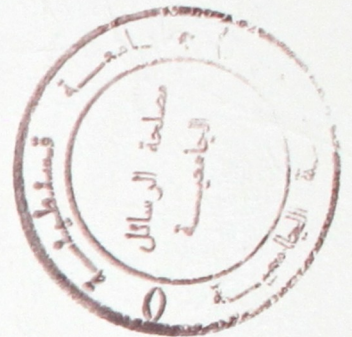


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE CONSTANTINE
INSTITUT D'ELECTRONIQUE



N° d'ordre :
Série :

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Magister
En Electronique

SEM
3186

OPTION
COMPOSANTS

Par
Lemia SEMRA

THEME

CONTRIBUTION A L'ETUDE
DES TANDEMS AlGaAs/Si DANS LES CELLULES
SOLAIRES

SOUTENU LE 15 Décembre 1998

Devant le jury:

<u>Président:</u>	Mme Cherifa KENZAI	Prof.	Univ. CONSTANTINE
<u>Rapporteur:</u>	Mr Mohamed REMRAM	Prof.	Univ. CONSTANTINE
<u>Examineurs:</u>	Mr Farid DJAHLI	M.C.	Univ. SETIF
	Mme Farida MANSOUR	M.C.	Univ. CONSTANTINE
	Mr Bader-Eddine MARIR	M.C.	Univ. CONSTANTINE

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE CONSTANTINE
INSTITUT D'ELECTRONIQUE

N° d'ordre :

Série :

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Magister
En Electronique

**OPTION
COMPOSANTS**

Par
Lemia SEMRA

THEME

**CONTRIBUTION A L'ETUDE
DES TANDEMS AlGaAs/Si DANS LES CELLULES
SOLAIRES**

SOUTENU LE 15 Décembre 1998

Devant le jury:

<u>Président:</u>	Mme Cherifa KENZAI	Prof.	Univ. CONSTANTINE
<u>Rapporteur:</u>	Mr Mohamed REMRAM	Prof.	Univ. CONSTANTINE
<u>Examineurs:</u>	Mr Farid DJAHLI	M.C.	Univ. SETIF
	Mme Farida MANSOUR	M.C.	Univ. CONSTANTINE
	Mr Bader-Eddine MARIR	M.C.	Univ. CONSTANTINE

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

(هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسُ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ
السِّنِينَ وَالْحِسَابِ، مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ، يُفَصِّلُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ
يَعْلَمُونَ)

سورة يونس - الآية ٥

(اللَّهُ الَّذِي رَفَعَ السَّمَاوَاتِ بِغَيْرِ عَمَدٍ تَرَوْنَهَا ثُمَّ أَسْتَوَىٰ عَلَى الْعَرْشِ وَ
سَخَّرَ الشَّمْسَ وَالْقَمَرَ كُلٌّ يَجْرِي لِأَجَلٍ مُّسَمًّى يُدَبِّرُ الْأُمْرَ يُفَصِّلُ الْآيَاتِ
لَعَلَّكُمْ بِلِقَاءِ رَبِّكُمْ تُوقِنُونَ)

سورة الرعد - الآية ٢

الإهداء

إلى روح أبي الطاهرة
إلى أمي رمز التضحية
إلى كل أخواتي و إخوتي
إلى كل من أعزّ عليه و كل من يعزّ علي
إلى كل من يقدرني و يقرّ عملي

لمياء

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Mr Mohamed REMRAM, Professeur à l'Institut d'Electronique, Université de Constantine, de m'avoir confié ce travail. Je le remercie pour son entière disponibilité, ses précieux conseils, sa tolérance et pour le matériel mis à ma disposition tout au long de ma recherche.

Je tiens à manifester ma gratitude à Mme Chérifa KENZAI, Professeur à l'Institut de Physiques, Université de Constantine, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury de thèse.

Je remercie, également et sincèrement, Mr Farid DJAHLI, Maître de conférences à l'Institut d'Electronique, Université de SETIF, Mme Farida MANSOUR et Mr Bader-Eddine MARIR, Maîtres de conférences à l'Institut d'Electronique, Université de Constantine, pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de le juger.

Je suis très reconnaissante à Mr Paul.A.Basore pour avoir pris en considération mon courrier et m'avoir envoyé une copie du PC1D version 3.4.

Je remercie Mr Djamel BENATIA enseignant à l'institut d'électronique Université de Batna pour son aide ainsi que Mr Salah SAHLI maître de conférences à l'institut d'électronique et Mr Mourad BOUGUENDOUL enseignant à l'institut de physique Université de Constantine pour la documentation mise à ma disposition.

Je ne saurais oublier mes collègues du laboratoire, Fella BOULGAMH, Fayçal AYAD, Mahmoud Riad BEGHOUL, Mohamed Chérif CHELLOUL pour leur soutien moral et l'ambiance amicale qu'ils ont créée.

Je voudrais également remercier mes collègues et amis Chafika AISSAOUI, Karima ALLIOUCHE, Fayçal AYAD, Mahmoud Riad BEGHOUL, Souad BENABDELKADER, Djamel BENATIA, Asma BENCHIHEB, Linda BENDJAMA, Amel BOUCHEMHA, Fella BOULGAMH, Samira DIB, Assia EUTAMENE, Samia HADJAR, Zoubeida HAFDI, Hakima LABANI, Ilhem MAARAD, Salama MEGHRICHE, Ramdane M'HAMMEDI pour leur amitié et leur permanent encouragement durant les moments difficiles.

Je remercie toute ma famille pour sa compréhension, sa tolérance, sa générosité, et toute l'aide qu'elle m'a procurée, tout spécialement ma première lectrice SAFIA pour ses remarques pertinentes

Enfin, je remercie toute personne m'ayant aidée ne serait ce que par un simple mot d'encouragement.

Résumé

Les dispositifs photovoltaïques à rendement élevé sont basés sur la technologie des semi-conducteurs Si et III-V. Les multiples recherches de simulation, théoriques ou expérimentales effectuées sur les cellules solaires ont, pour seul objectif, l'amélioration du rendement de conversion. Effectivement le rendement des cellules solaires est principalement limité par le fait que le domaine des énergies du spectre solaire est trop étendu pour que la conversion photovoltaïque puisse être effectuée convenablement par un seul matériau. Dans cette optique s'inscrit l'étude du comportement d'une cellule solaire de type P/N à base de silicium, et une autre à base de composé ternaire, AlGaAs. En effet, nous avons étudié l'influence des paramètres physiques des deux cellules et du processus technologique sur leurs rendements énergétiques à partir des caractéristiques (I-V), (P-V), ainsi que la réponse spectrale. Nous nous sommes, donc, intéressés à l'influence de la profondeur de jonction et du dopage, dans les deux régions émetteur et base. Nous avons analysé, par ailleurs, l'effet de la concentration en aluminium sur la conduite photovoltaïque de la cellule AlGaAs, et une comparaison entre les comportements des deux types de cellules a été réalisée. Cette analyse, dictée par les différences de propriétés intrinsèques de chaque cellule, nous a permis d'établir un modèle théorique à rendement élevé dans les spectres AM1.5G et AM0. Enfin, pour exploiter un spectre plus large, une structure monolithique tandem constitué des deux cellules optimisées a été examinée.

Mots clés: Cellule Solaire, Tandem, AlGaAs, Si, Rendement.

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre 1: Rayonnement et Absorption.....	5
1.1. INTRODUCTION.....	5
1.2. ASPECT ET STRUCTURE D'UNE CELLULE SOLAIRE CONVENTIONNELLE.....	6
1.3. SPECTRE SOLAIRE.....	8
1.4. ABSORPTION DE LA LUMIERE.....	10
1.5. EFFET PHOTOVOLTAIQUE.....	13
1.6. MECANISME DE RECOMBINAISON DES PORTEURS LIBRES.....	13
1.7. CONCLUSION.....	15
Chapitre 2: Matériaux et Technologies.....	16
2.1. INTRODUCTION.....	16
2.2. STRUCTURES TECHNOLOGIQUES.....	16
2.2.1. CELLULES A CHAMP ARRIERE "BSF".....	17
2.2.2. CELLULES A FORTE ABSORPTION "CNR".....	18
2.2.3. STRUCTURES NON CONVENTIONNELLES.....	19

2.2.3.1. CELLULES AMINCIÉES.....	19
2.2.3.2. CELLULES METAL-SEMICONDUCTEUR.....	19
2.2.3.3. MULTIJONCTIONS VERTICALES.....	20
2.2.3.4. CELLULES A CONTACT ARRIERE INTERDIGITE "IBC" ET JONCTION TANDEM "TJC".....	21
2.2.3.5. JONCTIONS EN CASCADE -CONVERSION MULTISPECTRALE.....	22
2.2.3.5.1. SYSTEME MULTISPECTRAL OU SYSTEME DICHROÏQUE.....	23
2.2.3.5.2. SYSTEME MONOLITHIQUE (TANDEM, CASCADE OU MULTICOLORE).....	24
2.2.4. CELLULES SOUS CONCENTRATION.....	26
2.3. CHOIX DE LA CELLULE ET DES MATERIAUX.....	27
2.4. QUELQUES PROPRIETES DES MATERIAUX.....	28
2.4.1. CELLULES AU SILICIUM ET A L'ARSENIURE DE GALLIUM.....	28
2.4.1.1. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES.....	28
2.4.1.2. QUELQUES PROPRIETES.....	30
2.4.1.3. METHODES D'ELABORATION.....	31
2.4.2. CELLULES AU COMPOSE TERNAIRE $Al_xGa_{1-x}As$	32
2.4.2.1. PARAMETRES CARACTERISTIQUES DU $Al_xGa_{1-x}As$	33
2.4.2.2. METHODES DE FABRICATION DU $Al_xGa_{1-x}As$	35
2.5. CONCLUSION.....	36
Chapitre 3: Caractéristiques Electriques de la Cellule Solaire.....	37
3.1. INTRODUCTION.....	37
3.2. COURANT D'ECLAIREMENT POUR UNE LUMIERE MONO- CHROMATIQUE DANS UNE HOMOJONCTION.....	38
3.2.1. COURANT DANS LA REGION QUASI-NEUTRE N.....	39
3.2.2. COURANT DANS LA REGION QUASI-NEUTRE P.....	41
3.2.3. COURANT DANS LA REGION DE CHARGE D'ESPACE.....	42
3.2.4. COURANT D'ECLAIREMENT TOTAL.....	42
3.3. HETEROJONCTIONS.....	43
3.3.1. PHOTOCOURANT.....	44
3.4. REPONSE SPECTRALE.....	46

3.5. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	49
3.5.1. COURANT D'OBSCURITE.....	49
3.5.1.1. COURANT D'INJECTION.....	50
3.5.1.2. COURANT DE RECOMBINAISON DANS LA ZONE DE DEPLETION.....	52
3.5.1.3. COURANT TUNNEL.....	53
3.5.1.4. COURANT D'OBSCURITE TOTAL.....	53
3.6. CIRCUIT EQUIVALENT.....	53
3.7. INFLUENCE DES PARAMETRES SUR LES CARACTERISTIQUES COURANT- TENSION.....	58
3.7.1. EFFETS DES RESISTANCES SERIE R_s ET SHUNT R_{sh}	58
3.7.2. EFFETS DU CHAMP ELECTRIQUE ARRIERE.....	59
3.8. LE RENDEMENT.....	60
3.9. EFFETS DES RADIATIONS, DE LA TEMPERATURE ET DE L'INTENSITE.....	61
3.9.1. EFFET DES RADIATIONS.....	61
3.9.2. EFFET DE LA TEMPERATURE ET DE L'INTENSITE.....	62
3.10. PERTES D'ENERGIE DANS LA CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE.....	63
3.11. CONCLUSION.....	65

Chapitre 4: Le Simulateur PC1D

4.1. INTRODUCTION.....	66
4.2. LA SIMULATION.....	67
4.3. DIFFERENTS TYPES DE SIMULATEURS.....	67
4.4. LE SIMULATEUR PC1D.....	68
4.4.1. INTRODUCTION.....	68
4.4.2. HISTORIQUE.....	68
4.4.3. METHODE NUMERIQUE.....	69
4.4.4. PERSPECTIVES.....	72
4.5. CONCLUSION.....	73

Chapitre 5: Résultats et Interprétations

5.1. INTRODUCTION.....	74
5.2. ETUDE DE LA CELLULE $Al_x Ga_{1-x}As$	76
5.2.1. INFLUENCE DES PARAMETRES DE LA BASE SUR LE COMPORTEMENT DE LA CELLULE.....	78
5.2.1.1. EFFET DU "BSF".....	82
5.2.2. INFLUENCE DES PARAMETRES DE L'EMETTEUR SUR LE COMPORTEMENT DE LA CELLULE.....	84
5.2.3. INFLUENCE DE LA CONCENTRATION D'ALUMINIUM SUR LE COMPORTEMENT DE LA CELLULE.....	88
5.3. ETUDE DE LA CELLULE Si.....	90
5.3.1. INFLUENCE DES PARAMETRES DE LA BASE SUR LE COMPORTEMENT DE LA CELLULE.....	90
5.3.2. INFLUENCE DES PARAMETRES DE L'EMETTEUR SUR LE COMPORTEMENT DE LA CELLULE.....	94
5.4. TANDEM $Al_{0.1}Ga_{0.9}As/Si$	97
5.5. CONCLUSION.....	100
Conclusion Générale	101
Références	103

Annexe

Résumés

Introduction

La cellule solaire est un dispositif photovoltaïque capable de convertir l'énergie solaire en énergie électrique (directement sans passer par une autre forme intermédiaire), pour la délivrer ensuite, avec efficacité, à une charge [1-5].

Bien que l'effet photovoltaïque était mis en évidence, au milieu du XIXe siècle, par Becquerel [4], ce n'est qu'en 1954, que la première cellule solaire, basée sur une jonction diffusée p-n au silicium, fut réalisée au laboratoire par D.M.Chapin, C.S.Fuller, et G.L.Pearson. A cette époque, on explorait déjà des voies concurrentes; la même année en effet, D.C.Raynolds et son équipe obtinrent une cellule solaire mais à partir du sulfure de cadmium [2, 4].

Ses plus importantes applications, dans le passé, étaient dans le programme spatiale. En effet, dès les premières années de l'ère spatiale, les cellules solaires s'imposèrent comme source d'alimentation électrique pour les différents satellites présents autour de la terre sur différentes orbites (dès 1958).

Concernant les applications terrestres, les grands projets n'ont pris corps que progressivement pour se développer après la crise d'énergie des années 70 [1,2,4], et les cellules solaires sembleraient être la source d'énergie dans un proche futur.

La conception optimale d'un composant dépend de son application. Entre les applications spatiales et terrestres, les contraintes s'avèrent trop différentes.

En ce qui concerne les applications spatiales où la masse est un facteur important, un optimum devra être donc trouvé entre le rendement de conversion (rapport de la puissance de sortie délivrée sur la puissance incidente) de la photopile et sa géométrie. Pour cela des cellules N/P au silicium avec un gradient de champ électrique à l'arrière "BSF"(de l'anglais: Back Surface Field) ou des cellules P/N dopées au lithium sont d'usage à cause des tolérances élevées aux radiations. Pour des missions proches du soleil, les cellules au GaAs avec des couches $Al_xGa_{1-x}As$ ont le potentiel le plus élevé grâce à leurs excellentes propriétés aux températures élevées, et à leur bonne tolérance aux radiations. Pour les applications terrestres, sont utilisées les cellules CdS, les cellules fabriquées à partir de ruban au silicium, ou des films minces au silicium ou à l'arséniure de gallium [1].

Actuellement, plusieurs autres semi-conducteurs sont employés par différentes structures et diverses configurations.

Effectivement, une grande variété de composés peut servir de matériaux de base à la cellule solaire, et fait l'objet de plusieurs recherches dont: le silicium monocristallin [1,3-25], polycristallin [1,2,4,5,26-34], et même amorphe (a-Si) [2,4,5,35,36], le sulfure de cadmium (CdS) et le tellure de cadmium (CdTe) [1,2,4,5,37-40], l'arséniure de gallium (GaAs) [1,2,4,5,12,13,39,41-50], le phosphore d'indium (InP) [5,39,51-56], ainsi que les composés ternaires et quaternaires [1-5,20,38-40,47,48,50,57-60] tels: AlGaAs, GaInP, CuInSe₂, InGaAsP, ...etc.

Parallèlement à l'amélioration des propriétés cristallines du semi-conducteur, la technologie du composant progresse: le contact avant en forme de grille apparaît six ans après la première cellule [4] et l'évolution de sa géométrie exige de nouveaux procédés de photogravures du type Lift-Off [44,60,61]. Les évolutions les plus importantes marquent les débuts des années 70 avec la cellule violette puis la pile noire [1,4,31]. La cellule conventionnelle commençait, alors, à changer de configuration, en partant de la cellule à champ arrière (Back Surface Field) BSF [1,2,4,14] qui offrait une plus grande tension de sortie. En 1974, la cellule CNR (Comsat Non Reflective) fut mise au point dans les laboratoires de la C.O.M.S.A.T, elle présente une surface sous forme de pyramides (textured surface) [1,2,4], et est caractérisée par la diminution des pertes

par réflexion.

D'autres configurations apparaissent après. Les multiples recherches de simulation, théoriques ou expérimentales effectuées sur les cellules solaires ont pour seul objectif: l'amélioration du rendement de conversion. Effectivement, le rendement des cellules solaires est principalement limité par le fait que le domaine des énergies du spectre solaire est trop étendu pour que la conversion photovoltaïque puisse être effectuée convenablement par un seul matériau [3]. Plusieurs systèmes, à rendements plus élevés, ont été envisagés pour permettre une conversion du spectre, continue et plus large, diminuant ainsi les pertes par excès d'énergie et par non absorption des photons. Tels que les systèmes utilisant des miroirs dichroïques et les systèmes monolithiques constitués de cellules à différentes énergies de bande interdite "gap", empilées les unes sur les autres [3,4,47,48,50,57-60]. Ceux avec plus de deux jonctions ont attiré l'attention par des rendements plus élevés: plus de 30 % [57-59], 32 % [47,50].

Le système III-V/Si est l'un des systèmes de matériaux les plus adéquats pour réaliser des cellules à rendements élevés en utilisant l'avantage qu'a le silicium: grande surface, bas prix, et force mécanique. Parmi plusieurs composés III-V, AlGaAs/Si est l'un des candidats à offrir un rendement supérieur à 30 % du point de vue "gap" [47,50,57-59]. Dans cette optique s'inscrit l'étude du comportement d'une cellule solaire de type P/N, à base de silicium et une autre à base de composé ternaire, AlGaAs. En effet, nous avons étudié l'influence des paramètres physiques des deux cellules et du processus technologique sur leurs rendements énergétiques à partir des caractéristiques (I-V), (P-V), ainsi que la réponse spectrale. Nous nous sommes, donc, intéressés à l'influence de la profondeur de jonction et du dopage, dans les deux régions émetteur et base. Nous avons analysé, par ailleurs, l'effet de la concentration en aluminium sur la conduite photovoltaïque de la cellule AlGaAs, et une comparaison entre les comportements des deux types de cellules a été réalisée. Cette analyse, dictée par les différences de propriétés intrinsèques de chaque cellule, nous a permis d'établir un modèle théorique à rendement élevé dans les spectres AM1.5G et AM0. Enfin, pour exploiter un spectre plus large, une structure monolithique tandem constituée des deux cellules optimisées a été examinée.

Dans cette thèse, nous présentons par conséquent dans le premier chapitre, le rayonnement solaire et la théorie de la conversion photovoltaïque. Nous aborderons, ensuite dans le second chapitre, les plus importantes configurations et les matériaux utilisés et nous rappellerons, après, les principales techniques de leurs croissances, ainsi que les procédés de fabrication les plus courants. Au troisième chapitre seront décrites les équations de base qui décrivent les différents phénomènes ayant lieu dans une cellule solaire. Notre modèle étudié est analysé à l'aide d'un simulateur. Celui-ci sera exposé au quatrième chapitre donnant une brève notion sur la simulation et les différents simulateurs. Enfin, nous rapporterons au dernier chapitre les résultats de notre travail.

Chapitre 1

Rayonnement et Absorption

1.1. INTRODUCTION

La cellule solaire est un dispositif photovoltaïque capable de convertir l'énergie solaire en énergie électrique (directement sans passer par une autre forme intermédiaire), pour la délivrer ensuite, avec efficacité, à une charge [1-5].

Son apparition, pour la première fois, fut en 1954, suite aux travaux de D.M.Chapin, C.S.Fuller, et G.L.Pearson basés sur une jonction diffusée p-n au silicium. Il vint, ensuite, la cellule au sulfure de cadmium développée par D.C.Raynolds et son équipe. Actuellement, plusieurs autres semi-conducteurs sont employés dans différentes structures et diverses configurations (monocristallines, polycristallines, ou amorphes) [2,4].

Elle peut être utilisée dans des applications terrestres ou spatiales. Ces dernières étaient pour longtemps les plus importantes, grâce à des satellites employant des composants au silicium. Ces satellites ont été exploités dans le domaine de la météorologie, de communication et dans différentes applications scientifiques et militaires [1]. La cellule solaire trouve aussi son intérêt dans des usages terrestres tels que l'éclairage des routes désertiques, la production d'énergie domestiques, ...etc., à partir des générateurs solaires [4].

1.2. ASPECT ET STRUCTURE D'UNE CELLULE SOLAIRE CONVENTIONNELLE

La cellule solaire conventionnelle consiste en une jonction P/N ou N/P, un contact ohmique à la face avant ou grille (barre omnibus + doigts) ayant une forme telle pour permettre à une quantité maximale de lumière d'atteindre le semi-conducteur, un contact ohmique couvrant toute la surface arrière du substrat, une couche antireflet pour réduire la réflexion de la lumière par la surface avant et, enfin, une couche de protection, collée par un adhésif, pour éviter la dégradation de la cellule due aux particules très énergétiques.

La région frontale de la jonction (diffusion ou dépôt), fortement dopée, est appelée EMETTEUR. L'autre côté de la jonction représentant le reste du substrat hormis la région de déplétion est appelé BASE [1].

L'aspect et la structure d'une cellule solaire sont représentés, avec les dimensions, en figures 1.1 et 1.2 respectivement. Le diagramme des bandes d'énergie, sous éclairage, est illustré par la figure 1.3.

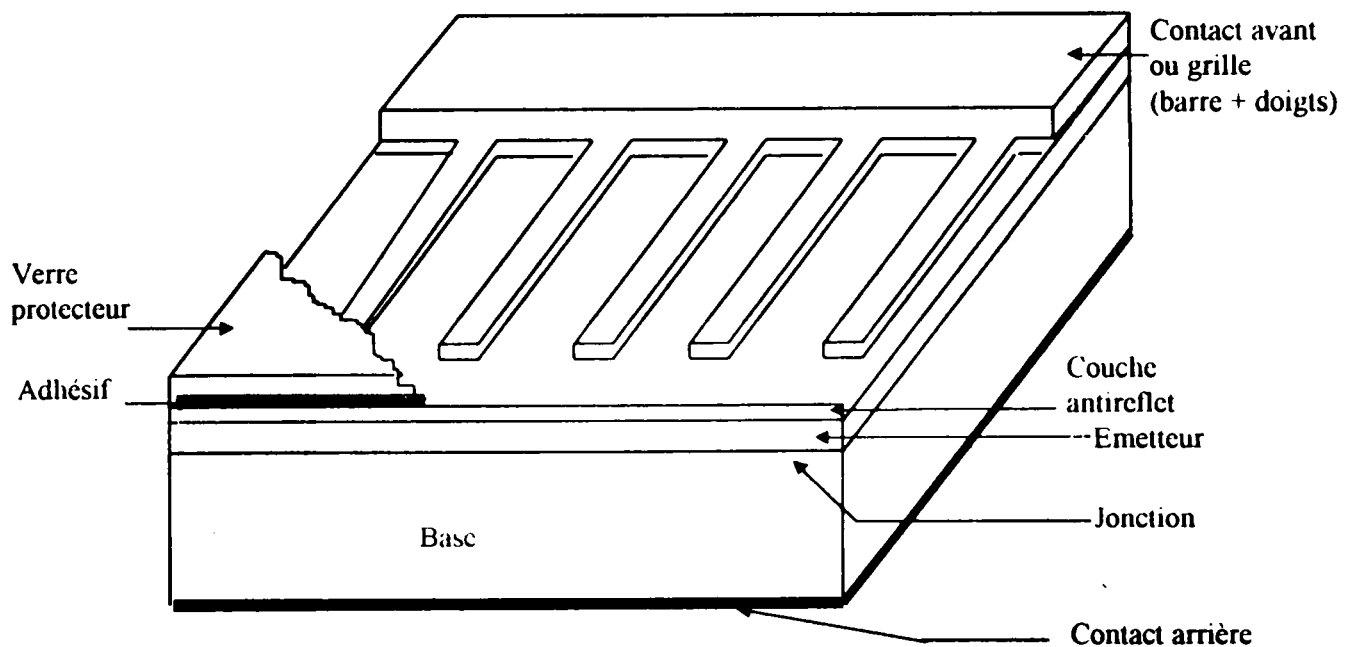


Figure 1.1. Configuration de base d'une cellule solaire [1].

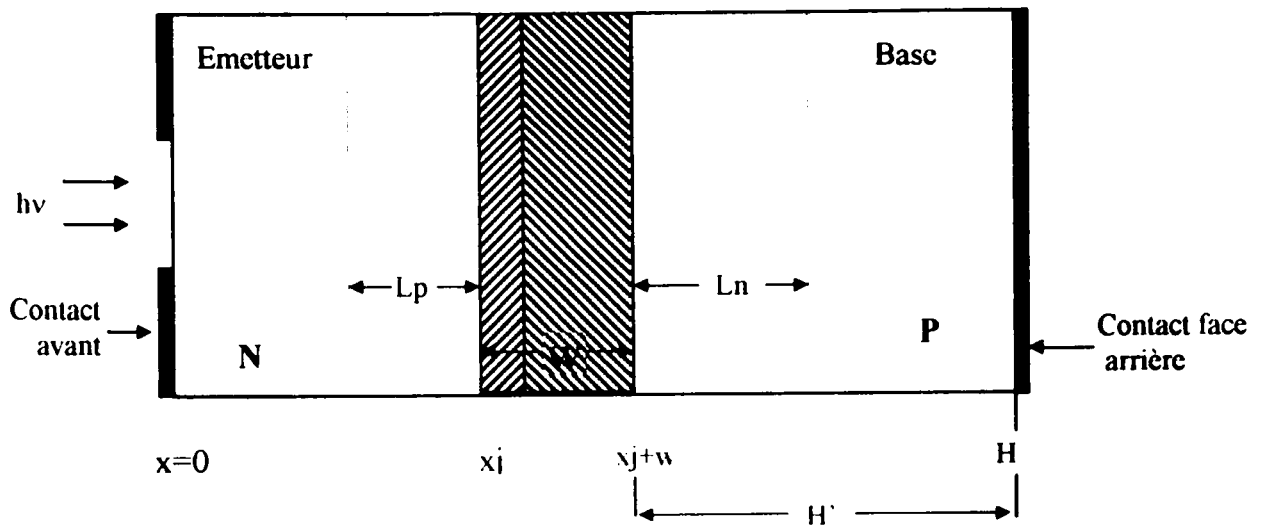


Figure 1.2. Structure générale d'une cellule solaire N/P: dimensions et longueurs de diffusion des porteurs minoritaires [2].

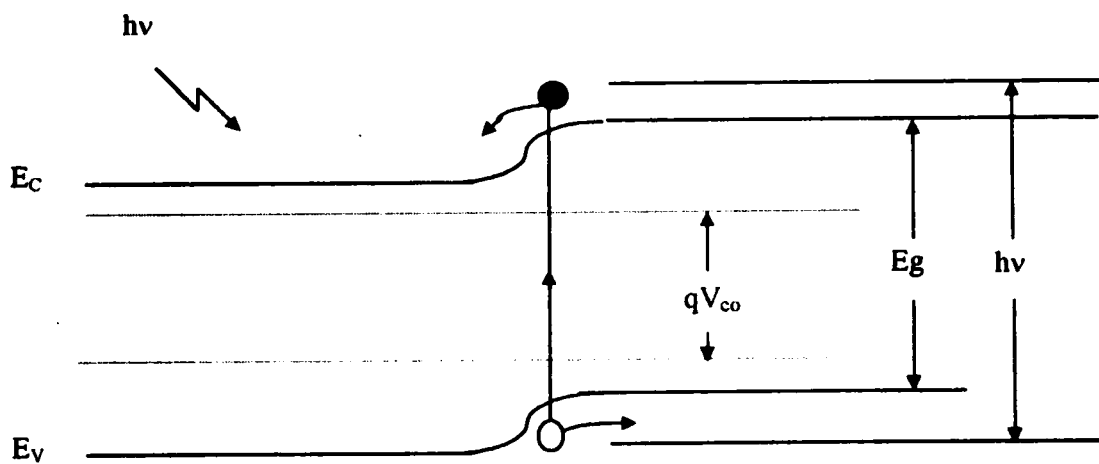


Figure 1.3. Diagramme des bandes d'énergie d'une cellule solaire à jonction p-n sous éclairage [2].

Plusieurs phénomènes ont lieu dans une cellule solaire. Par conséquent, avant d'entamer les équations de base qui les décrivent, il serait plus intéressant de définir, au préalable, le phénomène d'absorption et l'effet photovoltaïque.

1.3. SPECTRE SOLAIRE

Le rayonnement solaire est réparti en spectre s'étendant de la longueur d'onde 0.3 micron (ultraviolet) à la longueur d'onde 5 microns (infrarouge) (0.2 - 3 microns [2], 0.3 - 4 microns [4]), avec un maximum pour 0.47 micron dans le spectre visible [62].

Le rayonnement émis par le soleil arrive à la terre avec une intensité de 1353 W/m^2 au-dessus de l'atmosphère terrestre. Cette intensité représente la valeur de la constante solaire. A la traversée de l'atmosphère une partie du rayonnement est absorbée (l'infrarouge par la vapeur d'eau et le CO_2 , et l'ultraviolet par l'ozone), une partie est dispersée par les molécules de l'atmosphère (par les particules en suspension dans l'atmosphère ou aérosols) et engendre le rayonnement diffus; enfin, le reste du rayonnement solaire parvient directement à la surface de la terre: c'est le rayonnement direct [1,2,4,62,63] (figure 1.4). La modification du passage du rayonnement solaire à travers l'atmosphère est désignée par le terme masse d'air "Air Mass (AM)" ou trajet optique.

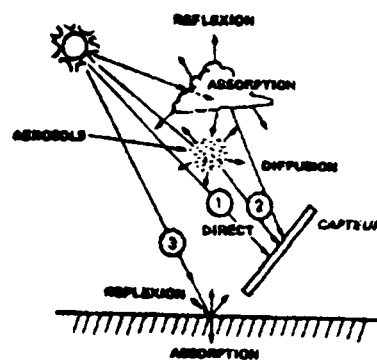


Figure 1.4. Les trois composantes du rayonnement incident sur le capteur [4].

L'Air Mass est défini pour plusieurs conditions de réception comme suit:

- Spectre au-dessus de l'atmosphère terrestre condition 'Air Mass zéro' AM0 de puissance incidente 1353 W/m^2 .
- Spectre AM1 représente un rayonnement solaire perpendiculaire à la surface de la terre (soleil au zénith), de puissance incidente d'environ 925 W/m^2 .
- Spectre AM2 représente un rayonnement solaire faisant un angle de 60° avec l'horizon de puissance incidente d'environ 691 W/m^2 [1,2,63,64].

Ces spectres sont représentés en figure I.5.

En outre, le spectre AM1.5 est défini pour représenter le rayonnement faisant un angle de 45° avec l'horizon et de puissance 844 W/m^2 environ [2,63]. Et suivant que le rayonnement est direct ou global (ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient à la surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend, donc, la composante verticale du rayonnement solaire diffus [62]), deux autres spectres sont définis respectivement: AM1.5D et AM1.5G. Le spectre AM1.5G correspond au rayonnement incident sur la surface quand le soleil fait un angle de 48° [64].

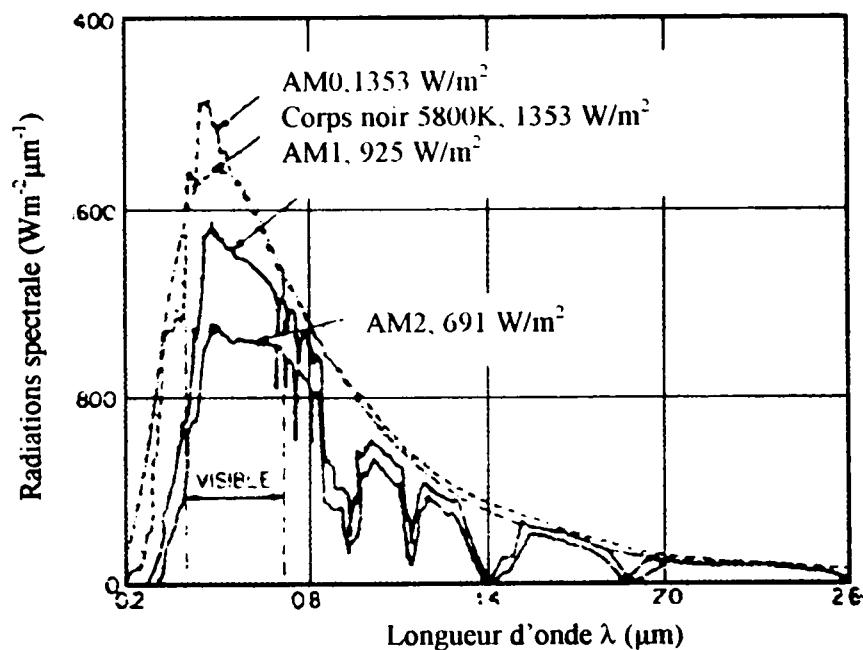


Figure I.5. Spectre du rayonnement solaire pour différentes conditions de réception [2].

Le spectre AM0 est le spectre approprié pour les applications spatiales tandis que le spectre AM1.5 est le mieux adapté pour les applications terrestres. La figure 1.6 représente le spectre solaire en fonction de l'énergie pour les conditions AM0 et AM1.5.

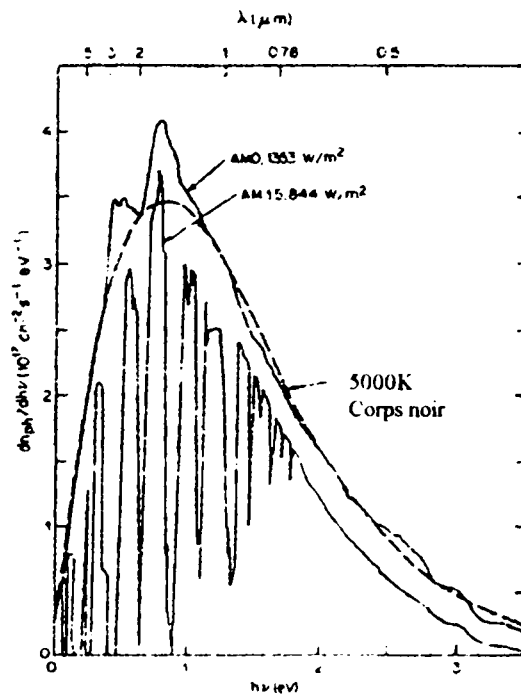


Figure 1.6. Spectre solaire en fonction de l'énergie des photons pour les conditions AM0 et AM1.5 [2].

1.4. ABSORPTION DE LA LUMIERE

Lorsqu'une lumière atteint un semi-conducteur, il se trouve qu'elle est partiellement transmise. Le degré d'absorption qui se produit dépend de la fréquence de la lumière et du matériau semi-conducteur. Le phénomène d'absorption ne se produit que si l'on atteint le "gap" optique. Celui-ci représente la plus faible énergie de photon supérieure à la largeur de la bande interdite E_g , permettant ainsi l'absorption d'un photon, et delà la formation d'une paire électron-trou [1,2,4,65-67].

Les photons de faibles fréquences ou de faibles énergies (grandes longueurs d'onde), $h\nu < E_g$,

passent à travers le semi-conducteur, n'apportant alors aucune contribution à la conversion d'énergie aux bornes de sortie de la cellule (en négligeant l'absorption des phonons 'assistés'). Le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle. Si, par contre, leurs fréquences ou énergies augmentent (courtes longueurs d'onde) au point où $h\nu \geq E_g$, l'absorption augmente, c.-à-d., la transmission diminue et le solide devient opaque. Un excès d'énergie au-dessus de E_g n'augmente pas l'absorption au-dessus de son seuil. Cet excès est perdu en chaleur [2,4,66,68], (figure 1.7). Le phénomène décrit est appelé mode d'absorption intrinsèque ou fondamentale, il prédomine dans les cellules solaires [4].

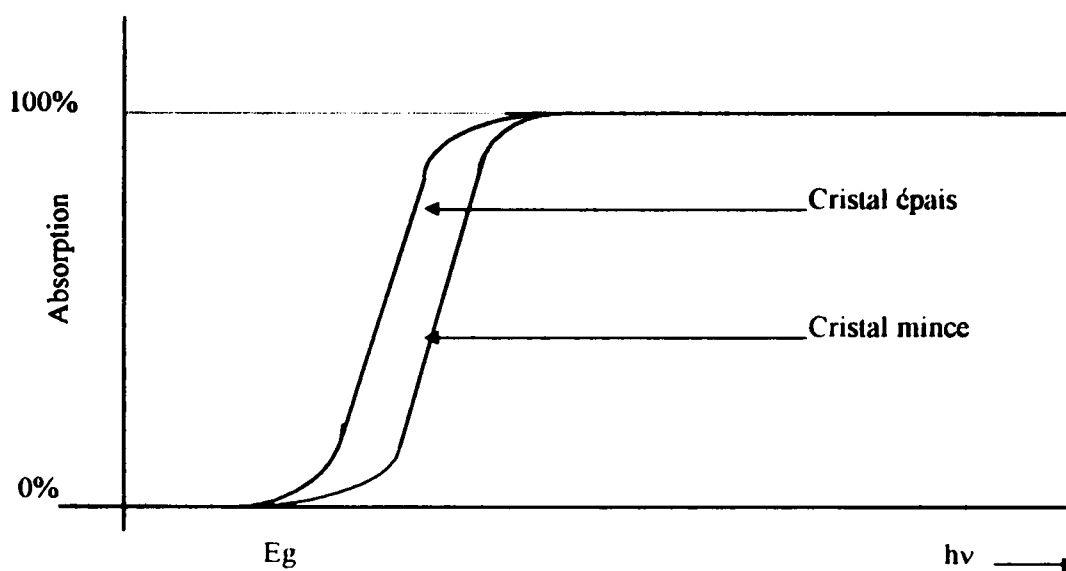


Figure 1.7. Seuil d'absorption qualitative pour un semi-conducteur [66].

D'autres types d'absorption optique interviennent encore dans le cristal : par les atomes d'impuretés (absorption extrinsèque), par les porteurs libres, le réseau, la formation d'une paire électron-trou liés appelée exciton... Il résulte de cette énumération de processus complexes, intervenant sous certaines conditions du milieu ambiant, que le spectre d'absorption du semi-conducteur varie avec la température ou avec d'autres facteurs tels que les champs électrique et magnétique, et la pression [4].

La relation liant l'énergie et la longueur d'onde est donnée par [2]:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{1.24}{h\nu \text{ (eV)}} \mu\text{m} \quad (1.1)$$

La capacité d'un matériau à absorber la lumière est mesurée quantitativement par le coefficient d'absorption α [1/cm], donné par [2]:

$$\alpha \equiv \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (1.2)$$

k : constante d'absorption.

Pour chaque distance $1/\alpha$ dans le matériau, la lumière incidente à la surface diminue en intensité, suivant une loi exponentielle donnée par la relation (1.3) [1,67,68]. Le flux ϕ transmis décroît, donc, avec l'épaisseur x traversée.

$$\phi(x) = \phi(0) \exp(-\alpha x), \quad [\text{photons.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}] \quad (1.3)$$

ϕ : le flux de photons à la profondeur x de la surface.

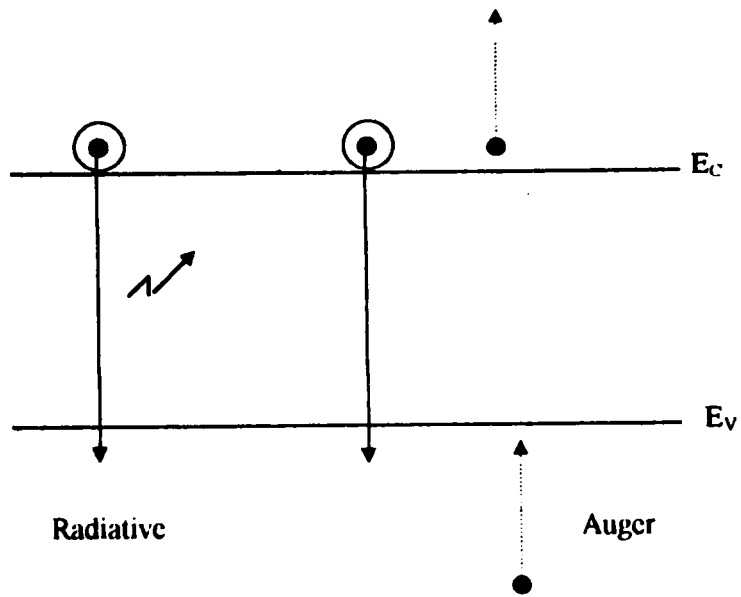
Et le taux d'absorption des photons dans le semi-conducteur exprimé par [4]:

$$\beta = \frac{-\partial\phi(x,\lambda)}{\partial x} = \alpha\phi(x,\lambda), \quad [\text{photons.cm}^{-3}.\text{s}^{-1}] \quad (1.4)$$

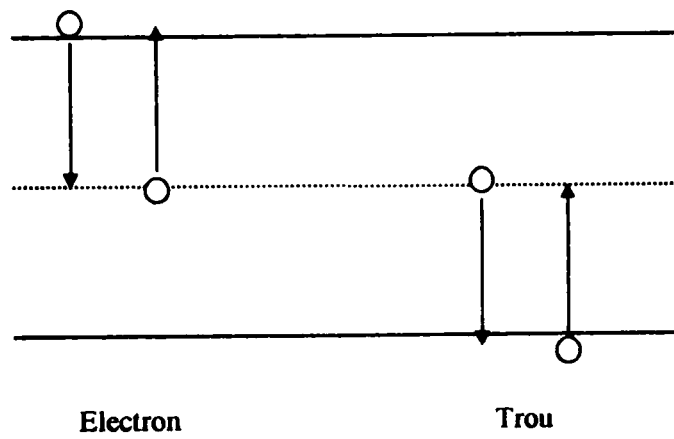
Pour une lumière monochromatique de longueur d'onde λ donnée, le taux de génération de paires électron-trou $G(x, \lambda)$, en fonction de la distance x , à partir de la surface éclairée, est donné par [1,2]:

$$G(x,\lambda) = \alpha(\lambda) F(\lambda) [1 - R(\lambda)] \exp(-\alpha(\lambda)x), \quad [\text{porteurs libres.cm}^{-3}.\text{s}^{-1}] \quad (1.5)$$

où $\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption, $F(\lambda)$ le nombre de photons incidents par unité de surface par unité de temps et par unité de bande passante $d\lambda$, $R(\lambda)$ le coefficient de réflexion à partir de la surface.



(a) Recombinaison bande à bande.



(b) Recombinaison indirecte.

Figure 1.8. Mécanismes de recombinaison [4].

3- La recombinaison indirecte

C'est le mécanisme le plus probable à température ambiante dans les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés pour les cellules solaires: le silicium et l'arséniure de gallium. La recombinaison s'effectue en deux étapes par l'intermédiaire d'un centre de recombinaison, situé à un niveau profond.

L'électron libre capturé par le centre peut être réémis vers la bande de conduction. Un processus identique se produit pour un trou capturé. Au total un électron et un trou libres disparaissent. Une paire électron-trou s'est recombinaisonnée.

Un niveau piège se situe près des bandes de conduction et de valence. Il peut avoir aussi une section efficace de capture différente pour ces deux types de porteurs libres. Il se distingue nettement du centre de recombinaison qui, après avoir capturé un électron, a une probabilité plus grande de capturer un trou que de réémettre cet électron [4]

1.7. CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons présenté les différents phénomènes qui ont lieu dans une cellule solaire. Il en résulte que la lumière incidente y génère des courants. La collecte de ces courants se révèle plus ou moins efficace suivant la structure technologique et les caractéristiques physiques du semi-conducteur. De plus, une conception optimale du composant dépend de l'application à laquelle il est destiné. Un aperçu sur les différents matériaux utilisés et les diverses configurations d'une cellule sera, par conséquent, impératif et de rigueur. Il sera donc le contenu du second chapitre.

2.1. INTRODUCTION

Le comportement d'une cellule solaire est fortement influencé. La puissance électrique que délivre la cellule photovoltaïque dépend du flux et de la répartition spectrale du rayonnement solaire. La collecte des courants se révèle plus ou moins efficace selon la structure technologique et les caractéristiques physiques du semi-conducteur [4]. La conception optimale d'un composant dépend de son application.

En pratique, le choix du matériau repose sur de nombreux critères, tels que son procédé de fabrication, sa pureté, l'état des matériaux de base, Actuellement, plusieurs autres semi-conducteurs sont employés par différentes structures et diverses configurations.

2.2. STRUCTURES TECHNOLOGIQUES

Parallèlement à l'amélioration des propriétés cristallines du semi-conducteur, la technologie du composant progresse: le contact avant en forme de grille apparaît six ans après la première cellule [4], et l'évolution de sa géométrie exige de nouveaux procédés de photogravures du type Lift-Off [44,60,61]. Les évolutions les plus importantes marquent les débuts des années

70 avec la cellule violette puis la pile noire [1,4,31]. La cellule conventionnelle commençait, alors, à changer de configuration, en partant de la cellule à champ arrière (Back Surface Field) "BSF" [1,2,4,14].

On ne se limite plus à la simple jonction PN, bien d'autres configurations sont conçues. Nous ne citerons que les plus intéressantes.

2.2.1. CELLULES A CHAMP ARRIERE "BSF"

L'apparition de la cellule à champ arrière, encore appelée cellule "BSF" (de l'anglais Back Surface Field) et qui offrait une plus grande tension de sortie, fut au début des années 70 [14]. La cellule "BSF" est équivalente à une cellule normale de largeur $(x_j + w_p + w_p')$ et de très faible vitesse de recombinaison à l'arrière ($S_n < 100$ cm/s)

Sa surface avant est conçue de la même façon que pour une cellule conventionnelle, mais la face arrière, au lieu de contenir seulement un contact ohmique, possède une région adjacente au contact très dopée (figure 2.1). On élabore, ainsi, un champ électrique interne par gradient de dopage. La barrière de potentiel $q\phi_p$ existant alors entre les deux régions de base tend à confiner les porteurs minoritaires dans la région la moins dopée [1,2,4].

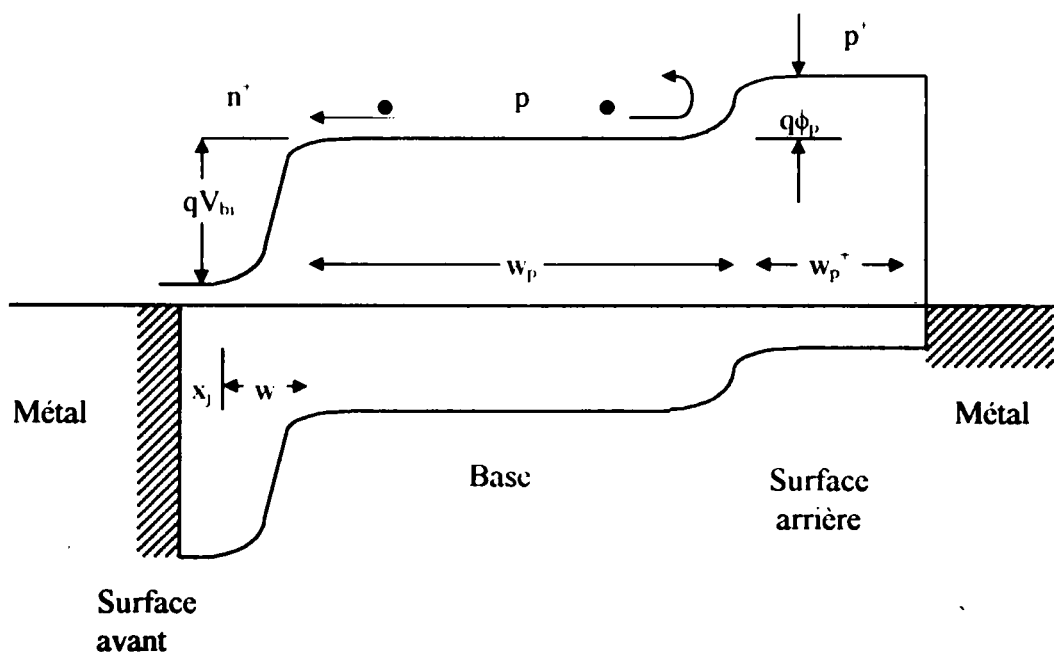


Figure 2.1. Diagramme des bandes d'énergie d'une cellule solaire "BSF" n⁺-p-p⁺ [2].

Multiples améliorations dans les cellules "BSF" au silicium dans les années 80 ont élevé leurs rendements à 20 - 24 % [14].

2.2.2. CELLULES A FORTE ABSORPTION "CNR"

En 1974, cette cellule "CNR" (Comsat Non Reflective) fut mise au point dans les laboratoires de la C.O.M.S.A.T, elle présente une surface sous forme de pyramides (textured surface) [1,2,4], et est caractérisée par la diminution des pertes par réflexion (figure 2.2).

Les minuscules pyramides, de 1 à 15 μm , recouvrant uniformément une surface, piègent les radiations incidentes. Ceux-ci subissent deux réflexions avant d'être totalement réfléchis; les pertes par réflexion diminuent, ainsi, proportionnellement au carré des pertes normales. Si, par exemple, la perte sur une surface polie par réflexion s'évalue à 30% pour le silicium, elle passera à $(0.3)^2$, soit 9%. Si l'on rapporte une couche antireflet sur une telle surface, on diminue encore les pertes: $(0.1)^2$, soit 1%, et, en théorie, la quasi-totalité de la lumière disponible pénètre dans le semi-conducteur. Vue de face, la cellule solaire apparaît de couleur noire, aussi l'a-t-on nommée pile noire [4].

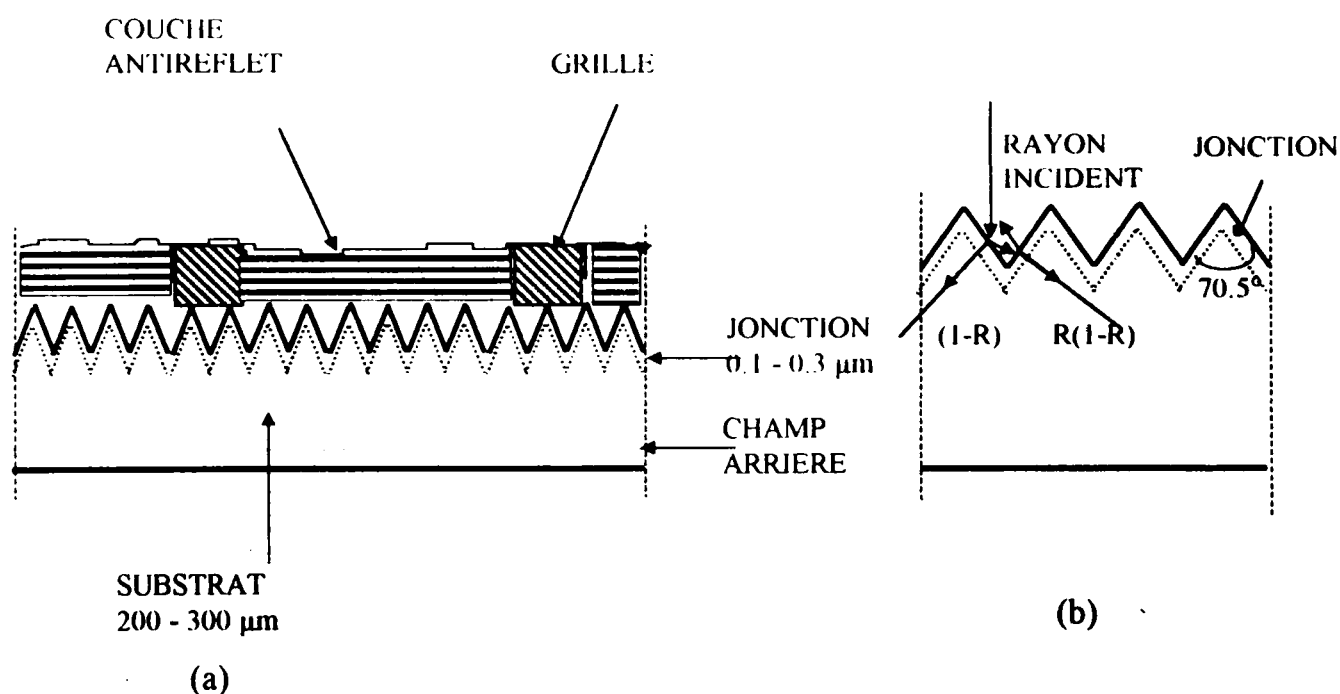


Figure 2.2. Cellule solaire à forte absorption [4].

(a) structure. (b) sa surface.

2.2.3. STRUCTURES NON CONVENTIONNELLES

Les multiples recherches de simulation, théoriques ou expérimentales effectuées sur les cellules solaires ont, pour seul objectif, l'amélioration du rendement de conversion. Effectivement, le rendement des cellules solaires est principalement limité par le fait que le domaine des énergies du spectre solaire est trop étendu pour que la conversion photovoltaïque puisse être effectuée convenablement par un seul matériau [3]. Ainsi, d'autres configurations apparaissent après la cellule conventionnelle.

2.2.3.1. CELLULES AMINCIÉES

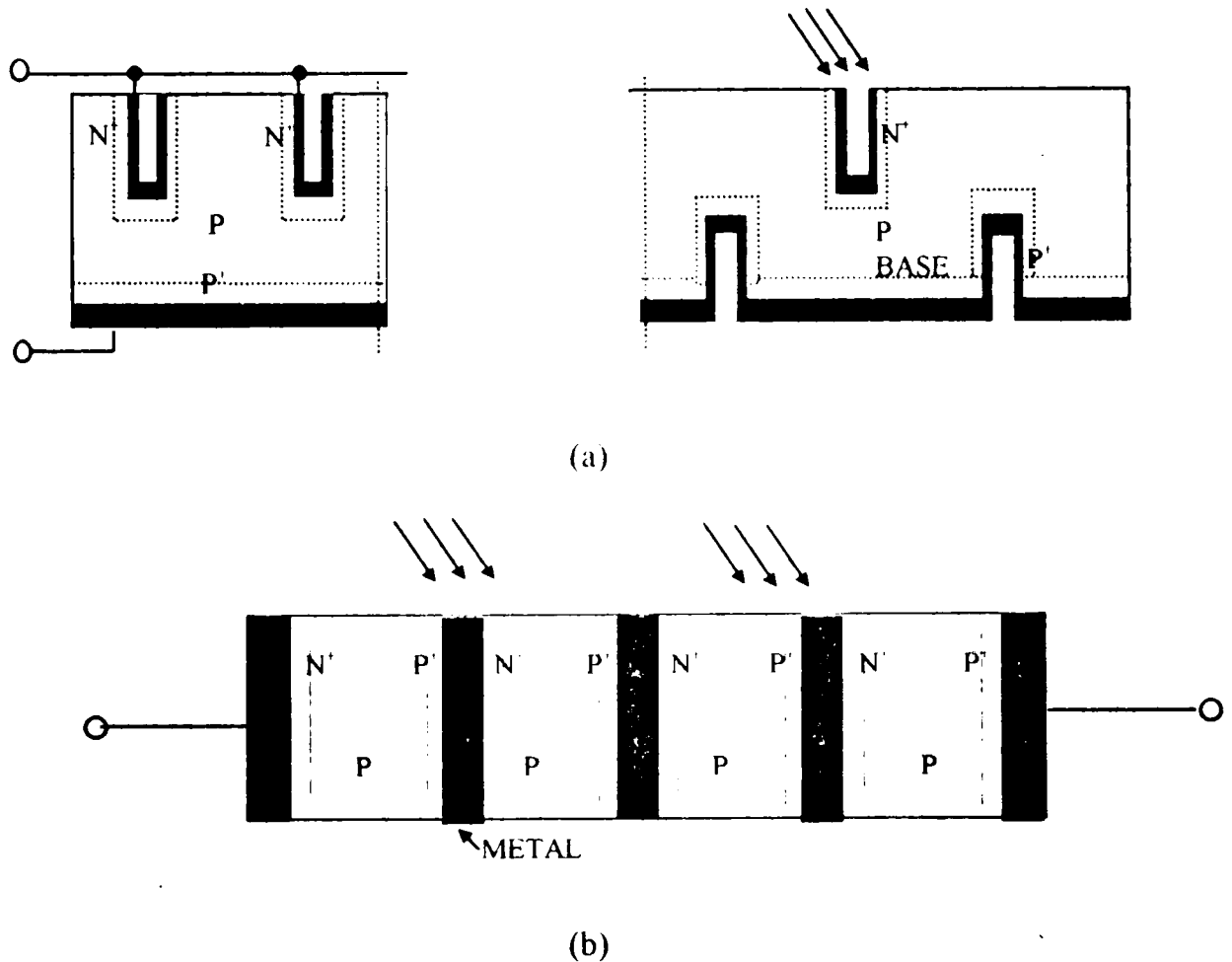
Pour diminuer la masse des cellules, orientées pour les applications spatiales, il suffit de les amincir. L'épaisseur actuelle de 200 μm peut être réduite à 100 μm voire 50 μm . Le rendement de conversion diminue alors car tout se passe comme si la longueur de diffusion était réduite dans les mêmes proportions. Mais le champ arrière restitue les performances de la cellule épaisse. L'inconvénient majeur apparaît avec les grandes longueurs d'onde du rayonnement lumineux qui, une fois absorbées par le contact arrière, échauffent la cellule solaire. On réalise alors un contact arrière réfléchissant [4].

2.2.3.2. CELLULES METAL-SEMICONDUCTEUR

Le procédé de fabrication se simplifie avec une jonction métal-semiconducteur ou barrière de Schottky, puisqu'on supprime la diffusion de la jonction dans le semi-conducteur. Le principal avantage de ces cellules est leur réponse aux courtes longueurs d'onde, ainsi des courants de court-circuit élevés peuvent être obtenus; des couches antireflet sont ajoutées pour minimiser la réflexion normale élevée de la surface du métal. Les courants d'obscurité sont plus élevés que ceux d'une jonction p-n avec un même dopage, ce qui conduit à des rendements et des tensions de circuit ouvert plus faibles. Ceci est guéri par la présence d'une mince couche interfaciale d'oxyde (structure MIS: Métal Isolant Semi-conducteur) [1,2,4].

2.2.3.3. MULTIJONCTIONS VERTICALES

Dans la cellule conventionnelle, la lumière incidente a une direction perpendiculaire à la jonction, dans la cellule à multijonctions verticales "VMJ" (de l'anglais Vertical Multijunction) elle lui est parallèle (figure 2.3). Il en résulte que la profondeur à laquelle se produit la génération des paires électron-trou importe moins. La collecte de ces charges peut être uniforme dans tout le spectre solaire, si seulement l'épaisseur de la zone de base reste inférieure à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires. Ces cellules offrent une légère amélioration du rendement, une meilleure tolérance aux radiations et une potentialité de travail aux intensités élevées, comparativement à la cellule conventionnelle. Néanmoins, la vitesse de recombinaison en surface doit demeurer faible. Il s'agit là d'un inconvénient de cette structure[1,2,4].

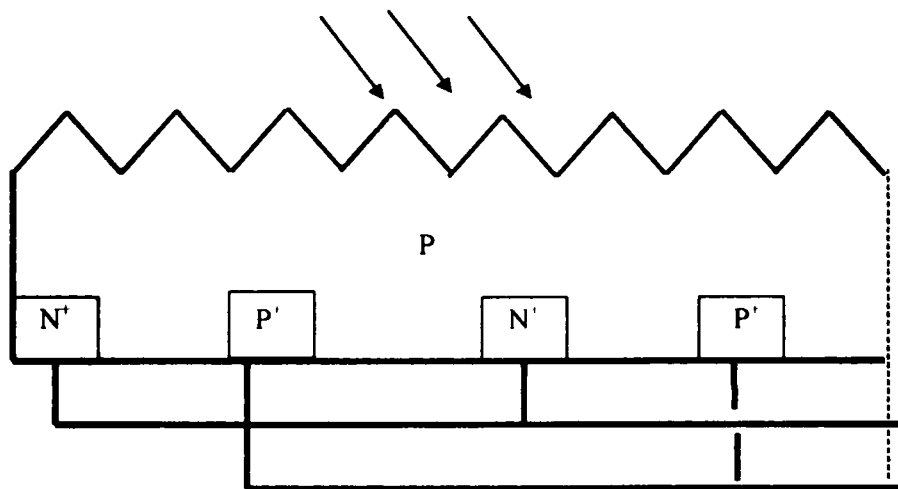


**Figure 2.3. Multijonction verticale
(a) montage parallèle. (b) montage série[4].**

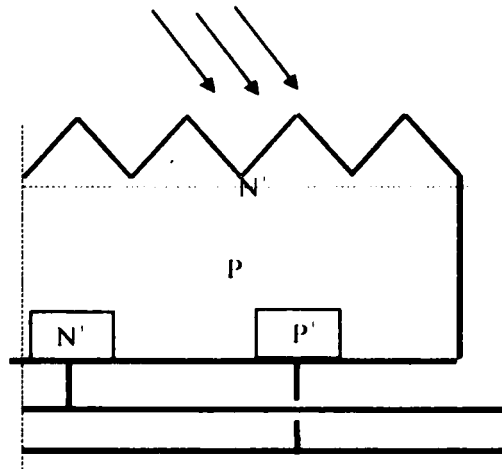
2.2.3.4. CELLULES A CONTACT ARRIERE INTERDIGITE "IBC" ET JONCTION TANDEM "TJC"

Dans ces deux structures, "IBC" (Interdigitated Back Contact Cell) "TJC" (Tandem Junction Cell), la prise de contact et la jonction sont reportées sur la face arrière de la cellule. Avec la "IBC" on retrouve à peu près tous les avantages de ces jonctions verticales: taux d'ombre nul, résistance série de faible valeur et peu d'effet lors de l'illumination non uniforme. Par contre, la face éclairée doit rester une zone à faible recombinaison. En outre, le volume doit constituer d'un semi-conducteur présentant une très bonne propriété de transport car les porteurs générés en surface doivent traverser toute cette zone de charge d'espace de la jonction (figure 2.4.a).

Dans la jonction tandem, la surface éclairée comporte une jonction réalisée sur une très faible épaisseur qui n'est en général pas reliée. La structure de cette cellule s'apparente à celle d'un transistor, la face avant N' étant l'émetteur, le volume P la base, et la région arrière N' le collecteur. Sous éclairage, la jonction en surface se polarise en direct. Les porteurs minoritaires générés dans cette région sont injectés dans le volume de la cellule puis collectés en zone arrière comme pour une cellule "IBC" (figure 2.4.b) [1,2,4].



(a) Cellule "IBC".



(b) jonction tandem "TJC".

Figure 2.4. Structures de base [4].

2.2.3.5. JONCTIONS EN CASCADE -CONVERSION MULTISPECTRALE

Le rendement des cellules solaires est principalement limité par le fait que le domaine des énergies du spectre solaire est trop étendu pour que la conversion photovoltaïque puisse être effectuée convenablement par un seul matériau [3]. Plusieurs systèmes, à rendements plus élevés, ont été envisagés pour permettre une conversion du spectre, continue et plus large, diminuant ainsi les pertes par excès d'énergie et par non-absorption des photons, tels que les systèmes utilisant des miroirs dichroïques (ou systèmes multispectraux) et les systèmes monolithiques constitués de cellules à différentes énergies de bande interdite "gap", [2-4,47,48,50,57-60]. Chaque cellule est adaptée à la tranche d'énergie qu'elle reçoit. Elles sont empilées dans l'ordre décroissant de bandes interdites. La cellule du haut absorbe les photons ultraviolets et visibles, alors que le reste des photons ($h\nu < E_{g1}$ de la cellule du haut) est absorbé par les cellules de bandes interdites plus faibles successivement [2-4,47,60]. Ceux avec plus de deux jonctions ont attiré l'attention par des rendements plus élevés: plus de 30 % [57-59], 32 % [47,50]. Deux types de ces systèmes sont généralement envisagés:

2.2.3.5.1. SYSTEME MULTISPECTRAL OU SYSTEME DICHROÏQUE

Les cellules sont indépendantes les unes des autres et sensibles dans une bande spectrale. Des miroirs sélectifs (miroirs dichroïques, ou filtres dichroïques) dirigent le rayonnement lumineux par bande spectrale, vers celles-ci (figure 2.5) [2-4,60].

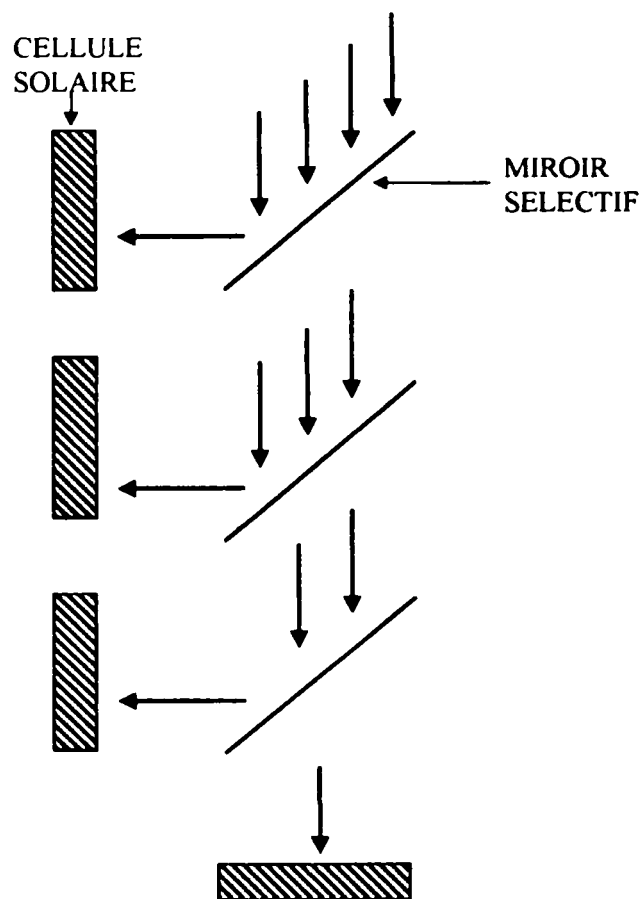


Figure 2.5. Association de plusieurs cellules solaires pour une conversion multispectrale [4].

Par la définition de sa pente et de sa longueur d'onde de coupure, le miroir permettra une meilleure adaptation du spectre au système de cellules utilisées. La longueur d'onde de coupure est fixée de telle sorte que la somme des puissances de sortie délivrées par les deux cellules, donc, le rendement énergétique soit maximal [2-4,60].

Dans ce mode de couplage par miroirs dichroïques, les cellules sont indépendantes et chacune est câblée individuellement sur une charge, par conséquent, quatre contacts sont exigés. Le câblage

se complique dès que la puissance électrique délivrée par le système photovoltaïque augmente. En outre, l'encombrement de l'ensemble peut devenir important et les filtres sélectifs peuvent provoquer des pertes [4,60] (figure 2.6).

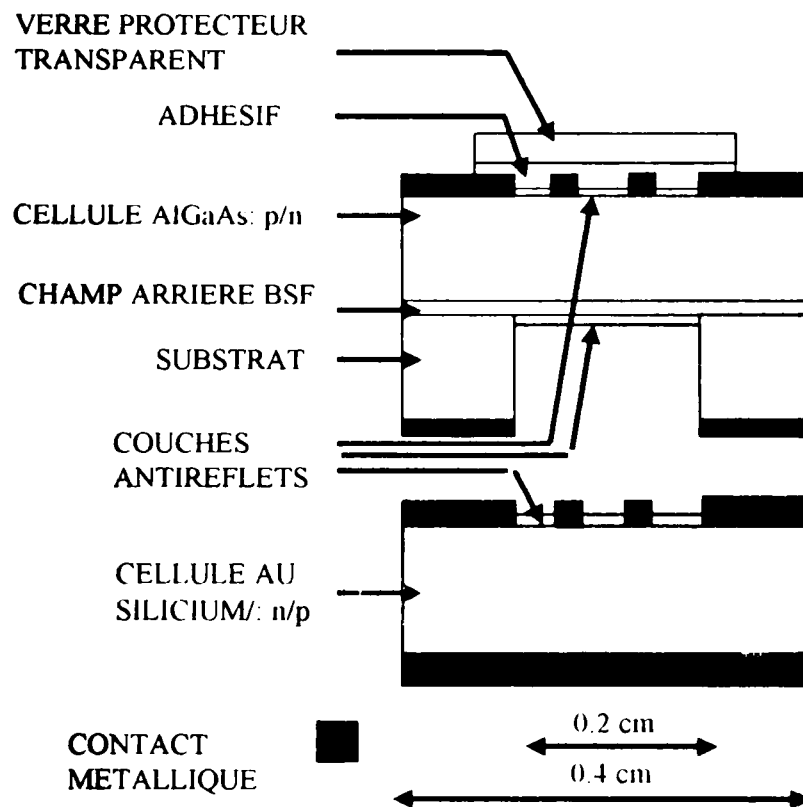


Figure 2.6. Schéma d'assemblage de cellules (Al, Ga)As/Si en cascade, mécaniquement empilée [60].

2.2.3.5.2. SYSTEME MONOLITHIQUE (TANDEM, CASCADE OU MULTICOLORE)

Il apparaît comme une succession de cellules solaires sensibles dans une bande spectrale, transparentes dans le reste du spectre solaire. La première cellule recevant la totalité du rayonnement solaire a la largeur de bande interdite la plus élevée. Chaque cellule joue le rôle de filtre pour la suivante. La structure est généralement monolithique (figure 2.7) [3,4,60].

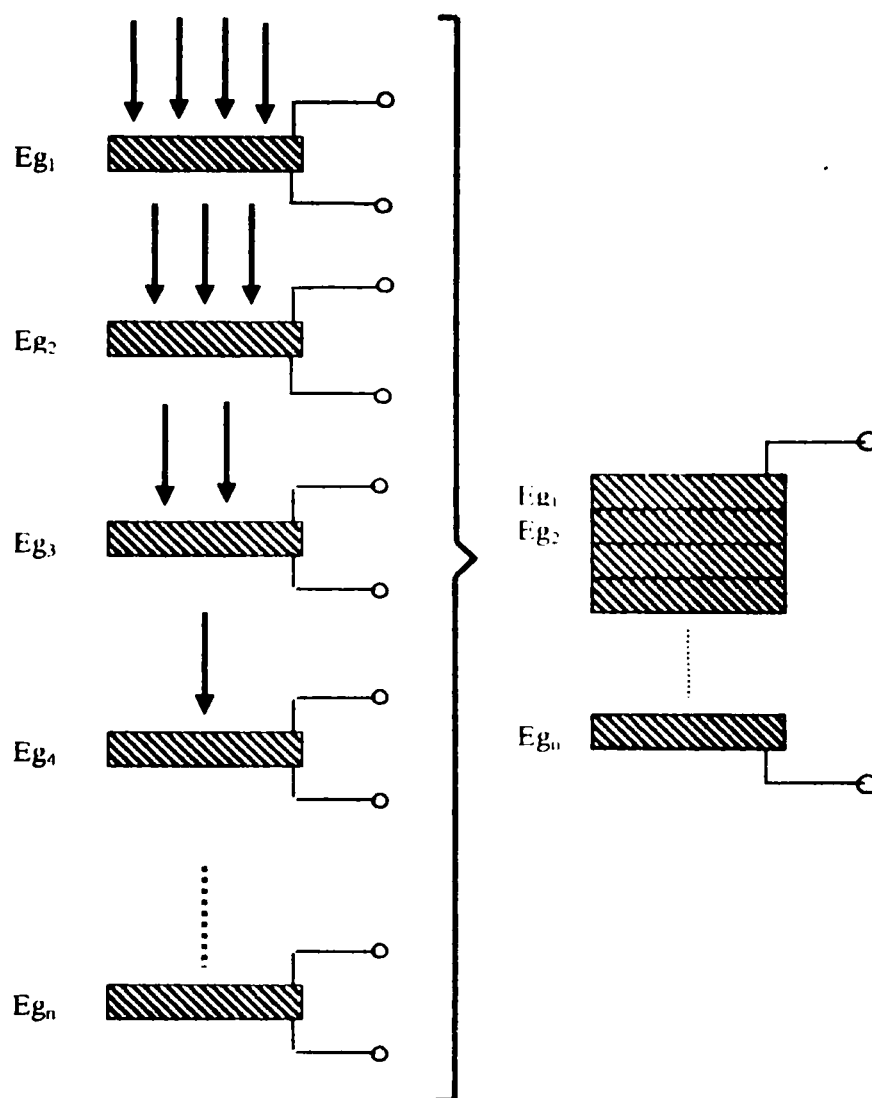


Figure 2.7. Association de plusieurs cellules solaires pour une structure Tandem, Cascade, Multicolore [4].

Les cellules sont, généralement, reliées optiquement et électriquement entre elles, par des diodes tunnel (optiquement inactives et transparentes). Dans une telle structure, l'épaisseur et la largeur de bande interdite doivent être choisies de façon que les photocourants dans chaque cellule doivent être égaux, toutes ces cellules étant connectées en série (figure 2.8). Seuls deux contacts existent dans un système monolithique [3,4,60].

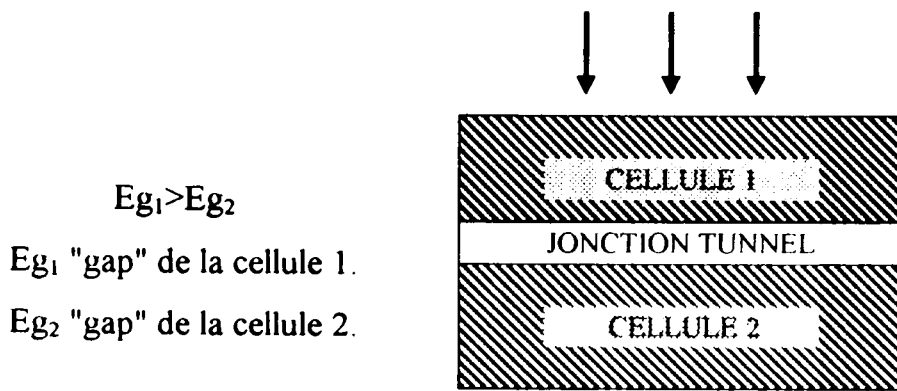


Figure 2.8. Système à deux jonctions empilées[3].

Il faut que l'interface assurant la liaison entre deux cellules évite de créer une barrière de potentiel aux porteurs minoritaires, tout en restant transparente aux photons d'énergie plus petite que la largeur de bande interdite du matériau traversé. La diode tunnel devrait satisfaire à ces différentes exigences [3,4,60].

Enfin, comme dans toute hétérostructure, le désaccord entre les paramètres cristallins doit rester de faible valeur [3,4,47,48,57-60].

2.2.4. CELLULES SOUS CONCENTRATION

La lumière peut être condensée par des miroirs et des lentilles. Elle est réfléchiée par un miroir primaire et sera concentrée par un miroir secondaire sur une cellule solaire montée sur un bloc de refroidissement par eau. Les performances s'améliorent lorsque la concentration passe de 1 soleil à 1000 soleils. Le courant de court-circuit augmente linéairement avec la concentration. La tension de circuit ouvert augmente à raison de 0.1V par décade, le facteur de forme varie peu et le rendement augmente de 2 % par décade.

Pour les applications terrestres, la lumière peut être concentrée par un facteur de quelques centaines sur des cellules solaires au silicium et de quelques milliers pour des cellules aux GaAs. Le rejet de chaleur devient un problème majeur. Le rendement tend à baisser, ceci est dû aux températures élevées [2,4].

2.3. CHOIX DE LA CELLULE ET DES MATERIAUX

Actuellement, plusieurs semi-conducteurs sont employés par différentes structures et diverses configurations. Effectivement, une grande variété de composés peut servir de matériaux de base à la cellule solaire, et fait l'objet de plusieurs recherches dont: le silicium monocristallin [1,3-25], polycristallin [1,2,4,5,26-34], et même amorphe (a-Si) [2,4,5,35,36], le sulfure de cadmium (CdS) et le tellure de cadmium (CdTe) [1,2,4,5,37-40], l'arséniure de gallium (GaAs) [1,2,4,5,12,13, 39,41-50], le phosphore d'indium (InP) [5,39,51-56], ainsi que les composés ternaires et quaternaires [1-5,20,38-40,47,48,50,57-60] tels: AlGaAs, GaInP, CuInSe₂, InGaAsP, ...etc

Les multiples recherches de simulation, théoriques ou expérimentales effectuées sur les cellules solaires ont, pour seul but, l'amélioration du rendement de conversion. Les cellules tandem, monolithiques ou en cascade à deux jonctions ou plus, répondent à cet objectif tant recherché.

Plusieurs systèmes monolithiques à deux cellules existent, tels les systèmes AlGaAs/GaAs [50], InGaP/GaAs [57], et AlGaAs/Si [47,57-59]. Cependant, le système III-V/Si est l'un des systèmes de matériaux les plus adéquats pour réaliser des cellules à rendements élevés, en utilisant l'avantage qu'a le silicium: grande surface, bas prix, et force mécanique. Ce système est l'un des candidats à offrir un rendement supérieur à 30 % du point de vue "gap".

Parmi plusieurs composés III-V, AlGaAs semble être un bon postulant. Ce composé ternaire est d'un grand intérêt pour les applications multispectrales, car sa bande interdite peut être ajustée dans le but d'atteindre le photocourant de la cellule du bas, en variant la fraction molaire de l'aluminium [47,57-60]. Dans ce système, la diode tunnel, située entre les deux cellules AlGaAs et Si, est à base de matériau GaAs; ce dernier a un paramètre de maille proche de celui de l'AlGaAs.

Le système AlGaAs/Si présente un grand intérêt dans la conversion photovoltaïque. Par conséquent, l'objectif de ce mémoire sera d'examiner les différentes cellules constituant le système et la cellule tandem. L'étude de certaines propriétés des trois matériaux le constituant sera de rigueur.

2.4. QUELQUES PROPRIETES DES MATERIAUX

2.4.1. CELLULES AU SILICIUM ET A L'ARSENIURE DE GALLIUM

2.4.1.1. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

Toutes les cellules sont affectées par les conditions dans les deux régions émetteur et base. Celles fabriquées à partir de matériaux à "gap" indirect, tels que le silicium (figure 2.9), dépendent beaucoup plus des conditions de base, alors que les composants issus de matériaux à "gap" direct, tels que l'arséniure de gallium (figure 2.10), sont gouvernés d'autant plus par les conditions dans la région d'émetteur [1]. L'absorption se produit dans le cas du silicium ($E_g = 1.12$ eV) dans le volume, elle est due au "gap" indirect. Toutefois, pour l'arséniure de gallium ($E_g = 1.42$ eV), elle se produit en surface. De ce fait, l'effet de recombinaison en surface est néfaste à la surface arrière pour le premier, il l'est à la surface avant pour le second [1].

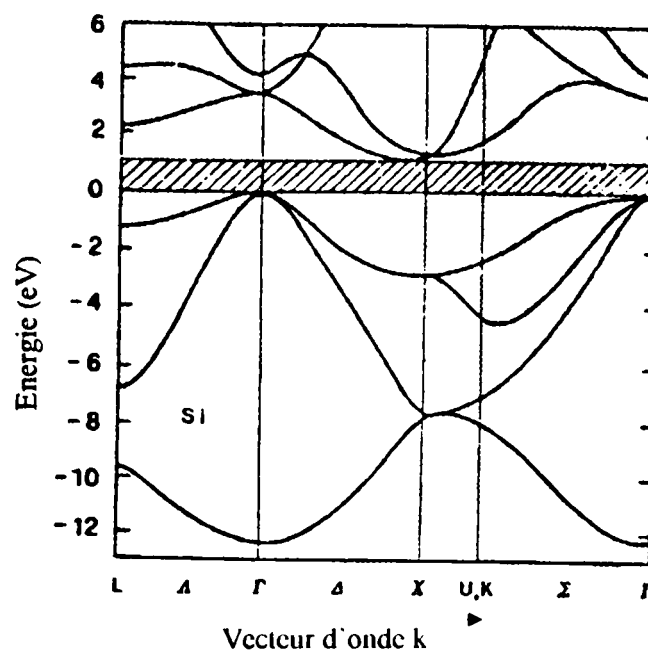


Figure 2.9. Structure des bandes d'énergie du silicium [69].

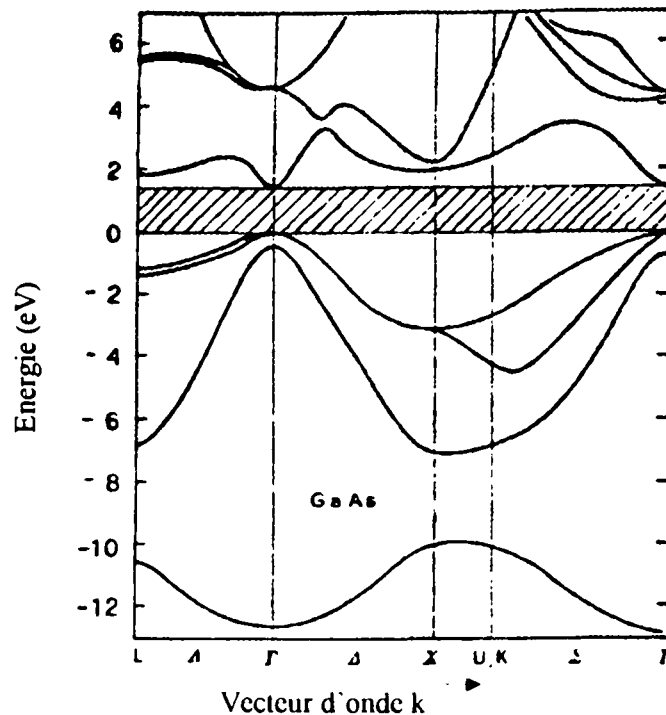
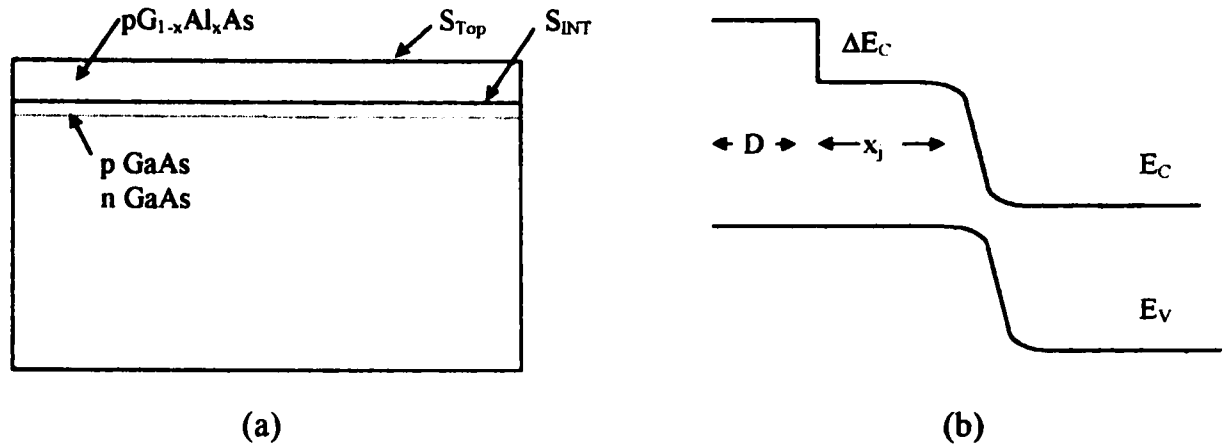


Figure 2.10. Structure des bandes d'énergie de l'arséniure de gallium [69].

Ces pertes en surfaces peuvent être surmontées en réalisant des jonctions minces comme pour le silicium, ou en établissant un champ électrique à la surface. Le champ électrique améliore la réponse spectrale que ce soit dans la région d'émetteur ou la région de base (surtout la première). En outre, dans le cas du GaAs, on peut vaincre les effets de recombinaisons en surface et les pertes dues aux recombinaisons en volume dans la région d'émetteur, en faisant croître une couche semi-conductrice à large "gap", très fortement dopée sur la couche d'émetteur: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sur GaAs (figure 2.11) [1]. On réalise, ainsi, un gradient de bande interdite sur la surface frontale en variant la composition x de l'alliage ternaire [4].

Les porteurs créés dans le GaAs sont contraints d'atteindre l'AlGaAs, par la discontinuité d'énergie ΔE_C , dans la bande de conduction qui survient de la différence des affinités électroniques des deux matériaux [1].

En effet, la réduction de l'épaisseur de la couche AlGaAs permettra une faible absorption dans la couche et un déplacement du "cut off" vers des énergies plus élevées.



**Figure 2.11. Cellule solaire $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs:
(a) structure, (b) diagramme des bandes d'énergie [1].**

2.4.1.2. QUELQUES PROPRIETES

généralement, les performances d'une cellule solaire sont liées aux paramètres issus des conditions de fabrication de celle-ci et de l'environnement où elle opère.

- Longueur de diffusion:

La longueur de diffusion diminue quand le dopage augmente, plus particulièrement aux fortes concentrations en impuretés. Elle est sensiblement plus élevée pour les électrons que pour les trous. Elle ne dépasse pas 20 - 30 μm dans GaAs, alors qu'elle peut atteindre plus de 200 μm dans Si. Ces valeurs sont tout à fait compatibles avec l'épaisseur requise pour absorber la majorité des photons utiles du spectre solaire.

- Absorption optique:

Les deux spectres couramment utilisés sont le spectre hors atmosphère AM0 et le spectre standard AM1.5 [4].

Les deux paramètres les plus influents dans une cellule solaire sont la durée de vie et la longueur de diffusion des porteurs. Cette dernière permet de caractériser la qualité de la base de la cellule. La durée de vie est conditionnée par le taux de recombinaison. Pour des matériaux à "gap" direct,

elle tend à être plus faible que pour le silicium ou le germanium [4]. Pour les cellules au GaAs et ses composés, les facteurs limitant les performances de la cellule sont la durée de vie et la vitesse de recombinaison à l'interface. La durée de vie et la longueur de diffusion dépendent de la méthode de croissance du cristal, de la procédure utilisée dans la préparation des substrats, de la résistivité de ceux-ci, de la présence d'impuretés indésirables telles que l'oxygène et le cuivre, et de la température du recuit et de sa durée. La vitesse de recombinaison en surface dépend fortement du matériau, aussi bien que de la concentration des impuretés de dopage [1].

La capacité d'une cellule à générer le photocourant à une longueur d'onde donnée d'une lumière incidente est mesurée quantitativement par sa réponse spectrale et son courant de court-circuit total.

La réponse spectrale aux grandes longueurs d'onde dépend principalement de la durée de vie et la longueur de diffusion dans la base τ_{base} et L_{base} respectivement. Si L_{base} est petite, la réponse peut être améliorée par la présence d'un champ électrique dans la base adjacente à la zone de déplétion, mais si L_{base} est grande, le champ dans la base a un faible effet. Le "BSF" (S faible) peut améliorer la réponse en minimisant le nombre de porteurs générés qui d'ordinaire se recombinent au contact ohmique arrière (S infinie) (cas d'une cellule Si).

La réponse spectrale aux courtes longueurs d'onde dépend de la recombinaison dans la surface avant "FSRV" (Front Surface Recombination Velocity) et de la durée de vie dans l'émetteur τ . Si τ est faible et "FSRV" élevée alors la réponse spectrale diminue [1].

Deux paramètres physiques se dégagent de cette analyse: la vitesse de recombinaison en surface de la face éclairée et la longueur de diffusion des minoritaires. Cette dernière dépend de la durée de vie, donc, des recombinaisons en volume. De ce fait, elle est étroitement liée à la qualité du matériau, par conséquent de sa fabrication [1,4].

2.4.1.3. METHODES D'ELABORATION

Rappelons que la cellule solaire peut être une homojonction ou une hétérojonction à partir d'un semi-conducteur pouvant être élaboré suivant plusieurs méthodes telles que: la méthode Czochralski (Cz), la méthode de la zone flottante (Fz), et les techniques de croissance des rubans (telles que EFG (Edge-defined, Film-fed Growth)) pour le silicium; la méthode de Bridgman, l'épitaxie en phase liquide (LPE: low Pressure Epitaxy) [1], l'épitaxie par jet moléculaire (MBE:

Molecular Beam Epitaxy), dépôt en phase vapeur tel que (MOCVD: MetalOrganic Chemical Vapor Deposition) [12], pour l'arséniure de gallium.

Les dopants peuvent être ajoutés directement au silicium ou au GaAs liquide, et seront incorporés dans le solide en croissance conformément au coefficient de ségrégation. Le bore et le phosphore sont les dopants les plus utilisés dans le silicium. Se, Te, ou Si le sont pour l'arséniure de gallium de type n [1].

Les hétérojonctions sont toujours fabriquées par croissance en phase vapeur ou par épitaxie en phase liquide pour un matériau à large "gap" sur des substrats Si ou GaAs [1].

Le résultat de toutes ces croissances est soit un monocristal, soit un polycristal, soit un film mince amorphe [1].

2.4.2. CELLULES AU COMPOSE TERNAIRE $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Plusieurs matériaux présentent des caractéristiques physiques qui s'adaptent tout à fait à la conversion photovoltaïque. L'un des critères importants est la largeur de la bande interdite. Quand différents matériaux sont mis en contact, ils forment une hétérostructure qui est d'une grande importance pour les composants à semi-conducteurs. L'accord de mailles est un facteur très important dans la détermination de la qualité de l'interface (faibles courants de fuite, vitesse de recombinaison à l'interface S_{interf} faible) [1-4,69]. La figure 2.12 montre la corrélation entre l'énergie du "gap" et la constante de maille pour une variété de composés semi-conducteurs III-V binaires et ternaires [69].

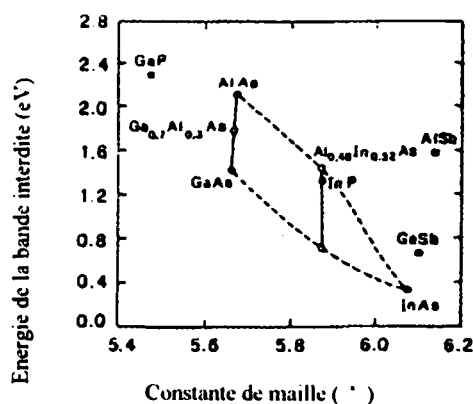


Figure 2.12. Energie du "gap" pour différents composés et constante de mailles [69].

Les composés semi-conducteurs $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sont d'une grande importance technologique [70]. Le $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ est un matériau semi-conducteur composé d'un alliage d'arséniure de gallium GaAs et d'arséniure d'aluminium AlAs. Le premier présente une structure de bande interdite directe de largeur 1.24 eV (cf. figure 2.10), par contre AlAs a une structure à bande interdite indirecte de 2.168 eV [68].

Une bonne croissance du cristal exige un bon accord de mailles. Il est à noter que le GaAs et AlAs ont des paramètres de mailles très similaires [1,2,4,70] (5,653 pour GaAs et 5,661 pour AlAs [4]). Il est, donc, possible d'insérer les atomes Al dans le GaAs pour former l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sans aucun changement significatif (<1%) dans la structure cristalline. Ceci autorise une croissance épitaxiale de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ directement sur GaAs [69].

2.4.2.1. PARAMETRES CARACTERISTIQUES DU $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Les paramètres caractéristiques du $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dépendent de la concentration x en aluminium. L'évolution des extrema des bandes d'énergie en fonction de la composition x de l'aluminium dans l'alliage est présentée en figure 2.13.

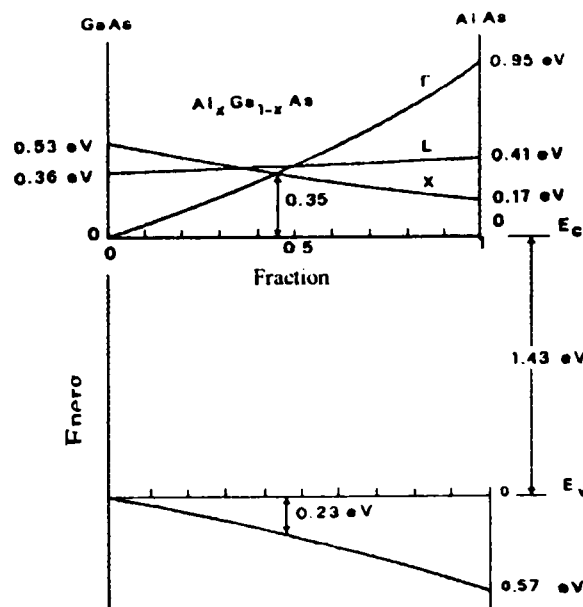


Figure 2.13. Bandes d'énergie des extrema dans l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ en fonction de la fraction de l'aluminium [69].

La valeur $x = 0$ correspond au GaAs ($E_g = 1.43$ eV) et la valeur $x = 1$ correspond à AlAs ($E_g = 2.17$ eV). Pour $x < 0.45$, le composé reste à "gap" direct avec le minimum de la bande de conduction dans Γ , alors que pour $x > 0.45$ le minimum est le long de la direction $[100]$ comme dans le silicium [69].

La bande interdite a pour valeur:

$$E_{g_d}^{\Gamma} = 1.424 + 1.247x \quad [2,3,68,70,71] \quad \text{pour } 0 < x < 0.45 \quad (2.1.a)$$

ou

$$E_{g_d}^{\Gamma} = 1.435 + 1.209x + 0.386x^2 \quad [70] \quad (2.1.b)$$

ou

$$E_{g_d} = 1.424 + 1.247x + 0.992(x - 0.45)^2 \quad [71] \quad (2.1.c)$$

$$E_{g_i}^{\Gamma} = 1.708 + 0.642x \quad [68] \quad \text{pour } 0.45 < x < 1 \quad (2.1.d)$$

$$E_{g_i}^X = 1.9 + 1.25x + 1.43x^2 \quad [68] \quad \text{pour } 0.45 < x < 1 \quad (2.1.e)$$

$$E_{g_i} = 1.87 + 0.29x \quad [3,71] \quad \text{pour } 0 < x < 1 \quad (2.1.f)$$

$$E_g = \min(E_{g_d}, E_{g_i}) \quad [71] \quad (2.1.g)$$

En ce qui concerne la variation de la largeur E_g du $Al_xGa_{1-x}As$ avec la température, seules des études concernant le "gap" direct sont mentionnées dans la littérature, [71]:

$$E_{g_d}(x, T) = E_{g_d}(x, 300K) + 4.10^{-4} (1 + 0.6x)(300 - T) \quad (\text{pour } T \geq 120 \text{ K et } 0 \leq x \leq 0.45) \quad (2.1.h)$$

L'affinité électronique a la forme suivante:

$$\chi = 4.07 - 1.015(E_g(x) - 1.424) \quad [68] \quad (2.2)$$

La permittivité relative s'écrit:

$$\epsilon_r = 131 - 3,0x \quad [3,68,71] \quad (2.3)$$

L'indice de réfraction s'écrit:

$$n(x) = 3.590 - 0.710x + 0.091x^2 \quad [2] \quad (2.4)$$

L'indice de réfraction n du $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ est inférieur à celui du GaAs , quel que soit la composition en aluminium x pour toutes les longueurs d'onde [70].

Les masses relatives sont données par:

$$m_p / m = 0.48 + 0.81x \quad [70] \quad (2.5.a)$$

ou

$$m_p / m = 0.45 + 0.302x \quad [70] \quad (2.5.b)$$

et

$$m_n / m = 0.067 + 0.083x \quad [70] \quad (2.6.a)$$

ou

$$m_n / m = 0.0665 + 0.083x \quad [70] \quad (2.6.b)$$

La variation de l'énergie du "gap" à l'interface conduit à des discontinuités (ou "offset") dans les bandes de conduction et de valence. Pour le cas de l'hétérojonction $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$, il est établi que le "gap" dans AlGaAs dépend fortement de la concentration en aluminium [3,69]. Il est, ainsi, possible de contrôler l'offset de la bande de conduction en changeant la concentration d'aluminium dans la couche $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

2.4.2.2. METHODES DE FABRICATION DU $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Différentes méthodes existent pour la fabrication des hétérostructures AlGaAs/GaAs telles que MBE (Molecular Beam Epitaxy) [13,39,69], HMBE (Hydrogen-Assisted Molecular Beam Epitaxy) [48], MOVPE (Metal-Organic Chemical Vapour-phase Epitaxy) [44], LPE (Low

Pressure Epitaxy) [3,45], LTLPE (Low Temperature Low Pressure Epitaxy) [45], MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapour-phase Deposition) [13,20,41,45,57,58,72]. En ce moment, la méthode MOCVD est largement utilisée pour la préparation de AlGaAs/ GaAs et les structures de cellules solaires relatives. Cette méthode permet de faire croître des structures complexes à rendement élevé à partir de cellules basées III-V. Il est important du point de vue économique et écologique de développer des techniques pas chères et non toxiques pour la préparation de ces structures

Les dopants utilisés sont, en général, Sn, Te, Se pour le type n, Ge, Mg, Zn, Be pour le type p. Le choix du dopant dépend de son accord avec le réseau, son énergie d'activation, son coefficient de diffusion, son coefficient de distribution, sa concentration, sa volatilité, l'épaisseur à épitaxier, et la possibilité d'être amphotère [3]

2.5. CONCLUSION

Les différentes applications de la cellule solaire exigent certaines performances. Par conséquent, plusieurs configurations du dispositif photovoltaïque sont mises au point. En outre, divers matériaux sont utilisés pour la fabrication du composant. Ainsi, nous avons trouvé nécessaire d'exposer les plus importantes configurations, en nous penchant sur les matériaux de celle choisie dans notre cas. Ceci clôt notre description de la cellule solaire et nous mène à décrire les équations gouvernant son comportement.

Caractéristiques Electriques de la Cellule Solaire

3.1. INTRODUCTION

Dans cette partie, nous présenterons les équations de base qui décrivent les différents phénomènes ayant lieu dans une cellule solaire.

Rappelons qu'une cellule photovoltaïque peut être conçue suivant trois configurations: une homojonction, une interface métal semi-conducteur, ou une hétérojonction réalisée à partir d'un semi-conducteur qui peut être élaboré suivant plusieurs méthodes.

Les photopiles sont, dans la majorité des cas, à jonction dissymétrique. Il existe, cependant, des jonctions à transition de dopage graduelle.

Nous allons, tout d'abord, considérer la structure de la figure 1.2 qui a le diagramme des bandes d'énergie illustré par la figure 1.3, celle-ci représente le cas d'une homojonction. Nous examinerons, ensuite le cas d'une hétérojonction.

Ces équations s'appliquent à la plupart des structures photovoltaïques et l'approche analytique donne des résultats s'accordant avec l'expérimentation. On formule, cependant, certaines hypothèses: les paramètres physiques et les niveaux de dopage demeurent constants dans les zones actives de la cellule. On ne tiendra pas compte des phénomènes de fort dopage se

produisant dans la zone avant, ni dans le cas où le taux de concentration en lumière est si élevé qu'on atteint des effets de forte injection.

Dans ce chapitre purement théorique, on analyse les phénomènes qui interviennent sur le transport des charges, dans les différentes parties de la photopile.

Dans une cellule solaire deux courants s'opposent: un courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. Nous allons étudier ces deux constituants du photocourant de la jonction.

3.2. COURANT D'ECLAIREMENT POUR UNE LUMIERE MONO-CHROMATIQUE DANS UNE HOMOJONCTION

Le photocourant que produisent les porteurs créés, lorsqu'une lumière monochromatique de longueur d'onde λ est incidente sur la surface d'un semi-conducteur, de taux de génération de paires électron-trou $G(x, \lambda)$ donné par la relation (1.5):

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

et la réponse spectrale (le nombre de porteurs recueillis par photons incidents à chaque longueur d'onde) peuvent être déterminés pour des conditions de faible injection (perturbation des porteurs minoritaires seulement) en utilisant les équations de continuité des porteurs minoritaires [1,2]:

$$(1/q) \left(dJ_p / dx \right) - G_p + (p_n - p_{n0}) / \tau_p = 0 \quad (3.1)$$

pour les trous dans le matériau de type N, et

$$(1/q) \left(dJ_n / dx \right) + G_n - (n_p - n_{p0}) / \tau_n = 0 \quad (3.2)$$

pour les électrons dans un matériau de type P.

$J_p, G_p, \tau_p, G_n, J_n, \tau_n$: densités de courants, taux de générations et durées de vie des trous et des électrons respectivement; p_n, n_p densités des porteurs minoritaires créés par la lumière, et p_{p0}, n_p

densités des porteurs minoritaires à l'équilibre dans l'obscurité. q charge de l'électron.

Les densités de courants des trous et des électrons sont obtenues à partir des équations de transport, et sont respectivement:

$$J_p = q \mu_p p_n E - q D_p (dp_n / dx), \quad (3.3)$$

$$J_n = q \mu_n n_p E + q D_n (dn_p / dx), \quad (3.4)$$

où:

E le champ électrique; μ_p , μ_n , D_p , D_n mobilités, et coefficients de diffusion des trous et des électrons respectivement.

3.2.1. COURANT DANS LA REGION QUASI-NEUTRE N

Si les deux côtés de la jonction ont un dopage uniforme, alors le champ électrique est nul hors la zone de déplétion.

Dans le cas considéré, la base est de type P et l'émetteur de type N, les équations (1.5)-(3.1) et (3.3) peuvent être combinées pour donner une expression pour la région d'émetteur:

$$D_p \frac{d^2(p_n - p_{n0})}{dx^2} + \alpha F(1 - R) \exp(-\alpha x) - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0 \quad (3.5)$$

La solution générale de cette équation est:

$$p_n - p_{n0} = A \cosh(x / L_p) + B \sinh(x / L_p) - \frac{\alpha F(1 - R)\tau_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \exp(-\alpha x), \quad (3.6)$$

où L_p est la longueur de diffusion, $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$. Pour un monocristal il y a deux conditions aux limites. A la surface, une recombinaison se produit avec une vitesse S_p :

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} = S_p (p_n - p_{n0}), \quad (x = 0) \quad (3.7)$$

A la limite de la jonction, la densité des porteurs en excès est réduite à zéro par le champ électrique dans la zone de déplétion:

$$p_n - p_{n0} = 0, \quad (x = x_j). \quad (3.8)$$

x_j profondeur de jonction.

En utilisant ces conditions aux limites dans l'équation (3.6), la densité des trous est:

$$p_n - p_{n0} = \left[\alpha F(1-R) \tau_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1) \right] \times \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \sinh\left(\frac{x_j - x}{L_p}\right) + \exp(-\alpha x_j) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\frac{x}{L_p} + \cosh\frac{x}{L_p} \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\frac{x_j}{L_p} + \cosh\frac{x_j}{L_p}} - \exp(-\alpha x) \right] \quad (3.9)$$

et la densité du photocourant des trous résultante à la limite de la zone de déplétion est

$$J_p = -q D_p \left(\frac{dp_n}{dx} \right)_{x_j} = \left[q F(1-R) \alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1) \right] \times \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - \exp(-\alpha x_j) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\frac{x_j}{L_p} + \sinh\frac{x_j}{L_p} \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\frac{x_j}{L_p} + \cosh\frac{x_j}{L_p}} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right] \quad (3.10)$$

Ceci est le photocourant recueilli à partir de la région d'émetteur à une longueur d'onde donnée, en supposant que dans cette région la durée de vie, la mobilité, et le dopage sont uniformes

3.2.2. COURANT DANS LA REGION QUASI-NEUTRE P

Pour trouver le photocourant des électrons recueilli à partir de la base, les équations (1.5)-(3.2) et (3.4) sont utilisées avec les conditions aux limites suivantes:

$$n_p - n_{p0} = 0 \quad (x = x_j + w), \quad (3.11)$$

$$S_n(n_p - n_{p0}) = -D_n \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} \quad (x = H), \quad (3.12)$$

où w la largeur de la zone de déplétion, H l'épaisseur totale de la cellule

L'équation (3.11) énonce que la densité des porteurs minoritaires en excès est réduite à zéro à la limite de la région de déplétion, alors que l'équation (3.12) stipule qu'à l'arrière de la cellule une recombinaison en surface prend place (contact ohmique) S_n (peut être considérée comme infinie).

En employant ces conditions aux limites, la distribution des électrons dans la région de base uniformément dopée est:

$$n_p - n_{p0} = \left[\alpha F(1-R) \tau_n / (\alpha^2 L_n^2 - 1) \right] \exp[-\alpha(x_j + w)] \\ \times \left[\cosh\left(\frac{x - x_j - w}{L_n}\right) - \exp[-\alpha(x - x_j - w)] \right] \\ \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \left[\cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha H') \right] + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \times \sinh\left(\frac{x - x_j - w}{L_n}\right) \quad (3.13)$$

et la densité du photocourant due aux électrons collectés à la limite de la jonction est:

$$J_n = \frac{qF(1-R)\alpha L_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \exp[-\alpha(x_j + w)]$$

$$\times \left[\alpha L_n - \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\right) \left(\cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha H') \right) + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right]$$

(3.14)

où $H' = H - (x_j + w)$. L'équation (3.14) est le résultat des suppositions de l'uniformité de la durée de vie, de la mobilité, et du dopage.

3.2.3. COURANT DANS LA REGION DE CHARGE D'ESPACE

La région de déplétion est aussi siège de courant de génération. Le champ électrique dans cette région peut être considérée assez élevée pour que les porteurs créés soient accélérés hors cette zone avant de se recombiner, de telle sorte que la densité de courant soit égale au nombre de photons absorbés:

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

(3.15)

3.2.4. COURANT D'ECLAIREMENT TOTAL

La densité totale du courant d'éclairement en court-circuit, par longueur d'onde du rayonnement incident, est la somme des équations (3.10), (3.14) et (3.15):

$$J(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda)$$

(3.16)

Toutes ces équations à partir de (3.7) jusqu'à (3.14), peuvent être transformées de leurs formes actuelles pour des cellules N/P à leurs équivalentes pour les cellules P/N en échangeant L_n , D_n , τ_n , S_n par L_p , D_p , τ_p , S_p respectivement.

3.3. HETEROJONCTIONS

Les hétérojonctions sont des jonctions formées par deux semi-conducteurs à différents "gap" (figure 3.1).

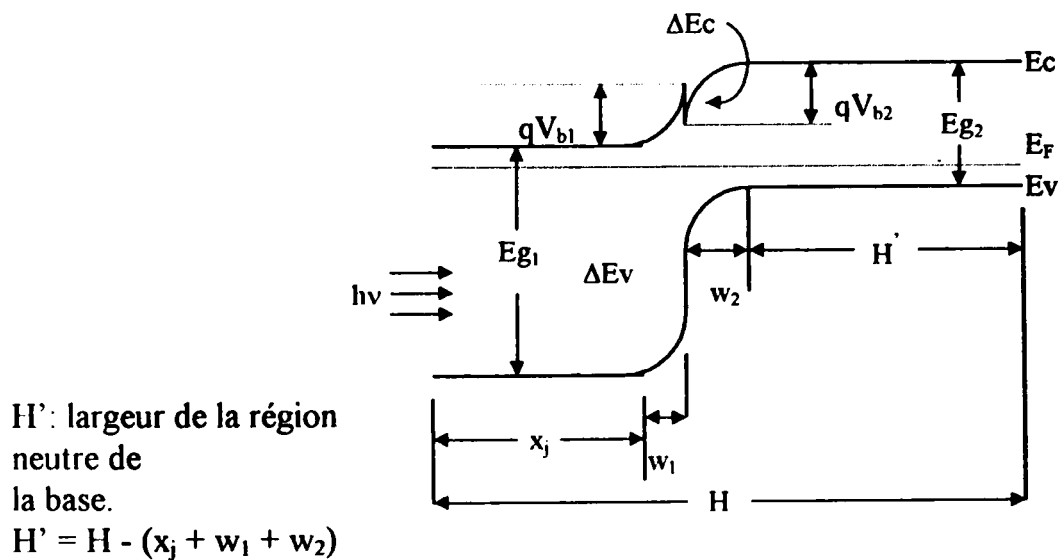


Figure 3.1. Diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction N/P à l'équilibre thermique [2].

Quand de telles jonctions sont formées, les porteurs se redistribuent de part et d'autre de l'interface, de la même manière que pour une homojonction. A l'équilibre thermodynamique, le niveau de Fermi reste le même, une région de charge d'espace se constitue. Les différences d'énergie des bords des bandes, dans ces deux semi-conducteurs font apparaître des discontinuités ΔE_C pour la bande de conduction et ΔE_V pour la bande de valence [4].

La lumière avec une énergie inférieure à la valeur E_{g1} , mais supérieure à l'énergie E_{g2} , passe à travers le premier semi-conducteur (E_{g1}) qui joue le rôle d'une fenêtre (l'effet fenêtre créé une région bande sensible aux énergies des photons entre E_{g1} et E_{g2} [68]) et est absorbée par le second semi-conducteur. Les porteurs créés dans la zone de déplétion et à moins d'une longueur de diffusion de la jonction seront collectés comme pour une cellule homojonction N/P. La lumière avec une énergie supérieure à E_{g1} est absorbée par le premier semi-conducteur et les

porteurs sont générés à moins d'une longueur de diffusion à partir de la jonction ou dans la zone de déplétion [1,2].

* Avantages d'une hétérojonction:

- Amélioration de la réponse spectrale pour les courtes longueurs d'onde si E_{g1} est assez grand pour que les photons à énergies élevées puissent être absorbés à l'intérieur de la zone de déplétion du second semi-conducteur.

- Minimisation de la résistance série si le premier semi-conducteur est très dopé sans affecter les caractéristiques pour la transmission de la lumière.

- Tolérance pour les radiations élevées si le premier semi-conducteur est épais en plus du "gap" élevé [1,2].

3.3.1. PHOTOCOURANT

La majeure contribution du photocourant provient de la région de base avec une contribution plus petite que celles de la région d'émetteur et des deux régions de déplétions. Pour une hétérojonction N/P avec la région de base neutre, le courant est:

$$J_n = \frac{q F(\lambda) \exp[-\alpha_1(x_j + w_1)] \exp(-\alpha_2 w_2) \alpha_2 L_{n2} (1 - R)}{(\alpha_2^2 L_{n2}^2 - 1)} \times \left[\alpha_2 L_{n2} - \frac{\left(\frac{S_n L_{n2}}{D_{n2}}\right) \left(\cosh\left(\frac{H'}{L_{n2}}\right) - \exp(-\alpha H') \right) + \sinh\left(\frac{H'}{L_{n2}}\right) + \alpha_2 L_{n2} \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_{n2}}{D_{n2}} \sinh\left(\frac{H'}{L_{n2}}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_{n2}}\right)} \right] \quad (3.17)$$

celui de la région d'émetteur est:

$$J_p = \frac{q F(\lambda) \alpha_1 L_{p1}}{(\alpha_1^2 L_{p1}^2 - 1)} (1 - R) \times \left[\frac{\left(\frac{S_p L_{p1}}{D_{p1}} + \alpha_1 L_{p1} \right) - \exp(-\alpha_1 x_j) \left(\frac{S_p L_{p1}}{D_{p1}} \cosh \frac{x_j}{L_{p1}} + \sinh \frac{x_j}{L_{p1}} \right)}{\frac{S_p L_{p1}}{D_{p1}} \sinh \frac{x_j}{L_{p1}} + \cosh \frac{x_j}{L_{p1}}} - \alpha_1 L_{p1} \exp(-\alpha_1 x_j) \right] \quad (3.18)$$

α_1 et α_2 : coefficients d'absorption des deux matériaux, w_1 et w_2 : largeurs des zones de déplétions, H' : largeur de la région de base neutre, S_n : vitesse de recombinaison de la surface arrière, S_p : vitesse de recombinaison de la surface du matériau 1, $F(\lambda)$: intensité de la lumière monochromatique incidente.

Les photocourants des régions de déplétions sont donnés par:

$$J_{w1}(\lambda) = q F (1 - R) \exp(-\alpha_1 x_j) [1 - \exp(-\alpha_1 w_1)] \quad (3.19)$$

$$J_{w2}(\lambda) = q F (1 - R) \exp[-\alpha_1 (x_j + w_1)] [1 - \exp(-\alpha_2 w_2)] \quad (3.20)$$

La réflexion à partir des interfaces est négligée dans l'équation (3.20) [1].

Ces expressions sont obtenues à partir des suppositions suivantes:

- La discontinuité ΔE_C faible (ΔE_V pour jonction P/N) ainsi les minoritaires dans le second semi-conducteur ne seront pas entravés au cours de leur écoulement à travers la jonction.

- Bon accord paramétrique des deux matériaux, par conséquent les pièges à l'interface sont négligeables pour réduire la durée de vie dans et autour de la région de déplétion.

La longueur d'onde de coupure est donnée par E_{g2} . La réponse spectrale aux courtes longueurs d'onde dépend de E_{g1} et de l'épaisseur du semi-conducteur 1 [1,4].

Pour une homojonction, la hauteur de barrière est donnée par:

$$V_d = E_g - (E_C - E_F) - (E_F - E_V) \quad (3.21)$$

Pour une hétérojonction, elle est donnée par:

$$V_d = E_{g2} + \Delta E_C - (E_C - E_F) - (E_F - E_V) \quad \text{pour une cellule N/P} \quad (3.22)$$

$$V_d = E_{g2} + \Delta E_V - (E_C - E_F) - (E_F - E_V) \quad \text{pour une cellule P/N} \quad (3.23)$$

E_{g2} : "gap" de plus faible énergie, et les discontinuités $\Delta E_C = \chi_2 - \chi_1$,
 $\Delta E_V = (E_{g1} - E_{g2}) - \Delta E_C$ [1].

3.4. REPONSE SPECTRALE

Le photocourant obtenu pour chaque longueur d'onde, relatif au nombre de photons incidents sur la surface à cette longueur d'onde, détermine la réponse spectrale du composant. Elle est le rapport entre la densité de courant collecté et la densité de puissance, pour chaque longueur d'onde du rayonnement lumineux [1,4].

Une partie du flux de photons incidents $F(\lambda)$ (en photons.cm⁻².s⁻¹), pour la radiation de longueur d'onde λ , se réfléchit $R(\lambda)$, coefficient de réflexion de cette radiation. La part $F(\lambda)[1-R(\lambda)]$ se transmet dans le matériau (figure 3.2) [4].

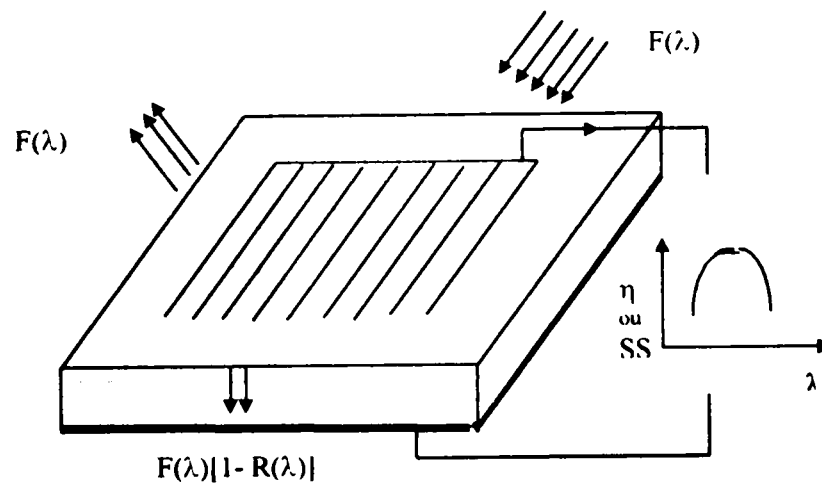


Figure 3.2. Réponse spectrale [4].

La réponse spectrale 'interne' est définie comme le nombre de paires électron-trou recueillies sous les conditions de court-circuit relatif au nombre de photons pénétrant dans le matériau:

$$SR(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} = \frac{J_p(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} + \frac{J_n(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} + \frac{J_{dr}(\lambda)}{qF(\lambda)[1 - R(\lambda)]} \quad (3.24)$$

Alors que la réponse spectrale "externe" n'est autre que la réponse interne modifiée par la réflexion de la lumière à partir de la surface, c'est-à-dire, le rapport entre le nombre de paires électron-trou collectées par la jonction par unité de temps et de surface, et le nombre de photons incidents par unité de temps et de surface [1]:

$$SR(\lambda)_{ext} = SR(\lambda)[1 - R(\lambda)] + \frac{J(\lambda)}{qF(\lambda)} \quad (3.25)$$

On introduit aussi la notion de sensibilité spectrale SS (en $A \cdot W^{-1}$), définie comme les rapports [4]:

$$SS_{int}(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{F(\lambda)[1 - R(\lambda)] \cdot h \cdot \nu} \quad (3.26)$$

$$SS_{ext}(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{F(\lambda) \cdot h \cdot \nu} \quad (3.27)$$

La figure 3.3 montre la réponse spectrale interne d'une cellule Si N/P de résistivité 1 Ohm-cm avec les contributions individuelles des trois régions: base, émetteur, et la région de déplétion. Aux faibles énergies, la plupart des porteurs est généré dans la base à cause des faibles coefficients d'absorption, mais lorsque l'énergie des photons augmente au-dessus de 2.4 eV, la région d'émetteur prend la relève. La contribution de la région de déplétion est considérable dans l'intervalle [2.0-2.9] eV pour une cellule de 1 Ohm-cm, mais n'atteint jamais la contribution de l'émetteur même si la résistivité de la base est plus élevée et la jonction est plus étroite. Cette contribution diminue pour des résistivités plus faibles et des jonctions plus larges [1].

Dans le cas idéal, la réponse spectrale d'un semi-conducteur à "gap" E_g est une fonction échelon qui est égale à zéro pour $h\nu < E_g$ et à l'unité pour $h\nu \geq E_g$ [2].

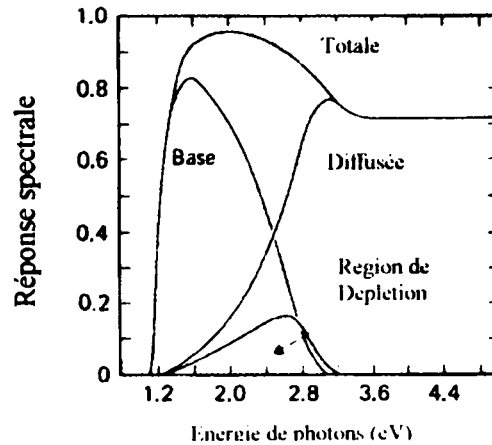


Figure 3.3. Réponse spectrale interne calculée pour une cellule Si N/P indiquant les contributions individuelles des trois régions [1].

Comme la réponse spectrale représente le nombre de porteurs recueillis par photon incident, la densité du photocourant par unité de bande passante est donnée par [1]:

$$J_{ph} = q F(\lambda) \cdot SR(\lambda)_{ext} \quad (3.28)$$

la densité totale est obtenue par intégration sur tout le spectre solaire [1]:

$$J_{ph} = q \int_0^{\infty} F(\lambda) \cdot SR(\lambda)_{ext} \cdot d\lambda \quad (3.29.a)$$

[ou

$$J_{ph} = q \int_0^{\lambda_m} F(\lambda) \cdot SR(\lambda)_{ext} \cdot d\lambda \quad (3.29.b)$$

où λ_m est la plus grande longueur d'onde correspondant à l'énergie de la bande interdite. Pour obtenir un photocourant maximal, il faut optimiser $SR(\lambda)_{ext}$ dans la gamme $0 < \lambda < \lambda_m$ [2,3]].

3.5. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE

3.5.1. COURANT D'OBSCURITE

Le comportement courant-tension d'une cellule dans l'obscurité a la même importance que le photocourant dans la détermination de la performance de la cellule. Les caractéristiques de la jonction déterminent la quantité d'énergie électrique disponible aux bornes de sortie et la quantité d'énergie qui sera perdue en chaleur. Quand une puissance est délivrée, il s'établit une tension entre les bornes de la cellule dans le sens de la polarisation directe un courant d'obscurité dans le sens inverse du photocourant. Le courant fourni à la charge sera donc la différence entre le photocourant et le courant d'obscurité. Il faut alors minimiser ce dernier pour obtenir un rendement maximal.

Le courant d'obscurité est déterminé par la combinaison des effets des mécanismes de transport du courant, qui peuvent être présents, et les problèmes des résistances série et shunt (R_s et R_{sh} , respectivement) qui peuvent survenir [1].

Les mécanismes de transport des porteurs excédentaires s'assimilent à ceux identifiés pour le courant d'éclairage. Les trois zones de la cellule participent à la génération du courant d'obscurité. Du fait de la polarisation en direct de la jonction, les porteurs majoritaires franchissent la barrière de potentiel, diffusent et se recombinent dans les zones quasi neutres de type opposé où ils deviennent alors des porteurs minoritaires. Un courant de diffusion prend naissance dans ces deux régions. Certains de ces porteurs se recombinent en traversant la zone de charge d'espace.

La figure 3.4 représente les mécanismes de transport du courant.

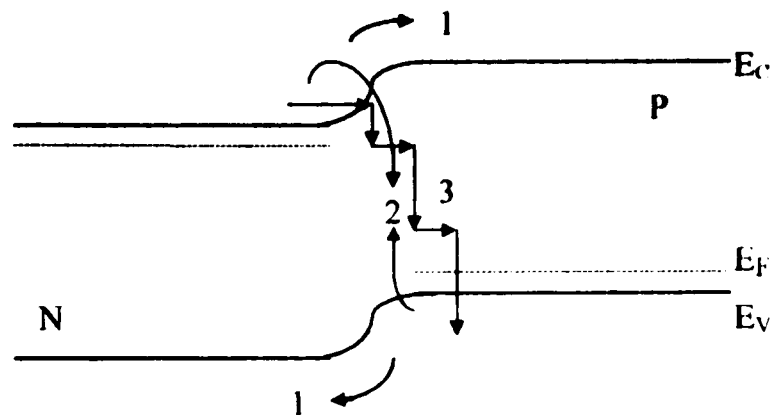


Figure 3.4. Mécanismes de transport des trois courants d'une jonction polarisée en direct:
(1) injection; (2) recombinaison dans la Z.C.E;
(3) effet tunnel à travers des états d'énergie causés par les défauts [1].

3.5.1.1. COURANT D'INJECTION

La densité du courant d'injection est la conséquence du transfert de charges à travers la jonction. Le comportement de ces porteurs minoritaires est gouverné par les équations de continuité:

$$(1/q)(d/dx)J_n - [(n_p - n_{p0})/\tau_n] = 0 \quad \text{électrons dans la région P,} \quad (3.30)$$

$$(1/q)(d/dx)J_p + [(p_n - p_{n0})/\tau_p] = 0 \quad \text{trous dans la région N,} \quad (3.31)$$

et par les équations du courant:

$$J_n = q\mu_n n_p E + qD_n (d/dx)n_p \quad \text{(région P),} \quad (3.32)$$

$$J_p = q\mu_p p_n E - qD_p (d/dx)p_n \quad \text{(région N).} \quad (3.33)$$

La mobilité μ , la durée de vie τ , le champ électrique E , le coefficient de diffusion, D sont considérés comme constants dans le but d'obtenir un résultat analytique.

Le courant d'injection est déterminé surtout par les conditions de base. Les conditions aux limites nécessaires pour résoudre ces équations pour une cellule N/P sont:

$$p_n = p_{n0} \exp(q V_j / kT) \quad (x = x_j), \quad (3.34)$$

$$n_p = n_{p0} \exp(q V_j / kT) \quad (x = x_j + w), \quad (3.35)$$

$$S_p (p_n - p_{n0}) = D_p (d/dx)(p_n - p_{n0}) - \mu_p p_n E_p \quad (x = 0), \quad (3.36)$$

$$S_n (n_p - n_{p0}) = D_n (d/dx)(n_p - n_{p0}) - \mu_n n_p E_n \quad (x = H) \quad (3.37)$$

Les équations (3.34), (3.35) sont les relations de Boltzmann pour les porteurs dans les deux régions quand la tension appliquée à la jonction est V_j .

Pour un dopage uniforme, la solution aux équations (3.30) - (3.33) est:

$$p_n - p_{n0} = A_1 \cosh(x / L_p) + B_1 \sinh(x / L_p) \quad (x \leq x_j), \quad (3.38)$$

$$n_p - n_{p0} = A_2 \cosh[(x - (x_j + w)) / L_n] + A_2 \sinh[(x - (x_j + w)) / L_n], \quad (x_j + w \leq x \leq H) \quad (3.39)$$

et le courant injecté J_{inj} , en utilisant les conditions aux limites (3.34) -(3.37), sera [1]:

$$J_{inj} = J_0 [\exp(q V_j / kT) - 1] \quad (3.40)$$

avec

$$J_0 = q \frac{D_p n_i^2}{L_p N_d} \left[\frac{(S_p L_p / D_p) \cosh(x_j / L_p) + \sinh(x_j / L_p)}{(S_p L_p / D_p) \sinh(x_j / L_p) + \cosh(x_j / L_p)} \right] + q \frac{D_n n_i^2}{L_n N_a} \left[\frac{(S_n L_n / D_n) \cosh(H' / L_n) + \sinh(H' / L_n)}{(S_n L_n / D_n) \sinh(H' / L_n) + \cosh(H' / L_n)} \right] \quad (3.41)$$

où $H' = H - (x_j + w)$ et S_p, S_n sont les vitesses de recombinaison en surface avant et arrière respectivement [1].

3.5.1.2. COURANT DE RECOMBINAISON DANS LA ZONE DE DEPLETION

La densité de courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace $J_{Z.C.E}$ provient des électrons de la région N et des trous de la région P qui se recombinent entre bandes dans la zone de charge d'espace quand la jonction est polarisée en direct [1,3]. Cette densité a pour expression l'équation (3.42) [1]:

$$J_{Z.C.E} = \frac{q n_i w}{\sqrt{\tau_{p0} \cdot \tau_{n0}}} \frac{2 \sinh(q V_j / 2kT)}{q(V_d - V_j) / kT} f(b), \quad (3.42)$$

$$f(b) = \int_0^{\infty} \frac{dx}{x^2 + 2bx + 1} \quad (3.43)$$

$$b = \left[\exp(-q V_j / 2kT) \right] \cosh \left[(E_t - E_i) / kT + (1/2) \ln(\tau_{p0} / \tau_{n0}) \right] \quad (3.44)$$

Le facteur $f(b)$ est une expression complexe, l'équation (3.42) atteint son maximum pour $f(b)=\pi/2$. La composante $J_{Z.C.E}$ aura la forme simplifiée suivante:

$$J_{Z.C.E} = \frac{\pi q n_i w}{\sqrt{\tau_{p0} \cdot \tau_{n0}}} \frac{\sinh(q V_j / 2kT)}{q(V_d - V_j) / kT} \quad (3.45)$$

V_d : tension de diffusion et V_j : tension aux bornes de la jonction, E_i niveau de Fermi intrinsèque.

avant. La résistance série R_S résulte des résistances de contacts avant et arrière, et des résistances de la base et de la région frontale.

Le courant d'obscurité I_{Obs} est égal à la densité de courant $J_{Obs} = J_{Inj} + J_{Z.C.E} + J_{Tun}$ multipliée par la surface totale de la cellule A_t . Par contre, le photocourant est égale à la densité du photocourant multipliée par la surface active A_a .

$$I_{Obs} = I_{Inj} + I_{Z.C.E} + I_{Tun} \quad (3.49)$$

A_a est la surface totale moins la surface masquée par le contact avant.

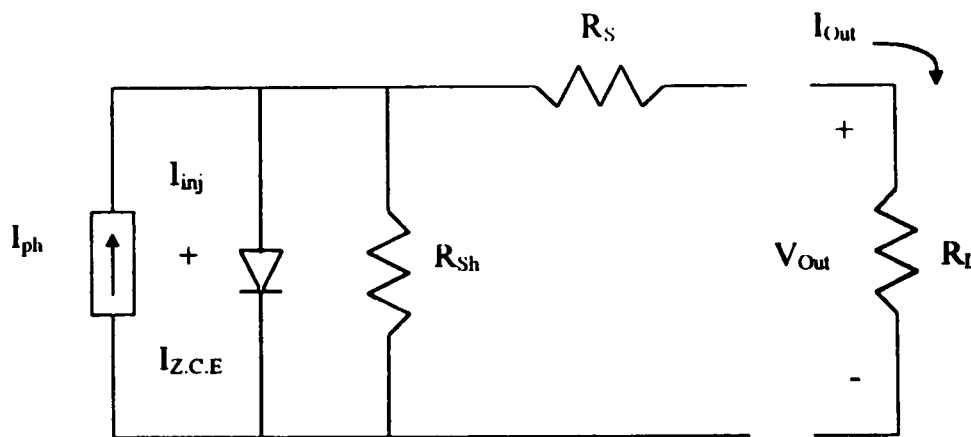


Figure 3.5. Circuit équivalent [1].

De ce circuit équivalent, une relation entre le courant de sortie I_{Out} et la tension de sortie V_{Out} peut être établie, en négligeant le courant tunnel dans l'équation (3.49). Cette relation est [1]:

$$I_{Out} (1 + (R_S / R_{Sh})) = I_{ph} - (V_{Out} / R_{Sh}) - I_{Obs} \quad (3.50)$$

I_{Inj} et $I_{Z.C.E}$ de l'équation (3.49) sont fonction de la tension aux bornes de la jonction V_j qui, à son tour, est égale à $(V_{Out} + I_{Out} \cdot R_S)$ [1].

La cellule solaire dont les extrémités sont reliées à une résistance de charge fonctionne en générateur de puissance électrique (figure 3.6). L'intersection de la caractéristique courant-tension du dipôle associé à la cellule solaire avec la droite de charge définit le point de fonctionnement de ce circuit. Les deux régimes extrêmes: la résistance de charge est nulle ou infiniment grande, donnent respectivement un courant en court-circuit I_{CC} et une tension en circuit ouvert V_{CO} [4].

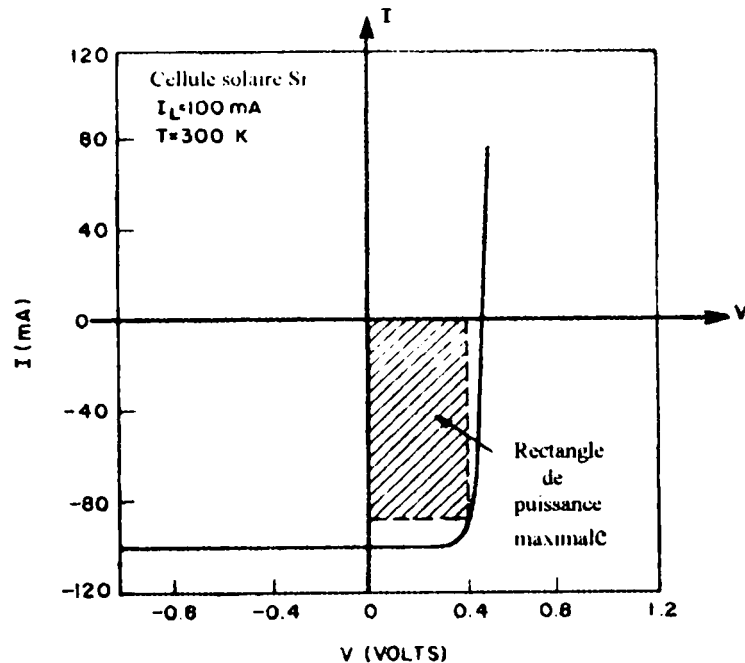


Figure 3.6. Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire sous éclairage [2].

Afin d'obtenir des expressions analytiques et maniables des sorties et du rendement de la cellule, l'effet des résistances série et shunt est négligé, et le courant d'obscurité peut s'écrire sous une forme simplifiée [1]:

$$I_{Obs} = I_S \left[\exp(q V_j / n k T) - 1 \right] \quad (3.51)$$

n : facteur d'idéalité,

I_S : courant de saturation ayant pour valeur approchée $I_{inj} + I_{Z.C.E}$ [3].

Le courant délivré sur une charge par une cellule solaire éclairée s'écrit:

$$I_{\text{Out}} = I_{\text{ph}} - I_{\text{S}} \left[\exp(q V_{\text{Out}} / nkT) - 1 \right] \quad (3.52)$$

Dans les conditions de court-circuit ($R_{\text{L}} = 0$) le courant en court-circuit est simplement le photocourant ou courant d'éclairement :

$$I_{\text{cc}} = I_{\text{ph}} \quad (3.53)$$

Examinons maintenant le cas extrême où la résistance de charge a une valeur très élevée. Le courant y prend une valeur négligeable. La tension aux bornes de la cellule a une valeur maximale V_{CO} . On obtient, donc, la tension en circuit ouvert et elle est exprimée par :

$$\begin{aligned} V_{\text{CO}} &= n(kT/q) \ln \left((I_{\text{cc}} / I_{\text{S}}) + 1 \right) \\ &= n(kT/q) \ln \left((J_{\text{cc}} \cdot A_{\text{a}} / J_{\text{S}} \cdot A_{\text{t}}) + 1 \right) \end{aligned} \quad (3.54)$$

Quand on utilise la cellule solaire, on se place au plus près de la caractéristique courant-tension $I(V)$ pour lequel la puissance électrique délivrée est maximale [4]. Comme la puissance de sortie P_{Out} est $V_{\text{Out}} \times I_{\text{Out}}$, la puissance maximale $P_{\text{out}}(\text{max})$ est obtenue en annulant la dérivée de la puissance par rapport à la tension (dP/dV) [1].

$$P_{\text{Out}}(\text{max}) = I_{\text{m}} \cdot V_{\text{m}}$$

où I_{m} et V_{m} représentent le courant et la tension de sortie respectivement au point de puissance maximale, avec :

$$I_{\text{m}} = (I_{\text{cc}} + I_{\text{S}}) \left[\frac{q V_{\text{m}} / nkT}{1 + (q V_{\text{m}} / nkT)} \right], \quad (3.55.a)$$

$$I_{\text{m}} = (J_{\text{cc}} \cdot A_{\text{a}} + J_{\text{S}} \cdot A_{\text{t}}) \left[\frac{q V_{\text{m}} / nkT}{1 + (q V_{\text{m}} / nkT)} \right], \quad (3.55.b)$$

et

$$\exp(q V_m / nkT) \cdot [1 + q V_m / nkT] = (I_{cc} / I_S) + 1 = \exp(q V_{co} / nkT) \quad (3.56.a)$$

$$= \left[(J_{cc} \cdot A_a / J_S \cdot A_l) + 1 \right] \quad (3.56.b)$$

Le facteur de forme (ou de courbe) FF, mesure la "forme carrée" de la courbe I(V), et est [1]:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (3.57)$$

$$= V_m \left[\frac{1 - (I_S / I_{cc}) [\exp(q V_m / nkT) - 1]}{(nkT / q) \ln[(I_{cc} / I_S) + 1]} \right] \quad (3.58.a)$$

$$= V_m \left[\frac{1 - (J_S \cdot A_l / J_{cc} \cdot A_a) [\exp(q V_m / nkT) - 1]}{(nkT / q) \ln[(J_{cc} \cdot A_a / J_S \cdot A_l) + 1]} \right] \quad (3.58.b)$$

$$= \frac{V_m}{V_{co}} \left[1 - \frac{[\exp(q V_m / nkT) - 1]}{[\exp(q V_{co} / nkT) - 1]} \right] \quad (3.58.c)$$

Le facteur de forme (relation (3.50)) se déduit d'une courbe fondamentale, la caractéristique I(V) tracée pour un spectre solaire donné. La puissance maximale s'accroît d'autant plus que le facteur de forme s'approche de l'unité [4].

Si les effets dus à la résistance série R_S et à la résistance shunt R_{sh} deviennent trop importants, les relations précédentes (3.55) - (3.58) ne sont plus applicables et la relation (3.50) devient alors difficile à résoudre analytiquement [1,3].

3.7. INFLUENCE DES PARAMETRES SUR LES CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION

3.7.1. EFFETS DES RESISTANCES SERIE R_s ET SHUNT R_{sh}

Les effets des résistances série et shunt sur le comportement de la cellule peuvent être observés à partir des figures 3.7, 3.8 :

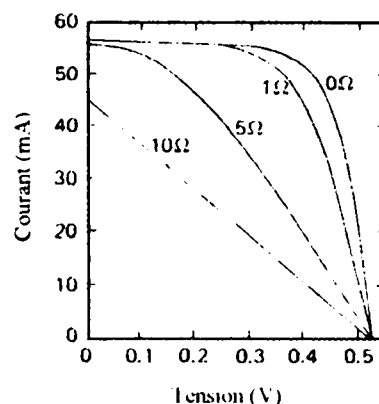


Figure 3.7. Effet de la résistance série sur une cellule solaire au silicium [1].

La résistance série a pour effet de diminuer le courant en court-circuit sans affecter la tension en circuit ouvert V_{oc} , alors que la résistance shunt provoque l'effet contraire: augmenter le courant en court-circuit et diminuer la tension en circuit ouvert. Les deux résistances ont pour effet de dégrader le facteur de forme FF.

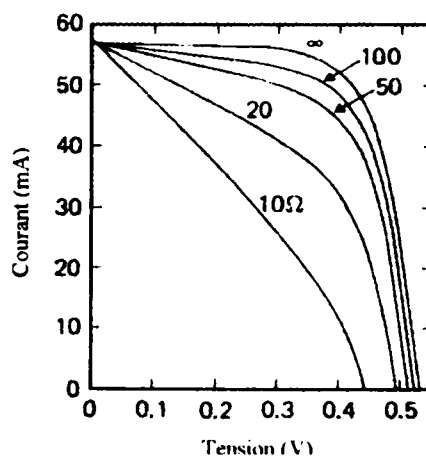


Figure 3.8. Effets de la résistance shunt sur une cellule solaire au silicium [1].

3.7.2. EFFETS DU CHAMP ELECTRIQUE ARRIERE

Généralement, le contact face arrière est un contact ohmique ayant une grande vitesse de recombinaison ($S \rightarrow \infty$), d'où la concentration des minoritaires tend vers zéro.

Afin de collecter les paires électron-trou créées par les radiations de grandes longueurs d'onde du spectre solaire, une autre configuration a été proposée: la cellule à champ arrière "BSF" (Back Surface Field) (figure 3.9).

L'introduction du champ électrique arrière améliore les caractéristiques électriques de la cellule solaire, en particulier, la tension en circuit ouvert V_{CO} par réduction du courant d'obscurité I_{obs} . En effet, les porteurs devenus minoritaires après leur injection dans la zone arrière diffusent en s'éloignant de la zone de déplétion, le champ électrique arrière "BSF" les repousse vers la jonction. Seuls les porteurs majoritaires franchissent ce gradient de dopage, encore appelé LHJ (Low High Junction) [4].

Dans une cellule solaire au silicium, avec "BSF" augmente la longueur de diffusion et la durée de vie des porteurs minoritaires en excès dans la région de base. Une augmentation dans leur durée de vie conduit à un accroissement dans la région de base de leur charge nette [10], donc, à une efficacité dans la collecte de celle-ci [27].

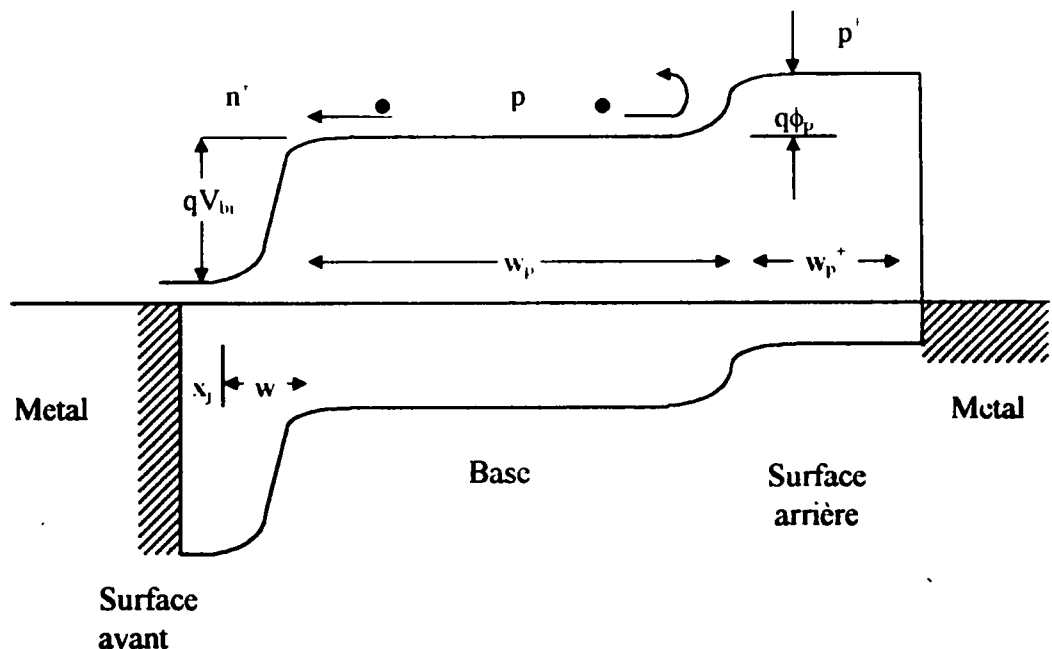


Figure 3.9. Diagramme des bandes d'énergie d'une cellule solaire "BSF" n⁺-p-p⁺ [2].

3.8. LE RENDEMENT

Une autre caractéristique électrique importante est le rendement de conversion η qui est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par le composant photovoltaïque et la puissance lumineuse qu'il reçoit. C'est un important facteur définissant la qualité des cellules. Ces dernières ont des réponses spectrales non-uniformes, elles convertissent mieux pour certaines longueurs d'onde que pour d'autres. Pour une même cellule, le rendement diffère selon le spectre solaire choisi (AM0, AM1, ...).

Le rendement de conversion, pour une distribution spectrale arbitraire, est donné par:

$$\eta = V_m \cdot I_m / P_{in} \quad (3.59)$$

où P_{in} est la puissance d'entrée (incidente), et est donnée par [1]:

$$P_{in} = A_t \int_0^{\infty} F(\lambda)(hc / \lambda)d\lambda \quad (3.60.a)$$

[ou par [3]:

$$P_{in} = A_t \int_0^{\lambda_m} F(\lambda)(hc / \lambda)d\lambda \quad (3.60.b)$$

A_t surface totale, $F(\lambda)$ nombre de photons incidents par centimètre carré par seconde par bande passante $d\lambda$ pour chaque longueur d'onde λ , et (hc / λ) l'énergie apportée par chaque photon.

$$P_{out} (max) = V_m \cdot I_m \equiv FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc} \quad (3.61)$$

Les équations sont écrites en termes de courant au lieu de densité de courant pour prendre en compte la petite différence entre la surface totale A_t et la surface active A_a [1].

3.9. EFFETS DES RADIATIONS, DE LA TEMPERATURE ET DE L'INTENSITE

3.9.1. EFFET DES RADIATIONS

Vu l'importance de la cellule solaire dans les applications spatiales, il est utile de connaître son comportement vis-à-vis des particules du rayonnement incident qui causent une dégradation considérable dans le réseau (lacunes et interstitiels, complexes lacune-impureté,...). Dans l'espace, cette dégradation résulte en une détérioration graduelle de la performance durant une période de temps. Une seule particule peut produire un grand nombre de défauts qui jouent toujours le rôle de centres de recombinaison et diminuent la durée de vie et la longueur de diffusion de la cellule [1]. Ces particules peuvent être à basses énergies (qq. keV) ou à hautes énergies (qq. centaines à une dizaine de MeV) et sont généralement soit des électrons soit des protons [4].

Cette dégradation est traduite par le coefficient de détérioration K , qui décrit le taux de variation de la durée de vie en fonction de la fluence de la particule, et par la fluence critique ϕ_c .

$$1 / \tau = 1 / \tau_0 + K_{\tau} \phi \quad (3.62)$$

où

$$K_{\tau} = \sigma \cdot v_{th} \cdot F_c \cdot P_R \quad (3.63)$$

et τ_0 la durée de vie initiale, ϕ la fluence incidente (nombre total de particules / cm^2), σ la section de capture, v_{th} la vitesse thermique, F_c la probabilité de Fermi qu'un centre de génération-recombinaison soit occupé par un porteur majoritaire, et P_R est le nombre de centres produits par centimètre par chaque particule [1].

Il est plus intéressant de décrire le coefficient K en terme de longueur de diffusion des porteurs minoritaires. La relation (3.62) devient alors:

$$1 / L^2 = 1 / L_0^2 + K_L \phi \quad (3.64)$$

et l'équation du taux de variation est:

$$d(1 / L^2) / d\phi = K_L \quad (3.65)$$

Plus faible est la valeur de K_L , plus faible sera la décroissance de la longueur de diffusion avec les radiations des particules incidentes, et plus faible sera la dégradation de la cellule. Les particules de faibles énergies (fluence critique faible, c'est à dire K_L élevé) créent des détériorations proches de la jonction, et donc augmentent le courant d'obscurité et abaissent la tension V_{oc} . Les particules aux énergies élevées pénètrent profondément dans la base et diminuent la durée de vie dans la base, réduisant ainsi le courant I_{cc} [1].

Les cellules photovoltaïques placées dans l'espace deviendront rapidement inutilisables, sans une certaine forme de protection. Lorsqu'elles sont non protégées, elles commenceront à se dégrader en quelques jours par les protons et en quelques mois par les irradiations d'électrons [4]. Le verre transparent (d'épaisseur 1-50 mil), le quartz, le saphir, ..., sont utilisés comme moyens de protection de la cellule afin de prévenir sa dégradation par les particules énergétiques. Ils sont collés à la surface par un adhésif transparent. Une autre possibilité est de déposer une couche de SiO_2 , Al_2O_3 , ... etc., directement sur la surface mais avec des épaisseurs moindres. Plus grandes sont l'épaisseur et la densité du verre, plus grande sera sa capacité à minimiser le nombre de particules énergétiques atteignant la cellule [1].

3.9.2. EFFET DE LA TEMPERATURE ET DE L'INTENSITE

L'intensité du rayonnement et la température de travail ont une grande influence sur le comportement de la cellule, que ce soit dans les applications spatiales ou terrestres.

Les longueurs de diffusions dans Si et GaAs croissent avec la hausse de la température, ce qui améliore le courant en court-circuit, et la limite d'absorption se déplace alors vers les faibles énergies.

La tension en circuit ouvert décroît fortement avec l'élévation de la température due à la forte augmentation du courant d'obscurité. Le rendement des cellules Si décroît (V_{oc} et FF faibles) à

une vitesse de $0.04 - 0.06 \% / ^\circ\text{C}$ ($\Delta\eta / \Delta T$) et ces cellules deviennent inutilisables à $T > 200 ^\circ\text{C}$. Quant au rendement dans les cellules GaAs, il reste constant et décroît à $0.02 - 0.03 \% / ^\circ\text{C}$ pour des températures supérieures à $80 ^\circ\text{C}$. Ces cellules sont utilisables jusqu'à $350 ^\circ\text{C}$.

Le courant en court-circuit augmente linéairement avec l'accroissement de l'intensité alors que la tension en circuit ouvert croît logarithmiquement. Aux faibles intensités, la résistance shunt et la qualité de la jonction deviennent très importantes, alors que la résistance série prend de la considération aux intensités élevées et la conception de la grille devient très importante. Le rendement croît légèrement avec l'intensité jusqu'au point où le facteur de forme FF décroît (les effets de la résistance série l'emportent sur l'amélioration de la tension en circuit ouvert) [1].

3.10. PERTES D'ENERGIE DANS LA CONVERSION PHOTO-VOLTAIQUE

La figure 3.10 et le tableau 3.1 résument les mécanismes de pertes d'énergie dans une cellule solaire. Les facteurs limitant le rendement énergétique sont d'ordres extrinsèques (pertes par réflexion, résistance série dépendant de la technologie de prise de contact et du dessin de la grille, température de fonctionnement trop élevée, absorption dans la couche fenêtre, mauvaise collecte des photoporteurs) ou intrinsèques; une seule cellule ne peut convertir tout le spectre solaire. Les photons d'énergie inférieure à l'énergie de la bande interdite E_g du semi-conducteur ne sont pas absorbés, tandis que l'énergie en excès de E_g est perdue sous forme de chaleur.

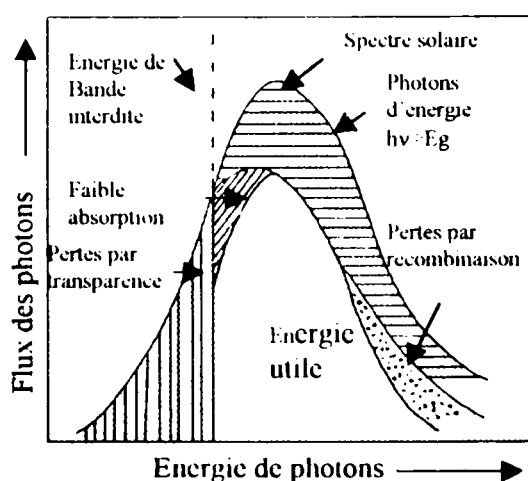


Figure 3.10. Rendement de collecte d'une cellule solaire.
Mécanismes de pertes d'énergie [3].

Pertes de photons		
Régions	Mécanismes	Formes de perte
Couche de protection et antireflet	Réflexion Absorption	Rayonnement de photons Chaleur
Grille	Ombre	Rayonnement de photons et chaleur
Couches actives	Réflexion en face avant Photons ne générant pas de photoporteurs Excès d'énergie	Rayonnement Chaleur Chaleur
Pertes de porteurs		
Faces avant et arrière	Recombinaison superficielle	Chaleur
Couches actives	Recombinaison	Chaleur
Jonction	Recombinaison des porteurs et des photoporteurs	Chaleur
Pertes de puissance		
Couches actives	Pertes ohmiques	Chaleur
Contacts	Pertes ohmiques	Chaleur

Tableau 3.1. Mécanismes de pertes d'énergie dans une cellule solaire [3].

3.11. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exposé les caractéristiques électriques et le comportement du composant photovoltaïque, après avoir analysé les phénomènes qui interviennent sur le transport des charges dans ses différentes parties. La résolution des équations a été basée sur l'hypothèse que la mobilité, la durée de vie et le dopage sont constants en fonction de la position dans la base. Sans cette hypothèse, les résultats analytiques du photocourant ne peuvent être obtenus, et les méthodes numériques deviennent indispensables. Plusieurs méthodes existent pour la résolution des équations non linéaires telles que celles décrivant le comportement de tels dispositifs. Certains simulateurs permettent la résolution de ces équations et la modélisation des composants semi-conducteurs.

4.1. INTRODUCTION

L'optimisation des performances d'une cellule solaire est, généralement, étudiée en variant la conception du composant ou un paramètre spécifique tout en gardant le reste des paramètres constants. Seulement, ces paramètres sont influencés par la fabrication du composant et ne doivent pas être considérés comme des variables indépendantes. La fabrication et la caractérisation des cellules modèles reviennent très onéreuses. On a recours à la modélisation. Différents modèles sont utilisés pour simuler le comportement et déterminer les caractéristiques des cellules solaires avec différentes conceptions. Des modèles à une, deux, et même trois dimensions sont utilisés suivant la précision de la simulation avec l'accroissement de la complexité. La tâche est toujours de résoudre les équations de transport de base gouvernant le comportement des porteurs de charges.

L'étude de ces modèles revient à examiner leur comportement à travers les paramètres qui les caractérisent (η , I_{cc} , V_{co} , FF). Les paramètres d'une cellule photovoltaïque, tels que le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires, leur durée de vie et la vitesse de recombinaison en surface, dépendent fortement du matériau aussi bien que de la concentration en dopants, et l'uniformité des champs dans les deux régions n'est pas toujours réalisée. Par conséquent, des approximations et

des hypothèses simplificatrices peuvent être suggérées pour permettre l'obtention de solutions analytiques. Celles-ci facilitent la compréhension des cellules solaires et aident à établir des tendances générales, bien que les aspects physiques détaillés peuvent être obscurcis. Cependant, les solutions numériques nous évitent de faire de telles simplifications et peuvent conduire à améliorer la conception des composants. Les effets des différents paramètres physiques sur les performances de la cellule peuvent être étudiés séparément

4.2. LA SIMULATION

La simulation est la procédure de construction d'un modèle et d'expérimentation (représentation formelle) d'un système réel ou proposé (à concevoir) pour:

- 1- comprendre le fonctionnement du système,
- 2- évaluer diverses stratégies pour expliquer le comportement futur du système,
- 3- évaluer les conséquences des modifications dans le choix des conditions d'utilisation.

C'est pour cela que la simulation est fort bien appréciée dans le domaine industriel, afin d'évaluer les performances du composant de façon peu coûteuse

Notons, que le modèle de simulation est un programme (logiciel) écrit dans un langage de programmation général tel que FORTRAN ou un langage de simulation tel que SIMULA [73].

4.3. DIFFERENTS TYPES DE SIMULATEURS

Ces dernières années, plusieurs simulateurs ont vu le jour, répondant à des exigences différentes. Généralement, on distingue cinq types de simulateurs, nous citons, à titre d'exemple, pour les simulateurs fonctionnels ou logiques: EPILOG [73], électriques ou analogiques: SPICE, ASTEC, ELDO [73], électriques dédiés: SYMBAL [73], et ESOPE [73], technologique: TITAN, SUPREM [73], de composants ou de dispositifs: JUPIN [73], SCAP1D, SCAP2D [50,74], PISCES [38,75], PC1D [11,14,17,19,30,38,43, 51,53,74,76]

Ayant besoin, dans notre cas, d'un simulateur de composants, nous avons opté sur le PC1D qui, étant le simulateur le plus utilisé dans le domaine photovoltaïque [11,14,17,19,30,38,43,51,53,74, 76], n'exige pas de station de travail.

4.4. LE SIMULATEUR PC1D

4.4.1. INTRODUCTION

Le PC1D (Personal computer 1 Dimension) est un programme, qui peut être exploité à l'aide des micro-ordinateurs personnels compatibles IBM, résout les équations non linéaires dépendantes du temps pour le transport quasi-unidimensionnel des électrons et des trous dans les composants à semi-conducteur, avec accent sur les composants photovoltaïques. Ce programme a joué un rôle important dans la compréhension de la physique des cellules solaires, spécialement les cellules solaires au silicium, et est devenu standard pour la modélisation de cette classe de composants optoélectroniques. PC1D a évolué pour être exécuté sous environnement windows [74].

4.4.2. HISTORIQUE

Le programme PC-1D (les versions précédentes étaient appelées PC-1D) fut entrepris en 1984 par Paul A. Basaure pendant son travail à la faculté d'ingénierie électrique à l'université d'Iowa, et fut rendu public, pour la première fois, peu après l'avoir annoncé à la 18^{ème} conférence sur les photovoltaïques IEEE PVSC (Décembre 1985). La version 1 fut le premier programme à résoudre avec succès les équations complètes d'un composant semi-conducteur sur un computer personnel pour des profils de dopages arbitraires. Les programmes antérieurs pour les computers personnels résolvaient seulement les équations des porteurs minoritaires pour des régions à dopage uniforme. Il s'approchait grandement des concepts développés pour deux précédents programmes écrits pour l'Université de Purdue SCAP1D et IBM FIELDAY.

Plus de 150 copies de ce programme étaient vendues à prix symbolique pendant plus de trois années [74].

La version 2 du PC-1D a été développée par Paul Basaure pendant qu'il menait ses recherches au département des photovoltaïques des laboratoires nationaux de Sandia. Cette version a eu sa démonstration en Septembre 1988, rendue public juste après son annonce à la 20^{ème} conférence IEEE PVSC (Mars 1989). Le programme incluait une nouvelle interface pour faire entrer les données, une autre pour la souris. Cette version a ajouté la capacité à assortir des matériaux différents dans le même problème, donnant accès à la modélisation des hétérostructures.

où σ_n est la conductivité locale des électrons et ϕ_n est le pseudo-potentiel de Fermi local. Le problème réside dans la sélection d'une dépendance spatiale supposée pour ϕ_n , à l'intérieur de chaque élément fini, qui peut être compatible avec la dépendance spatiale de σ_n , et donc avec la densité de courant J_n . Alors que la conductivité peut varier très rapidement à travers un élément, la densité de courant varie lentement.

Les efforts précédents pour modéliser un composant supposés que ϕ_n variait linéairement à travers chaque élément, ceci ne fonctionnait pas très bien dans les régions de fortes variations de conductivité. L'amélioration classique était de supposer que le courant est principalement constant à l'intérieur de chaque élément. Mais une telle approche conduit à des difficultés quand le courant est dominé par la génération ou la recombinaison à l'intérieur de chaque élément, comme dans le cas des cellules solaires. Si l'élément est assez grand pour avoir des effets de génération-recombinaison importants, alors le courant ne peut pas être considéré comme constant à travers l'élément. Par conséquent, un grand nombre de petits éléments est recherché pour une solution précise qui exige une grande mémoire dans l'ordinateur.

Le PC1D permet une variation linéaire et lisse du courant, même en présence de variation rapide de la conductivité. Dans les versions précédentes du PC1D, ceci était accompli en supposant que dans chaque élément, ϕ_n avait la forme suivante pour les problèmes à une dimension:

$$\phi_n(x) = V_t \ln(c_0 + c_1 e^{-ax} + c_2 x e^{-ax}) \quad (2)$$

où a est la dérivée spatiale du potentiel électrostatique ψ , normalisé à la tension thermique, V_t . En prenant a comme constante, le potentiel électrostatique était implicitement supposé variable linéairement dans chaque élément.

La nouvelle version réalise le même but en utilisant l'expression légèrement simple de ϕ_n :

$$\phi_n(x) = c_0 + c_1 e^{-ax} + c_2 x e^{-ax} \quad (3)$$

où σ_n est la conductivité locale des électrons et ϕ_n est le pseudo-potentiel de Fermi local. Le problème réside dans la sélection d'une dépendance spatiale supposée pour ϕ_n , à l'intérieur de chaque élément fini, qui peut être compatible avec la dépendance spatiale de σ_n , et donc avec la densité de courant J_n . Alors que la conductivité peut varier très rapidement à travers un élément, la densité de courant varie lentement.

Les efforts précédents pour modéliser un composant supposés que ϕ_n variait linéairement à travers chaque élément, ceci ne fonctionnait pas très bien dans les régions de fortes variations de conductivité. L'amélioration classique était de supposer que le courant est principalement constant à l'intérieur de chaque élément. Mais une telle approche conduit à des difficultés quand le courant est dominé par la génération ou la recombinaison à l'intérieur de chaque élément, comme dans le cas des cellules solaires. Si l'élément est assez grand pour avoir des effets de génération-recombinaison importants, alors le courant ne peut pas être considéré comme constant à travers l'élément. Par conséquent, un grand nombre de petits éléments est recherché pour une solution précise qui exige une grande mémoire dans l'ordinateur.

Le PC1D permet une variation linéaire et lisse du courant, même en présence de variation rapide de la conductivité. Dans les versions précédentes du PC1D, ceci était accompli en supposant que dans chaque élément, ϕ_n avait la forme suivante pour les problèmes à une dimension:

$$\phi_n(x) = V_t \ln(c_0 + c_1 e^{-ax} + c_2 x e^{-ax}) \quad (2)$$

où a est la dérivée spatiale du potentiel électrostatique ψ , normalisé à la tension thermique, V_t . En prenant a comme constante, le potentiel électrostatique était implicitement supposé variable linéairement dans chaque élément.

La nouvelle version réalise le même but en utilisant l'expression légèrement simplifiée de ϕ_n :

$$\phi_n(x) = c_0 + c_1 e^{-ax} + c_2 x e^{-ax} \quad (3)$$

où a est la dérivée spatiale du logarithme népérien de la conductivité de l'électron, σ_n , supposée avoir une dépendance spatiale illustrée par la figure 4.1.

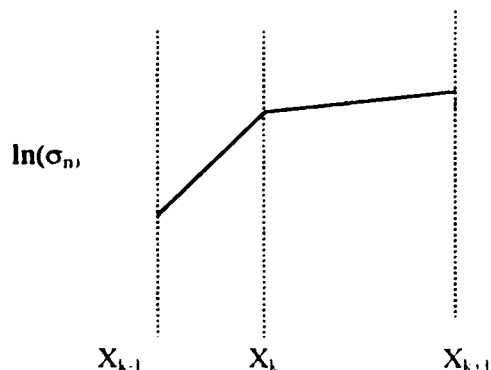


Figure 4.1. Dépendance spatiale de la conductivité des porteurs [74].

Trois coefficients sont nécessaires c_0 , c_1 , et c_2 pour décrire le comportement de ϕ_n dans chaque élément. Trois relations sont exigées pour la détermination de ces coefficients. Deux d'entre elles représentent simplement les conditions aux limites associées aux valeurs de ϕ_n de chaque côté de l'élément aux valeurs aux nœuds. La troisième relation compare la différence de la densité de courant, sur les deux côtés de l'élément, à la génération nette moins la recombinaison (G-R) dans l'élément. L'expression résultante de ϕ_n , combinée avec la dépendance spatiale supposée de la conductivité, fournit une représentation précise de la variation spatiale du courant dans chaque élément, qui est compatible avec des générations et recombinaisons considérables.

Il y a trois potentiels inconnus ϕ_n , ϕ_p , et ψ . Il faut, en conséquence, trois équations pour chaque nœud. Une équation à chaque nœud met le flux des électrons, hors le groupe des éléments qui sont en commun avec ce nœud, égale à la (G-R) totale dans ces éléments. Une approximation identique pour les trous se fait. La troisième équation est l'équation électrostatique de Poisson. Comme ces équations sont fortement non linéaires, elles ne peuvent pas se résoudre directement, une approche itérative est nécessaire. L'approximation par la méthode de Newton permet de linéariser les équations en chaque nœud autour de la valeur de leurs courants, et l'ensemble de ces équations linéarisées est résolu directement par inversion de matrice. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'aucun changement de valeurs ne soit observé. La méthode de Newton est utilisée dans PC1D, avec la contrainte supplémentaire que les potentiels à n'importe quel

nœud ne sont autorisés à varier plus que quelques V_t pendant n'importe quelle itération.

4.4.4. PERSPECTIVES

Connaissant l'interprétation de l'approximation par les éléments finis utilisée dans PC1D présenté ici, il est possible d'étendre la méthode à deux (trois) dimensions PC2D, en utilisant les éléments triangulaires généralisés illustrés par la figure 4.2.

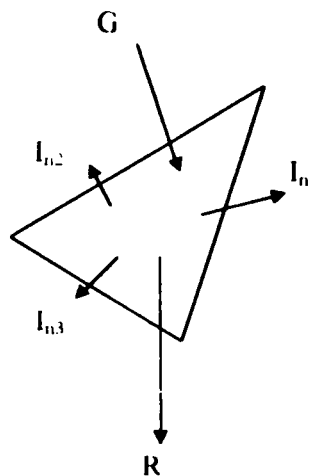


Figure 4.2. Élément fini à deux dimensions [74].

Une expression pour ϕ_n à deux dimensions est compatible avec les variations linéaires spatiales du vecteur densité de courant et les variations linéaires spatiales du logarithme de la conductivité des porteurs et est donnée par l'expression suivante:

$$\phi_n(\vec{r}) = c_0 + c_1 e^{-\vec{a} \cdot \vec{r}} + c_2 \cdot \vec{r} e^{-\vec{a} \cdot \vec{r}} \quad (4)$$

Le vecteur a est le gradient du logarithme de la conductivité de l'électron à deux dimensions. Maintenant, quatre coefficients sont nécessaires pour créer la dépendance de ϕ_n à l'intérieur de chaque élément, tenant compte des deux composantes du vecteur c_2 . Ceci exige quatre équations. Trois, sont les conditions aux limites associées aux valeurs de ϕ_n à ces trois noeuds de l'élément triangulaire. La dernière relation est le flux total des électrons quittant l'élément est égal à la génération nette moins la recombinaison à l'intérieur de l'élément. La dépendance spatiale connue

pour ϕ_n et σ_n garantit que la composante de J_n normale à la surface peut être calculée en chaque point [74].

4.5. CONCLUSION

La fabrication et la caractérisation des cellules solaires sont très coûteuses; on a, alors, recours à la modélisation.

Le programme PC1D est l'un des programmes permettant de modéliser des composants à base de semi-conducteurs, spécialement les composants photovoltaïques. Celui-ci a joué un rôle très important dans la compréhension de la physique des cellules solaires, particulièrement celles à base de silicium. Dans cette optique et afin d'obtenir de meilleures performances, nous l'avons exploité pour modéliser les opérations internes des cellules $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, Si et le tandem $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$.

Résultats et Interprétations

5.1. INTRODUCTION

Le but de notre étude est d'élucider, par un modèle, l'influence des paramètres physiques (dopage, épaisseur, profondeur de jonction) de la cellule sur le rendement énergétique. Pour déterminer les caractéristiques du composant photovoltaïque, pour différentes conceptions, le comportement est examiné à travers quatre paramètres:

- la densité de courant en court-circuit J_{CC} ,
- le rendement photovoltaïque η ,
- la tension en circuit ouvert V_{CO} ,
- le facteur de forme FF, ainsi que du rendement quantique externe.

Des rendements élevés peuvent être atteints dans des systèmes utilisant le concept de la conversion multispectrale (élargir le spectre de conversion). Dans de tels systèmes, les cellules sont empilées dans l'ordre décroissant de la largeur de la bande interdite. La cellule du sommet absorbe les photons dans l'ultraviolet et dans le visible, le reste des photons est absorbé par les cellules de faibles énergies de la bande interdite successivement.

Dans un tandem monolithique à deux jonctions, les deux cellules sont, généralement, connectées optiquement et électriquement par une diode tunnel. Dans de telles structures, les bandes interdites doivent être choisies de telle manière que les photocourants dans chaque cellule soient les mêmes.

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$ est l'un des candidats offrant un rendement élevé du point de vue "gap". En effet, le silicium a des avantages tels que: énergie de bande interdite de 1.12 eV, mécaniquement fort, abondance, technologie avancée. En outre, les composés ternaires tels que $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sont d'un grand intérêt pour les applications multispectrales, car leur bande interdite peut être ajustée, dans le but d'approcher le courant de la cellule du bas, en variant la fraction molaire de l'aluminium [47,48,57-60,78].

Dans cette optique, nous avons examiné un tel système. Le tandem à deux cellules $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$ à la structure suivante:

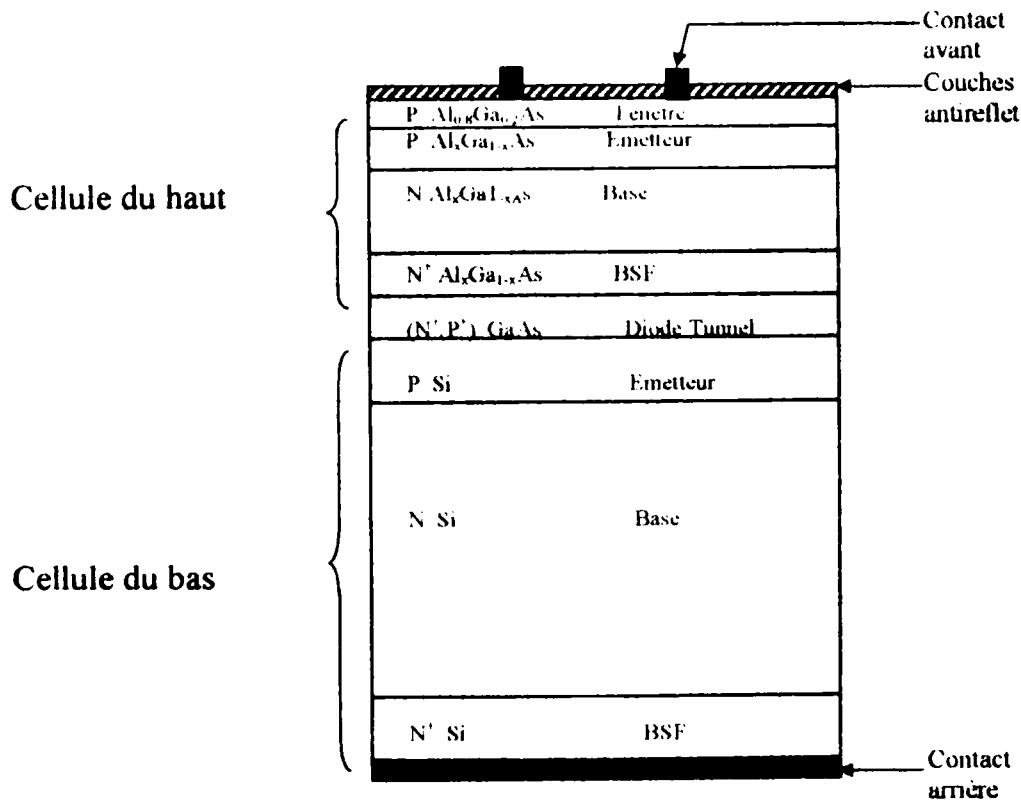


Figure 5.1. Schéma de la structure du tandem $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$.

Pour trouver les dimensions et les paramètres physiques du tandem monolithique $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$, nous nous sommes intéressés, en premier lieu, à étudier, séparément, les deux cellules formant le système: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ et Si qui sont du type P/N, pour trouver les

conditions optimales offrant le meilleur rendement (facteur important définissant la qualité de la cellule).

En second lieu, rechercher les cellules répondant aux exigences du tandem.

Cette étude est réalisée avec l'aide du simulateur PC1D, qui suppose:

- un écoulement libre des porteurs (pas de dispersion: "carrier-carrier scattering"),
- les deux porteurs restent à l'équilibre thermique au voisinage du réseau cristallin (pas de porteurs chauds),
- la mobilité des porteurs est isotropique,
- la structure des niveaux d'énergie disponibles aux électrons n'est presque pas affectée par l'excitation (bandes rigides),
- l'effet du champ magnétique est négligeable,
- la température du composant est uniforme.

5.2. ETUDE DE LA CELLULE $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Fixons tout d'abord, les conditions de travail du composant.

Dans les conditions de faible injection, nous avons considéré la valeur de la puissance d'entrée P_{in} égale à 100 mW/cm^2 pour le spectre AM1.5G et 135.3 mW/cm^2 pour le spectre AM0.

La cellule $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sur substrat Si, à étudier, a la structure représentée ci-après.

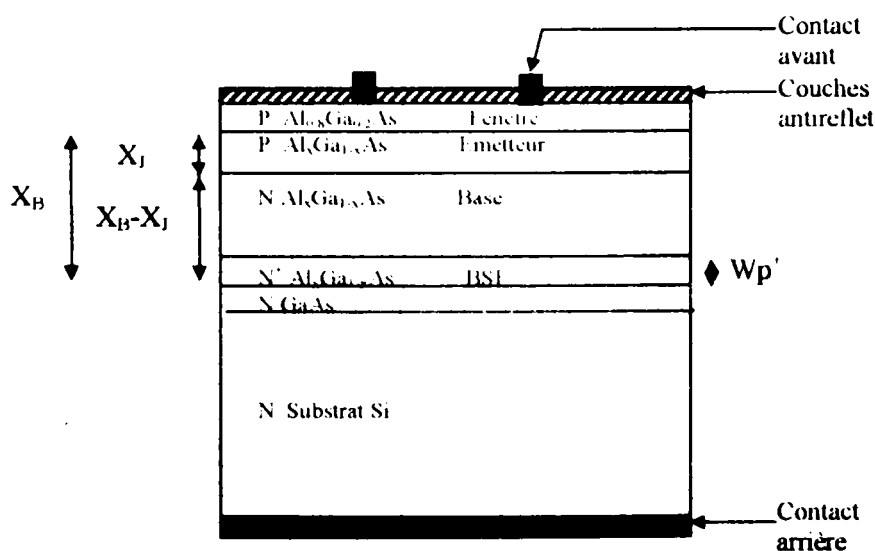


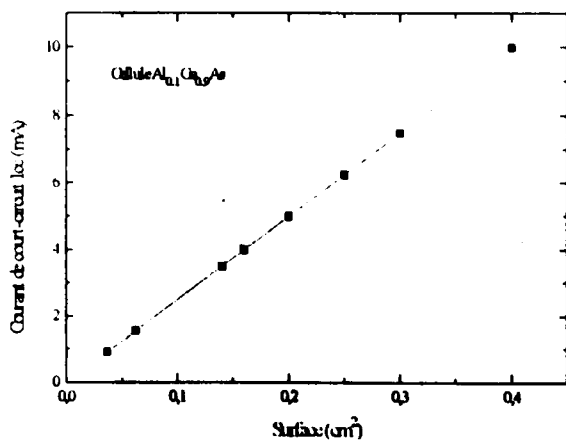
Figure 5.2. Schéma de la structure de la cellule $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

La surface avant est une surface "texturisée" recouverte de deux couches antireflet (telle que ZnS/MgF₂, utilisée dans les références [47,57,58,59]), pour diminuer les pertes par réflexion (cf. chap 2 §2.2). Comme le programme PC1D ne permet pas la présence d'une surface "texturisée" avec des couches antireflet (l'une ou l'autre), nous avons fixé, alors, les pertes par réflexion et celles dues au contact avant (vue la technologie avancée du contact métallique avant, grille [[19]) à 3%.

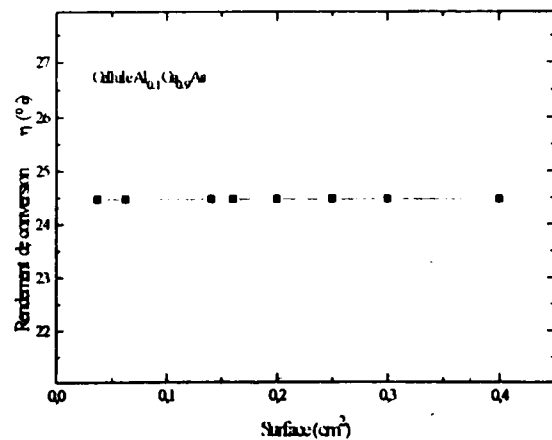
La fenêtre a pour effet de diminuer la vitesse de recombinaison en surface avant S_{front} . Pour l'hétérostructure AlGaAs/GaAs, Ringel et Rohatgi [41] ont déterminé une valeur égale à $1.25 \cdot 10^5$ cm/s. Liou et Wong [12] ont considéré une valeur qui équivaut $1 \cdot 10^4$ cm/s; d'autres auteurs ont suggéré une vitesse de recombinaison, pour la fenêtre AlGaAs, égale à 500 cm/s. Sachant que l'hétéroface Al_{0,8}Ga_{0,2}As/Al_xGa_{1-x}As présente un meilleur rapport du paramètre de maille que celui de l'hétéroface Al_{0,8}Ga_{0,2}As/GaAs, nous avons, nous aussi, adopté la valeur $S_{front}=1 \cdot 10^4$ cm/s (500 cm/s nous a semblé trop faible)

Concernant la face arrière, nous avons choisi la vitesse de recombinaison en surface arrière S_{back} égale à $1 \cdot 10^7$ cm/s dans le cas d'un contact ohmique (théoriquement $S_{back} \rightarrow \infty$), dans le cas d'une "BSF", S_{back} est choisie égale à $1 \cdot 10^4$ cm/s (théoriquement $S_{back}=0$).

Par contre, les dimensions de la surface d'une cellule solaire sont arbitraires; c'est un paramètre qui a peu d'influence sur son comportement. Cependant, il est connu qu'une surface plus grande permet d'avoir des courants plus forts, sans incidence, sur le reste (voir figure 5.3). Des intervalles de surfaces sont choisis: 0.25×0.25 cm² [3], $[0.14, 0.16]$ cm² [20], 45×45 mm² [44], 4×4 mm², 3.5×3.5 mm² [45], 5×5 mm² [47,57,58], et 3.7 mm² [60], 0.13 cm² [78], pour les cellules GaAs et AlGaAs. Dans notre cas, nous avons opté, à titre indicatif, pour une surface de 0.25 cm².



(a)



(b)

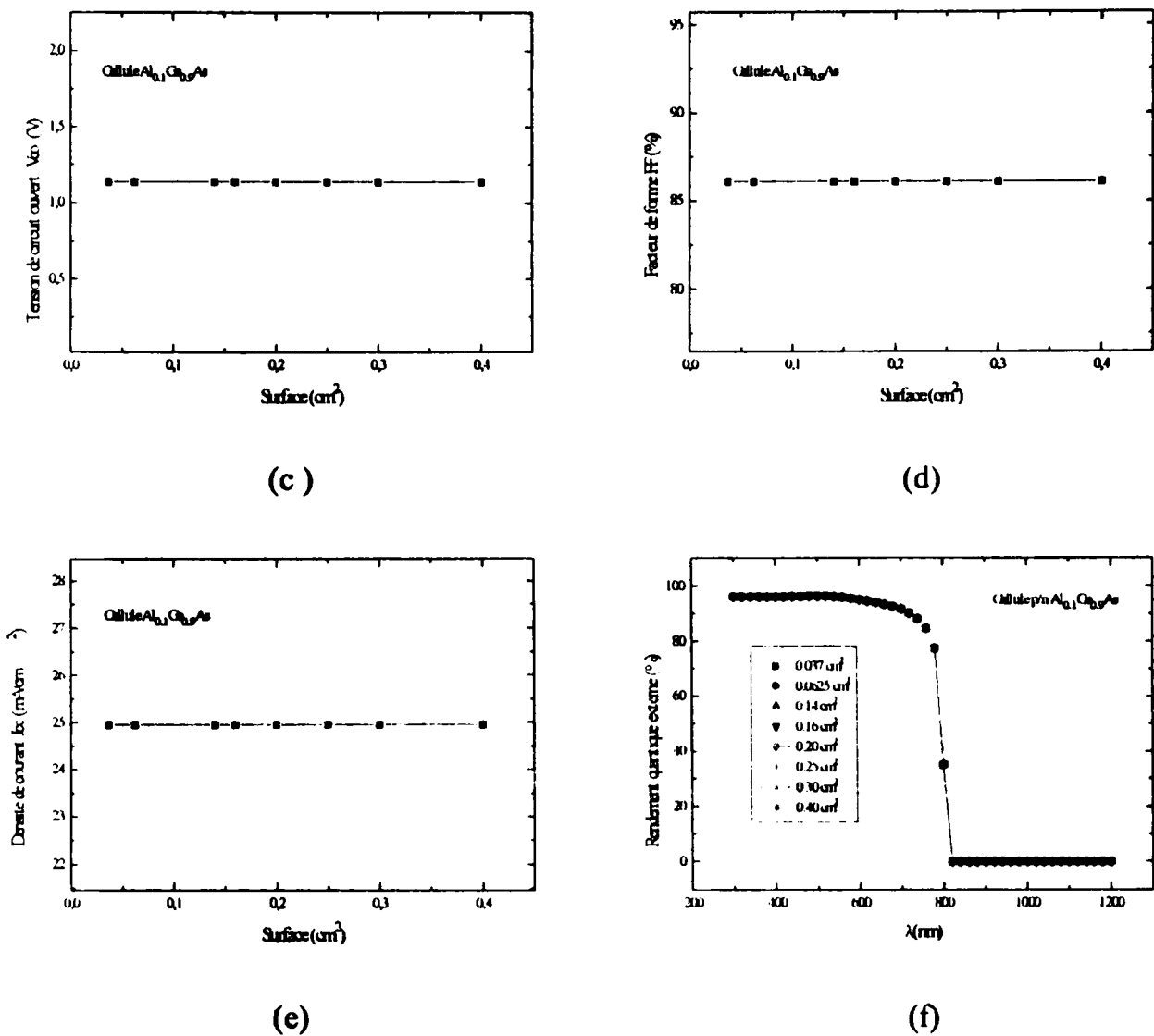


Figure 5.3. Effet de la surface sur les caractéristiques électriques et spectrale de la cellule.

5.2.1. INFLUENCE DES PARAMETRES DE LA BASE SUR LE COMPORTEMENT DE LA CELLULE

En premier lieu, pour trouver les paramètres de la cellule $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sur un substrat Si, nous avons fixé la composition en aluminium, x , à 0.1 (10%).

Nous avons, après, recherché les paramètres de la base (épaisseur (X_B-X_J) et le dopage N_D) donnant le meilleur rendement. En sachant qu'une cellule solaire a, généralement, un rendement élevé pour une couche émettrice mince et fortement dopée, nous avons adopté une profondeur de jonction $x_j=0.5 \mu\text{m}$ et un émetteur, fortement dopé, ayant pour valeur

$N_A=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, pour éviter les problèmes du rétrécissement du "gap" (bandgap narrowing) [12] (déjà la valeur critique N_C de Mott's est de $3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ à $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [79]).

Nous avons, alors, fait varier l'épaisseur X_B de la cellule dans l'intervalle [3-20 μm] pour différentes concentrations N_D dans la base, allant de $5.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ à $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Nous avons recueilli, ensuite, les résultats suivants dans le spectre AM1.5G:

La figure 5.4 montre que plus la base est dopée (moins résistive) plus la densité de courant en court-circuit diminue. La variation de celle-ci en fonction de l'épaisseur de la base, pour les différentes concentrations, présente une très légère croissance jusqu'à la valeur $(X_B-X_j)=4.5 \mu\text{m}$, au-delà de laquelle elle devient constante.

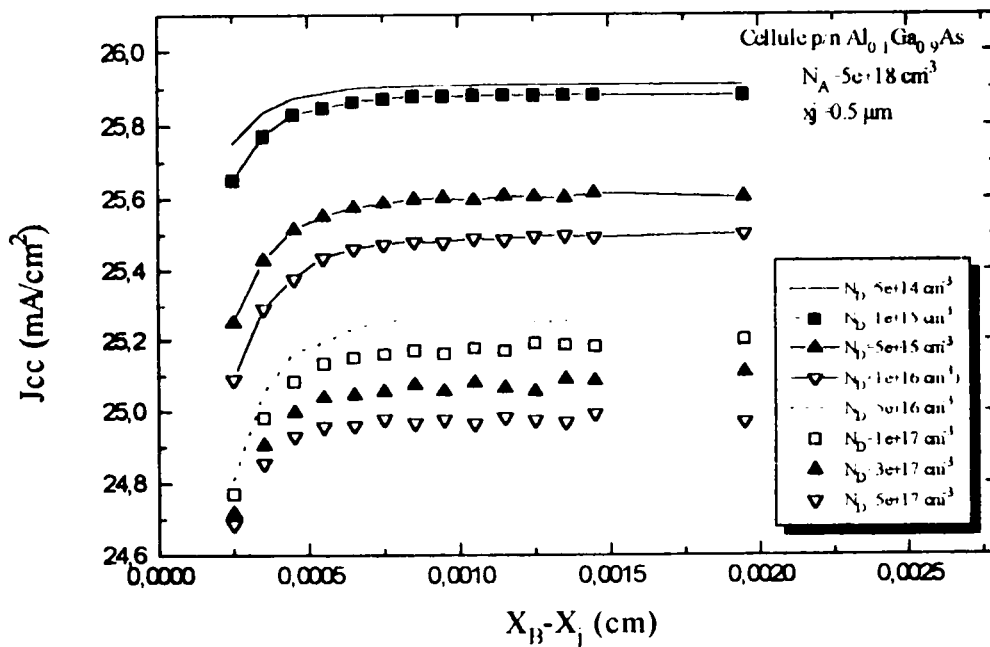


Figure 5.4. Effet des paramètres de la base sur la densité de courant en court-circuit J_{cc} .

Nous remarquons que la tension en circuit ouvert, représentée par la figure 5.5, est presque constante avec la variation de l'épaisseur de la base, mais augmente avec le niveau de dopage dans celle-ci.

La figure 5.6 illustre la dépendance du rendement de conversion en fonction de l'épaisseur

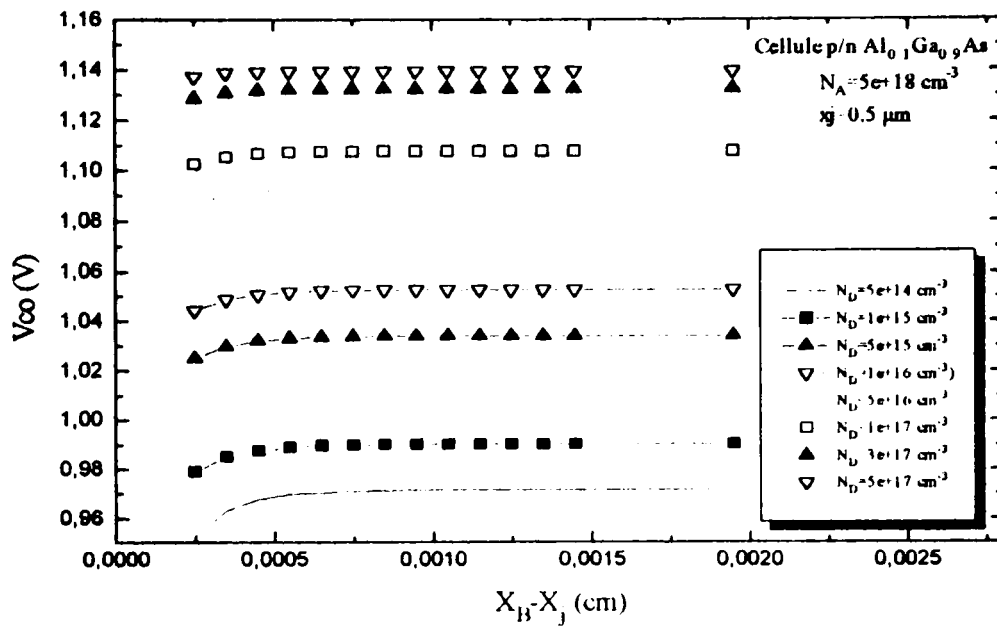


Figure 5.5. Effet des paramètres de la base sur la tension en circuit ouvert V_{co} .

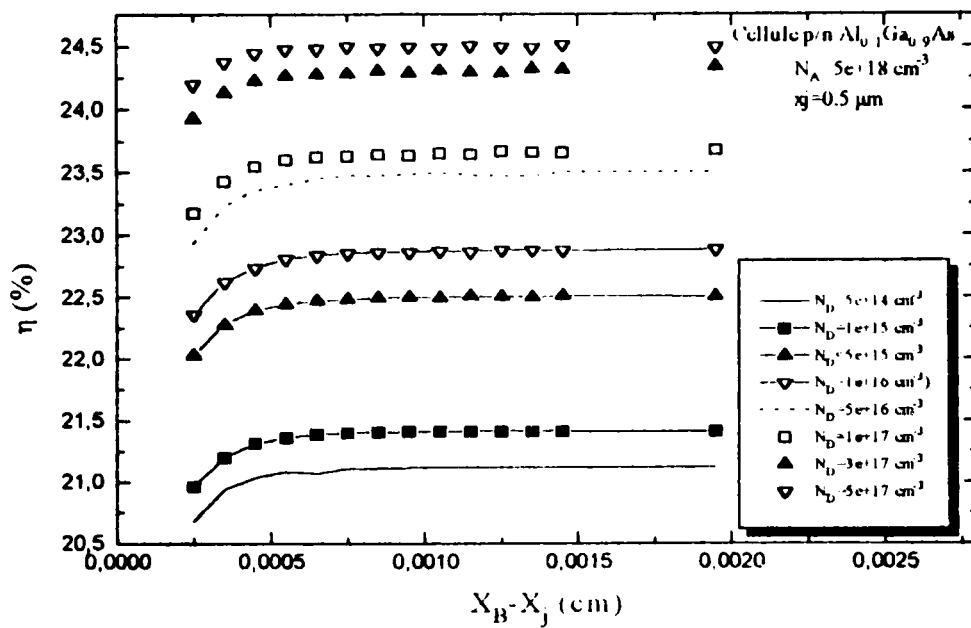


Figure 5.6. Effet des paramètres de la base sur le rendement de conversion η .

de la base et du dopage. La même variation, en fonction de l'épaisseur pour les diverses concentrations, que celle de la densité de courant en court-circuit est observée. Il croît, d'une part très légèrement, avec l'épaisseur jusqu'à la valeur 4.5 μm puis devient constant; et d'autre part, avec l'augmentation de la valeur du dopage. Nous constatons que le rendement est meilleur pour la valeur $N_D=5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ présente.

En ce qui concerne le facteur de forme, la figure 5.7 montre qu'il est meilleur pour le dopage $N_D=5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et qu'il ne croît pas directement avec la croissance du dopage.

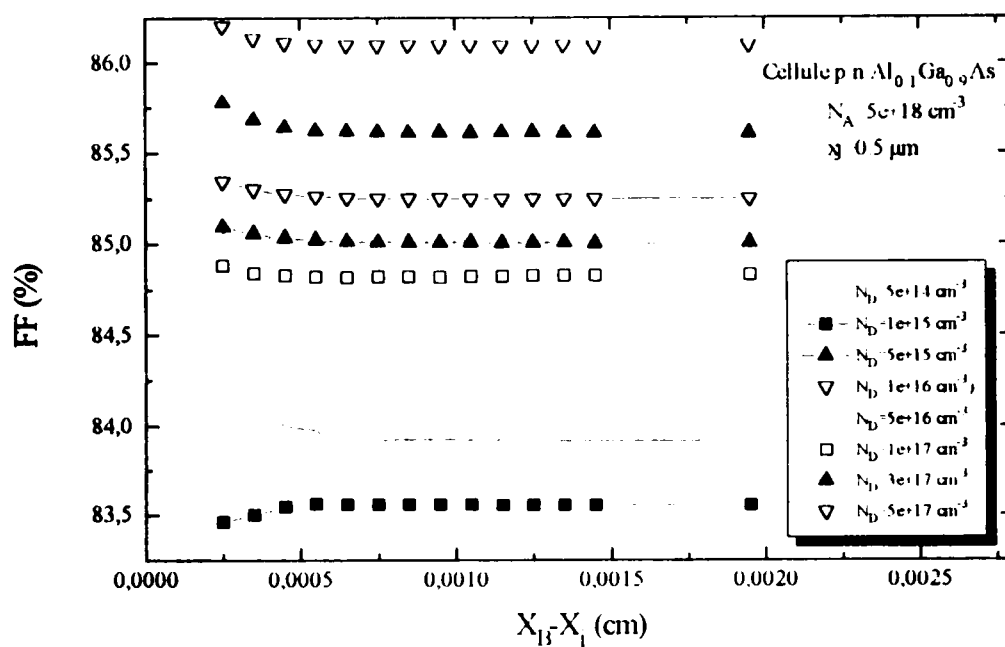


Figure 5.7. Effet des paramètres de la base sur le facteur de forme FF.

Nous constatons que le facteur de forme FF et la tension en circuit ouvert V_{co} s'améliorent, alors que la densité de courant d'éclairement J_{cc} décroît avec l'augmentation du niveau de dopage de la base. Ce résultat est lié au fait que le rendement s'améliore avec la décroissance de la résistivité de la base. De plus le courant d'éclairement est plus fort pour les fortes résistivités où la longueur de diffusion (donnée en annexe) et la durée de vie sont élevées, tandis que elles sont réduites pour les faibles résistivités. D'après Hovel [1] ceci est attribué à la dispersion des impuretés ionisées "ionized impurity scattering"

Un dopage de base de $1.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et moins peut conduire à un courant de recombinaison élevé. Ce courant est responsable de la limitation de la tension en circuit ouvert et du facteur de forme. Ce qui est confirmé par les travaux de K.C.Reinhardt [20].

Par analogie avec la cellule P/N à l'arséniure de gallium (paramètres presque similaires ($<1\%0[1,2,59,68]$)), nous pensons que la très légère décroissance de la densité de courant en court-circuit et du rendement, pour les épaisseurs de la cellule inférieures à $5\mu\text{m}$, est due au coefficient d'absorption élevé sur tout le spectre solaire au dessus de 1.4 eV.

La saturation observée pour tous les paramètres, pour $X_B \geq 5 \mu\text{m}$, est due au fait que les porteurs sont générés près de la surface, car nous sommes dans le cas d'un matériau à "gap" direct. De plus, l'épaisseur n'est appréciable que si elle est moins que deux longueurs de diffusion dans la base. Dans notre cas, les longueurs de diffusions L_p , (calculées à partir de la formule donnée dans l'annexe), suivant le dopage, sont alentours de 2 à $2.8 \mu\text{m}$.

5.2.1.1. EFFET DU "BSF"

Le fort dopage de la base dégrade légèrement la réponse spectrale aux grandes longueurs d'onde. Effectivement, cette dégradation est observée dans la figure 5.8. Elle est le résultat de la dégradation de la densité de courant.

En effet, l'augmentation du niveau de dopage de la base a pour effet de reporter une partie de la charge d'espace dans la zone avant, ce que diminue artificiellement cette zone, puisque la zone de charge d'espace est rapprochée de la surface. Aussi, la réponse spectrale, aux grandes longueurs d'onde, dépend principalement de la durée de vie et de la longueur de diffusion dans la base.

Cette dégradation est compensée par la présence d'un champ électrique arrière "BSF" puisqu'il améliore le rendement quantique aux grandes longueurs d'onde, ce qui est visible sur la figure 5.9. Ce résultat est conforme aux résultats trouvés par M.Umeno et al [47].

La légère compensation dans la réponse spectrale est reflétée sur la faible variation des trois paramètres qui sont indiqués dans le tableau 5.1 (où nous donnons les meilleurs résultats trouvés après variation de N_D^+ dans l'intervalle $[8.10^{17}\text{cm}^{-3}-5.10^{19} \text{ cm}^{-3}]$ et l'épaisseur W_p^+ dans l'intervalle $[0.8-3 \mu\text{m}]$). Car le champ arrière est plus efficace pour les épaisseurs réduites.

En conclusion, notre cellule a, donc, pour épaisseur $4\mu\text{m}$ et une base dopée à $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

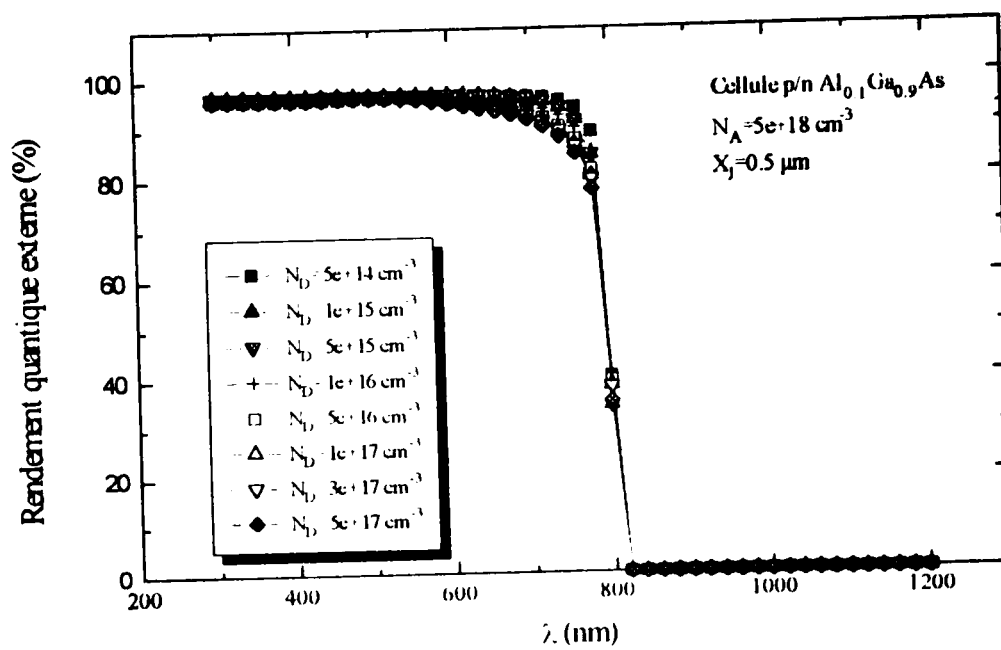


Figure 5.8. Effet du dopage de la base sur la réponse spectrale.

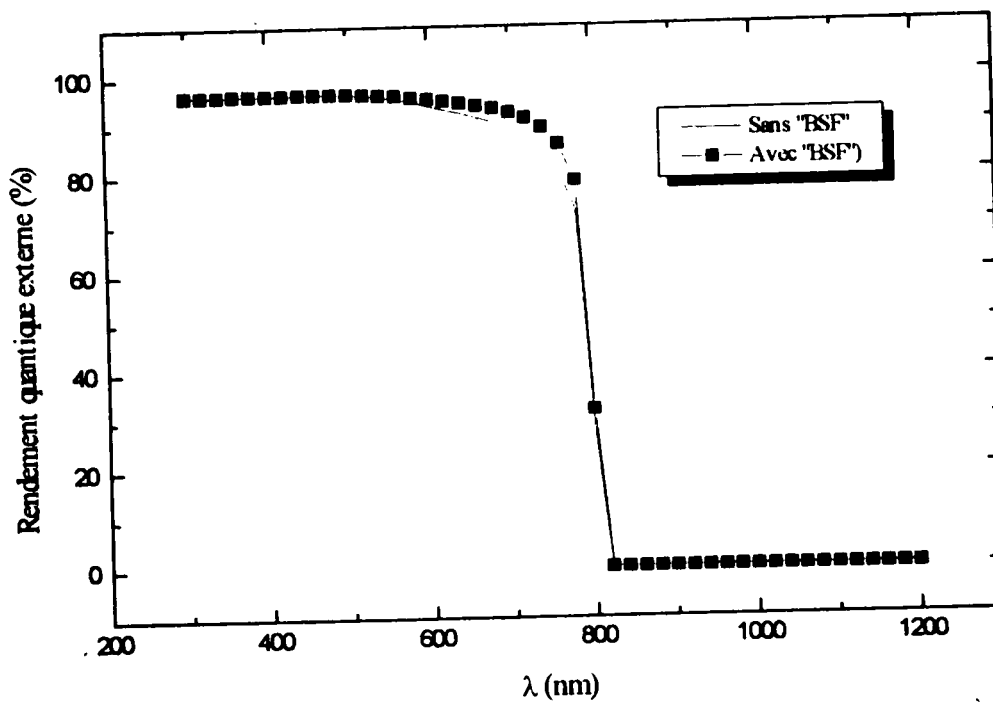


Figure 5.9. Effet du champ électrique arrière sur la réponse spectrale.

	Jcc (mA/cm ²)	Vco (V)	FF (%)	η (%)
Sans BSF	30.656	1.149	86.36	22.48
Avec BSF	31.272	1.155	86.16	23.00

Tableau 5.1. Caractéristiques photovoltaïques de la cellule Al_{0.1}Ga_{0.9}As p⁺n et p⁺nn⁺ sous AM0 pour N_D⁺=3.10¹⁸ cm⁻³ et Wp⁺=2.6 μm.

Le choix de la valeur de l'épaisseur 4 μm ($X_B - X_J = 3.5$ μm) au lieu de 5 μm ($X_B - X_J = 4.5$ μm) est appuyé par le facteur de forme qui est pour la première valeur plus élevé que celui de la seconde. De plus elle a une zone arrière dopée à 3.10¹⁸ cm⁻³ et épaisse de 2.6 μm.

5.2.2. INFLUENCE DES PARAMETRES DE L'EMETTEUR SUR LE COMPORTEMENT DE LA CELLULE

Notre choix des paramètres de base étant fait, nous avons, après, examiné les paramètres de l'émetteur. Pour cela, nous avons fait varier la concentrations en dopants N_A dans l'émetteur pour diverses profondeurs de jonction X_J. La concentration N_A est modifiée dans l'intervalle [1.10¹⁸ cm⁻³-5.10¹⁹ cm⁻³] pour des profondeurs de jonctions allant de 0.01 jusqu'à 3 μm. Par conséquent, nous avons obtenu les résultats ci-dessous:

Nous observons que la densité de courant en court-circuit, représentée en figure 5.10, pour les dopages N_A=1.10¹⁸ cm⁻³ et N_A=5.10¹⁸ cm⁻³, décroît avec la profondeur de jonction au delà de 1.2 μm. Cette décroissance s'accroît plus, pour des dopages plus élevés, à partir de 0.3 μm. Cette densité de courant se dégrade avec le dopage. En effet, elle présente les meilleures valeurs pour N_A=1.10¹⁸ cm⁻³ et semble constante dans l'intervalle [0.75-1.25 μm].

La dégradation de la densité de courant avec le fort dopage est reflétée sur la réponse spectrale, représentée en figure 5.11, où est observée une décroissance aux courtes longueurs d'onde.

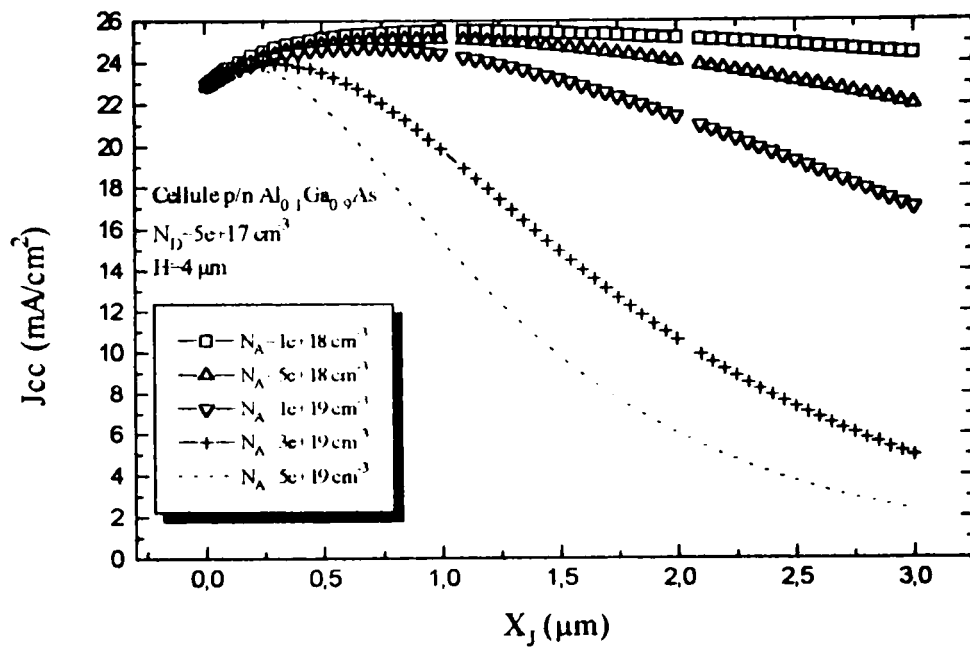


Figure 5.10. Effet des paramètres de l'émetteur sur la densité de courant en court-circuit.

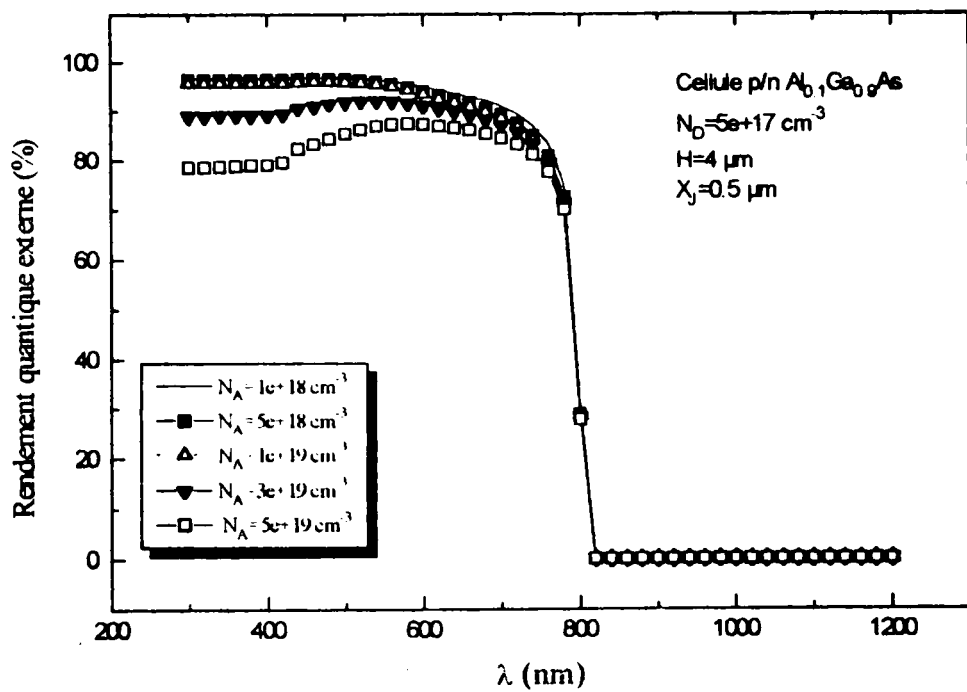


Figure 5.11. Effet des paramètres de l'émetteur sur la réponse spectrale.

Aussi, la tension en circuit ouvert, que montre la figure 5.12, chute avec la profondeur de jonction. Elle croît pour les niveaux de dopage N_A allant de $1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ jusqu'à $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, puis décroît pour les plus forts dopages (supérieurs à $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

De même, le rendement de conversion, présenté en figure 5.13, est fortement dégradé, aussi bien, avec l'accroissement de la valeur de la profondeur de jonction qu'avec les forts dopages supérieurs à $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, valeur à laquelle il montre les meilleures qualités. Il semble constant pour les valeurs inférieures à $1.25 \mu\text{m}$, pour ce dopage.

La décroissance du rendement, avec l'augmentation de la profondeur de jonction, peut être expliqué par le fait que la durée de vie des porteurs minoritaires est faible (inférieure à 10 ns). Par conséquent, les porteurs générés à la surface avant de la cellule solaire peuvent ne pas atteindre la jonction pn si l'émetteur a une profondeur de jonction grande comparée à la longueur de diffusion. Ce résultat est appuyé par les travaux de F.Dimroth et A.W.Bett [78]. En outre, la réponse spectrale dépend de la vitesse de recombinaison en surface avant et de la durée de vie dans l'émetteur .

Nous pensons que la dégradation due aux forts dopages est attribuée au rétrécissement de la bande interdite, ce qui permet une forte absorption de photons par les porteurs libres.

En conséquence, nous avons opté pour un dopage d'émetteur N_A de $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et une profondeur de jonction X_J de $0.35 \mu\text{m}$.

Finalement, notre cellule aura pour paramètres physiques et technologiques: $X_B=4 \mu\text{m}$, $X_J=0.35\mu\text{m}$, $Wp^+=2.6 \mu\text{m}$, $N_A=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_D^+=3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

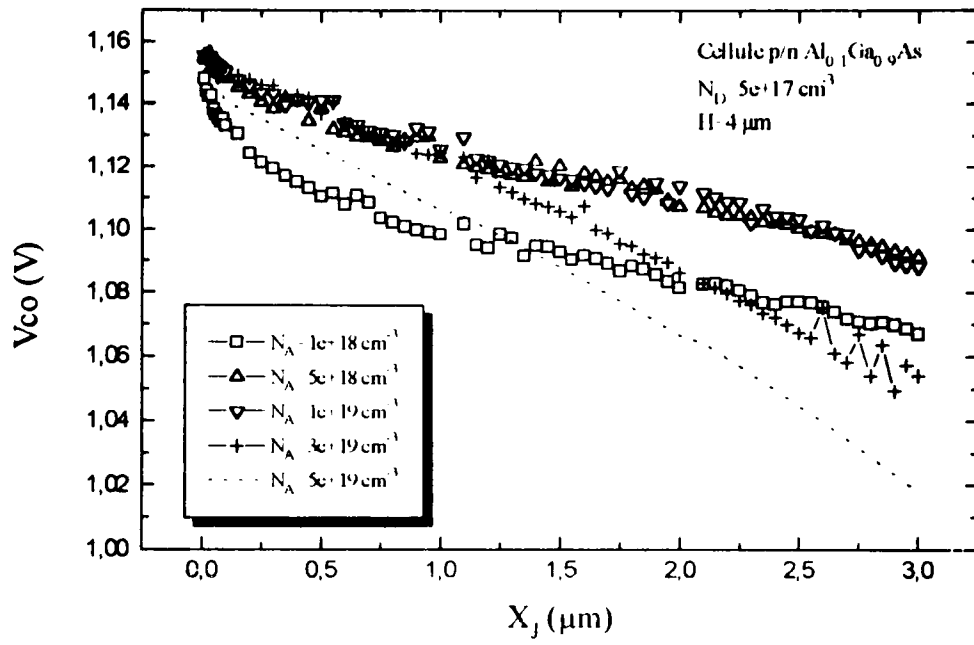


Figure 5.12. Effet des paramètres de l'émetteur sur la tension en circuit ouvert.

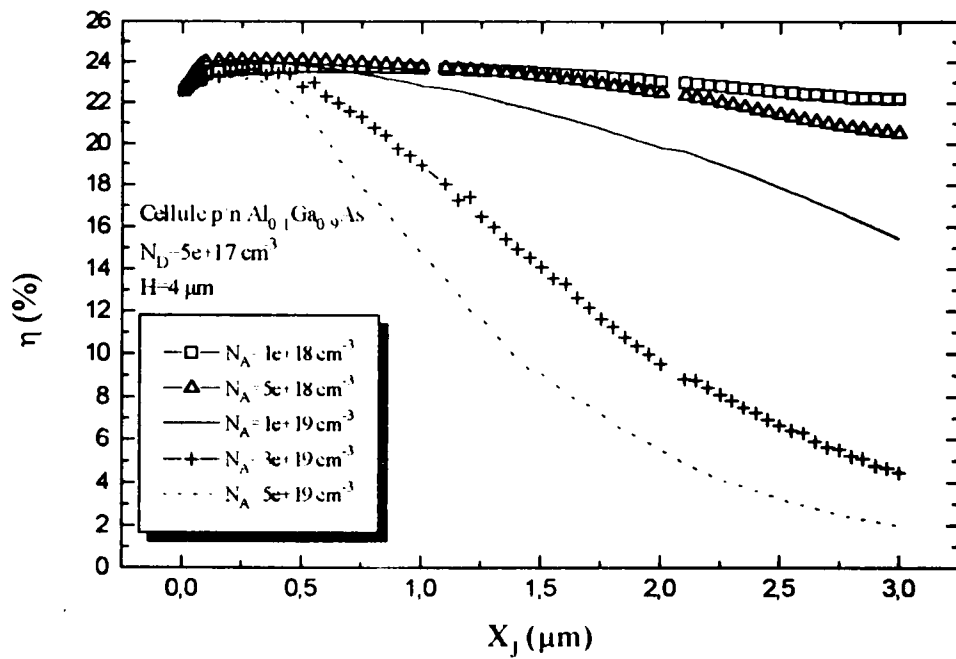


Figure 5.13. Effet des paramètres de l'émetteur sur le rendement de conversion.

5.2.3. INFLUENCE DE LA CONCENTRATION D'ALUMINIUM SUR LE COMPORTEMENT DE LA CELLULE

Avec les mêmes conditions offrant de meilleures caractéristiques, surtout du point de vue rendement, pour la cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, nous avons modifié la concentration en aluminium, x , tout en restant dans le cas d'un composé à "gap" direct ($0 < x < 0.45$).

Les figures 5.14 et 5.15 représentent, respectivement, la caractéristique courant-tension $I(V)$ et la réponse spectrale des cellules $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ pour les concentrations en aluminium $x=0.1$, $x=0.2$, $x=0.3$. Ces figures montrent que plus la concentration en aluminium augmente plus les caractéristiques de la cellule diminuent, sauf la tension en circuit ouvert augmente.

La dégradation des performances de la cellule, observée avec l'augmentation de la concentration en aluminium, est due au fait que plus la concentration augmente plus l'énergie de la bande interdite augmente ce qui résulte en une hausse de la valeur de la tension en circuit ouvert et une baisse du courant en court-circuit. Ceci est répercuté sur le rendement quantique où nous observons une dégradation aux grandes longueurs d'onde car les photons de faibles énergies ne sont pas absorbés.

De plus, cette dégradation est liée la dégradation de la durée de vie de la couche AlGaAs , qui d'une part, est causée par la densité élevée des dislocations à l'interface AlGaAs/Si ($1.1 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$, c'est pour cela qu'une couche GaAs est introduite, dans le but de réduire cette densité. Densité de GaAs sur Si à 10^4 [59]) due à la différence des paramètres de maille (4%) et le coefficient de dilatation thermique. Cette densité joue le rôle de centre de recombinaison. D'autre part, en nous reposant sur les résultats de d'autres chercheurs [47,48,58-60], la présence de Al dans AlGaAs autorise la présence de l'oxygène qui forme des niveaux profonds dans le cristal. Ceux-ci réduisent, donc, la durée de vie des porteurs minoritaires.

Nous confirmons, alors, notre bon choix de la concentration en aluminium.

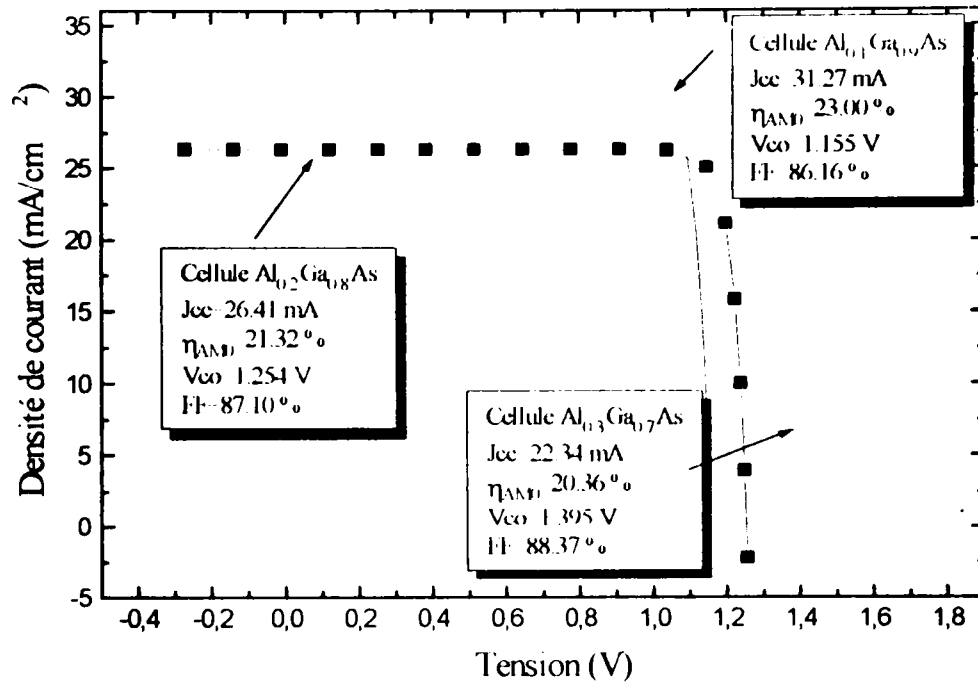


Figure 5.14. Caractéristiques I(V) en fonction de la concentration de l'aluminium.

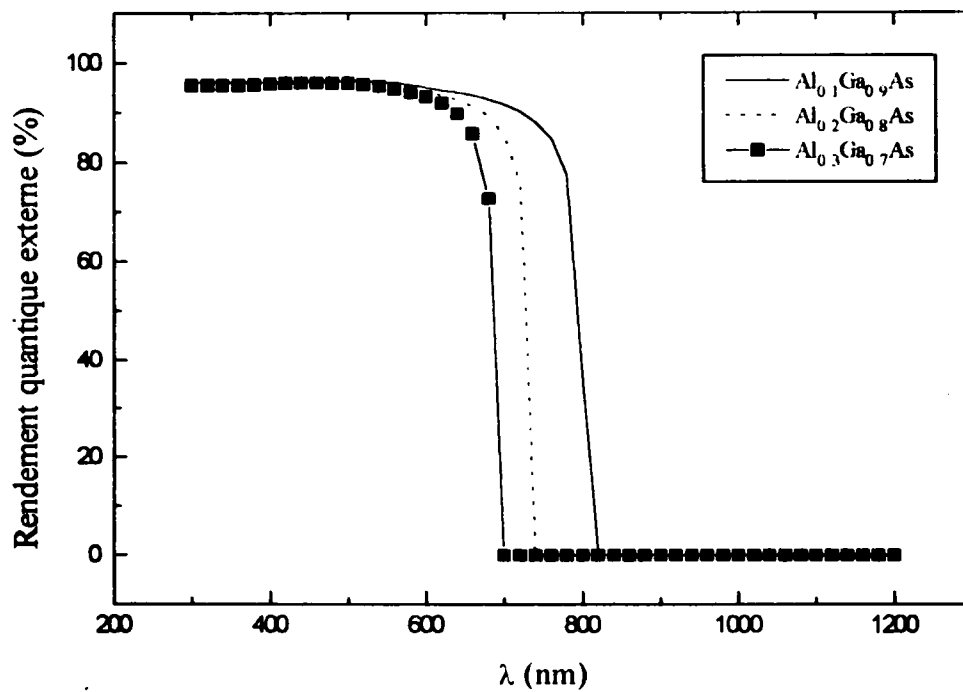


Figure 5.15. Réponse spectrale en fonction de la concentration de l'aluminium.

5.3. ETUDE DE LA CELLULE AU SILICIUM

De même que pour la cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, nous avons cherché les conditions optimales procurant le meilleur rendement. Nous avons gardé les mêmes considérations pour la réflexion 3% (les couches antireflet sont, à titre d'exemple, $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{MgF}$ utilisée dans [17,25]), la vitesse de recombinaison ($S_{\text{back}}=1 \cdot 10^7$ cm/s pour le contact ohmique) et la vitesse de recombinaison en face avant $S_{\text{front}}=1 \cdot 10^4$ cm/s que nous jugeons assez judicieuses pour le cas du silicium.

La même surface est considérée, même si avec le silicium des surfaces de 100 cm^2 sont atteintes. La structure de la cellule examinée est représentée ci-après.

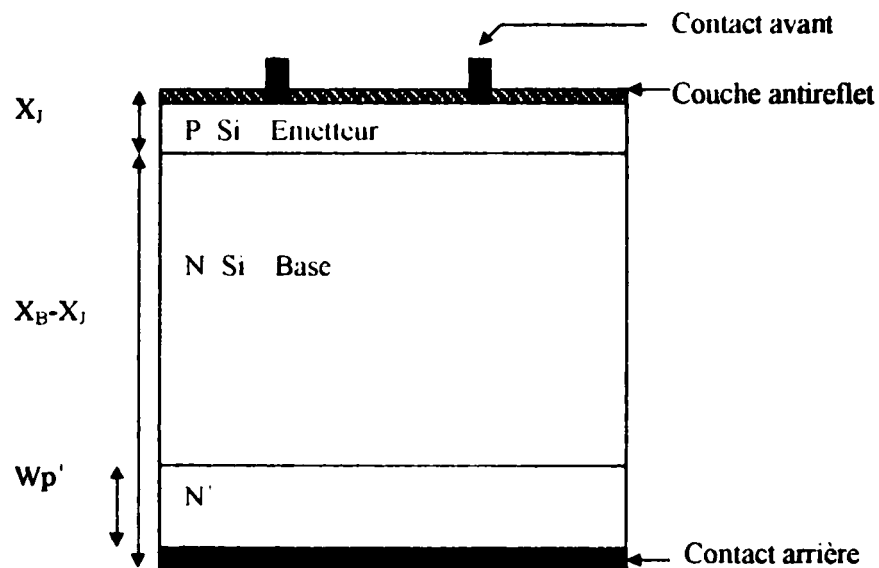


Figure 5.16. Schéma de la structure d'une cellule solaire au silicium.

5.3.1. INFLUENCE DES PARAMETRES DE LA BASE SUR LE COMPORTEMENT DE LA CELLULE

Premièrement, nous avons cherché les paramètres de la base offrant le meilleur rendement. Nous avons, en premier lieu, maintenu les mêmes caractéristiques de l'émetteur que pour la cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, en occurrence, $N_A=5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $X_j=0.5 \mu\text{m}$, et ceci pour les mêmes considérations.

Ensuite, nous avons fait varier l'épaisseur de la cellule dans l'intervalle $[50-400 \mu\text{m}]$ et ceci pour les diverses concentrations de la base de $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ à $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Les résultats obtenus dans le spectre à AMI 5G sont les suivants:

Nous avons remarqué, que pour un dopage de la base donné, la densité de courant en court-circuit, montrée par la figure 5.17, augmente avec l'épaisseur jusqu'à une valeur de saturation au alentours de 200 μm . Cependant, elle est en diminution constante lorsque le dopage de base est augmenté.

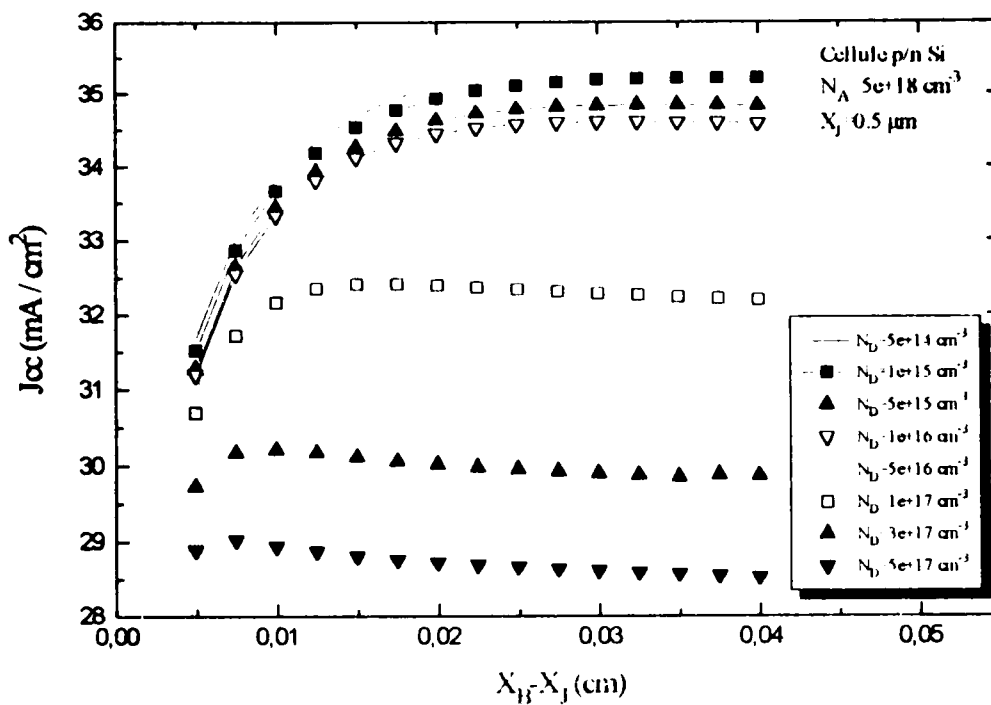


Figure 5.17. Effet des paramètres de la base sur la densité de courant en court-circuit J_{cc} .

La même tendance est constatée pour la tension en circuit ouvert, représentée en figure 5.18, en fonction de l'épaisseur. toutefois, son évolution est proportionnelle à l'augmentation du dopage jusqu'à la valeur de $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Au-delà de cette valeur le composant est aléatoire, les meilleurs résultats sont obtenus pour $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

La figure 5.19, illustrant la variation du rendement de conversion avec le dopage et l'épaisseur, montre, aussi, une croissance avec cette dernière jusqu'à la valeur 200 μm à partir de laquelle il devient constant. En ce qui concerne le dopage, il augmente jusqu'à la valeur $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ au-delà de laquelle il chute.

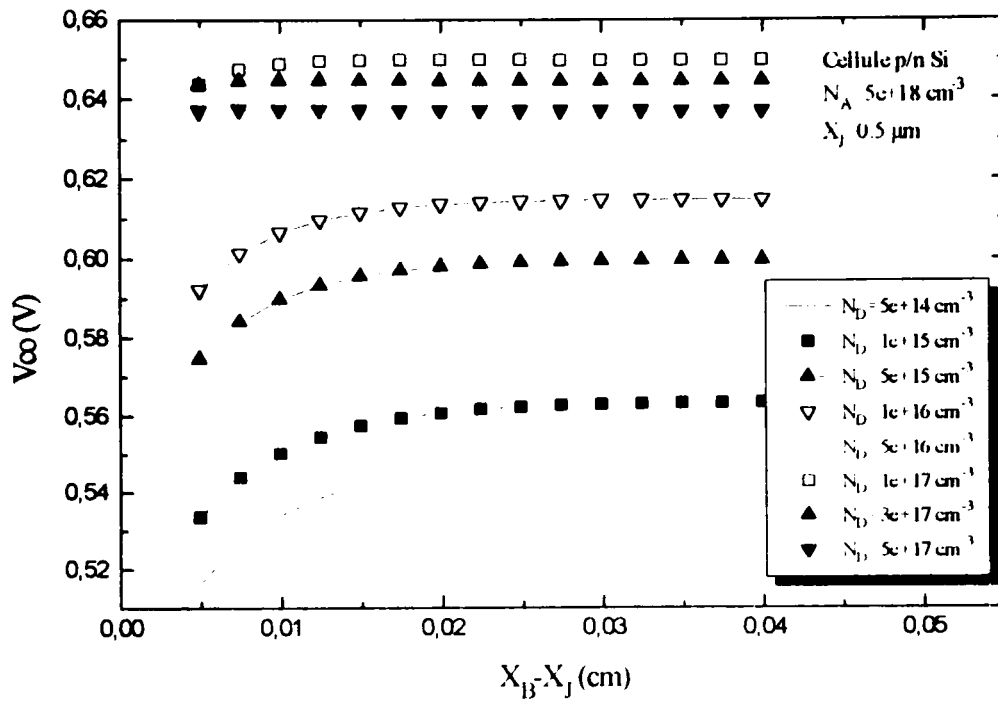


Figure 5.18. Effet des paramètres de la base sur la tension en circuit ouvert V_{oo} .

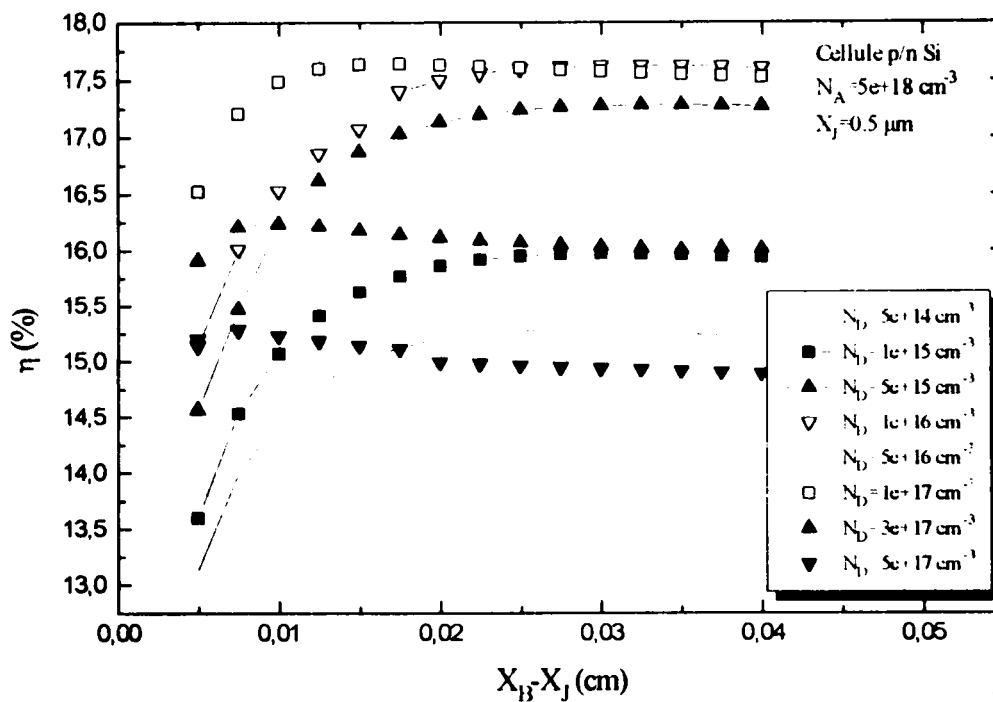


Figure 5.19. Effet des paramètres de la base sur le rendement de conversion η .

Ici aussi, nous constatons que, les densités de courants sont plus grandes pour les fortes résistivités de la base, où les longueurs de diffusion et la durée de vie sont élevées.

L'augmentation du niveau de dopage (fort dopage) a pour effet d'augmenter le courant d'obscurité dû à l'injection de la base vers la région d'émetteur, diminuant, ainsi, la tension en circuit ouvert.

Le fort dopage de la base dégrade la réponse spectrale aux grandes longueurs d'onde, que nous représentons en figure 5.20. Ceci est dû à la dégradation de la densité de courant. Effectivement, l'augmentation du niveau de dopage de la base a pour effet de reporter une partie de la charge d'espace dans la zone avant, ce que diminue artificiellement cette zone, puisque la zone de charge d'espace est rapprochée de la surface.

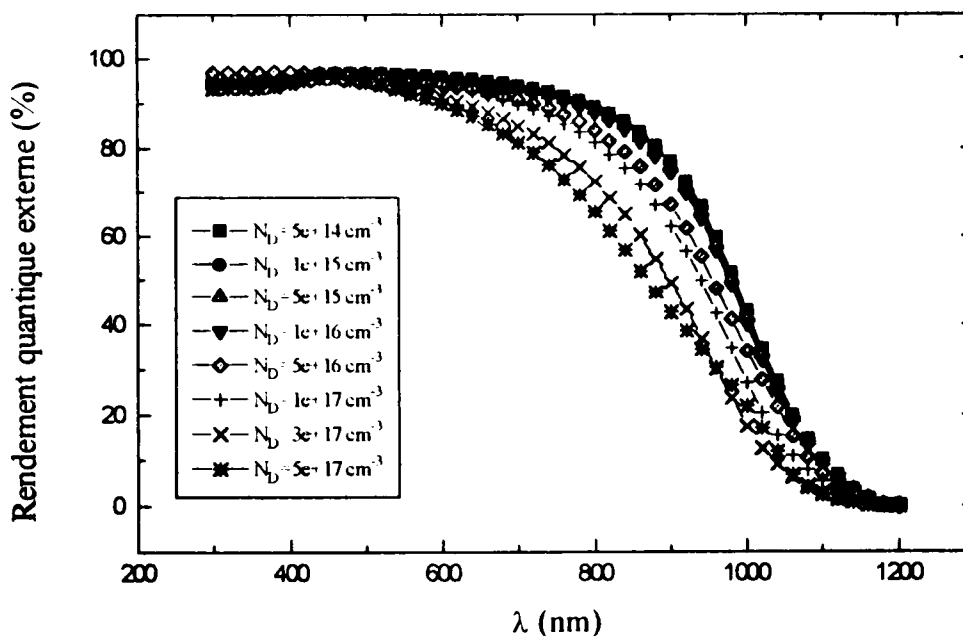


Figure 5.20. Effet du dopage de la base sur la réponse spectrale.

En conséquence, nous avons choisi la valeur de la concentration dans la base, N_D , égale à $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et la valeur de l'épaisseur de la cellule égale à $200 \mu\text{m}$, puisqu'elles offriraient le meilleur rendement et même des valeurs de densité de courant et de tension assez bonnes. Dans notre cas, la valeur $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ne présente pas de dégradation aux grandes longueurs d'onde. Par conséquent, un champ électrique arrière aura un effet presque négligeable. Ceci est confirmé par

les résultats du tableau 5.2, (après variation de la concentration N_D^+ dans l'intervalle $[8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}]$ et W_p^+ dans l'intervalle $[0.8-4 \text{ } \mu\text{m}]$.

	Jcc (mA/cm ²)	Vco (V)	FF (%)	η (%)
Sans BSF	41.2	0.6506	83.11	16.46
Avec BSF	41.6	0.6510	82.71	16.55

Tableau 5.2. Caractéristiques photovoltaïques de la cellule Si p^+n et p^+nn^+ sous AM0 pour $N_D^+=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $W_p^+=3 \text{ } \mu\text{m}$.

5.3.2. INFLUENCE DES PARAMETRES DE L'EMETTEUR SUR LE COMPORTEMENT DE LA CELLULE

Ayant fait notre choix, nous avons après étudié l'effet des paramètres physiques de l'émetteur sur les différents paramètres caractérisant la cellule. En effet, nous avons fait varier la concentration dans l'émetteur N_A de $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ jusqu'à $5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, la valeur de la profondeur de jonction varie de $0.1 \text{ } \mu\text{m}$ à $3 \text{ } \mu\text{m}$.

Des constatations sont dégagées.

En outre, la densité de courant, illustrée par la figure 5.21, croit en fonction de la profondeur jusqu'à la valeur de saturation $2 \text{ } \mu\text{m}$, pour la concentration $N_A=1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Par contre pour les fortes concentrations, la valeur de la densité de courant en court-circuit se dégrade pour les valeurs croissantes de la profondeur de jonction.

Toutefois, aucune variation significative de la tension en circuit ouvert, représentée par la figure 5.22, n'est constatée lorsque nous faisons varier la profondeur de jonction. Cependant, elle augmente en fonction du dopage.

En figure 5.23, nous constatons que, le rendement de conversion croit avec la profondeur de jonction pour $N_A=1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et, est presque constant pour les dopages inférieurs à $N_A=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Il présente un maximum à $X_J=1 \text{ } \mu\text{m}$ pour $N_A=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $N_A=1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Mais, il se dégrade avec la profondeur de jonction au-delà de ces valeurs.

Le dopage ne présente aucun effet sur la réponse spectrale, montrée par la figure 5.24.

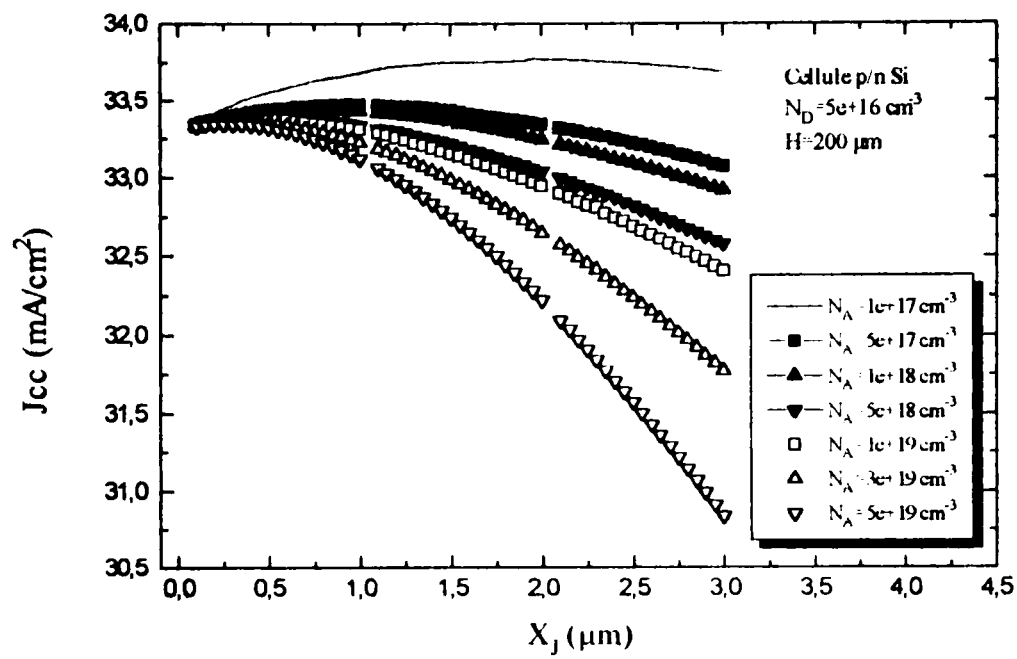


Figure 5.21. Effet des paramètres de l'émetteur sur la densité de courant en court-circuit.

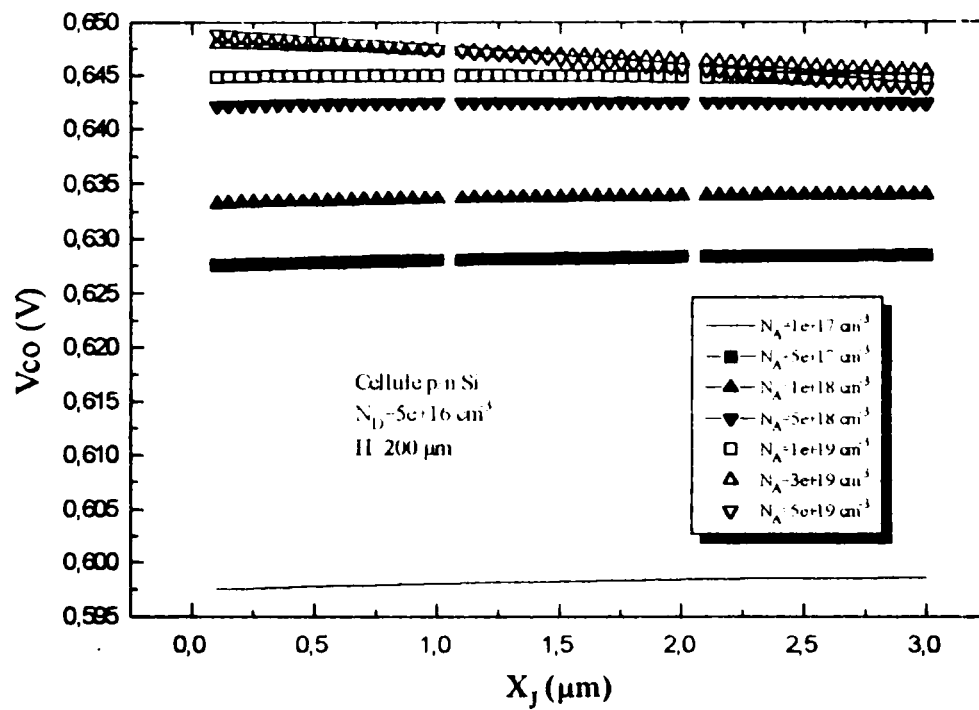


Figure 5.22. Effet des paramètres de l'émetteur sur la tension en circuit ouvert V_{co} .

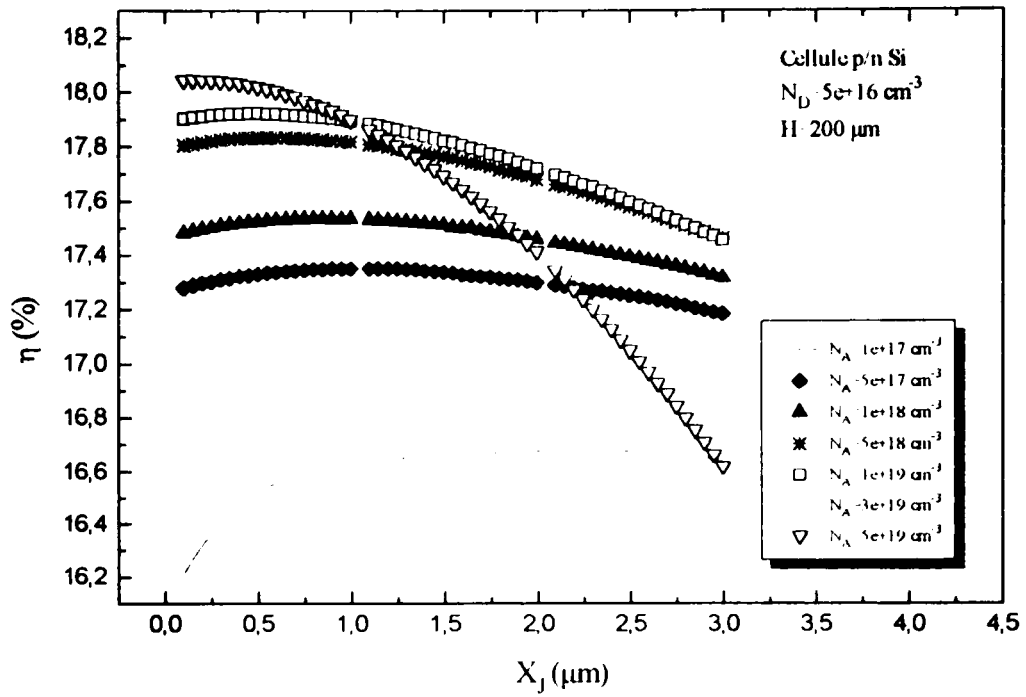


Figure 5.23. Effet des paramètres de l'émetteur sur le rendement de conversion η .

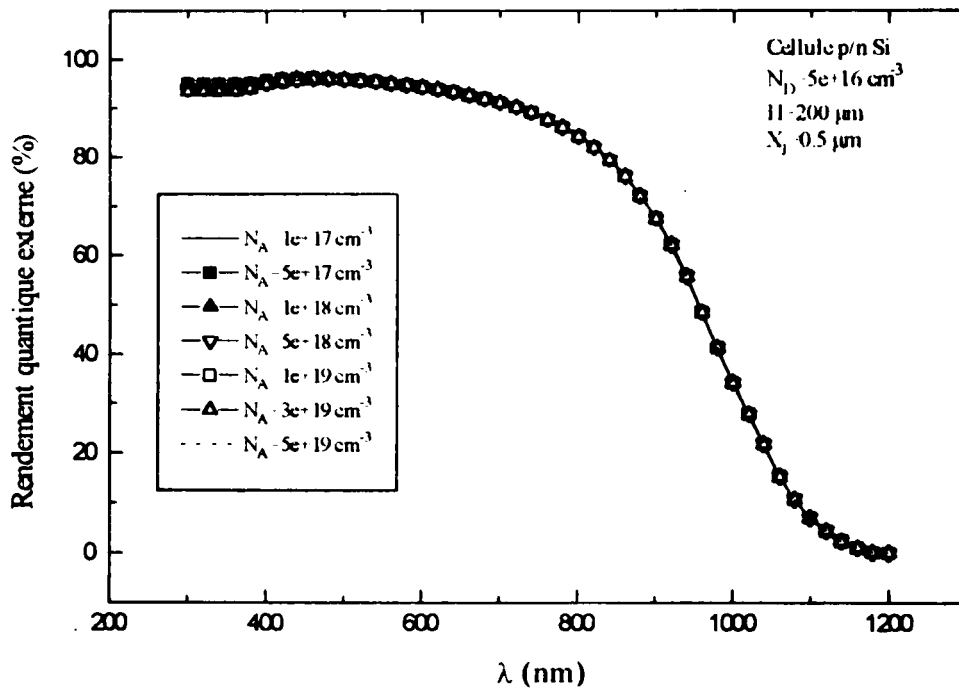


Figure 5.24. Effet du dopage de l'émetteur sur la réponse spectrale.

Nous remarquons qu'aux faibles profondeurs de jonction, le courant d'éclairement s'améliore, puisque le nombre des porteurs générés en surface diminue. Aussi, le bord de la région de déplétion se déplace vers la surface, donc, les porteurs générés ont plus de chance d'atteindre cette zone que de se recombiner.

Pour les forts dopages d'émetteur, la tension en circuit ouvert et le rendement seaturent puis décroissent. Ceci est attribué à la combinaison du rétrécissement de la bande interdite et la durée de vie extrêmement faible dans la région d'émetteur.

En conclusion, nous avons opté pour un dopage d'émetteur N_A de $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et une profondeur de jonction X_J de $1 \mu\text{m}$.

Finalement, notre cellule aura pour paramètres physiques et technologiques: $X_B=200 \mu\text{m}$, $X_J=1 \mu\text{m}$, $W_p'=3 \mu\text{m}$, $N_A=1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D'=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

5.4. TANDEM $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Si}$

Enfin, nous avons cherché les cellules répondant aux exigences du tandem.

Le choix de la cellule au silicium (cellule du bas) dépend de sa densité de courant. Les densités de courant de chaque cellule (Si et $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, cellule du haut) doivent être proches, puisqu'elles sont connectées en série. Par conséquent, la cellule Si optimale trouvée ne sera pas la cellule adéquate pour le tandem. Vu sa forte densité de courant dans le spectre AM1.5G de 33.44 mA/cm^2 (41.6 mA/cm^2 dans le spectre AM0) par rapport à la densité de courant de la cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ de 25.08 mA/cm^2 dans le même spectre (31.27 mA/cm^2 dans le spectre AM0).

Il faut, en occurrence, chercher la cellule répondant à cette condition. En réalité, une telle cellule doit avoir les performances les plus appropriées, à savoir une base de $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et une épaisseur de $400 \mu\text{m}$, pour se rapprocher de la densité de courant de la cellule du haut: $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$. En tenant compte de cette condition, l'émetteur doit être dopée à $5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et doit avoir une profondeur de jonction de $3 \mu\text{m}$. Cette cellule offre, alors, une densité de courant de $25.96.4 \text{ mA/cm}^2$.

Notre tandem monolithique $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Si}$ a la même structure représentée en figure 5.1. Celui-ci est, donc, réalisé avec cette cellule Si comme cellule du bas, la cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ comme cellule du haut. Leurs dimensions restent inchangées et une diode à l'arséniure de gallium très

fortement dopée est située entre ces deux dernières pour diminuer la densité des dislocations existant au niveau de l'interface AlGaAs/Si, ayant pour épaisseur 0.02 μm .

D'après les caractéristiques électriques, présentées dans le tableau 5.3, nous remarquons que le tandem a la même caractéristique électrique que celle de la cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$. Le rendement est meilleur que celui obtenu avec le silicium, dans tout les cas de figures. En outre, son rendement quantique s'élargit, dans le spectre, comparé à celui de la cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ seule, c'est le but recherché.

	Jcc (mA/cm ²)	Vco (V)	FF (%)	η (%)
Cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	25.076	1.148	85.94	24.74
Cellule Si (dégradée)	25.964	0.6418	82.98	13.828
Cellule Si (optimale)	33.436	0.6453	82.89	17.884
Tandem $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As/Si}$	25.076	1.148	85.94	24.74

Tableau 5.3. Caractéristiques électriques des différentes cellules.

La caractéristique courant-tension et la réponse spectrale de ce tandem sont représentées en figure 5.25 et figure 5.26 respectivement.

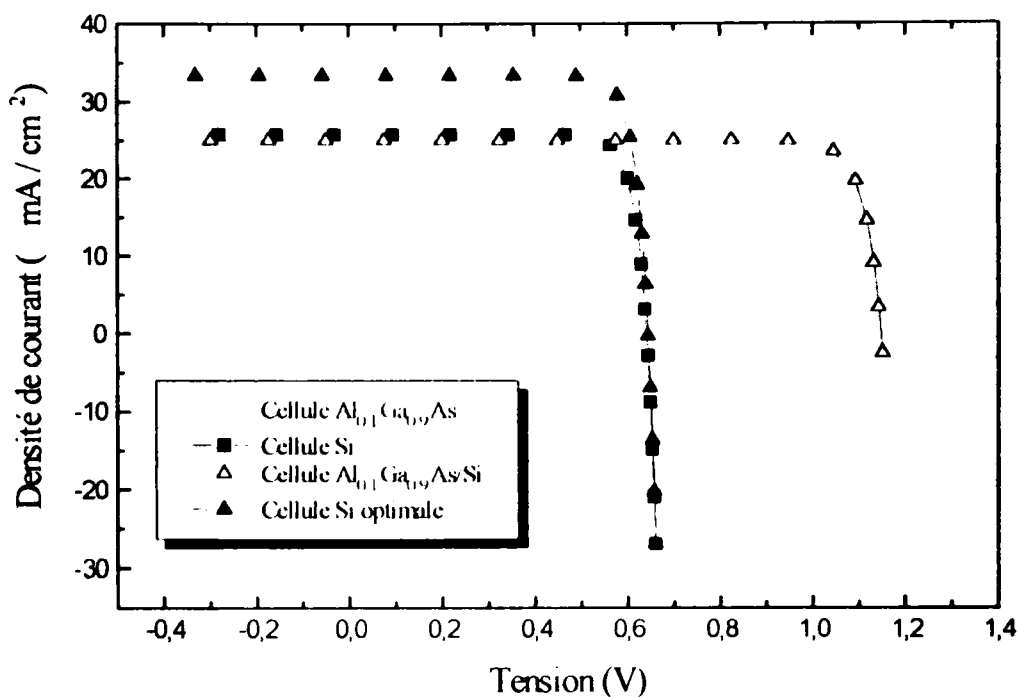


Figure 5.25. Caractéristiques I(V) du tandem AlGaAs/Si et les différentes cellules dans les conditions AM1.5G.

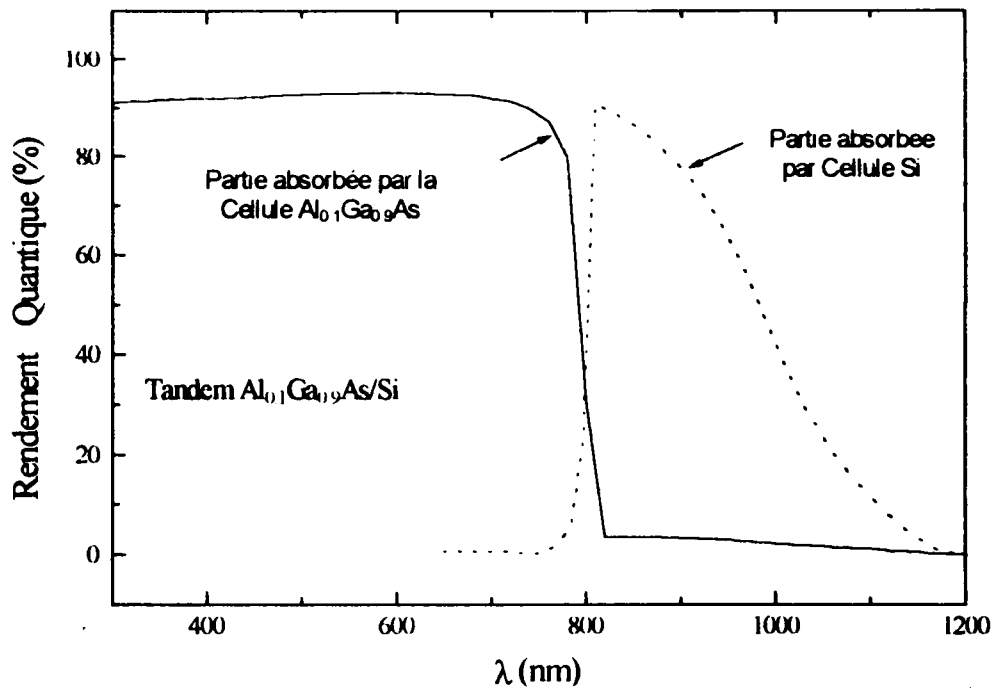


Figure 5.26. Rendement quantique du tandem AlGaAs/Si.

5.5. CONCLUSION

Nous nous sommes intéressés à l'influence de l'épaisseur, de la profondeur de jonction et du dopage dans la base ainsi que dans la région d'émetteur. La cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ était gouvernée, surtout, par les conditions dans l'émetteur, alors que celle du silicium par les conditions dans la base. Nous avons observé, aussi, le comportement de la cellule $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ en fonction de la concentration de l'aluminium.

L'analyse de ces deux cellules nous a permis de trouver les cellules les plus adéquates au tandem $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$, à savoir celles qui ont les densités de courants proches. Ceci nous a permis d'atteindre notre but, tout en ayant un rendement élevé avec un élargissement du spectre de conversion.

Conclusion Générale

Le but recherché était de trouver des cellules offrant un rendement élevé, avec une large conversion du spectre. Le tandem AlGaAs/Si était l'un des candidats répondant à ces critères.

Notre travail consistait, donc, à trouver les cellules formant le tandem.

En l'occurrence, nous avons étudié, d'une part, la cellule $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, en fixant tout d'abord la concentration x à 10 %, et d'autre part, la cellule Si. Nous avons, par conséquent, examiné l'influence des paramètres physiques et technologiques (dimensions et dopage des régions d'émetteur et de base) sur leurs rendements énergétiques à partir des caractéristiques (I-V), (P-V), ainsi que la réponse spectrale. Nous nous sommes, donc, intéressés à l'influence de l'épaisseur, la profondeur de jonction, et du dopage, dans les deux régions base et émetteur. Les deux cellules P/N étaient affectées par les conditions dans l'émetteur et dans la base. La cellule à "gap" direct $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ dépendait beaucoup plus des conditions dans l'émetteur, alors que la cellule Si, à "gap" indirect, était gouvernée par les conditions dans la base. Nous avons déterminé, par conséquent, les conditions optimales pour atteindre un rendement satisfaisant pour chaque cellule. A savoir, $N_A=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_D'=3.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour les dimensions $X_B=4 \text{ }\mu\text{m}$, $X_J=0.35 \text{ }\mu\text{m}$ et $W_p'=2.6 \text{ }\mu\text{m}$, pour la cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ et pour celle au silicium les paramètres suivants: $N_A=1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D'=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour $X_B=200 \text{ }\mu\text{m}$, $X_J=1 \text{ }\mu\text{m}$ et $W_p'=3 \text{ }\mu\text{m}$.

Aussi, nous avons observé le comportement de la cellule $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ à travers l'effet de la concentration en aluminium. Cette dernière avait pour effet de diminuer les performances de la cellule lorsqu'elle augmentait.

Cependant, les cellules formant le tandem ne sont pas nécessairement les cellules optimales trouvées. Dû au fait que les deux cellules doivent avoir le même courant puisqu'elles sont connectées en série pour le tandem monolithique. Ceci nous a permis de trouver la cellule la plus adéquate. Celle-ci est caractérisée par une base de $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, un émetteur dopé à $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, une épaisseur de $400 \mu\text{m}$ et une jonction profonde de $3 \mu\text{m}$. Sa densité de courant de 25.964 mA/cm^2 était comparable à celle de la cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ de 25.08 mA/cm^2 .

Le tandem est réalisé avec ces deux cellules. Grâce à notre analyse, nous avons pu obtenir un rendement de conversion de 24.74% , dans le spectre AM1.5G et 23% dans le spectre AM0. La caractéristique électrique du tandem était similaire à celle de la cellule $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$. En outre, la réponse spectrale s'étendait sur un spectre plus large, c'est le but recherché.

Enfin, cette étude a contribué à élargir le domaine des connaissances sur les cellules solaires. Toutefois, ce type de cellules pourrait donner des chiffres meilleurs si on s'intéressait à un émetteur à "gap" graduel. Ce qui permet d'avoir un rendement quantique s'étalant sur un large spectre d'une part, et d'améliorer la tension en circuit ouvert d'autre part.

En perspective, nous proposons d'étudier d'autres systèmes qui permettent d'atteindre des rendements plus élevés à base de matériaux III-V tels que les tandems GaInP/GaAs . En plus de l'utilisation du silicium polycristallin malgré son rendement limité (16%), mais qui présente un intérêt certain au vu de son coût.

Références

- [1] H.J.Hovel, "Solar Cells," in *Semiconductors and Semimetals*, R.K. Willardson and A.C. Beer (Eds.), vol. 11, Academic Press, New York, 1975.
- [2] S.M.Sze, "Physics of Semiconductors Devices," John Wiley & Sons (2^{ème} Ed.), 1981.
- [3] R.Zerdoum, "Etude et Réalisation de Photopiles Ga_{1-x}Al_xAs par Epitaxie en Phase Liquide," Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, Juin 1987.
- [4] M.Orgeret, "Les Piles Solaires: le Composant et ses Applications," Ed Masson, 1985.
- [5] H.Vo-Ho, R.Mullen, "Electronique Industrielle: Mesures en Milieu Industriel," 1983.
- [6] J.R.Davis, A.Rohatgi, P.Rai-Choudhury, P.Blais, R.H.Hopkins, "Characterisation of the Effects of Metallic Impurities on Silicon Solar Cell Performance," 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., vol.1, pp 666-671, 1988.
- [7] I.Tobias, A.Luque, "Series Resistance Calculations in Si Solar Cells at Very High Concentration," 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conf., vol.1, pp 289-294, 1990.
- [8] I.Perichaud, S.Martinuzzi, G.Mathian, M.Pasquinelli, J.Gervais, "Investigation of Conventional and Pregettered Multicrystalline Silicon Cells in Terms of Lifetime, Diffusion Length and Defects," 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conf., vol.1, pp 737-742, 1990.
- [9] E.Demesmaeker, M.Ghannam, E.G.Moreno, J.Nijs, R.Mertens, "Optimization of Silicon Solar Cell Emitters for Maximum Cell Efficiency," 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf., vol.1, pp 415-418, 1991.
- [10] S.K.Sharma, D.Pavithra, G.Sivakumar, N.Srinivasamurthy, B.L.Agrawal, "Determination of

- solar Cell Diffusion Capacitance and its Dependence on Temperature and 1 MeV Electron Fluence Level," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol.26, no. 3, pp 169-179, 1992.
- [11] E.G. Moreno, E. Demesmaeker, M. Ghannam, J. Nijs, "Analysis of Silicon Solar Cell Degradation in Space Using PC-1D," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol.26, no. 3, pp 189-201, 1992.
- [12] J.J. Liou, W.W. Wong, "Comparaison and Optimization of the Performance of Si and GaAs Solar Cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol 28, no. 1, pp 9-28, 1992.
- [13] C.H. Wang, A. Neugroschel, "New Technique for Lifetime and Surface/Interface Recombination Velocity Measurement in Thin Semiconductor Layers," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, vol.39, no. 3, pp 662-670, March 1992.
- [14] Z.T. Kuznicki, J.C. Muller, M. Lipinski, "A New L-H Interface Concept for Very High Efficiency Silicon Solar Cells," 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf., pp 327-331, 1993.
- [15] A.R. Burgers, H.H.C. de Moor, W.C. Sinke, R.A. Steeman, "2-D Numerical Analysis of Current Collection in Silicon Solar Cells," 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf., pp 340-346, 1993.
- [16] P.K. Basu, S.N. Singh, N.K. Arora, B.C. Chakravarty, "A New Method of Determination of Minority Carrier Diffusion Length in the Base Region of Silicon Solar Cells," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, vol.41, no. 3, pp 367-372, March 1994.
- [17] U. Creutzburg, M. Drawanz, D. Silber, "Optimizing Solar Cells Using Externally Controlled Device Simulators," 12th Europ. Photovoltaic Sol. Energy Conf., pp 1331-1334, 11-15 April 1994.
- [18] P. Grunow, R. Schiek, "Optoelectronic Characterization by Photothermal Deflection: Silicon Solar Cells," *J. Appl. Phys.*, vol 77, no 6, pp 2773-2781, 15 March 1995.
- [19] A.G. Aberle, P.P. Altermatt, G. Heiser, S.J. Robinson, A. Wang, J. Zhao, U. Krumbein, M.A. Green, "Limiting Loss Mechanisms in 23 % Efficient Silicon Solar Cells," *J. Appl. Phys.*, vol.77, no 7, pp 3491-3504, 1 April 1995.
- [20] K.C. Reinhardt, Y.K. Yeo, R.L. Hengehold, "Junction Characteristics of $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ n^+p Diodes and Solar Cells," *J. Appl. Phys.*, vol.77, no 11, pp 5763-5772, 1 June 1995.
- [21] G. Basso, B. Pellegrini, "Photocurrent Transients in Almost Ideal Silicon p-n Junctions," *J.*

- Appl. Phys., vol.78, no 4, pp 2504-2508, 15 August 1995.
- [22] S.J.Robinson, S.R.Wenham, P.P.Altermatt, A.G.Aberle, G.Heiser, M.A.Green, "Recombination Rate of Saturation Mechanisms at Oxidized Surfaces of High-Efficiency Silicon Solar Cells," J. Appl. Phys., vol.78, no 7, pp 4740-4754, 1 October 1995.
- [23] R.Corkish, D.S.-P.Chan, M.A.Green, "Excitons in Silicon Diodes and Solar Cells: A three Particle Theory," J. Appl. Phys., vol.79, no 1, pp 195-203, 1 January 1996.
- [24] D.B.M.Klaassen, J.W.Slotboom, H.C.De Graaff, "Unified Apparent Bandgap Narrowing in n- and p-Type Silicon," Solid State Electron., vol.35, no 2, pp 125-129, 1992
- [25] S.W.Glunz, J.Knobloch, D.Biro, W.Wettling, "Optimized High Efficiency Silicon Solar Cells With $J_{sc} = 42 \text{ mA/cm}^2$ and $\eta = 23.3 \%$," 14th Europ. Photovoltaic Sol. Energy Conf. and Exhibition, Barcelona, Spain, 30 June-6 July 1997.
- [26] H.ElGhitani, S.Martinuzzi, "Modelling the Influence of Dislocations on Effective Diffusion Length and Photocurrent of Polycrystalline Silicon Cells," 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., vol.2, pp 1624-1628, 1988.
- [27] B.Hartiti, J.C.Muller, A.Slaoui, P.Siffert, D.Sarti, "Back Surface Field Induced Gettering in Multicrystalline Silicon," 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf., vol.2, pp 998-1001, 1991.
- [28] H.E.Elgamel, M.Y.Ghannam, J.Nijs, R.Mertens, "High Efficiency Solar Cells on Electromagnetic Cold Crucible Cast Multicrystalline Silicon," 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf., pp 220-223, 1993.
- [29] B.Hartiti, A.Slaoui, J.C.Muller, P.Siffert, R.Schindler, I.Reis, B.Wagner, A.Eyer, "Multicrystalline Silicon Solar Cells Processed by Rapid Thermal Processing," 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf., pp 224-229, 1993
- [30] W.K.Schubert, "Multicrystalline Silicon Solar Cells: Gettering Optimization and Characterization," 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf., pp 230-235, 1993.
- [31] H.E.Elgamel, A.M.Barnett, A.Rohatgi, Z.Chen, C.Vinckier, J.Nijs, R.Mertens, "Efficient Combination of Surface and Bulk Passivation Schemes of High-Efficiency Multicrystalline Silicon Solar Cells," J. Appl. Phys., vol.78, no 5, pp 3457-3461, 1 September 1995.
- [32] A.S.Al-Omar, M.Y.Ghannam, "Direct Calculation of Two-Dimensional Collection Probability

- [44] P.R.Hageman, G.J.Bauhuis, A.van Geelen, P.C.van Rijsingen, L.J.Gilling, "Large Area Epitaxial Lift Off GaAs Solar Cells," 13th Europ. Photovoltaic Sol. Energy Conf., pp 58-60, 23-27 October 1995.
- [45] V.P.Khvoostikov, E.V.Paleeva, M.Z.Shvarts, "AlGaAs/ GaAs LPE Grown Concentrator Solar Cells," 13th Europ. Photovoltaic Sol. Energy Conf., pp 65-68, 23-27 October 1995.
- [46] C.Mingbo, Z.Zhongwei, "Development of the GaAs Solar Cell for Space Application," 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., pp 121-124, 13-17 May 1996.
- [47] M.Umeno, P.Kato, M.Yang, Y.Azuma, T.Soga, and T.Jimbo, "High Efficiency AlGaAs/Si Tandem Solar Cell Over 20%," 1st WCPEC, pp 1679-1684, 5-9 December 1994.
- [48] Y.Okada, A.Kawabata, and M.Kawabe, "Growth of GaAs and AlGaAs on Si Substrates by Atomic Hydrogen-Assisted MBE (H-MBE) for solar Cell Applications," 1st WCPEC, pp 1701-1704, 5-9 December 1994.
- [49] A.C.Gossard, "New Electronic Phenomena Based on Multilayer Epitaxy," IEEE Trans. Electron. Dev., vol. 31, no. 11, pp 1667-1672, November 1984.
- [50] F.D.Ho, T.D.Morgan, "Spice Modeling of Cascade Solar Cells," IEEE Proc.of SOUTHEASTCON, vol.2, pp 776-780, 1991.
- [51] A.H.Yahia, M.W.Wanlass, T.J.Coutts, "Modeling and Simulation of InP Homojunction Solar Cells," 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., vol.1, pp 702-707, 1988.
- [52] M.Yamaguchi, "Effects of Irradiation Temperature on Radiation Damage in InP Solar Cells," J. Appl. Phys., vol.77, no 8, pp 3679-3683, 15 April 1995.
- [53] G.Augustine, A.Rohatgi, N.M.Jokerst, R.Dhere, "Concentration-Dependent Near and Above Band Edge Absorption in Doped InP and its Effect on Solar Cell Modeling," J. Appl. Phys., vol 78, no 4, pp 2666-2670, 15 August 1995.
- [54] R.J.Walters, G.P.Summers, "Degradation and Annealing of Electron-Irradiated Diffusion Junction InP Solar Cells," J. Appl. Phys., vol.78, no 12, pp 7368-7375, 15 December 1995.
- [55] N.G.Anderson, S.J.Wojtczuk, "Open-Circuit Voltage Characteristics of InP based Quantum Well Solar Cells," J. Appl. Phys., vol.79, no 4, pp 1973-1978, 15 February 1996.
- [56] S.J.Wojtczuk, N.H.Karam, P.Gouker, P.Colter and S.M.Vernon, "Development of InP Solar

- Cell on Inexpensive SiWafers,” 1st WCPEC, pp 1701-1704, 5-9 December 1994.
- [57] T.Soga, T.Kato, M.Yang, M.Umeno and T.Jimbo, “High Efficiency AlGaAs/ Si Monolithic Tandem Solar Cell Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition,” *J. Appl. Phys.*, vol.78, no 6, pp 4196-4199, 15 September 1995.
- [58] T.Soga, T.Kato, M.Umeno, T.Jimbo, “Photovoltaic Properties of an $Al_xGa_{1-x}As$ Solar Cell ($x=0-0.22$) Grown on Si Substrate by Metalorganic Chemical Vapor Deposition and Thermal Cycle Annealing,” *J. Appl. Phys.*, vol.79, no 12, pp 9375-9378, 15 June 1996.
- [59] T.Soga, M.Yang, Y.Azuma, H.Ushida, T.Jimbo and M.Umeno, “Improvement of AlGaAs Solar Cell on Si Substrate,” 1st WCPEC, pp 1855-1858, 5-9 December 1994.
- [60] K.Zahraman, J.C.Guillaume, G.Nataf, “Epitaxial Lift-Off in Photovoltaics: Ultra Thin $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ Cell in a Mechanically Stacked (Al,Ga)/Si Tandem,” 1st WCPEC, pp 1701-1704, 5-9 December 1994.
- [61] H.Moritz, “Optical Single Layer Lift-Off Process,” *IEEE Trans. Electron. Dev.*, vol. 32, no 3, pp 672-676, March 1985.
- [62] J.R.Vaillant, “Utilisations et Promesses de l’Energie Solaire,” 2^{ème} Ed. Eyrolles, Paris, 1978.
- [63] M.Ghrieb, “Les Cellules Solaires au Silicium Amorphe Hydrogène,” Mémoire 1989-1990.
- [64] P.A.Basore, “PC-1D Installation Manual and User’s Guide,” Version 3, November 1994.
- [65] F.F.Y.Wang, “Introduction to Solid State Electronics,” North Holand Publishing Company 1980.
- [66] J.Lindmayer, C.Y.Wrigley, “Fundamentals of Semiconductors Devices,” The Van Nostrand Series in Electronics and Communications 1965.
- [67] G.Asch, “Les Capteurs en Instrumentation Industrielle,” Dunod, 3^{ème} Edition, 1987.
- [68] A.Ziari, “Etude de l’Influence des Paramètres Physiques et Technologiques des Cellules Solaires au GaAs et AlGaAs,” Thèse de Magister, Université de Constantine, 1990.
- [69] C.Jacobi, P.Lugli, “The Monte Carlo Method for Semiconductors Devices Simulation,” Springer-Verlag /Wien, 1989.
- [70] B.Jensen, A.Torabi, “Dispersion of the Refractive Index of GaAs and $Al_xGa_{1-x}As$,” *IEEE J. Qantum Electron.*, vol.QE-19, no 5, pp 877-882, May 1983.

- [71] A.Marty, "Etude des Transistors Bipolaires à Hétérojonction GaAlAs/ GaAs: Théorie et Expérience," Thèse de Doctorat, Univ. Paul Sabatier de Toulouse Juin 1980.
- [72] V.S.Kalinovsky, V.V.Komin, I.V.Kochnev, V.V.Kozlovskii, V.M.Lantratov, M.Z.Shvarts, "An Internal Bragg Reflector Influence on Radiation Resistance of AlGaAs/ GaAs High Efficiency Solar Cells," 13th Europ. Photovoltaic Sol. Energy Conf., pp 55-57, 23-27 October 1995.
- [73] I.Bazer, "Simulation de la Diffusion et de l'Implantation Ionique des Impuretés dans une Jonction PN," mémoire d'ingénieur, Institut d'Electronique, Université de Constantine, Juin 1994.
- [74] P.A.Basore, D.A.Clugston, "PC1D Version4 for Windows: From Analysis to Design," 25th PVSC pp 377-381, 13-17 May, 1996
- [75] C.S.Rafferty, M.R.Pinto and R.W.Dutton, "Iterative Methods in Semiconductor Device Simulation," IEEE Trans. Electron. Dev., vol. 32, no. 10, pp 2018-2027, October 1985
- [76] P.A.Basore, D.T.Rover, A.W.Smith, "PC-1D Version 2: Enhanced Numerical Solar Cell Modeling," 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., vol 1, pp 389-396, 1988.
- [77] PC1D Help Version 5.0, 1997.
- [78] F. Dimroth, A. W. Bett, "Liquid-Phase Epitaxy and Technology of Mechanically Stacked Al_xGa_{1-x}As - Silicon Tandem Solar Cells," 14th Europ. Photovoltaic Sol. Energy Conf. and Exhibition, Barcelona, Spain, 30 June-6 July 1997.
- [79] P.W.Hawkes, "Advances in Electronics and Electron Physics," vol.82, Academic Press, 1991.

Annexe

Largeur de bande interdite [3,70]:

<u>AlAs (1)</u>	gap direct = $E_{gd1} = 2.95 \text{ eV}$
	gap indirect = $E_{gi1} = 2.16 \text{ eV}$
	gap résultant = $E_{g1} = E_{gi1}$
<u>GaAs (2)</u>	gap direct = $E_{gd2} = 1.424 \text{ eV}$
	gap indirect = $E_{gi2} = 1.87 \text{ eV}$
	gap résultant = $E_{g2} = E_{gi2}$

Masses effectives des porteurs [3,70]:

$$1 / m_p^* = y / m_{p1}^* + (1-y) / m_{p2}^*$$

$$1 / m_{nd}^* = y / m_{nd1}^* + (1-y) / m_{nd2}^*$$

$$1 / m_{ni}^* = y / m_{ni1}^* + (1-y) / m_{ni2}^*$$

masse effective des trous du $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$

masse effective des électrons du $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$

masse effective des électrons du $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$

les masses effectives des composants de l'alliage s'expriment par:

$$m_{p1}^* = 0.85 m_0$$

$$m_{p2}^* = 0.68 m_0$$

$$m_{nd1}^* = 0.128 m_0$$

$$m_{nd2}^* = 0.063 m_0$$

$$m_{ni1}^* = 0.37 m_0$$

$$m_{ni2}^* = 0.39 m_0$$

pour les trous

pour les électrons de la vallée directe

pour les électrons de la vallée indirecte

Les densités effectives d'états pour les bandes de conduction et de valence s'écrivent:

$$N_c = 2 \cdot (2\pi m_n^* K T)^{1.5} / h^3 \cdot 10^{-6} \text{ (cm)} \quad N_v = 2 \cdot (2\pi m_p^* K T)^{1.5} / h^3 \cdot 10^{-6} \text{ (cm)}$$

avec:

$$m_n^* = [m_{nd}^{*1.5} \exp((E_g - E_{gd}) / K T) + m_{ni}^{*1.5} \exp((E_g - E_{gi}) / (K T))]^{2/3} \text{ (Kg)}$$

Mobilité des porteurs [3,70]:

$$\mu_p(N, y) = \mu_{p2}(N) (m_{p2})^{1.5} / (m_p)^{1.5} \quad (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}) \quad \text{mobilité des trous}$$

$$\mu_{nd}(N, y) = \mu_{n2}(N) (m_{nd2})^{1.5} / (m_{nd})^{1.5} \quad (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}) \quad \text{mobilité des } e^- \text{ pour les transitions directes}$$

$$\mu_{ni}(N, y) = \mu_{n1}(N) (m_{ni1})^{1.5} / (m_{ni})^{1.5} \quad (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}) \quad \text{mobilité des } e^- \text{ pour les transitions indirectes}$$

Les coefficients $\mu_{p2}(N)$, $\mu_{n2}(N)$ et $\mu_{n1}(N)$ sont définis par les relations empiriques suivantes:

$$\mu_{p2}(N) = 380 / [1 + 3,17 \cdot 10^{-17} \cdot N]^{0.266};$$

$$\mu_{n1}(N) = 165 / [1 + 8,1 \cdot 10^{-17} \cdot N]^{0.13};$$

$$\mu_{n2}(N) = 7200 / [1 + 5,51 \cdot 10^{-17} \cdot N]^{0.233};$$

où N est la densité d'impuretés.

La mobilité effective résulte de la composition des mobilités directes et indirectes pondérées par les densités d'électrons des bandes respectives soit:

$$\mu_n(N, y) = \mu_{nd} R_d + \mu_{ni} (1 - R_d)$$

où:

$$R_d = n_d / (n_d + n_i) = 1 / [1 + (m_{ni1})^{1.5} / (m_{nd})^{1.5} \exp((E_{gd} - E_{gi}) / (K T))]$$

Longueurs de diffusion des porteurs minoritaires [3,70]:

$$L_n(N, y) = L_n(N) \cdot [\mu_n(N, y) / \mu_n(N, 0)]^{0.5} \quad \text{longueur de diffusion des électrons}$$

$$L_p(N, y) = L_p(N) \cdot [\mu_p(N, y) / \mu_p(N, 0)]^{0.5} \quad \text{longueur de diffusion des trous}$$

avec:

$$L_n(N) = 8 \cdot 10^{-4} / [1 + 8 \cdot 10^{-19} N] \text{ (cm)}$$

$$L_p(N) = 3 \cdot 10^{-4} / [1 + 1,2 \cdot 10^{-18} N] \text{ (cm)}$$

Abstract

High efficiency photovoltaic devices are based both on the III-V compounds and silicon semiconductor technologies. These devices are of both single and multijunction configurations. A tandem solar cell including more than two junctions is one of the candidates for photovoltaic cell. Among many material systems, the AlGaAs/Si monolithic tandem solar cell is attractive for its high efficiency, low cost and large-area photovoltaic cell from the band-gap-energy point of view. The aim of this work is focused on semiconducting materials in Si and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ on the Si substrate and the AlGaAs/Si monolithic tandem solar cell. The optimum efficiency is determined taking into account the different factors affecting the photogenerated current, open circuit voltage and fill factor. The most considerable subject of this study in the top cell is its emitter region. The judicious choice of aluminium content of the AlGaAs layer is the particular considered point, because results reveal that efficiency decreases with increasing Al composition. Also the thickness and doping concentration are examined. Shallow and highly doped emitter improve the efficiency. High doping level effects in Si solar cells (the bottom cell) in the two regions particularly in the base are investigated taking into account the free carrier absorption. these improve considerably the open voltage and efficiency. Since, the AlGaAs/Si tandem solar cells are promising for both terrestrial and space applications, it is the object of this work to perform modeling studies in one dimension and to determine their maximum attainable global and AM0 efficiencies. Modeling and simulation are performed using PC1D simulator.

ملخص

الخلية الشمسية هي جهاز توليد الجهد ضوئياً، قادر على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية مباشرة ليحررها لحمولة بفعالية. تتكون هذه الخلية أساساً من السيليسيوم و مركبات III-V. الخلية الشمسية الترادفية المتكونة من أكثر من وصلتين هي من بين الخلايا ذات المردود العالي، و باعتبار المجال الطاقوي المحظور، فإن النظام الترادفي أحادي البلورة AlGaAs/Si ملفت للنظر بفضل ارتفاع مردوده و انخفاض كلفته.

صبنا اهتمامنا إذن على دراسة خلايا السيليسيوم و AlGaAs على أساس من السيليسيوم، ثم درسنا الثنائي AlGaAs/Si. المردود المرجو يستخرج بأخذنا بعين الاعتبار مختلف العوامل المؤثرة على التيار المتولد عن الضوء، توتر الدارة المفتوحة و " عامل الشكل".

يرتكز هذا البحث على دراسة الخلية $Al_xGa_{1-x}As$ ، خصوصاً كمية الألمنيوم فيها، إذ أثبتت النتائج أن المردود ينخفض بارتفاعها، و هذا راجع لاتساع المجال الطاقوي المحظور الذي يؤدي إلى انخفاض في عامل الامتصاص و تضاؤل زمن البقاء. كذلك فحصنا سمك الخلية و تركيز الشوائب؛ بوصلة غير عميقة (قريبة من السطح) و باعث كثير الشوائب يتحسن المردود.

أما في خلية السيليسيوم، فإننا اهتمنا بدراسة مفعول التركيز القوي في كلتي الجهتين، خاصة في منطقة القاعدة.

نظراً لأهمية النظام AlGaAs/Si في التطبيقات الأرضية و الفضائية، فإننا نهدف لإيجاد المردود الأعظمي في المجال الطيفي AM 1,5 G و AM0 بصياغة نموذج نحصل عليه باستعمالنا للمحاكي PCID.

Résumé

Les dispositifs photovoltaïques à rendement élevé sont basés sur la technologie des semi-conducteurs Si et III-V. Les multiples recherches de simulation, théoriques ou expérimentales effectuées sur les cellules solaires ont, pour seul objectif, l'amélioration du rendement de conversion. Effectivement le rendement des cellules solaires est principalement limité par le fait que le domaine des énergies du spectre solaire est trop étendu pour que la conversion photovoltaïque puisse être effectuée convenablement par un seul matériau. Dans cette optique s'inscrit l'étude du comportement d'une cellule solaire de type P/N à base de silicium, et une autre à base de composé ternaire, AlGaAs. En effet, nous avons étudié l'influence des paramètres physiques des deux cellules et du processus technologique sur leurs rendements énergétiques à partir des caractéristiques (I-V), (P-V), ainsi que la réponse spectrale. Nous nous sommes, donc, intéressés à l'influence de la profondeur de jonction et du dopage, dans les deux régions émetteur et base. Nous avons analysé, par ailleurs, l'effet de la concentration en aluminium sur la conduite photovoltaïque de la cellule AlGaAs, et une comparaison entre les comportements des deux types de cellules a été réalisée. Cette analyse, dictée par les différences de propriétés intrinsèques de chaque cellule, nous a permis d'établir un modèle théorique à rendement élevé dans les spectres AM1.5G et AM0. Enfin, pour exploiter un spectre plus large, une structure monolithique tandem constituée des deux cellules optimisées a été examinée.

Mots clés: Cellule Solaire, Tandem, AlGaAs, Si, Rendement.