

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences exactes et Sciences de la Nature et de la Vie



N° de série :.....

N° d'ordre :.....

Mémoire

Présenté au

Département de Sciences de la Matière

Présentée en vue de l'obtention

Du diplôme de

Magister en physique de matériaux

Spécialité : physique de matériaux métallique et non métallique

Option : physique de matériaux non métallique

Présentée par :

Mihi Sana

Intitulé :

**Comparaison par simulation numérique entre
les caractéristiques électriques d'une cellule
solaire en Si et une autre en Si intégré sur un
substrat en GaAs**

Soutenue : 04/07/2012

Devant le jury :

Président	Nouredine Sengouga	Professeur	Université de Biskra
Rapporteur	Afak Meftah	Professeur	Université de Biskra
Examineur	Amjad Meftah	Professeur	Université de Biskra
	Rahmene Saad	Maitre de conférences	Université de Biskra

2011-2012

الإهداء:



"ربي اوزعني ان اشكر نعمتك التي انعمت علي و علي
والدي و ان اعمل عملا صالحا ترضاه و ادخلني برحمتك

في عبادك الصالحين"

الى كل من يسكن ها هنا في سويداء قلبي :

الي مهجة الروح و بهجتها الي نبع الحنان امي...

الي مبعث الحب و الامان ابي...

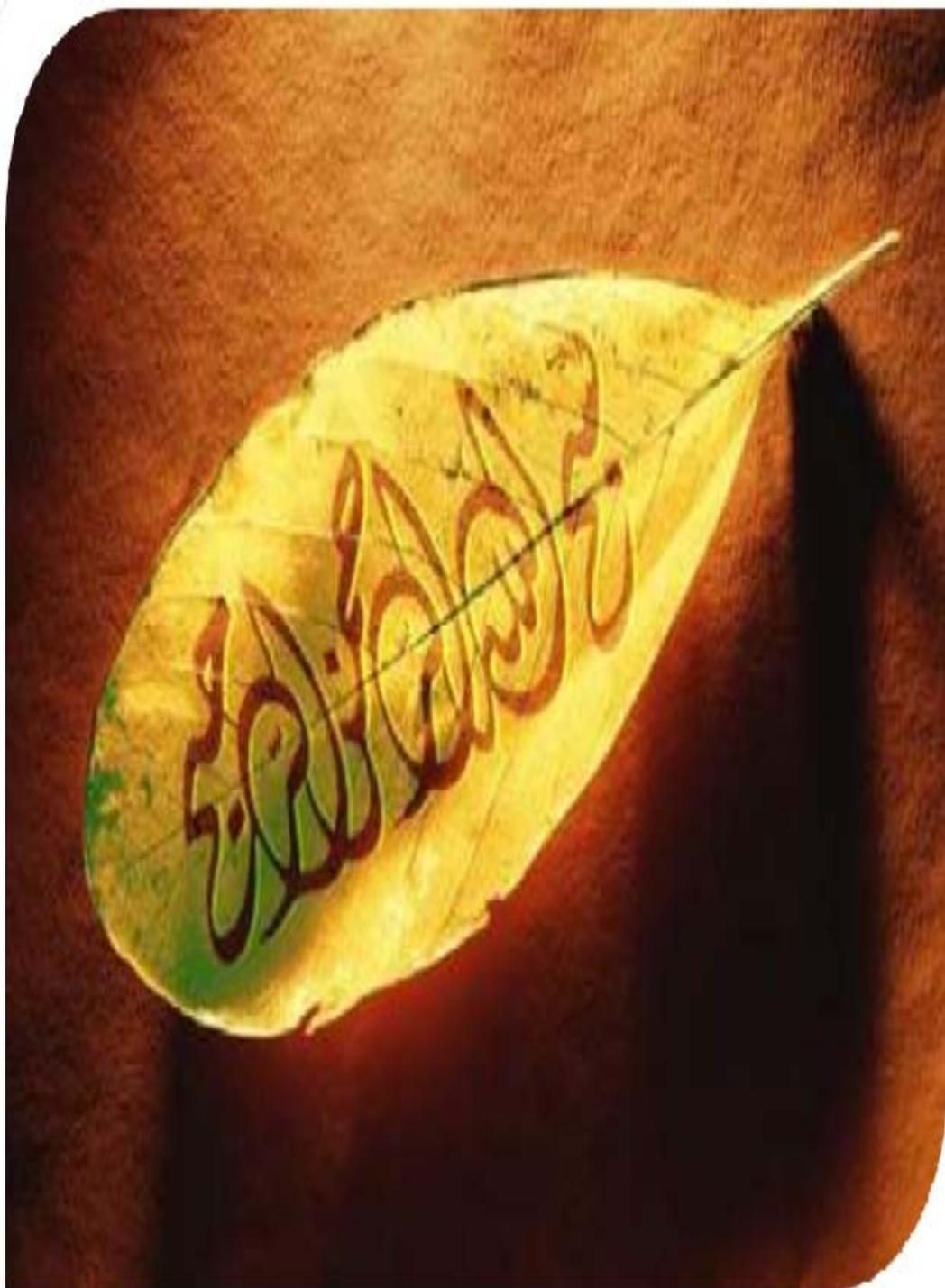
اليكم يا من قاسمتكم لحظات حزني و سعادتي اخوتي و اخواتي

خاصة اختي سماح التي ساعدتني كثيرا كما ادعوا لها بالنجاح

الي جميع رفقاء الدرب الطويل.

اليكم ومعكم جميعا اهدي و اتوج سنوات دراستي.





Remerciements :

Je commence par le remerciement du bon "DIEU" pour la santé, la volonté et la Patience qui m'a donné pour accomplir ce modeste travail.

Ce travail a été réalisé au laboratoire **LMSM** (Laboratoire des Matériaux Semi-conducteurs et Métalliques) à l'université Biskra, sous la direction de M^{me} Meftah Afak, professeur à l'université de Biskra, qui trouvera ici l'expression de mes profondes gratitude, et mes sincères remerciements et reconnaissances pour son aide précieux, ses conseils pertinents et objectifs.

Je remercie monsieur le professeur Nouredine Sengouga d'avoir accepté de faire partie et De présider le jury de soutenance de ma mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à M^{elle} Amjad Meftah, professeur à l'université De Biskra et Mr Saad Rahmene, Maître de conférence à l'université de Biskra, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger le mémoire.

Mes remerciements vont aussi à toute personne qui m'a aidé, en particulier M^{elle} Mansoura Mancer Gatte, et tous mes camarades de la post-graduation.



Sana Mihi

SOMMAIRE

◆ Dédicaces.	
◆ Remerciements.	
◆ Sommaire.....	iv
◆ Liste des Figures.....	viii
◆ Liste des Tableaux.....	xi
◆ Liste des Symboles et Acronymes.....	xii
Introduction général.....	01
◆ Bibliographie de l'introduction générale	04

CHAPITRE I :

Notions fondamentales sur le rayonnement solaire et les semi-conducteurs

I Introduction	07
I-1.1 L'énergie	07
I -2 Rayonnements solaires.....	08
I -2.1 Le soleil.....	08
I -2.2 Les émissions du Soleil.....	09
I -2.2.1 Rayonnement solaire hors atmosphère.....	09
I -2.2.2 Rayonnement solaire a travers l'atmosphère	10
I-2.2.3 Rayonnement solaire au sol.....	11
I -2.3 Spectre solaire.....	12
I -2.3.1 Masse d'air.....	12
I -3 Le semi-conducteur.....	13
I -3.1 Notion de Bande interdite (gap).....	14
I -3.2 Type des semiconducteurs	15
I -3.2.1 Semi-conducteur intrinsèque	15
I -3.2.2 Semi-conducteur extrinsèque	15
I -3.3 Concentrations des porteurs de charges	16
I -3.4 Équations fondamentales du transport électrique dans semiconducteurs.....	17
I-3.5 L'interaction photon/ semiconducteur.....	19

SOMMAIRE

I-3.5.1 Absorption optique	19
I -3.5.2 Génération optique	22
I -3.6 Mécanismes De Recombinaison Des Porteurs en Excès	22
I -3.6.1 Recombinaison en volume	22
I -3.6.2 Recombinaison en surface.....	24
Conclusion	25
♦ Bibliographie du chapitre I	26

CHAPITRE II:

Principe de la conversion photovoltaïque

II -1 Introduction	31
II -2 Historique bref	31
II -3 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	32
II -3.1 jonction PN.....	32
II -3.2 Principe de l'effet photovoltaïque	34
II -4 Paramètres de la cellule solaire	36
II-5 Technologie du Si et du GaAs.....	39
II- 5.1 Structure cristallines du GaAs et du Si	42
II- 5.2 Elaboration du silicium cristallin	43
II- 5.3 Elaboration du GaAs cristallin	44
II- 6 Caractéristiques expérimentales des Cellules solaires à base de Si et GaAs	45
II- 6.1 Cellules solaires en (c-Si)	45
II- 6.2 Cellules solaires en GaAs	47
II- 6.3 Cellules solaires en GaAs/Si	48
Conclusion	49
♦ Bibliographie de chapitre II	50

SOMMAIRE

CHAPITRE III:

Simulation numérique par SILVACO-ATLAS

III -1 Introduction	56
III -2 Historique	56
III -3 Présentation du paquet des programmes SILVACO	57
III -4 Présentation d'Atlas	60
III-5 programmation par Atlas	62
III -5.1 Spécification de la Structure	64
III -5.2 Spécification des Modèles des matériaux	69
III -5.3 sélection de la méthode numérique	71
III-5.4 Spécification des Solutions	72
III -5.5 Analyses des Résultats	73
Conclusions	75
♦ Bibliographie de chapitre III.....	76

CHAPITRE IV:

Résultats de simulation et interprétations:

IV- 1 Introduction	78
IV-2 Diagrammes représentatifs des cellules solaires étudiées :.....	79
IV-3 Paramètres optiques et structurales.....	80
IV-3.1 Indices de réfraction	80
IV-3.2. Paramètres des cellules (c-Si) ⁿ⁺ -p/(GaAs) _p et (c-Si) ⁿ⁺ -p.....	82
IV-3.3. Paramètres des cellules (GaAs) ⁿ⁺ -p/(Si) _p et (GaAs) ⁿ⁺ -p	83
IV-3.4 Maillage des structures.....	85
IV-4.Résultats de la simulation	88
IV-4.1. cellules solaires n ⁺ p(c- Si) et n ⁺ p(c-Si)/p(GaAs).....	88
IV-4.1.1Caractéristique J-V.....	88
IV-4-1.2.la réponse spectrale.....	90
IV-4.2. cellules solaires n ⁺ p(GaAs) et n ⁺ p(GaAs)/p(Si)	91

SOMMAIRE

IV-4.2.1. Caractéristique J - V	91
IV-4.2.2 La réponse spectrale.....	93
IV-4.3 comparaison entre les cellules : $n^+p(c-Si)$ et $n^+p(c-Si)/p(GaAs)$ et $n^+p(GaAs)$ et $n^+p(GaAs)/p(Si)$	94
IV-4.4 optimisation de la cellule Si/GaAs	97
Conclusion	102
♦ Bibliographie de chapitre IV.....	103
Conclusion général	105

Liste des figures:

Figure (I-1) : origine des différentes sources d'énergie utilisées par l'homme.....08

Figure (I-2) : Constante solaire [11].....10

Figure (I-3) : la structure verticale de l'atmosphère[12].....11

Figure (I-4) : Exemples de spectre solaire. AM0 : conditions d'éclairement hors atmosphère ou en haute altitude - AM2 : conditions d'atmosphère terrestre, le soleil étant à 30° sur l'horizon [18],[19].....12

Figure (I-5) : le rayonnement solaire et le nombre d'air masse [15].....13

Figure (I-6): Constante d'illumination [19].....13

Figure (I-7): Les différentes bandes d'énergie [23].....14

Figure (I-8): Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de phosphore [26].....15

Figure (I-9): Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de bore [26].....16

Figure (I-10): Statistique de Fermi- Dirac : variations de $f(E)$ en fonction de E pour différentes températures. A 0 K, la fonction est en escalier [28].....16

Figure (I-11): Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semiconducteurs19

Figure (I-12): La variation de la longueur d'onde en fonction du gap [34]20

Figure (I-13): Le coefficient absorbant en fonction de la longueur d'ondes pour certains semiconducteurs : on montre aussi le spectre solaire $AM_{1,5D}$ [35].....21

Figure (I-14): Structure de bandes d'énergie (E_g) du Si, Ge et GaAs dans l'espace réciproque De Vecteurs d'onde k , d'après [36].....21

Figure (I-15) : Différents types de recombinaison [45].....24

Figure (I-16) : La recombinaison via la surface expose continuellement distribué à l'énergie dans la crise de l'énergie d'un semiconducteur [48].....25

Figure (II-1): La Jonction P-N.....32

Figure (II-2) : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction PN [8].....33

Figure II-3 : Caractéristique d'une jonction PN polarisée [8].....34

Figure (II-4) : Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une Cellule Photovoltaïque [14].....35

Figure (II-5) : Etapes successives impliquées dans une cellule photovoltaïque.....36

Figure (II-6) : a)Caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque [16].b) puissance maximale (FF) [17].....37

Figure (I-7) : Caractéristiques réponse spectrale de piles solaires [23].....	39
Figure (II-8) : Répartition en pourcentage de puissance électrique, des différentes filières de cellules photovoltaïques produites en 2006 [25].....	40
Figure (II-9) : a) Cellule photovoltaïque :a)silicium 20 cm × 20 cm, b) Monocristallin,c) Multi cristallin [30] ,[31].....	41
Figure (II-10) : Évolution de la demande mondiale de silicium pour l'industrie Microélectronique et photovoltaïque [25].....	41
Figure (II-11) : Structure cristalline du Si et du GaAs [35].....	42
Figure (II-12): Structure et diagramme énergétique d'une cellule solaire en Si.....	46
Figure (II-13): Les caractéristiques électriques de la cellule solaire en Si n ⁺ -p-p ⁺ : (a) I-V sous Illumination AM1.5, (b) I-V dans obscurité (c) rendement quantique externe[44].....	46
Figure (II-14) : structure de cellule solaire GaAs [50].....	47
Figure (II-15) : Caractéristique I-V de la cellule solaire AlGaAs- GaAs de section 2 cm x 2c [50].....	47
Figure (II-16) : Exemples de cellule GaAs/Si [54],[55].....	48
Figure (II-17) : Caractéristique I-V d'une cellule GaAs/Si de section 2cmx2cm.....	49
Figure (II-18) : réponse spectrale de la cellule solaire de GaAs su Si (17%) et GaAs sur GaAs (20%) [55].....	49
Figure (III-1) : Organigramme de la structure VWF.....	58
Figure (III-2) : basent fenêtre de TonyPlot	58
Figure (III-3) : interface de Deckbuild.....	59
Figure (III-4) : Entrées et sorties d'Atlas.....	61
Figure (III-5) : Ordre des groupes des commandes dans Atlas	63
Figure (III-6) : Atlas a l'intérieur de Deckbuild	64
Figure (III-7) : les Type mesh: Exemple Cellule solaire Si simple.....	65
Figure (III-8) : exemple des régions d'une cellule solaire en Si simple dans Atlas	66
Figure (III-9) : attribution de matériaux aux différentes régions de la cellule solaire Si simple.....	67
Figure (III-10) : exemple d'électrodes dans Atlas pour une cellule solaire en Si.....	68
Figure (III-11): exemple de dopage dans une cellule solaire Si simple.....	69
Figure (III-12) : les paramètres de la couche d'oxyde	71
Figure (III-13) : exemple de courbe tracées par TonyPlot	74
Figure (III-14) : Organigramme du programme de simulation.....	75

Figure (IV-1) : Un diagramme schématique de la structure des quatre cellules solaire étudiées : a) (c- Si), b) $Si/GaAs$, c) $GaAs$, d) $GaAs/Si$	79
Figure (IV-2.a) : Indice de réfraction n et coefficient d'extinction k du silicium.....	80
Figure (IV-2.b) : Indice de réfraction n et coefficient d'extinction k de L'arséniure de gallium.....	81
Figure (IV-3): L'irradiance en fonction de la longueur d'onde du spectre solaire AM1.5....	81
Figure (IV-4) : La structure deux cellules solaire (c-Si) n^+ -p/(GaAs)p et (c-Si) n^+ -p par Tony Plot.....	83
Figure (IV-5) : La structure deux cellules solaire (GaAs) n^+ -p/(Si)p et (GaAs) n^+ -p par Tony Plot.....	85
Figure (IV-6): (a) maillage de la cellule (Si) n^+ -p/(GaAs)p avec (b) un zoom près de l'anode.....	86
Figure (IV-7): (a) maillage de la cellule (Si) n^+ -p avec (b) un zoom près de l'anode.....	86
Figure (IV-8): (a) maillage de la cellule (GaAs) n^+ -p avec (b) un zoom près de l'anode...	87
Figure (IV-9): (a) maillage de la cellule (GaAs) n^+ -p/(Si)p avec (b) un zoom près de l'anode.....	87
Figure (IV-10) : caractéristique $J-V$ en obscurité et sous éclairement AM1.5 et caractéristique P-V: (a) n^+ p(c- Si) ,(b) n^+ p(c-Si)/p(GaAs)	88
Figure (IV-11) : distribution du taux de recombinaison par TonyPlot pour :a) n^+ p(c- Si) ,b) n^+ p(c-Si)/p(GaAs)	90
Figure (IV-12): La réponse spectrale pour deux cellules solaire: (a) n^+ p(c- Si) ,(b) n^+ p(c-Si)/p(GaAs)	91
Figure (IV-13): Comparaison entre les caractéristiques $J-V$ et $P-V$, sous éclairement AM1.5: (a) n^+ p(GaAs),(b) n^+ p(GaAs)/p(Si).....	92
Figure (IV-14): Réponse spectrale pour les deux cellules solaire: (a) n^+ p(GaAs),(b) n^+ p(GaAs)/p(Si).....	93
Figure (IV-15): réponse spectrale théorique pour une cellule solaire en GaAs [3].....	94
Figure (IV-16) : Comparaison entre les caractéristiques :(a) $J-V$ et (b) $P-V$ pour les quatre cellules solaires.....	95
Figure (IV-17) : Réponses spectrales internes et externes des quatre cellules solaires.....	96
Figure (IV-18): Comparaison entre les caractéristiques $J-V$ et $P-V$, sous éclairement AM1.5 : pour les deux cellules solaires.....	99
Figure (IV-19): Réponse spectrale pour les deux cellules solaire.....	100

Figure (IV-20) : caractéristique $J-V$ en obscurité et sous éclairment AM1.5 et caractéristique P-V: sans CAR, avec CAR en Si_3N_4 .et avec CAR double en $SiO_2 - Si_3N_4$101

Figure (IV-21) : effet de la passivation sur le rendement quantique externe.....102

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

Tableau (I-1) : densité des porteurs de charge à l'équilibre et quasi –équilibre [13].....	17
Tableau (II-1) : Propriétés à température ambiante 300K [36], [37], [38], [39], [40].....	43
Tableau (II-2) : comparaison théorie et expérimental [49].....	48
Tableau (III-1): les paramètres des <i>Si</i> et <i>GaAs</i> dans l'atlas [13].....	74
Tableau (IV-1) : Les paramètres des deux cellules : (c-Si) ⁿ⁺ -p/(GaAs)p et (c-Si) ⁿ⁺ -p.....	82
Tableau (IV-2) : Les paramètres des deux cellules : (GaAs) ⁿ⁺ -p/(c-Si)p et (GaAs) ⁿ⁺ -p.....	84
Tableau (IV-3) : Paramètres de sortie des cellules n ⁺ p(c- Si) et n ⁺ p(c-Si)/p(GaAs).....	89
Tableau (IV -4): Paramètres de sortie des cellules n ⁺ p(GaAs) ,(b) n ⁺ p(c-GaAs)/p(Si).....	93
Tableau (IV-5) : Optimisation de la cellule (c-Si) ⁿ⁺ -p/(GaAs)p par le dopage et les épaisseurs des différentes couches.....	98
Tableau (IV -6): Paramètres de sortie des cellules : sans (c-Si) ⁿ⁺ -p/(GaAs)p et avec (c-Si) ⁿ⁺ -p/(GaAs)p.....	99
Tableau (IV -7): Paramètres de sortie des trois cellules : cellule 1, cellule 2 et cellule 3....	101

Introduction Générale

Introduction générale :

L'humanité a un appétit apparemment insatiable pour l'énergie. Cet appétit n'a cessé de croître avec la population croissante et le développement technologique [1]. La question se pose comment fournir cette énergie ? Certes, la réponse simple est de brûler davantage de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel, l'huile). Est-ce vraiment un choix ?

Les combustibles fossiles émettent beaucoup de gaz qui polluent l'atmosphère. Le bioxyde de soufre et d'oxyde nitreux (principales causes des pluies acides et du smog) sont deux exemples. Notre style de vie pratique se traduit également par une production journalière de 16 millions de tonnes de CO_2 dans l'atmosphère [2]. Cette émission de CO_2 produit de charbon et de pétrole, crée des problèmes plus environnementaux comme le réchauffement global, cause de changements climatiques dramatiques à côté d'autres problèmes de santé. Cependant, leur prix bas est l'un des avantages principaux des combustibles fossiles en comparaison à d'autres sources [3]. Donc, la recherche d'autres sources d'énergie est nécessaire. L'énergie nucléaire et l'énergie renouvelable semblent être prometteuses et candidats pour remplacer les carburants fossiles [3].

L'énergie renouvelable est produite de ressources naturelles comme la lumière du soleil, les vents et les rivières. L'énergie renouvelable doit fournir une bonne ressource d'énergie alternative.

L'énergie solaire est une des ressources d'énergie les plus concurrentielles renouvelables. L'énergie solaire reçue par la terre est environ 130,000 TW, qui est beaucoup plus que ce que nous avons besoin. C'est une source d'énergie infinie. De plus, la lumière du soleil est accessible presque partout. Basé sur sa longue vie et accessibilité, l'énergie solaire est une source d'énergie très potentielle principale et renouvelable [4]. L'énergie du soleil fait la vie sur cette planète possible. Pourquoi pas n'en prendre d'avantage ?

Une voie d'utiliser l'énergie du soleil est en la convertissant en énergie électrique [2].

Ces dernières années les systèmes photovoltaïques ont gagné une popularité mondiale comme voie respectueuse de l'environnement qui permet de résoudre les problèmes d'énergie à la future [5]. L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un Courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique [6]. De grands progrès dans les performances des cellules solaires à base de silicium (Si) et d'arséniure de gallium (GaAs) ont été réalisés [7]. Le silicium est un matériau semi-conducteur important employé aujourd'hui parce qu'il est peu coûteux et peut facilement

former une couche d'oxyde. C'est aussi un matériau diélectrique très stable. Le GaAs est aussi un matériau clé pour les dispositifs optiques et électroniques [8].

En 1953-1954 **Carl Fuller**, au sein des laboratoires **Bell**, cherche à fabriquer des diodes au silicium en y introduisant certains dopants. Il réalise alors les premières jonctions (p-n) en silicium cristallin pour application solaire. Une année plus tard des rendements de 6% sont atteints par cette équipe. Le meilleur rendement en laboratoire sur une petite cellule de 4 cm^2 s'approche de 24.7% pour des cellules homojonction en silicium cristallin (c-Si) [9,10]. Les rendements des modules vaux d'environ 12% à 20% [11]. En 1956 **Loferski** publiait différentes tables de conversion de rendement photovoltaïque pour plusieurs matériaux semiconducteur [12]. Ensuite, au début des années 70, on a pu obtenir en laboratoire un rendement de 20% en travaillant sur des cellules monocristallines d'arsenic de gallium (GaAs) [12]. Ce composé III-V est destiné pour les cellules photovoltaïques à haut rendement (25 à 28%) [11]. Les premières expériences couronnées de succès de la croissance GaAs sur des substrats de Si datent des années 1980 [13]. En 1989 le rendement d'une cellule en couche mince de GaAs sur un substrat en Si avec une surface de 1 cm^2 a atteint 19,3-20% [14]. Récemment un grand intérêt est attaché aux applications des composés III-V dans la croissance hétéro-épitaxiale sur substrat en Si. En particulier, les cellules solaires GaAs/Si ont des avantages en termes de coût, de poids et contrainte mécanique. Bien qu'il y ait quelques problèmes dans l'obtention des films GaAs/Si de haute qualité dû à la différence des coefficients de dilatation thermique et des constantes du réseau, une efficacité de 18.3 % de la cellule solaire pour l'éclairage solaire hors atmosphère AM0 a été obtenue [15].

L'objectif de notre travail est d'effectuer une étude de comparaison entre les caractéristiques électriques d'une cellule solaire homoépitaxiale en Si et une autre intégrée sur un substrat en GaAs (*Si/GaAs*) sous l'éclairage solaire au sol AM1.5. Ensuite, comparer les résultats précédents avec une cellule solaire homojonction en GaAs et une autre intégrée sur un substrat en Si (*GaAs/Si*). Les caractéristiques électriques à calculer sont la caractéristique courant-tension en éclairage et la réponse spectrale. La première permet de calculer l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité, et la deuxième reflète la gamme du spectre solaire exploitée par la cellule. L'outil de calcul est la simulation numérique en utilisant le logiciel connu sous le nom de SILVACO-ATLAS. C'est un logiciel commercialisé de modélisation à deux dimensions développé par une société Américaine, « Silvaco International » ayant son siège à Santa Clara en Californie.

Le mémoire est présenté en quatre chapitres :

- Le premier constitue un rappel général sur le rayonnement solaire et quelques notions fondamentales des semi-conducteurs : absorption optique, génération et les différents types de recombinaison dans la cellule localisés en surfaces et en volume.
- Le second chapitre est consacré à la description du principe de la conversion photovoltaïque, les caractéristiques électriques des cellules solaires, et sur quelle base est fait le choix du matériau semiconducteur. On présente également quelques exemples de cellules solaires intégrées sur des substrats de matériaux semiconducteurs différents.
- Le troisième chapitre décrit le logiciel SILVACO-ATLAS, l'outil de calcul que nous avons utilisé pour générer nos résultats concernant la simulation.
- Le chapitre quatre présente les résultats de simulation des caractéristiques électriques d'une cellule solaire Si/GaAs comparés avec ceux d'une homojonction en Si. D'autres travaux ont étudié les cellules GaAs/Si. Pour cette raison on a ajouté également dans le but de comparer les résultats de simulation d'une homojonction en GaAs et GaAs/Si pour voir si la cellule Si/GaAs présente un rendement meilleur ou non.

Finalement une conclusion générale sera fait sur les résultats de la simulation.

Bibliographie de l'introduction générale :

- [1] A. R. Davies, «effects of contact-based non-uniformities in CdS/CdTe thin film solar cells », Thesis Doctor, University Fort Collins Colorado, 2008, 1p.
- [2] A. Kanevce, «anticipated performance of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells in thin-film limit», Thesis Doctor ,University Fort Collins, Colorado, 2007,2-3p.
- [3] M. Turkestani , «CdTe Solar Cells: Key Layers and Electrical Effects» , thesis Doctor, University of Durham, 2010,1p.
- [4] K-J. Hsiao ,« Electron-reflector strategy for CdTe thin-film solar cells», These Doctor, University Fort Collins, 2010.
- [5] D. M. Bagnall , M. Boreland, «Photovoltaic technologies», Energy Policy 36 (2008) 4390–4396.
- [6] C. Darras, « Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)», Thèse Doctorat, Université Corse Pascal Paoli.
- [7] S. Bensmaïne et B. Benyoucef, « Analyse des Paramètres Optimaux sur les Microtechnologies Utilisées dans la Fabrication des Cellules Photovoltaïques à Base de Silicium Monocristallin», Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 55-64.
- [8] T-H. Fang, W-J Chang, C-M Lin, « Nanoindentation and nanoscratch characteristics of Si and GaAs », Microelectronic Engineering 77 (2005) 389–398.
- [9] J. Damon-Lacoste, « Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si:H/c-Si rôle prépondérant de l'hydrogène », Thèse Doctorat, l'école Polytechnique 2007,17p.
- [10] W. Wanga_ and E. A. Schiff, «Polyaniline on crystalline silicon heterojunction solar cells », Applied Physics Letters 91, 133504 (2007).
- [11] A. Bilbao Learreta, « Réalisation de commandes MPPT Numériques», rapport de stage projet fin d'études, Universitat Rovira I Virgili, LAAS –CNRS Toulouse (France) 2006.
- [12] C. Muresan, «étude des transferts thermiques rayonnement spectral- conduction – convection naturelle dans des systèmes photovoltaïques hybrides en vue de leur intégration au bâti », Thèse Doctorat, Lyon:INSA de Lyon, 2005,11 p.
- [13] Y. B Bolkhovityanov, O P Pchelyakov, « GaAs epitaxy on Si substrates: modern status of research and engineering», Physics - Uspekhi 51 (5) 437 - 456 (2008).

- [14] M. Yamaguchi, «III–V compound multi-junction solar cells: present and future», *Solar Energy Materials & Solar Cells* 75 (2003) 261–269.
- [15] M. Yang , T. Soga, T. Egawa, T. Jimbo, Masayoshi Umeno, «Three-terminal monolithic cascade GaAs/Si solar cells», *Solar energy materials and Solar Cells* 35 (1994) 45-51.

Chapitre I :

***Notions fondamentales sur le
rayonnement solaire et les
semi-conducteurs***

I-1 Introduction :

Pratiquement, toutes les énergies utilisées par l'être humain sont originaires du soleil [1], qui reste toujours une source non négligeable d'économie d'énergie [2]. Le Rayonnement solaire qui arrive au sol peut se décomposer en deux parties: l'une provient directement du soleil (direct), l'autre a été diffusée par l'atmosphère (diffuse) [3]. L'énergie solaire est absorbée et stockée par les plantes [1]. On utilise cette énergie lorsqu'on brûle le bois ou on mange de la nourriture, l'énergie renouvelable est par excellence respectueuse de l'environnement. Les cellules solaires sont des dispositifs électroniques qui convertissent l'énergie du soleil en énergie électrique. Ces dispositifs sont à base de semiconducteurs. C'est pour cette raison qu'on s'intéresse dans ce chapitre à définir le rayonnement solaire et les propriétés physiques des semiconducteurs.

I-1.1 l'énergie:

Si l'énergie est une quantité physique parfaitement définie pour le physicien, sa définition est beaucoup moins claire si l'on consulte un dictionnaire. Pour ce qui nous intéresse ici, disons, de manière pragmatique, qu'un système ou qu'un corps possède de l'énergie s'il peut fournir du travail ou de la chaleur [4].

L'usage de l'énergie permet d'améliorer le bien être de l'homme en lui permettant de se nourrir, de se chauffer, etc. on distingue les énergies primaires (le soleil, le pétrole, le gaz, le vent....) des énergies finales (électrique, mécanique, chimique...). Une énergie primaire n'a subi aucune conversion entre la production et la consommation. C'est le cas du pétrole, du charbon, du gaz naturel, de l'électricité d'origine nucléaire, de l'hydraulique, du bois, de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne. L'énergie finale, fournie aux consommateurs, peut être utilisée pour satisfaire des besoins énergétiques ou non énergétiques [4].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels : le vent, la géothermie et le soleil [4].

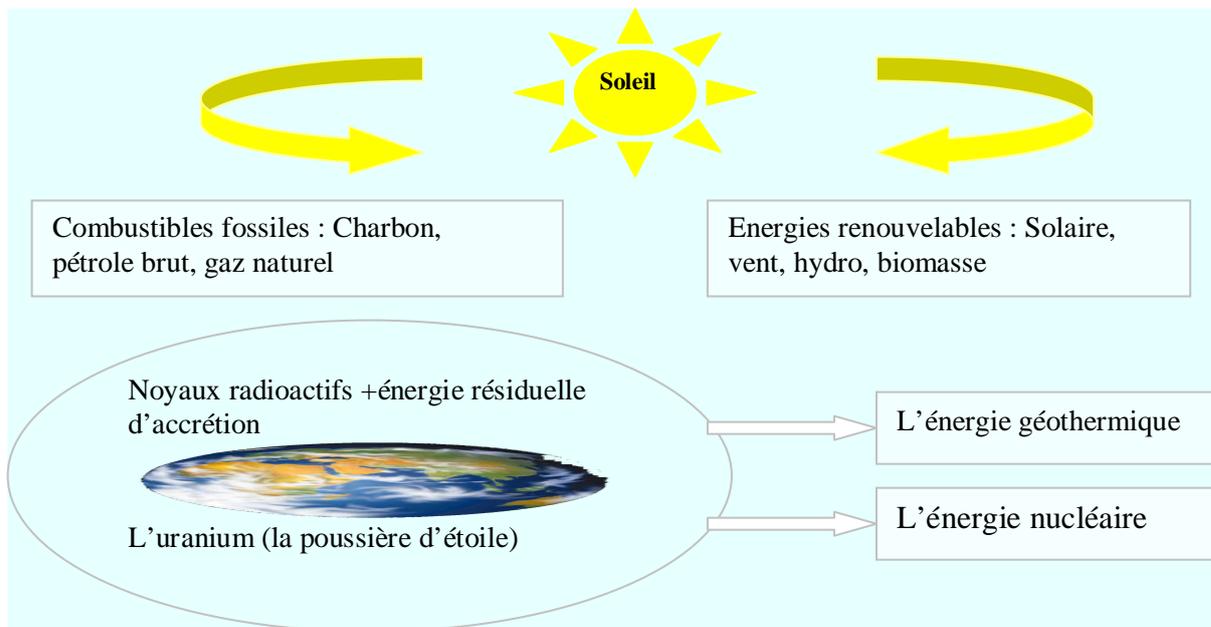


Figure (I-1) : Origine des différentes sources d'énergie utilisées par l'homme.

I -2 Rayonnements solaires :

I -2.1 Le soleil :

Le soleil est la source de l'énergie que nous recevons, c'est une étoile sphérique qui fournit la plus grande partie de l'énergie que nous utilisons [5]. En effet, à part l'énergie géothermique et l'énergie nucléaire, toutes les énergies viennent du soleil [4]. Cette étoile est particulièrement importante car elle fournit l'essentiel de l'énergie que les planètes du système solaire reçoivent. Néanmoins, elle reste relativement banale comparée à l'ensemble des autres étoiles située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre [6].

Cette étoile est formée de 92.1% d'hydrogène, 7.8% d'hélium, 0,061% oxygène, 0,03 Carbone, 0,0084% azote, 0,0076% néon, 0,0037% fer, 0,0031% silicium, 0,0024% magnésium, 0,0015% soufre, 0,0015% Tous les autres composants [8].

Quelques caractéristiques du Soleil [6], [7] :

- Age : 4.5×10^9 ans.
- Masse (kg) : 1.99×10^{30} (terre= 6×10^{24} Kg).
- Masse (Terre = 1): 332946.
- Rayon équatorial (km): 696000.
- densité moyenne (kg/m^3): 1410.

- Vitesse de libération (km/se69c) : 618.
- Durée de vie estimée : 1010 ans.
- Diamètre : $1,4 \times 10^6$ km (Terre = 12 600 km).
- Masse volumique : $1,41 \text{ g/cm}^3$ (Terre = $5,5 \text{ g/cm}^3$).
- Puissance rayonnée (W) : 4×10^{26} .
- Energie reçue par la Terre ($W.m^{-2}$) : 1353.
- Température au centre (K) : 15×10^6 .
- Température de surface (K) : 5800.
- Champ magnétique global 1 à 2 Gauss.

Les couches internes sont : Le noyau (Coeur), La zone radiative, La zone convective et les couches externes du soleil constitue sont « atmosphère ». L'atmosphère est elle aussi composée de trois zones : La photosphère, La chromosphère, La couronne [6].

I -2.2 Les émissions du Soleil :

L'énergie émise par le Soleil est sous la forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le **rayonnement solaire**, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière c , il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère [8].

I -2.2.1 Rayonnement solaire hors atmosphère :

Le rayonnement solaire parvient à la limite de l'atmosphère terrestre après un trajet dans L'espace d'environ 150.000.000 km, effectué en 8 minutes [9]. En dehors de l'atmosphère terrestre, il donne un éclairement énergétique à peu près constant et égale à $1367 \text{ [w/m}^2\text{]}$ [10]. Ceci est connu sous le nom de « constante solaire ». Cependant, la distance de la terre au soleil n'est pas constante tout au long de l'année, il en résulte que le rayonnement extraterrestre oscille par un pourcentage de 3 % [9].

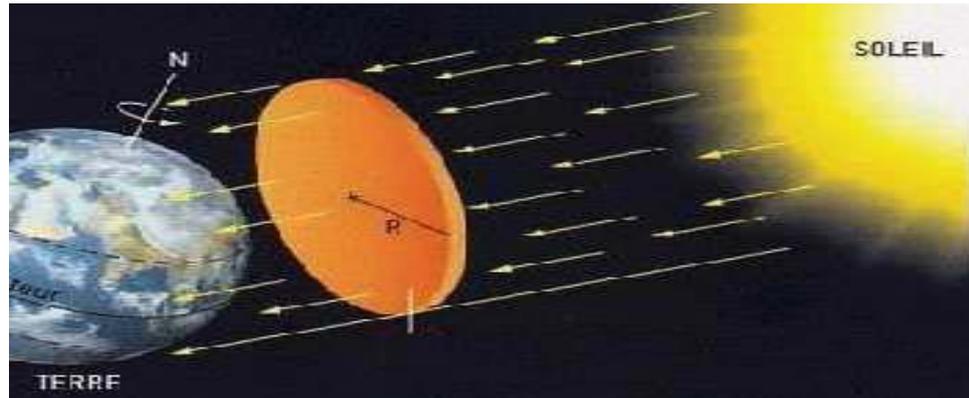


Figure (I-2): Constante solaire [11].

I -2.2.2 Rayonnement solaire à travers l'atmosphère :

✚ Structure verticale de l'atmosphère :

L'atmosphère, l'enveloppe fine et fragile d'air autour de la Terre, joue un rôle primordial sur l'environnement dans lequel nous vivons. Elle est maintenue autour de la Terre par gravitation et une de ses caractéristiques est la distribution verticale de sa température et de sa pression [12]. On peut grossièrement diviser l'atmosphère en 5 couches ayant des propriétés tout à différents et distinctement séparées [13] :

- La troposphère qui s'étend jusqu'à 15km d'altitude où la température décroît de 6,5°C par km pour atteindre -70°C à la base de la couche suivante.
- L'atmosphère de 15 à 55km d'altitude où la température décroît de -70°C à 10°C.
- La mésosphère de 55 à 80km, où la température décroît de +10°C à -80°C.
- L'ionosphère où la température croît régulièrement pour atteindre 1500°C à l'altitude de 300Km.
- L'exosphère au- de là de 700Km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidérale.

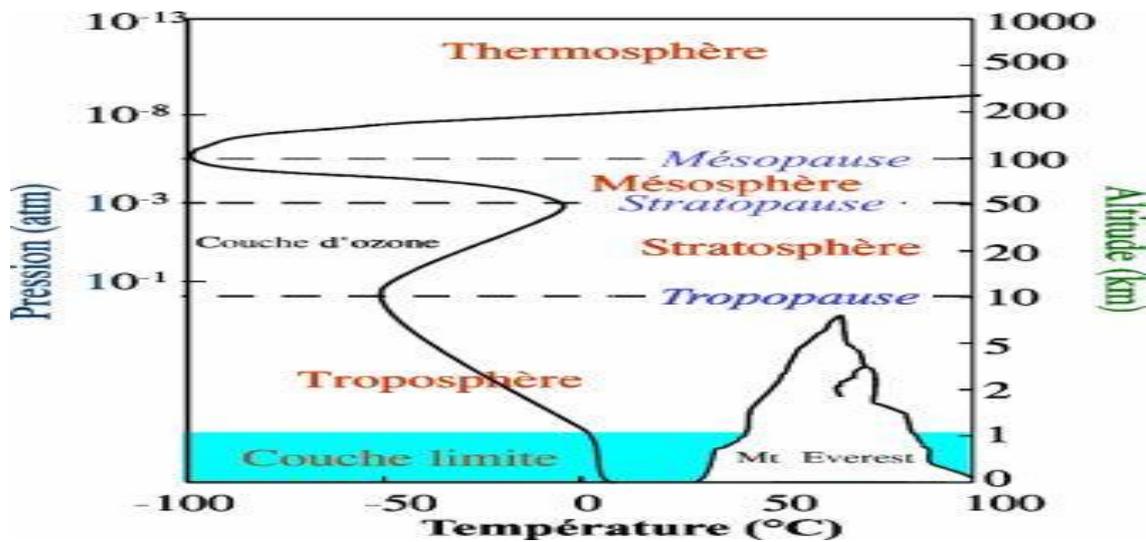


Figure (I-3) : la structure verticale de l'atmosphère [12].

✚ La composition et le rôle de l'atmosphère:

La composition de l'atmosphère est à peu près la même pour les trois premières couches: 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0,9 % d'argon, 0,03 % de CO_2 et des traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs. L'essentiel des modifications subies par le rayonnement solaire se fait dans la troposphère par diffusion, diffraction, absorption, réfraction par des gaz de température et de densité croissante [14].

✚ Atmosphère standard:

En ramenant toutes les couches de l'atmosphérique dans les conditions normales ($P=1013\text{mbar}$ et $T=0^\circ\text{C}$), on définit une atmosphérique standard d'épaisseur verticale moyenne de 7,8Km prise pour référence unité et formée des couches planes et stratifiées par les divers gaz comme l'azote, l'argon, l'eau [15].

I-2.2.3 Rayonnement solaire au sol :

Puisqu'on s'intéresse principalement aux photopiles à usage terrestre, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement reçu au sol. L'atmosphère modifie le spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux [16]:

- L'absorption par les différents gaz, chacun ayant des raies caractéristiques.
- La diffusion moléculaire de Rayleigh.
- La diffusion par les aérosols, par les poussières et par les nuages.

I -2.3 Spectre solaire:

L'énergie solaire utilisable en héliotechnique est contenue dans le rayonnement électromagnétique du soleil, qui correspond à celui d'un corps noir [17]. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère [18].

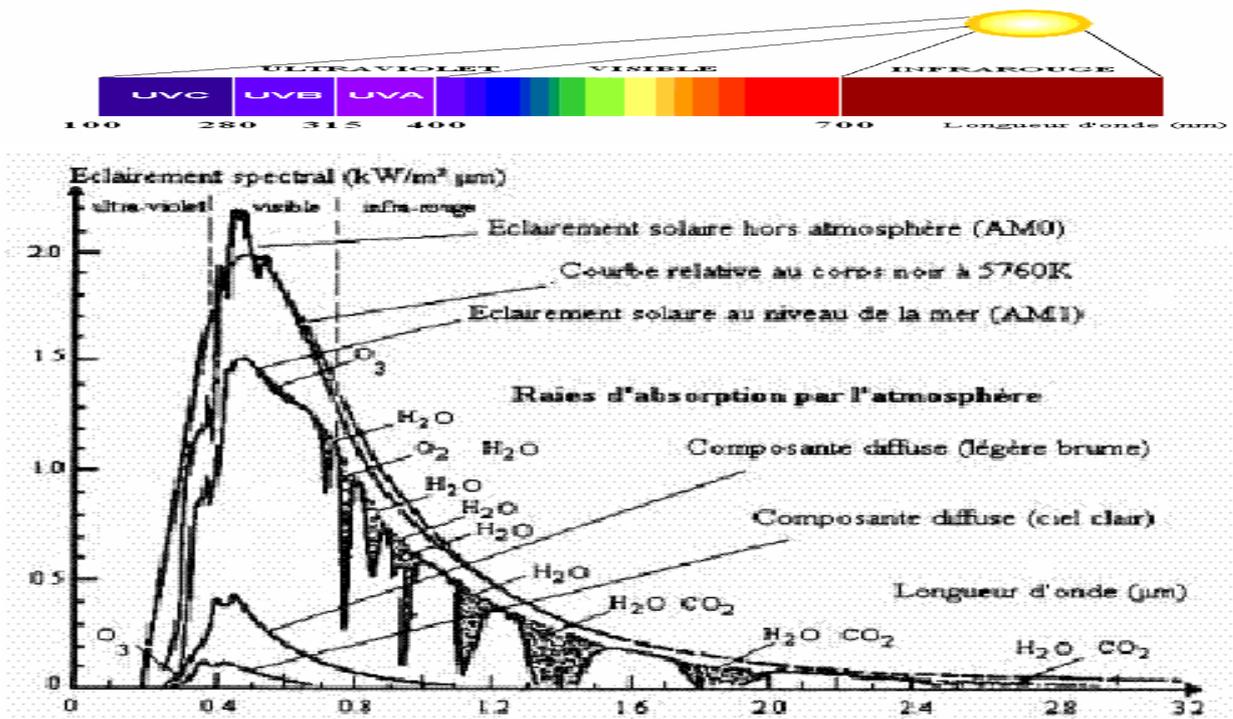


Figure (I-4) : Exemples de spectre solaire. AM0 : conditions d'éclairement hors atmosphère ou en haute altitude - AM2 : conditions d'atmosphère terrestre, le soleil étant à 30° sur l'horizon [19], [18].

Sa distribution en énergie est répartie comme suit [20] :

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu m$	6.4%.
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu m$	48.0%.
Infrarouge	$0.78 < \lambda < 10 \mu m$	45.6 %.

I -2.3.1 Masse d'air :

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur important d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié. on appelle « masse d'air », m, la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement directe pour atteindre le sol (par ciel clair), par

rapport à une traversé vertical au niveau de la mer (voir figure (I-5)). Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil (h). A l'aide des points O, A et M, on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \tag{I-1}$$

On appelle m le rapport OM / OA , soit $1/\sin h$

A une pression p différente de 1013 mbar et à altitude z (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre [21]:

$$m = \frac{p}{1013 \times \sin h} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \tag{I-2}$$

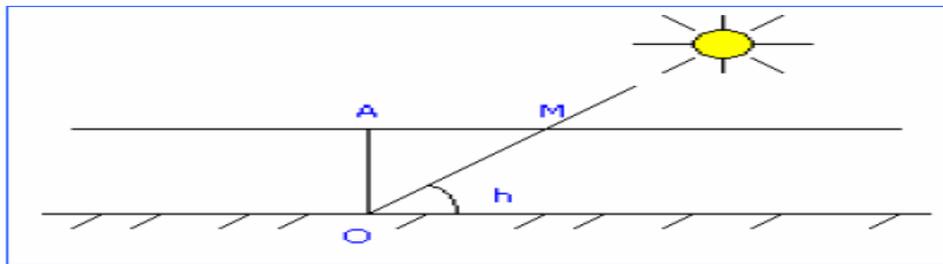


Figure (I-5) : le rayonnement solaire et le nombre d'air masse [15].

Exemples :

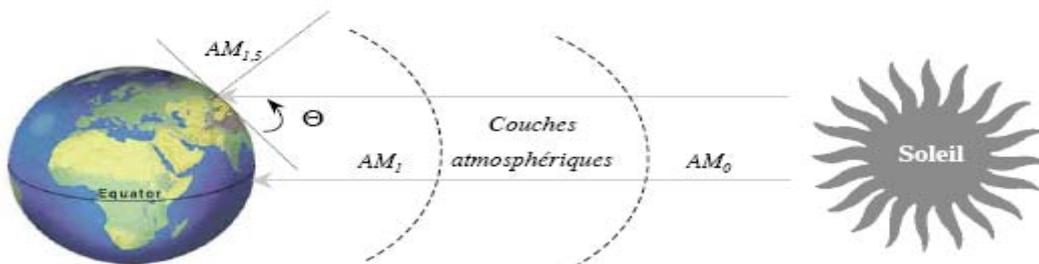


Figure (I-6): Constante d'illumination [19].

- AM0: hors atmosphere (application spatiales). $P \approx 1.36 \text{ KW.m}^{-2}$.
- AM1: le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
- AM1.5 : spectre standard, le soleil est à 45° . $P \approx 1 \text{ KW.m}^{-2}$.

➤ **Normalisation :**

Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre

AM1.5 sous un éclairage de 1000W/m^2 et une température de 25°C . Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C.: Standard Test Conditions) [11].

I -3 Semi-conducteurs:

I -3.1 Notion de Bande interdite (gap):

L'énergie de bande interdite est la mesure de la quantité d'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction lorsque celui-ci est soumis à une excitation. Le matériau sera appelé semi-conducteur si le gap (notée E_g , unité : eV), ou la distance énergétique entre le bas de la bande de conduction (E_c) et le sommet de la bande de valence (E_v) valence, est inférieur à $2eV$ [22].c'est à dire [23]:

$$E_g = E_c - E_v \quad (\text{I-3})$$

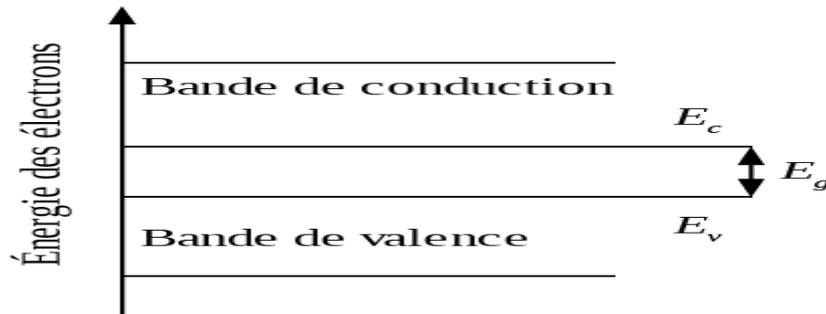


Figure (I-7):les différentes bandes d'énergie [23].

En effet, la largeur de la bande interdite fixe la limite en température au-dessous de laquelle le dispositif peut fonctionner sans détérioration, ainsi que l'aptitude du semi-conducteur à résister aux radiations, et ces variations de la largeur de la bande interdite peuvent être décrites approximativement par la fonction [22] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (\text{I-4})$$

Où T est la température absolue. Les valeurs des paramètres α et β sont données pour différents matériaux [24].

I -3 .2 Type des semiconducteurs :

I -3.2.1 Semi-conducteur intrinsèque :

Un semi-conducteur est dit «intrinsèque» s'il est à l'état pur. Dans ce cas, le nombre d'électrons dans la bande de conduction est égal au nombre de trous dans la bande de valence [25].

I -3.2.2 Semi-conducteur extrinsèque :

La méthode utilisée pour créer ce type de semiconducteurs est le "dopage" par des impuretés. Deux types de dopage sont possibles :

1. **Le dopage de type n (négatif) :** consiste à introduire dans la structure cristalline Semiconductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres.

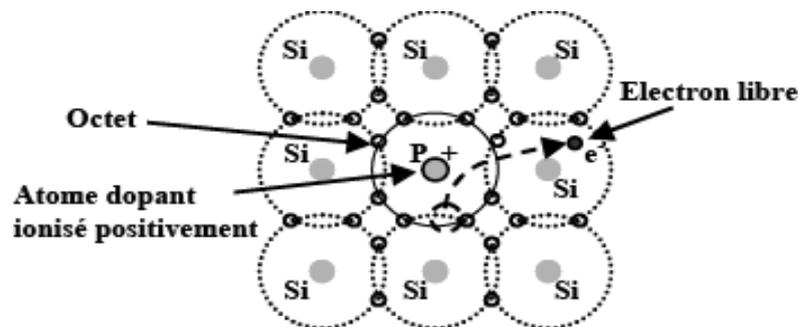


Figure (I-8): Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de phosphore [26].

2. **Le dopage de type p (positif) :** utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type p le plus couramment utilisé pour le silicium.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Lorsque l'énergie de la bande gap augmente, le courant diminue mais la tension est plus élevée.

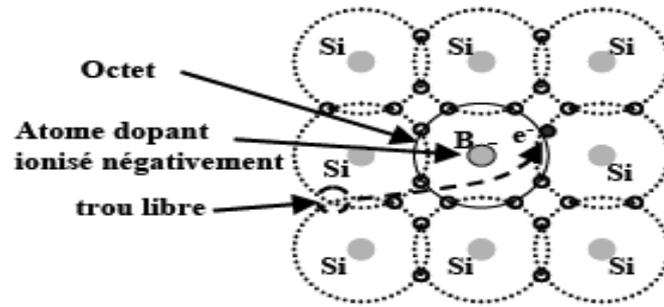


Figure (I-9): Dopage d'un monocristal de silicium par un atome de bore [26].

I -3.3 Concentrations des porteurs de charges :

Quand le semi-conducteur est dans l'équilibre thermodynamique (c'est-à-dire à une température constante sans injection externe ou génération de transporteurs), la fonction de Fermi-Dirac détermine la proportion d'états remplis aux états disponibles à chaque énergie [27]:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{KT}}} \quad (\text{I-5})$$

Dans laquelle E est le niveau d'énergie considéré, E_F est le niveau particulier appelé niveau de Fermi. E_F correspond au niveau statistique moyen occupé à l'équilibre thermodynamique par l'ensemble des porteurs. La représentation de $f(E)$ est donnée par la figure (I-10) [28].

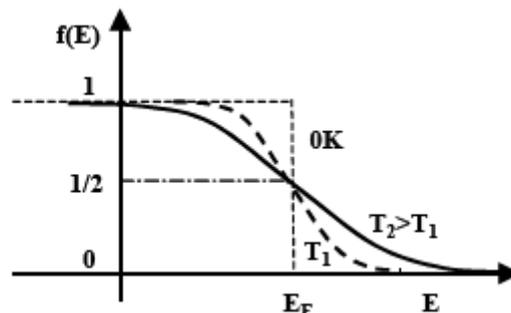


Figure (I-10): Statistique de Fermi-Dirac : variations de $f(E)$ en fonction de E pour différentes températures. A 0K, la fonction est en escalier [28].

L'équilibre thermodynamique est modifié lorsque des porteurs sont injectés par polarisation ou par illumination. L'introduction des quasi-niveaux de Fermi E_{Fn} et E_{Fp} permettent d'exprimer simplement le régime quasi-équilibre. Le tableau (I-1) ci-dessous

décrit l'évolution de la densité des porteurs de charges pour les deux régimes : équilibre et quasi-équilibre [29].

équilibre	Quasi-équilibre
$n_0 = N_c \exp\left[\frac{E_f - E_c}{kT}\right]$ (I- 6)	$n = N_c \exp\left[\frac{E_{Fn} - E_c}{kT}\right]$ (I- 9)
$p_0 = N_v \exp\left[\frac{E_v - E_f}{kT}\right]$ (I- 7)	$p = N_v \exp\left[\frac{E_v - E_{Fp}}{kT}\right]$ (I- 10)
$n_0 \cdot p_0 = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[\frac{-(E_c - E_v)}{kT}\right]$ $= N_c N_v \exp\left[\frac{-E_g}{kT}\right]$ (I- 8)	$n \cdot p = N_c N_v \cdot \exp\left[\frac{-(E_c - E_v)}{kT}\right] \cdot \exp\left[\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}\right]$ $= n_0 p_0 \exp\left[\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}\right]$ (I- 11)

Tableau (I-1): Densité des porteurs de charge à l'équilibre et quasi-équilibre [29].

I -3.4 Équations fondamentales du transport électrique dans les semiconducteurs :

L'équation de Poisson et les équations de continuité pour les électrons et les trous permettent de décrire les potentiels électrostatiques et les phénomènes de transport des charges électriques dans un matériau semiconducteur [30].

Le potentiel électrostatique V est relié à la densité de charge d'espace ρ par l'équation de Poisson [30]:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_s} \tag{I-12}$$

Avec : $\rho = q \times (p - n + N_D - N_A)$ (I-13)

ρ : Densité de charge n et p sont les densités d'électrons et de trous libres, N_D et N_A sont les concentrations de donneurs et d'accepteurs ionisés, ϵ_s est la permittivité diélectrique du semi conducteur q : charge électrique.

A une dimension l'équation (I-12) s'écrit comme suit :

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \tag{I-14}$$

Pour décrire les phénomènes de transport des porteurs, on utilise les équations de continuité pour les électrons et pour les trous, qui régissent la condition d'équilibre

dynamique des porteurs de charge dans le semi conducteur. Elles donnent la relation entre les courants, les mécanismes de génération et de recombinaison et la distribution spatiale et temporelle des porteurs de charges libres [30]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div}(j_n) + G_n - R_n \quad (\text{I-15a})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{-1}{q} \text{div}(j_p) + G_p - R_p \quad (\text{I-15b})$$

R_n (R_p) et G_n (G_p) : représentent, respectivement les taux de recombinaison et de génération des électrons (Trous). J_n (J_p), la densité de courant des électrons (trous) ; q : la charge électrique élémentaire. A une dimension (I-15) s'écrit sous la forme [30]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial j_n}{\partial x} + G_n - R_n \quad (\text{I-16a})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{-1}{q} \frac{\partial j_p}{\partial x} + G_p - R_p \quad (\text{I-16b})$$

Pour résoudre les équations (I-15), nous avons besoin de connaître les mécanismes de génération, de recombinaison et les courants. En ce qui concerne les courants, dans l'approximation dérive-diffusion (drift-diffusion approximation), les courants d'électrons et de trous résultent de la somme de deux termes : un gradient de concentration et un gradient de potentiel électrostatique [30]:

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \nabla n \quad (\text{I-17a})$$

$$J_p = q\mu_p pE - qD_p \nabla p \quad (\text{I-17b})$$

μ_n (μ_p) : est la mobilité électron (trous). D_n (D_p) : est le coefficient de diffusion des électrons (trous). et K : est la constante de Boltzmann [31].

Pour le cas unidimensionnel:

$$J_n = -qn\mu_n \frac{dV}{dx} + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (\text{I-18a})$$

$$J_p = -qp\mu_p \frac{dV}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (\text{I-18b})$$

L'équation de Poisson forme avec les deux équations de continuité un système à trois équations et trois inconnues : le potentiel électrostatique et les densités des électrons et des trous. Ces trois équations sont le point de départ de l'analyse de la plupart des phénomènes photovoltaïques, elles peuvent être résolues analytiquement dans certains cas particuliers, mais dans la plupart des cas la résolution numérique de ces équations est nécessaire [30].

I-3.5 L'interaction photon/ semiconducteur :

I-3.5.1 Absorption optique :

Le phénomène d'absorption qui se produit dépend de l'énergie (fréquence) de la lumière (photon) incidente. L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur de la bande interdite E_g du matériau constituant la cellule [32]. Les photons de faibles énergies, ($h\nu < E_g$), passent à travers le semi-conducteur, n'apportant alors aucune contribution à la conversion photovoltaïque. Le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle. Si, les photons sont de grandes énergies ($h\nu \geq E_g$), l'absorption augmente. En outre, l'énergie au-dessus de E_g n'augmente pas l'absorption au-dessus de son seuil. Cet excès est perdu sous forme de chaleur [32].

Ce phénomène qui provoque le transfert des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, donc créé des paires electron-trou est appelé mode d'absorption intrinsèque (Figure I-11) ou fondamentale, Ce dernier prédomine dans les piles solaires [32].

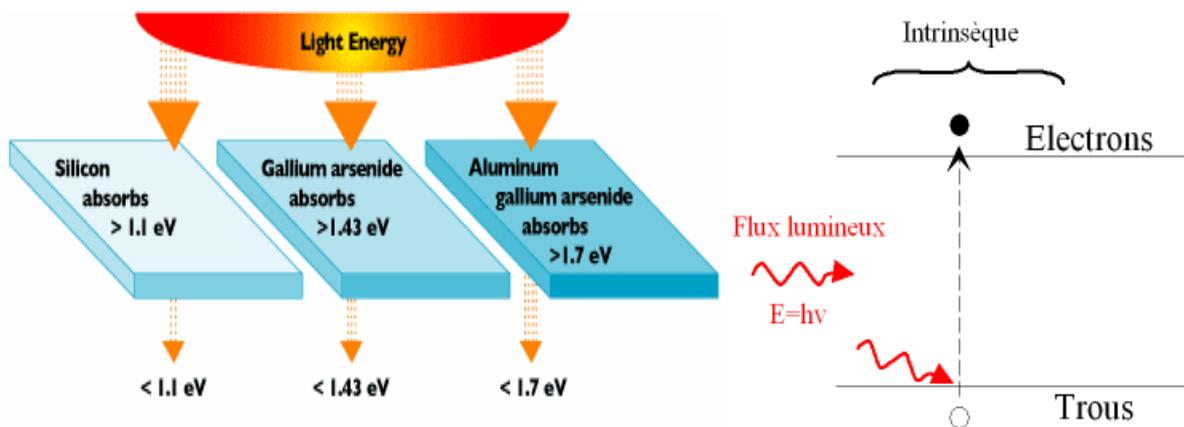


Figure (I-11) : Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semiconducteurs.

La relation liant l'énergie $E = h\nu$ et la longueur d'onde est donnée par [33] :

$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{h\nu(\text{eV})} \quad (\text{I-19})$$

h : constante de Planck.

ν : fréquence de la radiation [33].

La variation de la longueur d'onde en fonction du gap (Figure I-12) suit dans la formule (I-19) [34].

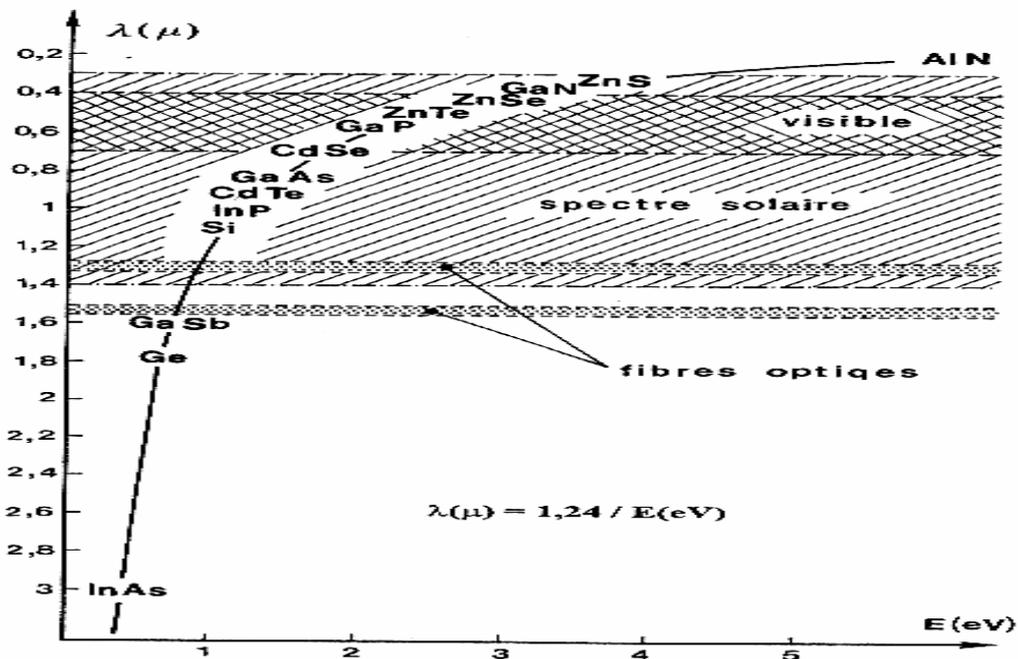


Figure (I-12): La variation de la longueur d'onde en fonction du gap [34].

Une radiation lumineuse rencontrant un semi-conducteur est absorbée suivant la loi de Lambert- Bouguer [33]:

$$I(x) = I(1 - R) \exp(-\alpha x) = I_0 \exp(-\alpha x) \tag{I-20}$$

x: profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du Semiconducteur.

R : coefficient de réflexion, représente la part de l'énergie lumineuse incidente I, réfléchi à la surface du matériau [33].

Le coefficient d'absorption α [cm^{-1}], traduisant quantitativement la capacité d'un matériau à absorber la lumière, est donné par [33]:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \tag{I-21}$$

k: coefficient d'extinction.

λ : longueur d'onde de la lumière incidente.

La figure (I-13) montre l'évolution en fonction de la longueur d'onde du coefficient d'absorption pour un nombre de semiconducteurs.

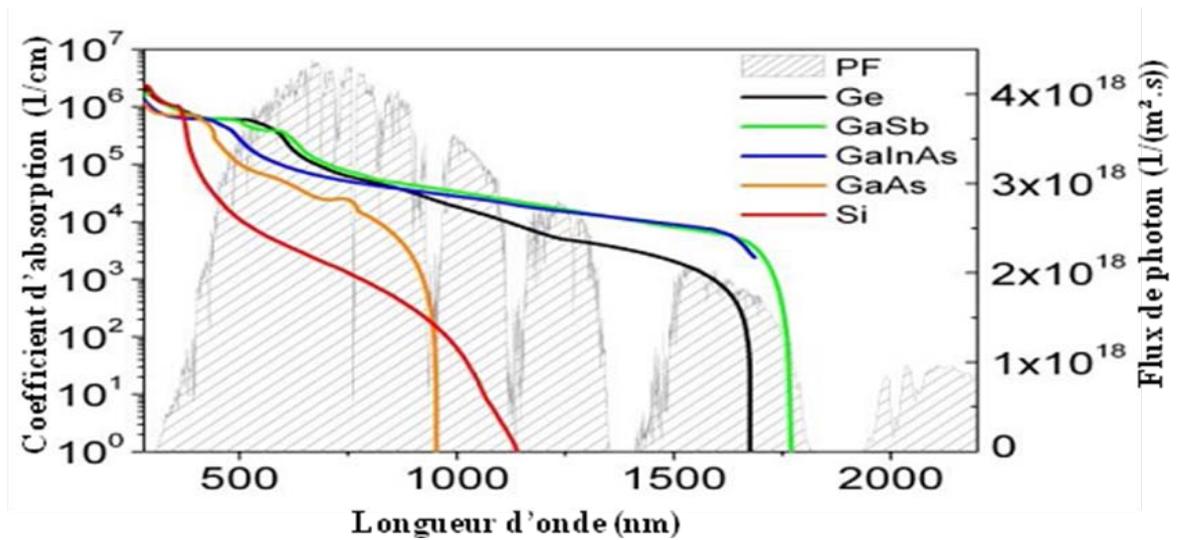


Figure (I-13): Le coefficient absorbant en fonction de la longueur d'ondes pour certains semiconducteurs : on montre aussi le spectre solaire $AM_{1.5D}$ [35].

Parmi les semiconducteurs, on distingue deux types de gap: les semiconducteurs dits à gap indirect comme le Si et le Ge (Figure I-14 (a) et (b)) qui ont des extremums en des points différents de l'espace réciproque des vecteurs d'onde k et ceux dits à gap direct comme le GaAs (Figure I-14 (c)), qui ont des extremums situés au même point de l'espace réciproque. Le gap est représenté par la zone hachurée sur la figure (I-14) [36].

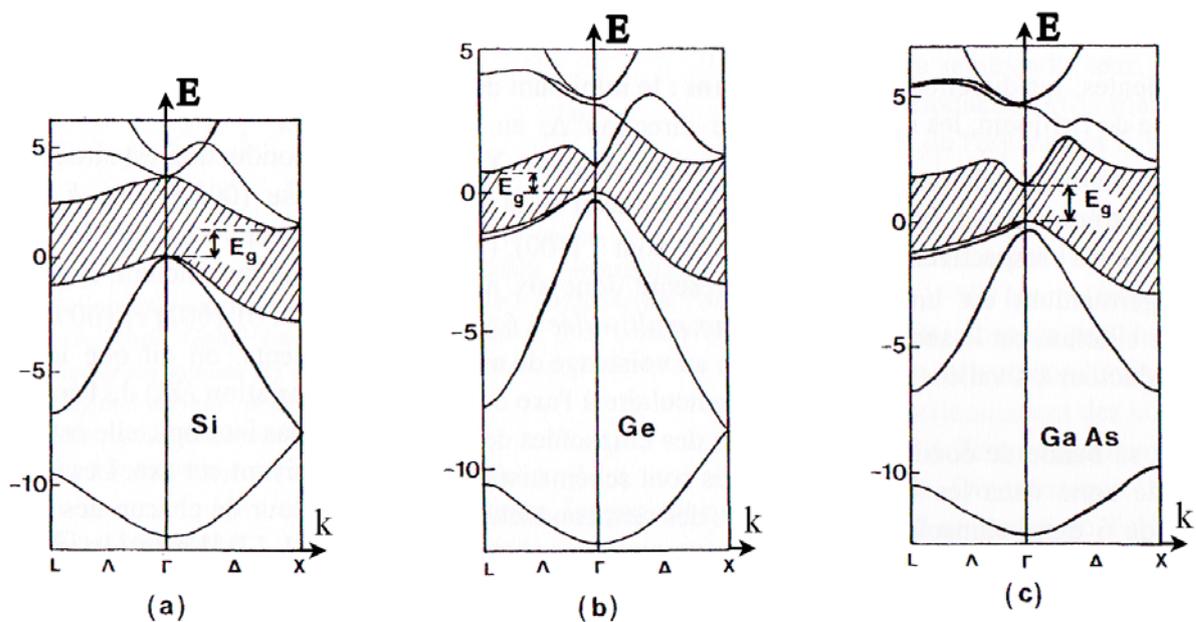


Figure (I-14) : Structure de bandes d'énergie (E_g) du Si, Ge et GaAs dans l'espace réciproque de Vecteurs d'onde k , d'après [36].

I -3.5.2 Génération optique :

Le flux de photons est absorbé pour donner lieu à la génération de paires électrons –trous [36] en tenant compte du rendement quantique $\gamma(\lambda)$, rapport entre le nombre de paires électron-trou créées et nombre de photons absorbés, le taux de génération dans le volume, à la distance x de la face éclairée du matériau, s'écrit [34]:

$$g(x, \lambda) = \beta\gamma(\lambda) = \alpha(\lambda)\gamma(\lambda)[1 - R(\lambda)]\Phi(0, \lambda)\exp[-\alpha(\lambda).x] \quad (\text{I-22})$$

β : Le taux d'absorption des photons dans le semiconducteur (en photons $\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$).

$\Phi(0, \lambda)$: flux de photons incidents.

Pour la totalité du spectre solaire qui éclaire une photopile, en admettant que le rendement quantique $\gamma(\lambda)$ soit égal à 1, le taux de génération devient alors [34] :

$$G(x) = \int_0^{\infty} \frac{\lambda S(\lambda)}{hc} [1 - R(\lambda)] \alpha(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)x) d\lambda \quad (\text{I-23})$$

$R(\lambda)$: le coefficient de réflexion à partir de la surface.

$S(\lambda)$: répartition spectrale du rayonnement solaire incident ($\text{W}.\text{cm}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$) [34].

I -3.6 Mécanismes de Recombinaison des Porteurs en excès:

Lorsqu'un semiconducteur est sous illumination, il y a création d'électrons et de trous. La densité des porteurs minoritaires de charge sera alors en excès par rapport à la densité des porteurs minoritaires en obscurité. Lorsque l'excitation est supprimée, les porteurs minoritaires en excès reviennent à leur état d'équilibre. Le processus physique de retour à l'état d'équilibre est connu sous le nom de recombinaison [37].

La recherche de hauts rendements nécessite une excellente connaissance des mécanismes de recombinaison dans le matériau semiconducteur constituant la photopile. Divers types de mécanisme de recombinaison existent [37].

I -3.6.1 Recombinaison en volume :

Recombinaison de SRH (Shockley-Read Hall):

Le modèle a été présenté en 1952 par Schrockley, Read et Hall [38,39]. C'est une recombinaison à travers les pièges dans le gap interdit [39]. Le taux de recombinaison net à travers un piège $E = E_R$ dans le gap d'énergie est donné par [39] :

$$U_{SRH} = \frac{(n.p - n_i^2)}{\tau_{p0} \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_R - E_{Fi}}{KT}\right) \right] + \tau_{n0} \left[p + n_i \exp\left(-\frac{E_R - E_{Fi}}{KT}\right) \right]} \quad (I-24)$$

Avec τ_{p0} et τ_{n0} sont respectivement les durées de vie des trous et d'électrons données par:

$$\tau_{p0} = \frac{1}{C_p N_r} \quad \text{et} \quad \tau_{n0} = \frac{1}{C_n N_r} \quad (I-25)$$

C_p : Coefficient de capture des trous.

C_n : Coefficient de capture des électrons.

N_r : Densité de centres occupés.

E_R : L'énergie associée aux centres piège.

E_{Fi} : Le niveau de fermi intrinsèque.

Dans la pratique, les centres qui jouent un rôle important dans les processus de recombinaison introduisent des niveaux d'énergie voisins du milieu du gap du semiconducteur, et ont des coefficients de capture tels que $C_n = C_p$. Les centres caractérisés par des coefficients de capture d'électrons et de trous très différents jouent le rôle de piège à électron ($C_n \gg C_p$) ou à trou ($C_p \gg C_n$) [40]. Le modèle SRH est sélectionné dans Atlas par l'option SRH [41].

✚ Recombinaison Auger :

Dans la recombinaison Auger (AR) deux électrons et un trou (eeh) ou bien un électron et deux trous (ehh) sont impliqués. En outre il est possible qu'une excitation complémentaire, par exemple un phonon, y participe [42]. Avec la recombinaison d'Auger, l'énergie en excès est transférée à un autre électron dans la bande de conduction ou à un trou dans la bande de valence (la figure I-15). La recombinaison Auger est exprimée par :

$$R_{Aug} = (C_n n + C_p p)(np - n_0 p_0) \quad (I-26)$$

Avec C_n et C_p les coefficients d'Auger qui dépendent de la température [43]. Cette recombinaison est faible et peut être négligée. Elle est sélectionnée dans Atlas par l'option AUGER [41].

✚ Recombinaison Radiative :

La recombinaison radiative bande vers bande est simplement l'inverse du processus de génération optique. Il est plus important dans les semiconducteurs à gap direct que dans les

semiconducteurs à gap indirect. Quand la recombinaison directe se produit l'énergie de l'électron recombiné se transforme en un photon, c'est le principe de fonctionnement des diodes lasers et des diodes électroluminescentes (LED). Dans les semiconducteurs à gap indirect une partie de l'énergie de recombinaison peut être sous forme de phonons. Le taux net de recombinaison radiative est donné par [44]:

$$R_{spont} = B(np - n_0 p_0) \tag{I-27}$$

B : le coefficient matériel.

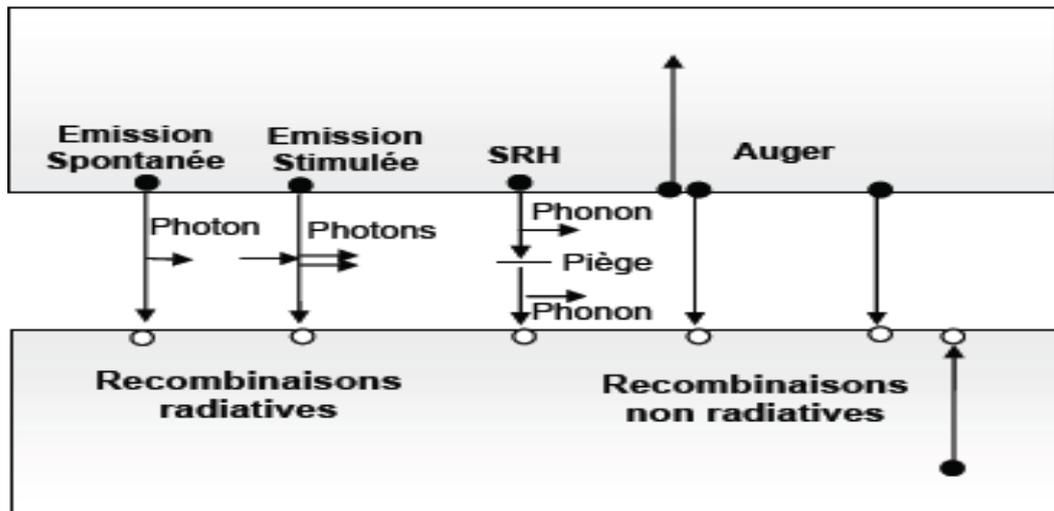


Figure I-15 : Différents types de recombinaison [45].

I-3.6.2 Recombinaison en surface:

La surface est la limite de la périodicité, c'est une zone de défaut par rapport au cristal. Elle est le siège d'états d'interface dont les niveaux d'énergie peuvent se situer dans le gap. Certains de ces états jouent le rôle de centre de recombinaison. La durée de vie des porteurs en surface et de ce fait toujours inférieure à la durée de vie en volume. Il en résulte que dans un semiconducteur excité, la densité des porteurs excédentaires en surface est toujours inférieure à sa valeur en volume [46]. La recombinaison en surface (R_{surf}) peut contrôler les caractéristiques de dispositif entières. Le taux de recombinaison est donné par :

$$R_{surf} = S_0 \frac{pn - n_i^2}{(n + n_i) + (p + n_i)} \tag{I-28}$$

Les sections de capture superficielle des électrons et des trous sont assumées égales et S_0 est la vitesse de recombinaison surface [47].

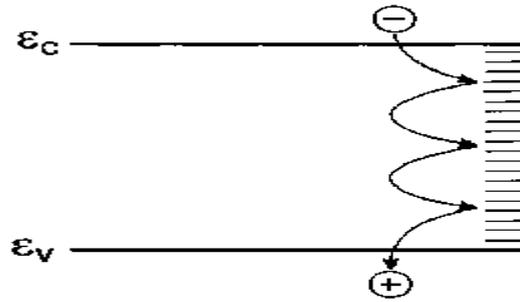


Figure II-16 : La recombinaison via la surface expose continuellement distribué à l'énergie dans la crise de l'énergie d'un semiconducteur [48].

I-4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelque notion de bases relatives au rayonnement Solaire, telles que le spectre solaire et les mécanismes de leur interaction avec les matériaux semiconducteurs comme l'absorption, la génération et la recombinaison des porteurs de charges.

Cette initiation, d'après la littérature, est nécessaire pour bien comprendre de mécanisme de la conversion photovoltaïque.

Bibliographie du chapitre I :

- [1] M. Arrouf, « optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un generateur photovoltaïque », Thèse Doctorat, Université Biskra, 2007,4p.
- [2] H. Abdi et N. Aït Messaoudène, «Etude Expérimentale et Théorique des Performances de deux Capteurs Plans à Contact Direct Eau-Plaque d' Absorption», Rev. Energ. Ren. : Chemss 2000 53-60.
- [3] M.R. Yaïch1 et S.M.A. Bekkouche, «Conception et validation d'un logiciel sous Excel pour la modélisation d'une station radiométrique en Algérie Cas d'un ciel totalement clair», Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 (2009) 677 – 688.
- [4] C. Ngô . «L'énergie ressources, technologies et environnement »,2^e édition, Dunod, paris, 2002.
- [5] J. Lilensten , J. Bornarel. « Sous les feux du soleil: vers une meteorology de l'espace », Université joseph fourier, grenoble 1, 2001.
- [6] E. Parbaile « Contribution à l'optimisation des techniques de dépôts sous vide de cellules solaires organiques », Thèse Doctorat, l'Université de Limoges. 2009.
- [7] C. Ngô , « Le Soleil », dunod , édition, paris, 2005.
- [8] P. Bessemoulin, J. Oliviéri « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », La Météorologie 8e série - n° 31 - septembre 2000.
- [9] M. L. Louazene, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla », Mémoire de Magister, Université Batna ,2008.
- [10] I. Zeghib, «Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire parabolique», Mémoire Magistère, Université Constantine.
- [11] B. Flèche - D. Delagnes « Energie solaire photovoltaïque. » .doc, juin 07.
- [12] A. Guilloteau, « Etude multiphasique de polluants organiques aromatiques : répartition des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques dans les suies et formation d'aérosols dans l'ozonolyse du catéchol », Thèse Doctorat, Université D'orleans ,2007.
- [13] A. Bouden, «Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque », Mémoire Magister, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [14] A. Ricaud, « Gisement solaire et transferts énergétiques », Master Energies Renouvelables, Université de Cergy –Pontoise. Jan 2011.
- [15] F. Zouache, « étude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïque », Mémoire Magistère, université Constantine, 2009.

- [16] A. Ricaud, «photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés», ©1997. presses polytechniques et universitaires romandes.
- [17] N. Oleye, «contribution a la réalisation d'une microcentrale énergétique multigenerateurs éoliens et photovoltaïque simulation du fonctionnement et gestion en temps réel de l'énergie par ordinateur dans un environnement multiprocesseurs », Thèse Doctorat, Université Cheikh Anta Diop – Dakar, 1990, 9p.
- [18] C. Alonso, «Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie » ; Mémoire en vue de l'obtention de L'habilitation à diriger les recherches, université paul sabatier – toulouse III ,2003.
- [19] W. Hojeij «Réalisation et caractérisations optoélectroniques de cellules photovoltaïques organiques », Thèse Doctorat, l'Université de Limoges, 2007.
- [20] A. Labouret, M. Viloz, «énergie solaire photovoltaïque», 2^e édition, Dunod, paris, 2003,2005.
- [21] H. Benis, « Contribution à la modélisation du problème de « Hot Spot » dans les modules solaire Photovoltaïque occultées », mémoire Magistère, Université Constantine, 2008.
- [22] C. Charbonniaud, «Caractérisation et modélisation électrothermique non linéaire de transistors à effet de champ GaN pour l'amplification de puissance micro-onde», Thèse doctorat, Université Limoges, 2005.
- [23] N. Le Sech, «Photocathodes à base de nanotubes de carbone sur substrats semi-conducteurs de type III-V Application aux amplificateurs hyperfréquence», Thèse doctorat, école polytechnique, 2010.
- [24] T. Markvart, L. Castafier, « Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation», Copyright © 2005, Elsevier Ltd. Al.
- [25] C. Ngô, H. Ngô, « les semiconducteurs de l'électron aux dispositifs » , dunod ,paris 2003 .
- [26] O. Bonnaud, «Physique des Solides, des Semiconducteurs et Dispositifs», Université de Rennes 1, Physique des solides, juin 2003.
- [27] A. Luque, S. Hegedus, «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», 2003.
- [28] Jeffery L. Gray, « The Physics of the Solar Cell», Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Edited by A. Luque and S. Hegedus © 2003 John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-471-49196-9.

- [29] Y. Veschetti, « Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince », Thèse doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2005,21-22p.
- [30] Y. Sayad, «Interaction Laser-Semiconducteur : Contribution à l'étude de la technique LBIC - application au silicium photovoltaïque.», Thèse Doctorat, Université Constantine, 2009.
- [31] L. Kronik, Y. Shapira, «Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications», Surface Science Reports 37 (1999) 1-206.
- [32] L. Zighed, «Etude de l'influence de nouveaux films anti réfléchissants sur la conversion photovoltaïque», Thèse doctorat, Université Constantine, 2007.
- [33] M. Orgeret, «les piles solaires le composant et ses applications», Masson, paris, 1985.
- [34] Ab.R. Bechiri, « Effets du désordre et du substrat sur la structure électronique dans les alliages semi-conducteurs III-V», Thèse Doctorat, Université Constantine ,2006.
- [35] I. Mathews, D. O'Mahony, Weiwei Yu, D. Gordan, N. Cordero, B. Corbett, and Alan P. Morrison,« Mechanically Stacked Solar Cells for Concentrator Photovoltaics».
- [36] F. Moutier, « Modélisation et évaluation des Performances des Phototransistors Bipolaires a Hétérojonction SiGe/Si pour les Applications Optique- micro-ondes Courtes Distances», Thèse doctorat, Université Marne-la- Vallée, 2006.
- [37] M. L. Sow, «phénomènes de recombinaison dans la photopile en régimes statique et transitoire », Thèse doctorat, Université Chrikhanta diop Dakar, 1995.
- [38] T. Goudon , V. Miljanovi, and C. Schmeiser, «On the Shockley – read –hall model : generation – recombination in semiconductors », SIAM J. APPL. MATH. ©2007 Society for Industrial and Applied Mathematics Vol. 67, No. 4, pp. 1183–1201.
- [39] M. S. Tyagi, R. Van Overstraeten,« Minority carrier recombination in heavily – doped silicon », Solid-Slate Electronics Vol. 26, No. 6, pp. 577-597, 1983.
- [40] A. Boumaiza, «Recombinaison à l'interface Agrégat Métallique/matrice semiconductrice Effet de la taille», Mémoire Magister, Université Constantine, 2006.
- [41] J-L. Polleux,« Contribution a L'étude et a la modélisation de phototransistors bipolaires a hétérojonction SiGe/Si pour les applications opto-microondes », Thèse Doctorat, conservatoire national des arts et métiers, 2001.
- [42] W. Schmid, «Experimental comparison of localized and free carrier Auger recombination in silicon»,Vol. 21. pp. 12854287, 1978.
- [43] A, Haug, «Auger coefficients for highly doped and highly excited semiconductors », vol .28, pp291-293 1978.

- [44] J. Piprek, « Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation », University of California at Santa Barbara, Academic press, 2003.
- [45] E. Havard, « Contribution à l'étude de l'injection électrique dans les VCSEL de grandes dimensions », Thèse Doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.
- [46] S. Bouchekouf, « Modélisation numérique des OPVC dans les systèmes EnR », Thèse doctorat, Université Constantine, 2010.
- [47] D. J. Chin and D. H. Navon, « Two –dimensional analysis of the interdigitated back – contact solar cell », solid- state electronics Vo 24, pp.109- 114 © pergamon press Ltd ,1981. printed in Great Britain.
- [48] P. Würfel, « physics of solar cells from principles to new concepts », Universität Karlsruhe, 2005 WILEY-VCH verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim.

Chapitre II :

***Principe de la conversion
photovoltaïque***

II -1 Introduction :

L'effet photovoltaïque correspond à l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux côtés d'une jonction semi-conductrice sous l'action d'une radiation lumineuse [1]. Quand cette cellule est exposée aux radiations, les photons créent les paires d'électron-trou avec l'énergie plus grande que la bande d'énergie du semi-conducteur ($h\nu > E_g$) [2]. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique [1]. Aux cours de ces dernières années, des améliorations considérables concernant les performances des cellules solaires ont permis d'aboutir à des rendements de conversion photovoltaïque respectivement de 24.8 % et de 23 % pour des cellules solaires à base d'arsenic de gallium et de silicium, sous la condition d'éclairement normal [3]. Dans ce chapitre nous allons présenter le principe de la conversion photovoltaïque et le principe de fonctionnement des cellules solaires.

II -2 Historique bref:

- L'effet photovoltaïque a été décrit en premier par le physicien français Edmond Becquerel (1788-1878) en 1839.
- WG Adams et RE Day créent la première cellule PV au sélénium en 1877 (rendement 1 %).
- Albert Einstein (1879-1955) expliqua cet effet en 1904 et reçut le prix Nobel en 1921.
- Les laboratoires Bell (Charpin, Pearson et Price) présentent la première cellule au silicium le 25 avril 1954 (rendement de 4 % à 6%).
- Les premières cellules solaires en GaAs, fabriquées par Jenny et al en 1956 ont été sous forme d'homojonction p/n avec une efficacité de conversion de 3 à 6 % seulement.
- Première utilisation photovoltaïque dans un satellite artificiel Américain Vanguard 1 en 1958 (rendement 9 % et 0,1 W).
- Première application terrestre dans un phare au Japon en 1963 (242 W).
- Première maison photovoltaïque, Solar One, est construite à l'université de Delaware à l'USA en 1973.
- Première installation PV reliée au réseau en Europe (TISO en Suisse) en 1982.
- Première installation PV reliée au réseau électrique en France en 1992 (900 W) [4], [5].

Le développement de la nouvelle technologie d'énergie a été plutôt modéré jusqu'au Milieu des années 70 et a été limité par les technologies conventionnelles d'énergie dominantes, les combustibles fossiles, particulièrement le charbon, le pétrole et le gaz naturel. En outre la recherche a été consacrée surtout au développement de l'énergie nucléaire [6].

Durant cette période la production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque a été seulement utilisée dans les applications spatiales, pompage de l'eau, transport, centrales photovoltaïques, électrifications publiques, petit appareillage, PV intégré au bâtiment [6]. ensuite, la situation a changée radicalement. Des grandes améliorations ont permis l'augmentation de l'efficacité de la conversion d'énergie, réduisant ainsi les coûts des cellules, par l'utilisation de différents matériaux de semi-conducteurs.

Une autre question importante est l'impact des technologies classiques de la production d'énergie sur l'environnement (pollution de l'air et l'effet de serre qui en résulte). Par exemple l'énergie nucléaire elle-même est une source de problèmes tels que la radioactivité et les déchets nucléaires [6]. L'avantage de l'énergie produite par les cellules photovoltaïques est la production d'énergie propre et durable et son avenir est prometteur [6].

II -3 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

II -3.1 Jonction PN :

Pour obtenir une cellule photovoltaïque il faut réaliser une diode (c'est le cœur d'une cellule PV), c'est-à-dire réaliser une jonction du type P-N (ou N-P). Dans un tel dispositif, certains des électrons de conduction excessifs dans le matériau émigrent rapidement au matériau de type p pour combler les trous de valence. Ceci provoque un champ électrique fort et permanent à proximité de la jonction, comme il est montré dans la figure (II-1) [6].

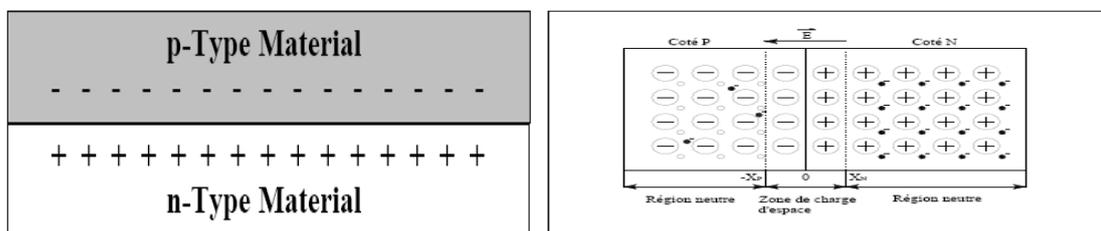


Figure (II-1) : La Jonction P-N.

Dans la figure (II- 2) des courants de diffusions de trous et d'électrons se développent au voisinage de la jonction (couche de déplétion), créant, à son voisinage, une barrière de

potentiel qui s'oppose au courant de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone. Il y a création d'un champ électrique qui entraîne les porteurs minoritaires vers la zone où ils sont majoritaires [7].

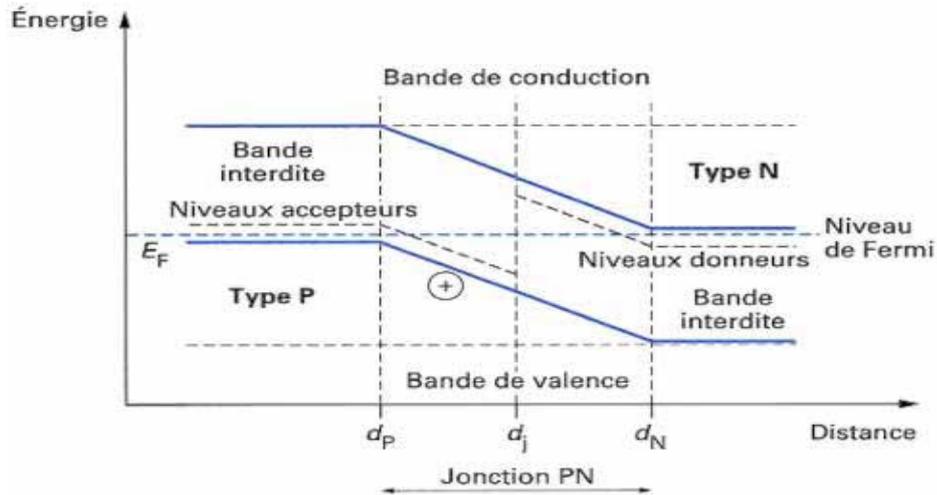


Figure (II-2) : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction PN [8].

Si l'on polarise une jonction PN, on obtient la caractéristique $I_{obs} = f(V)$ donnée sur la figure (II-3), le courant sous obscurité dans une telle structure est donné par la formule [9]:

$$I_{obs} = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-1})$$

Avec:

I_s : Courant de saturation inverse de la jonction P-N.

K : la constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K).

T : la température effective des cellules (en Kelvin).

V : Tension appliquée aux frontières de diode (V).

q : la charge de l'électron $= 1,6 \times 10^{-19}$ C.

n : le facteur de qualité de la jonction.

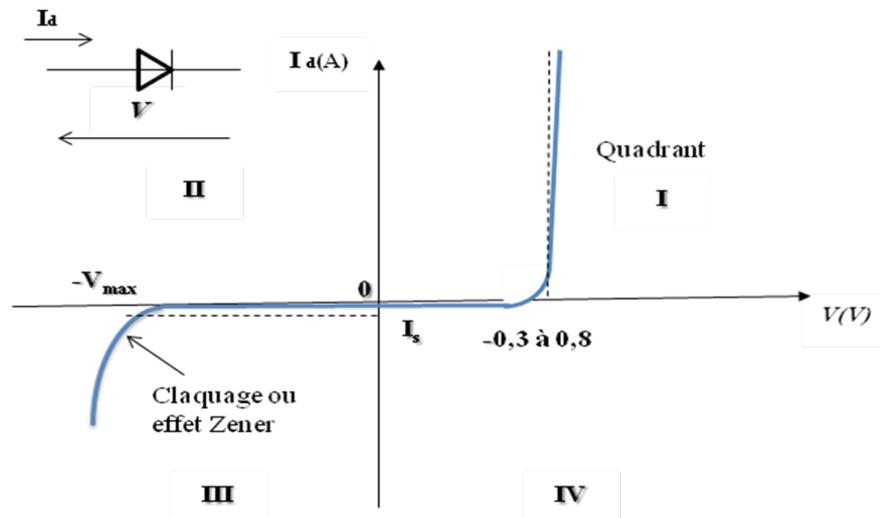


Figure (II-3) : Caractéristique d'une jonction PN polarisée [8].

Le courant de saturation I_s appelé également par le courant inverse de la jonction P-N, a deux composantes [10]:

- Le courant de diffusion des porteurs minoritaires, constitué par les électrons de la région P et les trous de la région N qui parviennent à atteindre la zone de charge d'espace par diffusion.
- Le courant de génération thermique dû aux paires électrons-trous créées thermiquement dans la zone de charge d'espace.

Le facteur n , compris entre 1 et 2, représentant le coefficient d'idéalité de la jonction P-N, permet de tenir compte des différentes composantes du courant direct circulant dans la jonction P-N :

- Les composantes dues aux gradients de concentration dans les régions N et P constituent les courants de la diffusion des électrons et des trous ($n=1$).
- La composante due aux recombinaisons dans la zone de charge d'espace constitue le courant de recombinaison de la jonction ($n=2$) [10].

II -3.2 Principe de l'effet photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque (PV) signifie la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le nom est une combinaison de *Photos* (lumière en grec) et *Volta* (du nom du pionnier de l'électrotechnique Alessandro Volta) [11].

Le photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés [12]:

- L'absorption de la lumière dans le matériau.

- Le transfert d'énergie des photons aux porteurs de charge.
- La collecte des charges.

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption des photons donnant lieu à la création de paires électron- trou. Le champ électrique permanent, au sein du matériau, assure la séparation rapide de ces porteurs pour éviter les phénomènes de recombinaison [13].

Le mode de fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur les figures (II-4 et II-5):

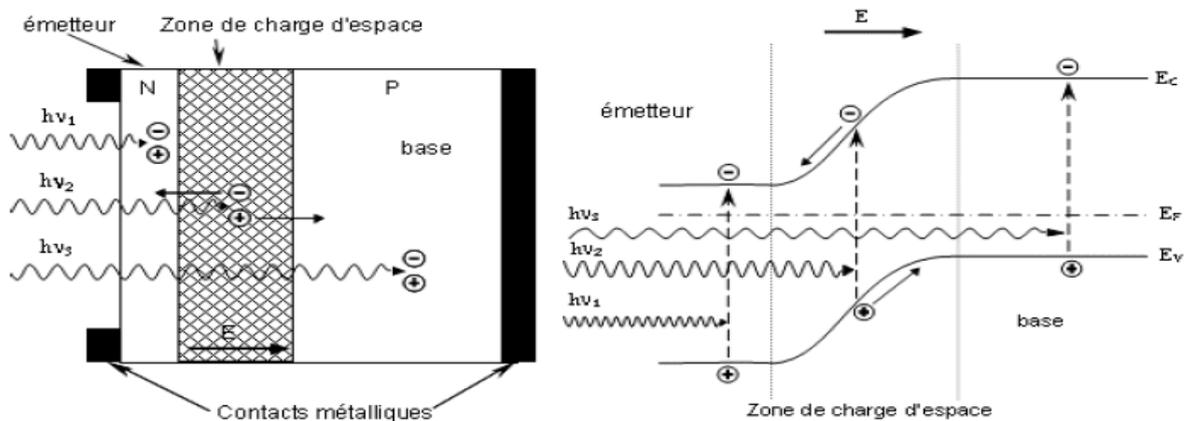


Figure (II-4): Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une Cellule Photovoltaïque [14].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. on aura un photocourant de diffusion [15] :
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique: les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération [15].

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [14].

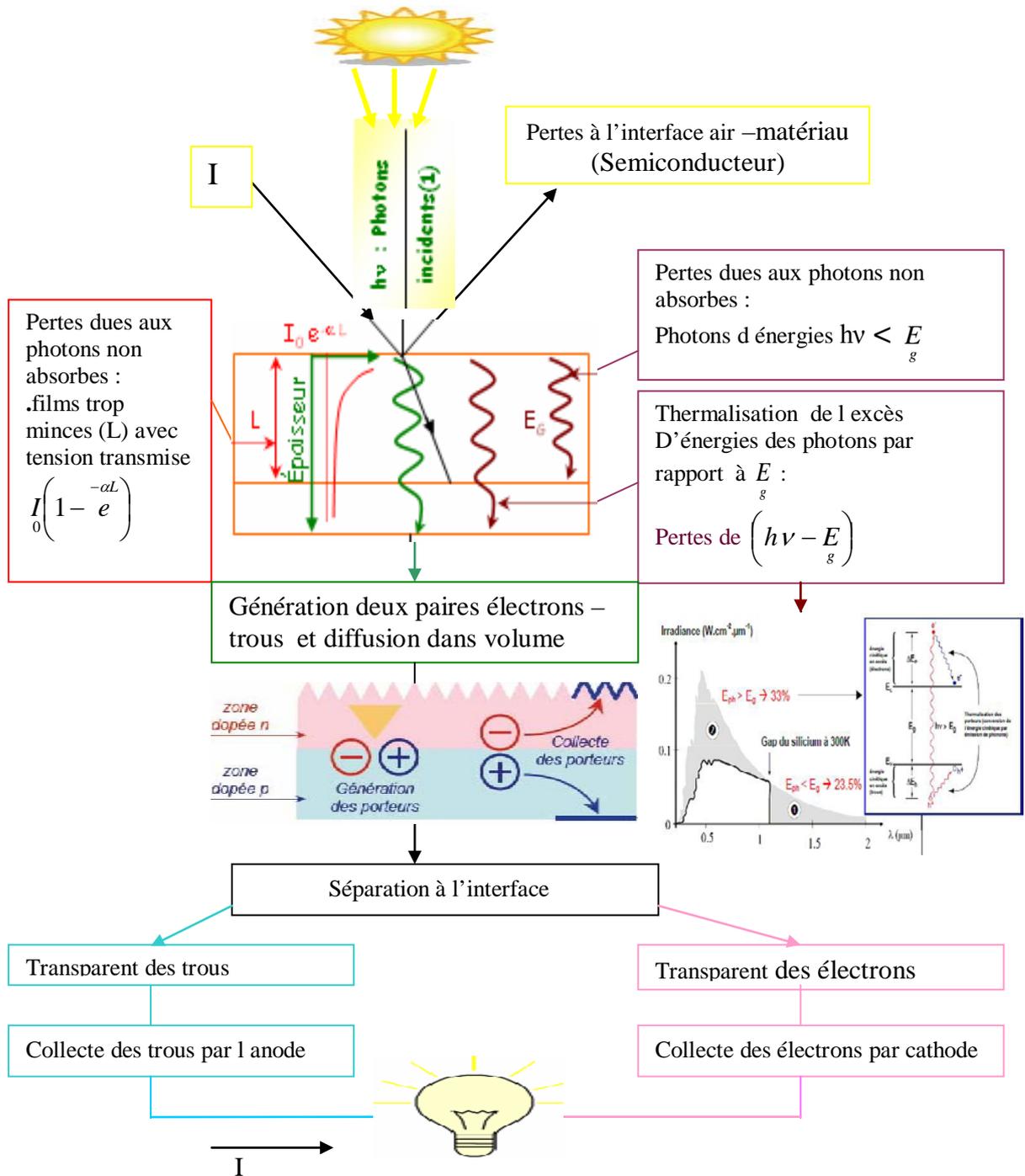


Figure (II-5) : Etapes successives impliquées dans une cellule photovoltaïque.

II -4 Paramètres de la cellule solaire :

Considérons la caractéristique courant – tension de la cellule photovoltaïque représentée sur la figure (II-6). Les paramètres de sortie de la cellule sont déduits comme suit :

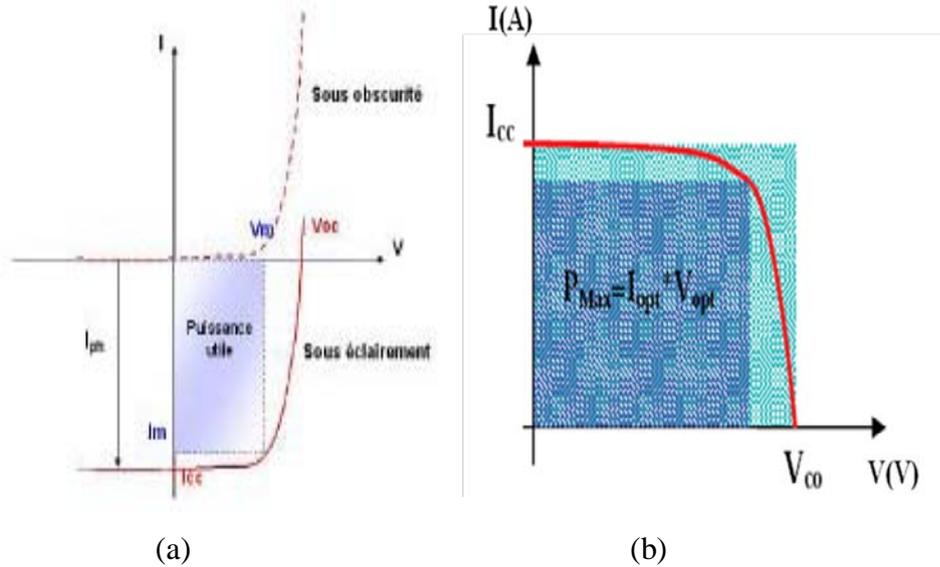


Figure (II- 6): a)Caractéristique I (V) d’une cellule photovoltaïque [16] .b) puissance maximale [17].

✚ Courant de court-circuit :

Si les deux électrodes sont en court –circuit à travers un ampèremètre, les électrons entrainés par le champ interne de la jonction vont donner naissance à un «court-circuit» I_{cc} qui correspond au photo-courant I_{ph} génère par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photo-courant est proportionnel à l’intensité du rayonnement incident et à la surface éclairée de la cellule [18]. Il définit la quantité de paire electron-trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison le long des les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) [19] :

$$I_{ph} = qG(L_n + L_p) \tag{II-2}$$

Où q est la charge électrique.

✚ Tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière de potentiel et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l’intensité lumineuse [20] :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right) \tag{II-3}$$

Où I_s : courant saturation et I_{cc} le courant de court circuit.

✚ Facteur de forme :

Le facteur de forme (FF) a une relation avec l'efficacité de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée P_{\max} et la puissance idéale $V_{co} \cdot I_{cc}$ [18] :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II-4})$$

La puissance maximale délivrée à la charge est présentée par le rectangle hachuré dans la figure (II-7).

$$P_{\max} = I_m \cdot V_m \quad (\text{II-5})$$

I_m : Courant correspondant à la puissance maximale fournie.

V_m : Tension correspondant à la puissance maximale fournie.

Le facteur de forme est donc sans unité. Il doit être compris entre 0,75 et 0,85 pour une bonne cellule solaire [21].

✚ Rendement de conversion d'énergie :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire incident P_{in} . On appelle rendement maximal le rapport entre la puissance maximale débitée et la puissance P_{in} incidente [18]:

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = FF \frac{V_{co} I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{II-6})$$

✚ Réponse spectrale de la cellule photovoltaïque :

La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant génère par la cellule et la puissance lumineuse incidente en fonction de différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale (RS) est donne par la relation [22] :

$$RS = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (\text{II-7})$$

EQE représente le rendement quantique externe de la cellule, c'est-à-dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. Pour une longueur d'onde donnée, le rendement quantique externe est égal à 1 si chaque photon génère un électron. si l'on prend en compte la réflectivité de la surface de la cellule photovoltaïque, on détermine son rendement quantique interne IQE [22].

Les cellules solaires absorbent différentes longueurs d'onde selon leurs compositions. Sur la Figure (II-7), on présenté la réponse spectrale pour différentes cellules solaires cette

caractéristique indique la gamme du spectre solaire qu'une cellule peut absorber, identifiant de ce fait ses vertus. Les cellules qui se composent d'un semiconducteur composé, à savoir le GaAs, CdTe et CIS absorbent des longueurs d'onde dans la gamme de 500~900nm et sont reconnues en tant que cellules solaires à rendement élevé. Egalement, les cellules solaires au a-Si et au c-Si montrent l'excellente absorption aux longueurs d'onde courtes et longues, respectivement. Les cellules solaires composées de combinaison de ces derniers sont capables de réaliser un rendement plus élevé [23].

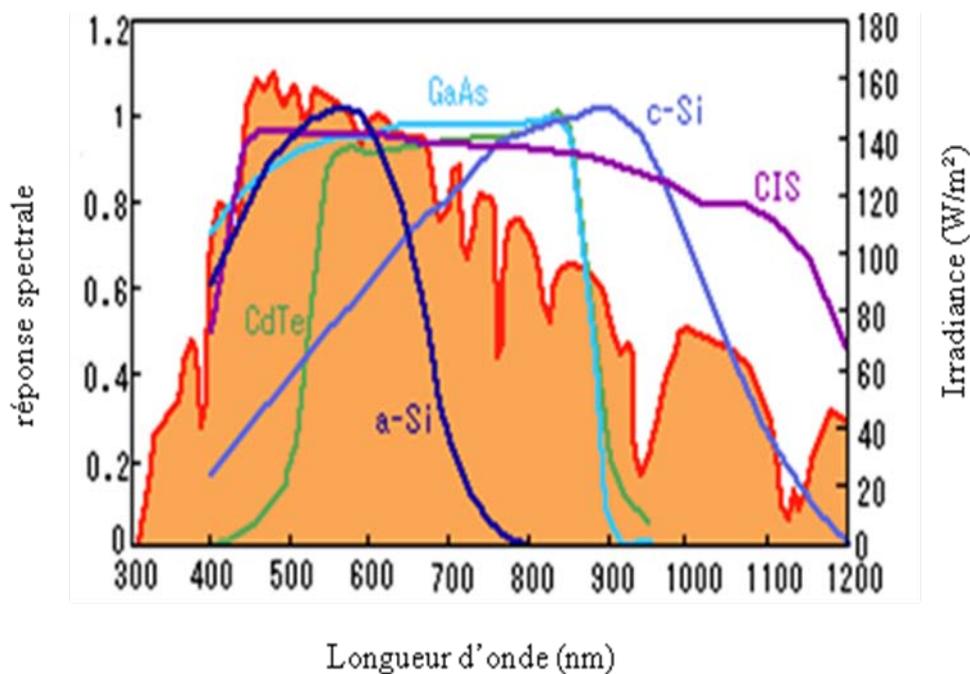


Figure (II-7) : Caractéristiques réponse spectrale de piles solaires [23].

II-5 Technologie du Si et du GaAs :

De nombreux semiconducteurs peuvent être choisis pour réaliser des photopiles. En pratique, quatre types principaux de semiconducteur sont actuellement utilisés [24]:

- le silicium cristallin (monocristallin et polycristallin).
- le silicium amorphe.
- les couches minces de type *GaAs*, *CdTe*, *CIS*.
- les semiconducteurs organiques.

Le silicium est le plus employé, cependant l'arséniure gallium offre de meilleures performances, mais reste beaucoup plus coûteux [24].

Les différents semiconducteurs utilisés sont présentés dans la Figure (II-8).

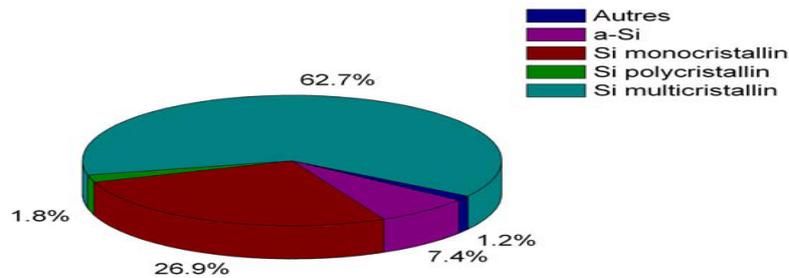


Figure (II-8): Répartition en pourcentage des différentes filières de cellules photovoltaïques produites en 2006 [25].

Pour sélectionner un matériau pour fabriquer des cellules solaires, il faut non seulement prendre en compte la valeur du gap du matériau mais également le coût du procédé de fabrication de la cellule puis du module photovoltaïque [26].

Dans ce mémoire les deux semiconducteurs concernés sont le Si et le GaAs. Par la suite on présente les propriétés et les technologies de ces deux types de semiconducteurs.

✚ Le silicium cristallin Si :

C'est le matériau semi-conducteur le mieux connu et donc le plus utilisé dans l'industrie. Il représente encore à ce jour la technologie dominante avec plus de 80% de part de marché [26]. Ce semiconducteur présente en effet plusieurs avantages [27] :

- Le silicium est le plus prometteur car il est non-toxique et très abondant sur la Terre puisqu'il est facilement extrait à partir du sable.
- Il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques
- Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore).
- La stabilité et la longue durée de vie (de fonctionnement) des cellules solaires.
- La simplicité relative du traitement [28], [29].

Ses véritables inconvénients sont [28] :

- Gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct. Pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100 μm pour le silicium, alors que seulement 1 μm de GaAs suffit.
- La largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV), le GaAs, avec une largeur

de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés [28].

Les cellules au silicium (Si) peuvent être fabriquées à partir de plaquettes de silicium cristallisée (c-Si) dans deux catégories distinctes, le silicium monocristallin (mc-Si) et le silicium polycristallin (pc-Si). Le silicium monocristallin est plus cher que le polycristallin mais donne des rendements plus élevés [30].

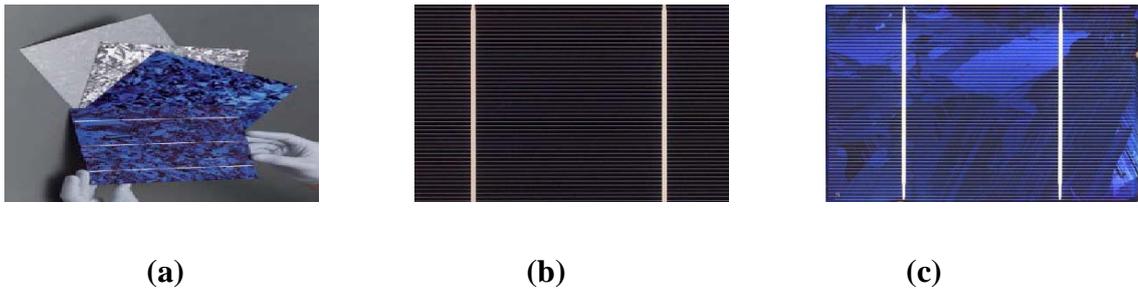


Figure (II-9):a) Cellule photovoltaïque en silicium 20 cm × 20 cm, b) silicium Monocristallin, c) silicium Multi cristallin [30], [31].

Dans la Figure (II-10), on présente l'évolution de la demande mondiale du silicium pour l'industrie microélectronique et photovoltaïque [25].

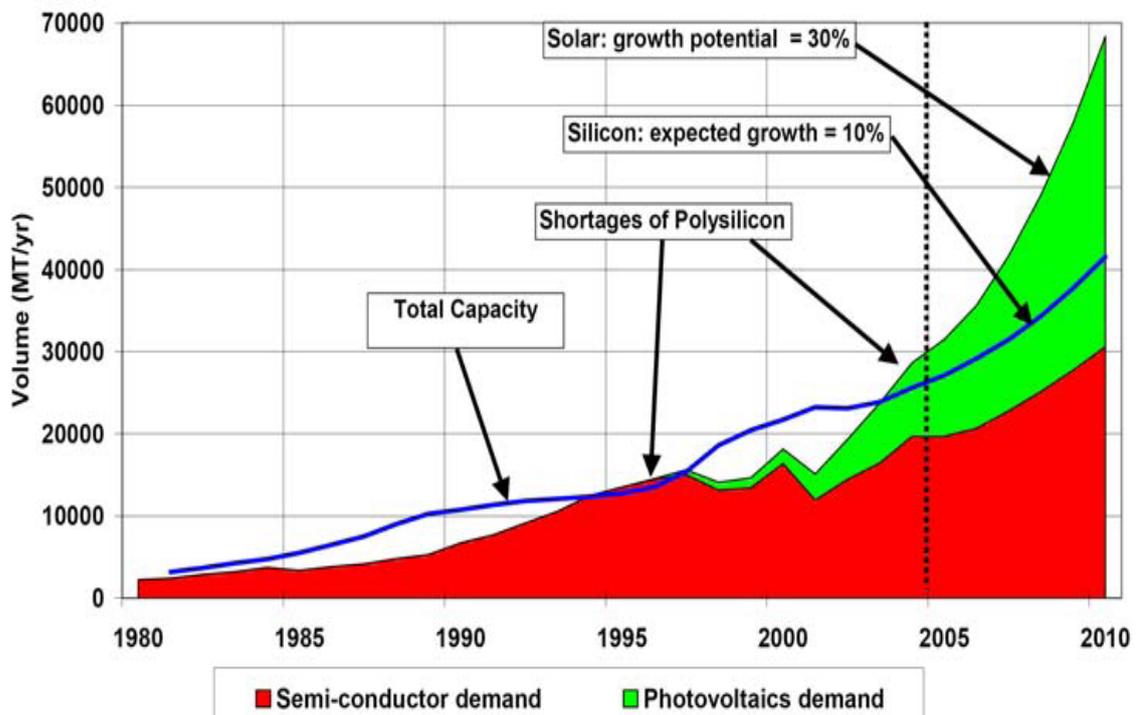


Figure (II-10): Évolution de la demande mondiale de silicium pour l'industrie Microélectronique et photovoltaïque [25].

✚ L'arséniure de gallium GaAs :

C'est un matériel largement employé dans l'industrie de semiconducteur en raison de son gap d'énergie direct et grand ($E_g = 1.42$ eV) [32]. Par conséquent il a une forte absorption [32]. Durant les dernières années, les cellules solaires à base de l'arséniure de gallium ont été largement utilisées, plus particulièrement aux applications spatiales, et ceci à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace [32]. Cependant, un problème important s'opposait au développement des piles solaires au GaAs, à savoir celui de la vitesse de recombinaison en surface [33]. C'est la raison pour laquelle le rendement réalisé pour les premières cellules solaires était seulement de l'ordre de 10% [33]. Ensuite on a parvenus à des efficacités de 26.1% pour des cellules de jonction simple mais avec un coût élevé [25].

II- 6.1 Structure cristallines du GaAs et du Si:

Le silicium à une structure cristalline du type du diamant cette structure est présente dans la figure (II-11 a), et le GaAs qui est un élément III-V à une structure cristallographique de type blende de zinc. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (*Si*, *Ge*, etc...), est constituée de deux sous- réseaux cubique à faces centrées, l'un d'éléments Ga, l'autre d'éléments As, décalé l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale (voir la figure II-11 b) [34].

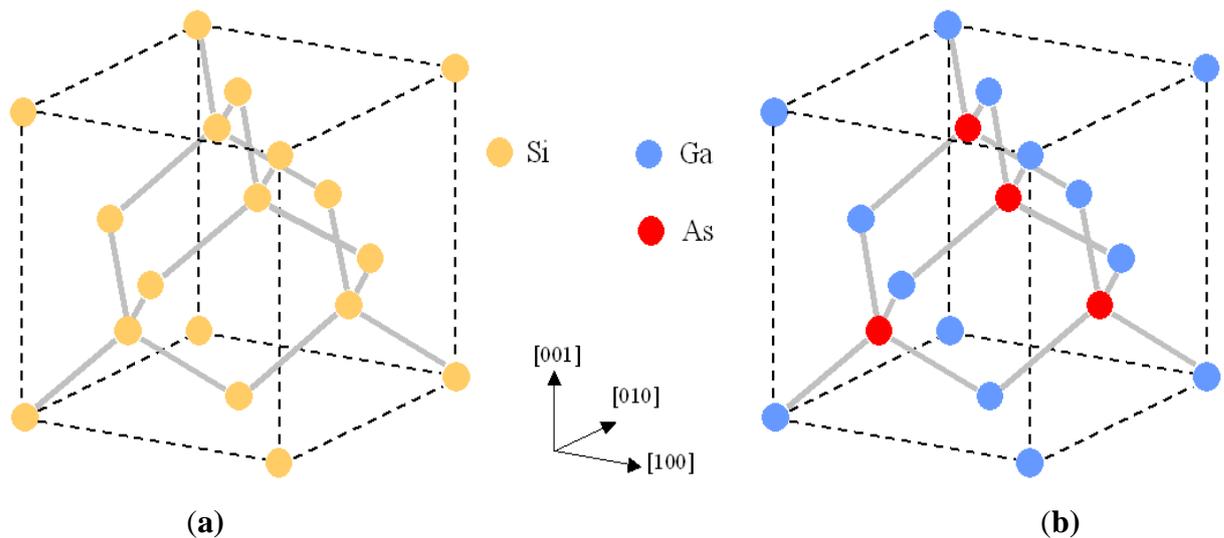


Figure (II-11) : Structure cristalline du *Si* et du *GaAs* [35].

Dans le tableau II- on présente les paramètres physiques des deux semiconducteurs : Si, GaAs.

Propriété	Si	GaAs
.Gap à 300 K (eV)	1.12	1.42
	Indirect	Direct
.structure	D (diamant)	ZB (blende de zinc)
.densité de molécule/atome ($/cm^3$)	5.02×10^{22}	2.21×10^{22}
.masse moléculaire	28.09	144.63
.Température maximale de fonctionnement ($^{\circ}C$)	300	460
.Température de fusion ($^{\circ}C$)	1415	1238
.Stabilité physique	Bonne	Correcte
.Mobilité des électrons ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)	1350	8000
.Mobilité des trous ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)	480	300
.champ de claquage ($10^6V^1cm^{-1}$)	0.3	0.4
.conductivité thermique (Wcm^{-1})	1.5	0.5
.constante diélectrique	11.9	13.18
. paramètre de maille (Å)	5.43	5.65
.coefficient réflexion	0.30	0.286
.concentration intrinsèque n_i ($/cm^3$)	1.45×10^{10}	4.5×10^6
. durée de vie des électrons (s)	8×10^{-5}	4×10^{-8}
. durée de vie des trous (s)	8×10^{-5}	4×10^{-8}
.coefficient diffusion des trous (cm^2 / s)	15.52	10.35
.coefficient diffusion des électrons (cm^2 / s)	38.81	219.9
.indice de réfraction	3.42	3.3
.densité (g / cm^3)	2.32	5.32

Tableau (II-1) : Propriétés du Si et GaAs à température ambiante 300K [36], [37], [38], [39], [40].

II- 6.2 Elaboration du silicium cristallin :

Le silicium, à la base de toute l'industrie électronique moderne, est obtenu par réduction de la silice dans un four électrique, ce qui fournit le matériau dit "métallurgique" dont la pureté est de 98 % environ. Celui-ci est purifié à son tour, sous forme de gaz trichlorosilane ou silane. Après pyrolyse de ces derniers, le matériau obtenu sert de produit de départ pour la croissance [41].

Le silicium monocristallin peut être obtenu sous forme de lingots de 30 cm de diamètre et des longueurs de plus de 1 m par des procédés industriels tels que le tirage CZ (Czockralski) [15]. Il faut noter qu'en partant de 1 kg de silice, on n'obtient pas plus de 100 g de silicium monocristallin pour une dépense énergétique considérable, de l'ordre du MWh. De plus, la

moitié de ce cristal sera perdue au cours du découpage en tranches de 300 μm d'épaisseur. [41] ou lors de la purification par fusion de zone (FZ) [15].

Le Silicium cristallin a encore un potentiel considérable de réduction des coûts. Dans le passé, il a toujours maintenu sa domination en dépit de l'élaboration de nouveaux matériaux et de nouvelles approches. Seule l'expansion rapide du marché qui va conduire à des réductions des coûts au niveau de l'échelle économique. Il a pu être estimé que son coût ne baissera pas beaucoup au-dessous de la moitié des coûts actuels. Des développements supplémentaires de la technologie du silicium vers la production à moindre coût se sont effectués dans deux principales directions : la technologie Rubban et le silicium cristallin en couches minces [42].

II- 6.3 Elaboration du GaAs cristallin :

Il y a plusieurs méthodes utilisées pour la croissance des composés III-V comme le GaAs. Ces méthodes peuvent être classées dans deux catégories: croissance en volume (massive) et croissance en couches minces par épitaxie [41].

Le composé GaAs se dissocie à haute température (1238C°) par l'évaporation d'arsenic. C'est cette caractéristique qui impose la limitation principale des techniques de croissance par fusion pour le GaAs [43].

Au début la croissance des monocristaux fondus a été produite par solidification dans des barquettes de quartz qui se trouvent à l'intérieur d'ampoules scellées (étanches). Une variété de telles techniques de croissance par barquettes horizontales existe, y compris Bridgman et la zone fondue. Elles sont toujours l'objet de plusieurs articles de revues. La partie majeure du GaAs produite commercialement est toujours fabriquée de cette manière. Les avantages offerts par ces méthodes sont [43]:

- L'habileté de maintenir un contrôle précis de la composition.
- Une faible densité de dislocations.
- Incorporation de dopants de haute concentration.
- Croissance de grands lingots.

La deuxième technique pour la production massive est la croissance Czochralski. C'est la technique la plus utilisée pour la fabrication de silicium monocristallin. Le problème de son application à des composés dissociables a été surmonté par l'utilisation de la technique Czochralski à liquides encapsulés (liquid encapsulated Czochralski LEC), proposée d'abord par Metz et al [43] et appliquée aux composés III-V par Mullin et al [43].

A cause de la volatilité de l'arsenic à la température de fusion du gallium les technologues se sont dirigés vers la deuxième catégorie : croissance par épitaxie. L'épitaxie

est le processus par lequel une couche de matériau, nouvellement déposée sur un substrat, forme une structure monocristalline. Les couches de GaAs qui sont épitaxiées sur des substrats GaAs préparés proprement présentent généralement une transition quasi-parfaite à partir du substrat vers la couche épitaxiée où la structure cristalline et l'orientation du substrat sont conservées [43]. Il existe plusieurs techniques d'épitaxie : épitaxie par jet moléculaire (MBE), épitaxie en phase liquide (LPE) et épitaxie en phase vapeur (VPE, CVD) [43].

II- 7 Caractéristiques expérimentales des Cellules solaires à base de Si et GaAs :

II- 7.1 Cellules solaires en (c-Si) :

Il existe plusieurs types de cellules solaires à base de Si. Une de ces configurations est la structure n^+pp^+ . Avec une section de 243.4 cm^2 , une efficacité maximale de 17.12 % a été obtenue [44]. Les contacts d'une cellule solaire doivent être ohmiques [45]. Sur l'émetteur les contacts sont déposés sous forme de grille. La géométrie de celle-ci doit assurer une faible résistance série tout en limitant l'ombrage de la cellule [46]. Pour obtenir un contact ohmique, la région sous le contact avant est surdopée n^+ , appelé par l'émetteur sélectif [46]. Le contact arrière couvre totalement la surface arrière de la cellule solaire. Il est caractérisé par une vitesse de recombinaison superficielle très élevée. Le champ électrique arrière (Back Surface Field) BSF (Figure II-12 b) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p^+-p ou n^+-n) sur la face arrière pour en assurer une bonne passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de dopage entre la base et la région BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base [45].

Les principales étapes technologiques du procédé de réalisation d'une cellule solaire conventionnelle en silicium sont les suivantes [47]:

- Traitement de la surface des plaquettes et texturation.
- Formation de la jonction n^+-p ou de la structure n^+-p-p^+ .
- Isolation de la jonction parasite.
- Passivation de la surface et des joints de grains.
- Métallisation : dépôt de la grille collectrice et du contact arrière.
- Dépôt de la couche antireflet (oxyde de silicium, nitrure de silicium,...). Généralement, la technique utilisée pour ce dépôt est la PECVD ; plasma assistée par vapeur chimique qui se déroule à des températures de déposition assez basses [48].

On présente dans les figures (II- 12 a et b) la structure de la cellule et le diagramme d'énergie correspondant [47].

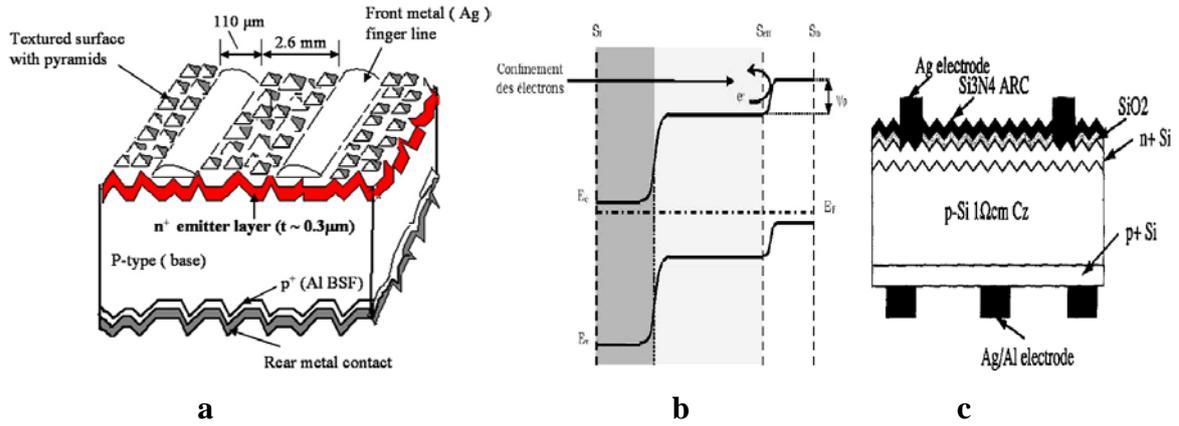


Figure (II-12): Structure et diagramme énergétique d’une cellule solaire en Si.

On présente dans la figure (II-13 (a)) l’efficacité de conversion, la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuite (I_{sc}) et le facteur de forme de la cellule solaire mesurés qui sont respectivement : 17.12 %, 618.4mV, 5.32A et 77 %, pour le spectre AM1.5. La cellule a un courant de fuite très bas et une très bonne réponse dans le visible [44].

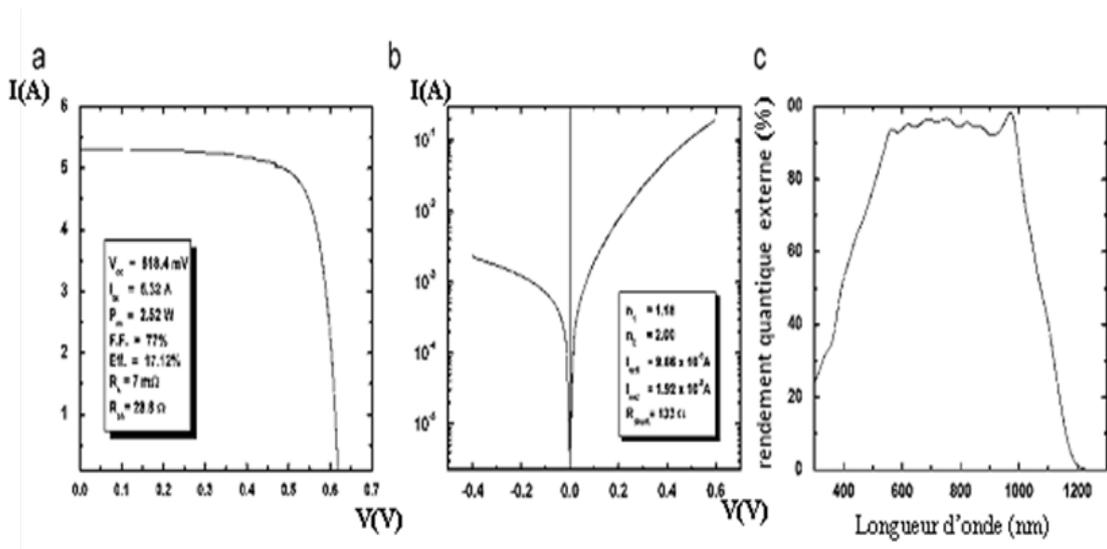


Figure (II-13): Les caractéristiques électriques de la cellule solaire en Si $n^+ - p - p^+$: (a) I-V sous illumination AM1.5, (b) I-V dans obscurité (c) rendement quantique externe [44].

Les cellules épaisses sont moins affectées par les états de surface que les cellules minces. Par exemple une cellule solaire d’épaisseur de 400 μm présente un rendement de conversion de 28.5% et peut diminuer à 26.8% selon les états de surface. Cependant pour cellule mince de 1 μm le rendement est de 24.7% et peut diminuer jusqu’à 19.8% selon l’état de surface [49]. Le rendement peut aussi être affecté par les pertes par réflexion ou l’ombrage de la cellule [49].

II- 7.2 Cellules solaires en GaAs :

La première cellule solaire de haut rendement a été développée pour la première fois par Woodall et Hovel en utilisant une hétérostructure $AlGaAs/GaAs$ obtenue par épitaxie en phase liquide [50]. Leur rendement record sous AM1 était 22% [50]. Le développement de la technique de croissance MOCVD et une compréhension meilleur des causes de pertes a conduit à des améliorations stables dans le rendement qui a parvenu à atteindre 25% sous AM1 et 29% pour des ensoleillements plus concentrés.

Un exemple de la structure de base du GaAs qui a été développée pendant plusieurs années dans différents laboratoires est montré dans la figure (II-14) [51].

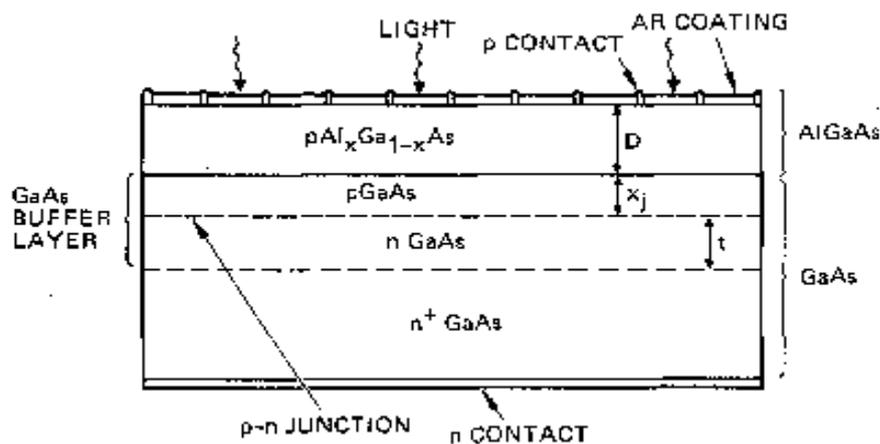


Figure (II-14): structure de cellule solaire GaAs [50].

Sa caractéristique (I-V) est présentée dans la figure (II-15).

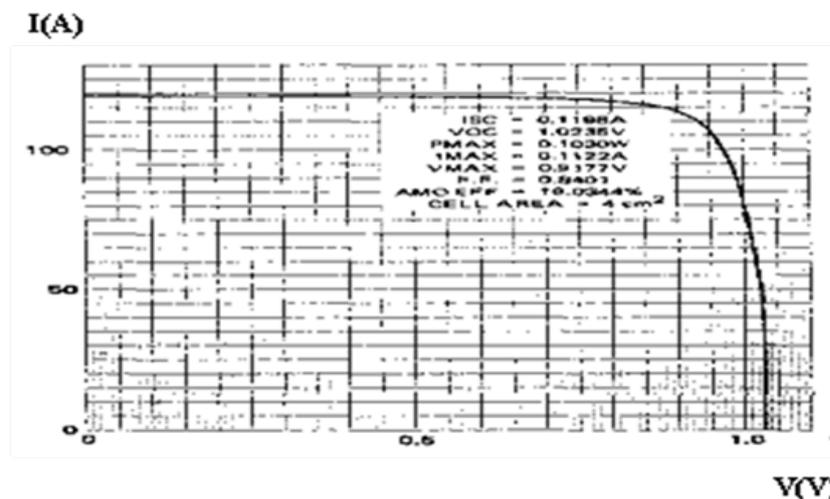


Figure (II-15): Caractéristique I-V de la cellule solaire AlGaAs- GaAs de section 2 cm x 2 cm [50].

Les paramètres externes de cette cellule sont présentés dans le tableau (II-2). La différence entre le rendement mesuré de 19% et celui prévu de 18.5% tombe bien dans l'intervalle des erreurs expérimentales.

	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
Théorie	116.1	1.02	0.85	18.5
Expérimental	119.8	1.02	0.84	19.0

Tableau (II-2): comparaison théorie et expérimental [49].

II- 7.3 Cellules solaires en GaAs/Si:

L'hétéro-épitaxie du GaAs sur des substrats en silicium est d'un grand intérêt grâce à ses applications potentielles comme les circuits intégrés optoélectroniques, les dispositifs à effet quantiques et les cellules solaires. Cependant, la croissance du GaAs sur le Si de haute qualité rencontre des difficultés à cause de la divergence entre les réseaux [52]. Il existe une densité de dislocations significative dans l'interface [53]. Des techniques de passivation permettent néanmoins de diminuer un peu la densité des dislocations [54].

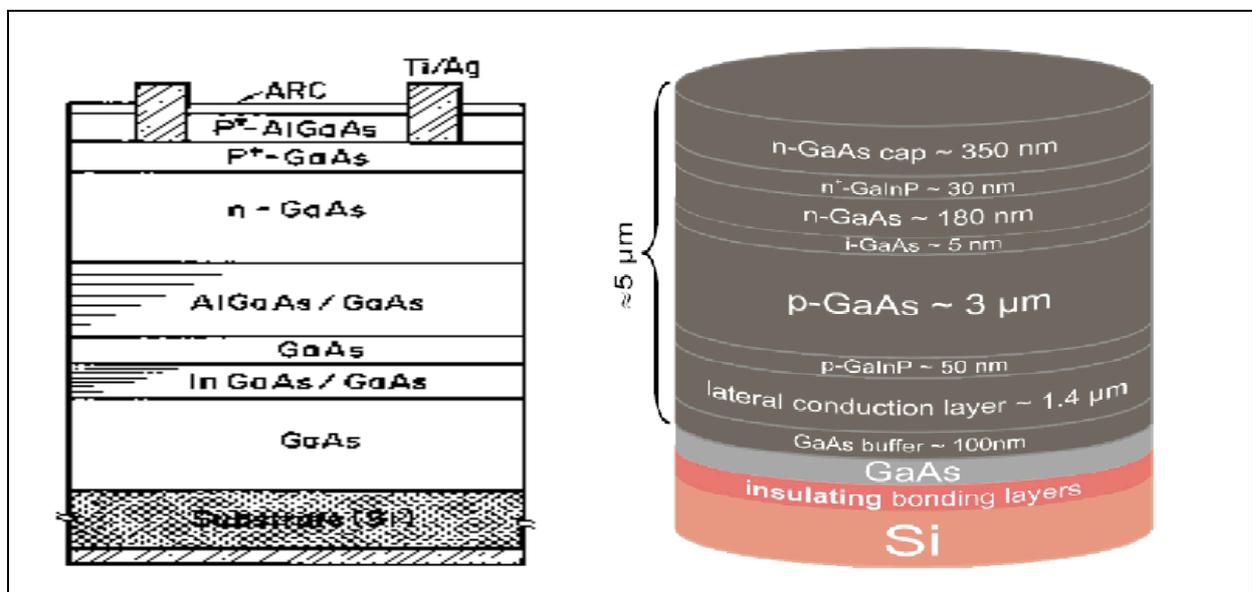


Figure (II-16): Exemples de cellule GaAs/Si [55], [56].

La figure (II-16) montre des exemples de cellules à base de GaAs sur des substrats en Si. Leurs rendements peuvent atteindre 18.3 % à AM0 (montre dans la figure (II-17)).

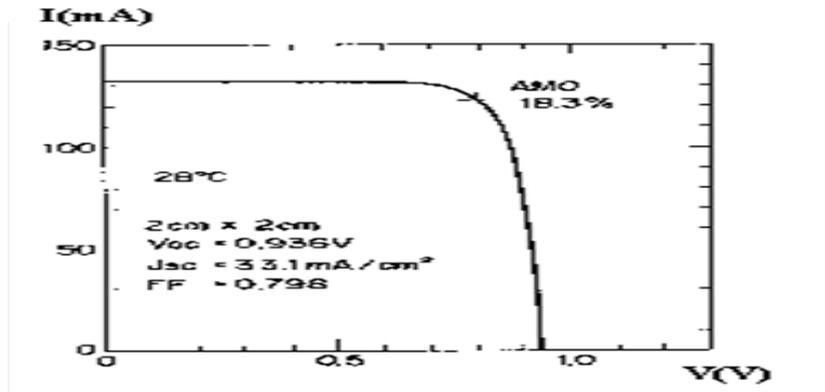


Figure (II-17): Caractéristique I-V d'une cellule GaAs/Si de section 2cmx2cm.

Dans la figure (II-18) on présente la réponse spectrale d'une cellule GaAs/Si en Comparaison avec une en GaAs. La différence est remarquable vers les longs longueurs d'onde dû à la présence du Si [56].

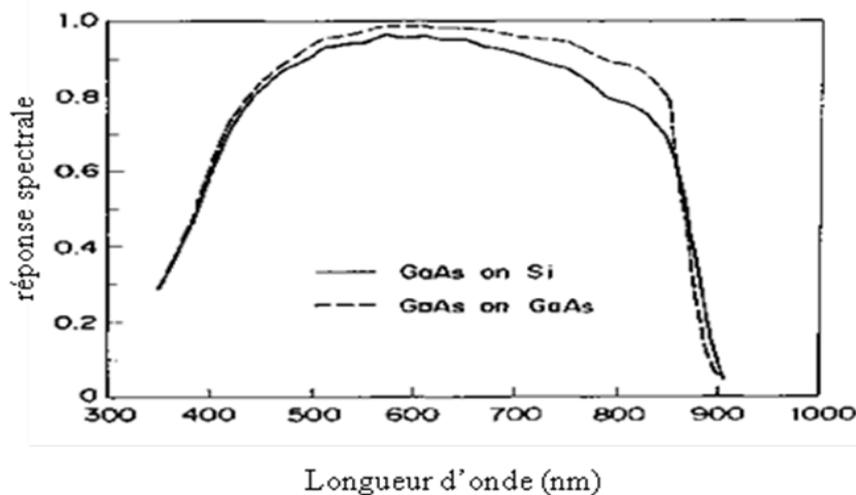


Figure (II-18) : réponse spectrale de la cellule solaire de GaAs sur Si (17%) et GaAs sur GaAs (20%) [56].

Conclusion :

Ce chapitre constitue le principe de la photo conversion. Les cellules conventionnelles sont généralement à base de Si. Les cellules de haut rendement sont à base de GaAs. Le fait d'assembler ces deux matériaux peut apporter des améliorations. Dans la littérature on a rencontré des cellules de GaAs/Si qui ont apporté des améliorations dans la réponse spectrale. Pourquoi ne pas voir si le fait d'inverser la structure en Si/GaAs peut aussi en apporter des améliorations dans les paramètres des cellules.

Bibliographie du chapitre II :

- [1] S. Zaamta et A. Dib, «Réalisation D'un Régulateur Solaire à Base De Microcontrôleur Pour Le Contrôle De L'état De Charge et La Protection Des Accumulateurs», Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 137 – 147.
- [2] M.S. Aït Cheikh, M. Haddadi and A. Zerguerras, «Design of à neural network control scheme for the maximum power point tracking (MPPT) », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°1 (2007) 109 – 118.
- [3] T. Baghdadli, A. Zerga et B. Benyoucef, « Optimisation du Rendement de Conversion Photovoltaïque des Cellules Solaires à base de GaAs et de Si » Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 27-31.
- [4] R .Maouedj, «application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen», Mémoire Magister, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, 2005.
- [5] P.D. Demoulia, «The physics and modeling of gallium arsenide solar cells», Thesis PH.D, purdue University, 1988.
- [6] M. Makhlouf, «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage », mémoire magister, Université Constantine, 2006.
- [7] C. Fanny, L. Karl, R. Simon, «Etude D'une Installation Solaire Photovoltaïque », 4ème Année Génies Physique et Nucléaire, Institut Supérieur Industriel de Bruxelles, Année Académique 2005 – 2006,19p.
- [8] L. Protin, S. Astier, « Convertisseurs Photovoltaïques», Traité Génie Electrique D 3360, (Édition Projet Sénégalo Allemand - Énergie Solaire Photovoltaïque), Techniques De l'Ingénieur1997.
- [9] A. Aziz, K. Kassmi, F. Olivié, A. Martinez « Symbolization of The Electric Diagram of the Marketed Solar Panels in The Orcad- Pspice Environment», M. J. Condensed Mater Volume7, number 1, 1 January 2006.
- [10] M. Madani, « Réalisation Des Couches Antireflets Dans Les Cellules Solaires a Couches Mince», Mémoire Magister, Université Abou –Bakr Belkaid De Tlemcen, 2006.
- [11] Ing. Jean-François Dupuis ; A. Bertrand ; J. Ulbricht «Les technologies solaires de production d'électricité», Dossier d'information du Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France en Allemagne – Octobre 2008.

- [12] Hussein Mourad, «Mise en oeuvre d'une méthodologie pour l'étude de rayonnement parasite basse fréquence de panneaux solaires sur des capteurs situés en zone proche», Thèse Doctorat, Université limoges, 2007,16 p.
- [13] B. Thuillier, «Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisées à partir D'encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multi cristallin », Thèse doctorat, Université Lyon, 2001.
- [14] B. Lakehal, « Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky », Mémoire Magister, Université Batna. 2009.
- [15] S. Amtablian, «Du Transfert De films minces De Silicium monocristallin vers un procede cellule a faible budget thermique», Thèse doctorat, Lyon : INSA de Lyon, 2008,21p.
- [16] F.Nait Kaci, «étude et réalisation de couche d'oxynitru de silicium sur un substrat de silicium monocristallin ou multicristallin », Mémoire Magister, Université Boumerdes ,2010.
- [17] M. Petibon Stéphane, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques», Thèse doctorat, Université Toulouse, 2009.
- [18] Ab. Benyoucef, «développement de surfaces de dioxyde de titane par PVD pour une application aux cellules solaires», Thèse Doctorat, Université Tlemcen, 2008.
- [19] W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga, « Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin », Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 301 – 306.
- [20] Z. Bendjellouli, «contribution a la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire Magistère, Université Bechar ,2009.
- [21] Akassewa Tchapo SINGO, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome», Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010, 16p.
- [22] Sébastien .Quoizola, «épitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium me soporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût », Thèse Lyon:INSA de Lyon ,2003.
- [23] S. Khelifi, «Modélisation d'une Cellule Solaire $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}(n)\text{-GaAs}(i)\text{-GaAs}(p)$ », Mémoire Magister, Universitaire de Bechar, 2003.

- [24] T. Guellah, H. Idrissi, R. Maher «réalisation d'un module d'éclairage et de chauffage pour la technique de Hg-photo-CVD», projet fin d'études, école normale pour l'enseignement technique rabat « Maroc », 2005,7p.
- [25] Mickaël Beaudhuin, « Étude expérimentale et numérique de la précipitation D'impuretés et de la formation des grains dans le silicium photovoltaïque», Thèse Doctorat, Université de Grenoble. 2009.
- [26] I. Massiot, « vers des cellules solaire ultraminesces », Rapport de stage de Master 2, Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, 2010.
- [27] S. FAÏ, « L'oxyde de zinc par dépôt chimique en phase vapeur comme contact électrique transparent et diffuseur de lumière pour les cellules solaires», Thèse Doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, 2003.
- [28] M. Ouddah, « Étude du silicium poreux destine aux cellules solaires», Mémoire Magister, université Constantine ,2009.
- [29] Roger Van Overstraeten Imec, Leuven, Belgium, « Crystalline Silicon Solar Cells», Renewable Energy, Vol.5, Part I, pp. 103-106, 1994.
- [30] D. Lincot, «la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », découverte N°344-345 janvier –février 2007.
- [31] S. Vighetti, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion», Thèse Doctorat, Université Grenoble, 2010.
- [32] T. Tibermacine and A. Merazga, « Characterization of semi-insulating GaAs:Cr by means of DC-CPM technique», Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 125 – 135.
- [33] S. Khelifi et A. Belghachi, « Le Rôle de la Couche Fenêtre dans les Performances d'une Cellule Solaire GaAs», Rev. Energ. Ren. Vol.7 (2004)13-21.
- [34] T. N. Quang, « Effets de spin dans les nanostructures semi-conductrices : modélisation et expériences de magnéto -transport», Thèse Doctorat, école polytechnique ,2006.
- [35] Y. Chriqui, « Intégration monolithique sur silicium d'émetteurs de lumière a base de GaAs par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques sur pseudo substrat de Ge/Si», Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 2004.
- [36] M. H. Colder, « Croissance basse température de films minces de carbure de silicium nanocristallisé : propriétés et performances d'hétérojonctions SiC/Si», Thèse Doctorat, Université de caen /basse –Normandie, 2005.

- [37] M. Benosman, A. Zerga and B. Benyoucef, « Hierarchical Classification of the Photovoltaic Materials by Data Analysis Method », *Rev. Energ. Ren.* Vol.5 (2002) 23-32.
- [38] S. Khelifi , M. Burgelman , J. Verschraegen , Ab.R. Belghachi, «Impurity photovoltaic effect in GaAs solar cell with two deep impurity levels », *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92 (2008) 1559–1565.
- [39] A. Suzuki, «High-efficiency silicon space solar cells», *Solar Energy Materials and Solar Cells* 50 (1998) 289-303.
- [40] Kwok K. Ng, «complete guide to semiconductor devices », international edition, 1995.
- [41] Z. Ben Mohamed, «caractérisation et analyse des cellules solaires a base de silicium multi cristallin», Thèse Doctorat, Université Constantine, 2009.
- [42] Goetzberger, A., Hebling Ch.: Photovoltaic materials, past, present, future, solar energy materials and solar cells, Vol. 62, Issues 1-2, 15 April 2000, p. 1 – 19.
- [43] M. R. Brozel, C. E. Stillman, « PROPERTIES OF Gallium Arsenide », Phillips Hall, Cornell University, Ithaca, New York, USA, Third Edition, October 1996©: The Institution of Electrical Engineers.
- [44] J. Lee , N. Lakshminarayan , S.K. Dhungel, K. Kim, J. Yi ,« Optimization of fabrication process of high-efficiency and low-cost crystalline silicon solar cell for industrial applications», *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93 (2009) 256–261.
- [45] A. Helmaoui, A. Belghachi et B. Bellali, «Amélioration du rendement de collecte et la tension V_{co} d'une cellule solaire avec couche BSF», *Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda* (2007) 153 – 156.
- [46] N. Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités », Thèse EEA. Lyon : INSA de Lyon, 2005, 29 p.
- [47] A. Mouhoub, « Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin », *Rev. Energ. Ren.* Vol. 4 (2001) 11-22.
- [48] R. Kishore, S. N. Singh and B. K. Das, « Screen Printed Titanium Oxide and PECVD Silicon Nitride as Antireflection Coating on silicon solar cells », *Renewable Energy*, Vol. 12, No. 2, pp. 131-135, 1997.
- [49] M. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham, « Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells », *Solar Energy Materials & Solar Cells* 65 (2001) 9}16.

- [50] Ronald c. Knechtli, S. Member, IEEE, Roobert Y. Loo, and G. S. Kamath, « High-Efficiency GaAs Solar Cells», IEEE transactions on electron Devices, Vol.ED-31, NO.5, May 1984.
- [51] S. P. Tobin, S. M. Vernon, S. J. Wojtczuk, C. Bajgar, M. M. Stutlacon, and T. M. Dixon, « advances in high-efficiency GaAs.solar cells », Presented at Twenty-first IEEE Photovoltaic Specialist Conference may 1990.
- [52] Wu-Yih Uen, Zhen-Yu Li, Yen-Chin Huang, Meng-Chu Chen, Tsun-Neng Yang, Shan-Ming Lan, Chih-Hung Wu, Hwe-Fen Hong, Gou-Chung Chi,« Heteroepitaxial growth of GaAs on Si by MOVPE using a-GaAs/a-Si double-buffer layers»,Journal of Crystal Growth 295 (2006) 103–107.
- [53] G. Wang, T. Ogawa, T. Soga, T. Jimbo, M. Umeno,« A detailed study of H₂ plasma passivation effects on GaAs/Si solar cell», Solar Energy Materials & Solar Cells 66 (2001) 599}605.
- [54] G. Wang, T. Ogawa, T. Soga, T. Jimbo, M. Umeno, «Surface and bulk passivation of defects in GaAs/Si by RF plasma-assisted MOCVD», Journal of Crystal Growth 221 (2000) 172}176.
- [55] J. Schöne, F. Dimroth, A. W. Bett, A. Tauzin, C. Jaussaud, J.-C. Roussin, «III-V solar cell growth on wafer-bonded GaAs/Si-substrates», Presented at the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 7- 12, 2006, Hawaii.
- [56] Y. Ohmachi, T. Ohara, and Y. Kadota, « a GaAs-on-Si solar cell for space use», 0160-8371/90/0000-0089 @ \$1.00 1990 IEEE.

Chapitre III :

***Simulation numérique par
SILVACO-ATLAS***

III -1 Introduction :

SILVACO est une société Américaine, « Silvaco International » qui se trouve à Santa Clara en Californie. Elle est l'un des principaux fournisseurs d'une suite de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont employés par les compagnies de la microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs [1].

Le développement de SILVACO, les ventes et les équipements de support se trouvent presque dans le monde entier pour maintenir la clientèle. Une majeure partie du modèle des affaires de SILVACO se fonde sur la capacité de la compagnie à fournir Ingénieurs technico-commerciaux bien formés et expérimentés pour le support à la clientèle sur place dans toutes les régions principales de fabrication de semi-conducteurs [1]. Les outils de Silvaco créent des modèles physiques sur lesquels est basé le dispositif de semi-conducteur en 2D ou 3D [2].

III -2 Historique :

Historiquement la compagnie a été fondée en 1984 par Dr. Ivan Pesic pour répondre aux besoins des designers de circuits intégrés analogiques (IC, integrated circuits) pour des modèles SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [1].

Le produit initial a été le système d'extraction des paramètres UTMOST (Universal Transistor MOdeling SofTware) qui est devenu standard pour l'extraction des paramètres, la caractérisation des dispositifs et la modélisation. L'entrée de SILVACO dans la technologie TCAD a eu lieu en 1989, et elle a été basée sur les recherches menées par le Département des Dispositifs Physiques à l'Université de Stanford. Ainsi il apparut dans SILVACO, le simulateur « Athena » pour simuler les processus et « Atlas » pour simuler les dispositifs (2D et 3D). A l'aide d'un projet de recherche à l'Université de Californie, Berkeley, en 1992 SILVACO a conçu son propre logiciel de simulation comportementale SPICE. « SmartSpice » devient une partie de la suite TCAD de SILVACO qui permet de simuler les circuits électroniques avec les modèles physiques des composants créés à l'aide d'Atlas tout en utilisant la logique SPICE. « SmartSpice » écrit en C++ permet facilement l'introduction de nouveaux modèles de simulation et permet une amélioration des algorithmes numériques pour une meilleure convergence. En 1997 SILVACO introduit ICCAD (Integrated Circuit Computer Aided Design) analogue qui est un outil pour la capture schématique (schematic capture), disposition sur circuits imprimés (layout) et vérification physique. L'ensemble de

ces outils avec le simulateur des circuits « SmartSpice » fournit une structure complète d'une très grande productivité pour la conception des circuits intégrés analogiques. Enfin en 2004, SILVACO propose un outil d'extraction de signaux parasites qui permet la conversion directe des données des masques et des informations intéressantes aux processus des schémas électriques (netlists) [1].

Parmi cette suite des outils TCAD, nous avons utilisé la partie appelée « Atlas » pour créer le modèle bidimensionnel de la cellule solaire et simuler ses caractéristiques photoélectriques.

III -3 Présentation du paquet des programmes SILVACO :

Sous SILVACO l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs s'appel VWF (Virtual Wafer Fab) [1]. Les composants de base de VWF sont [1]:

1. Les outils de simulation (VWF core tools). Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication ou soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont Athena, Atlas et SSuprem3.
2. Les outils interactifs (VWF interactive tools). Ces outils sont désignés pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée. En étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI), le travail de construction du fichier d'entrée devient plus efficient. Les outils interactifs peuvent être utilisés soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l'environnant « VWF automation tools ».
3. Les outils d'automatisation (VWF automation tools). Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales pour créer des résultats pour l'analyse statistique suivante. Ces outils automatiques se servent de la technologie de base de données répartie et des méthodes de logiciels de transmissions d'interprocessus.

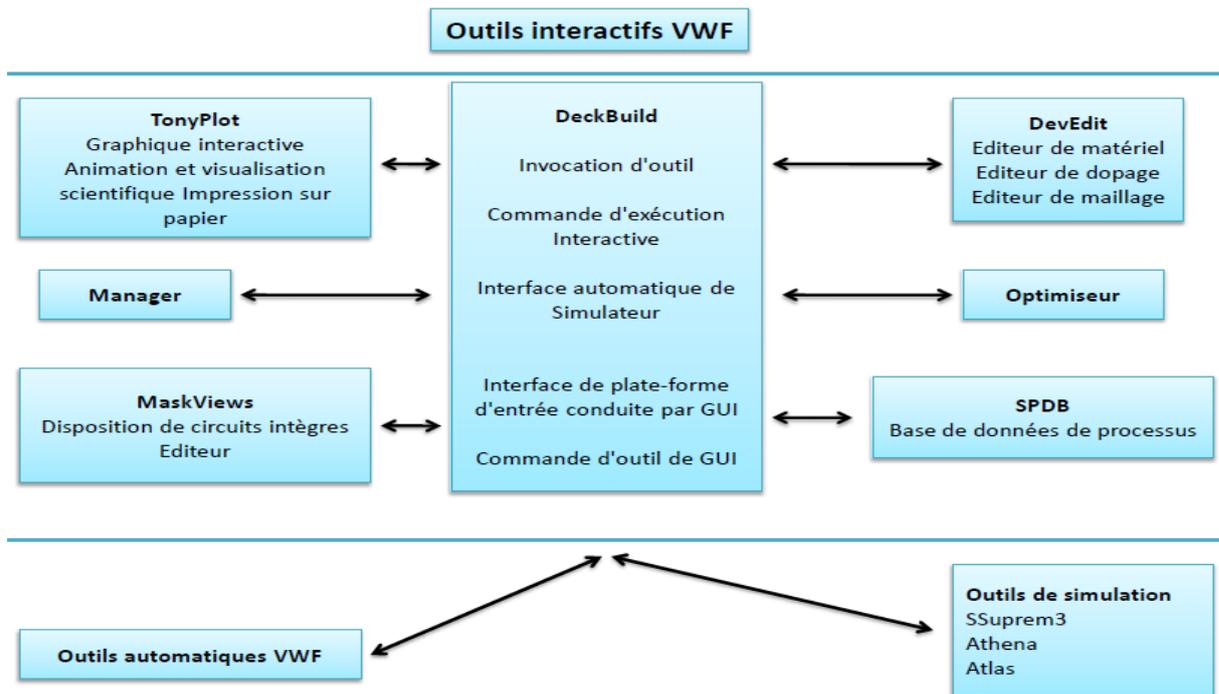


Figure (III-1) : Organigramme de la structure VWF.

Ainsi les modules de VWF sont les suivants :

- outils interactifs VWF :
 - **TonyPlot** : outil de visualisation et d’analyse graphique 1D et 2D des résultats des simulations.



Figure (III-2) : Basent Fenêtre de TonyPlot.

- **Manager** : outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF.
- **MaskViews** : outil de dessin des masques (layouts).
- **DeckBuild** : environnement d'exécution interactif qui permet la simulation des processus et de dispositifs (mais principalement il est l'interface avec les outils de simulation).

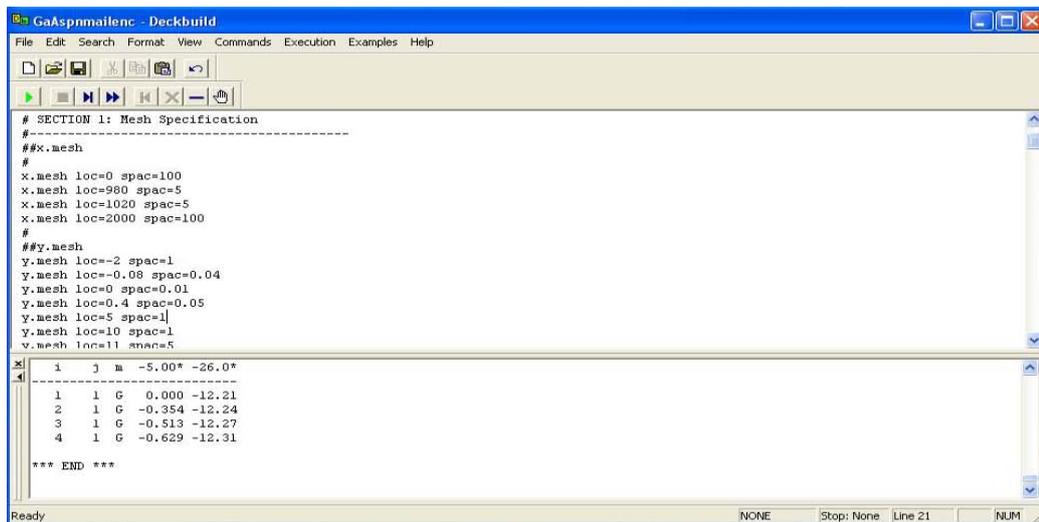


Figure (III-3) : Interface de Deckbuild.

- **DevEdit** : outil d'édition de structure, on peut créer des nouvelles structures ou même modifier des structures existantes, on peut définir des maillages ou raffiner les maillages existants.
- **Optimiseur** : outil d'optimisation automatique.
- **SPDB** : (Process Data Base), c'est un produit séparé, ce n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement ainsi que les données qui décrivent les conditions expérimentales.
- Outils de simulation :
 - **SSuprem3** : simulateur 1D prédictif des profils du dopage et des épaisseurs des couches dans les procédures de fabrication des semiconducteurs.
 - **Athena** : simulateur 2D de procédés technologiques qui permet de simuler les différentes étapes effectuées en salles blanches et ainsi d'obtenir la structure du dispositif (couches constitutives, dimensions, géométrie) avec les profils de dopage.

- **Atlas** : simulateur 2D ou 3D de dispositifs semi-conducteurs qui permet d'obtenir leurs caractéristiques électriques (statiques ou dynamiques).

Dans ce mémoire on s'est basé principalement sur l'interface graphique « DeckBuild » et l'outil de simulation par éléments finis « Atlas ».

La structure créée sous DeckBuild implique la définition des couches (dimensions, type de matériaux ; métal, semi-conducteur, isolant), le type de dopant et la forme du dopage (uniforme, gaussien, trapézoïdal, etc.) ainsi que le maillage (avec des pas fixes, adaptable d'une couche à l'autre et plus ou moins raffiné). Une fois la simulation effectuée sous « Atlas », la visualisation des résultats se fait via le logiciel « TonyPlot » [1].

Nous allons présenter de l'outil « Atlas » que nous avons utilisé principalement pour effectuer la simulation numérique des caractéristiques photoélectriques des cellules solaires.

III -4 Présentation d'Atlas :

« Atlas » est un simulateur 2D et 3D des dispositifs basés sur la physique des semiconducteurs [1]. Les modèles physiques inclus dans Atlas sont les suivants [3] :

- Les petits signaux AC et DC, et la dépendance complète en temps.
- Les modèles de transport Drift-Diffusion.
- Les modèles de transport hydrodynamique et par équilibre d'énergie.
- Echauffement du réseau et dissipation de la chaleur.
- Hétérojonctions graduées et abruptes.
- Interactions optoélectroniques avec traçage général des rayons lumineux.
- Matériaux amorphes et polycristallins.
- Environnements de circuits Généraux.
- Emission Stimulée et radiation.
- Statistique de Fermi- Dirac et de Boltzmann.
- Modèles de mobilité avancés.
- Effets des forts dopages.
- La dynamique complète des pièges donneurs et accepteurs.
- Contacts Ohmic, Schottky et isolants.
- Recombinaison SRH, radiative et superficielle.
- Impact d'ionisation (local et non - local).
- Grilles Flottantes.
- Injection de porteurs Chauds.
- Modèle de transport quantique.

- Courants d'émission thermo- ionique.

Atlas prédit le comportement électrique des structures semi-conductrices spécifiées et fournit des aperçus des mécanismes physiques internes associés au fonctionnement des dispositifs. Atlas peut être utilisé de façon autonome ou comme un outil noyau dans le milieu de simulation VWF de SILVACO. Dans le but de prévoir l'impact des variables du processus sur le comportement du circuit, la simulation du dispositif joint la simulation du processus et l'extraction du modèle SPICE [1].

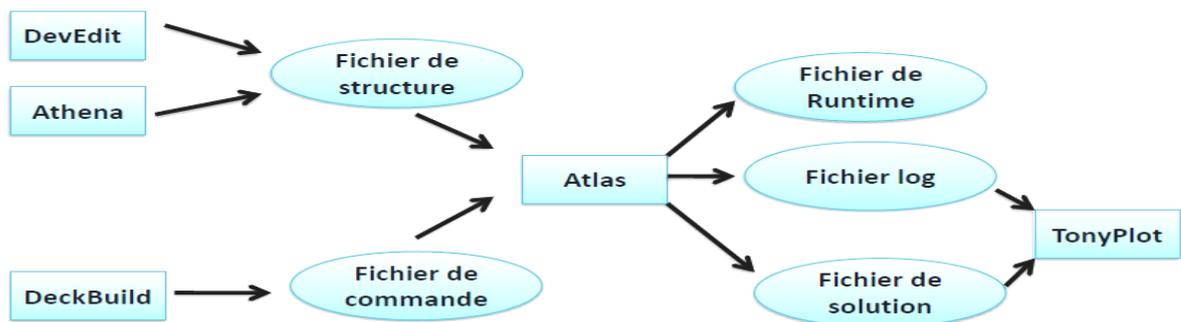


Figure (III-4) : Entrées et sorties d'Atlas.

Dans le schéma de la figure (III-4) nous voyons les types d'informations à l'entrée et à la sortie « d'Atlas ». La plupart des simulations réalisées par « Atlas » utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'Atlas s'exécute (représenté par « Fichier de commande »). Le second fichier est un « Fichier de structure » qui définit la structure qui va être simulée. A la sortie « d'Atlas », nous avons trois types de fichiers. Le premier de ces fichiers est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le fichier « log » qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique). Le troisième fichier de sortie est le « Fichier de solution », ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné (nœud) de la structure (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation « TonyPlot » [4].

Le fonctionnement d'un dispositif à semiconducteur est modélisé dans « Atlas » par un ensemble couplé de jusqu'à six équations différentielles partielles (EDP). Dans notre modélisation trois EDP couplées (l'équation de Poisson et les équations de continuités des

trous et des électrons) sont utilisées. « Atlas » produit des solutions numériques en calculant les valeurs des inconnues sur un maillage de points dans le dispositif. Une procédure interne de discrétisation convertit le modèle original continu en un système algébrique non linéaire discret qui a un comportement approximativement identique. L'ensemble des EDP, le maillage et la procédure de discrétisation détermine le problème algébrique discret à résoudre [1].

Le système algébrique discret est résolu en utilisant une procédure itérative qui raffine les estimations successives de la solution. L'itération continue jusqu'à ce que les erreurs soient assez petites pour satisfaire les critères de convergence, ou jusqu'à ce qu'il soit clair que le procédé n'arrive plus à converger (nombre limite des pas de convergence). Le procédé non linéaire d'itération commence à partir d'une première conjecture (valeurs initiales). Les erreurs sont calculées en résolvant les formes linéarisées du problème. Les sous- problèmes linéaires sont résolus en employant des techniques itératives [1].

Les différentes procédures de résolution montrent le comportement différent en ce qui concerne la convergence, l'exactitude, l'efficacité, et la robustesse. Les deux aspects principaux de la convergence sont, l'obtention d'une solution et la rapidité de convergence. L'efficacité est le temps requis pour produire une solution. La robustesse est la capacité de converger en utilisant des mailles et des profils initiales qui ne sont pas nécessairement proches des solutions [1].

En résolvant un système général des équations non- linéaires, il n'y a aucune garantie que la méthode de résolution choisie marche toujours. Les différentes méthodes peuvent marcher bien pour différents problèmes. Sous Atlas, en fonction du système des équations EDP à résoudre nous pouvons définir à l'aide d'une commande bien précise la méthode non linéaire de résolution et les paramètres associés tels que les critères d'itération et de convergence. Dans notre cas la méthode de résolution de systèmes non linéaires est la méthode de Newton [1].

II-5 Programmation par Atlas :

Après la présentation de la suite des logiciels TCAD de SILVACO, sa composition interne et le fonctionnement « Atlas » nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation « d'Atlas ». Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (voir figure III-5,6). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas

d'une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l'ordre adéquat, le simulateur ne les prend pas en compte [1].

Chaque fois que l'utilisateur veut exécuter ATLAS à l'intérieur de Deckbuild, la première ligne de programmation doit être :

go atlas

Groupes		commandes
1. Spécification de la structure	>>>>	<ul style="list-style-type: none"> <i>MESH</i> <i>REGION</i> <i>ELECTRODE</i> <i>DOPING</i>
2. Spécification des modèles de couches	>>>>	<ul style="list-style-type: none"> <i>MATERIAL</i> <i>MODELS</i> <i>CONTACT</i> <i>INTERFACE</i>
3. Sélection de la méthode numérique	>>>>	<ul style="list-style-type: none"> <i>METHOD</i>
4. Spécification des solutions	>>>>	<ul style="list-style-type: none"> <i>LOG</i> <i>SOLVE</i> <i>LOAD</i> <i>SAVE</i>
5. Analyses des résultats	>>>>	<ul style="list-style-type: none"> <i>EXTRACT</i> <i>TONYPLOT</i>

Figure (III-5): Ordre des groupes des commandes dans Atlas.

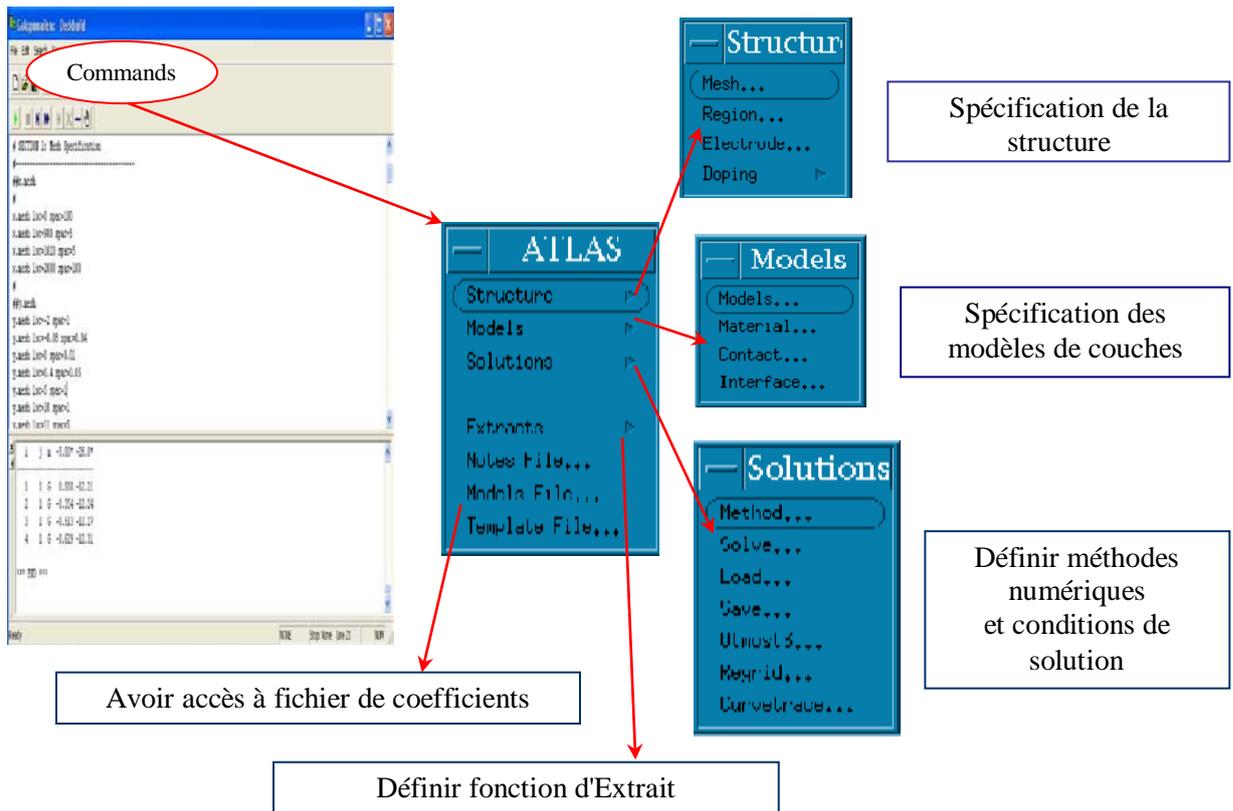


Figure (III-6) : Atlas à l'intérieur de Deckbuild.

Le développement de la structure souhaitée dans ATLAS se fait en utilisant un langage de programmation déclaratif. Dans ce qui suit, on donne un bref aperçu comment une structure est construit et simulé dans ATLAS.

Le fichier d'entrée d'atlas contient un ordre de lignes de commande. Chaque ligne consiste en un nombre de déclaration qui identifie la commande et les paramètres. Le format général est : <DÉCLARATION> <PARAMÈTRE> = <VALEUR>

Les commandes fondamentales sont :

III -5.1 Spécification de la Structure :

Les structures des dispositifs à simuler sont introduites sous forme de texte dans Deckbuild. Pour construire correctement un dispositif dans Deckbuild l'utilisateur doit définir plusieurs paramètres clefs pour obtenir un résultat précis [5].

- **Mesh** : cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini antérieurement. L'élément de maille utilisé est le triangle [1]. Le format général pour définir la maille est [6]:

$$X.MESH LOCATION=<VALUE> \quad SPACING=<VALUE>$$

Y.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>

On présente un exemple d'une maille créée dans ATLAS dans la Figure (III-7). Les caractéristiques électriques de la cellule solaire sont évaluées dans chaque croisement (nœud) des lignes horizontales et verticales définies dans la maille pour déterminer les caractéristiques complètes de la cellule solaire [7].

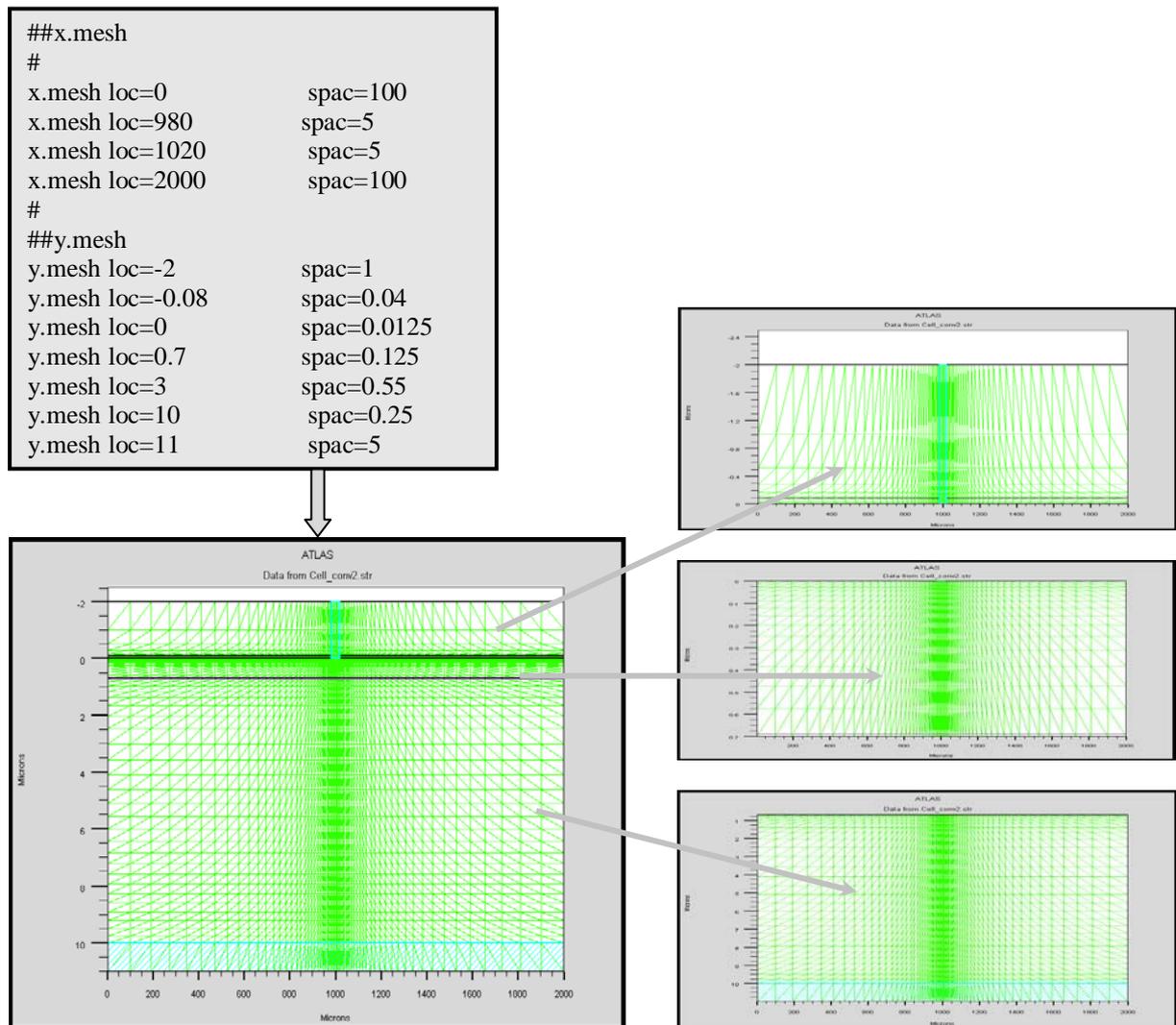


Figure (III-7): les Type Mesh : Exemple Cellule solaire Si simple.

Un maillage grossier ou fin détermine l'exactitude de la simulation. Un maillage grossier produit une simulation plus rapide, mais des résultats moins précis. Un maillage fin produit une simulation plus lente, mais des résultats plus précis [8].

- **Région** : indique la position des matériaux dans le maillage définie précédemment [1]. Le format pour définir les régions est comme suit [6]:

REGION number=<integer> <material_type> /<position parameters>

Dans la Figure (III-8), le code qui définit les régions est présenté. Il ya 7 régions définies. Les limites de chaque région sont explicitement identifiées suivant le x et le y. On doit alors attribuer un matériau aux régions. Les différents couleurs marquent les différents matériaux.

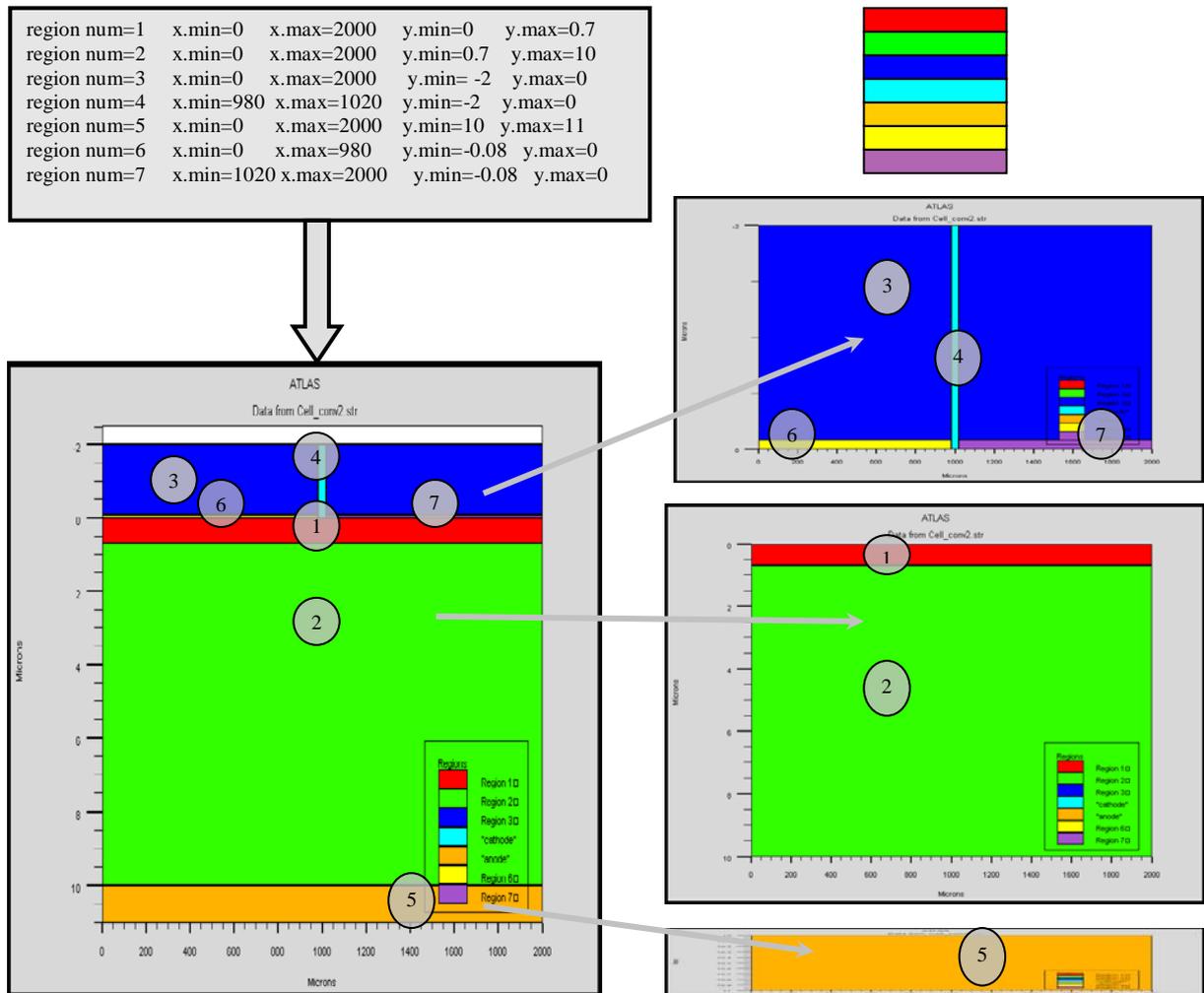


Figure (III-8): Exemple des régions d’une cellule solaire en Si simple dans Atlas.

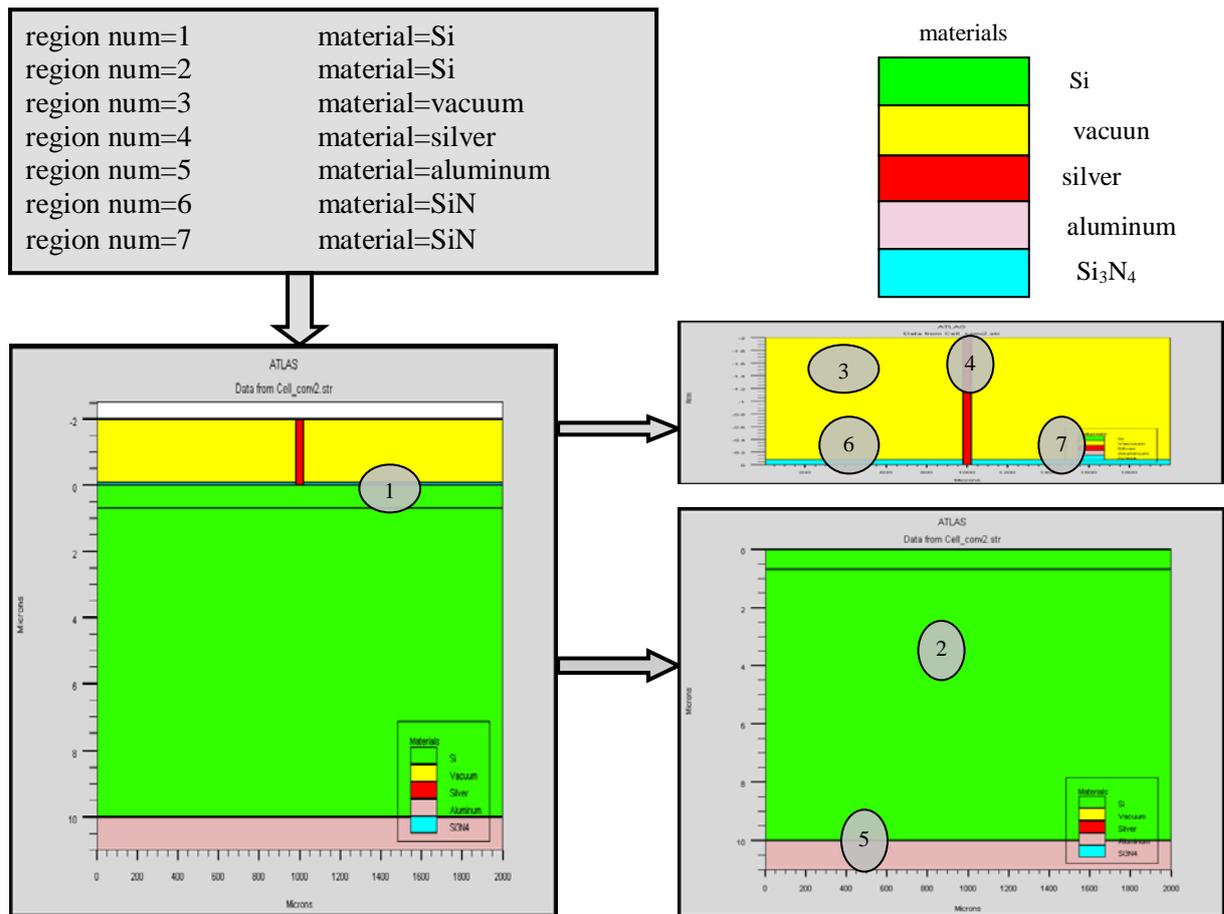


Figure (III-9): Attribution de matériaux aux différentes régions de la cellule solaire Si simple.

- **Electrode :** indique l'endroit et les noms des électrodes dans la structure [1].Le format général de ces commandes est de la forme suivante [8]:

ELECTRODE NAME =<electrode name> <position_ parameters>

Dans la figure (III-10) on présente des exemples de déclarations d'électrodes : l'anode et la cathode pour une cellule simple en Si. La cathode est en haut de la cellule en argent avec une épaisseur de 2µm est une largeur de 40µm et l'anode est en bas en aluminium avec une épaisseur de 1µm. la largeur de la surface éclairée est 2mm.

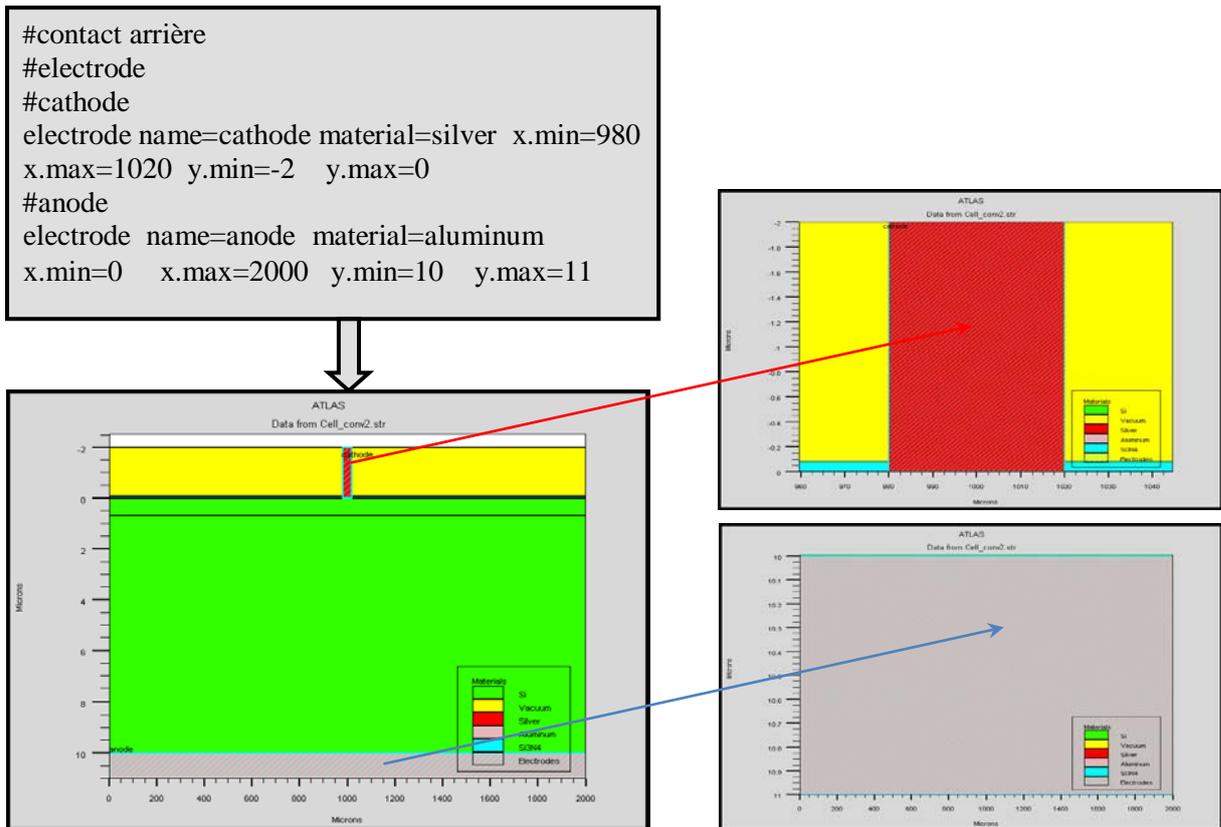


Figure (III-10): Exemples d'électrodes dans Atlas pour une cellule solaire simple en Si.

- **Doping:** Le dernier paramètre de structure à spécifier est le dopage. Le format de la déclaration d'Atlas est comme suit :

DOPING <distribution type> <dopant_type> /<position parameters>

Dans la figure (III-11) on présente un exemple de dopage. On définit les types de dopage et les niveaux de dopage. Le dopage peut être de type n ou de type p. Le profile du dopage peut être uniforme comme il peut avoir une distribution analytique donnée [9].

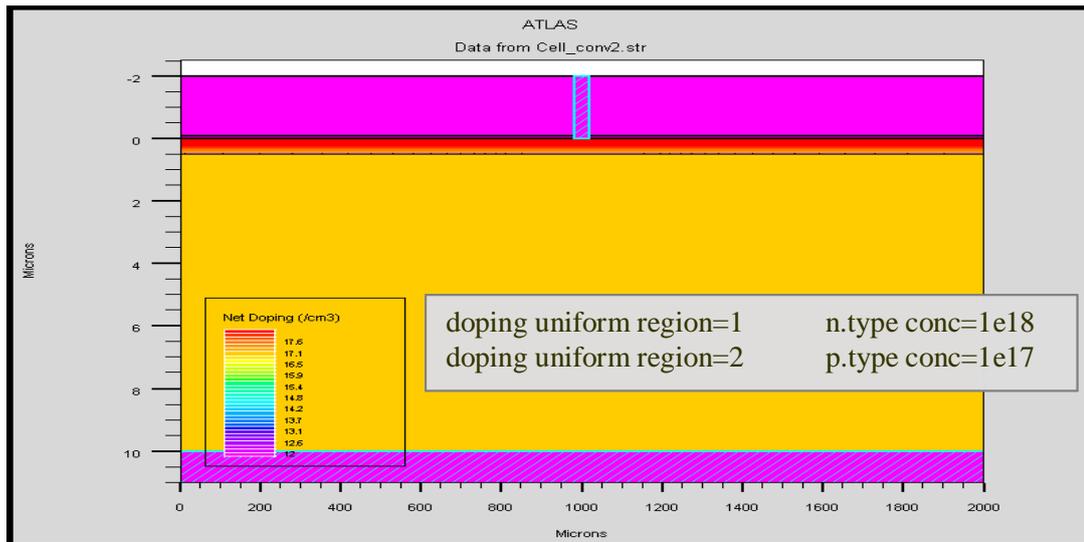


Figure (III-11): Exemple de dopage dans une cellule solaire Si simple.

III -5.2 Spécification des Modèles des matériaux :

Une fois que l'utilisateur a défini la structure et a conçu la géométrie du dispositif, il peut changer les propriétés par défaut des matériaux et choisir les modèles que ATLAS emploiera pour calculer les caractéristiques électriques des dispositifs [5] :

- **Matériau:** Cette déclaration associe des paramètres physiques aux matériaux de la structure. Noter que le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standard [1]. L'utilisateur définit les matériaux de la cellule solaire dans DeckBuild en utilisant le format suivant :

MATERIAL<identification> <material_parameters>

Les paramètres que l'utilisateur peut identifier sont par exemple : les durées de vie, la présence de défauts (avec sa position énergétique, concentration, section efficace de capture), les indices de réfraction, les coefficients d'extinction, le gap d'énergie...En voici deux Exemples : `material region=1 index.file=c-Si_nk.txt`

`Material region=1 taun0=112.1e-6 taup0=112.1e-6.`

Dans le premier exemple on spécifie les indices de réfraction et d'extinction du matériau de la région 1 (qui est le Si) dans un fichier .txt dont le nom est Si_nk. Dans le deuxième exemple on spécifie les durées de vie des électrons et des trous.

- **Models :** Il existe plusieurs catégories de modèles physiques concernant : les mobilités, la recombinaison, les statistiques de transporteur, l'impact d'ionisation (pour les champs forts)

l'effet tunnel, modèles dépendants de température (en cas de variation de température), rétrécissement de la bande interdite sous l'effet de dopage, les collisions locales et leurs effets sur la durée de vie et la température locale. Même pour le modèle de transport il y en a plusieurs : Drift diffusion, Equilibre d'énergie, Quantique (revoir définition d'ATLAS). La syntaxe de déclaration des modèles est comme suit [8]:

```
MODELS <model flag> <general parameter> /<model dependent parameters>
```

Le choix des modèles dépend des matériaux choisis pour la simulation et leurs environnement et dimensions. En voici un exemple :

```
MODELES CONMOB FLDMOB SRH
```

CONMOB Signifie que la mobilité est dépendante de la concentration des dopants. FLDMOB signifie que la mobilité est dépendante du champ électrique. SRH c'est les statistiques de Shockely Read Hall [8].

- **Contacts** : La déclaration de CONTACT est employée pour décrire les électrodes, en particulier dire qu'ils sont ohmiques ou bien de type Schottky. Ces déclarations sont de la forme suivante [7]:

```
CONTACT NAME=<name> <property_specification>
```

Par nom on veut spécifier l'anode ou la cathode et la spécification de ses propriétés. Si celles-ci ne sont pas spécifiées ATLAS considère le contact comme étant ohmique. Si par contre on spécifie par exemple le travail de sortie c'est un contact Schottky.

Exemple: contact name=anode material aluminium.

```
          contact name=cathode material silver.
```

- **Interface**: Cette déclaration indique les paramètres d'interface aux frontières semiconducteur/isolant (surface libre). Tous les paramètres s'appliquent aux nœuds frontaux [1]. Ces paramètres sont la densité de charge d'interface et la vitesse de recombinaison superficielle aux interfaces entre les semi-conducteurs et les isolants ou surface libre [7]. On donne la déclaration d'INTERFACE dans le format suivant [7] :

```
INTERFACE <parameters> <interface_dimensions>
```

Exemple:

```
Interface optical material=SiN ar.index=2.05 ar.thick=0.08 coating=1 layer=2 x.min=0
x.max=980 y.min=-0.08 y.max=0
```

```
Interface x.min=0 x.max=2000 y.min=0 y.max=0 Sn=1e3 Sp=1e3
```

Dans le premier exemple, il s'agit d'une interface optique entre un oxyde transparent et le semiconducteur. Cette oxyde est le SiN son indice de réfraction est 2.05, son épaisseur est $0.08 \mu\text{m}$, le coating =1 signifie un revêtement (anti-réflexion) en deux couches. Les x et les y sont les coordonnées de l'oxyde. Dans le deuxième exemple on définit les vitesses de recombinaison à l'interface oxyde/semiconducteur.

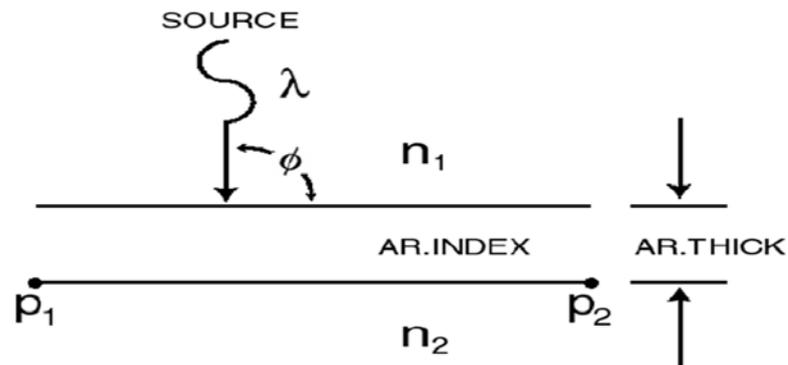


Figure (III-12): les paramètres de la couche d'oxyde.

▪ Lumière:

Pour la simulation des cellules solaires, il est indispensable de spécifier la source de la lumière. Celui qui développe le programme peut accomplir ceci par une série de commandes [7].en voici un exemple :

```
beam num=1 x.origin=1000 y.origin=-30 angle=90.0 power.file=cdromdis.spec reflects=1
front.refl back.refl quantum.eff=1.0
```

Cette déclaration définit le nombre des faisceaux lumineux qui est 1, l'origine du rayon pour des sources optiques 2D; le x.origin et le y.origin sont les coordonnées x et y de l'origine du faisceau lumineux en microns. L'angle d'incidence de 90 degrés indique que le rayon est perpendiculaire à la surface éclairée de la cellule solaire. Power.file spécifie la source spectrale de la lumière en indiquant le nom d'un fichier d'extension .spec qui contient les valeurs des intensités du spectre utilisé en fonction de leurs longueurs d'onde. Le paramètre reflects = 1 donne le nombre de réflexions du faisceau lumineux. La déclaration back.refl permet au rayon lumineux de se réfléchir en face arrière de la cellule.

III -5.3 Sélection de la méthode numérique :

Après la spécification des modèles des matériaux, le choix de la méthode numérique doit

être spécifié. La seule déclaration qui s'applique à la sélection de la méthode numérique est la déclaration méthode [10]. Une variété de méthodes numériques existe pour calculer les solutions [10] :

- La méthode découplée de Gummel.
- La méthode couplée de Newton.
- La méthode Block.

La méthode Gummel résout les équations pour chaque inconnu en gardant tous les autres inconnus constants. Le processus est répété jusqu'à ce qu'il y soit une solution stable. La méthode de Newton résout les équations pour tous les inconnus simultanément. La méthode block résout certaines équations par la méthode Gummel et d'autres par la méthode de Newton [8].

La méthode Gummel est utilisée pour un système d'équations qui sont faiblement couplées et quand il y a une convergence linéaire. La méthode de Newton est utilisée lorsque les équations sont fortement couplées et que la convergence est quadratique [8].

Exemple : method newton trap

III-5.4 Spécification des Solutions:

Après la sélection de la méthode numérique, la prochaine étape est la spécification de la solution. La spécification de la solution se décompose en ces déclarations LOG, SOLVE, LOAD, et SAVE.

- **Log :**

LOG enregistre toutes les caractéristiques finales dans un fichier [6]. Des données DC, transitoire, ou AC sont générées par la déclaration SOLVE après l'enregistrement d'une déclaration LOG. L'exemple suivant montre un exemple de la déclaration LOG.

LOG OUTFILE=<filename>

Dans cet exemple, la déclaration de log sauvegarde les données courant- tension dans fichier dont le nom est < filename >.log

- **Solve:**

La déclaration SOLVE suit la déclaration LOG. SOLVE effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Cette déclaration a le format de base suivant :

SOLVE <bias_points>

Par exemple :

```
solve vanode=0 vstep=0.01 vfinal=2 name=anode
```

▪ **Load et Save :**

La commande LOAD introduit les solutions précédentes à partir de fichiers comme valeurs initiale à d'autres points de polarisation. L'instruction SAVE introduit toutes les informations attribuées à un point nœud dans un fichier output (fichier de sortie). Les instructions pour load et save sont comme suit [9] :

```
LOAD INFILE=<filename>
```

```
Save outfile =<filename>
```

III -5.5 Analyses des Résultats:

Une fois que la solution est trouvée pour un problème du dispositif semi-conducteur, les informations peuvent être affichées graphiquement avec TonyPlot. En outre, les paramètres du dispositif peuvent être extraits par la déclaration EXTRACT [10].

L'instruction extract a la forme suivante :

```
extract initial infile ="<filename>"
```

Exemple:

```
extract name="IV" curve (v."anode",i."cathode") outfile="IVcurvlight.dat"
```

```
extract name="ISC_[mA/cm^2]" y.val from curve(v."anode",i."cathode"*1e3) where  
x.val=0.0
```

L'instruction Tonyplot démarre le programme « TonyPlot » pour la présentation graphique des données [10].

Exemple:

Tonyplot IVcurvlight.dat (tracer la courbe I-V dont les données sont stockées dans le fichier IVcurvlight.dat).

Dans la figure (III-13) on montre des exemples de la caractéristique I-V et de la puissance tracée par TonyPlot.

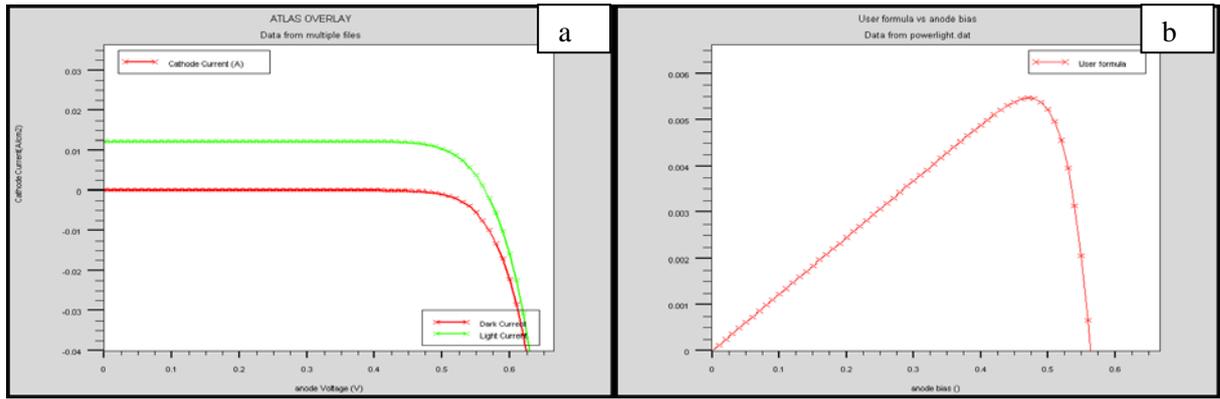


Figure (III-13): Exemple de courbes tracées par TonyPlot.

Les paramètres des matériaux Si et GaAs sont définis par défauts dans ATLAS. On les regroupe dans le tableau suivant.

Paramètre et désignation (unité)	Si	GaAs
Gap d'énergie E_g (eV)	1.08	1.42
Densité des états en E_c , N_c (par cc)	2.8×10^{19}	4.35×10^{17}
Densité des états en E_v , N_v (par cc)	1.04×10^{19}	8.16×10^{18}
Permittivité relative ϵ_r	11.8	13.2
Affinité électronique χ (eV)	4.17	4.07
Mobilité d'électron μ_n ($cm^2 / V.s$)	1000	8000
Mobilité de trous μ_p ($cm^2 / V.s$)	500	400
Recombinaison Auger (auger) augn	2.8×10^{-31}	5×10^{-30}
Recombinaison Auger (auger) augp	9.9×10^{-32}	1×10^{-31}

Tableau (III-1) : les paramètres des Si et GaAs dans l'Atlas [11].

Le programme que nous avons conçu est décrit par l'organigramme suivant :

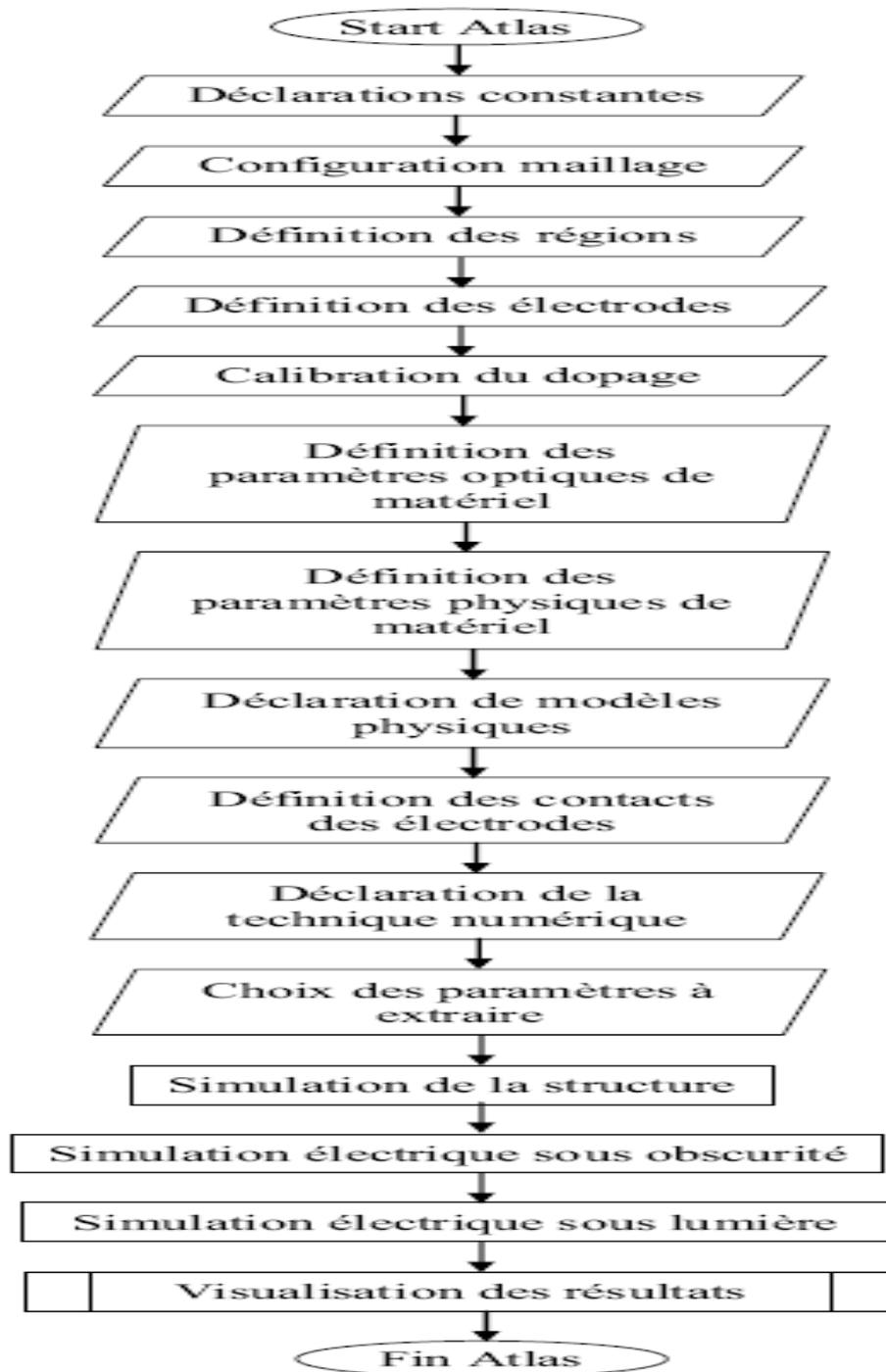


Figure (III-14) : Organigramme du programme de simulation.

III-6 Conclusions :

Ce chapitre a présenté les étapes fondamentales pour la programmation par SILVACO-ATLAS. Dans le suivant chapitre nous allons exploiter ces étapes pour développer un programme de simulation d'une cellule solaire en Si sur un substrat en GaAs. Celle-ci sera comparée avec une cellule en Si, en GaAs et en GaAs/Si.

Bibliographie du chapitre III :

- [1] R. Negru, « Conception et modélisation de pixels de photodétection Photodiodes PIN en silicium amorphe en vue de leurs utilisations comme détecteurs de particules », Thèse Doctorat, Université France .2008.
- [2] J. Utsler, « genetic algorithm based optimization of advanced solar cell designs modelled in SILVACO ATLASTM», Thesis Naval postgraduate school Monterey California.2006.
- [3] ATLAS User's Manual device simulation software, SILVACO International, 2004.
- [4] P. Michalopoulos. «A novel approach for the development and optimization of state – of –the –art photovoltaic devices using SILVACO» , Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2002.
- [5] R. Gelinis, « A novel approach to modeling tunnel junction diodes using SILVACO ATLAS SOFTWARE» , Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2005.
- [6] S. Dehimi, « Etude de lasers à base des composés semi-conducteurs (InP, GaAs, GaP).», Mémoire Magister, Université El-Hadj Lakhder – Batna, 2011.
- [7] B. P. Sullivan, « The effect of temperature on the optimization of photovoltaic cells using SILVACO ATLAS modelling », Thesis Naval postgraduate school Monterey California.2010.
- [8] F. KÜRKER, « Microfabrication based design and simulation of heterojunction solar cell », This MSc Thesis is written at the Department of Institute of Natural And Applied Sciences of Çukurova University, 2010.
- [9] M. H. Sanders, «Modeling of Operating Temperature Performance of Triple Junction Solar Cells Using SILVACO'S ATLAS», Thesis Naval postgraduate school Monterey California, 2007, 32 p.
- [10] B. Garcia, Jr., « indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using SILVACO ATLAS» , Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2007.
- [11] ATLAS User's Manual device simulation software, SILVACO International, 2011.

Chapitre IV:

***Résultats de simulation et
interprétations***

IV-1 Introduction :

Quelque soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres qui servent à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, et le confinement optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, du substrat (duré de vie, mobilité, longueur de diffusion), de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc....

La simulation numérique présente ainsi les avantages suivants [1]:

- Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des paramètres différents.
- Elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres).
- On peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètres interdépendants.

Comme ça a été mentionné dans le troisième chapitre, nous avons utilisé ATLAS pour simuler les caractéristiques électriques d'une cellule solaire n⁺/p sur un substrat de GaAs. Pourquoi nous avons fait ce choix ? Dans la littérature, on a rencontré pas mal de fois des études concernant des cellules en GaAs épitaxies sur des substrats en Si. On s'est posé la question, qu'est ce qu'on peut avoir si on inverse cette structure. Les caractéristiques électriques obtenues par simulation de cette cellule vont être comparées avec ceux d'une cellule simple en Si, une cellule simple en GaAs, et finalement une cellule en GaAs épitaxie sur un substrat en Si.

Les caractéristiques électriques calculées sont les courbes J (V) en obscurité et sous éclaircissement AM1.5. A partir de cette dernière on peut extraire les outputs (paramètres de sortie) de chaque cellule (la densité de courant du court circuit (J_{sc}), la tension du circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF), la puissance maximale (P_{max}) ainsi que le rendement de conversion photovoltaïque (η)). La deuxième caractéristique est la réponse spectrale de la cellule pour chaque longueur d'onde du spectre AM1.5. Celle-ci est très sensible aux gaps d'énergie employés. Elle nous permet de mieux décerner l'avantage d'utiliser des gaps différents au lieu d'un gap simple.

Dans ce qui suit nous allons commencer par donner des schémas simples des quatre cellules. Ensuite les indices de réfractions et les coefficients d'extinction du Si et du GaAs, les

paramètres des épaisseurs et des dopages des cellules Si, Si/GaAs dans une section et des cellules GaAs, GaAs/Si dans une autre section. Par la suite, les caractéristiques J-V et les réponses spectrales des quatre cellules vont être présentées et comparées. Finalement, une optimisation de la cellule Si/GaAs sera effectuée.

IV-2 Diagrammes représentatifs des cellules solaires étudiées :

Dans la figure (IV-1) on montre les structure des quarte cellules solaires à étudier: La première cellule est une homojonction n^+/p en silicium cristallin, la deuxième cellule est une homojonction n^+/p en silicium cristallin intégrée sur un substrat en GaAs, la troisième cellule est une homojonction n^+/p en GaAs, et la quatrième est une homojonction n^+/p en GaAs intégrée sur un substrat en silicium.

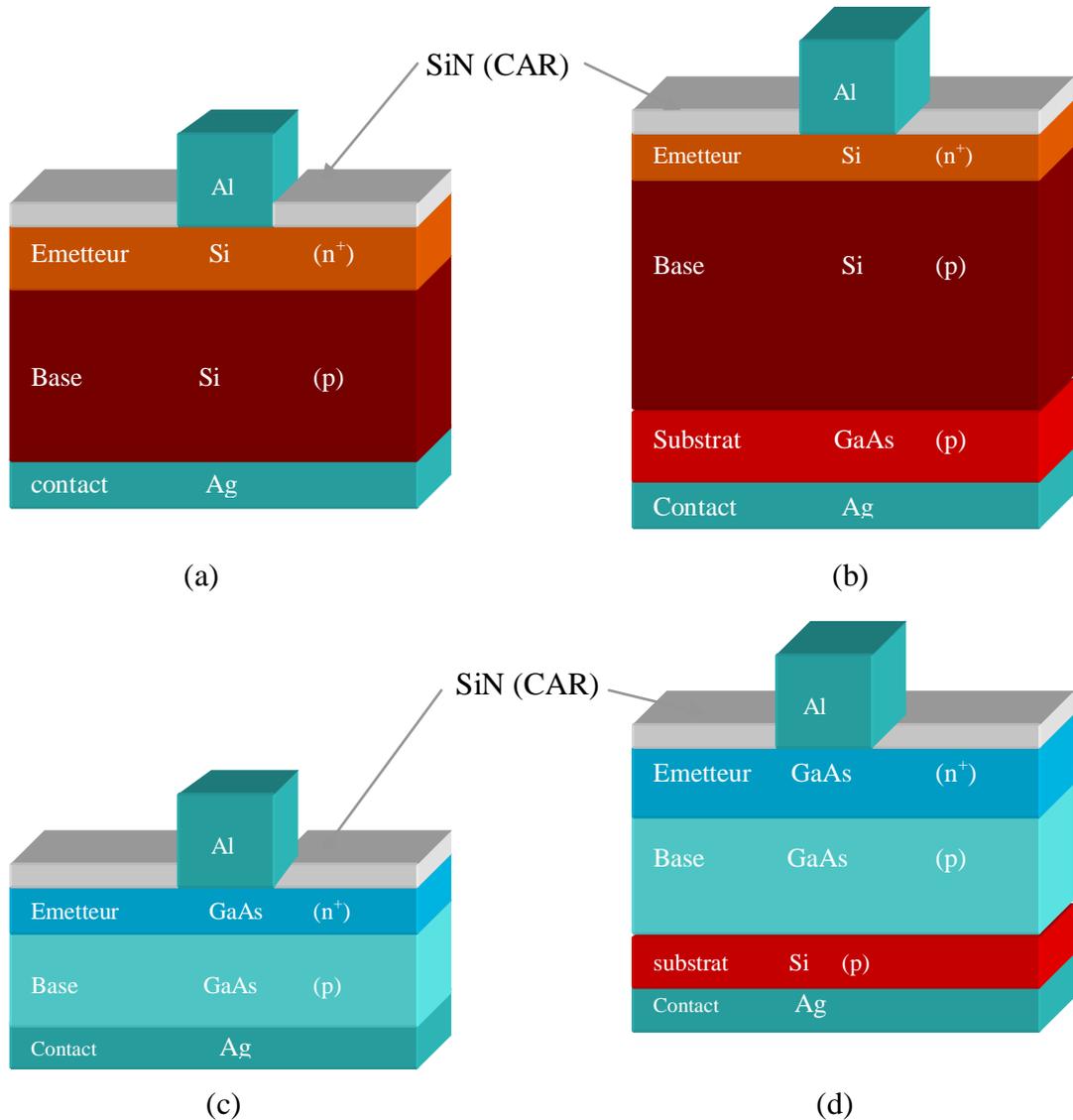


Figure (IV-1): Un diagramme schématique de la structure des quatre cellules solaire étudiées:

a) (c- Si), b) Si / GaAs , c) GaAs , d) GaAs / Si .

On note que les quatre cellules, ont une cathode en aluminium en haut, une couche antireflet en Nitrure de silicium et une anode en bas en argent.

IV-3 Paramètres optiques et structurales:

IV-3.1 Indices de réfraction :

La surface du dispositif est très importante car elle influe sur la photo- courant d'une manière appréciable. Dans notre simulation, nous avons choisi une surface de 1 cm^2 pour les quatre cellules.

Avant de donner les paramètres des structures nous allons présenter les propriétés optiques des matériaux qui sont impliqués dans le programme de simulation SILVACO-ATLAS. Ces paramètres sont notamment : l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction qui sont importants pour définir les propriétés optiques de l'interface entre : le vide et les contacts, le vide et la couche antireflet, la couche antireflet et le semi-conducteur, et les deux semi-conducteurs différents.

On rappelle que l'indice de réfraction n , est le rapport entre la vitesse c de propagation de la lumière dans le vide et sa vitesse v dans le milieu étudié ($n = c/v$). Le coefficient d'extinction k qui est la partie imaginaire de l'indice de réfraction complexe est lié directement au coefficient d'absorption du rayonnement par le matériau en fonction de la longueur d'onde ($k = \frac{\lambda}{4\pi} \alpha$). On présente dans la Figure (IV-2) l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction en fonction des longueurs d'ondes : (a) pour le silicium et (b) pour l'arséniure de gallium.

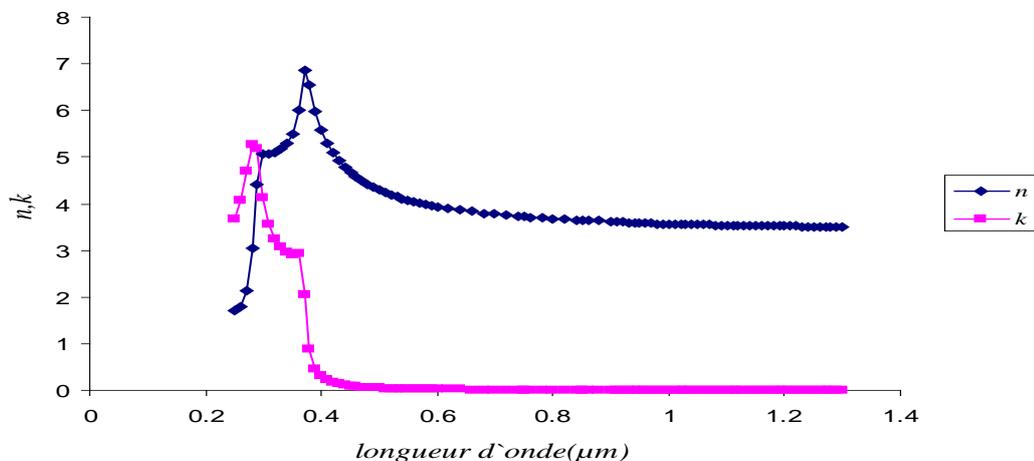


Figure (IV-2.a): Indice de réfraction n et coefficient d'extinction k du silicium.

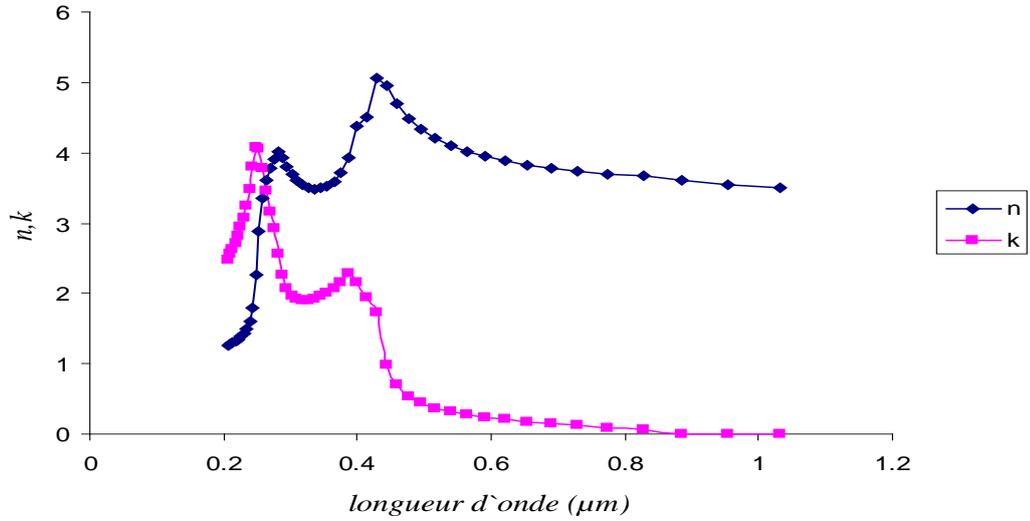


Figure (IV-2.b): Indice de réfraction n et coefficient d'extinction k de L'arséniure de gallium.

Notons que toutes les structures ont été étudiées sous le spectre solaire AM1.5, avec la condition $P=100\text{ mW} / \text{cm}^2$ et la température ambiante $T=25^\circ\text{C}$.

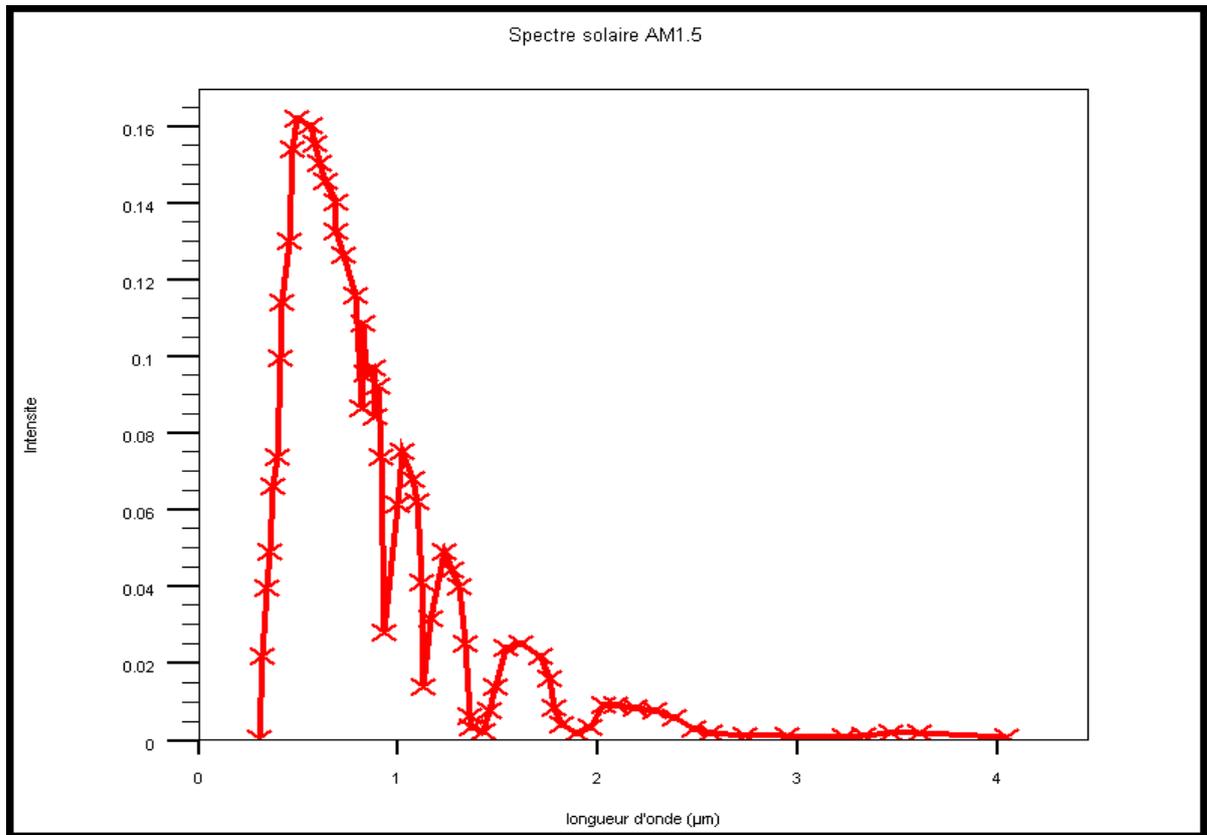


Figure (IV-3): L'irradiante en fonction de la longueur d'onde du spectre solaire AM1.5.

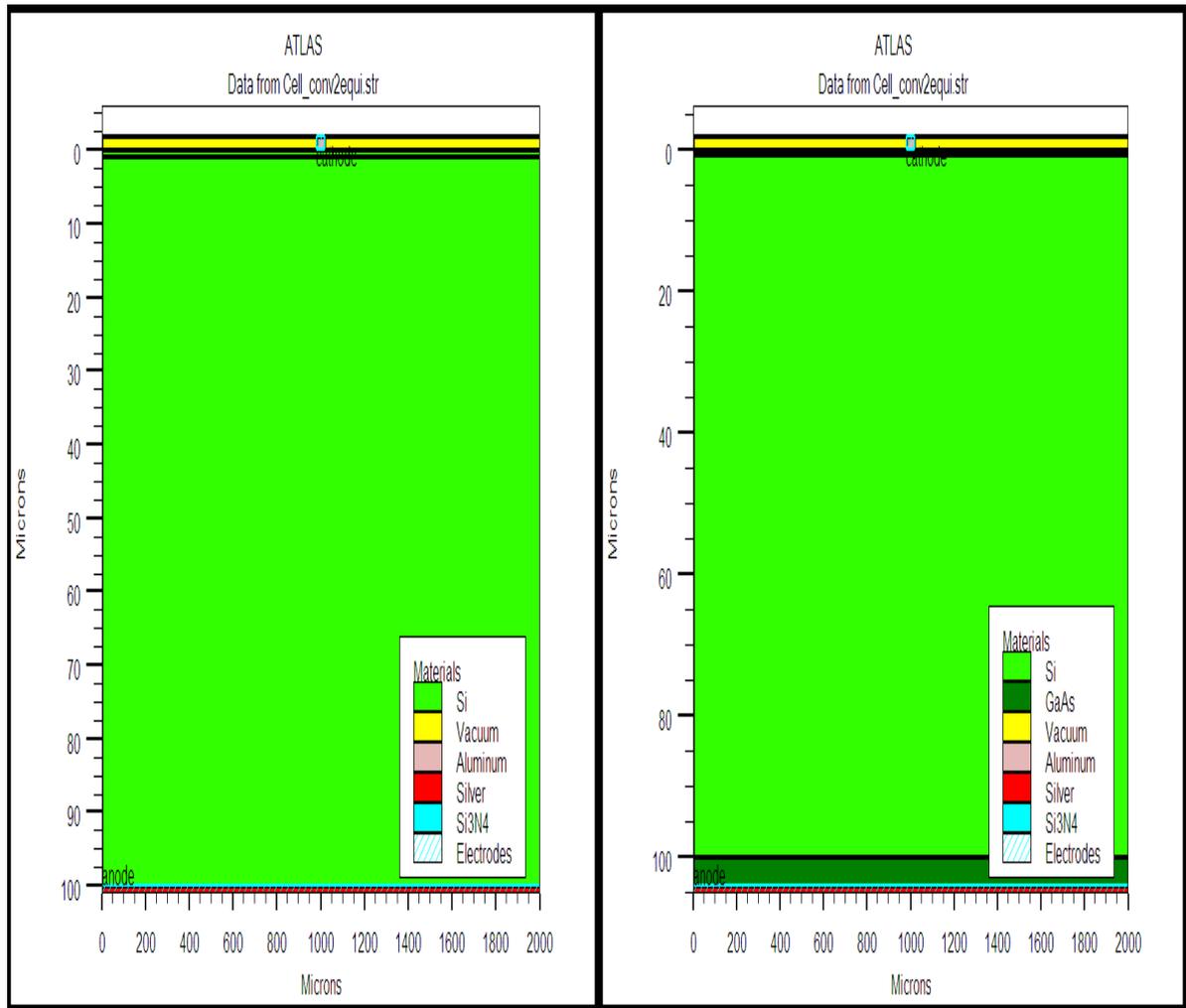
IV-3.2 Paramètres des cellules (c-Si)n⁺-p/(GaAs)p et (c-Si)n⁺-p:

Comme nous l'avons déjà précisé, la première cellule est une homojonction n⁺-p sur un substrat en GaAs, qui forme le propos de ce mémoire, et la deuxième est une homojonction simple n⁺-p pour effectuer une comparaison.

Les paramètres de ces deux cellules sont groupés dans le tableau (IV-1). Les structures des deux cellules simulées par SILVACO-ATLAS sont représentées par TonyPlot, respectivement, dans les figures (IV-4 (a) et (b)).

Matériau		(c- Si)	Si / GaAs
Emetteur	Epaisseur (μm)	0.75	0.75
	Dopage ($/ cm^3$)	2.10^{18}	2.10^{18}
	Recombinaison face avant (cm / s)	$S_n = 1.e3$ $S_p = 1.e3$	$S_n = 1.e3$ $S_p = 1.e3$
Base/Collecteur	Epaisseur (μm)	99.25	99.25
	Dopage ($/ cm^3$)	5.10^{17}	5.10^{17}
Substrat	Epaisseur (μm)		4
	Dopage ($/ cm^3$)		2.10^{18}
	Recombinaison face arrière (cm / s)	$S_n = 1.e5$ $S_p = 1.e5$	$S_n = 1.e5$ $S_p = 1.e5$
Couche antireflet	SiN avec une épaisseur -80 nm		

Tableau (IV-1) : Les paramètres des deux cellules : (c-Si)n⁺-p/(GaAs)p et (c-Si)n⁺-p.



(a)

(b)

Figure (IV-4) : La structure des deux cellules solaire $(c\text{-Si})n^+\text{-p}/(\text{GaAs})p$ et $(c\text{-Si})n^+\text{-p}$ par Tony Plot.

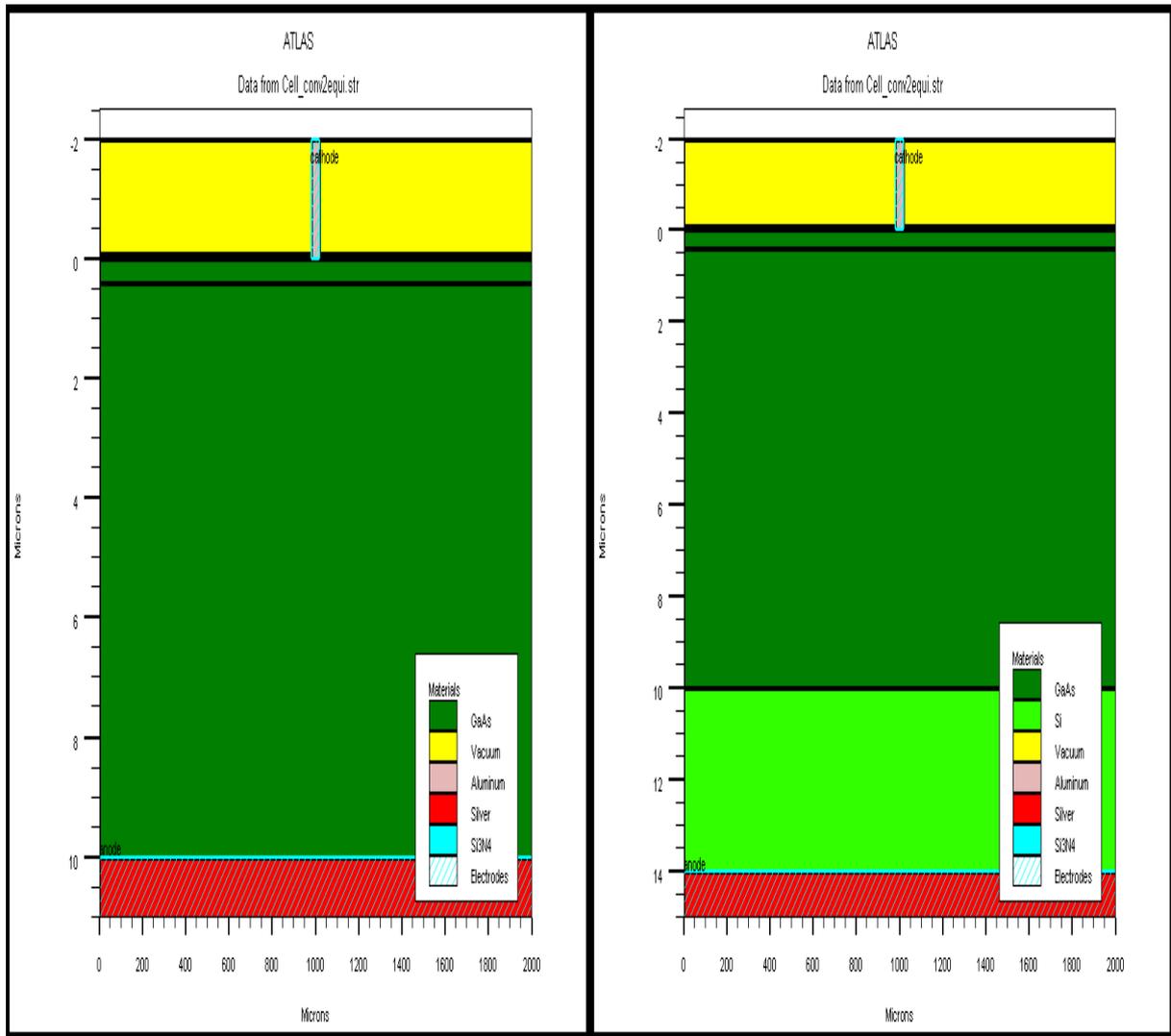
IV-3.3 Paramètres des cellules $(\text{GaAs})n^+\text{-p}/(\text{Si})p$ et $(\text{GaAs})n^+\text{-p}$:

Ces deux structures ont été choisies justes dans le but de faire une comparaison avec les deux cellules de la section précédente. La première cellule est une homojonction $n^+\text{-p}$ en GaAs sur un substrat en Si, et la deuxième est une homojonction simple $n^+\text{-p}$ en GaAs.

Les paramètres de ces deux cellules sont groupés dans le tableau (IV-2). Les structures des deux cellules simulées par SILVACO-ATLAS sont représentées par TonyPlot, respectivement, dans les figures (IV-5 (a) et (b)).

Matériau		GaAs	GaAs / Si
Emetteur	Epaisseur (μm)	0.4	0.4
	Dopage ($/cm^3$)	4×10^{18}	4×10^{18}
	Recombinaison face avant (cm/s)	$S_n = 1.e3$ $S_p = 1.e3$	$S_n = 1.e3$ $S_p = 1.e3$
Base	Epaisseur (μm)	9.6	9.6
	Dopage ($/cm^3$)	7×10^{17}	7×10^{17}
Substrat	Epaisseur (μm)		4
	Dopage ($/cm^3$)		4×10^{18}
	Recombinaison face arrière (cm/s)	$S_n = 1.e5$ $S_p = 1.e5$	$S_n = 1.e5$ $S_p = 1.e5$
Couche antireflet	SiN avec une épaisseur -80 nm		

Tableau (IV-2): Les paramètres des deux cellules : (GaAs) n^+ -p et (GaAs) n^+ -p/(c-Si)p.



(c)

(d)

Figure (IV-5): La structure deux cellules solaire $(\text{GaAs})\text{n}^+\text{-p}/(\text{Si})\text{p}$ et $(\text{GaAs})\text{n}^+\text{-p}$ par Tony Plot.

IV-3.4 Maillage des structures:

Pour assurer une bonne précision des calculs lors de la simulation, il faut utiliser un maillage fin aux interfaces. On montre dans les figures suivantes le maillage de chaque une des structures étudiées.

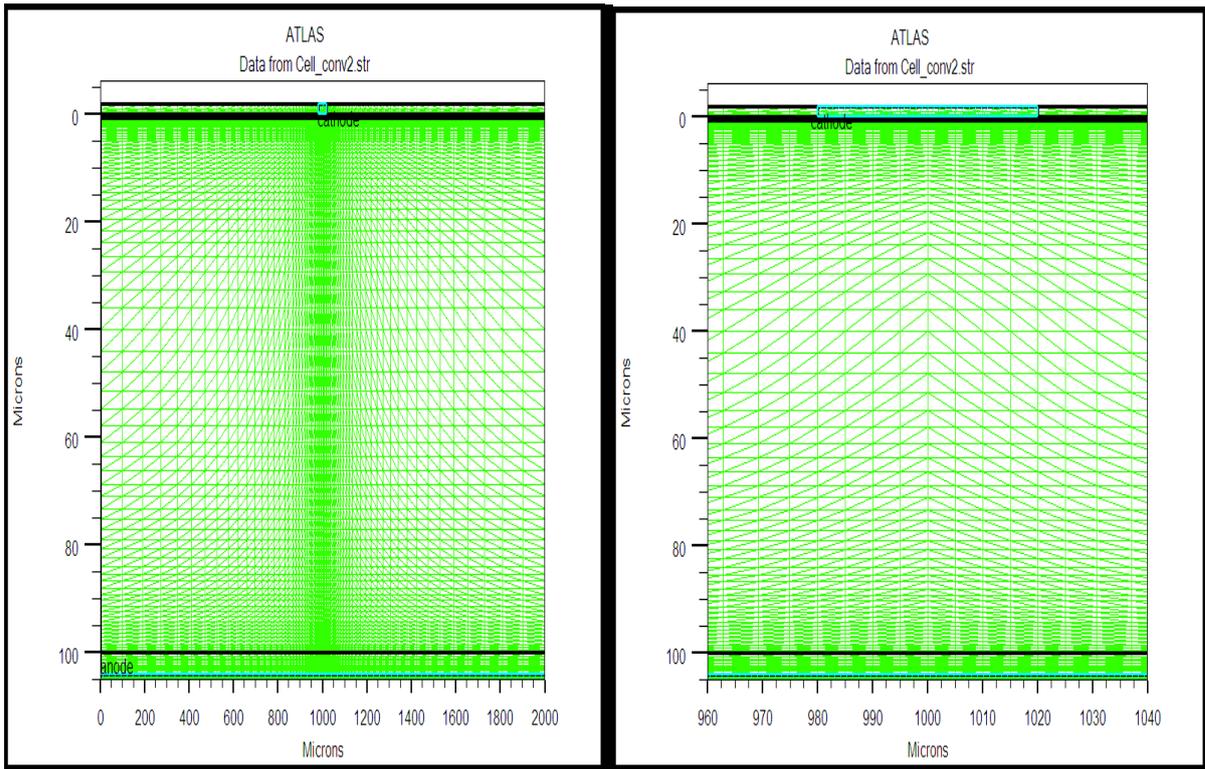


Figure (IV-6): Maillage de la cellule (Si)ⁿ⁺-p/(GaAs)p.

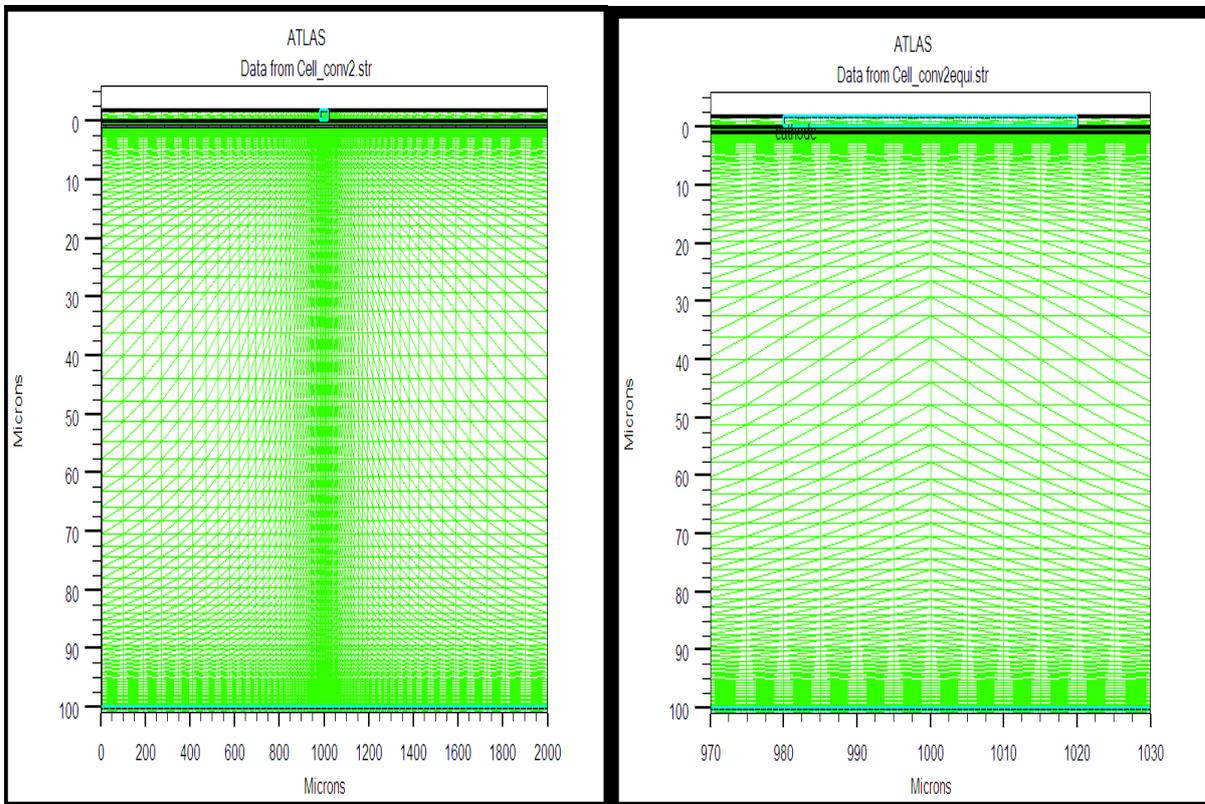


Figure (IV-7): Maillage de la cellule (Si)ⁿ⁺-p.

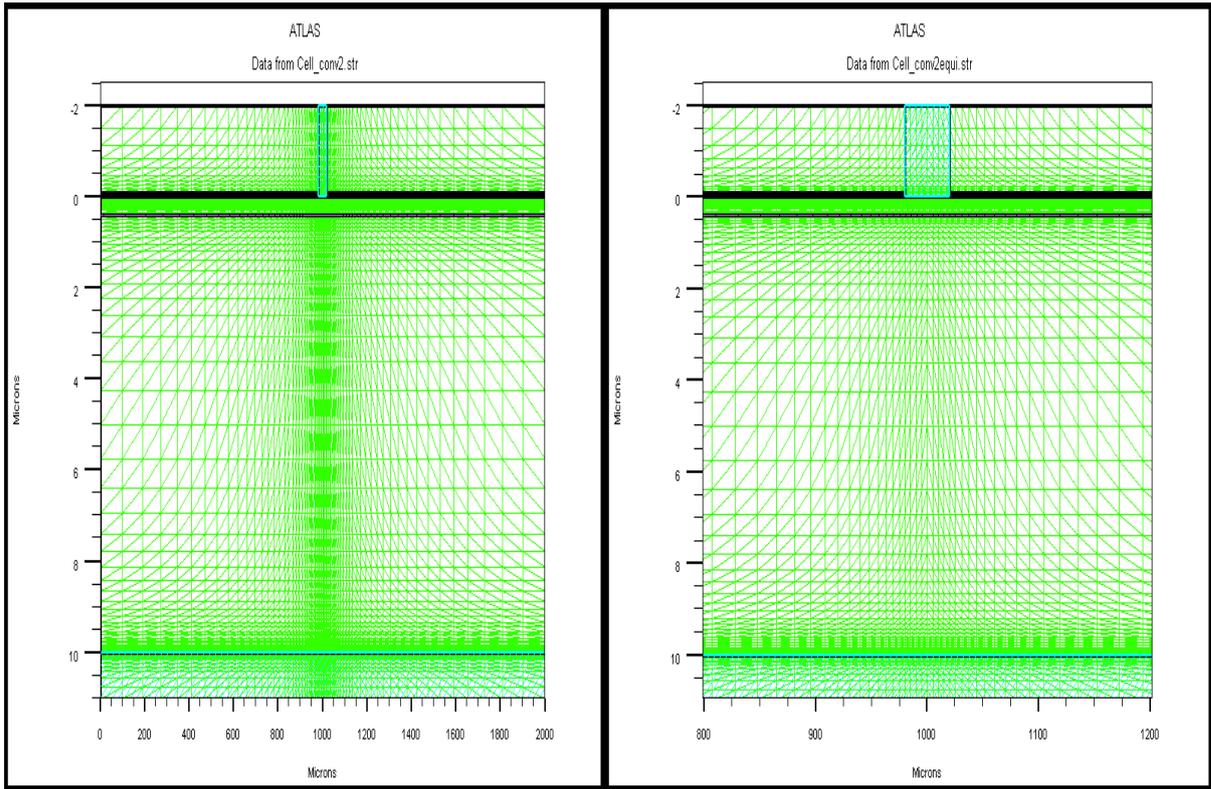


Figure (IV-8): Maillage de la cellule (GaAs) n^+p .

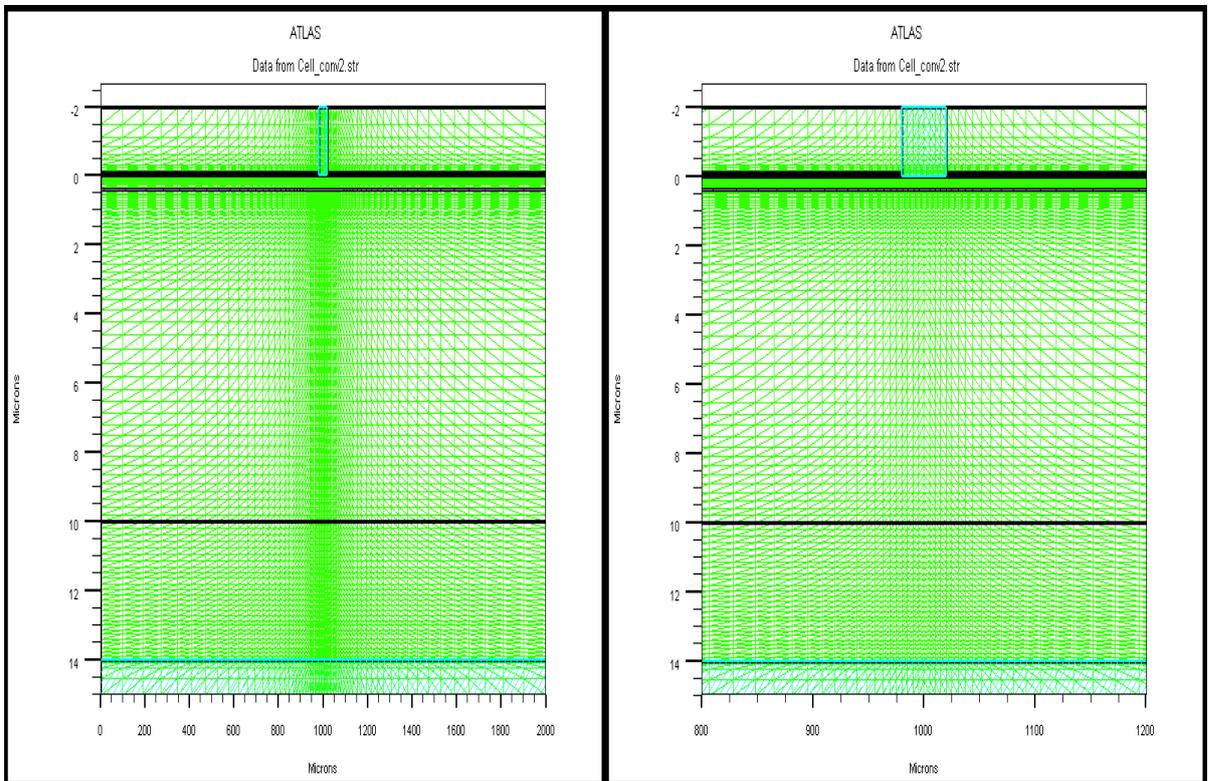


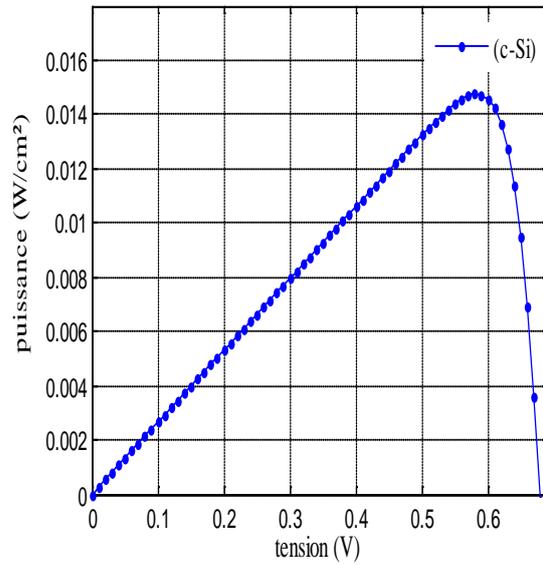
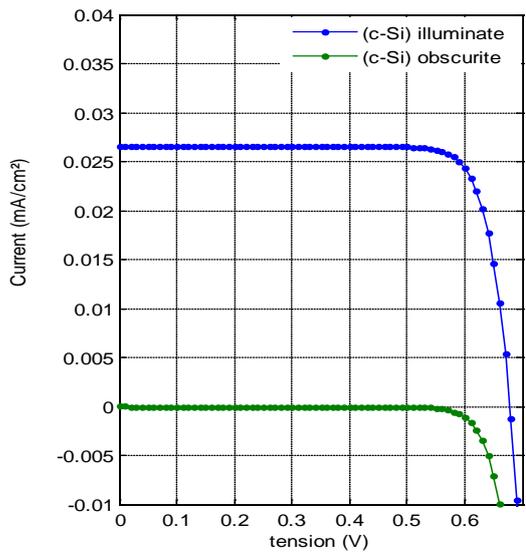
Figure (IV-9): Maillage de la cellule (GaAs) $n^+p/(Si)p$.

IV-4 Résultats de la simulation :

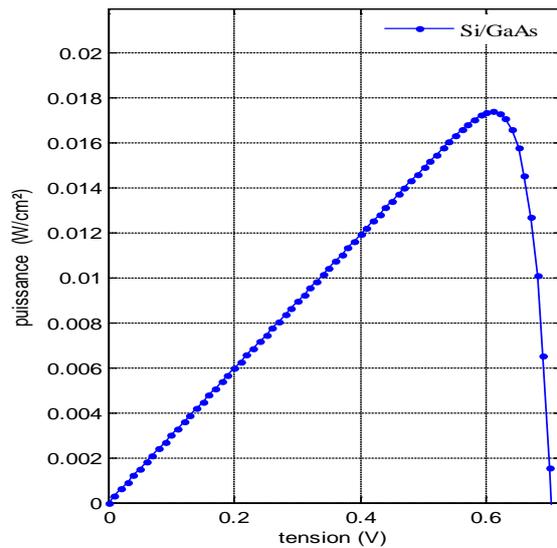
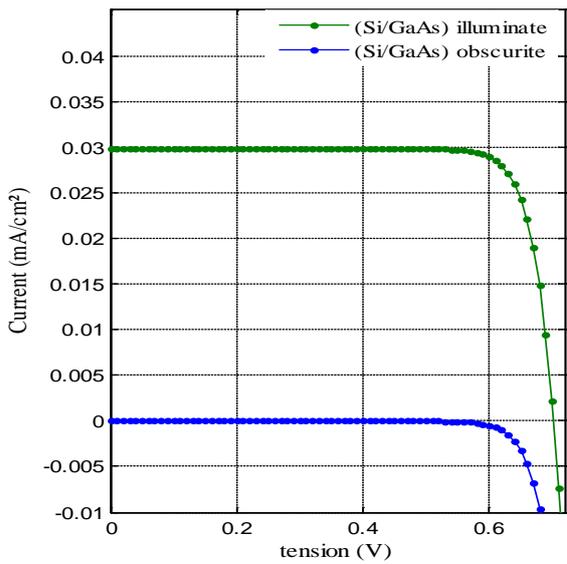
IV-4.1 Cellules solaires $n^+p(c\text{-Si})$ et $n^+p(c\text{-Si})/p(\text{GaAs})$:

IV-4.1.1 Caractéristique J - V :

On présente dans les figures (IV-10), les caractéristiques électriques J - V à l'obscurité et sous éclairage AM1.5, et les caractéristiques P - V pour (a) la cellule n^+p en Si et (b) la cellule $n^+p(c\text{-Si})/p(\text{GaAs})$).



(a)



(b)

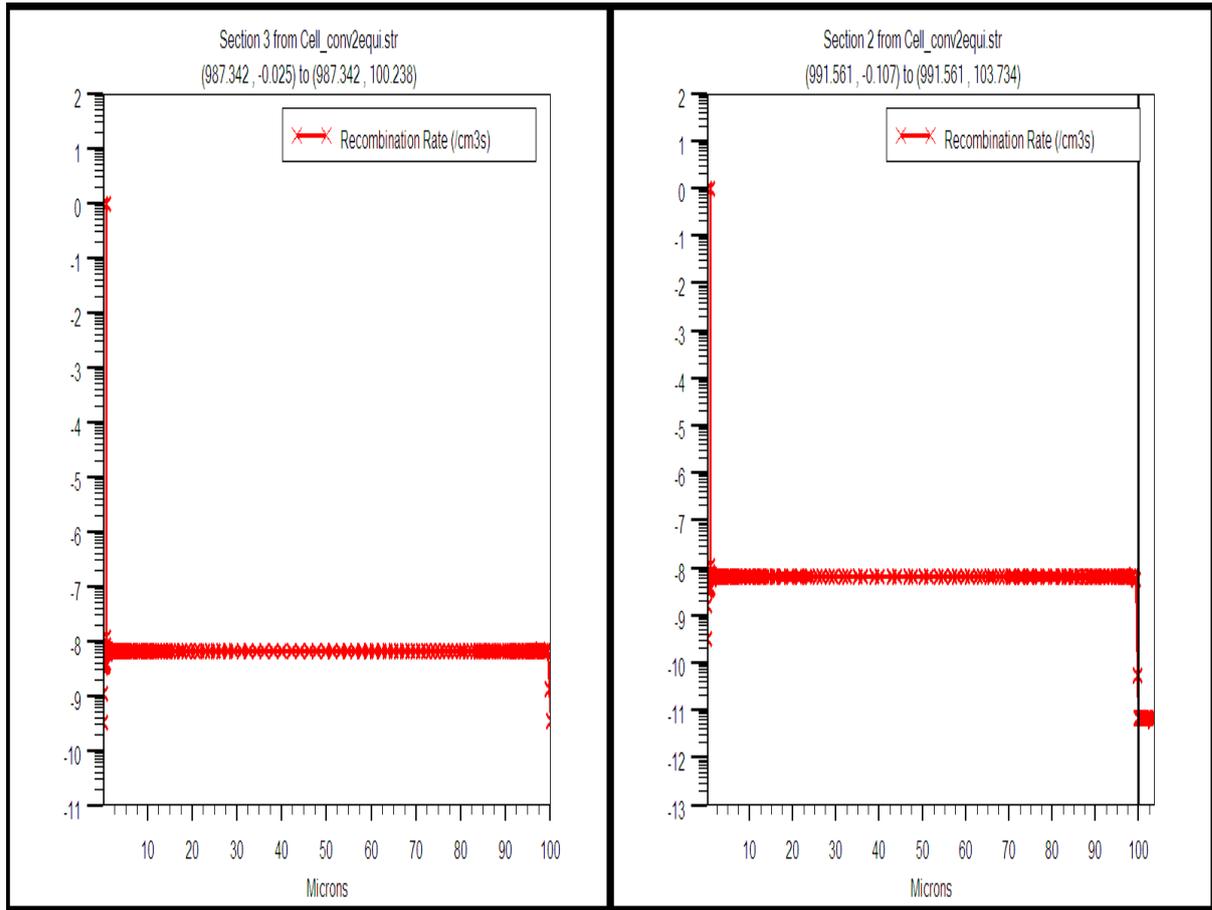
Figure (IV-10) : caractéristique J - V en obscurité et sous éclaircment AM1.5 et caractéristique P- V : (a) $n^+p(c\text{-Si})$,(b) $n^+p(c\text{-Si})/p(\text{GaAs})$.

Le tableau (IV-3) regroupe les paramètres essentiels de la cellule, tirés des caractéristiques J - V sous l'éclaircment AM1.5: la densité de courant de court circuit (J_{sc}), la tension du circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF), la puissance maximale (P_{max}) ainsi que le rendement de conversion photovoltaïque (η). D'après ces résultats on peut constater que l'utilisation du substrat (p^+) en (GaAs) (dans la cellule (b)) a un effet remarquable sur les valeurs de J_{sc} et P_{max} , V_{oc} ce qui induit une augmentation significative du rendement de conversion photovoltaïque (η) de 14.77% à 17.41%. Pour V_{oc} et FF il y a, cependant une augmentation très faible.

Cellule (np)	$J_{sc} (mA/cm^2)$	$V_{oc} (V)$	FF	$P_{max} (W/cm^2)$	$\eta (\%)$
(c-Si / c-Si) (np)	26.54	0.68	0.82	0.014	14.77
(Si / GaAs) (np/p)	29.83	0.70	0.83	0.017	17.41

Tableau (IV-3): Paramètres de sortie des cellules $n^+p(c\text{-Si})$ et $n^+p(c\text{-Si})/p(\text{GaAs})$.

Pour avoir une idée sur la cause de cette augmentation (principalement du photocourant), nous avons tracé le taux de recombinaison qui a un effet direct sur le photocourant des deux cellules. On remarque qu'il y a une diminution dans le taux de recombinaison dans la deuxième cellule côté du substrat GaAs, ce qui explique l'augmentation de son photocourant par rapport à celui de la première cellule.



(a)

(b)

Figure (IV-11) : Distribution du taux de recombinaison par TonyPlot pour :a) $n^+p(c\text{-Si})$,b) $n^+p(c\text{-Si})/p(\text{GaAs})$:

IV-4-1.2 Réponse spectrale:

La réponse de la cellule dépend du coefficient d'absorption α en fonction des longueurs d'ondes. La variation du coefficient d'absorption avec les longueurs d'onde induit une distribution en fonction des longueurs d'onde des porteurs photogénérés.

Dans la figure (IV-12) on présente la réponse spectrale interne (RSI) et externe (RSE) des cellules (a) $n^+p(c\text{-Si})$, (b) $n^+p(c\text{-Si})/p(\text{GaAs})$. On rappelle que la réponse spectrale externe est le rapport entre le photocourant et le flux des photons incidents, alors que la réponse interne est le rapport entre le photocourant et le flux des photons transmis dans le matériau.

D'après les deux figures, la différence est plus nette pour la RSI ou on remarque une certaine amélioration ou au delà de $1.12 \mu\text{m}$. Les réponses spectrales avec leur intervalles qui s'étend entre 0.3 et $1.1 \mu\text{m}$ sont comparables avec la réponse spectrale d'une cellule solaire en Si d'après la littérature [2], [3].

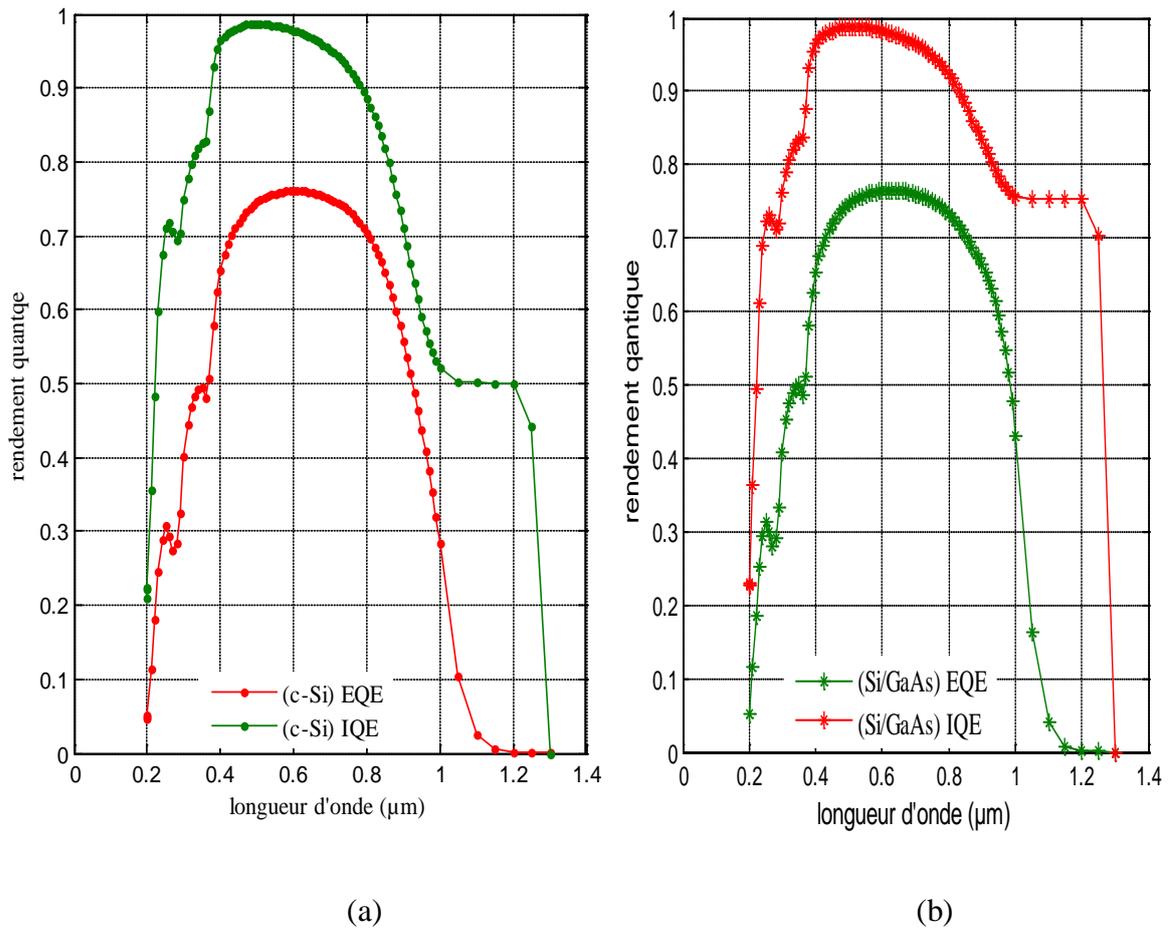
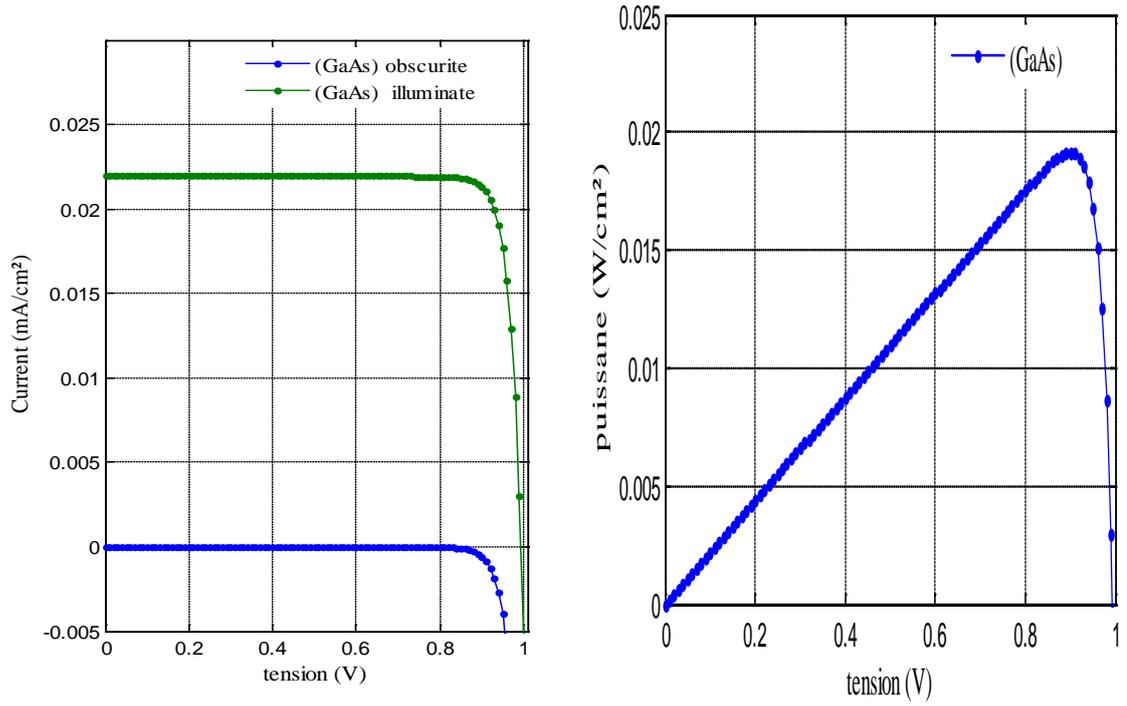


Figure (IV-12): La réponse spectrale pour deux cellules solaire: (a) $n^+p(c-Si)$, (b) $n^+p(c-Si)/p(GaAs)$.

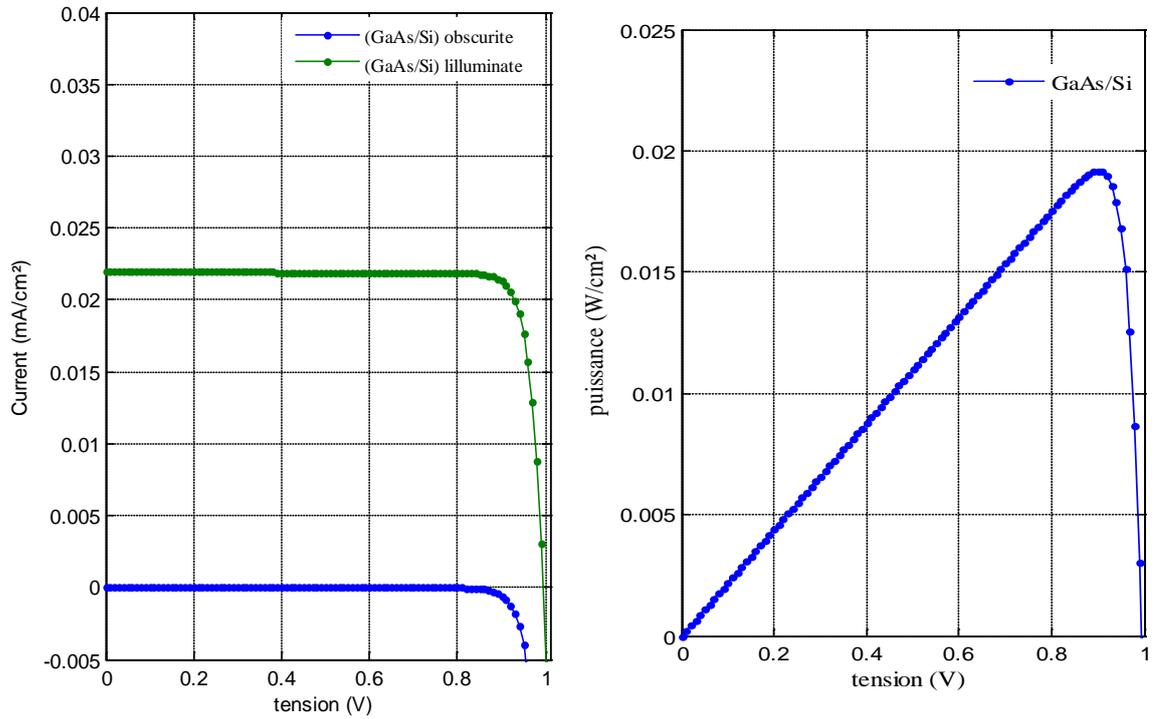
IV-4.2 Cellules solaires $n^+p(GaAs)$ et $n^+p(GaAs)/p(Si)$:

IV-4.2.1 Caractéristique $J-V$:

On montre dans la figure (IV-13) les caractéristiques J-V en obscurité et sous éclaircment AM1.5, et les caractéristiques P-V :(a)de la cellule $n^+p(GaAs)$ et (b) de la cellule $n^+p(GaAs)/p(Si)$.



(a)



(b)

Figure (IV-13): Comparaison entre les caractéristiques J - V et P - V , sous éclaircissement AM1.5:

(a) n^+p (GaAs), (b) n^+p (GaAs)/ p (Si).

Les paramètres de sortie des deux cellules sont groupés dans le tableau (IV-4).

Cellule (n-p)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	P_{max} (W/cm ²)	η (%)
(c-GaAs) (np)	21.98	0.99	0.87	0.019	19.18
(GaAs/Si) (np/p)	21.95	0.99	0.87	0.019	19.15

Tableau (IV -4): Paramètres de sortie des cellules n⁺p(GaAs), (b) n⁺p(c-GaAs)/p(Si).

La première remarque à faire est que l'effet du substrat en Si est presque négligeable. La deuxième remarque est l'amélioration du rendement à 19.18% par rapport à 17.41% de la cellule Si/GaAs. Ceci signifie, que la cellule à base de GaAs avec une épaisseur de 10 µm a un rendement plus élevé que celui d'une cellule à base de Si avec une épaisseur de 100 µm.

IV-4.2.2 Réponse spectrale:

Dans la figure (IV-14 et 15) on montre les réponses spectrales de deux cellules et la courbe théorique pour les cellules solaire en GaAs.

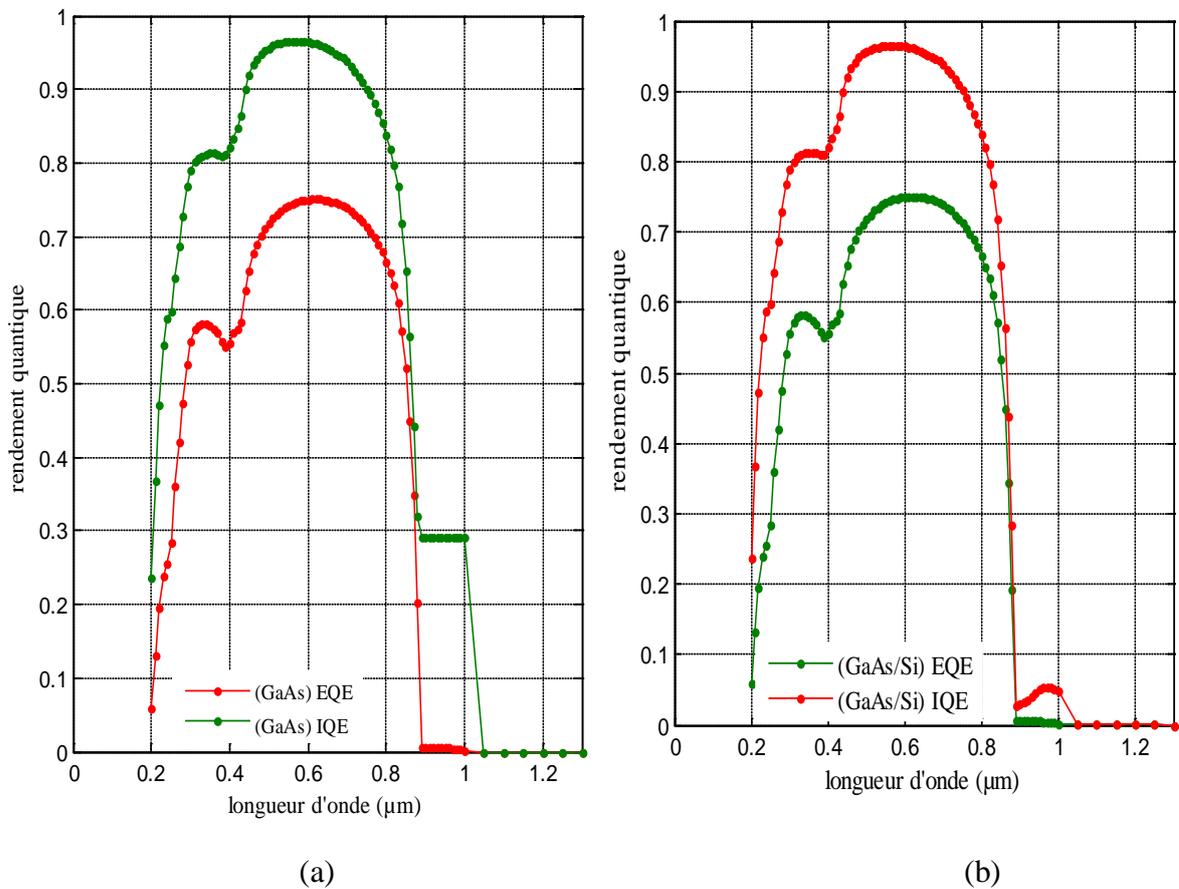


Figure (IV-14): Réponse spectrale pour les deux cellules solaire: (a) n⁺p(GaAs), (b) n⁺p(GaAs)/p(Si).

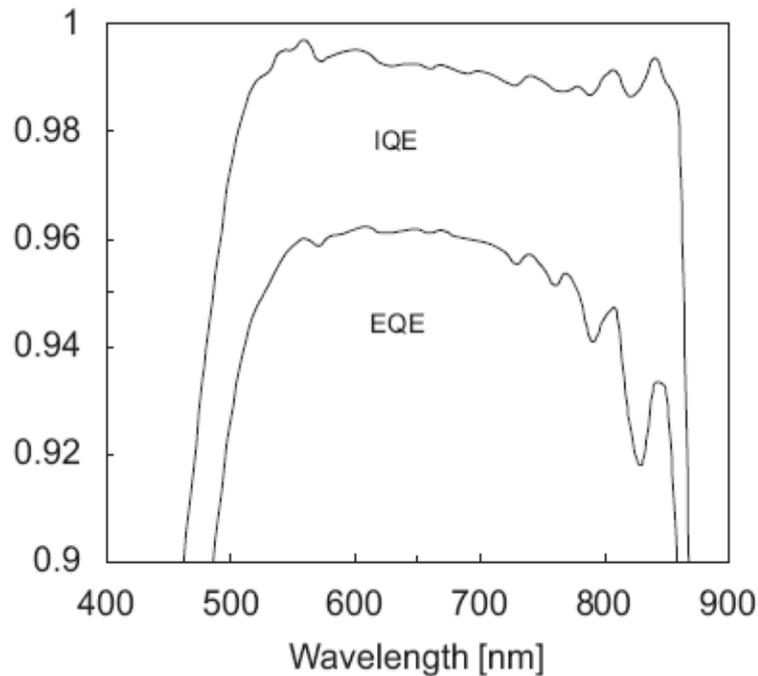


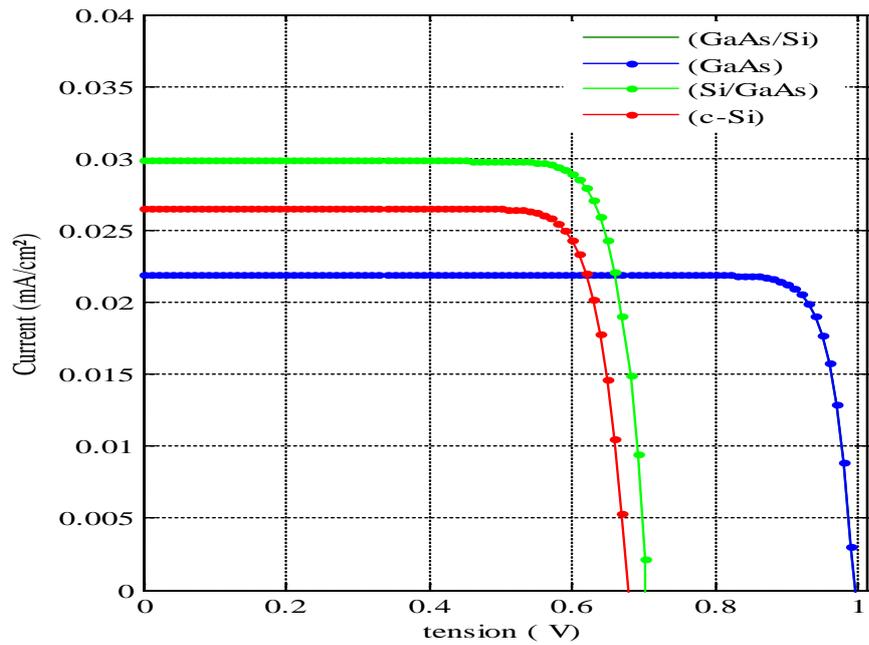
Figure (IV-15): réponse spectrale théorique pour une cellule solaire en GaAs [4].

Concernant les figures (IV-16 (a) et (b)), il y a une légère différence entre les deux réponses spectrales internes des deux cellules. Celle de la première cellule est un peu pointue, alors que celle de la deuxième, et à cause du substrat en Si, elle est un peu étalée par rapport à la première. Leurs intervalles entre 0.2 et 0.9 μm est comparable à celui de la courbe théorique [3], bien que l'allure est différente.

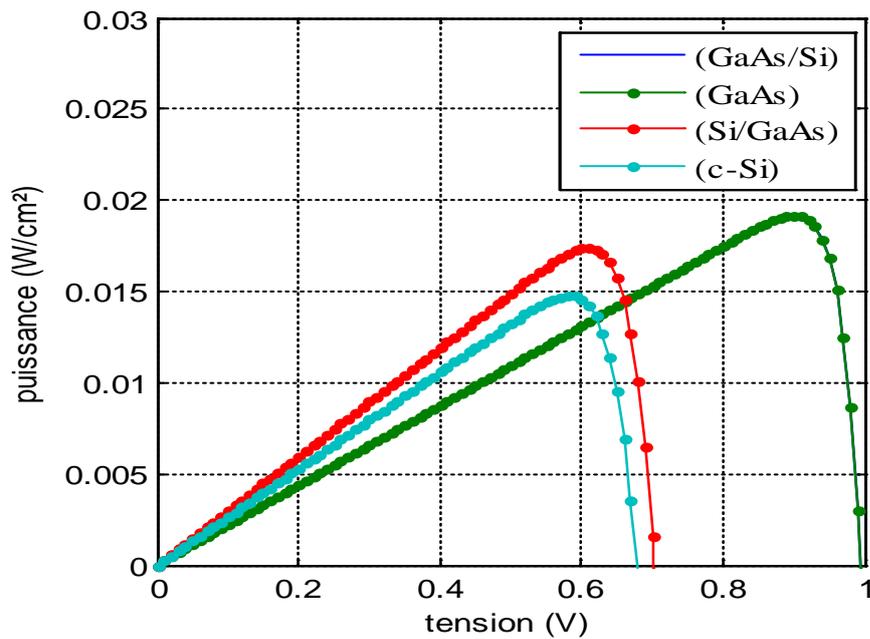
IV-4.3 comparaison entre les cellules : $n^+p(\text{c-Si})$, $n^+p(\text{c-Si})/p(\text{GaAs})$, $n^+p(\text{GaAs})$ et $n^+p(\text{GaAs})/p(\text{Si})$

Dans la figure (IV-16), on a tracé (a) les caractéristiques J-V et (b) P-V des quatre cellules. Le groupe des cellules Si et Si/GaAs, et à cause de son gap d'énergie de 1.12 eV, présente un courant élevé, en particulier la cellule Si/GaAs. Cependant, leurs V_{oc} ont des valeurs basses. Par contre, le groupe des cellules GaAs et GaAs/Si avec un gap d'énergie dominant de 1.42 eV présente un courant plus faible, mais une tension V_{oc} plus élevée.

D'après les figures IV-16 (b) des caractéristiques P-V, on peut affirmer que finalement c'est la tension qui contrôle plus la puissance maximale, et par conséquent le rendement de conversion. Ainsi, le groupe GaAs, GaAs/Si avec son gap d'énergie direct de 1.42 eV (qui s'accorde mieux avec le maximum du spectre) présente le meilleur rendement de conversion.



(a)



(b)

Figure (IV-16) : Comparaison entre les caractéristiques :(a) J - V et (b) P - V pour les quatre cellules solaires.

Dans la Figure (IV-17), on a tracé : (a) RSE des quatre cellules, (b) RSI des quatre cellules et (c) RSI et RSE des quatre cellules.

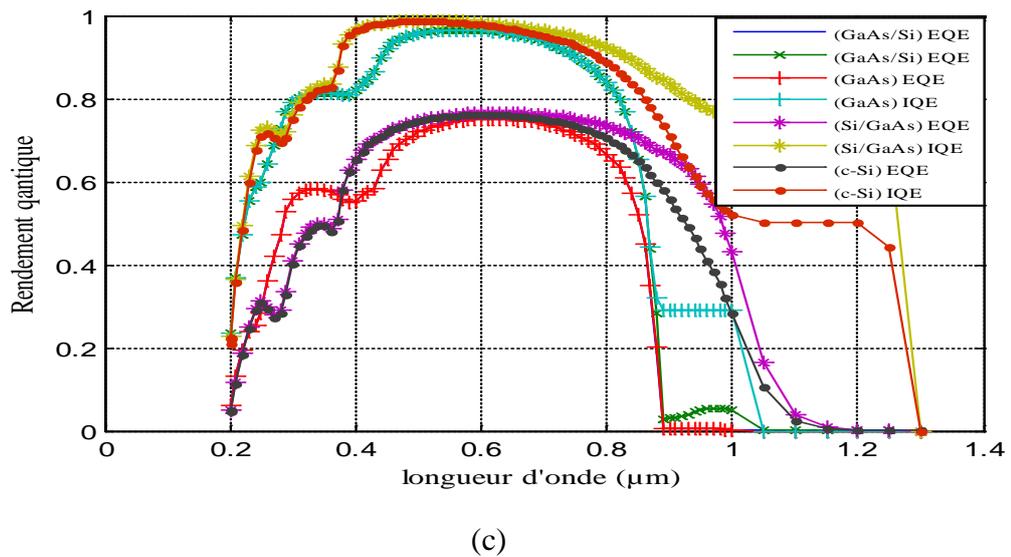
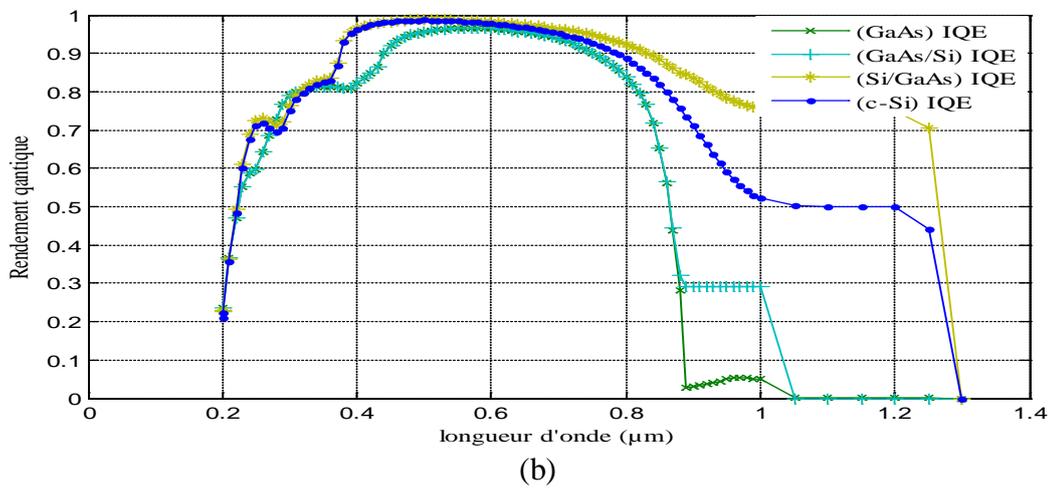
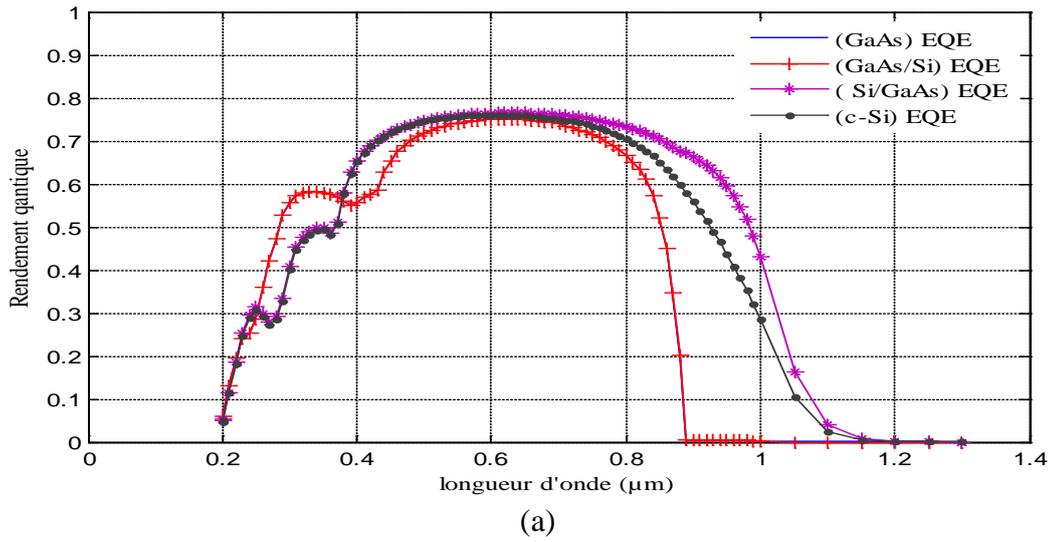


Figure (IV-17): Réponses spectrales internes et externes des quatre cellules solaires.

La première chose remarquée est le fait que la différence entre les quatre cellules est mieux discernée pour la RSI, puisque celle-ci est liée au flux des photons transmis effectivement dans le matériau, contrairement à la RSE. Puisque la RSI est liée directement au photocourant, il est évident que celle du Si/GaAs soit la meilleure. Ainsi, malgré que la cellule Si/GaAs a un rendement de conversion inférieur à celui de la cellule GaAs/Si, mais elle peut être plus avantageuse pour des applications spectrales.

Il est intéressant aussi, si on parvient au future d'assembler ces deux cellules en une seule par une double jonction GaAs/Si/GaAs par exemple.

On note aussi qu'économiquement le Si, et à cause de son abondance dans la nature, est plus utilisé comme substrat pour le GaAs qui est plus chère. Ceci est bien clair, et pour cette raison, dans le cas de la cellule Si/GaAs c'est toujours le Si qui a la grande épaisseur. On inverse juste la face éclairée. Alors au lieu que ça soit la face du GaAs qui est éclairée, c'est la face du Si.

IV-4.4 Optimisation de la cellule Si/GaAs :

Puisque l'objectif essentiel de ce mémoire et l'étude d'une cellule solaire a base de Si/GaAs, on essaye dans cette section d'apporter quelques modifications dans les paramètres de la cellule Si/GaAs afin d'améliorer son rendement de conversion.

On présente dans le tableau suivant (IV-5) les premiers paramètres modifiés qui sont l'épaisseur et dopage des différentes couches de la cellule.

Cellule solaire <i>Si/GaAs</i>		Initiale	Optimisée
Emetteur (Si)	Epaisseur (μm)	0.75	2
	Dopage ($/\text{cm}^3$)	$2 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{18}$
	Recombinaison face avant (cm/s)	$S_n = 1.e3$ $S_p = 1.e3$	$S_n = 1.e3$ $S_p = 1.e3$
Base/Collecteur (Si)	Epaisseur (μm)	99.25	193
	Dopage ($/\text{cm}^3$)	$5 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{17}$
Substrat (GaAs)	Epaisseur (μm)	4	4
	Dopage ($/\text{cm}^3$)	$2 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{18}$
	Recombinaison face arrière (cm/s)	$S_n = 1.e5$ $S_p = 1.e5$	$S_n = 1.e5$ $S_p = 1.e5$
Couche antireflet	<i>SiN</i> avec une épaisseur -80 nm		

Tableau (IV-5) : Optimisation de la cellule (c-Si) n^+ -p/(GaAs)p par le dopage et les épaisseurs des différentes couches.

On montre dans la figure (IV-18) les caractéristiques J-V en obscurité et sous éclaircment AM1.5, et les caractéristiques P-V des deux cellules.

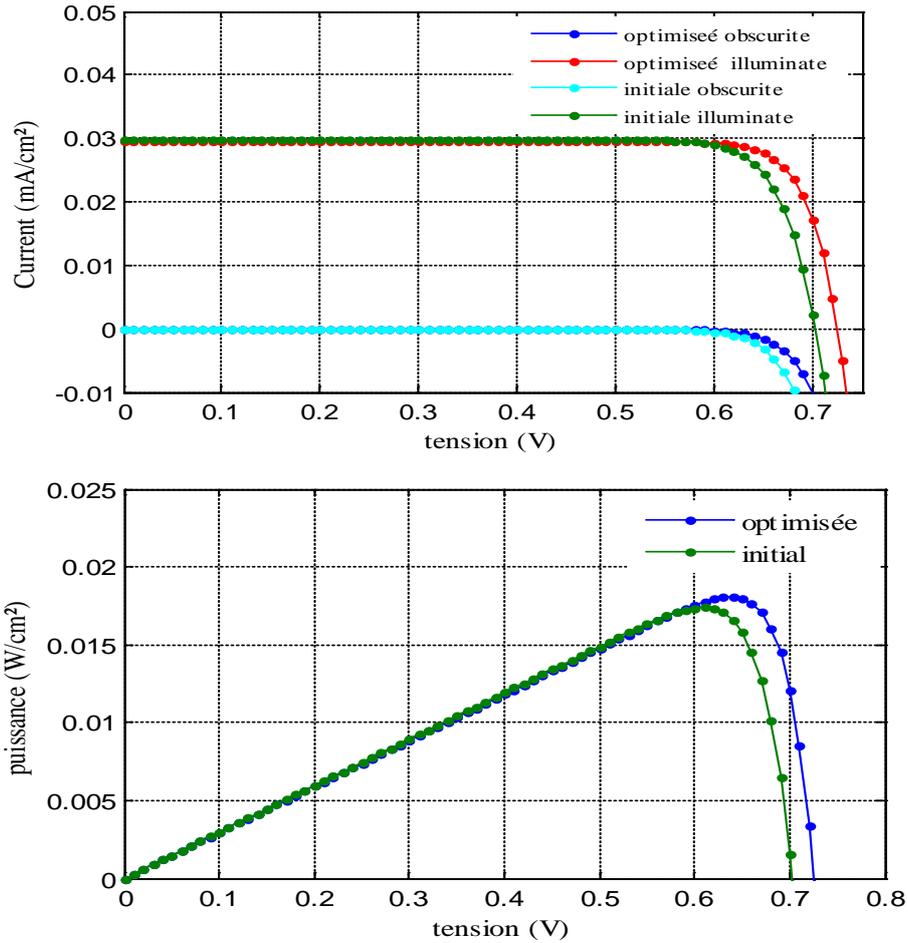


Figure (IV-18): Comparaison entre les caractéristiques J - V et P - V , sous éclaircissement AM1.5: pour les deux cellules solaires.

Les paramètres de sortie des deux cellules (initiales et optimisée) sont groupés dans le tableau (IV-6). On peut voir qu'après le changement des épaisseurs et du dopage des couches, on a pu augmenter le rendement de 17.41 à 18.09%. Même si on augmente en plus le dopage ou les épaisseurs, le rendement maximum de 18.09%. Comme on peut le voir d'après le tableau, cette optimisation du rendement est due à V_{oc} et FF, malgré que J_{sc} diminue un peu.

Cellule Si/GaAs	$J_{sc} (mA/cm^2)$	$V_{oc} (V)$	FF	$P_{max} (W/cm^2)$	$\eta (\%)$
Initiale	29.83	0.70	0.83	0.017	17.41
Optimisée	29.57	0.72	0.84	0.018	18.09

Tableau (IV -6): Paramètres de sortie des cellules : sans (c-Si) n^+ -p/(GaAs)p et avec (c-Si) n^+ -p/(GaAs)p.

Dans la figure (IV-19) on montre les réponses spectrales de deux cellules.

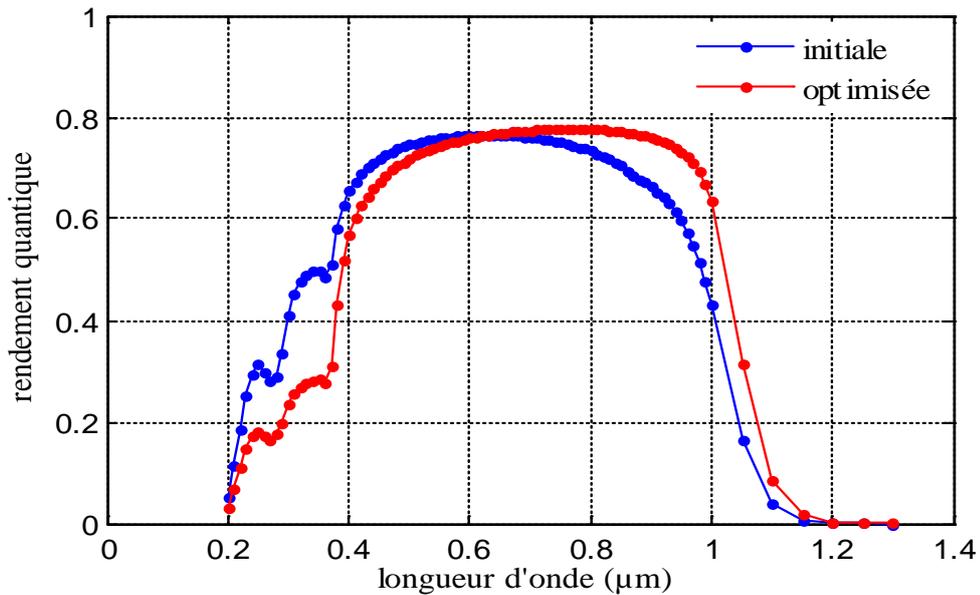


Figure (IV-19): Réponse spectrale pour les deux cellules solaire.

Maintenant et puisque une optimisation supplémentaire de la cellule n'est plus possible par le dopage ou par les épaisseurs, alors on a essayé de jouer sur un autre paramètre : c'est la couche antireflet de l'oxyde.

Le souci d'avoir une meilleure absorption des photons, nécessite le dépôt d'une couche antireflet. Afin d'examiner l'importance de cette couche dans notre cellule Si/GaAs, on a fait une comparaison entre la cellule Si/GaAs sans couche antireflet (CAR), nommée cellule 1, la cellule Si/GaAs initial (de rendement de 17.41%) qui a une CAR en Si_3N_4 ; nommée cellule 2, et la troisième cellule a les mêmes épaisseurs et dopage de la cellule 2 mais sa CAR est composée de deux couches d'oxydes : SiO_2 et Si_3N_4 ; cette cellule est nommée cellule 3. Les caractéristiques J-V en obscurité et sous éclairage AM1.5, et les caractéristiques P-V de ces trois cellules sont présentées dans les figures IV-20 (a) et (b). On remarque que la cellule 3 avec CAR double en $SiO_2 - Si_3N_4$ a un courant plus élevé et par conséquent, une puissance maximale meilleure.

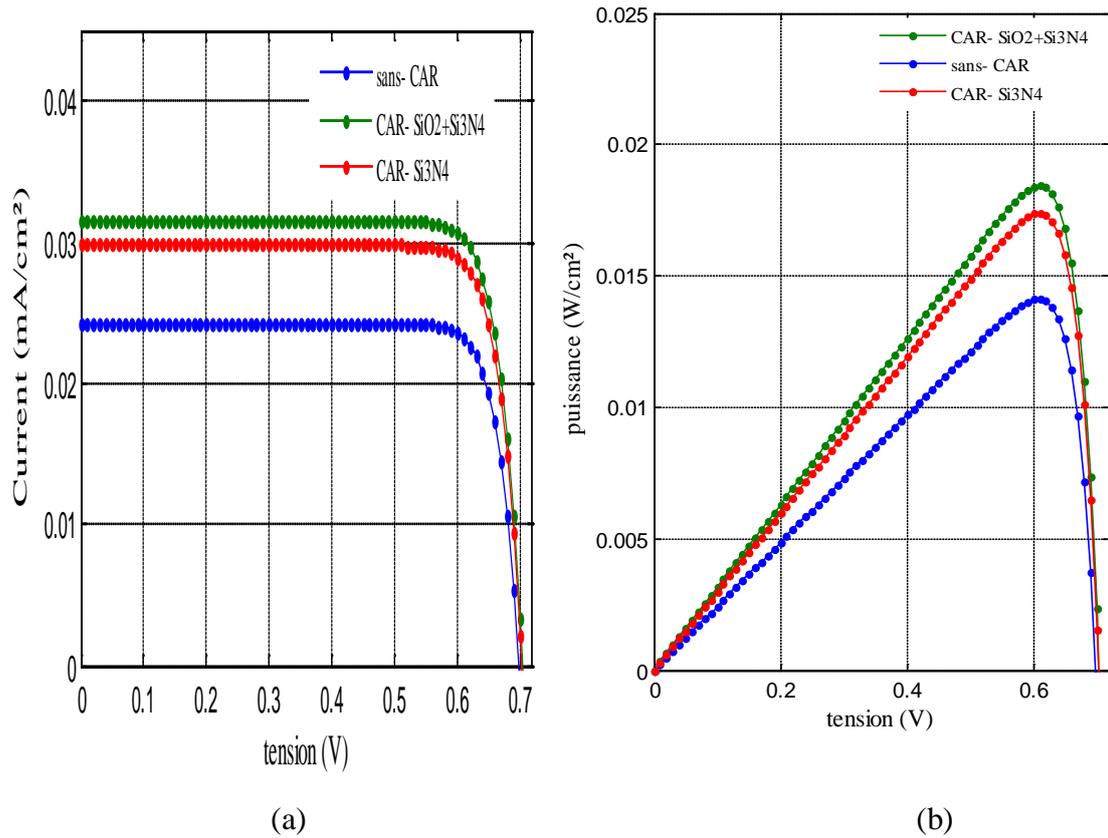


Figure (IV-20) : caractéristique J - V en obscurité et sous éclairage AM1.5 et caractéristique P - V : sans CAR, avec CAR en Si_3N_4 .et avec CAR double en $SiO_2 - Si_3N_4$.

Les paramètres de sortie des trois cellules sont résumés dans le tableau (IV-7). La cellule 3 présente un J_{sc} de 31.56 (mA/cm²) qui conduit à un rendement de 18.43%.

Cellule Si/GaAs	J_{sc} (mA / cm ²)	V_{oc} (V)	FF	P_{max} (W / cm ²)	η (%)
Cellule 1	24.29	0.71	0.83	0.014	14.13
Cellule 2	29.83	0.70	0.83	0.017	17.41
Cellule 3	31.56	0.70	0.83	0.018	18.43

Tableau (IV -7) : Paramètres de sortie des trois cellules : cellule 1, cellule 2 et cellule 3.

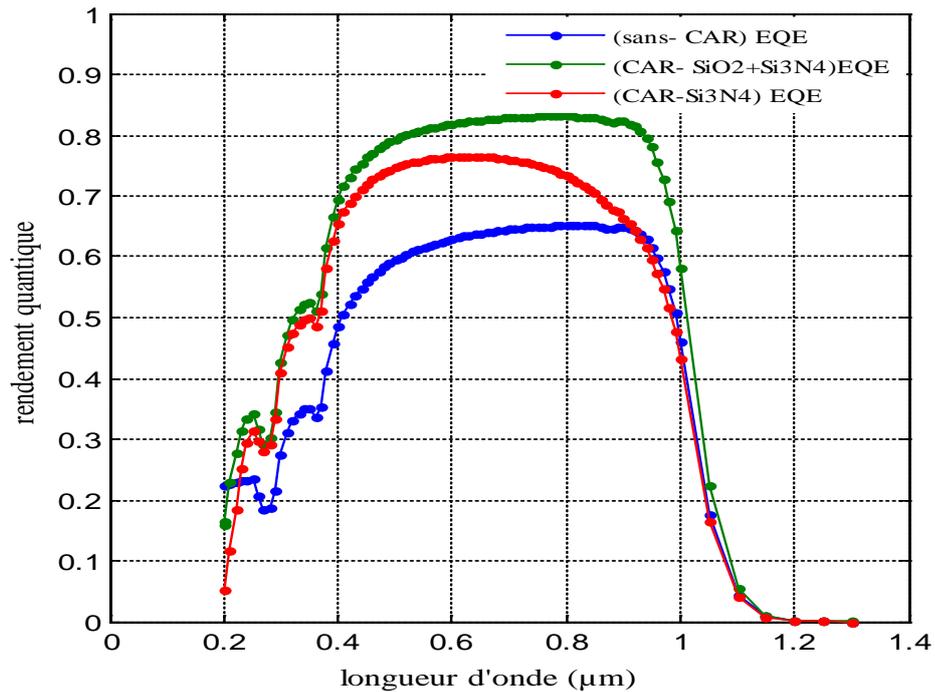


Figure (IV-21) : effet de la passivation sur le rendement quantique externe.

Concernant la RSE qui est présentée dans la figure (IV-21), une nette amélioration est remarquée pour la cellule 3 ce qui indique qu'une double couche $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ offre une certaine amplification de la lumière incidente, ce qui encourage la photogénération des porteurs de charge.

IV-5 Conclusion:

Ce chapitre est application du logiciel SILVACO-ATLAS pour le calcul des caractéristiques J-V et P-V, et la réponse spectrale d'une cellule Si/GaAs de type n^+p-p . Au début on a commencé par une comparaison de cette cellule avec les cellules courantes : en Si, GaAs et GaAs/Si, pour la situer par rapport à ces cellules. D'après cette comparaison le rendement de conversion de la cellule Si/GaAs est meilleur que celui d'une cellule Si, mais plus bas que celui des cellules en GaAs et GaAs/Si. Cependant elle présente la meilleure réponse spectrale.

En second lieu, on essayé d'optimiser notre cellule en jouant sur : les épaisseurs et le dopage des différentes couches, et finalement sur la composition de la couche antireflet. Avec ces changements on a pu augmenter le rendement de 17.41% à 18.43% avec une réponse spectrale encore plus meilleure.

Bibliographie du chapitre IV:

- [1] N. Oleksiy, «Simulation, Fabrication et Analyse de Cellules Photovoltaïques a contacts arrières interdigités », Thèse Doctorat, Lyon : INSA de Lyon, 2005, 48p.
- [2] A. Rothwarf and K. W. Boer, « Direct Conversion of Solar Energy Through Photovoltaic Cells », Progress in Solid-State Chemistry, 1975, Vol. 10, Part 2, pp. 71-102. Pergamon Press. Printed in Great Britain.
- [3] Lawrence L .Kazmerski, «photovoltaics: a review of cell and module technologies»,renewable and sustainable energy reviews, Vol 1,Nos1/2,pp71.170.1997.
- [4] G.J. Bauhuis, P.Mulder, E.J.Haverkamp, J.C.C.M.Huijben, J.J.Schermer ,«26.1% thin-film GaAs solar cell using epitaxial lift-off »,Solar Energy Materials & Solar Cells 93 (2009) 1488–1491.

Conclusion général

Conclusion générale :

Cette étude est une application du logiciel SILVACO-ATLAS pour modéliser une cellule solaire en Si sur un substrat GaAs. Les caractéristiques électriques calculées sont la caractéristique courant-tension (J-V), la caractéristique (P-V) et la réponse spectrale externe et interne (RSE et RSI). La cellule est une jonction n^+ / p et le substrat est de type p.

Dans la littérature, on a rencontré plusieurs études sur les cellules solaires en GaAs sur substrat en Si, et ceci nous a donné l'idée de voir ce qui se passe si c'était l'inverse.

Ainsi, nous avons divisé l'étude en deux parties : une partie qui compare la cellule Si /GaAs à une cellule simple en Si et la deuxième compare les deux cellules GaAs /Si et GaAs simple.

Ensuite nous avons comparé ces quatre cellules ensemble et les déductions faites sont les suivantes :

- ✚ Le groupe des cellules GaAs /Si, et GaAs simple a le meilleur rendement de conversion, qui est d'environ 19%.

- ✚ La cellule Si/GaAs présente la meilleure réponse spectrale.

Une optimisation de la cellule Si/GaAs, sur la base des épaisseurs, du dopage et de la composition de la couche anti-reflet permet d'optimiser le rendement de conversion à 18.43%, mais qui reste toujours inférieur à celui du groupe des cellules GaAs simple et GaAs/Si.

Enfin les résultats dans cette mémoire est un très simple correspondre pour l'optimiser plus.

▪ **Perspective :**

Ce travail encourage à effectuer des études plus approfondies :

- ✚ Ce papier doit proposer une conception optimale de couche tampon (buffer) graduelle Si_xGe_{1-x} sur des cellules solaires Si / GaAs pour avoir la production de la cellule optimale, les outputs (paramètres de sortie) à savoir la tension de circuit, le courant de court-circuit et le facteur de forme, la puissance maximale, ainsi que le rendement de conversion photovoltaïque. nous avons employé Si_xGe_{1-x} avec contenu à 10 vers 80 % de germanium par exemple.

- ✚ Il est intéressant aussi, si on parvient au futur d'assembler ces deux cellules en une seule par une double jonction GaAs/Si/GaAs par exemple.

ملخص:

في هذا العمل قمنا بعملية المحاكاة العددية للخواص الكهربائية ; الخصائص (J-V) و الاستجابة الطيفية, للخلية الشمسية من Si على مسند من $GaAs$ ، وقد أجريت المحاكاة بواسطة برنامج SILVACO-ATLAS في مختبرا لمواد النصف الناقل و المعدنية(LMSM) في جامعة بسكرة. هذه الخلية تتم مقارنتها مع خلية بسيطة من Si ، خلية بسيطة من $GaAs$ و في نهاية مع خلية من $GaAs$ على مسند من Si . وأظهرت النتائج التي نكصلنا عليها أن الخليتين $GaAs/Si$ و $GaAs$ لديهما أفضل مردود (19%) في حين أن الاستجابة الطيفية للخلية $Si/GaAs$ هي الأفضل. ولتحسين خصائص الخلية Si/GaA , قمنا علي هذا الأساس بتغيير في السمك , التطعيم وتركيبية الطبقة المانعة للانعكاس وقد ساعدت على زيادة مرد وديقي هذه الخلية إلى (18.43%).

الكلمات المفتاحية:

الخلايا الشمسية, $Si / GaAs$, Si , $GaAs$, $GaAs / Si$, المحاكاة العددية , $SILVACO - ATLAS$.

Résumé:

Ce travail est une simulation numérique des propriétés électriques ; caractéristique (J-V) et réponse spectrale, d'une cellule solaire en Si sur un substrat en $GaAs$. La simulation a été faite par le logiciel SILVACO-ATLAS au sein du laboratoire des matériaux semiconducteurs et métalliques (LMSM) à l'université de Biskra. Cette cellule est comparée par la suite avec une cellule Si simple, une cellule $GaAs$ simple et finalement une cellule $GaAs$ sur un substrat en Si . Les résultats que nous avons obtenu montre que les cellules $GaAs$ et $GaAs/Si$ ont un meilleur rendement de conversion (19%) or la réponse spectrale de la cellule $Si/GaAs$ est plus meilleur. Une optimisation de la cellule $Si/GaAs$ sur la base des épaisseurs, du dopage et de la composition de la couche antireflet a permis d'augmenter le rendement de conversion de la cellule à 18.43%.

Mots- Cles :

Cellule solaire, Si , $GaAs$, $GaAs / Si$, $Si / GaAs$, simulation numérique, SILVACO-ATLAS.

Abstract:

This work is a numerical simulation of electrical properties; (J-V) characteristic and spectral response, of a Si solar cell on a $GaAs$ substrate. The simulation was performed by the SILVACO-ATLAS software in the laboratory of metallic and semiconductor materials (LMSM) in university of Biskra. This cell is then compared with a simple Si cell, a $GaAs$ cell and finally a $GaAs$ cell on a Si substrate. Results we obtained showed that $GaAs$ and $GaAs/Si$ cells have better conversion efficiency (19%) while the spectral response of the $Si/GaAs$ cell is best. The optimization of the $Si/GaAs$ cell based on the thickness, doping and composition of the antireflection coating has increased the conversion efficiency of the cell to 18.43%.

Key Words:

Cell solar, $Si / GaAs$, Si , $GaAs$, $GaAs / Si$, numerical simulation, SILVACO-ATLAS.