



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la
Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Thème

**Effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur une cellule
solaire InGaP/GaAs**

Réalisées par :

Chettouh Romaissa

Dou Bouthaina

Soutenu en Juin 2019 devant le jury composé de:

Dr. LAKHDAR Nacereddine

MCA

Directeur du mémoire

M. BOULILA Mohamed

MAA

Président

M. HIMA Abdelkader

MAA

Examineur

Année Universitaire : 2018/2019

REMERCIEMENTS

Nous rendons grâce à ALLAH de nous avoir donné le courage et la volonté.

Ainsi que nous remercions nos chers parents, pour leurs sacrifices, aides, soutiens et encouragements; afin que nous effectuions cette formation de master dans les meilleures conditions.

Nous tenons à remercier vivement notre promoteur

"Dr. Lakhdar Nacereddine "

pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances, qu'il nous a apportées durant notre recherche.

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, qui nous ont donné les bases de la science et l'aides inestimables.

Aussi, nous entrons d'une large porte pour remercier très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examineur.

Nous tenons à remercier aussi l'ensemble du personnel de faculté de technologie et surtout du département de génie-électrique.

Merci à toute personne qui a participé de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

*Il est temps de mettre fin à cet humble travail et de le mettre entre vos mains,
remerciant Dieu pour sa grâce .*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur
soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

A mes chères sœurs ... pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

*A mes chers frères, ..., pour leur appui et leur encouragement, A toute ma famille
universitaire (mes profs et mes camarades) pour leur soutien tout au long de mon
parcours universitaire, Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant
allégués, et le fruit de votre soutien infailible,*

Merci d'être toujours là pour moi.

Dou Bouthaina

Chettouh Romaissa

Résumé

Depuis plus d'une décennie, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. Les matériaux III-V sont intensément étudiés pour des applications optoélectroniques. En particulier, ils sont largement étudiés pour des applications photovoltaïques grâce à sa large couverture spectrale, ses bonnes caractéristiques électriques et sa résistance à de fortes puissances. Dans ce travail, nous avons étudié la cellule en InGaP/GaAs par la simulation numérique en utilisant le logiciel Silvaco/Atlas. De plus, l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres électriques de la cellule à savoir le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme FF et le rendement de conversion (η) a été analysé. Les résultats de simulation obtenus ont été montrés que l'épaisseur de la couche (t_{GaAs}) influent fortement sur le rendement de la cellule. Par conséquent, plus l'épaisseur de cette couche est réduite plus le rendement de conversion est diminué.

Mots clés : Matériaux III-V, cellule solaire, couche absorbante, rendement de conversion.

Abstract

For more than a decade, the use of renewable energies and in particular photovoltaic solar is becoming stronger. III-V materials are intensely studied for optoelectronic applications. In particular, they are widely studied for photovoltaic applications due to its wide spectral coverage, good electrical characteristics and resistance to high power. In this work, we have studied the InGaP/GaAs-based cell by numerical simulation using the Silvaco / Atlas software. Therefore, the effect of the absorber layer thickness on the electrical parameters of the solar cell, namely the short-circuit current (I_{cc}), the open-circuit voltage (V_{co}), the fill factor FF and the efficiency conversion (η) has been analyzed. The obtained results have been shown that the thickness of the layer (t_{GaAs}) strongly influences the efficiency of the cell. Therefore, the smaller the thickness of this layer, the lower the conversion efficiency.

Key words: III-V materials, solar cell, absorbent layer, efficiency.

الملخص

منذ أكثر من عقد، تم استخدام الطاقات المتجددة وعلى وجه الخصوص الطاقة الشمسية التي تزداد بقوة وبصفة خاصة وقد تمت دراسة مواد العمود الثالث III-V دراسة مكثفة من أجل التطبيقات الإلكترونية. كما تمت دراستها على نطاق واسع للتطبيقات الكهروضوئية بفضل تغطيتها الطيفية الواسعة وخصائصها الكهربائية الجيدة ومقاومتها القوية لطاقات العالية. في إطار هذا العمل، قمنا بدراسة خلية InGaP / GaAs بمساعدة البرنامج المحاكى رقميا /Silvaco /Atlas. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة تأثير سمك طبقة الإمتصاص على الخواص الكهربائية للخلية وهي تيار الدارة القصيرة (I_{cc})، جهد الدارة المفتوحة (V_{co})، عامل الشكل FF ومردودية التحويل (η). حيث تظهر نتائج المحاكاة أن سمك الطبقة (t_{GaAs}) تؤثر و بقوة على كفاءة الخلية. حيث كلما نقص سمك هذا الأخيرة نقصت مردودية التحويل.

الكلمات المفتاحية : مواد العمود الثالث III-V ، الخلايا الشمسية ، طبقة الإمتصاص ، كفاءة التحويل .

Tableau des matières

Résume	i
Tableau des matières	iii
Liste des figures.....	vi
Liste de tableaux.....	viii
Liste des Symboles et Abréviations.....	ix
Introduction générale.....	2

Chapitre I .Généralités sur les cellules solaires

I.1.Introduction	5
I.2. Historique.....	5
I.3. Définition	6
I.4. Rayonnement solaire	6
I.4.1 . L'air mass (AM)	6
I.4.2. Spectre solaire	7
I.5. Les matériaux semi-conducteurs.....	8
I.5.1. Semi-conducteurs intrinsèques	8
I.5.2.Semi-conducteurs extrinsèques	9
I.6. Dopage	9
I.6.1.électronégatif.....	9
I.6.2.électropositif	9
I.7. Bandes d'énergies	10
I.8.La jonction P-N	10
I.9.Principe de fonctionnement	11
I.10.Caractéristiques d'une cellule solaire	12

I.10.1.Circuit électrique équivalent	12
I.10.2.Caractéristique courant-tension $J(V)$ d'une cellule solaire	13
I.11. Paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire	15
I.11.1.Courant de court-circuit	15
I.11.2. Point de la puissance maximale	15
I.11.3.Tension de circuit ouvert	15
I.11.4. Facteur de forme	16
I.11.5. Rendement de conversion d'énergie	16
I.12. Technologies des cellules solaires.....	16
I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	18
I.14.Conclusion	19

Chapitre II. Description logiciel silvaco

II.1.Introduction	21
II.2. Logiciel de simulation « Silvaco-Atlas ».....	21
II.3. Entrées et Sorties dans Silvaco Atlas.....	21
II.4. Présentation d'Atlas.....	22
II.4.1. DECKBUILD.....	23
II.4.2. TONYPLOT.....	23
II.5. Ordres de commandes d'Atlas	24
II.6. Spécification de la structure.....	25
II.6.1.Mesh	25
II.6.2 Régions	26
II.6.3 Electrode	27
II.6.4. Doping	27

II.7.Spécification des matériaux et de modèles	28
II.8. Spécification Méthodes numériques de calcul	29
II.9. Spécification des solutions	30
II.10. Analyse des résultats	30
II.10.1.EXTRACT.....	30
II.10.2.TONYPLOT	30
II.11. Contour général de construction d'ATLAS	31
II.12.conclusion	33
 Chapitre III . Etude de l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante	
III.1.Introduction.....	35
III.2.Simulation de la cellule solaire InGaP/GaAs.....	35
III.2.1.Description de la cellule.....	35
III.3. Paramètres de simulation.....	36
III.4 Spécification de la structure cellule solaire InGaP/GaAs.....	37
III.4.1.Maillage.....	37
III.4.2. Régions	38
III.4.3 Electrodes.....	38
III.4.4. Dopage.....	39
III.5.caractéristique (I.V) de la structure InGaP / GaAs.....	40
III.6 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante p-GaAs.....	41
III.8.Conclusion.....	45
Conclusion générale	47
Références Bibliographique	48

Liste des figures

Figure I.1: Schéma de fonctionnement d'une cellule solaire	6
Figure I.2: Définition de l'Air Mass	7
Figure I.3: spectre du rayonnement solaire.....	8
Figure I.4: diagramme de bande	9
Figure I.5: la bande d'énergie de la cellule solaire.....	10
Figure I.6: Jonction PN à l'équilibre.....	11
Figure I.7: structure d'une cellule photovoltaïque au silicium	12
Figure I.8: Schéma équivalent électrique de la cellule solaire	12
Figure I.9: Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule Photovoltaïque	13
Figure I.10: Caractéristique J(V) d'une cellule solaire	14
Figure I.11 : Diagramme des bandes et direction des courants dans une jonction P sous éclairement	14
Figure II.1: Environnement virtuel de fabrication des plaquettes de Silvaco	21
Figure II.2: Entrées et sorties d'Atlas.....	22
Figure II.3: Menu de commandes de Deckbuild	23
Figure II.4: Fenêtre de Base de TonyPlot	24
Figure II.5: Maillage générique pour une cellule GaAs	26
Figure II.6: Régions pour une cellule solaire GaAs	26
Figure II.7: Définition des électrodes avec Atlas	27
Figure II.8: Distribution uniforme typique d'une cellule solaire à simple jonction GaAs.....	28

Figure II.9: Gros plan de la région de jonction de la Figure II.6 pour mettre en évidence les changements de dopage dans les matériaux	28
Figure II.10: Organigramme des étapes de construction d'un model sur ATLAS ...	32
Figure III.1: Structure de la cellule solaire InGaP / GaAs.....	36
Figure III.2: Maillage de la cellule solaire proposée	37
Figure III.3: Présentation des régions de la cellule solaire	38
Figure III.4: Electrodes de la cellule solaire InGaP /GaAs.....	39
Figure III.5: Dopage des régions de la cellule solaire InGaP /GaAs	39
Figure III.6: La caractéristique I(V) de la cellule solaire InGaP /GaAs.....	40
Figure III.7: La puissance de la cellule solaire InGaP /GaAs	41
Figure III.8: La caractéristique I(V) de la cellule solaire GaAs.....	42
Figure III.9: La puissance de la cellule solaire GaAs	42
Figure III.10: La caractéristique I(V) de la cellule solaire InGaP /GaAs	43
Figure III.11: La puissance de la cellule solaire InGaP /GaAs.....	43
Figure III.12: Caractéristiques I-V de la cellule avec différentes épaisseurs de la couche absorbante.....	44

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Rendement énergétique des différents types de cellules solaire	17
Tableau II.1 : Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans Chaque groupe.....	25
Tableau III.1: Paramètres de simulation de InGap/GaAs	36
Tableau III.2: paramètres de la cellule solaire InGaP /GaAs	41
Tableau III.3: Paramètre électrique pour différentes épaisseurs de la couche absorbante	44

Liste des Symboles et Abréviations

Symboles	Signification	Unite
J	La densité de courant	mA/cm^2
V	Le voltage	v
η	Le rendement	%
λ	la longueur d'onde de la lumière	μm
J_{cc}	La densité de courant de court circuit	mA/cm^2
V_{co}	La tension de circuit ouvert	v
FF	Le facteur de forme	%
h	Constante de Planck ($6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$)	J.s
α	Coefficient d'absorption	cm^{-1}
E_g	L'énergie de bande interdite	eV
AM 1.5	Spectre de la lumière solaire	-
θ	angle du soleil	-
R_s	résistance série	Ω
R_{sh}	résistance shunt	Ω
T	la température de la cellule	K
q	la charge de l'électron $e = 1.610 \times 10^{-19}$	C
K	la constante de Boltzmann $K = 1.3854 \times 10^{-23}$	J.K^{-1}
J_{ph}	Courant photo— généré	A
J_{obsc}	Courant à l'obscurité	A
J_s	Courant de saturation de la jonction	A
I_m	courant maximal	A
V_m	tension maximale	V
λ_g	le gap du semi-conducteur	m
λ_{min}	le gap du semi-conducteur minimale	m
$\Phi(\lambda)$	Le flux de photons, à la longueur d'onde λ	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

$R(\lambda)$	Le coefficient de réflexion à la longueur d'onde λ	-
P	la puissance	W
P_M	la puissance maximal	W
$P_{id\acute{e}ale}$	la puissance idéale	W
P_{inc}	la puissance du rayonnement solaire incident	W
CeTd	Tellure de Cadmium	-
CIS	Cuivre Indium Sélénium	-
GsAa	d'Arséniure de Gallium	-
InGap	Indium Phosphore de Gallium	-
SILVACO	Silicon Valley Corporation	-
TCAD	Technology Computer Aided Design	-
VWF	Virtual Wafer Fab	-
Al	Aluminium	-
<i>E_g</i>	Bande interdite	eV
<i>χ</i>	Affinité électronique	eV
<i>NC</i>	Densité d'états des électrons	cm ⁻¹
<i>NV</i>	Densité d'états des trous	cm ⁻³
<i>τ_{N0} et τ_{P0}</i>	Durée de vie des électrons et des trous	ns
<i>Sn</i> et <i>Sp</i>	Vitesse de recombinaison en surface	cm/s

Introduction générale

Introduction générale

Depuis le début du xx^e siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part. Actuellement, la production de l'énergie domestique et dans l'industrie est basée, en grande partie, sur une ressource limitée: le pétrole. Les sources du pétrole deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation. Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important.

La cellule solaire est un composant électronique qui peut convertir la lumière du soleil en électricité, cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, qui ont comme propriété de libérer leurs porteurs de charge (électrons et trous) sous l'influence d'une excitation extérieure. Actuellement l'objectif de multiples recherches est de réaliser la meilleure cellule avec un haut rendement énergétique et un prix de revient bas. Pour diminuer à la fois le poids et le prix de ces dispositifs tout en augmentant leurs surfaces et leurs souplesses, des cellules en couches minces ont été réalisées.

L'efficacité des cellules solaires s'est améliorée au fil du temps en exploitant de nouveaux matériaux tels que le Phosphore d'Indium Gallium (InGaP) et l'arséniure de gallium (GaAs) qui ont subi des recherches approfondies en tant que matériau photovoltaïque. De plus, plusieurs effets peuvent affecter le rendement des cellules solaires telles que la concentration du dopage des matériaux, la température, épaisseurs des couches...etc. Dans ce contexte, le but de ce travail est d'étudier une cellule solaire à base des matériaux III-V dont en examinant l'effet de l'épaisseur de la

couche absorbante sur le rendement de conversion de la cellule. Pour cela, notre manuscrit comporte trois chapitres organisés comme suit;

Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales sur les cellules en basant sur les matériaux III-V et leurs propriétés. Leurs principes de fonctionnement, les différentes technologies utilisées par l'industrie photovoltaïque sont donnés. Enfin, nous citons les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Le deuxième chapitre présente une description du logiciel Silvaco-Atlas et les principaux concepts et grandeurs liés à l'étude des cellules solaires et leurs caractéristiques.

Dans le troisième chapitre, nous exploitons le simulateur Atlas du logiciel SILVACO-TCAD pour la simulation et l'étude d'une cellule solaire InGaP/GaAs. Puis, nous étudions l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres électrique de la cellule proposée.

Chapitre I :
Généralités sur les cellules
solaires

I.1.Introduction :

Ce chapitre est considéré comme une base des notions fondamentales de cellules solaires photovoltaïques. Après une bref historique et définition des cellules solaires, nous décrirons le rayonnement solaire, la jonction PN et le principe de fonctionnement de ces cellules. Le modèle mathématique et électrique d'une cellule solaire est donné par la suite ainsi que ses différentes caractéristiques photovoltaïques. On termine par une brève description des différentes filières technologiques existantes ainsi que les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque .

I.2. Historique :

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés" .

C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles

représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. [1]

I.3. Définition :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif. [2]

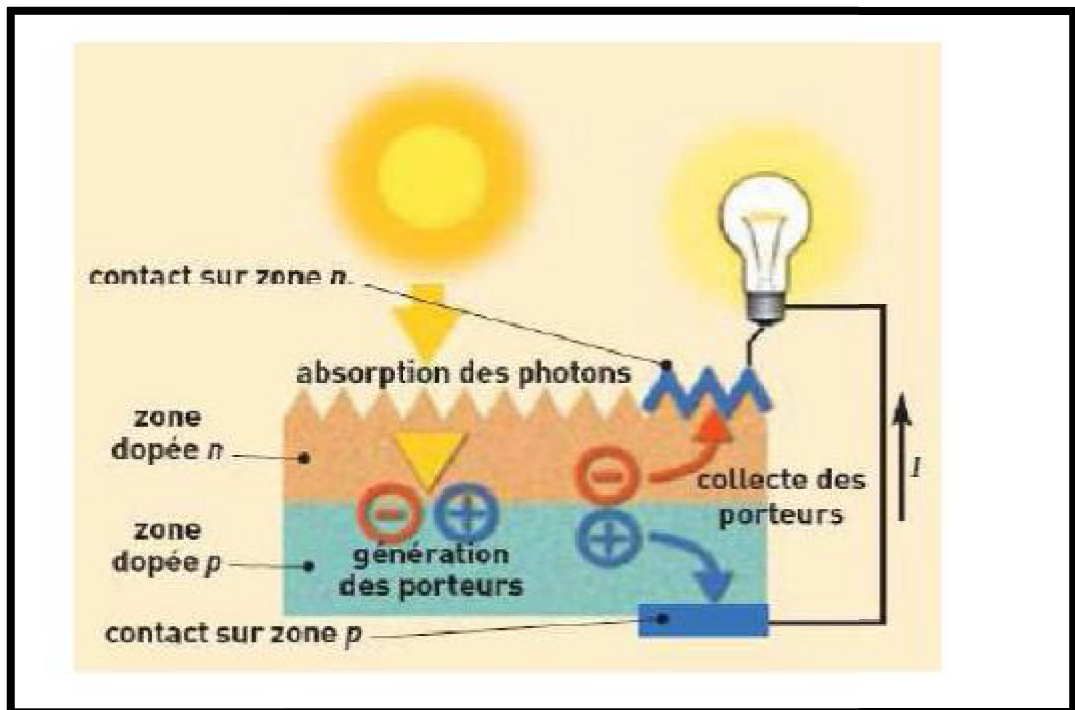


Figure I.1:Schéma de fonctionnement d'une cellule solaire .[4]

I.4. Rayonnement solaire :

I.4.1 . L'air mass (AM) :

La notion d'air mass "masse d'air" a été entrée, afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde. Elle varie en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith.

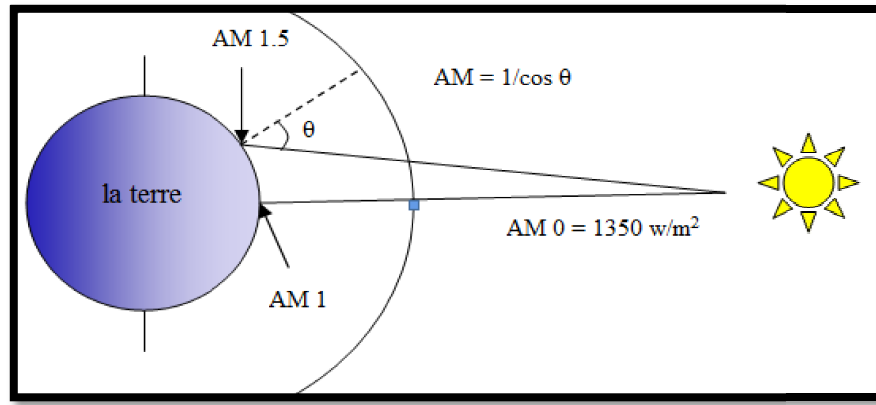


Figure I.2: Définition de l'Air Mass. [4]

L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1367 W/m^2 (AM0) hors atmosphère terrestre. Le rayonnement solaire global reçu au niveau du sol pour $\theta = 48^\circ$ (AM1.5) atteint 1000 W/m^2 , avec un petit arrondissement. [5]

I.4.2. Spectre solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.2 à 4 microns. La Figure (I.3) représente la variation de l'irradiance en fonction de la longueur d'onde.

Le spectre solaire hors atmosphère est comparable à celui d'un corps noir à une température d'environ 5800 K. À la surface de la Terre, le spectre solaire n'est plus le même, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O_3 , CO_2 , H_2O , ...). [6]

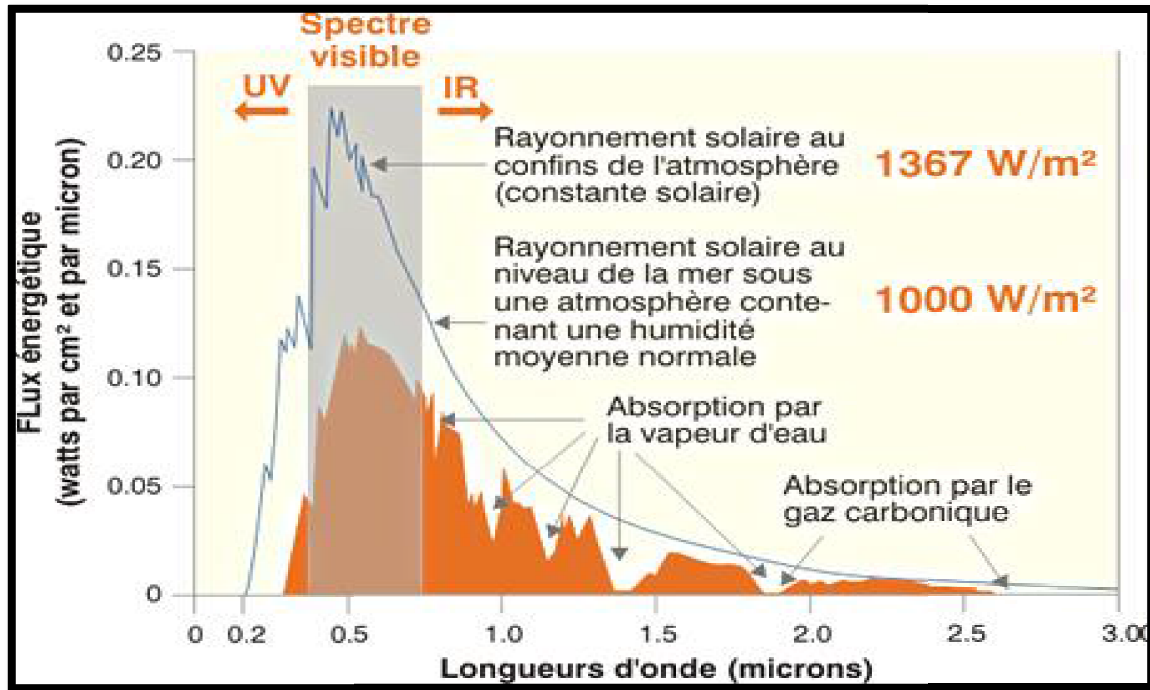


Figure I.3: spectre du rayonnement solaire . [7]

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. [6]

I.5. Les matériaux semi-conducteurs :

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique. [3]

I.5.1. Semi-conducteurs intrinsèques :

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal. [8]

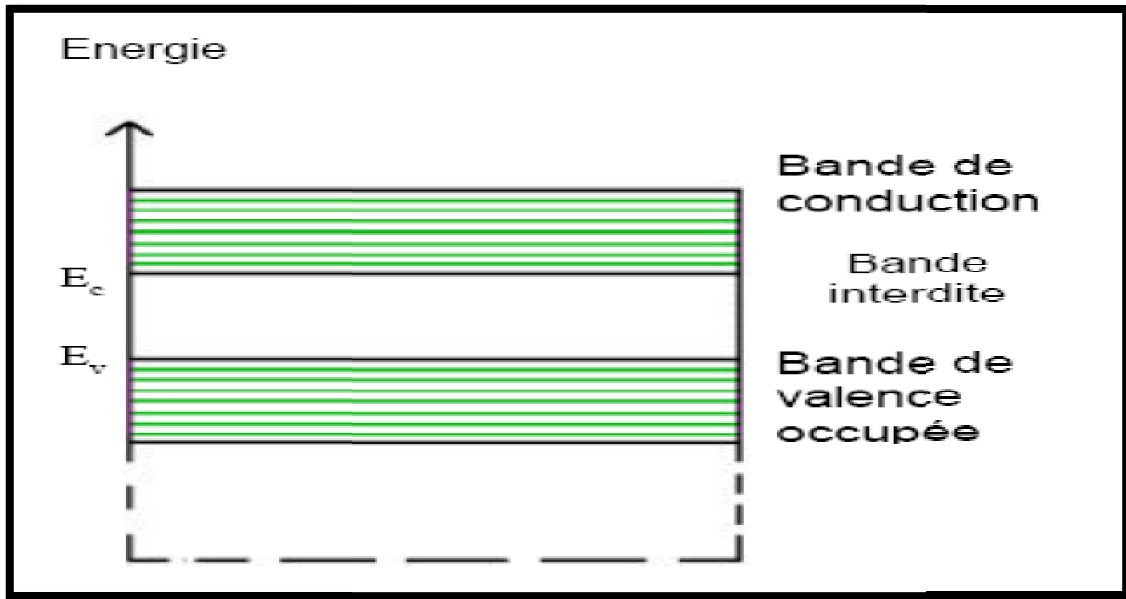


Figure I.4:diagramme de bande . [8]

I.5.2.Semi-conducteurs extrinsèques :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage. [8]

I.6. Dopage :

Le dopage consiste à l'introduction d'impuretés dans un matériau (ici le silicium).

Les impuretés introduites dans le silicium sont de deux types :

I.6.1.électronégatif : des atomes de *phosphore* dont la couche externe comportent 5 électrons. L'insertion de tels atomes dans le réseau cristallin va libérer un électron qui devient disponible pour le transport du courant. Le silicium devient donc semi-conducteur de type N.

I.6.2.électropositif : soit des atomes de *bore* dont la couche externe comportent 3 électrons. L'insertion de tels atomes dans le réseau cristallin va créer un trou positif d'électron) dans la structure cristalline. Le silicium devient donc un semi-conducteur de type P.[9]

I.7. Bandes d'énergies :

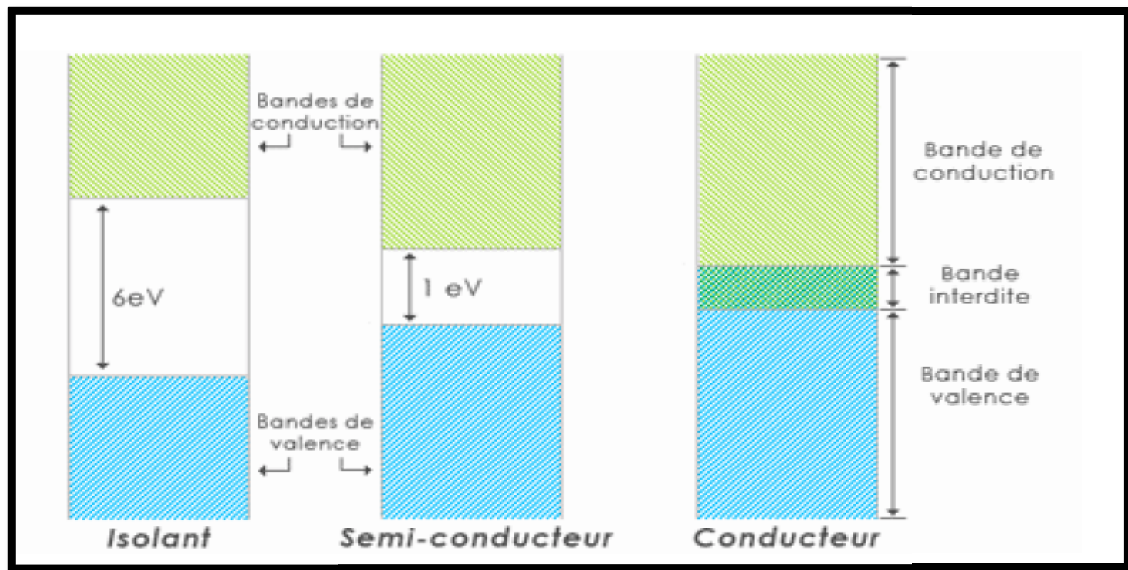


Figure I.5 : la bande d'énergie de la cellule solaire. [10]

Il existe deux bandes d'énergies dans les semi-conducteurs au niveau de la couche externe:

- la bande de conduction, dans laquelle se trouvent les électrons excités qui peuvent se déplacer dans le silicium.
- la bande de valence, qui contient les électrons impliqués dans les liaisons covalentes.

Ces deux bandes sont séparées par une bande interdite (ou *gap*) qui est normalement infranchissable par les électrons. Ils peuvent la traverser grâce à une excitation provenant de l'extérieur (ici, l'absorption de photons). On choisit d'utiliser les semi-conducteurs car ceux-ci ont une petite bande interdite (1 eV , soit 6 fois plus petite qu'un isolant).[9]

I.8. La jonction P-N:

Lorsque les deux zones sont mises en contact, certains électrons de semi-conducteur de type N passent vers le matériau de type P tandis que les trous du semi-conducteur de type P se déplacent au même moment dans la direction opposée. Le mouvement de ces charges majoritaires forme des paires électron-trou neutres, nous obtenons alors une région appelée jonction PN dans laquelle la conductibilité passe progressivement du type P au type N. [11]

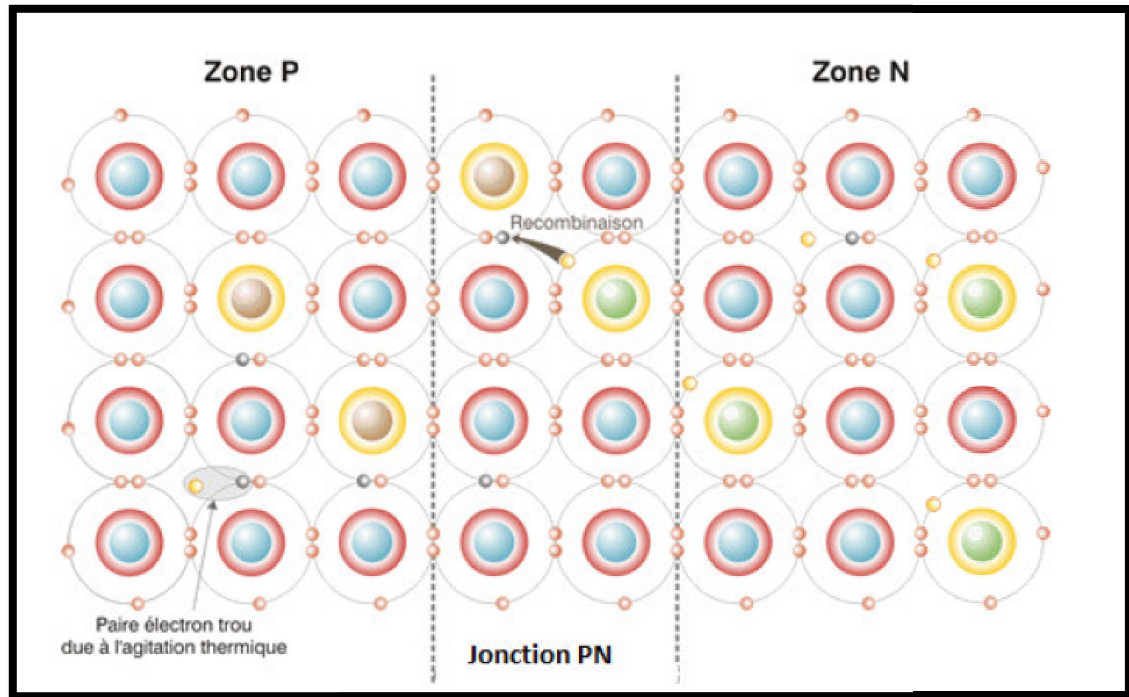


Figure I.6 : Jonction PN à l'équilibre. [11]

I.9.Principe de fonctionnement :

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{co}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}). [12]

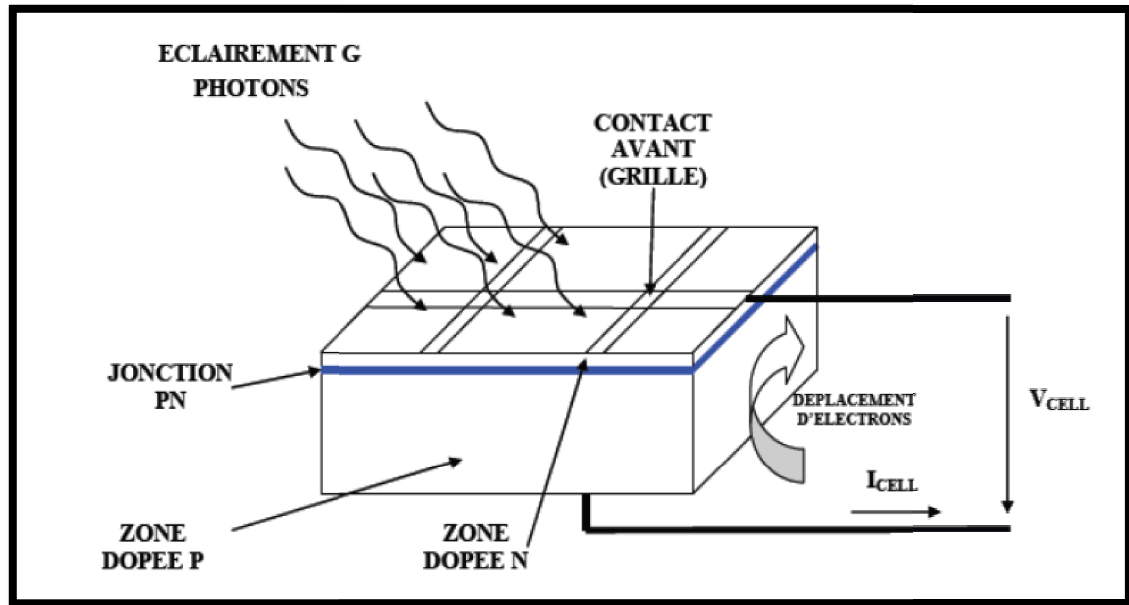


Figure I.7 : structure d'une cellule photovoltaïque au silicium. [12]

I.10.Caractéristiques d'une cellule solaire :

I.10.1.Circuit électrique équivalent :

La figure (I.8) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Elle constitue d'un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce modèle. Ces résistances influencent la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule.

La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles; La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [13]

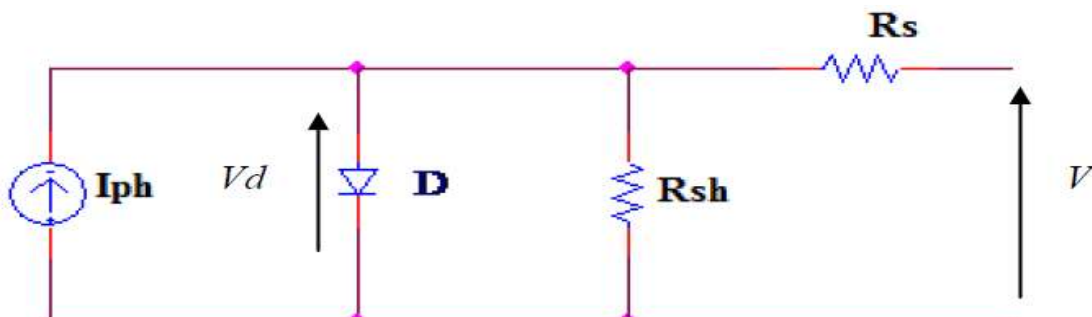


Figure I.8 : Schéma équivalent électrique de la cellule solaire . [13]

En appliquant la loi des nœuds, on trouve :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left[\frac{e(V + IR_s)}{\alpha K T} \right] - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I.1)$$

Où

α : Facteur d'idéalité de la diode et La valeur typique de α est 1.3.

T : est la température de la cellule en K .

e : est la charge de l'électron $e = 1.61010^{-19}$ C .

K : est la constante de Boltzmann $K = 1.3854 \cdot 10^{-23}$ J.K-1.

I.10 .2.Caractéristique courant-tension $J(V)$ d'une cellule solaire :

Le courant délivré sur une charge (caractérisée d'une résistance de charge R_c) par une cellule photovoltaïque éclairée, s'écrit :

$$J(V) = J_{ph} - J_{obsc}(V) \quad (I.2)$$

Avec J_{ph} : Courant photo – généré et J_{obsc} : Courant à l'obscurité

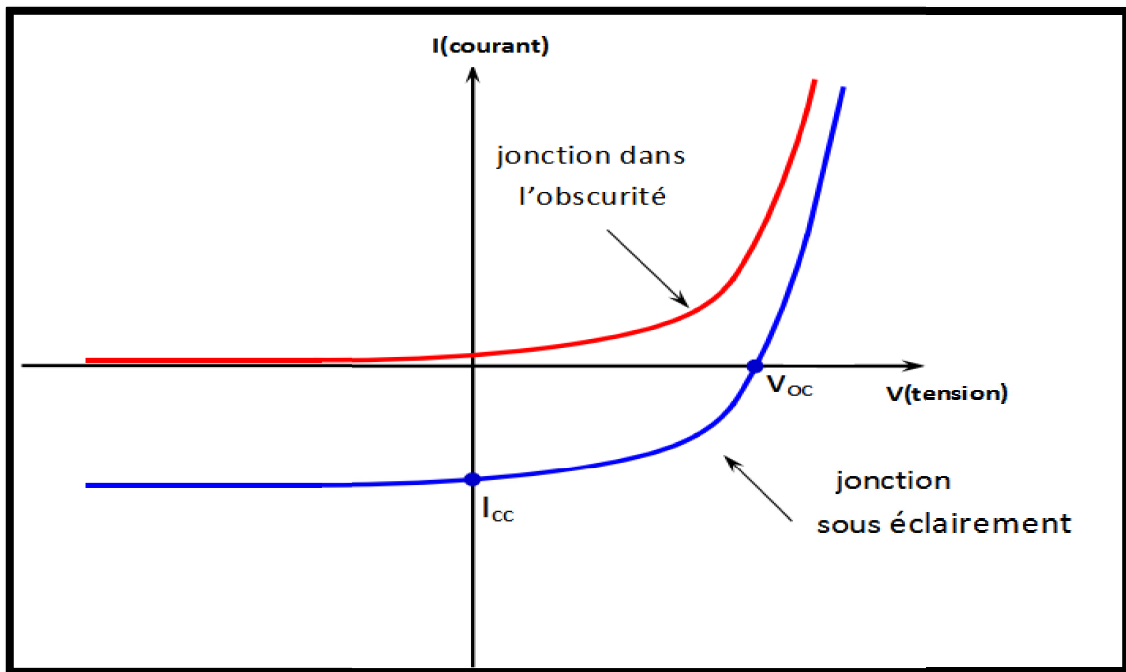


Figure I.9: Caractéristiques $I(V)$ à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque. [13]

Pour une cellule photovoltaïque idéale, tout en considérant que la caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode, l'équation précédente est reprise sous la forme suivante :

$$J(V) = J_{ph} - J_s \left[\exp \left(\frac{qV}{KT} \right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

Avec :

V : Tension aux bornes de la jonction,

J_s : Courant de saturation de la jonction,

$q = 1.602 \times 10^{-19} C$; Charge élémentaire d'un électron,

$K = 8.62 \times 10^{-5} eV.K^{-1}$; Constante de Boltzmann,

T : Température en degrés Kelvin.

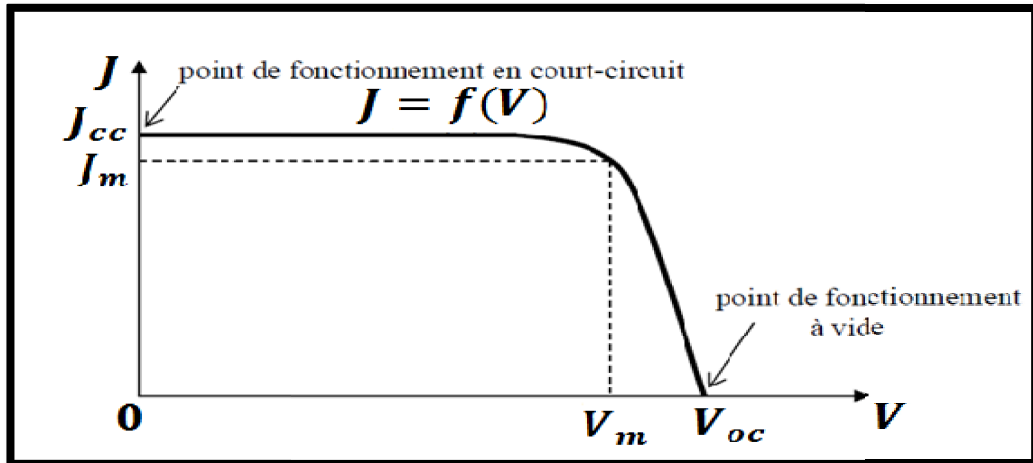


Figure I.10: Caractéristique $J(V)$ d'une cellule solaire. [13]

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et le courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. [14]

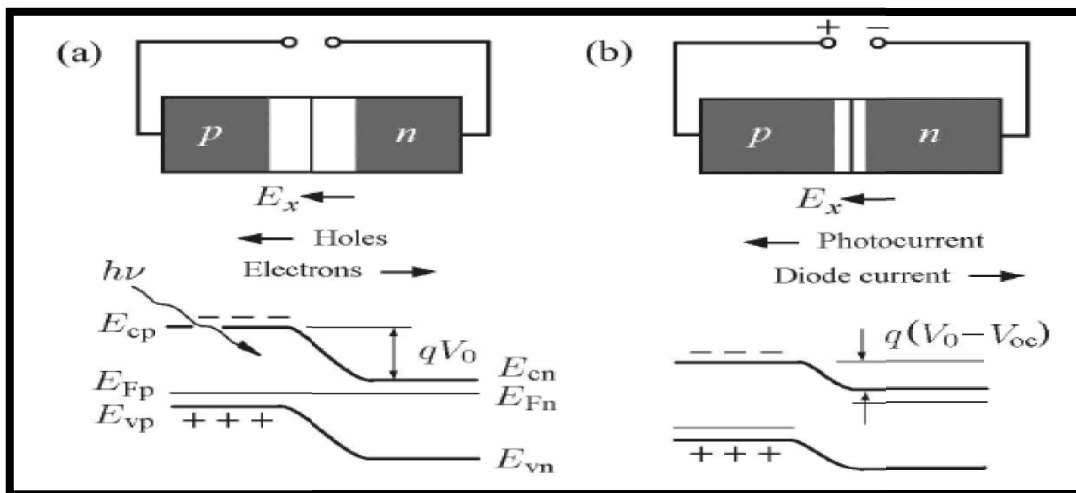


Figure I.11 : Diagramme des bandes et direction des courants dans une jonction P sous éclairement : [14]

a) Non polarisée,

b) Polarisation directe.

I.11. Paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire :

I.11.1. Courant de court-circuit :

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre (à $V=0$), les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit J_{cc} qui correspond au photo-courant généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photo-courant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface du front de la cellule. Il est donné par [14] :

$$J_{ph}(\lambda) = q \cdot \Phi(\lambda) [1 - R(\lambda)] \cdot R_s \quad (I.4)$$

$$J_{cc} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_g} J_{ph}(\lambda) d\lambda \quad (I.5)$$

Avec :

λ_g : où hc/E_g est le gap du semi-conducteur,

$\Phi(\lambda)$: Le flux de photons, à la longueur d'onde λ , reçu par la photopile,

$R(\lambda)$: Le coefficient de réflexion à la longueur d'onde λ ,

R_s : La réponse spectral

I.11.2. Point de la puissance maximale :

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal.

En effet, suivant la formule : $P = J \times V$, pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit $J \times V$ soit maximal : c'est le point de charge idéale de la photopile ou bien point de puissance maximale P_M .

La puissance maximale est également fonction de l'éclairement STC (Standard Test Conditions) (1000W/m², 25°C, spectre solaire AM1.5), on parle alors de watts-crête (Wc) ou de puissance-crête.

I.11.3. Tension de circuit ouvert :

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une auto polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto polarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photo-courant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert V_{co} . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo-courant (courant nul), elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \left(\frac{KT}{q} \right) \ln \left[\left(\frac{I_{cc}}{J_s} \right) + 1 \right] \quad (I.6)$$

I.11.4. Facteur de forme :

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée ($P_M = V_M \times I_M$) et la puissance idéale ($V_{co} \times I_{cc}$), on le note par:

$$FF = \frac{P_{maximale}}{P_{idéale}} = \left(\frac{I_M \cdot V_M}{I_{cc} \cdot V_{co}} \right) \quad (I.7)$$

I.11.5. Rendement de conversion d'énergie :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident . (100mW/cm² dans STC AM1.5). On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_{inc} :

$$\eta = \frac{P_{maximale}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{inc}} \quad (I.8)$$

I.12. Technologies des cellules solaires :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi conducteurs.[15]

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes :

- ✓ la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13à 18 %.

Leur durée de vie est habituellement de plus de 25à 30ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12à 15 %.

- ✓ La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de 6à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20ans.
- ✓ la troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium(CdTe),Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs) ,cette technologies des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant :

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'application
	Théorique	en labo.	Disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de Gallium GaAs	29	27.5	18-20	systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellure de Cadmium	28.5	16	9-11	modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

Tableau I.1 . Rendement énergétique des différents types de cellules solaire . [15]

I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.13.1. Avantages :

Une haute fiabilité , les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs .

- ✓ Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt .
- ✓ Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car Le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet.

I.13.2. Inconvénients :

- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé .
- ✓ L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions .
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %) .
- ✓ Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ✓ Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) .

est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.[3]

I.14.Conclusion :

Ce chapitre servira d'un point de départ afin de se familiariser sur le domaine photovoltaïque. Où il est nécessaire de connaître la définition d'une cellule solaire PV et l'historique des cellules solaires PVs. Sans rayonnement solaire la cellule ne sert à rien, c'est pourquoi, le rayonnement solaire est un paramètre aussi important de le savoir. La compréhension du principe de fonctionnement de la cellule PV est aussi très intéressante à le détaillé. Puis, les différentes technologies utilisées par l'industrie PV ont été également présentées. Enfin, nous avons cité les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque .

Chapitre II :

Description logiciel silvaco

II.1.Introduction :

L'utilisation des cellules solaires comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser. Cependant, les coûts élevés de l'expérimentation justifient l'utilisation de la simulation qui constitue une bonne perspective . Dans ce chapitre, nous présentons les diverses outils de simulation numérique qui décrivent le comportement des dispositifs semi-conducteurs. Les différentes commandes, modèles et méthodes du simulateur ATLAS sont ainsi présentés.

II.2. Logiciel de simulation « Silvaco-Atlas » :

La figure (II.1) montre l'environnement de fabrication virtuel des plaquettes du logiciel «SILVACO ». Il est constitué de '7' programmes parmi lesquelles on a utilisé le logiciel « Atlas » qui permet la simulation, en deux et trois dimensions, des dispositifs électroniques à semi-conducteurs.[16]

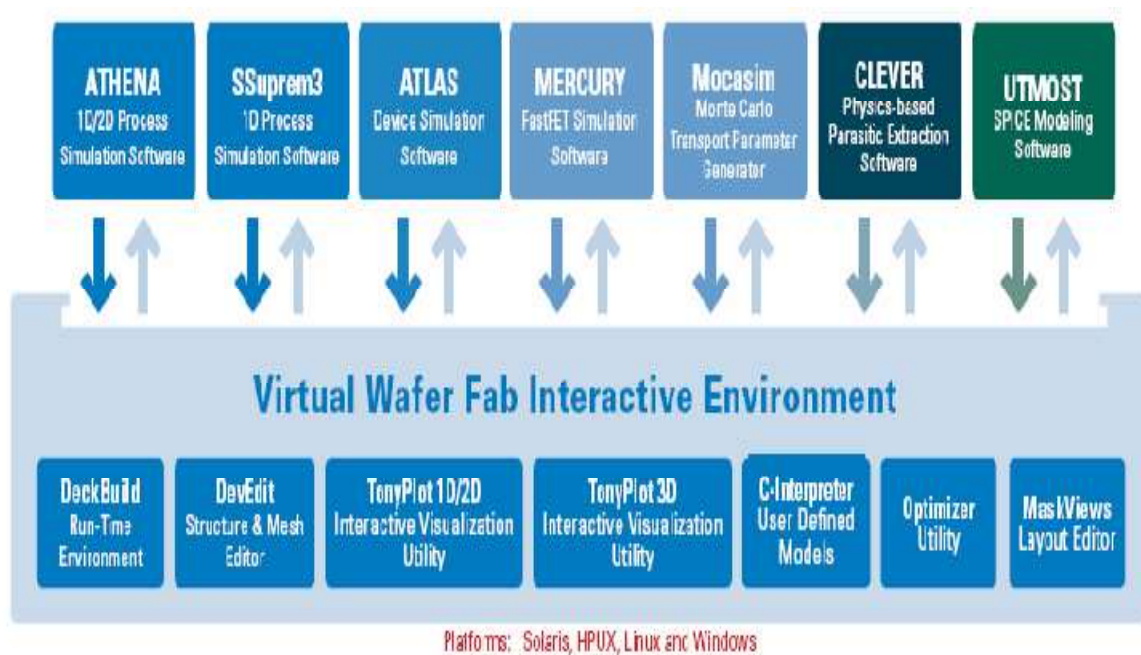


Figure II.1: Environnement virtuel de fabrication des plaquettes de Silvaco.[17]

II.3. Entrées et Sorties dans Silvaco Atlas :

La Figure (II.2) montre les entrées et les sorties du logiciel «Atlas » dont l'environnement d'exécution «DeckBuild» reçoit les fichiers d'entrée, dans lesquelles «Silvaco-Atlas » a été appelé à exécuter le code, et « TonyPlot » a été utilisé pour afficher et visualiser la sortie de la simulation.[16]

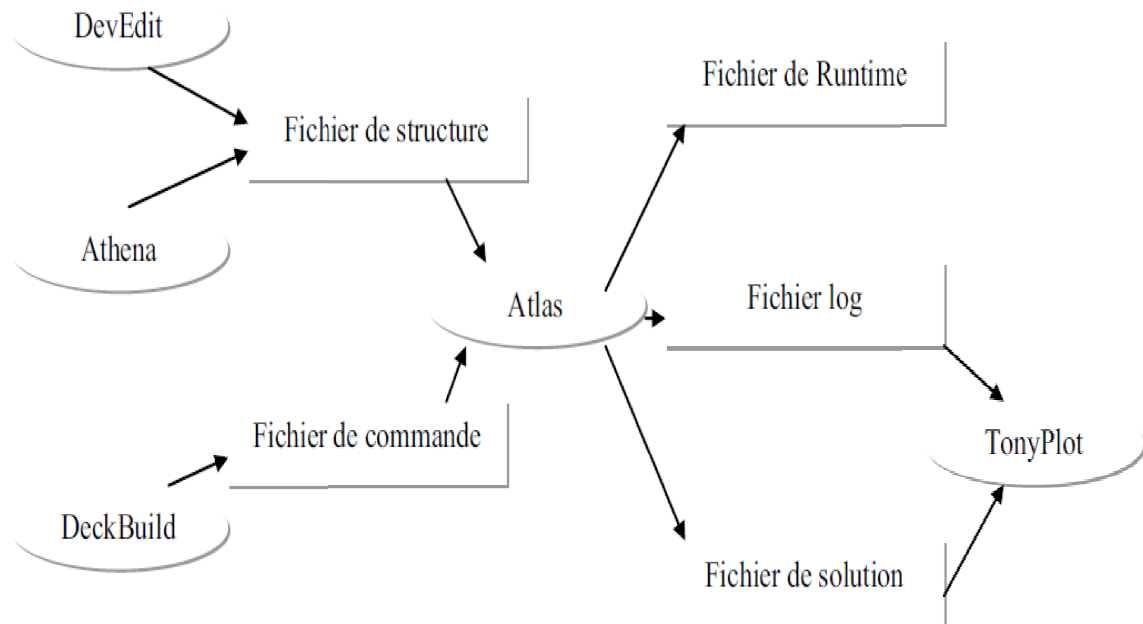


Figure II.2. Entrées et sorties d'Atlas . [18]

II.4. Présentation d'Atlas :

<< Atlas >> est un simulateur 2D et 3D des dispositifs bases sur la physique de semi-conducteurs. Il prédit le comportement électrique des structures semi-conductrices spécifiées et fournit des aperçus de mécanismes physiques internes associes au fonctionnement des dispositifs. Atlas peut être utilise 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.

Dans le schéma ci-dessus de la figure II.2 nous voyons les types d'informations qui circulent en entrée et en 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 que Atlas s'exécute (représente 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 simule (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 donne (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>> .[18]

II.4.1. DECKBUILD:

DeckBuild est un environnement d'exécution graphique interactive, pour le développement de procédé et les dispositifs de simulation des entrées de plate-formes. Il se compose d'une fenêtre pour la création de la plate-forme d'entrée et une fenêtre pour la sortie du simulateur et le contrôle et un ensemble de fenêtres pop-up pour chaque simulateur qui fournissent le langage complet et le support d'exécution (voir la figure II.3).

[19]

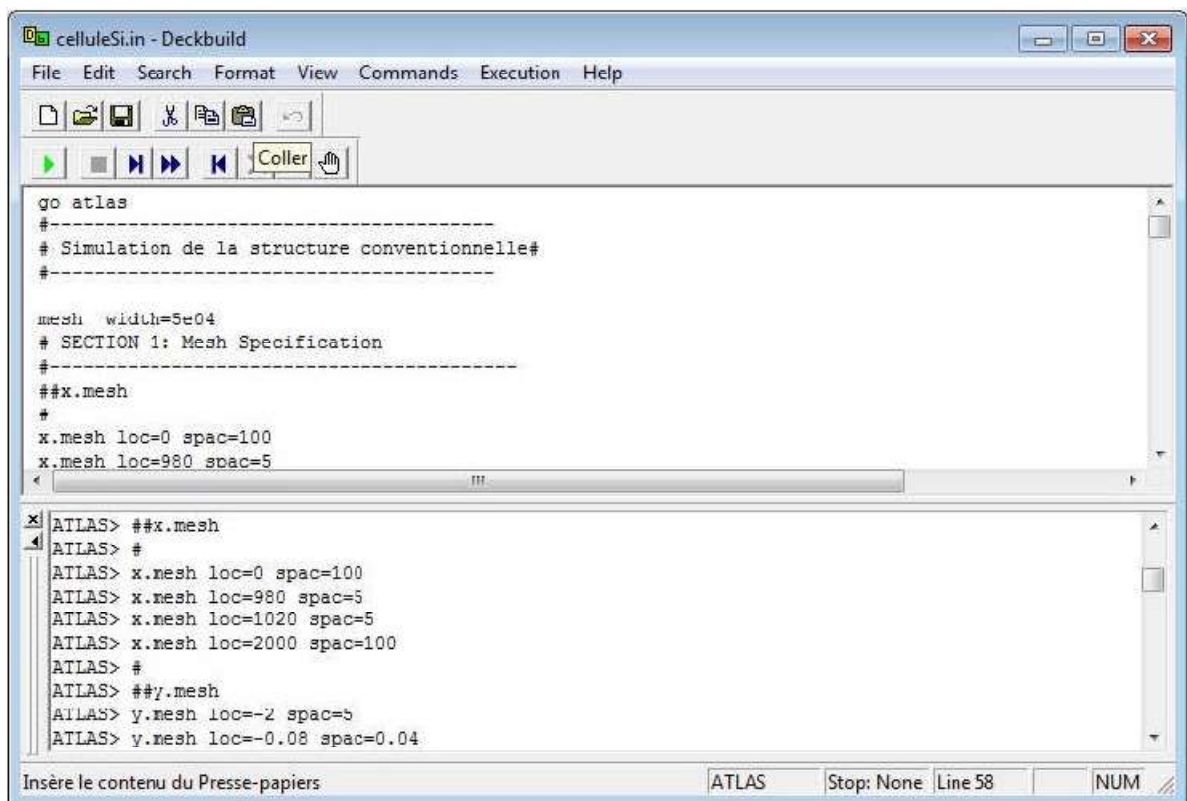


Figure II.3 : Menu de commandes de Deckbuild. [19]

II.4.2. TONYPLOT :

TonyPlot est un outil de traitement graphique utilisé avec tous les simulateurs SILVACO et fait partie intégrante des VWF, Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil du dopage, et caractéristiques électriques). TONYPLOT peut fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de VWF, comme DECKBUILD, VWF ou SPDB (voir le figure II.4). [19]

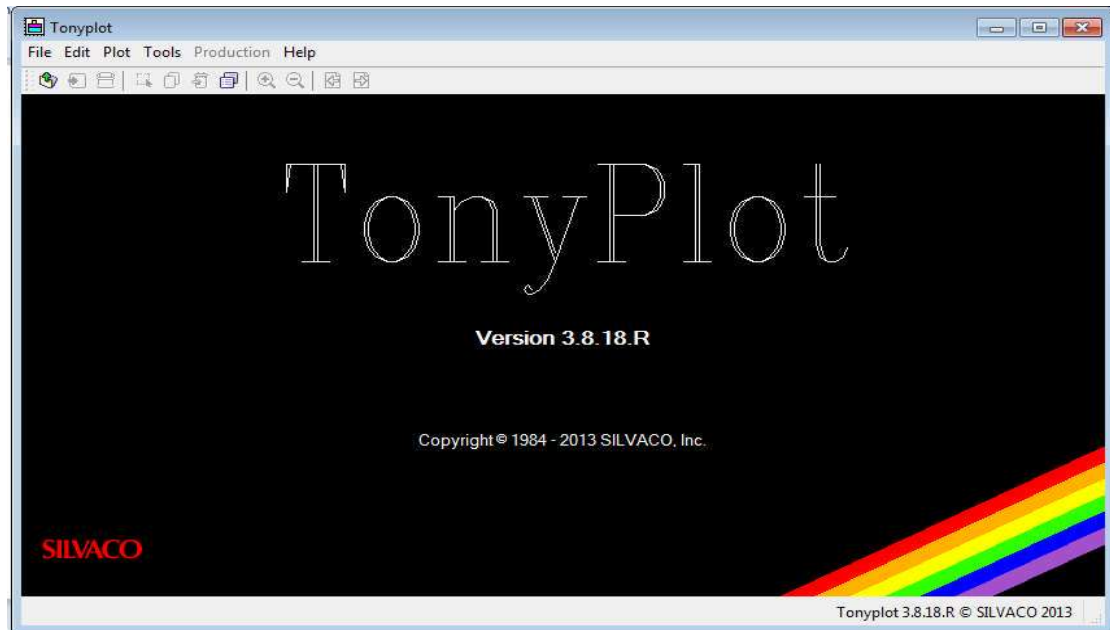


Figure II.4 : Fenêtre de Base de TonyPlot . [19]

II.5. Ordres de commandes d'Atlas :

Après la présentation de l'outil de simulation « d'Atlas » de SILVACO TCAD, sa composition interne et son fonctionnement 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 (**Tableau II.1**). 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 idoine, le simulateur ne les prend pas en compte .[16]

Group		Statements
1. Structure specification	_____	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material models specification	_____	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical method selection	_____	METHOD
4. Solution specification	_____	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results analysis	_____	EXTRACT TONYPLOT

Tableau II.1 : Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans chaque groupe.[20]

II.6. Spécification de la structure :

La spécification de la structure est effectuée en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage.[16]

II.6.1. Mesh :

La première étape dans la construction d'un dispositif après la déclaration go atlas, est de définir le maillage. Le maillage est une grille qui recouvre la zone physique dans lequel le dispositif est construit et simulé. Le maillage est simplement réalisé par une série de lignes horizontales et verticales définies par l'utilisateur avec un espacement entre eux [21].

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats [22].

Le format général pour définir le maillage est :

MESH X. LOCATION = <VALEUR> ESPACEMENT = <VALEUR>

MESH Y. LOCATION = <VALEUR> ESPACEMENT = <VALEUR>

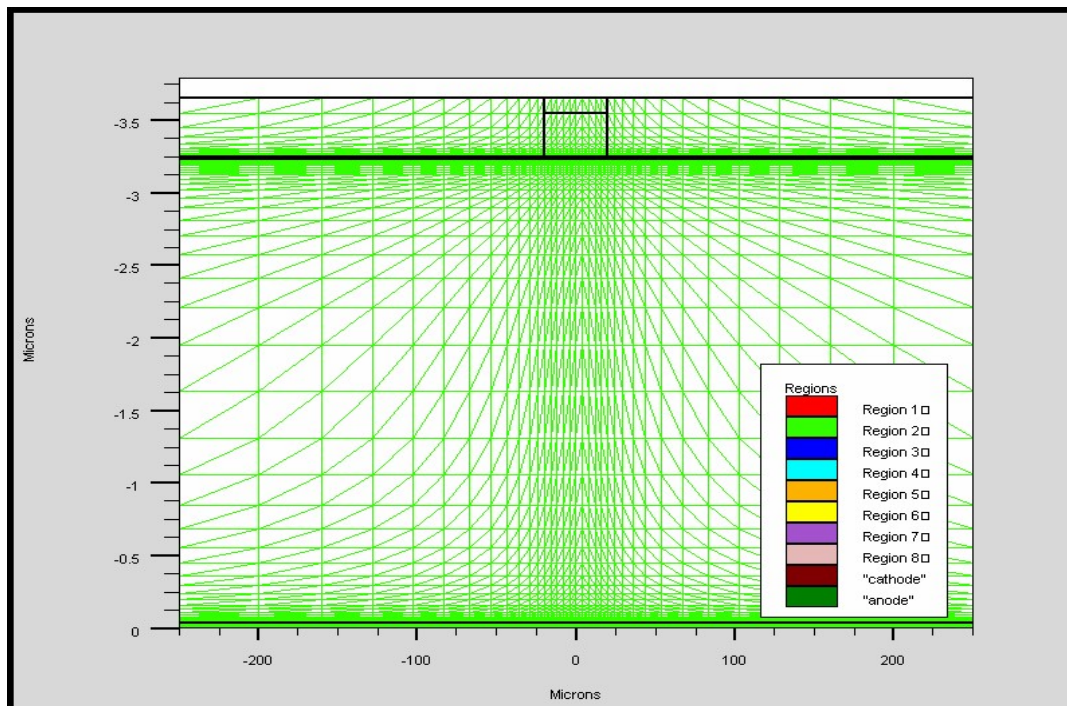


Figure II.5. Maillage générique pour une cellule GaAs.[23]

II.6.2 Régions :

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions dont le format de définition des régions est le suivant :

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

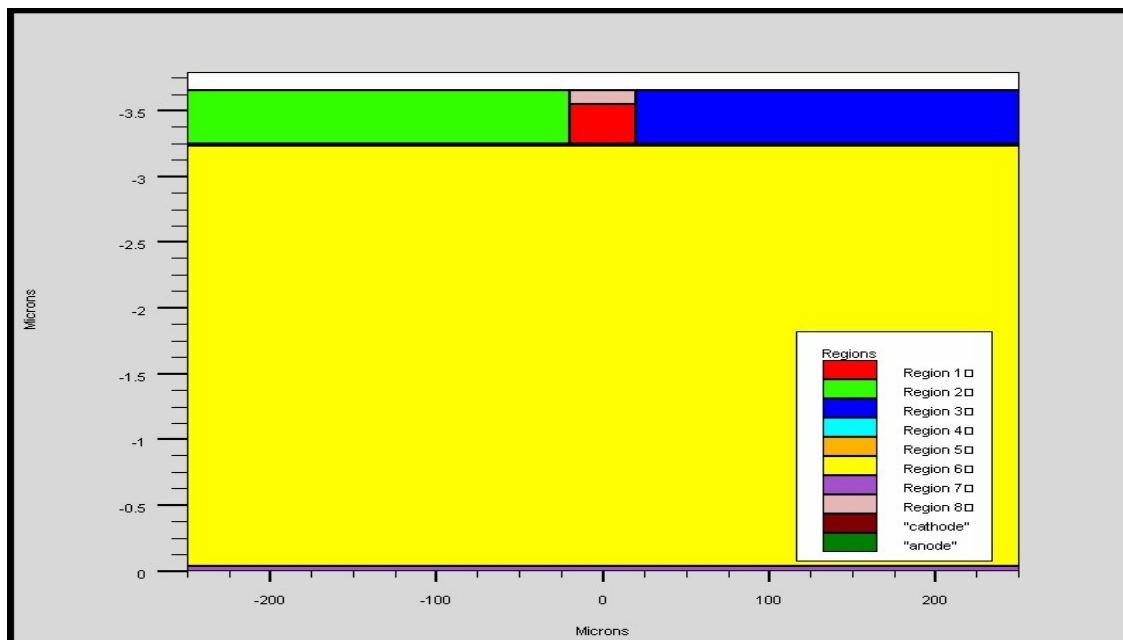


Figure II.6. Régions pour une cellule solaire GaAs . [23]

II.6.3 Electrode :

La prochaine spécification de la structure correspond aux électrodes (Figure II.7). Typiquement dans notre simulation, il n'ya que deux électrodes, l'anode et la cathode. Le nombre d'électrodes qu'on peut définir avec Silvaco Atlas peut aller jusqu'à **50**. Le format de définition d'électrodes est comme suit : [24]

ELECTRODE NAME=<electrodename><position parameters>

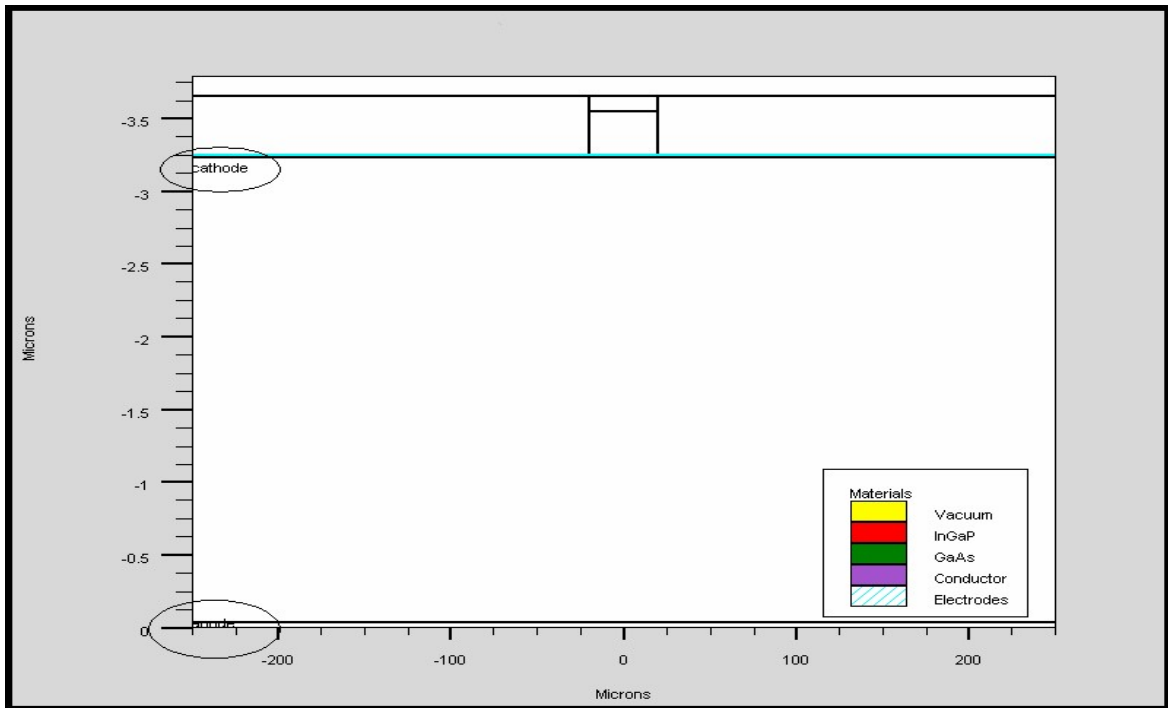


Figure II.7. Définition des électrodes avec Atlas.[23]

II.6.4. Doping :

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage. Le format de la déclaration de dopage dans « Atlas » se présente comme suit :

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

Le dopage peut être de type N ou P. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussienne.[18]

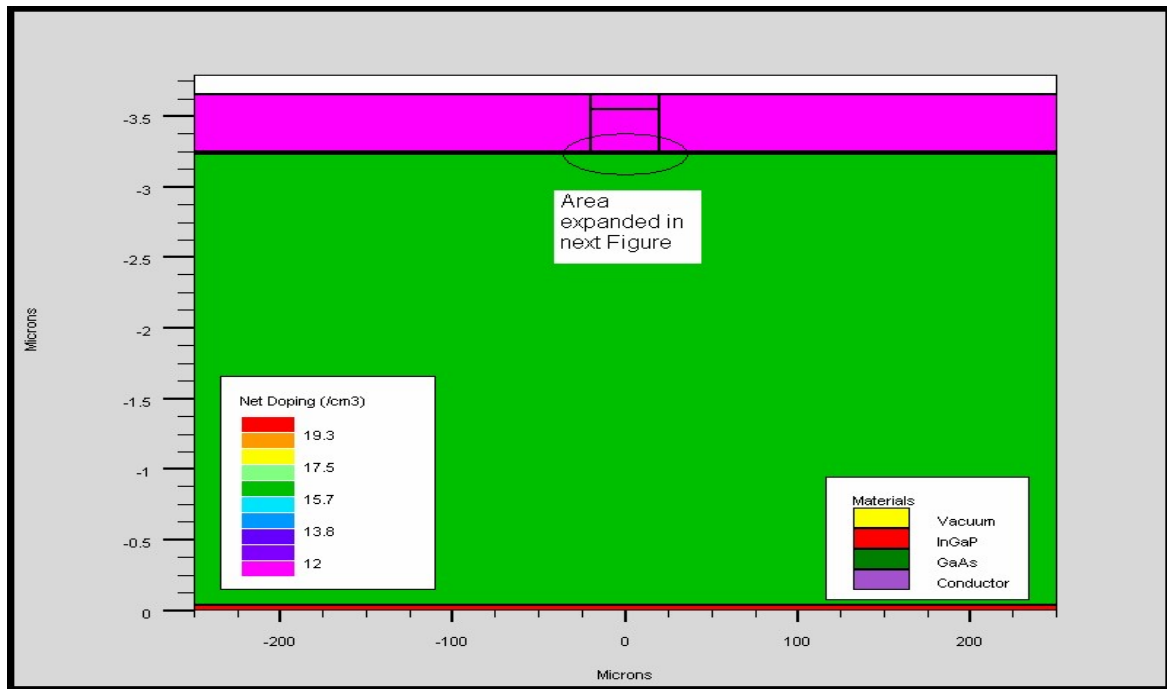


Figure II.8. Distribution uniforme typique d'une cellule solaire à simple jonction GaAs.[23]

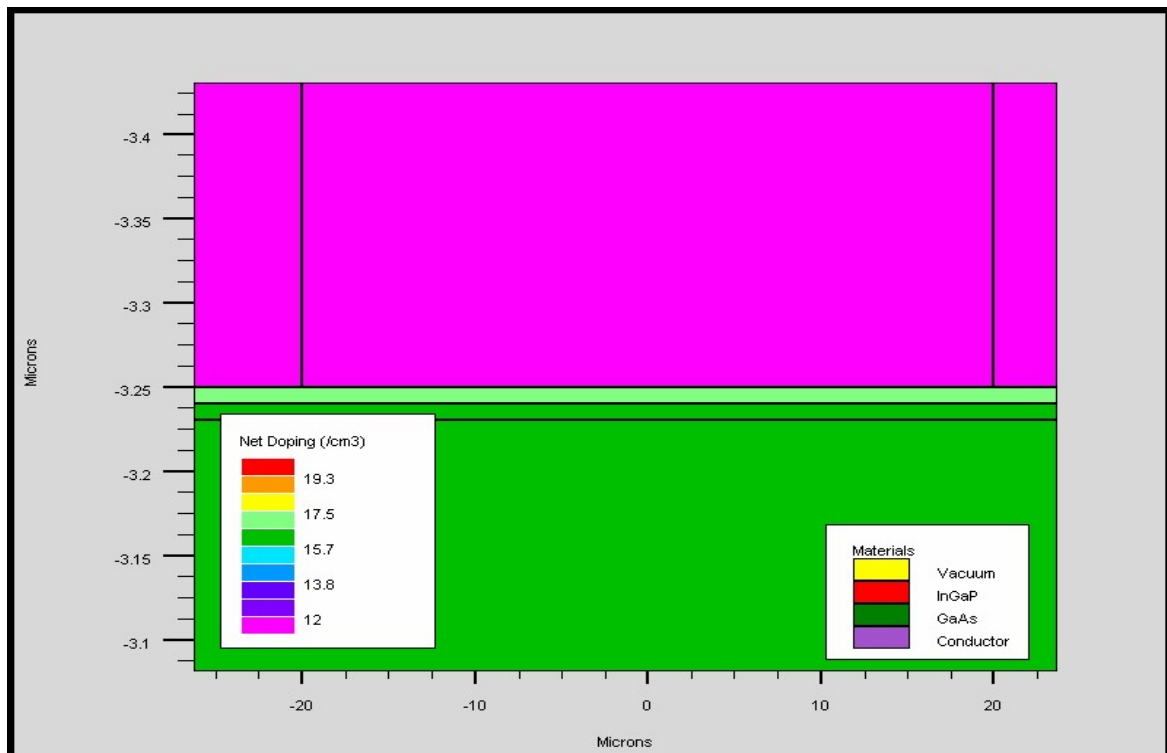


Figure II.9. Gros plan de la région de jonction de la Figure II.6 pour mettre en évidence les changements de dopage dans les matériaux .[23]

II.7. Spécification des matériaux et de modèles :

Après avoir défini la spécification de la structure, l'étape prochaine est la spécification des modèles des matériaux qui est divisé en : matériau, modèles, contact et interface.[24]

II.7.1 Matériel :

Une fois que la structure est complètement assemblée, les matériaux utilisés pour construire le dispositif doivent eux-mêmes être définis. La déclaration matérielle permet la spécification de certains paramètres de base. Ces valeurs peuvent s'appliquer à un matériau ou à une région .[21]

La capacité la plus importante que les déclarations matérielles permettent est la création des matériaux définis par l'utilisateur. L'utilisateur peut utiliser arbitrairement n'importe quel matériau lors de la définition d'une structure, puis modifier l'ensemble de ses propriétés pour correspondre à celle d'un matériau désiré. Bien que le matériel porte le nom du matériau choisi, il agira fonctionnellement comme n'importe quel matériau l'utilisateur le désire .[25]

Le format d'Atlas pour définir le matériau est le suivant :

MATERIAL <localization><material_définition>

II.7.2 Models:

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories: la mobilité, recombinaison, statistiques des transporteurs, l'ionisation d'impact, et de tunnels. La syntaxe de la commande Model est la suivante:[24]

MODELS <model flag><generalparameter><model dependentparameters>

II.7.3.Contact :

Indique les attributs physiques d'une électrode (résistivité, travail de sortie,...). La syntaxe de contact est comme suit :

CONTACT NUMBER=<n> |NAME=<ename>|ALL

II.7.4.Interface :

Indique les paramètres d'interface aux frontières des semi-conducteurs ou des isolants. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux noeuds de frontière exceptés la où ils sont déjà indiqués.[26]

II.8. Spécification Méthodes numériques de calcul :

Après la précision du modèle de matériaux, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types de techniques sont utilisée dans « Silvaco-Atlas »:

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton
- Méthode des block

Pour la méthode de GUMMEL, elle est utilisée pour la résolution des équations à une seule inconnue et des variables fixées constantes, la résolution se fait d'une manière itérative jusqu'à la solution est achevée. La deuxième méthode de NEWTON est la méthode la plus répandue dans le programme Atlas, elle est utilisée pour résoudre des systèmes d'équations à plusieurs inconnues. La troisième méthode est une combinaison des deux méthodes, elle est utile pour les systèmes d'équation mixtes.[16]

II.9. Spécification des solutions :

Après avoir sélectionné la méthode numérique il est nécessaire de déterminer les solutions. La spécification de solution est donnée par les déclarations : LOG, SOLVE, LOAD, et SAVE.[26]

II.9.1.LOG :

LOG enregistre toutes les caractéristiques du terminal dans un fichier. Toute donnée de type DC, transitoire, ou AC générée par la commande SOLVE après une commande LOG est enregistré.[24]

II.9.2.Solve :

La déclaration SOLVE fait suite à la déclaration LOG. SOLVE effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

II.9.3.Load :

Charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conjectures initiales à d'autres points de polarisation.

II.9.4.Save :

sauve toutes les informations d'un point noeud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.[26]

II.10. Analyse des résultats :

Une fois la solution a été trouvée pour un problème de dispositif à semi-conducteurs, les informations peuvent être affichées graphiquement.

II.10.1.EXTRACT :

les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.

II.10.2.TONYPLOT :

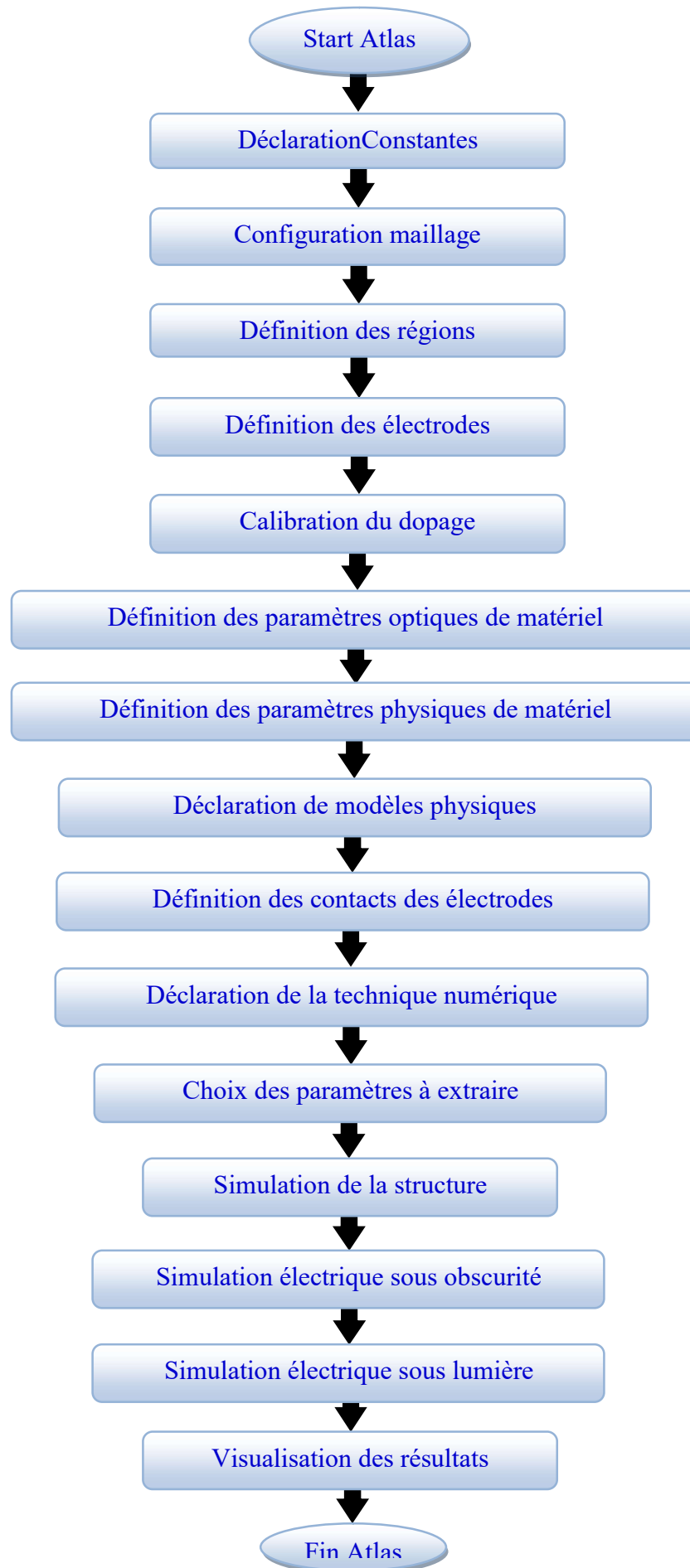
démarre le programme « TonyPlot » permettant une représentation graphique des données.

Une autre commande importante est BEAM, sa position est au niveau 4 des groupes de commande. BEAM indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière (mono ou multi-spectrale). Le faisceau ainsi déclaré est allumé et utilisé par la commande SOLVE, dans ce cas le module luminous est activé. Donc BEAM est utilisé pour simuler des courants sous lumière ou des réponses spectrales.[26]

II.11. Contour général de construction d'ATLAS :

L'organigramme suivant sur la Figure (II.10) peut clarifier les étapes pour construire chaque modèle.[19]

Figure II.10: Organigramme des étapes de construction d'un model sur ATLAS.



II.12.conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description relativement détaillée sur le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS. Nous avons défini sa structure, ses outils et ses capacités permettant de calculer tous les paramètres internes et externes liés à la cellule solaire .

Chapitre III :

*Etude de l'effet de l'épaisseur de la
couche absorbante*

III.1.Introduction :

Ces dernières années, en raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se sont orientés vers la simulation. Cette technique permet à l'expérimentateur de prédire le fonctionnement des dispositifs électroniques et d'étudier le comportement de ces dispositifs suivant leurs propriétés électriques, physiques, géométriques ...etc. Dans notre travail, on a entamé l'étude du fonctionnement d'une cellule solaire en InGaP/GaAs par un outil de simulation deux dimension: Atlas SILVACO. La simulation par le logiciel Atlas SILVACO permet de déterminer, à chaque variation des variables, les caractéristiques électriques des cellules solaires comme: la caractéristique densité de courant – tension (I-V) dans l'obscurité et sous éclairement, et par la suite les paramètres photovoltaïques liés à ces caractéristiques tels que la densité du courant de court circuit (J_{cc}), la tension en circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF), la puissance maximale (P_{max}) et le rendement de conversion photovoltaïque (η).

III.2.Simulation de la cellule solaire InGaP/GaAs :

III.2.1.Description de la cellule :

Notre structure se compose de quatre couches comme représenté par le figure III.1 une première couche de métal Gold d'épaisseur $0.05\mu m$ comme une électrodes, une deuxième couche de matériaux III-V qui est InGaP d'épaisseur $0.05\mu m$ de type N. La Troisième région de matériaux III-V qui est GaAs comme une couche absorbante de type P de valeur d'épaisseur de $3.5\mu m$. Ce matériau est le plus étudié du fait de la facilite relative de réalisation des couches épitaxiales. La concentration de dopage des deux dernières régions sont $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, respectivement. La dernière couche du métal Aluminium d'épaisseur $0.5\mu m$ comme une deuxième électrode.

0.05μm	Gold
0.05μm	n.type $In_{0.3}Ga_{0.7}P$
3.5μm	p. type GaAs
0.5μm	Al

Figure III.1. Structure de la cellule solaire InGaP / GaAs.

III.3. Paramètres de simulation :

L'InGaP/GaAs, matériaux utilisés dans notre travail sont définis à partir de leurs paramètres tirés de la simulation , leurs valeurs sont rassemblées dans le tableau III.1:

Paramètres	Matériaux	
	$In_{0.3}Ga_{0.7}P$	GaAs
Bande interdite $E_g(eV)$	1.61	1.42
Affinité électronique $\chi(eV)$	4.4	4.07
Densité d'états des électrons $N(cm^{-3})$	7.18×10^{17}	4.7×10^{17}
Densité d'états des trous $NV(cm^{-3})$	8.87×10^{18}	7×10^{18}
Durée de vie des électrons et des trous τ_{N0} et $\tau_{P0}(ns)$	$\tau_{N0} = \tau_{P0} = 4 \times 10^{-9}$	
Vitesse de recombinaison en surface S_n et $S_p(cm/s)$	$S_n = S_p = 1 \times 10^4$	

Tableau III.1. Paramètres de simulation de InGaP/GaAs.

III.4 Spécification de la structure cellule solaire InGaP/GaAs :

III.4.1. Maillage :

La déclaration de MESH doit être utilisée pour décrire une symétrie colonne. L'instruction dans notre cas pour créer un maillage qui contient une symétrie colonne est donnée par la figure III.2 ci-dessous. Il est à noter que dans notre cas on a défini un maillage auto. Ceci veut dire que l'espacement dans la direction y n'est pas défini comme le cas dans la direction x mais il est présenté dans les instructions des régions comme montré dans la section suivante.

```
x.m loc=0.0 s=2.5
x.m loc=10.0 s=2.5
```

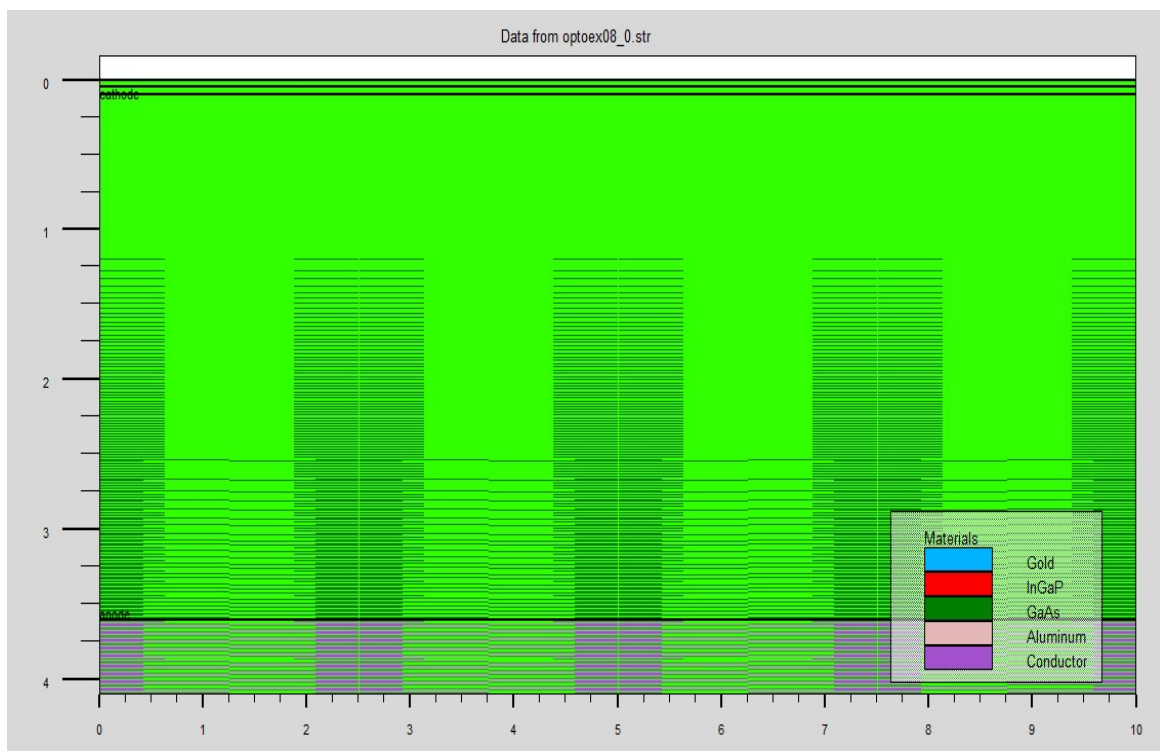


Figure III.2. Maillage de la cellule solaire proposée.

III.4.2. Régions :

Notre structure proposée se compose de quatre régions à savoir le Gold, InGaP, GaAs et Aluminium. Le matériau GaAs occupe toute la structure en raison de son importance dans la cellule. Ces régions sont présentées avec leurs épaisseurs par la figure III.3 ci-dessous.

```
region num=1 material=Gold conductor bottom thick=0.05 ny=20
region num=2 material=InGaP bottom thick=0.05 ny=20 x.comp=0.3
region num=3 material=GaAs bottom thick=3.5 ny=20
region num=4 material=Aluminum conductor bottom thick=0.5 ny=20
```

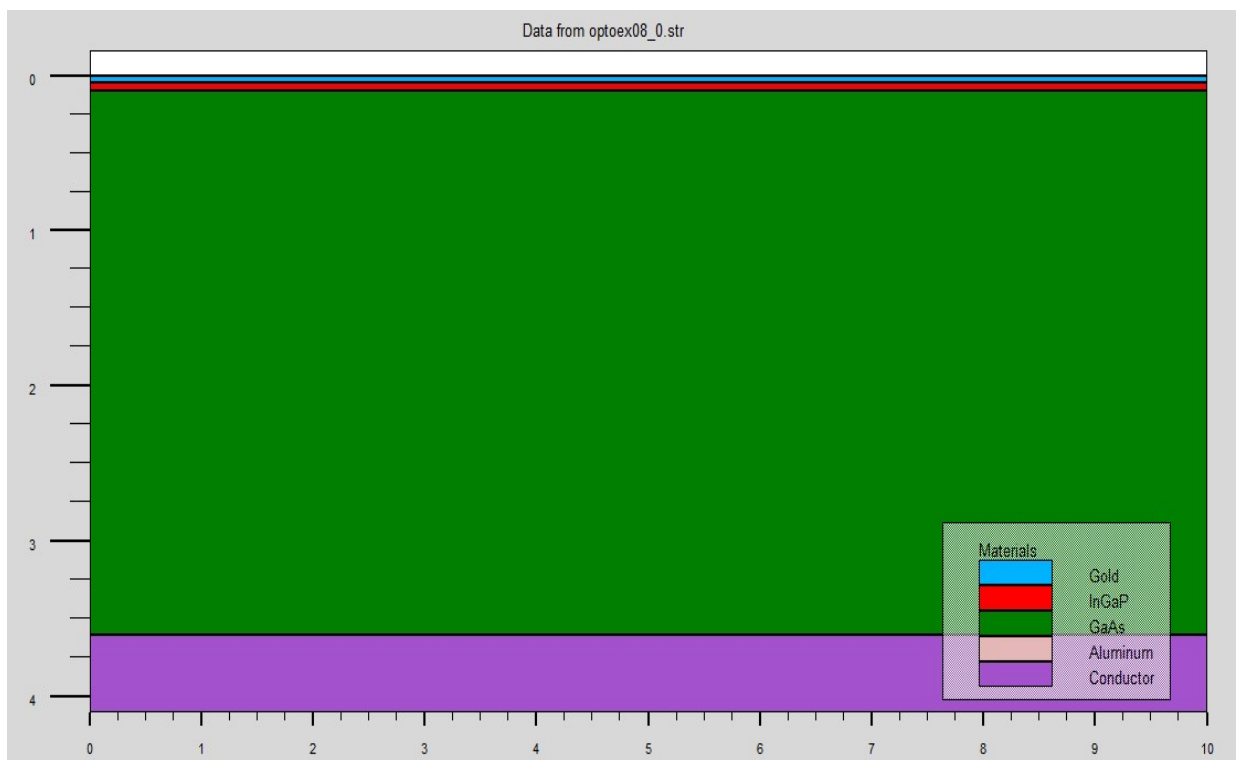


Figure III.3. Présentation des régions de la cellule solaire.

III.4.3 Electrodes :

La cellule solaire proposée montre une cathode en haut de la structure avec une épaisseur de $0.05\mu\text{m}$ et une anode en bas de la structure avec une épaisseur de $0.5\mu\text{m}$ et tout illustré par les instructions et la figure III-4.

```
elec num=1 name=cathode y.min=0 y.max=0.05 mat=Gold
elec num=2 name=anode y.min=3.6 y.max=4.1 mat=Aluminium
```

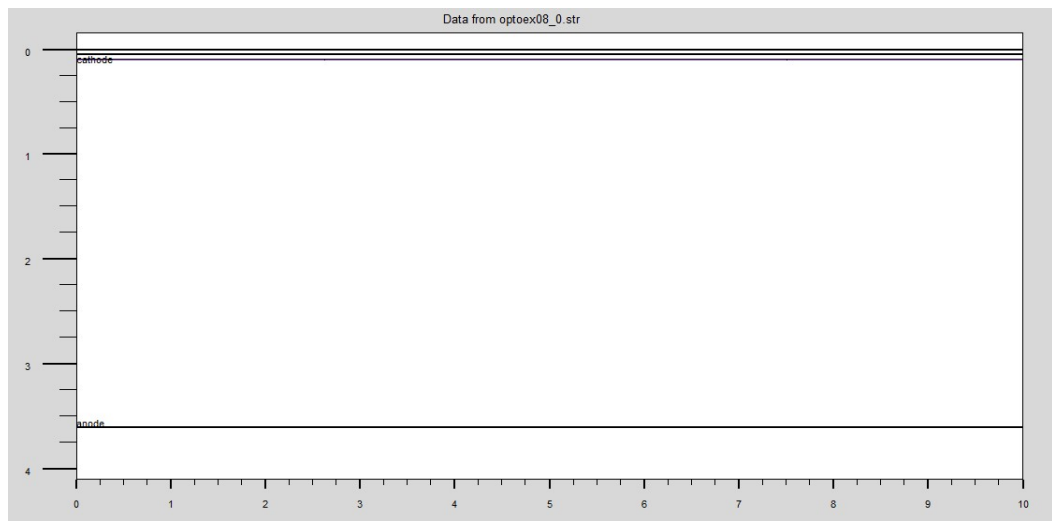


Figure III.4. Electrodes de la cellule solaire InGaP /GaAs .

III.4.4. Dopage :

La concentration de dopage des deux régions de la structure (figure III.5) montre un dopage pour la région 2 avec une distribution uniforme de type n et d'une concentration de ($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) et un dopage pour la région 3 avec une distribution uniforme de type p et d'une concentration de ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).

```
doping region=2 uniform n.type conc=2e18
doping region=3 uniform p.type conc=1e17
```

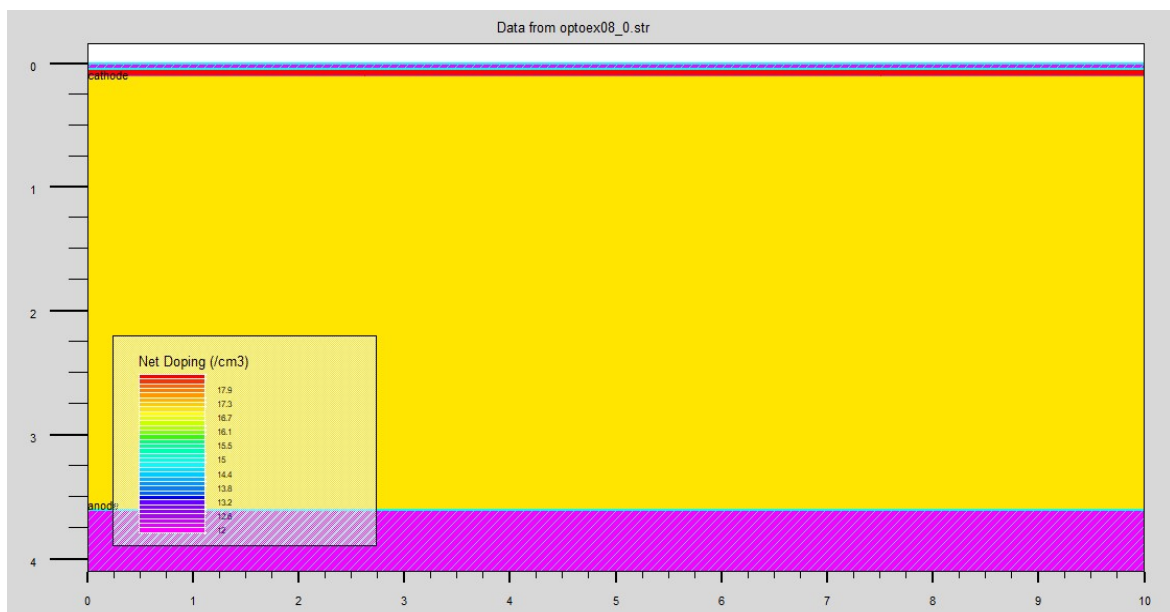


Figure III.5. Dopage des régions de la cellule solaire InGaP /GaAs

III.5.caractéristique (I.V) de la structure InGaP / GaAs :

Après l'implémentation des paramètres de simulations de la cellule proposée, différentes caractéristiques peuvent être extraits parmi lesquelles la caractéristique I-V et celle P-V. La figure III.6 illustre la caractéristique I-V de la cellule proposée avec courant de court circuit de $2.03\text{mA}/\text{cm}^2$, une tension de circuit ouvert de 0.939V , un facteur de forme de 84.77% et un rendement de conversion de 16.21% . La variation de la puissance en fonction de la tension est donnée par la figure III.7 où la puissance maximale est trouvée à $1.62\text{mW}/\text{cm}^2$.

Les performances de la cellule tirées d'après la caractéristique (I-V) sont récapitulées dans le tableau (III.2).

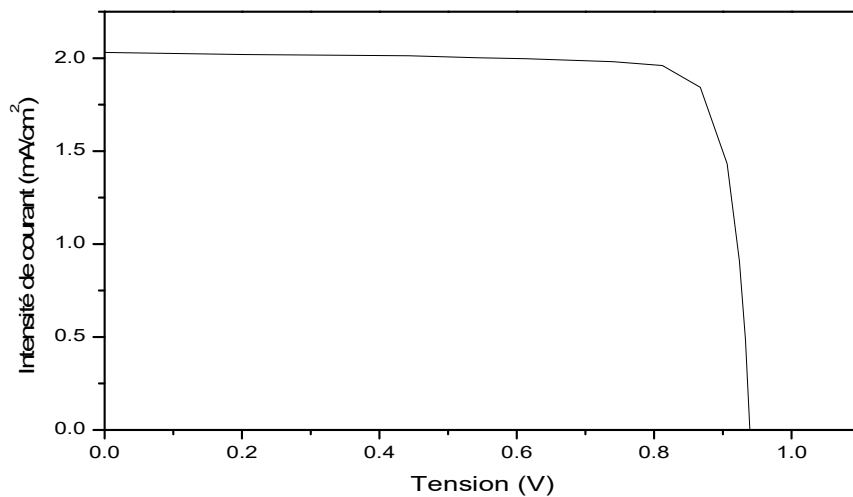


Figure III.6. La caractéristique I(V) de la cellule solaire InGaP /GaAs.

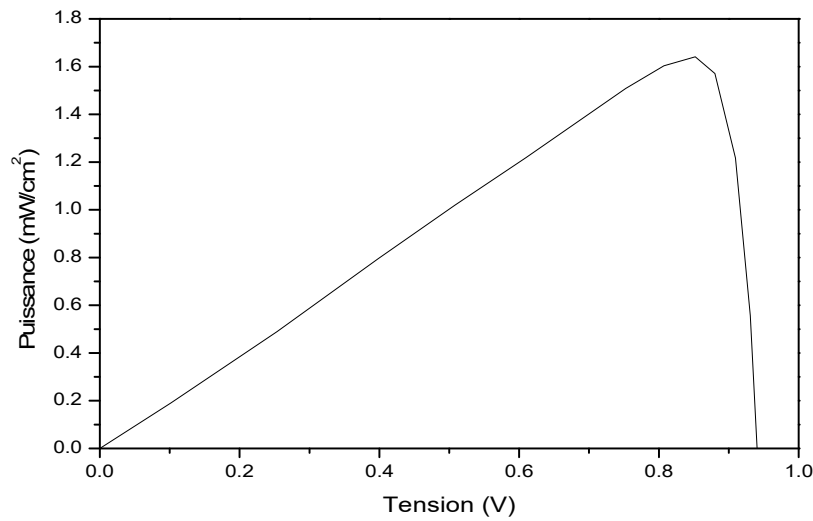


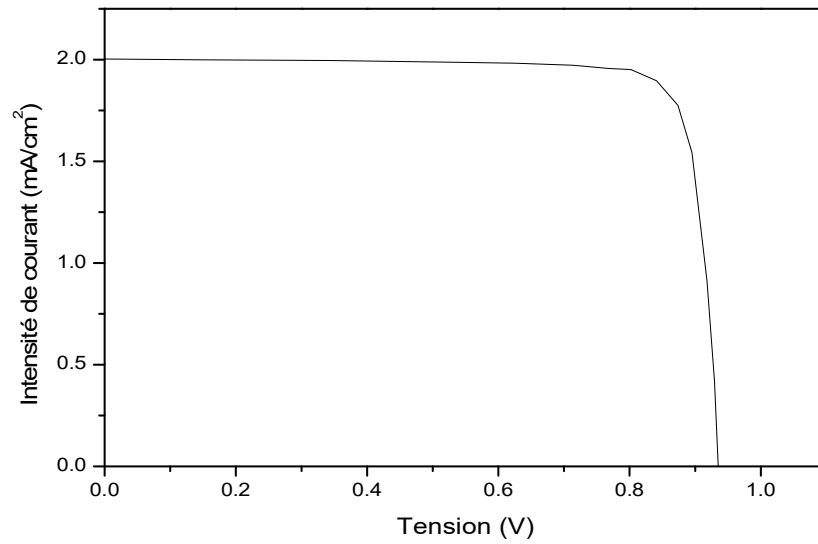
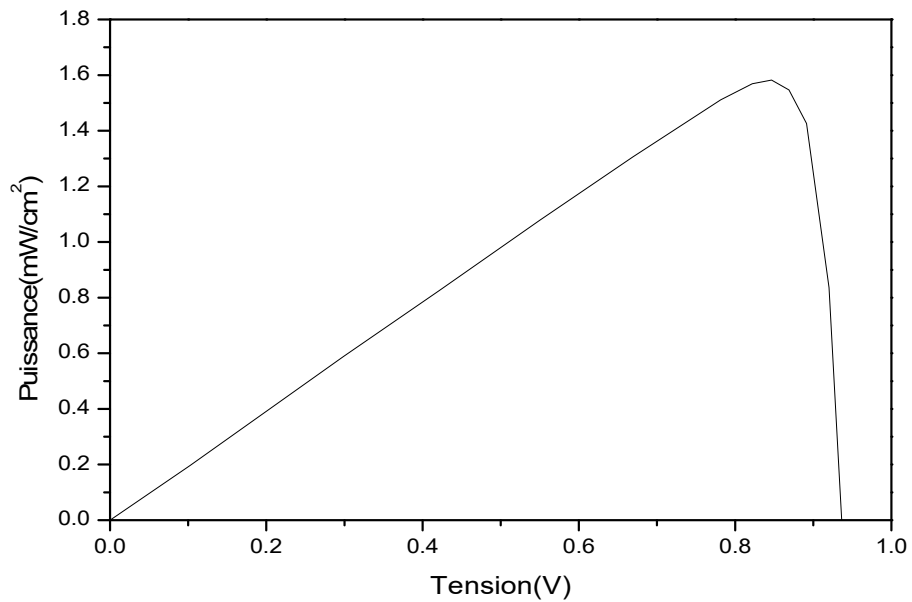
Figure III.7. La puissance de la cellule solaire InGaP /GaAs.

Paramètres électrique	I _{cc} (mA/cm ²)	V _{co} (V)	FF (%)	η (%)
Valeurs	2.03582	0.939365	84.7746	16.2121

Tableau III.2. Paramètres de la cellule solaire InGaP /GaAs.

III.6. Effet de l'épaisseur de la couche absorbante p-GaAs :

Pour étudier l'effet de l'épaisseur de la région absorbante de la structure proposée qui est la couche du matériau GaAs de type P (p-GaAs), plusieurs simulations ont été faites en modifiant seulement l'épaisseur de cette couche et en particulier en la réduisant de 3.5μm à 3μm et ensuite à 2.5μm. les diverses caractéristiques trouvées pour les deux cas sont donnés respectivement.

a) cas d'épaisseur $t_{\text{GaAs}} = 3\mu\text{m}$ **Figure III.8. La caractéristique I(V) de la cellule solaire GaAs.****Figure III.9. La puissance de la cellule solaire GaAs.**

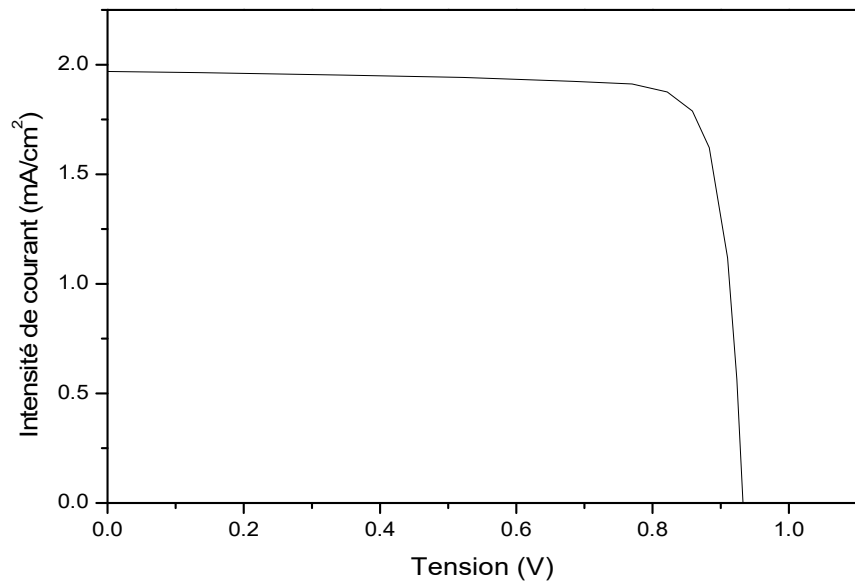
b) Cas d'épaisseur $t_{\text{GaAs}} = 2.5\mu\text{m}$ 

Figure III.10. La caractéristique I(V) de la cellule solaire InGaP /GaAs.

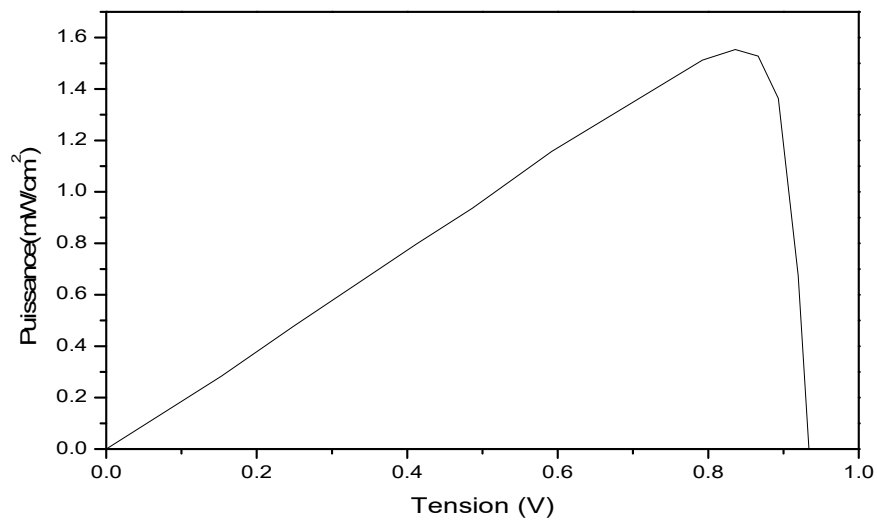


Figure III.11. La puissance de la cellule solaire InGaP /GaAs.

Les caractéristiques I-V des trois cas d'épaisseur de la couche absorbante ($3.5\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$ et $2.5\mu\text{m}$) sont montés dans la figure III.12 .

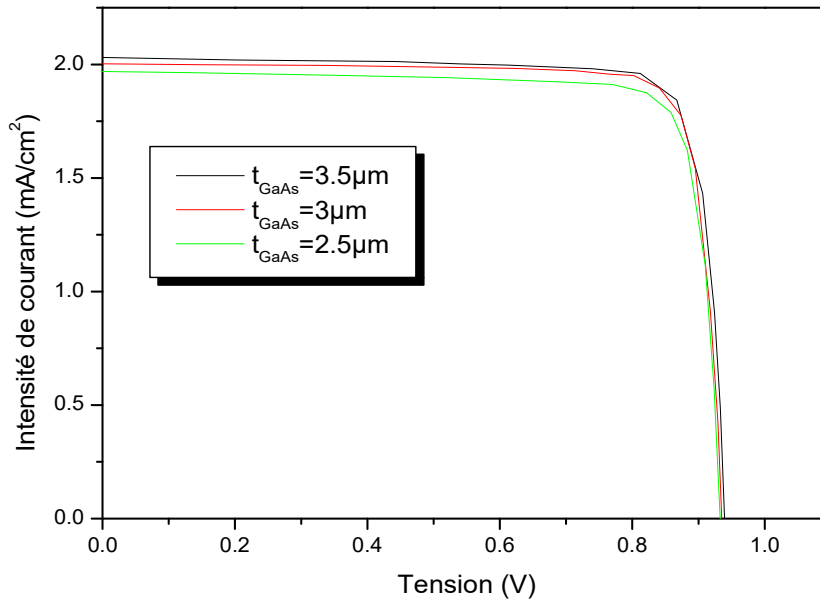


Figure III.12. Caractéristiques I-V de la cellule avec différentes épaisseurs de la couche absorbante .

Il est clair de la figure III.12 que le courant de court circuit décroît de $2.03\text{mA}/\text{cm}^2$ pour $t_{\text{GaAs}}=3.5\mu\text{m}$ à $1.96\text{ mA}/\text{cm}^2$ pour $t_{\text{GaAs}}=2.5\mu\text{m}$. De plus, une légère diminution de la tension de circuit ouvert et le facteur de forme pour les deux cas précédents. Par conséquent, une réduction du rendement de 16.21% à 15.84% pour les deux cas d'épaisseur, respectivement. Cette diminution du courant et du rendement peut être expliquée par la réduction du nombre des électrons absorbés par la lumière dans cette région lorsque son épaisseur est réduite.

Les paramètres électriques pour différentes épaisseurs de la région absorbante sont résumés dans le tableau III.3.

Paramètres électrique	I _{cc} (mA/cm ²)	V _{co} (V)	FF (%)	η (%)
$t_{\text{GaAs}}=3.5\mu\text{m}$	2.03582	0.939365	84.7746	16.2121
$t_{\text{GaAs}}=3\mu\text{m}$	2.00823	0.936351	84.6098	15.9101
$t_{\text{GaAs}}=2.5\mu\text{m}$	1.96926	0.932694	84.3108	15.4855

Tableau III.3. Paramètre électrique pour différentes épaisseurs de la couche absorbante.

D'après les résultats illustrés dans le tableau III.3, on remarque qu'avec la diminution de l'épaisseur de la couche GaAs, tous les paramètres sont affectés.

III.8.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié une cellule solaire à base de matériau III-V et en particulier la cellule InGaP/GaAs. Nous avons examiné l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres électrique de la cellule proposée. Les résultats trouvés montrent que l'épaisseur de la couche absorbante (t_{GaAs}) influent fortement sur les performances de la cellule solaire. Par conséquent, plus l'épaisseur de cette couche est réduite plus le rendement de conversion est diminuée.

Conclusion générale

Conclusion générale

En raison de l'épuisement des énergies fossile et de la pollution qui en découle, la filière photovoltaïque a pris, ces dernières années, une ampleur considérable et son développement est devenu une nécessité pour toute l'humanité.

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables.

Hormis les cellules solaires classiques à base de silicium, les matériaux III-V et la nouvelle technologie des couches minces ont vu le jour.

Ces matériaux sont utilisés avec des épaisseurs de l'ordre de quelques microns qui sont suffisantes pour la conversion photovoltaïque étant données que leurs coefficients d'absorption des photons est très supérieurs à celui du silicium cristallin.

Dans ce mémoire, nous avons fait une étude par simulation numérique à l'aide d'un logiciel TCAD-Silvaco d'une cellule solaire à base de matériaux III-V et en particulier InGaP/GaAs. Par la suite, l'effet de la couche absorbante (t_{GaAs}) de la cellule proposée a été analysé afin d'améliorer l'efficacité de conversion pour les applications à rendement élevé.

Dans un premier pas, nous avons utilisé une épaisseur de $3.5\mu\text{m}$ qui donne un rendement de 16.21%.

Ensuite, l'épaisseur a été modifiée à $3\mu\text{m}$ et à $2.5\mu\text{m}$ qui donne un rendement de 15.91% et 15.84%, respectivement.

Les résultats de simulation obtenus ont montrés que l'épaisseur de la couche (t_{GaAs}) influent fortement sur les paramètres de la cellule solaire a savoir le courant de court circuit I_{cc} , tension de circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement η . Par conséquent, plus l'épaisseur de cette couche est réduite plus le rendement de conversion est diminué.

Bibliographique :

- [1] Production d'énergie électrique :ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE.
- [2] Thèse Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités Année 2005 .
- [3] CHAPITRE 1 GENERALITE SUR LES CELLULES SOLAIRES.
- [4]Amer HAMZAOUI(Effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin), MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF ,2012.
- [5]P. Würfel, Physics of solar cells, Wiley-VCH Deutsche, 2005.
- [6] SALAHEDDINE BENSLEM (Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires) MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF,2011.
- [7] DOUMCyril , FEKOUA Armand (THEME : ETUDE, CONCEPTION ET Réalisation D'UN SUIVEUR SOLAIRE BI-AXES). UNIVERSITE DE DOUALA,2018
- [8] Hicham Bahtoun (ETUDE DES DIFFERENTS MONTAGES ET DIFFERENTS BRANCHEMENT DES PANNEAUX SOLAIRES) Master , UNIVERSITE L'ARBI BEN M'HIDI (OUM EL BOUAGHI) ,2014.
- [9] BOUAYED Abderrahmen (COMMANDE A DEUX AXES D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAIQUE) ,Master, UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID TLEMCEM ,2014.
- [10]http://www.futurasciences.com/uploads/tx_oxcsfutura/schema-theorie-bandes.gif.
- [11] Halouane Assia (Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque), Master, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES,2017.

- [12] « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». thèse doctorat M. Angel Cid Pastor 2006 Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAAS-CNRS).
- [13] Korichi Taki Eddine (Modélisation et commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique), MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, JUIN 2016.
- [14] MESSAOUDI Chahrazed (Méthode de détermination des paramètres d'une cellule solaire par Excel : Perspectives pour une cellule solaire bifaciale en silicium), Master, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2015 .
- [15] BOUKHERS Djamil (OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE APPLICATION AU POMPAGE) ,MAGISTER , Université Mentouri de Constantine ,2007.
- [16] TERGHINI Ouarda (Simulation numérique des effets de radiation dans les détecteurs de particules à base de silicium de type p), diplôme de Doctorat , Université Mohamed Khider – Biskra , 2015.
- [17] Baldomero Garcia (Indiumgallium nitride multijonction solar cell simulation using SILVACO/ATLAS) Master's Thesis, Naval Postgraduation School, Monterey, California ,2007.
- [18] Razvan NEGRU(Conception et modélisation de pixels de Photodetection Photodiodes PIN en silicium amorphe en vue de leurs utilisations comme détecteurs de particules), le grade de Docteur, Ecole polytechnique , France, 2008.
- [19] Melouki Dilmi (ÉTUDE DES PERFORMANCES DE LA CELLULE InGaP/GaAs/Ge PAR SIMULATION) ,MASTER, UNIVERSITE MOHAMMED BOUDHIAF DE M'SILA , 2016.
- [20] Patrick Henry (ATLAS User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE) , Copyright 2006.

- [21] S. Daniel (Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas”) Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [22] S. MOSTEFA K (Etude et Simulation de Cellules Photovoltaïques a Couches Minces a Base de CIS et CIGS”) Mémoire magistère, Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen. 2012.
- [23] Sanders, Michael H (Modeling of operating temperature performance of triple junction solar cells using Silvaco's ATLAS) Monterey California. Naval Postgraduate School ,2007
- [24] Yacine MAROUF (Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco.) , diplôme de Magister , Université Mohamed , 2013.
- [25] BALI AMINA (Etude comparative entre les cellules solaires de type p⁺-AlGaAs/ p-GaAs /n-GaAs et une autre de type n⁺-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs),diplôme de Magister , UNIVERSITE MOHAMED KHEIDER-BISKRA .
- [26] M^{me} DIB Wassila Née KAZI-TANI (MODELISATION DES STRUCTURES PHOTOVOLTAIQUES : ASPECTS FONDAMENTAUX ET APPLIQUES), diplôme de Doctorat, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKÄID DE TLEMEN , 2011.