

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE L'ELECTRONIQUE
N° :2017/ME09/97/482



DOMAINE : SCEANCE ET
TECHNOLOGIE
FILIERE : GENIE ELECTRIQUE
OPTION : MICRO ELECTRONIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

**Par: BOUKARABA Mohamed et
ZORRIG Heythem**

Intitulé

**Effet de la couche buffer dans les cellules
solaires Tandem à base de CIGS**

Soutenu devant le jury composé de:

BENNACER Hamza

Université de M'SILA

Président

BOUCHAMA Idris

Université de M'SILA

Rapporteur

KEBAILI Farida

Université de M'SILA

Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

À nos très chers parents

À nos petites familles

À tous nos amis.

*Et à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à notre
formation*

Remerciement

*Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos
avoir donné la force et le courage.*

A la suite Nous tenons à remercier vivement :

Dr. BOUCHAMA Idris *notre promoteur*

*qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils
et ses encouragements;*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury
pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre
soutenance;*

*Et tous les enseignants du Département d'Electronique et
à tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie
prenante de ce travail.*

*Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de prés et
de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

SOMMAIRE

Dédicace	
Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des Symboles et Abréviations	
Introduction générale	1
<u>Chapitre I : Structure des cellules solaires</u>	
I.1 Introduction	3
I.2 Effet Photovoltaïque	3
I.3 Description de la cellule solaire	4
I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule PV	4
I.5 Différentes filières photovoltaïques	6
I.5.1 La cellule de 1 ^{er} Génération	6
I.5.2 La cellule de 2 ^{eme} Génération	7
I.5.3 La Cellule de la 3 ^{eme} Génération	8
I.6 Différentes structures des cellules solaires en couches minces CIGS	9
I.6.1 Structure substrate	10
I.6.2 Structure superstrate	12
I.6.3 Cellule tandem	13
I.6.4 Structure multi-jonctions	14
I.7 Conclusion	15
<u>Chapitre II : Propriétés fondamentales du composé $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$</u>	
II.1 Introduction	16
II.2 Propriétés du composé $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$	16
II.2.1 Structure cristallographique du composé $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$	16
II.2.2 Propriétés optiques	17
II.2.3 Propriétés électriques	21
II.2.3.1 Les défauts ponctuels	22
II.2.3.2 Les défauts cristallins	23
II.2.3.3 Les principaux défauts dans le composé ternaire CuInSe_2	23
II.3 Conclusion	25
<u>Chapitre III : Logiciel de simulation SILVACO-ATLAS</u>	
III.1 Introduction	26
III.2 Définitions du SILVACO-ATLAS	26
III.3 Entrées et Sorties dans SILVACO ATLAS	27
III.3.1 DECKBUILD	28
III.3.2 TONYPLOT	28
III.4 Structure d'entrée dans SILVACO ATLAS	29
III.5 Contour général de construction d'ATLAS	31
III.5.1 Mesh	32
III.5.2 Régions	33
III.5.3 Electrode	34
III.5.4 Dopage	35
III.5.5 Matériel	36

III.5.6 Modèles physiques	36
III.5.7 Contacts	37
III.5.8 Interface	37
III.5.9 Lumière	37
III.5.10 Méthode de la solution	37
III.5.11 Spécification de la solution	37
III.5.12 Extraction des données et traçage	38
III.6 Conclusion	39

Chapitre IV : Résultats et Discussion

IV.1 Introduction	40
IV.2 Méthode d'optimisation de la cellule tandem	40
IV.3 Paramètres de la cellule individuelle CIGS	40
IV.4 Effet de galium dans la couche CIGS	43
IV.5 Cellule solaire à double-jonctions : Structure tandem CGS/CIGS	47
IV.6 Effet de l'épaisseur de la couche CdS	52
IV.7 Conclusion	55
Conclusion générale	56
Références	58
Résumé	

Listes des figures

Figure (I.1)	La cellule photovoltaïque	3
Figure (I.2)	Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairement	4
Figure (I.3)	Structure de la cellule substrate à base de CIGS	10
Figure (I.4)	Diagramme des bandes d'énergie d'une cellule à base de CuInSe ₂	11
Figure (I.5)	Structure de la cellule superstrate à base de CIGS	13
Figure (I.6)	Cellule tandem à base de CIS et CGS	13
Figure (I.7)	Principe de la cellule à hétérojonction	14
Figure (II.1)	Représentation schématique de la structure chalcopyrite	17
Figure (II.2)	Représentation des indices de réfraction (réelle et imaginaire) en fonction de l'énergie pour le CIGS, avec $x=0$ et $x=0.2$	19
Figure (II.3)	Largeur de bande interdite et paramètre de maille a de certaines chalcopyrites	20
Figure (II.4)	Variation de $(\alpha h\nu)^2$ en fonction de $h\nu$	20
Figure (III.1)	Environnement Virtual Wafer Fabrication	27
Figure (III.2)	ATLAS Entrées et Sorties	28
Figure (III.3)	Menu de Commandes de Deckbuild	28
Figure (III.4)	Fenêtre de Base de TonyPlot	29
Figure (III.5)	Organigramme des Étapes de Construction d'un Model sur ATLAS	32
Figure (III.6)	Atlas Mesh.	33
Figure (III.7)	Régions avec les matériaux définis	34
Figure (III.8)	Déclaration des Électrodes dans ATLAS	35
Figure (III.9)	ATLAS Dopage	36
Figures (IV.1)	Structure de la cellule solaire CIGS individuelle	41
Figures (IV.2)	Courbe (I-V) pour une cellule solaire CIGS	42
Figures (IV.3)	Caractéristiques (I-V) de la cellule CIGS avec concentration du galium variable	43
Figures (IV.4)	Caractéristiques (I-V) de la cellule CIGS avec différentes concentrations du galium x et 1500 nm épaisseur de l'absorbeur	45
Figures (IV.5)	Caractéristiques (I-V) de la cellule CIGS avec différentes concentrations du galium x et pour 200 nm comme épaisseur de l'absorbeur	46
Figures (IV.6)	Structure de la cellule tandem CGS/CIGS affichée par Tonyplot	48
Figures (IV.7)	Caractéristiques (I-V) des trois cellules solaires : cellule inférieure, cellule supérieure et celle de la cellule tandem CGS/CIGS pour une épaisseur de CGS = 150 nm	49
Figures (IV.8)	Structure de la cellule tandem CGS/CIGS affichée par Tonyplot	51
Figures (IV.9)	Caractéristiques (I-V) des trois cellules solaires : cellule inférieure, cellule supérieure et celle de la cellule tandem CGS/CIGS pour une épaisseur de CGS = 200 nm	51
Figures (IV.10)	Structure de la cellule tandem CGS/CIGS affichée par Tonyplot	53
Figures (IV.11)	Caractéristiques (I-V) des trois cellules solaires : cellule inférieure, cellule supérieure et celle de la cellule tandem CGS/CIGS pour une épaisseur de CdS = 100 nm et de CGS = 150 nm	53

Liste des Tableaux

Tableau (II.1)	Défauts majoritaires des paires dans le CIS	24
Tableau (II.2)	Energie de formation des défauts intrinsèques dans le CIS	24
Tableau (III.1)	Groupes de Commande ATLAS avec les Déclarations de Base dans Chaque Groupe.	31
Tableau (IV.1)	paramètres de base de la cellule individuelle CIGS	41
Tableau (IV.2)	Paramètres photovoltaïques de la cellule CIGS	42
Tableau (IV.3)	Les paramètres photovoltaïques de la cellule CIGS pour différentes valeurs de Ga/(Ga+In)	44
Tableau (IV.4)	Les paramètres photovoltaïques de la cellule CIGS pour différentes valeurs de Ga/(Ga+In)	45
Tableau (IV.5)	Les paramètres photovoltaïques de la cellule CIGS pour différentes valeurs de Ga/(Ga+In).	46
Tableau (IV.6)	Paramètres photovoltaïques de la cellule tandem CGS/CIGS, pour une épaisseur de CGS =0.15 μm	49
Tableau (IV.7)	Paramètres photovoltaïques de la cellule tandem CGS/CIGS, pour une épaisseur de CGS =0.2 μm .	52
Tableau (IV.8)	Paramètres photovoltaïques de la cellule tandem CGS/CIGS, pour une épaisseur de CGS =0.15 μm et de CdS = 100 nm	54

Liste des Symboles et Abréviations

Symboles	Signification	Unité
<i>J</i>	La densité de courant	mA/cm ²
<i>V</i>	Le voltage	v
<i>QE</i>	Le rendement quantique	%
λ	la longueur d'onde de la lumière	μm
<i>J_{CC}</i>	La densité de courant de court circuit	mA/cm ²
<i>V_{CO}</i>	La tension de circuit ouvert	v
<i>FF</i>	Le facteur de forme	%
<i>E</i>	Energie	ev
<i>h</i>	Constante de Planck (6.62 x 10 ⁻³⁴ J.s)	J.s
α	Coefficient d'absorption	cm ⁻¹
$\epsilon_r \epsilon_0$	La permittivité du semi-conducteur	F cm ⁻¹
μ_n et μ_p	La mobilité des électrons et des trous respectivement	cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹
<i>E_g</i>	L'énergie de bande interdite	eV
<i>ZnO</i>	Oxyde de Zinc	-
<i>CdS</i>	Sulfure de Cadmium	-
<i>CIGS</i>	Di-sélénium de galium d'indium de cuivre (Cu (In, Ga)Se ₂)	-
<i>CdTe</i>	Tellure de Cadmium	-
<i>AM 1.5</i>	Spectre de la lumière solaire	-
<i>Mo</i>	Molybdénium	-

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les cellules solaires en couches minces ont des applications photovoltaïques terrestres à grande échelle vu à leur faible prix de fabrication. Un certain nombre de semi-conducteurs comprenant le CdTe polycristallin, le Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) et le silicium amorphe (a-Si) ont été élaborés pour les cellules solaires en couches minces. Les cellules solaires à base du CIGS présentent une excellente stabilité et une grande résistance aux rayonnements [1]. Ce type de cellules ont un intérêt considérable pour des applications terrestres et/ou spatiales. Des tests d'irradiation de protons et d'électrons sur des cellules solaires CIGS et CdTe ont montré que leur stabilité contre l'irradiation de particules est supérieure à celles de cellules solaires de Silicium (Si) ou à base des semi-conducteurs III-V [2].

Le matériau CIGS est un semi-conducteur ayant un gap d'énergie approprié et un coefficient d'absorption optique élevé dans le domaine visible du spectre solaire. Le coefficient d'absorption de films en CIGS est 100 fois plus grand que celui du Si dans le domaine de visible du spectre solaire.

Le rendement maximal de la meilleure cellule solaire en CIGS fabriquée sur des substrats en acier inoxydable est de 17.5% sous l'illumination AM1.5G [3] avec une structure du dispositif est composée de: MgF₂/ITO/ZnO/CdS/CIGS/Mo/substrat en acier inoxydable. La cellule solaire CIGS pour une fraction molaire $x = 0.3$ correspond à une énergie de gap variée entre 1.1-1.2 eV et fabriquée sur des substrats en verre a un rendement de 20% sous AM1.5G [4], comme rapporté par l'équipe de recherche de NREL (National Renewable Energy Laboratory).

Dans ces dernières années, des progrès ont abouti à des meilleures cellules solaires dont la couche absorbante CIGS a une épaisseur entre 2.5 et 3 μm , et un gap d'énergie dans la gamme 1.2-1.3 eV dépassant le rendement 20% et ayant atteint un nouveau record mondial de 20.3% [5]. Une cellule solaire CdS/CIGS a abouti à un rendement maximal de 19% [6].

L'amélioration du rendement de la cellule solaire à base de CIGS est aussi venue par l'utilisation des cellules solaires double-jonctions (Tandem), Triple ou Multi-jonctions qui sont composées par de plusieurs couches ayant des énergies du gap différentes afin d'exploiter les différentes régions des énergies du spectre solaire [6].

L'étude par simulation numérique des cellules solaires en couches minces reste la moyenne la plus performante pour estimer les performances des cellules. Par ces outils de simulation beaucoup de paramètres peuvent être variés pour modéliser les phénomènes expérimentalement observés. On peut également offrir une explication physique des phénomènes observés puisqu'ils permettent de calculer les paramètres internes tels que le taux de recombinaison et les densités des porteurs libres.

Dans notre travail, nous allons utiliser le simulateur **Atlas** du logiciel **SILVACO-TCAD**[®] pour la simulation et l'étude d'une cellule solaire double-jonction (Tandem) à base de CIGS. L'outil Atlas permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à base de ces semi-conducteurs. Ce travail contribuera à une meilleure compréhension et analyse des cellules solaires Tandem CGS/CIGS. Nous allons simuler l'effet de l'épaisseur et de la concentration du gallium (Ga) dans la cellule inférieure de la structure Tandem avec différente fraction molaire x sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire CIGS. La couche fenêtre de ZnO dopé Aluminium (ZnO:Al) est utilisée comme une couche transparente dans la structure de cellule Tandem.

Ce mémoire est structuré de la façon suivante:

Après une introduction générale, le premier chapitre présente des généralités sur la conversion photovoltaïque, le principe de fonctionnement et leur filières, ainsi que les structures des cellules solaires.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les propriétés fondamentales du matériau CIGS. Nous décrirons les propriétés optiques et électriques du composé $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le logiciel Silvaco utilisé dans notre simulation.

Dans le quatrième chapitre, des discussions et des interprétations des résultats obtenus par la simulation de notre cellule solaire Tandem à base de CIGS utilisant le simulateur Atlas Silvaco. Nous clôturerons le travail par une conclusion générale ainsi que des perspectives de ce travail.

CHAPITRE 1

STRUCTURE DES CELLULES SOLAIRES

I.1 Introduction

La cellule solaire est un composant semi-conducteur qui convertit l'éclairement incident en énergie électrique. Le phénomène mis en jeu, l'effet photoélectrique, consiste l'apparition d'une différence de potentiel produite par la génération de porteurs de charge par excitation lumineuse au voisinage d'une jonction. La cellule solaire est une jonction PN dont le fonctionnement est basé sur l'absorption du flux lumineux solaire, la génération et la collecte des charges.

Dans ce chapitre on va présenter le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, les différentes filières des cellules photovoltaïques ainsi que les différentes structures existant dans le marché de la cellule PV.

I.2 Effet Photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [7].

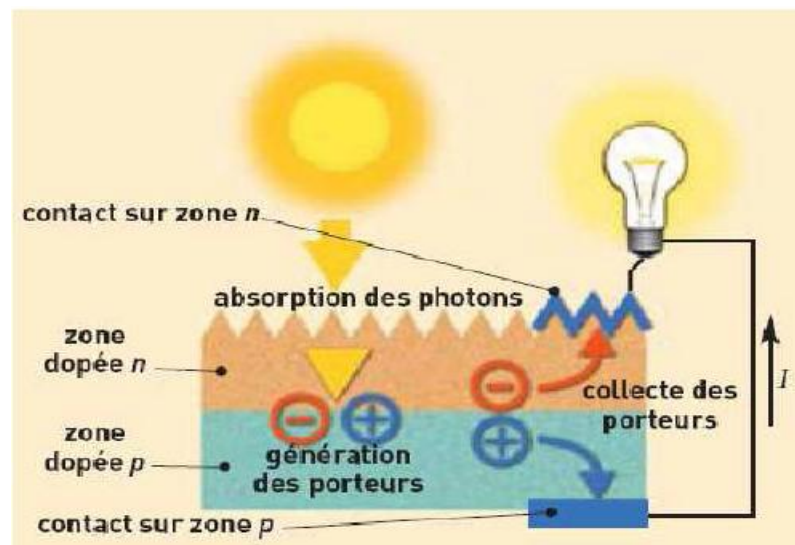


Figure (I.1) : La cellule photovoltaïque [7].

Le principe de l'effet photovoltaïque est le suivant :

1. Les "grains de lumière"- les photons - heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couche mince;
2. Ils transfèrent leur énergie aux électrons présents dans la matière, qui se mettent alors en mouvement dans une direction particulière (voir Figure (I.1));

3. Le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante.

I.3 Description de la cellule solaire

L'effet photovoltaïque provient de la conversion du rayonnement du soleil en énergie électrique. Cette conversion est effectuée par l'intermédiaire des composants électroniques à base des matériaux semi-conducteurs, dites: les cellules solaires ou les cellules photovoltaïques (Figure (I.2)). Le groupement d'un ensemble des cellules solaires constitue le panneau solaire ou le panneau photovoltaïque.

Une cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif constitué de deux semi-conducteurs de conceptions différentes, type P (les trous sont les porteurs majoritaires) et type n (les électrons sont les porteurs majoritaires), il permet de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière (Figure (I.2)). Les semi-conducteurs candidats pour qu'ils soient les bases des cellules solaires doivent présenter une stabilité physique pour assurer la fiabilité au cours du temps et ayant des gaps adaptés pour l'absorption du spectre solaire avec un coefficient d'absorption plus élevé.

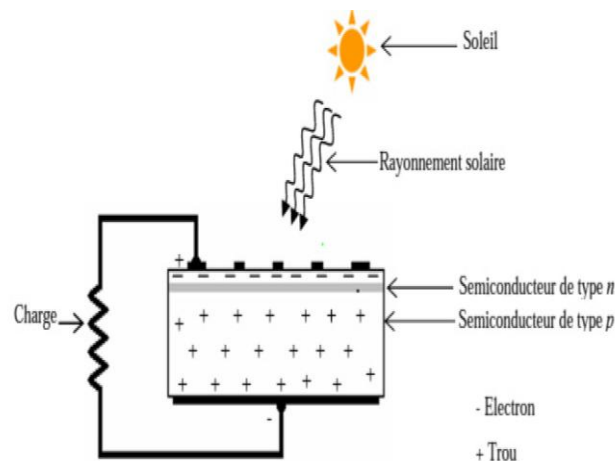


Figure (I.2): Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairage [8].

I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Les cellules solaires sont basées sur la technologie des semi-conducteurs et la jonction p-n. Un semi-conducteur (SC) est un matériau présentant une bande interdite (E_g) de quelques eV entre la bande de valence et la bande de conduction, avec le niveau de Fermi dans la bande interdite. La position du niveau de Fermi est fonction de la concentration des porteurs de charges. Le semi-conducteur est de type n lorsque les électrons sont les porteurs de charge majoritaires, dans ce cas,

le niveau de Fermi se situe près de la bande de conduction. Il est de type p lorsque ce sont les trous, dans ce cas le niveau de Fermi est proche de la bande de valence [9].

L'assemblage de deux semi-conducteurs de types différents forme la jonction p-n. Il existe deux types de jonctions: lorsque les deux semi-conducteurs sont issus de deux matériaux différents, on parle d'hétérojonction, lorsque la jonction p-n est formée d'un seul matériau comportant des zones avec des dopages différents p et n, on parle alors d'homojonction (ex : homojonction Si).

Lors du contact entre zones p et n, les porteurs majoritaires de chacune diffusent à travers la surface de contact, il se crée une zone chargée positivement du côté du semi-conducteur n et une zone chargée négativement du côté du semi-conducteur de type p. Cette zone de transition est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Le gradient de concentration des porteurs majoritaires induit la présence d'un champ électrique permanent dans cette ZCE à l'équilibre. Les niveaux de Fermi des deux zones s'égalisent, ce qui provoque une courbure du diagramme de bande, introduisant une barrière de potentiel V_e à l'interface [9].

a) L'absorption de la lumière

L'absorption des photons est la première étape nécessaire au processus de conversion photovoltaïque. La plus élémentaire est celle d'un photon d'énergie $h\nu$ qui excite un électron d'un niveau de basse énergie vers un niveau de plus haute énergie. Ainsi, l'une des propriétés d'un matériau photovoltaïque est son coefficient d'absorption (α). L'exploitation du spectre d'absorption permet de calculer toutes les transitions que peut subir un électron et ainsi accéder à la distribution des niveaux énergétiques dans le semi-conducteur.

b) Le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont les électrons contenus dans la matière semi-conductrice. Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons périphériques, leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur [10].

En régime permanent, l'électron libéré laisse un trou qui se traduit par une charge positive. Si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, les électrons dans un sens et les trous dans l'autre, ce qui donne un courant électrique [10].

c) La collecte des charges

Les porteurs créés par les photons doivent être collectés et envoyés dans le circuit extérieur. Mais tous ces porteurs n'arrivent pas dans le circuit extérieur, certains sont piégés avant d'y arriver. Les principales causes de disparition des porteurs libres sont les impuretés, les recombinaisons dues aux états d'interface et les courbures de bandes non appropriées. Les états d'interfaces sont constitués par l'ensemble des défauts de la structure du matériau. Etats d'interface jouent un rôle très important, ils introduisent des niveaux d'énergie permis dans le gap, donc piégeage des porteurs libres et par conséquent apportent une modification des populations dans les bandes permises

I.5 Différentes filières photovoltaïques

L'effet photovoltaïque, a été observé pour la première fois par Antoine Becquerel et présenté à l'académie des sciences en 1839. Il faut attendre 1954 pour que les chercheurs **Chapin, Pearson** et **Prince** mettent au point au sein des laboratoires de la compagnie **Bell** la première cellule photovoltaïque au silicium possédant un rendement atteignant les 6%. Cette cellule est suffisamment performante pour imaginer un développement et une application sous forme de panneaux solaires. En parallèle, l'industrie spatiale se développe fortement et recherche des solutions pour alimenter ses satellites. C'est ainsi que le premier satellite scientifique américain équipé de panneaux solaires est mis en orbite en août 1959. Depuis lors, de nombreux progrès ont été effectués et différentes générations de cellules solaires ont vu le jour.

I.5.1 La cellule de 1^{er} Génération

Ce type de cellule est basé sur une seule jonction p-n et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. Ce fut le début de la « **première génération** » de cellules solaires fabriquées à partir d'un substrat d'un silicium massif issu de la technique du tirage en lingots et du découpage en plaquettes.

Cette méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté.

Durant de longues années, la principale application de ces cellules resta le domaine spatial. Leur intérêt dans une utilisation terrestre apparaît dans les années 1970, période du premier choc pétrolier. Aujourd'hui le développement de l'industrie des semi-conducteurs et ses très nombreuses avancées (tant en termes de qualité du matériau que de développement des équipements) ont favorisé la très large expansion des cellules solaires.

Ainsi pour les cellules à base de plaquettes en silicium cristallin (90 % du marché mondial) et dont les rendements en laboratoire (24,7%) ont atteint les limites théoriques du silicium et les rendements industriels dépassent souvent les 16 % sur de grandes surfaces, l'avenir passe par une réduction drastique des coûts [11].

Ceci nécessite sans cesse de nouvelles approches technologiques afin de réduire les coûts de production tout en augmentant le rendement de conversion des cellules et diminuer les pertes de matière lors de l'élaboration des plaques.

I.5.2 La cellule de 2^{ème} Génération

C'est la filière technologique des couches minces dites de « **deuxième génération** » qui a été remporté. En effet, grâce au développement des procédés de dépôt sous vide, il est devenu possible d'utiliser un autre support que le silicium (verre ou polymère) sur lequel on ne dépose que quelque dizaine de micromètres de silicium ou d'autres semi-conducteurs. Et donc l'apparition d'une nouvelle génération où on peut avoir des rendements plus élevés avec un faible coût.

Les avantages de coût sont dus à la consommation inférieure du matériau et d'énergie, les conditions inférieures de la qualité du semi-conducteur, de plus petites dimensions des couches minces et production intégrée de module.

Le prix d'une telle technologie s'est largement réduit puisque l'on a plus besoin de lingots purifiés de silicium si onéreux, cependant le dépôt de silicium en film mince pose d'autres problèmes, dont deux essentiels. Le premier, est liée à la faible épaisseur du dépôt qui se répercute sur une faible absorption des photons, l'autre difficulté rencontrée provient de la faible cristallinité du dépôt sur un substrat amorphe (verre ou polymère) qui est loin de la qualité d'une plaquette monocristalline et génère des centres de recombinaison pour les porteurs de charges. Ces deux problèmes majeurs se sont répercutés sur le rendement de conversion qui a dépassé difficilement les 10% pour le silicium et a pu atteindre les 16 et 20% pour d'autre semi-conducteurs tel que CdTe et Cu(In,Ga)Se₂ respectivement.

Donc pour cette filière de couches minces, trois voies semblent aujourd'hui s'imposer: le silicium, sous ses formes amorphe ou poly-cristalline, le tellure de cadmium, et de Sélénium d'Indium, de Galium et de Cuivre.

Pour les cellules à base de CdTe, il s'agit d'une technologie extrêmement prometteuse, permettant d'obtenir des rendements tout à fait convenables (16,5% en laboratoire) [12].

De part une bande interdite de 1,45eV parfaitement adaptée au spectre solaire et un très fort coefficient d'absorption, seule une couche de 2 μm est nécessaire pour obtenir un matériau très

opaque et absorbant une grande partie du spectre solaire. Le développement des panneaux CdTe est néanmoins largement freiné par l'utilisation du cadmium, qui pose un problème au niveau environnemental.

Mais avec une efficacité de conversion de puissance de 20.1% sur 0.5 cm^2 de cellules de laboratoire et 16.6% pour des mini modules avec une aire d'environ 20 cm^2 de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$, la technologie en couches minces est aujourd'hui, la plus efficace des piles solaires. Les cellules à base de matériau chalcopyrite quaternaire comme les CIGS (pour $\text{Cu}(\text{Ga,In})\text{Se}_2$ possède également des performances extrêmement intéressantes [13]. Les réductions de coût attendues à moyen terme pour cette technologie sont donc très prometteuses [14].

Le problème de ce type de cellules est le rendement faible par rapport à la première génération et la toxicité de certains éléments (cadmium) pour leur fabrication.

Le verrou majeur commun à toutes les différentes filières en couches minces réside dans le passage au stade industriel des cellules de laboratoire où il est possible d'obtenir des rendements de cellule voisins de 12-14% sur petite surface vers la fabrication de modules 30 cm par 30 cm possédant des rendements au minimum 10%.

Cette deuxième génération de cellule a donc aussi ses défauts, que les physiciens corrigent en travaillant à la maîtrise du matériau lui-même. Et par conséquent, cette deuxième génération en a ouvert une troisième.

I.5.3 La Cellule de la 3^{ème} Génération

L'impact environnemental d'une cellule doit être pris en compte lors de sa fabrication. Tenter de régler le problème de l'approvisionnement en électricité propre (du point de vue émission de gaz à effet de serre) en utilisant des matériaux toxiques ou non recyclables n'est pas une option: c'est ce qui limite les cellules CdTe dans leur développement, par exemple.

La disponibilité des matériaux peut être un autre facteur limitant, l'un des inconvénients majeurs des cellules CIGS provient du fait que le sélénium, l'indium et le gallium sont des matériaux dont les ressources sont limitées. Cela entraîne évidemment des coûts de fabrication plus importants car ces matériaux étant rares, ils sont chers.

Ceci a par conséquent conduit à l'émergence d'une troisième génération de cellules solaires, encore au stade de développement mais aux perspectives prometteuses pour l'avenir proche (d'ici 2020).

C'est pour répondre à ces deux problématiques qu'une équipe de recherche de l'université de Chicago en collaboration avec IBM travaille sur des cellules à la fois dépourvues d'éléments dangereux pour la santé ou l'environnement et dont les ressources sont relativement importantes. Ces cellules dites CZTS (pour cuivre, zinc, étain et soufre) permettent d'atteindre des rendements de près de 10% en laboratoire [12].

Pour les cellules du futur à semi-conducteurs organiques (3.5% de rendement de conversion en début de vie) ou à base de matériaux nano structurés, une recherche fondamentale de base est encore nécessaire. Enfin dans le domaine des composants et de l'architecture des systèmes générateurs, l'enjeu majeur est l'intégration au réseau (y compris de systèmes hybrides de toutes tailles) ainsi que l'intégration de la conversion en puissance à l'échelle du module et de la cellule [11].

À l'échelle nanométrique, les propriétés des matériaux changent. Les physiciens tentent d'en tirer profit, par exemple en introduisant des nanoparticules de silicium ou de germanium (5 nanomètres de diamètre) dans une fine couche de verre placée à la surface de la cellule pour que la lumière solaire soit mieux absorbée.

L'un des projets principaux de ce programme de recherche est l'augmentation de rendement de conversion au-delà des limites théoriques calculées pour une structure à simple jonction, et ce en utilisant de nouvelles stratégies pour la capture des photons et la collecte des excitons. L'autre objectif de cette troisième génération est de réduire considérablement le prix de fabrication en utilisant des matériaux à très faible coût (matériaux organiques, polymères...).

I.6 Différentes structures des cellules solaires en couches minces CIGS

Les composés $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ sont dotés d'un fort coefficient d'absorption ($>10^5 \text{cm}^{-1}$) ce qui réduit l'épaisseur de toute la cellule de 2 à 4 μm . En plus, il a été montré que l'écart à la stœchiométrie n'altère pas leurs propriétés d'absorption, ce qui rend possible leurs utilisations sous forme de couches minces poly-cristallines en grandes surfaces et leur obtention à partir de techniques de croissance simples et non sophistiquées contrairement au cas de la croissance cristalline. C'est l'un des critères essentiels du photovoltaïque terrestre.

Les performances des cellules solaires dépendent de nombreux paramètres, tels que l'absorption, le transport de charge, la longueur de diffusion des porteurs, les états d'interfaces, etc. Le choix des matériaux constituant les couches et les électrodes métalliques est nécessaire pour obtenir un bon rendement de conversion. Ce dernier peut être amélioré en utilisant des absorbeurs

ayant un coefficient d'absorption élevé. Le rendement de la cellule dépend en outre de la structure élaborée et de la qualité de diverses couches, autrement dit des divers procédés de croissance.

Nous citons dans ce qui suit les différentes structures existantes dans la fabrication des cellules solaires à base de CIGS en couches minces :

I.6.1 Structure substrate

La figure (I.3) montre la structure de la cellule solaire classique à base de CIGS qu'on appelle aussi structure standard. La structure substrate classique est composée de :

- Une électrode métallique arrière en Molybdène déposée sur substrat de verre,
- Une couche absorbante Cu(In,Ga)Se_2 dont l'épaisseur peut varier de 1 à 3 μm ,
- Une couche tampon (CdS , ZnO) d'épaisseur de 10 à 100 nm chacune, assurant respectivement la jonction et l'absence de courts circuits,
- Une fenêtre optique de ZnO dopé aluminium (ZnO:Al) qui doit combiner deux propriétés essentielles, à savoir la conductivité électrique et la transparence optique [15].
- Une grille métallique avant 'aluminium-nickel' nécessaire pour la collecte de courant.

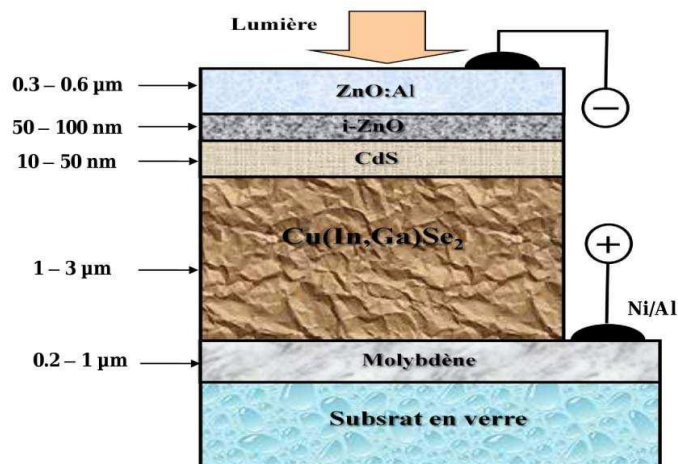


Figure (I.3): Structure de la cellule substrate à base de CIGS [15].

Outre les électrodes métalliques (contact ohmique inférieur (Molybdène) et contact ohmique supérieur (Ni/Al)), la cellule photovoltaïque est constituée principalement de trois éléments : une couche absorbante (p- Cu(In,Ga)Se_2), une couche tampon (n- CdS , i- ZnO) et une fenêtre optique ZnO dopé aluminium (ZnO:Al). La déposition de la couche tampon entre l'absorbeur et la fenêtre optique sert à éviter un éventuel court-circuit dû à l'interconnexion entre les couches. Elle doit être très fine ($< 0.1 \mu\text{m}$) pour ne pas gêner le passage des porteurs de charge. Elle sert aussi à adapter les bandes d'énergie de l'absorbeur et de la fenêtre optique, pour éviter les discontinuités dues aux différences de gaps des composants et faciliter le passage des porteurs.

Nous présenterons brièvement les principaux éléments de la cellule photovoltaïque en couches minces à base de CIGS:

a) Couche absorbante

La couche absorbante est de type p et a un fort coefficient d'absorption dans le domaine du visible. Il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1,1-1,7 eV.

b) Couche tampon (buffer)

La couche tampon est située entre la couche absorbante et la fenêtre optique. Si un contact (couche absorbante/fenêtre optique) est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister. En revanche, son rendement sera limité par l'inadaptation des bandes interdites et les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains. De ce fait, il est préférable d'introduire une fine couche, dite couche tampon, entre ces deux composés afin d'optimiser les performances de la cellule. Cette couche doit avoir les propriétés suivantes:

- Une bande interdite intermédiaire permettant une transition « souple » entre celle de l'absorbeur et de la fenêtre optique dont la valeur est comprise entre 2,4 et 3,2 eV.
- Une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante. De plus, pour éviter les effets de fuite de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante.
- Elle doit être morphologiquement très homogène et compacte pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains de la couche absorbante [16].

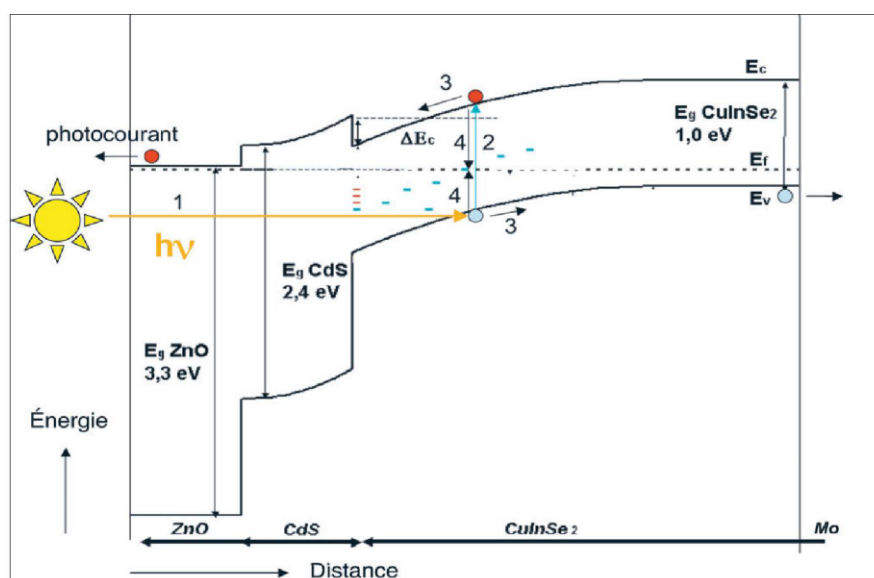


Figure (I.4): Diagramme des bandes d'énergie d'une cellule à base de CuInSe_2 .

c) Couche d'oxyde transparent conducteur (OTC)

Une couche fenêtre de CdS est normalement utilisée. Les inconvénients associés à cette couche sont : la transmission et réflexion, un décalage de la bande de conduction avec les chalcopyrites de plus grand gap et la toxicité du cadmium.

Pour ces raisons cette couche a été remplacée par une couche d'oxyde transparent conducteur (OTC). La conductivité de ces couches doit être supérieure à $10^3 \Omega^{-1} cm^{-1}$ et dans le domaine du spectre solaire, la transmission des couches doit être supérieure à 80%. De telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces de SnO_2 , In_2O_3 , de leur alliage ITO et de ZnO. Leurs propriétés électriques dépendent de la composition des couches et d'un éventuel dopage, tandis que, leur transparence est liée à la valeur de leur bande interdite. On dépose généralement une première couche non dopée de ZnO, puis une couche ZnO dopée à l'aluminium (ZnO:Al) ou d'ITO. En effet, la couche de ZnO intrinsèque, donc non-conductrice, évite toute fuite de courant entre la couche absorbante et le contact supérieur [17].

I.6.2 Structure superstrate

La figure (I.5) montre la structure d'une cellule superstrate à base de CIGS en opposition à la cellule substrate classique. En effet, jusqu'à présent, les rendements élevés mentionnés dans le tableau précédent, ont été obtenus sur des cellules standards nécessitant l'utilisation d'une couche tampon intermédiaire contenant du cadmium, élément nocif pour l'environnement. Le rendement de conversion affiché actuellement en laboratoire pour une cellule superstrate classique est de 12.8% [18].

La cellule dans la configuration superstrate est constituée des différentes couches semi-conductrices suivantes : substrat de verre (SLG)/couche oxyde conductrice et transparente (OTC)/couche tampon (i-ZnO)/absorbeur CIGS/contact arrière. Cette configuration a des avantages par rapport à la configuration substrate classique [19] :

- Elle permet d'éliminer la couche tampon de CdS, c'est d'abord la fenêtre transparente net conductrice jouant le rôle d'émetteur de type n/n+ (le plus souvent constituée par un oxyde: OTC) qui sera déposée sur le substrat de verre, suivie du dépôt de l'absorbeur (de type p) tandis qu'un contact métallique (Ag) sera déposé à l'arrière (Figure (I.5)).

- Elle offre une encapsulation plus aisée de la cellule. Le substrat de verre agit non seulement comme un support de la cellule mais aussi comme une partie de l'encapsulation, conduisant à une réduction du coût de module par rapport à ceux des cellules de type substrate.

▪ Elle a un mérite dans la fabrication d'une structure tandem plus avancée, à savoir, les cellules solaires à jonctions multiples, dans lequel il agit comme une cellule supérieure pour la partie courte longueur d'onde du rayonnement solaire.

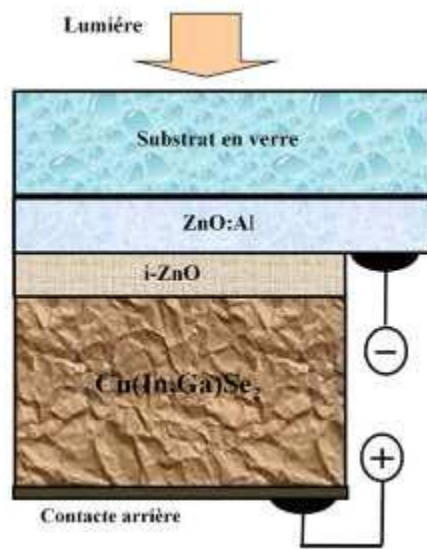


Figure (I.5): Structure de la cellule superstrate à base de CIGS [15].

I.6.3 Cellule tandem

La structure tandem à base de CuInSe_2 est formée par plusieurs photopiles, généralement les gaps sont décroissants vers le substrat. Ainsi, en combinant la cellule solaire petit gap ($E_g \approx 1,1 \text{ eV}$) à base de CuInSe_2 (configuration classique) et la cellule grand gap ($E_g \approx 1,7 \text{ eV}$) à base de CuGaSe_2 empilées (Fig. (I.6)) le rendement théorique pourrait approcher 36% [15]. Le gap élevé de CuGaSe_2 permet d'augmenter la tension en circuit-ouvert en minimisant la densité de courant ce qui réduit les pertes dans les modules photovoltaïques.

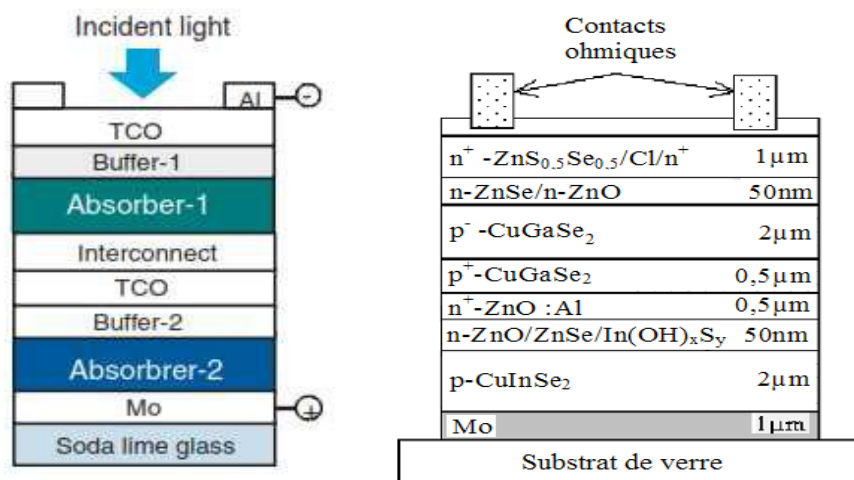


Figure (I.6) : Cellule tandem à base de CIS et CGS [18].

I.6.4 Structure multi-jonctions

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée E_g en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utilisable.

D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue depuis longtemps. Du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Figure (I.7)). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants [20].

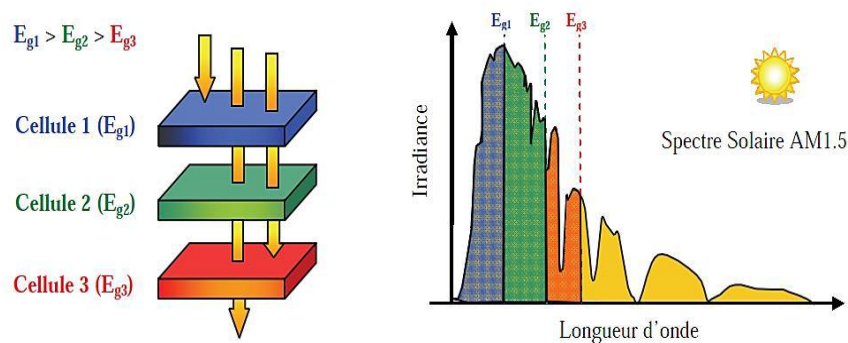


Figure (I.7): Principe de la cellule à hétérojonction [20].

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases de quelques notions sur le rayonnement solaire. On a présenté aussi le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Des aspects aussi bien technologiques qu'électriques ont été abordés afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion photovoltaïque. En fin, nous avons parlé sur les cellules substrats, Superstrates, Double-jonctions et multi-jonctions à haut rendement à base de CIGS.

Dans le chapitre qui suit nous présenterons les propriétés fondamentales de notre matériau CIGS utilisé dans la structure de notre cellule solaire comme un absorbeur.

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS FONDAMENTALES DU COMPOSÉ $\text{CUIN}_{1-x}\text{GA}_x\text{SE}_2$

II.1 Introduction

Les qualités fondamentales des matériaux chalcopyrites I-III-VI₂ ont été largement étudiées dans la littérature et principalement celles du système ternaire Cu-In-Se qui est connu comme étant la base du système quaternaire Cu-In-Ga-Se. Par contre, il est nécessaire de faire le point sur l'état actuel des connaissances susceptibles d'être utilisées pour la conversion photovoltaïque. Cet état des connaissances portera donc principalement sur les résultats bien établis et pratiquement indiscutables du matériau CuInSe_2 et par conséquent des composés $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$. Il faut savoir que le gallium (Ga) et l'indium (In) sont chimiquement très similaires, car la substitution du Ga à la place de l'In ne change pas de façon dramatique les paramètres du matériau. Cependant, il y a quelques exceptions à cette règle [22].

II.2 Propriétés du composé $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$

Les recherches actuelles sur les matériaux photovoltaïques (PV) portent également sur d'autres matériaux que le silicium, mieux adaptés à une utilisation en couches minces et délivrant de hauts rendements à des coûts relativement bas. Deux filières semblent s'imposer progressivement, l'une basée sur le tellure de cadmium (notée CdTe) et l'autre sur les alliages Cuivre-indium/gallium-Sélénium (notée CIGS).

Le CIGS est un semi-conducteur composé de quatre matériaux semi-conducteurs (quaternaire), di-séléniure de cuivre, d'indium et de gallium.

Les principaux avantages de ce matériau consistent en une très bonne stabilité et des caractéristiques optoélectroniques performantes, notamment un fort coefficient d'absorption optique ($\alpha > 10^5 \text{ cm}^{-1}$). Quelques micromètres d'épaisseur suffisent à absorber la partie utile du spectre solaire. Ce qui se répercute de manière significative sur le coût de fabrication.

Les composés CIGS, possèdent de bonnes propriétés telles qu'un coefficient d'absorption très élevé (10^5 cm^{-1}) et une bande interdite qui varie dans une gamme de 1 eV à 1.6 eV, ce qui rend les cellules solaires à base de ces composés très utilisées dans le domaine photovoltaïque.

II.2.1 Structure cristallographique du composé $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$

Ce type de système cristallise sous deux formes allotropiques bien connues, la sphalérite et la chalcopyrite. Il a été montré expérimentalement que cette dernière est plus intéressante pour la conversion photovoltaïque. Elle assure à ce genre de matériaux une grande stabilité, leur permettant même de résister aux rayonnements cosmiques les plus élevés de l'espace. Il est donc nécessaire de l'obtenir sur les couches.

La chalcopyrite appartient au système tétragonal et dont la structure est ordonnée. Chaque atome de cuivre ou d'indium est entouré par quatre atomes de sélénium, tandis que chaque atome de sélénium a deux voisins de cuivre et deux voisins d'indium. La maille élémentaire renferme huit atomes de sélénium, quatre atomes de cuivre et quatre atomes d'indium.

La sphalérite possède une structure cubique face centrée de type zinc-blende avec une distribution aléatoire des cations [23].

La structure de la maille primitive du composé CIGS est donnée par la figure suivante :

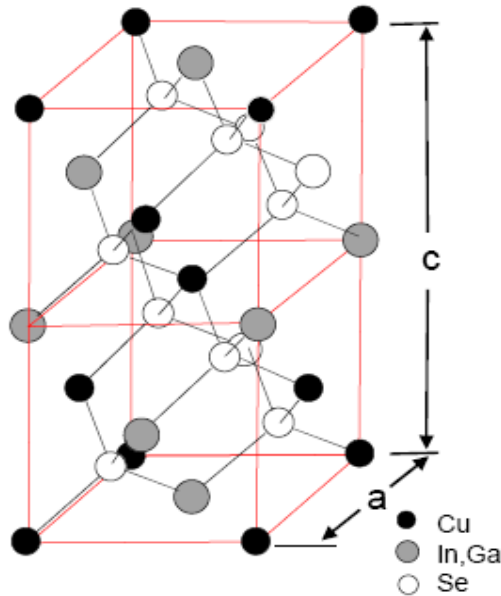


Figure (II.1) : Représentation schématique de la structure chalcopyrite [24].

Le CIGS cristallise dans un système spécifique dit “quadratique”, où : $a = b \neq c$, (a , b et c sont les paramètres de la maille primitive). Et $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Avec : (α) entre b et c , (β) entre a et c et (γ) entre b et a [25].

II.2.2 Propriétés optiques

❖ Coefficient d'absorption (α)

L'absorption optique d'un matériau reflète les bandes d'énergie de celui-ci. Un photon d'énergie E absorbé par le matériau induit des transitions électroniques entre les différents états. Ainsi, pour chaque photon absorbé, un transfert d'énergie E est réalisé du faisceau lumineux incident vers le milieu absorbant. Le coefficient d'absorption $\alpha(E)$ est défini par [26].

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha x) \quad (\text{II.1})$$

Où : $I(x)$ est l'intensité lumineuse traversant le matériau dans la direction x et I_0 l'intensité lumineuse incidente.

Une absorption maximum de la lumière sur tout le spectre solaire est l'une des propriétés les plus importantes que doit posséder un absorbeur pour les cellules solaires. Le CIGS à un coefficient d'absorption très élevé (10^5 cm^{-1}). Ce coefficient d'absorption se calcule à partir de l'équation :

$$\alpha = \left(\frac{1}{d}\right) \ln \left[\frac{(1-R^2)}{2T} + \left[\frac{(1-R^2)^4}{4T^2} + R^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{II.2})$$

Où : d est l'épaisseur de la couche, T la transmission et R la réflectivité de l'échantillon.

Dans les semi-conducteurs, l'absorption fait intervenir en plus des états délocalisés (bande de valence et de conduction), les états localisés des queues de bandes et de la bande interdite. Les spectres d'absorption présentent alors, en fonction de l'énergie, trois régions :

❖ Une queue à faible absorption à basse énergie. Une absorption résiduelle généralement associée à la présence de défauts localisés (impuretés, ...)

❖ Une queue exponentielle à moyenne énergie. Une absorption qui aurait pour origine des transitions qui impliquent les queues de bandes. Elle varie selon une loi exponentielle :

$$\alpha = c \cdot \exp\beta(h\nu) \quad (\text{II.3})$$

Une composante de forte absorption à haute énergie. Le coefficient d'absorption est lié à l'énergie du GAP et aux énergies des photons incidents selon la relation :

$$\alpha = \frac{A}{h\nu} (h\nu - E_g)^\beta \quad (\text{II.4})$$

Où E_g est l'énergie de la bande interdite, A est une constante, h la constante de Planck et

$\beta = 1/2, 3/2$ et 2 , respectivement pour une transition directe permise, une transition directe interdite et une transition indirecte permise. Dans le cas du CIGS, $\beta = 1/2$.

Le coefficient de l'absorption α pour le CuInSe_2 est très grand. Il est supérieur à 10^5 cm^{-1} pour $E_g = 1.04 \text{ eV}$ et des énergies de photons plus élevées [27].

❖ Constante optique (indice de réfraction)

Les courbes de (la figure (II.2)) représentent l'indice de réfraction complexe, $\eta = n + ik$ (n : Indice réel), pour des échantillons pour $x = 0$ et $0,2$ (x étant la concentration en Ga dans le CIGS). L'indice de réfraction complexe (k) peut être utilisé pour calculer d'autres paramètres optiques comme le coefficient d'absorption :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

k : Indice imaginaire.

λ : Longueur d'onde du photon.

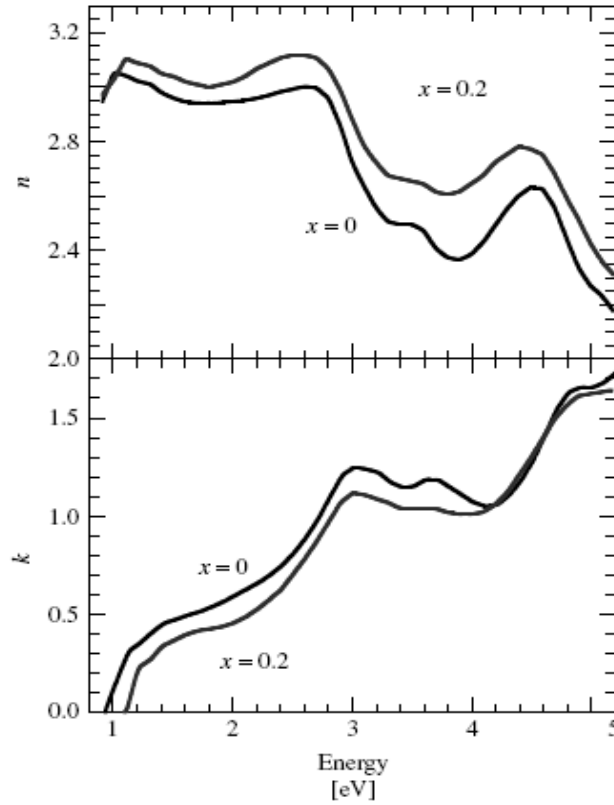


Figure (II.2) : Représentation des indices de réfraction (réelle et imaginaire) en fonction de l'énergie pour le CIGS, avec $x=0$ et $x=0.2$ [28].

❖ Largeur de la bande interdite (GAP)

Tous ces composés ont une bande d'énergie directe qui occupe une importance dans les matériaux photovoltaïques en couche mince comme des absorbeurs. La figure (II.3) montre la valeur de bande interdite en fonction de la valeur du paramètre de maille à de quelques chalcopyrites.

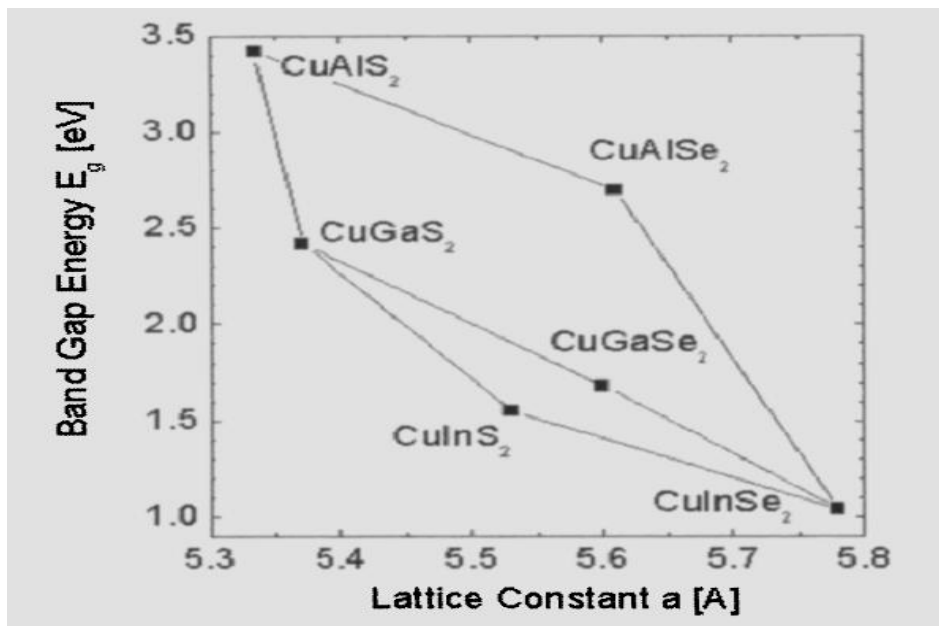


Figure (II.3): Largeur de bande interdite et paramètre de maille a de certaines chalcopyrites [29].

La valeur de E_g peut être déterminée à partir de la courbe $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$. L'extrapolation linéaire à $(\alpha h\nu)^2 = 0$ de cette courbe permet de déterminer le gap optique E_g .

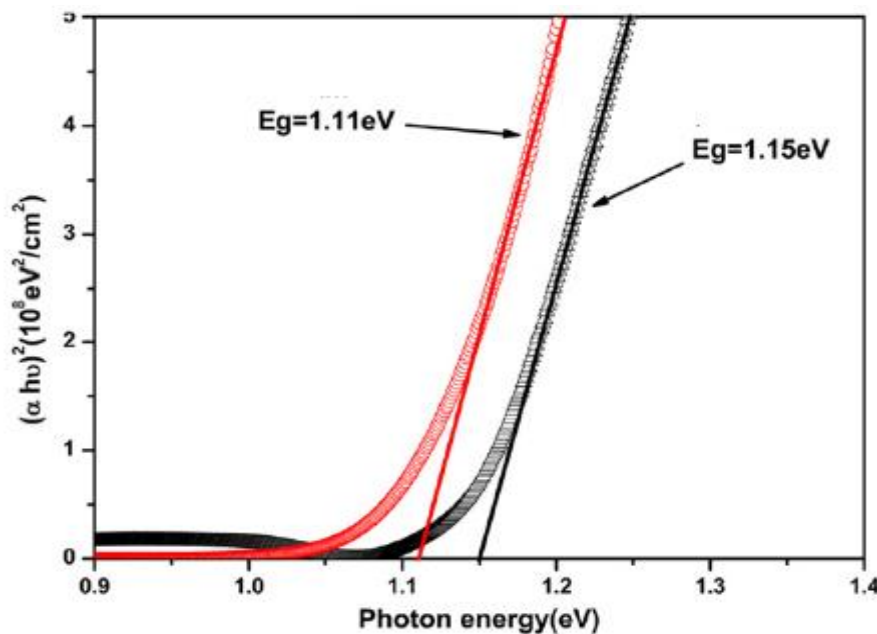


Figure (II.4) : Variation de $(\alpha h\nu)^2$ en fonction de $h\nu$ [30].

La figure (II.4) représente le spectre d'absorption de la couche CIGS pour $x=0.3$ à la température ambiante. Il est décrit par une dépendance linéaire de $(\alpha h\nu)^2$ en fonction de l'énergie des photons qui est indicatif de la largeur de la bande directe dans le CIS. La largeur de la bande interdite a été estimée par l'intersection de la droite d'extrapolation avec l'axe des énergies, soit:

$$E_g = 1,15 \text{ eV.}$$

La bande interdite du CIGS est influencée par le taux de concentration $[\text{Ga}]/[\text{In}]$ mais aussi par la teneur en Cu. Des mesures effectuées sur le GAP du CIS ont données une valeur de 1.01 eV à la température ambiante et une valeur de 1.65 eV pour le CGS. La bande interdite du CIGS est comprise entre ces deux valeurs.

Les transitions fondamentales pour différentes compositions peuvent être décrites par une fonction parabolique donnant la largeur de bande interdite E_g par :

$$E_g^{CIGS} = E_g^{CIS} (1-x) + E_g^{CGS} x - bx(1-x) \quad (\text{II.6})$$

Où $x = [\text{Ga}] / [\text{Ga} + \text{In}]$, représente la teneur en Ga du CIGS et $b = 0.15 - 0.24$ [21].

Et en termes d'énergie :

$$E_g (eV) = 1,01(1-x) + 1,65x - 0,15x(1-x) \quad (\text{II.7})$$

Pour un semi-conducteur à largeur de bande interdite directe, la dépendance en température suit la loi suivante :

$$E_g (T) = E_g (0) - aT^2 / (b + T) \quad (\text{II.8})$$

Où : a et b sont des constantes qui dépendent du matériau. En général, dE_g / dT est approximativement de l'ordre de : -2×10^{-4} eV /K.

II.2.3 Propriétés électriques

Tout écart à la périodicité du réseau ou à la structure est un défaut. Les défauts ponctuels usuels sont les impuretés, les sites vacants du réseau et les atomes en excès placés en dehors des positions normales du réseau.

Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour pouvoir augmenter la conductivité électrique, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts diminue la possibilité de transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion.

La nature des défauts usuels pour certains solides est assez bien connue. Beaucoup de propriétés importantes des solides sont déterminées autant par les défauts que par la nature du cristal, qui peut n'intervenir qu'en tant que matrice pour ces défauts. La conductivité de certains semi-conducteurs peut être entièrement due aux impuretés chimiques présentes dans le cristal.

Les défauts et les impuretés sont créés à l'intérieur de la bande interdite, ils peuvent être profonds ou peu profonds. Généralement, un état de défaut est dit peu profond si son niveau d'énergie est proche du minimum de la bande de conduction ou du maximum de la bande de valence. Dans le cas contraire, il est appelé niveau profond. Les niveaux peu profonds dopent le matériau, les niveaux profonds sont des pièges de porteurs libres, ils captent les porteurs apportés par le dopage. Il est nécessaire de connaître et contrôler les défauts et impuretés créant tous ces niveaux d'énergie, pour les introduire dans le matériau dans le cas des niveaux peu profonds, ou pour les éliminer dans le cas des niveaux profonds. L'étude des centres de défauts se fait souvent à partir de la luminescence et de mesures capacitives (Deep Level Transient Spectroscopy, DLTS), celles-ci étant surtout utilisées pour les niveaux profonds. Il existe deux grandes classes de défauts : les défauts ponctuels et les défauts cristallins.

II.2.3.1 Les défauts ponctuels

a) défauts intrinsèques

Ces défauts sont liés aux imperfections du réseau cristallin. Ils sont présents dans tous les cristaux quelle que soit la technique employée pour leur croissance. Ils introduisent des niveaux d'énergie peu profonde. Parmi ces défauts on distingue :

❖ Les lacunes

Les lacunes sont des nœuds du réseau où manquent des atomes. Elles se forment surtout à la surface des cristaux, d'où, grâce aux déplacements des atomes, elles diffusent dans le cristal. Dans les ternaires I-III-IV₂, les lacunes sont présentées par :

- Les vacances de cuivre V_{Cu} de type accepteur.
- Les vacances d'Indium V_{In} de type accepteur.
- Les vacances de sélénium V_{Se} de type donneur (avec une grande énergie déformation).

❖ Les atomes interstitiels

C'est un type de défaut dans lequel un atome est transféré d'un site du réseau à une position normalement non occupée par un atome. Dans les ternaires, il est représenté par : Cu_i , In_i ou Se_i .

❖ Les défauts substitutionnels

Ils correspondent à un échange de position entre deux atomes. Dans les ternaires, ces défauts sont représentés par : Cu_{In} , Cu_{Se} , In_{Cu} , In_{Se} , Se_{Cu} , Se_{In}

b) Les défauts extrinsèques

Les défauts extrinsèques ou défauts chimiques sont des impuretés pouvant s'introduire soit involontairement pendant la synthèse cristalline ou le recuit, soit occasionnellement pour effectuer des dopages. Leur présence peut induire des modifications de certaines propriétés physiques du cristal. La présence de ces défauts n'est pas désirable dans le matériau, ils peuvent dégrader ses performances. Leur importance peut être réduite si on utilise des éléments très purs lors de la synthèse cristalline. Les niveaux d'énergie introduits par ces défauts sont profonds.

II.2.3.2 Les défauts cristallins

Pour ce qui concerne les défauts cristallins, on peut citer : dislocations, défauts d'empilement, macles...etc. Les dislocations contribuent à la dégradation des durées de vie des porteurs minoritaires, mais il faut noter que des dislocations ont été observées sur des couches minces de CuInSe_2 ayant servi de matériaux de base des dispositifs présentant des rendements de conversion photovoltaïque supérieurs à 10 %. [25].

II.2.3.3 Les principaux défauts dans le composé ternaire CuInSe_2

Les échantillons légèrement riche en indium ou en gallium, constituent la plupart des cas, la déviation de la composition de la formule idéale $\text{Cu}_a\text{In}_b\text{Se}_c$ ($a=1$; $b=1$; $c=2$). Cette déviation peut être décrite par deux paramètres :

Δm et Δz : la déviation à la molécularité et la déviation de la valence stœchiométrique respectivement.

Δm et Δz sont définis comme suit :

$$\begin{cases} \Delta m = ([\text{Cu}] / [\text{In}]) - 1 \\ \Delta z = \{ 2[\text{Se}] / ([\text{Cu}] + [\text{In}]) \} - 1 \end{cases}$$

$[\text{Cu}]$, $[\text{In}]$ et $[\text{Se}]$ sont les concentrations totales du Cu, In et Se dans l'échantillon, respectivement. L'analyse de Δm et Δz donne les différentes conditions pour l'existence de toutes les paires de défauts majoritaires possibles dans un échantillon ternaire [31].

Δm : La non-molécularité affecte la concentration des défauts intrinsèques ioniques. Dans Le Cu (In, Ga) Se_2 on trouve $\Delta m > 0$. Tandis qu'un excès dans In_2Se_3 donne $\Delta m < 0$.

Δz : Les déviations de stœchiométrie devraient affecter la concentration de défauts électroniques. Δz détermine s'il y a un excès ($\Delta z > 0$) ou un manque ($\Delta z < 0$) de sélénium.

- ❖ Des échantillons avec $\Delta m < 0$ et $\Delta z < 0$ sont supposés avoir $(\text{In}_{\text{Cu}} - \text{V}_{\text{Cu}})$ ou In_{Cu} et V_{Se} comme défauts dominants.

- ❖ Des échantillons avec $\Delta m < 0$ et $\Delta z > 0$ sont supposés avoir In_{Cu} ou V_{Cu} comme défauts dominants [31].

Les tableaux suivants représentent les principaux défauts dans le ternaire CIS ainsi que leurs énergies d'activation.

Paire de défauts majoritaires		Déviation de la stœchiométrie (Δy)
Accepteur	Donneur	
V_{Cu}	In_{Cu}	<0
V_{Cu}	V_{Se}	<0
V_{Cu}	In_{i}	>0
Se_{i}	In_{Se}	>0
Se_{i}	In_{i}	>0

Tableau (II.1): Défauts majoritaires des paires dans le CIS [31].

Type des défauts intrinsèque		Energie de formation en eV
Vacants	V_{Se}	2.6
	V_{Cu}	2.3
	V_{In}	2.8
Interstitiels	Cu_{i}	4.4
	In_{i}	9.1
	Se_{i}	22.1
Antisites (substitution)	In_{Cu}	1.4
	Cu_{In}	1.4
	In_{Se}	5.0
	Se_{In}	5.5
	Se_{Cu}	7.5
	Cu_{Se}	7.5

Tableau (II.2) : Energie de formation des défauts intrinsèques dans le CIS [32].

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les propriétés fondamentales du matériau Cu(In,Ga)Se_2 , à savoir sa structure cristalline ainsi que ses propriétés électrique et optique. Nous avons ensuite donné de brèves définitions des différents défauts ponctuels (lacunes, atomes interstitiels, défauts substitutionnels), intrinsèque et extrinsèque.

Grace à ces caractéristiques, le matériau CIGS est devenu un semi-conducteur promoteur pour les applications photovoltaïques, ceci permet d'utiliser ce semi-conducteur comme matériaux de base dans la fabrication des composants électroniques et/ou des matériaux photovoltaïques pour satisfaire des besoins industriels spécifiques.

Dans le chapitre qui suit on va présenter l'outil de simulation utilisé (Atlas SILVACO-TCAD) pour la simulation de notre structure de la cellule Tandem à base de CIGS.

CHAPITRE III

LOGICIEL DE SIMULATION

SILVACO-ATLAS

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une description relativement détaillée sur SILVACO-ATLAS, notre étude est réalisée par l'application du logiciel de simulation numérique sophistiqué SILVACO-ATLAS. Le logiciel SILVACO comprend une gamme large d'étude intégrale dans l'élaboration et la caractérisation des cellules solaires. Nous, nous allons appliquer la partie SILVACO-ATLAS pour générer les résultats des caractéristiques électriques de la cellule solaire étudiée.

III.2 Définitions du SILVACO-ATLAS

Silvaco International est une société de logiciels qui offre des programmes pour la modélisation de tous les domaines de l'électronique, y compris les circuits analogiques et numériques. Cette société dispose de logiciel allant de la simple modélisation Spice jusqu'aux schémas des circuits intégrés de pointe et des outils d'extraction [33].

Le logiciel SILVACO-ATLAS est un simulateur de dispositifs semi-conducteurs basé sur les principes physiques à deux et à trois dimensions, ce qui signifie qu'il peut prédire les caractéristiques électriques qui sont associés aux structures physiques bien spécifiées et des conditions de polarisation. Ceci est obtenu en rapprochant le fonctionnement d'un dispositif sur une grille à deux ou trois dimensions, comprenant un certain nombre de points de grille appelés nœuds. En appliquant un ensemble d'équations différentielles, dérivées des lois de Maxwell, sur cette grille, vous pouvez simuler le transport des porteurs à travers une structure. Cela signifie que le rendement électrique d'un dispositif peut maintenant être modélisé en courant continu, alternatif ou en modes de fonctionnement transitoires [34].

ATLAS est conçu pour être utilisé avec les outils interactifs de VIRTUAL WAFER FAB (VWF). Il s'agit de DECKBUILD, TONYPLOT, DEVEDIT, MASKVIEWS et OPTIMIZER :

DECKBUILD: fournit un environnement d'exécution interactive.

TONYPLOT: fournit des capacités de visualisation scientifique.

DEVEDIT: est un outil interactif pour la spécification de la structure et du maillage ainsi que le raffinement.

MASKVIEWS: est un éditeur de masque pour le circuit intégré IC.

OPTIMIZER: supports d'optimisation à travers de multiples simulateurs.

Virtual Wafer Fabrication (VWF) aide à effectuer la simulation efficacement sans avoir recours à des logiciels tiers. De la figure (III.1), on voit que Silvaco avec VWF propose des logiciels de simulation puissante.

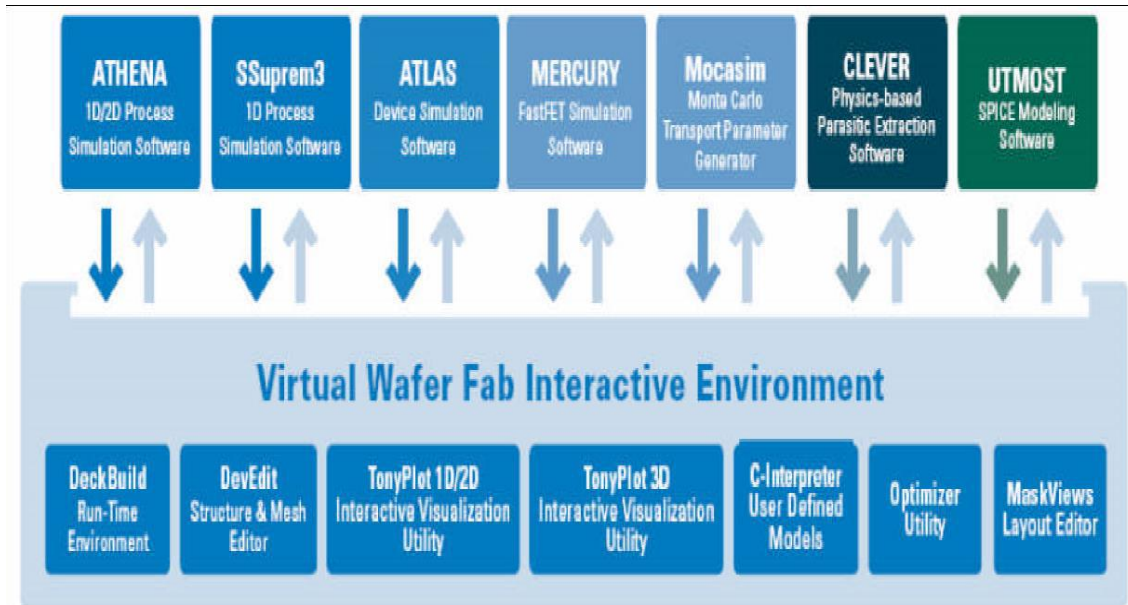


Figure (III.1) : Environnement Virtual Wafer Fabrication [35].

III.3 Entrées et Sorties dans SILVACO ATLAS

La figure (III.2) présente les types d'informations qui entrent et sortent d'ATLAS. La plupart des simulations sur ATLAS utilisent deux entrées : un fichier texte qui contient des commandes pour ATLAS à exécuter et un fichier de structure qui définit la structure qui sera simulée. ATLAS produit trois types de sortie. La sortie d'exécution (Runtime output) fournit un guide pour le progrès des simulations en cours d'exécution, et c'est là que les messages d'erreur et les messages d'avertissement apparaissent. Les fichiers Log (Log-files) stockent toutes les tensions et courants terminaux de l'analyse de dispositif, et les fichiers de solution (Solution files) stockent les données deux et tridimensionnelles relatives à la valeur des variables de solution à l'intérieur du dispositif pour un seul point de polarisation [36].

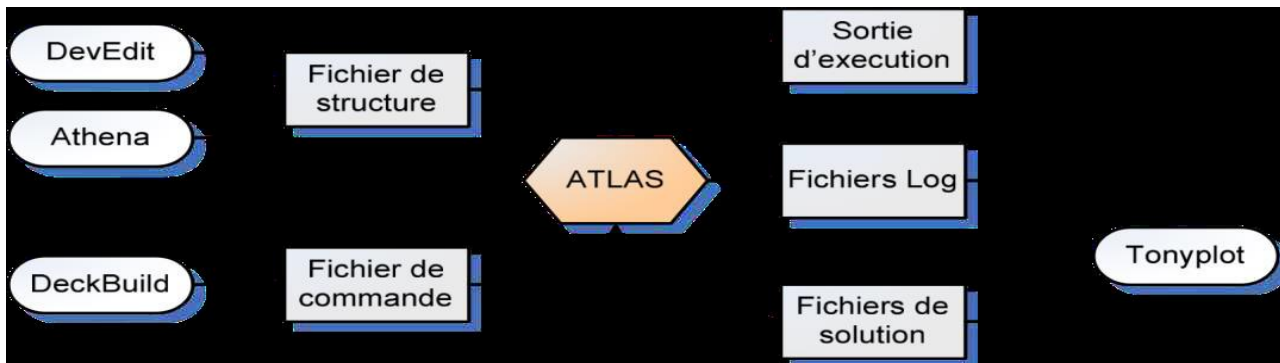


Figure (III.2) : ATLAS Entrées et Sorties [34].

III.3.1 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 (III.3)) [37].

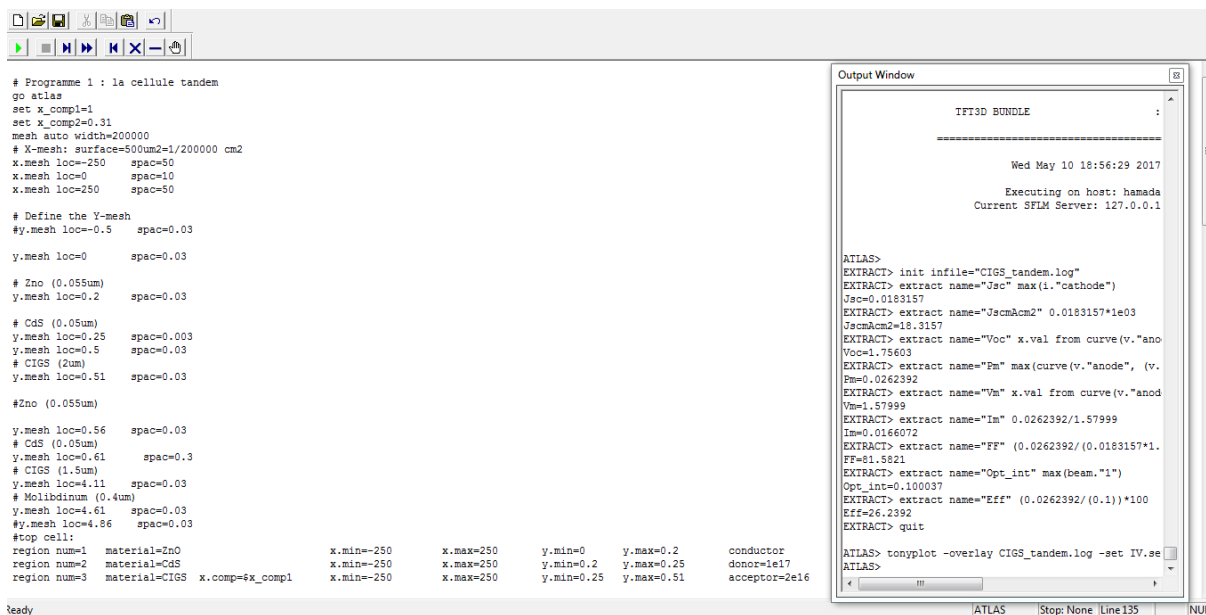


Figure (III.3) : Menu de Commandes de Deckbuild.

III.3.2 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 (III.4)) [38].

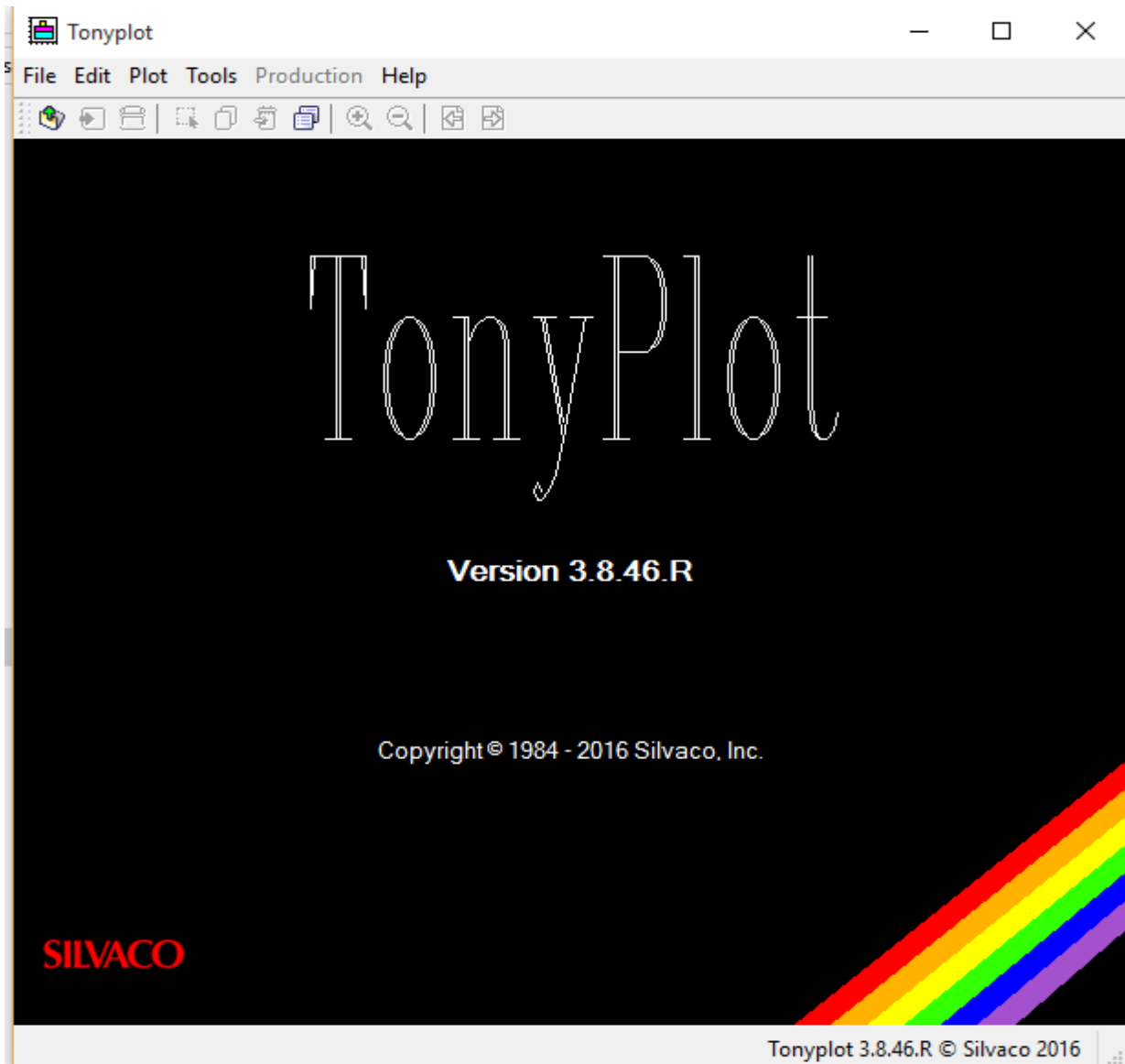


Figure (III.4) : Fenêtre de Base de TonyPlot.

III.4 Structure d'entrée dans SILVACO ATLAS

Un fichier de commande ATLAS est une liste de commandes pour ATLAS à exécuter. Cette liste est stockée sous forme de fichier texte ASCII qui peut être préparé dans DECKBUILD ou en utilisant n'importe quel éditeur de texte. La préparation du fichier d'entrée en DECKBUILD est préférée, et peut être facilitée par l'utilisation appropriée du menu Commandes de DECKBUILD. Le fichier d'entrée contient une séquence d'instructions. Chaque déclaration se compose d'un mot clé qui identifie la déclaration et un ensemble de paramètres. Le format général est :

<STATEMENT> <PARAMETER>=<VALUE>

Quelques conseils sur la structure appropriée des déclarations sont énumérés ci-dessous :

1. La déclaration doit venir en premier, mais après cela, l'ordre des paramètres dans une instruction n'est pas important.
2. Il est seulement nécessaire d'utiliser suffisamment de lettres de n'importe quel paramètre pour le distinguer de tout autre paramètre sur la même déclaration. Ainsi, le paramètre Concentration peut être raccourci à Conc. Cependant, le paramètre Région ne peut pas être réduit à R car il ya également le paramètre RATIO associé à la déclaration du dopage.
3. Les Valeurs Logiques peuvent être explicitement défini comme faux (False) en les faisant précéder par le symbole \wedge .
4. Toute ligne commençant par # est ignorée. Ces lignes sont utilisées comme des commentaires.
5. ATLAS peut lire jusqu'à 256 caractères sur une ligne. Cependant, il est préférable de répartir les longues déclarations d'entrée sur plusieurs lignes pour rendre le fichier d'entrée plus lisible. Le caractère \ à la fin d'une ligne indique la continuation.

L'ordre dans lequel les déclarations se produisent dans un fichier d'entrée d'ATLAS est important. Il y a cinq groupes de déclarations, et ceux-ci doivent se produire dans l'ordre correct. Ces groupes sont indiqués dans le tableau (III.1).

Chaque fichier d'entrée doit contenir ces cinq groupes en ordre. Sinon, cela entraînera généralement un message d'erreur et la fin du programme, mais il pourrait également conduire à un mauvais fonctionnement du programme. Par exemple, les paramètres matériels ou modèles figurant dans le mauvais ordre ne peuvent pas être utilisés dans les calculs. L'ordre des déclarations dans la définition du maillage, la définition structurelle, et les groupes de la solution est également important [39].

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 (III.1) : Groupes de Commande **ATLAS** avec les Déclarations de Base dans Chaque Groupe.

III.5 Contour général de construction d'ATLAS

Dans cette simulation, la cellule solaire à double-jonctions à base de CiGs est définie graphiquement dans ATLAS via l'interface Deckbuild. Afin de bien définir une cellule, il est nécessaire d'entrer non seulement les dimensions, mais aussi les propriétés des matériaux. L'organigramme suivant sur la figure (III.5) peut clarifier les étapes pour construire chaque modèle.

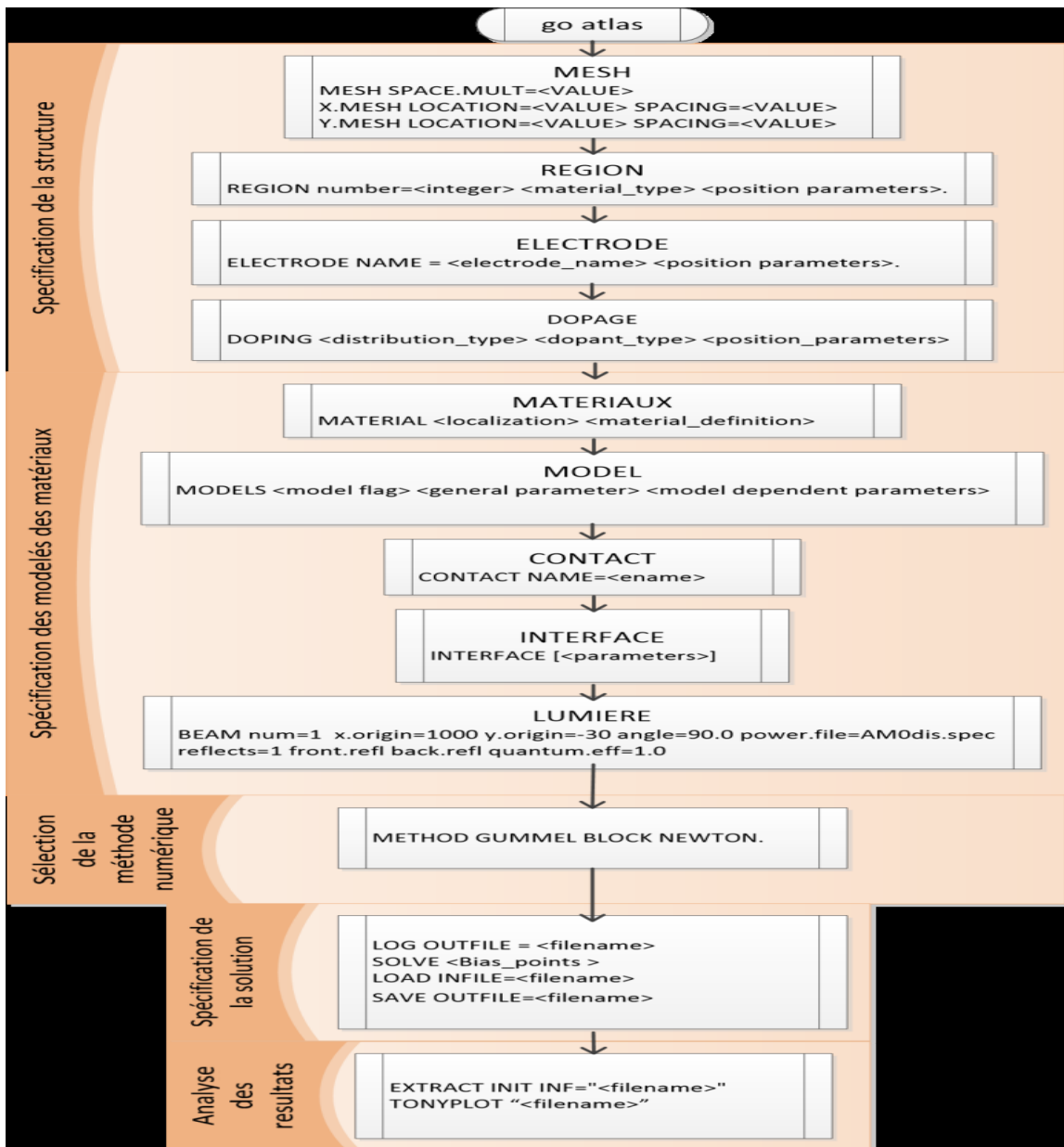


Figure (III.5) : Organigramme des Étapes de Construction d'un Model sur ATLAS.

III.5.1 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 [36].

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 [40].

Un exemple de maillage créé dans **ATLAS** est illustré dans (la figure (III.6)).

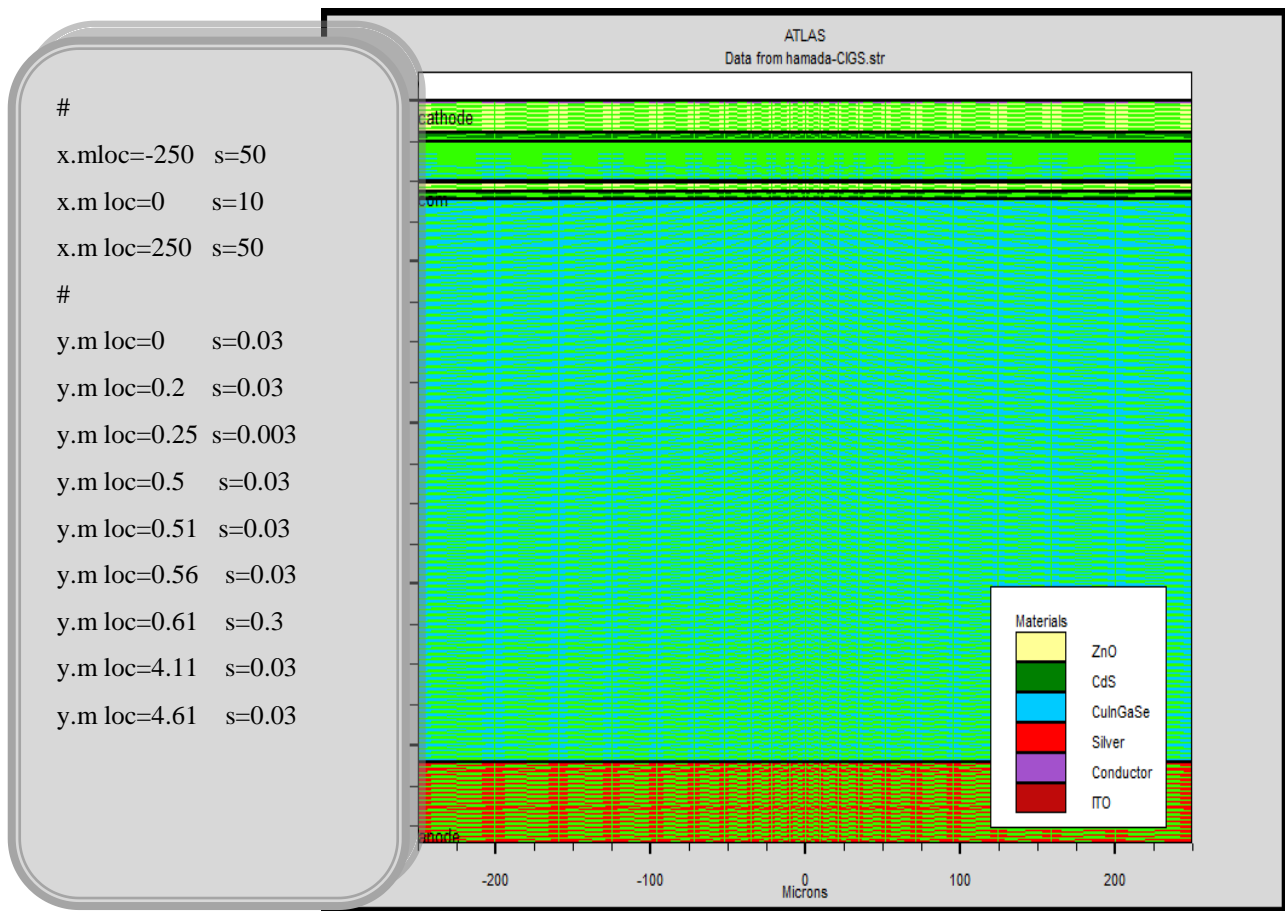


Figure (III.6) : Atlas Mesh.

III.5.2 Régions

La déclaration de la région est utilisée pour séparer l'instruction du maillage initial en blocs distincts et définit les paramètres matériels initiaux qui peuvent être désignés plus tard par des numéros de région. Tous les domaines maillés d'une structure doivent être assignés à une région et les régions doivent être ordonnées de la plus basse vers la plus élevée. Par exemple, la région 5 ne peut pas être définie avant la région 4 [41].

```

region num=1 material=ZnO y.min=0 y.max=0.2 conductor
region num=2 material=CdS y.min=0.2 y.max=0.25 donor=1e17
region num=3 material=CIGS x.comp=1 y.min=0.25 y.max=0.51 acceptor=2e16
region num=4 material=ZnO y.min=0.51 y.max=0.56 conductor
region num=5 material=CdS y.min=0.56 y.max=0.61 donor=2e18
region num=6 material=CIGS x.comp=0.31 y.min=0.61 y.max=4.11 acceptor=8e16
region num=7 material=Molybdenum y.min=4.11 y.max=4.61 conductor

```

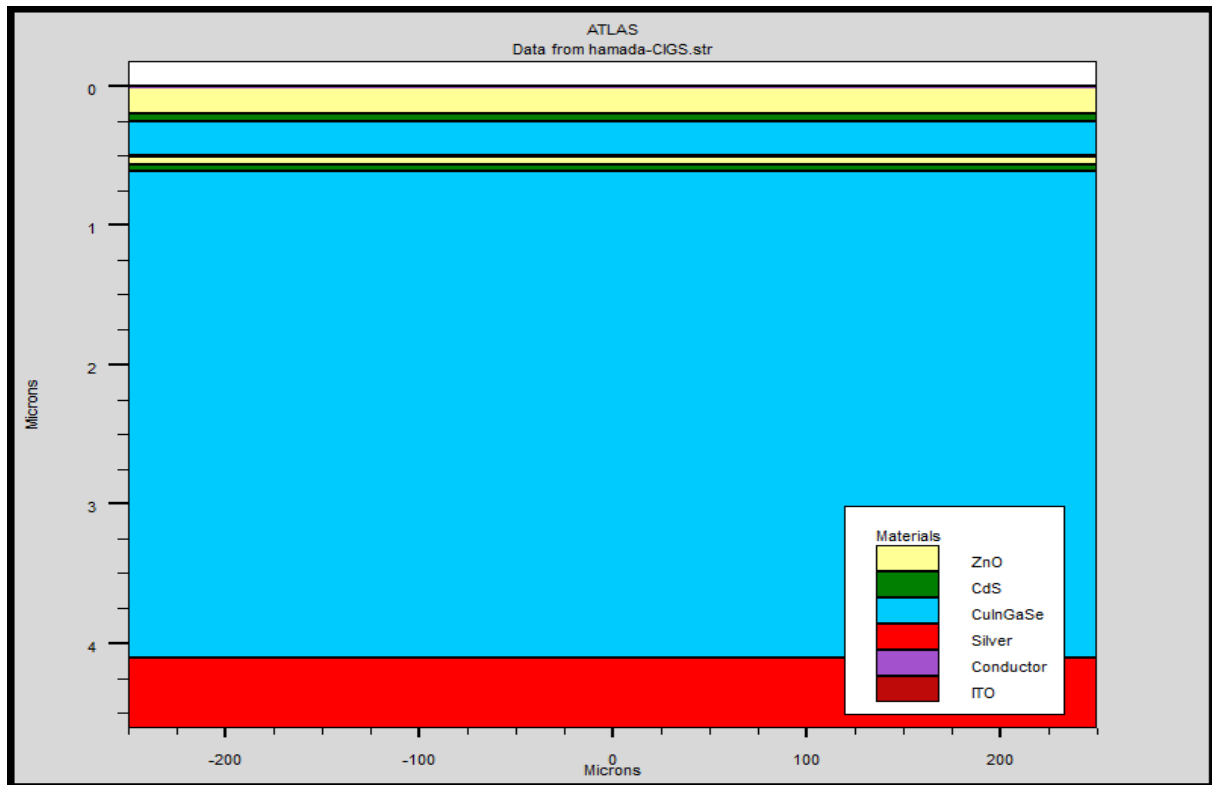


Figure (III -7) : Régions avec les matériaux définis.

III.5.3 Electrode

La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode [42]. Cependant, SILVACO ATLAS a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définis [35].

D'après la figure (III.8), la déclaration des électrodes est définie pour l'anode et la cathode. A noter que la cathode est définie avec de l'argent en tant que matériau. La localisation par x et y correspond à la région 6 précédemment définie (figure (III.7)). L'anode est définie avec l'Aluminium comme matériau et définie dans la région 5 (figure (III.7)).

```
# Electrodes on top and bottom
elec num=1 name=cathode top
elec num=2 name=anode bottom
elec num=3 name=com y.min=0.5 y.max=0.51 mat=ITO
```

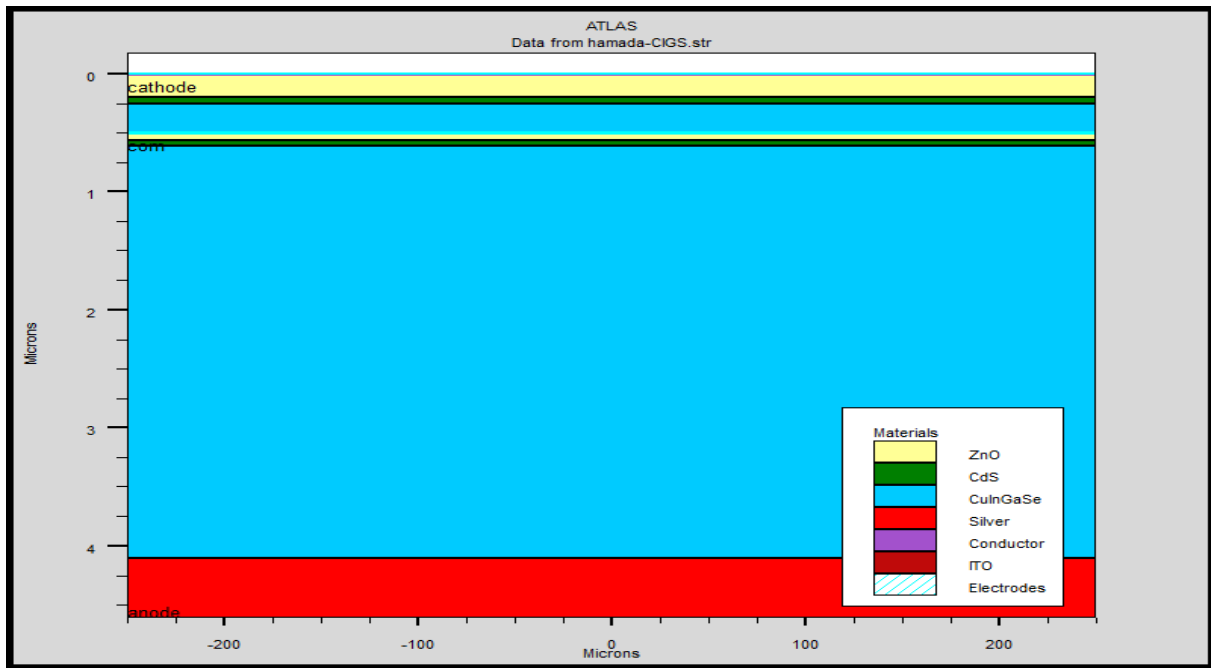


Figure (III.8) : Déclaration des Électrodes dans ATLAS.

III.5.4 Dopage

Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type n ou p, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien, etc.... [42].

Dans (la figure (III.9)), les types et les niveaux de dopage sont définis.

```
doping uniform region=1 conductor
doping uniform region=2 n.type concentration= 1e17
doping uniform region=3 p.type concentration= 2e16
doping uniform region=4 conductor
doping uniform region=5 n.type concentration= 2e18
doping uniform region=6 p.type concentration= 8e16
doping uniform region=7 conductor
```

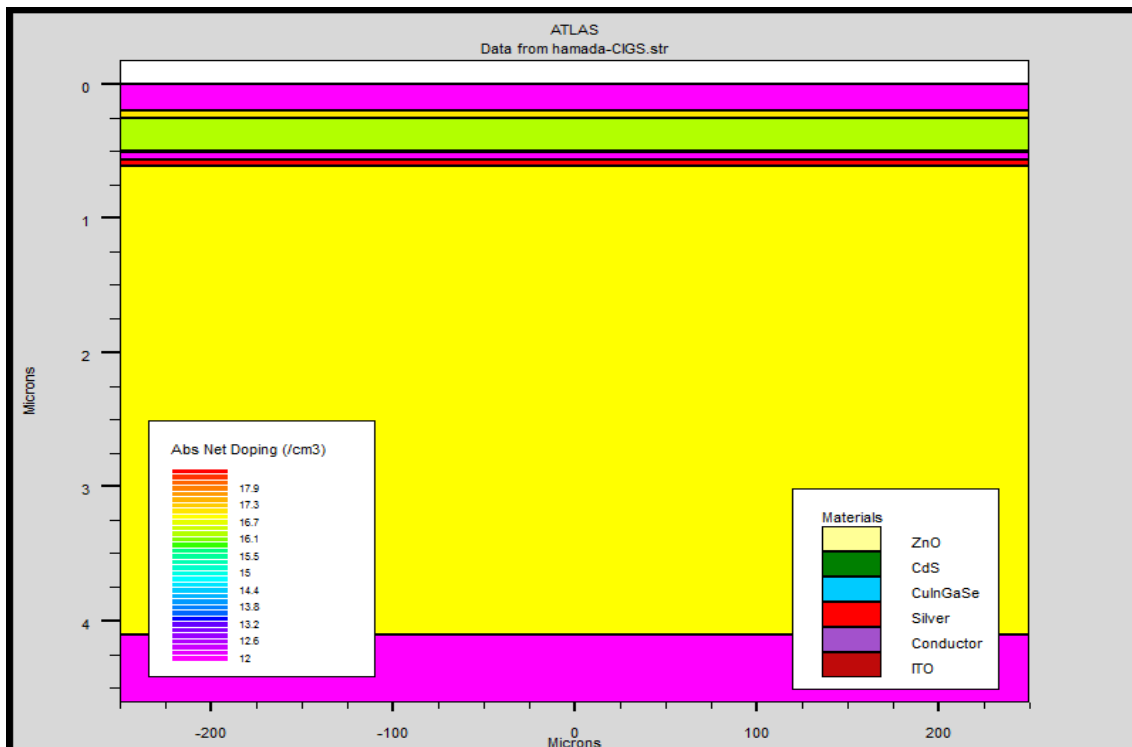


Figure (III.9) : ATLAS Dopage.

III.5.5 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 [34].

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 [43].

III.5.6 Modèles physiques

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories : la mobilité, la recombinaison, les statistiques des porteurs, l'ionisation par impact, et l'effet tunnel.

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple ci-dessous active plusieurs modèles.

MODELS CONMOB FLDMOB SRH

CONMOB est le modèle de mobilité dépendant de la concentration du dopage. FLDMOB est le modèle de mobilité dépendant du champ électrique parallèle. SRH est le modèle Shockley-Read-Hall pour les statistiques des porteurs de charge [35].

III.5.7 Contacts

Indique les attributs physiques d'une électrode (résistivité, travail de sortie...) [42].

III.5.8 Interface

Indique les paramètres d'interface aux frontières des semi-conducteurs ou des isolants. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés là où ils sont déjà indiqués [42].

III.5.9 Lumière

Lorsque l'éclairage est important pour un dispositif (comme dans les cellules solaires), il y a la possibilité d'utiliser un certain nombre de sources lumineuses et d'ajuster leur emplacement, l'orientation et l'intensité. Le spectre de la lumière peut être décrit avec tous les détails nécessaires [44].

III.5.10 Méthode de la solution

ATLAS contient plusieurs méthodes numériques pour calculer les solutions aux problèmes de dispositif à semi-conducteur. Il existe trois principaux types de méthodes numériques. La première méthode est la méthode de GUMMEL qui est utile lorsque le système d'équations est faiblement couplé mais a seulement la convergence linéaire. La méthode suivante est méthode de NEWTON, qui est utile lorsque le système d'équations est fortement couplé et a convergence quadratique. Cette méthode prend plus de temps pour résoudre les quantités qui sont essentiellement constantes ou faiblement couplées et exige également une estimation initiale plus précise du problème pour obtenir la convergence. La dernière méthode est la méthode des blocs qui peut fournir des temps de simulation plus rapides [36].

III.5.11 Spécification de la solution

Cette section de la plate-forme d'entrée est où la simulation fait ses calculs à résoudre pour le dispositif spécifié. Elle est divisée en quatre parties : Log, Solve, Load, et Save.

L'instruction Log crée le fichier de sauvegarde de l'état d'équilibre, transitoires ou DC, données déterminées par une déclaration Solve après la déclaration Log.

La déclaration Solve suit une instruction Log et calcule les informations relatives à un ou plusieurs points de polarisation.

Les instructions Load et Save sont utilisés ensemble pour aider à créer de meilleures estimations initiales pour les points de polarisation. L'instruction **Save** sert d'abord à stocker toutes les informations sur les points de polarisation, et plus tard l'instruction Load est utilisée pour récupérer ces informations et l'aide dans la solution [36].

III.5.12 Extraction des données et traçage

Une fois qu'une solution est trouvée pour le problème du dispositif, l'information peut être visualisée graphiquement avec TONYPLOT. En plus, les paramètres des dispositifs peuvent être extraits par la déclaration EXTRACT [35].

III.6 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 et générer ainsi ses caractéristiques électriques comme la caractéristique densité de courant-tension (**I-V**) et la réponse spectrale.

Dans le chapitre qui suit on va présenter la simulation de la structure Tandem proposée à base de CIGS, les résultats des performances photovoltaïques obtenus et la discussion.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.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 tandem à base de CGS/CIGS 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 (J-V) dans l'obscurité et sous éclairnement, 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_{OC}), le facteur de forme (FF), la puissance maximale (P_{max}) et le rendement de conversion photovoltaïque (η).

IV.2 Méthode d'optimisation de la cellule tandem

Une fois la validité du code Atlas SILVACO[®] vérifiée, deux cellules CIGS différentes ont été créées en utilisant le même code pour être utilisé comme une cellule supérieure et inférieure dans la structure tandem. Les cellules réalisées ont été validées après une certaines optimisations des paramètres géométriques (les épaisseurs des différentes couches), les paramètres physiques et électriques (concentrations des porteurs, mobilités et affinités) des cellules individuelles. La cellule tandem finale était composée d'une cellule supérieure à base de CGS et une cellule inférieure à base de $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ (CIGS) avec $x = 0,3$. La cellule supérieure avait une faible épaisseur et un large écart de bande comparativement à la cellule inférieure (Tableau IV.1). Dans ce qui suit, on va présenter la simulation des deux cellules (supérieure et inférieure) individuellement, afin d'assurer le bon fonctionnement des deux structures avant de les mettre dans la structure tandem.

IV.3 Paramètres de la cellule individuelle CIGS

La structure de la cellule solaire individuelle à base du composé CIGS est constituée par: une couche fenêtre optique conductrice et transparente de ZnO, une couche buffer de CdS et l'absorbeur à base de CIGS ($x = 0,3$), le contact arrière est fixé comme un métal (Molybdène). Les paramètres utilisés sont présentés dans le Tableau (IV.1).

Après la simulation, la structure de la cellule obtenue à l'aide d'Atlas SILVACO et la courbe de la caractéristique (I-V) sont présentés dans la figure (IV.1) et la figure (IV.2), respectivement.

	ZnO	n-CdS	p-CIGS
E_g (eV)	3.3	2.4	1.2
Épaisseur (nm)	55	50	2000
ϵ_r	9	10	13.6
χ_e (eV)	4	3.75	3.89
μ_n (cm ² /Vs)	50	10	300
μ_p (cm ² /Vs)	5	1	30
N_A (1/cm ³)	0	0	8.10^{16}
N_D (1/cm ³)	5.10^{17}	5.10^{17}	0
N_C (1/cm ³)	$2.2.10^{18}$	$2.2.10^{18}$	$2.2.10^{18}$
N_V (1/cm ³)	$1.8.10^{19}$	$1.8.10^{19}$	$1.8.10^{19}$

Tableau (IV.1) : paramètres de base de la cellule individuelle CIGS [45].

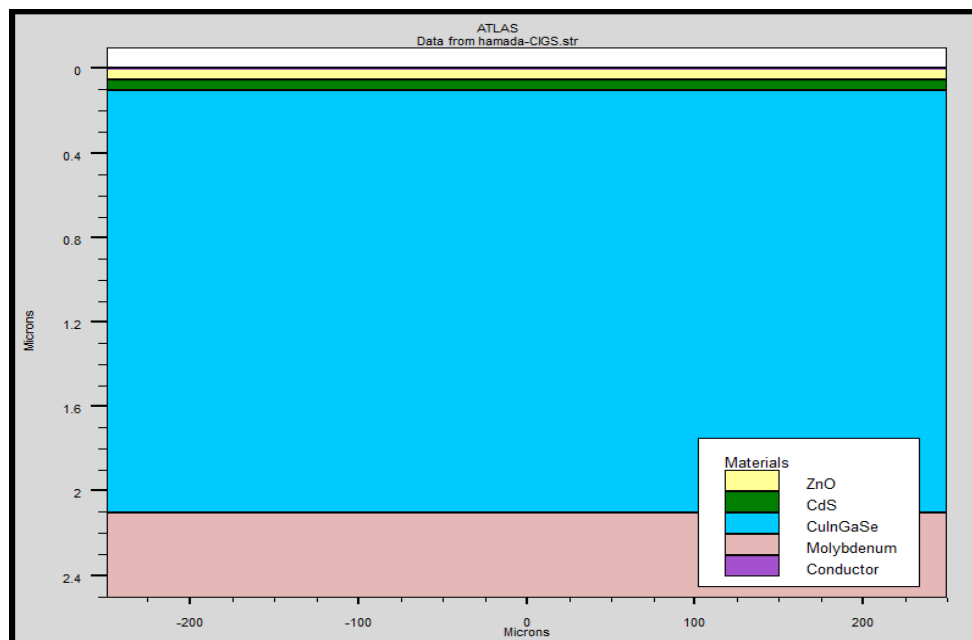


Figure (IV.1): Structure de la cellule solaire CIGS individuelle.

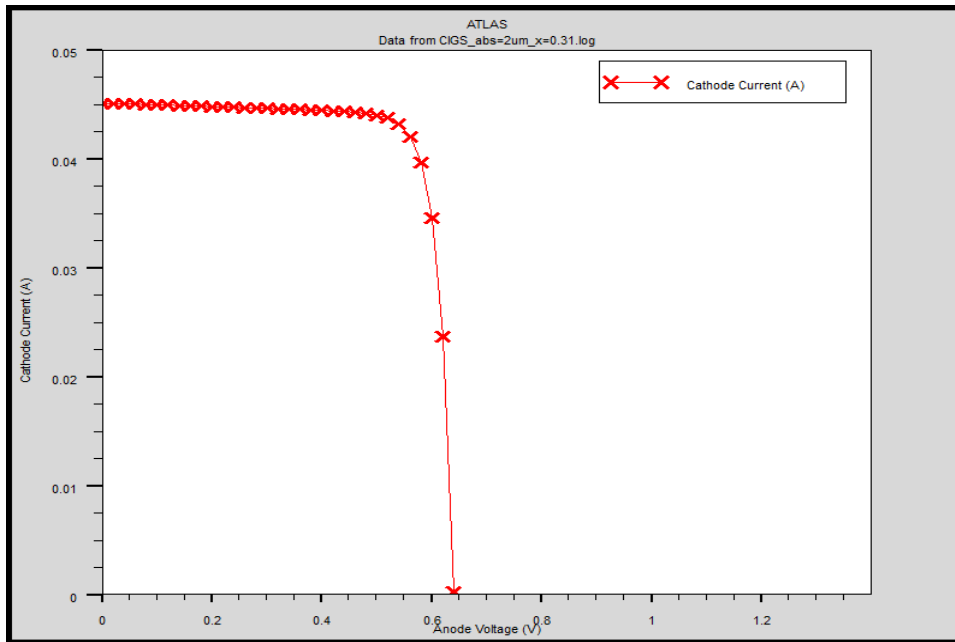


Figure (IV.2) : Courbe (I-V) pour une cellule solaire CIGS.

Les performances de la cellule CIGS simulé sous éclairement AM1.5 comparées avec des résultats expérimentaux sont présentées dans le Tableau (IV.2).

	Notre simulation	Résultats expérimental [46]
Epaisseur (nm)	2000	-
Ga/(In+Ga)	0.31	~ 0.3
E_g (eV)	1.1635	1.27
V_{co} (V)	0.640087	0.752
J_{cc} (mA/cm ²)	45.0838	31.2
FF (%)	81.5814	77.73
Rendement (%)	23.54	18.3

Tableau (IV.2) : Paramètres photovoltaïques de la cellule CIGS.

On remarque que la différence de ces paramètres réside sur le fort rendement obtenu dans la simulation, qui est due au fort courant de court-circuit. Le simulateur ATLASTM utilise toute la surface de la couche supérieure en tant que contact, contrairement à la réalité, où la grille de contacte est utilisée en haut de la cellule comme un point.

IV.4 Effet de galium dans la couche CIGS

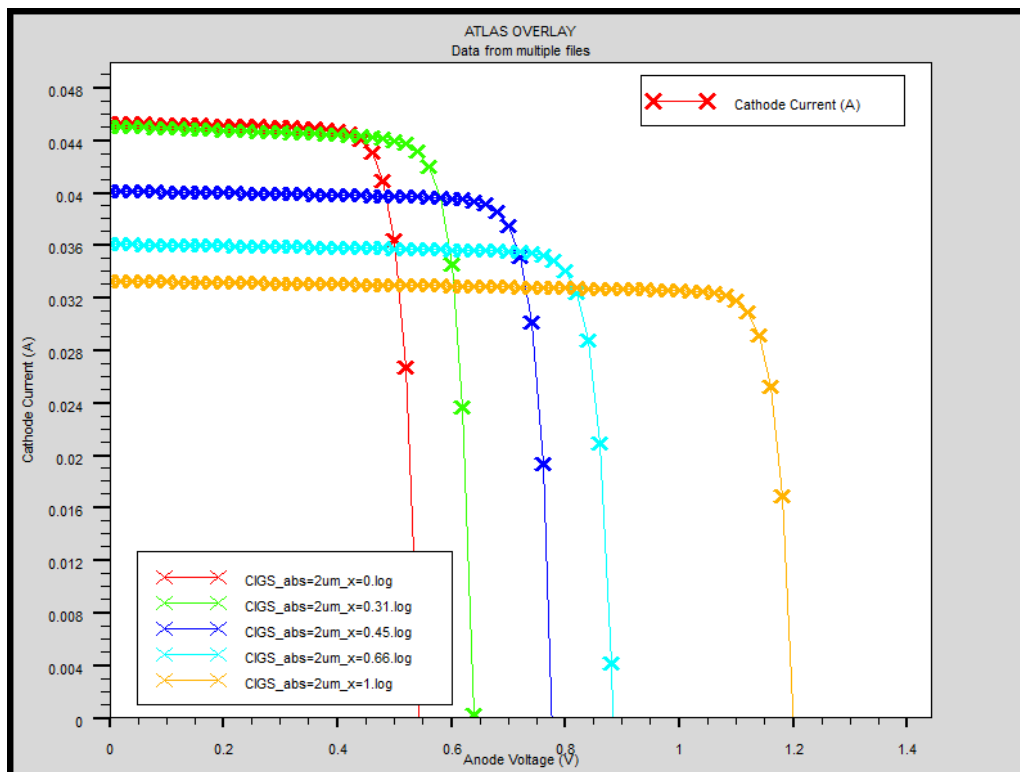
a) Cas de l'épaisseur de CIGS = 2 μm

La variation de la concentration du galium dans le composé quaternaire CIGS induit à une variation de l'énergie de gap de la couche CIGS. Pour calculer l'énergie de gap de notre absorbeur, en fonction de la concentration x , on a utilisé la formule suivante [47]:

$$E_g(x) = 1.011 + 0.664x - 0.249x(1-x) \quad (\text{IV.1})$$

Après la simulation, on a trouvé des différentes courbes de la caractéristique (I-V) pour que x prend les valeurs suivantes : 0, 0.31, 0.45, 0.66 et 1. L'épaisseur de l'absorbeur CIGS reste fixe pendant les calculs et égale à 2000 nm. Les résultats sont affichés dans la figure (IV.3).

Les performances de la cellule tirées d'après les courbes de la caractéristique (I-V) sont récapitulées dans le tableau (IV.3). Avec l'augmentation de la concentration du galium x dans le composé CIGS, on remarque une légère diminution du courant de court-circuit et une large augmentation de la tension de circuit-ouvert. Le rendement augmente rapidement de 19 à 34%.



Figures (IV.3) : Caractéristiques (I-V) de la cellule CIGS avec concentration du galium variable.

Epaisseur de CIGS =2 μm					
Ga /(In+Ga)	0	0.31	0.45	0.66	1
V _{co} (V)	0.542479	0.640087	0.776473	0.88227	1.19874
J _{cc} (mA/cm ²)	45.3505	45.0838	40.161	36.1035	33.2892
FF (%)	80.5225	81.5814	84.2498	85.5178	87.5861
Rendement (%)	19.8099	23.5424	26.2724	27.24	34.9513

Tableau (IV.3) : Les paramètres photovoltaïques de la cellule CIGS pour différentes valeurs de Ga/(Ga+In).

b) Cas de l'épaisseur de CIGS = 1.5 μm

L'épaisseur de l'absorbeur CIGS dans ce cas est fixé à 1500 nm. Après la simulation, on a trouvé une série des courbes de la caractéristique (I-V) pour que x prend les valeurs suivantes : 0, 0.31, 0.45, 0.66 et 1. Les résultats sont affichés dans la figure (IV.4).

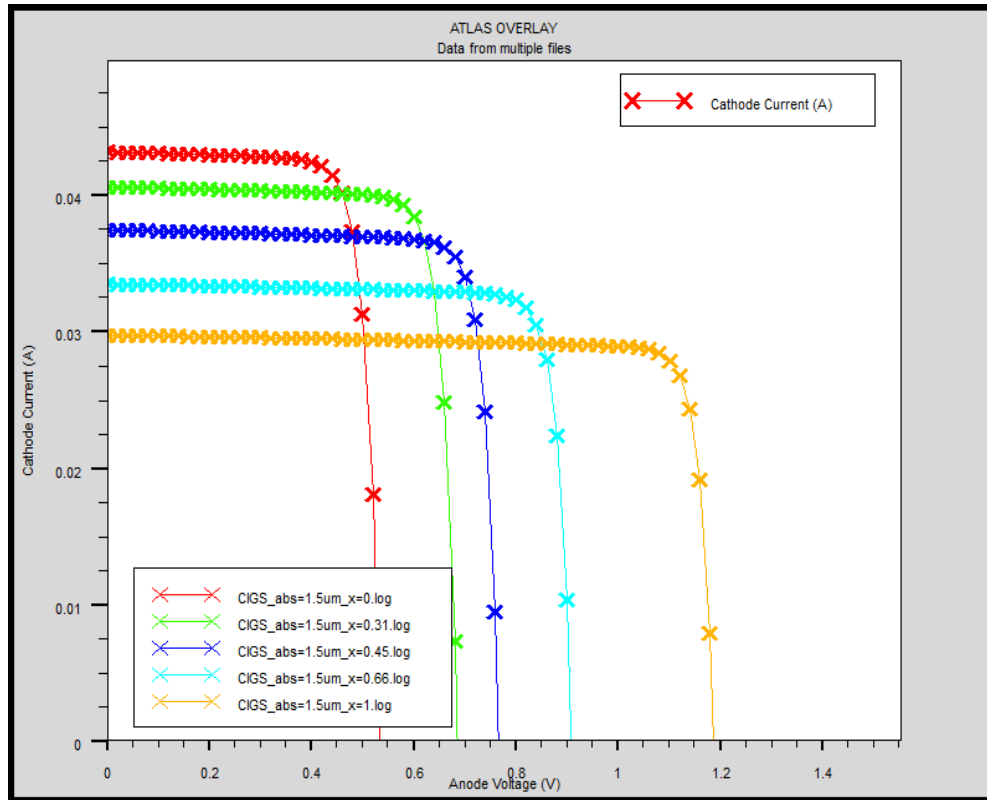
Les performances de la cellule tirées d'après les courbes de la caractéristique (I-V) sont récapitulées dans le tableau (IV.4). Avec l'augmentation de la concentration du galium x dans le composé CIGS, on remarque une légère diminution du courant de court-circuit et une large augmentation de la tension de circuit-ouvert. Le rendement augmente rapidement de 18.5 à 30.7%.

La seule remarque importante ici, est que dans ce cas (1500 nm) le rendement subit une diminution de 13% de la valeur obtenue dans le premier cas (2000 nm), ceci dit qu'il y a une diminution de l'absorption dans la couche CIGS.

c) Cas de l'épaisseur faible de CIGS = 0.2 μm

Une faible épaisseur de l'absorbeur CIGS dans ce cas est fixée à 200 nm. Après la simulation, on a trouvé une série des courbes de la caractéristique (I-V) pour que x prend les valeurs suivantes : 0, 0.31, 0.45, 0.66 et 1. Les résultats sont affichés dans la figure (IV.5).

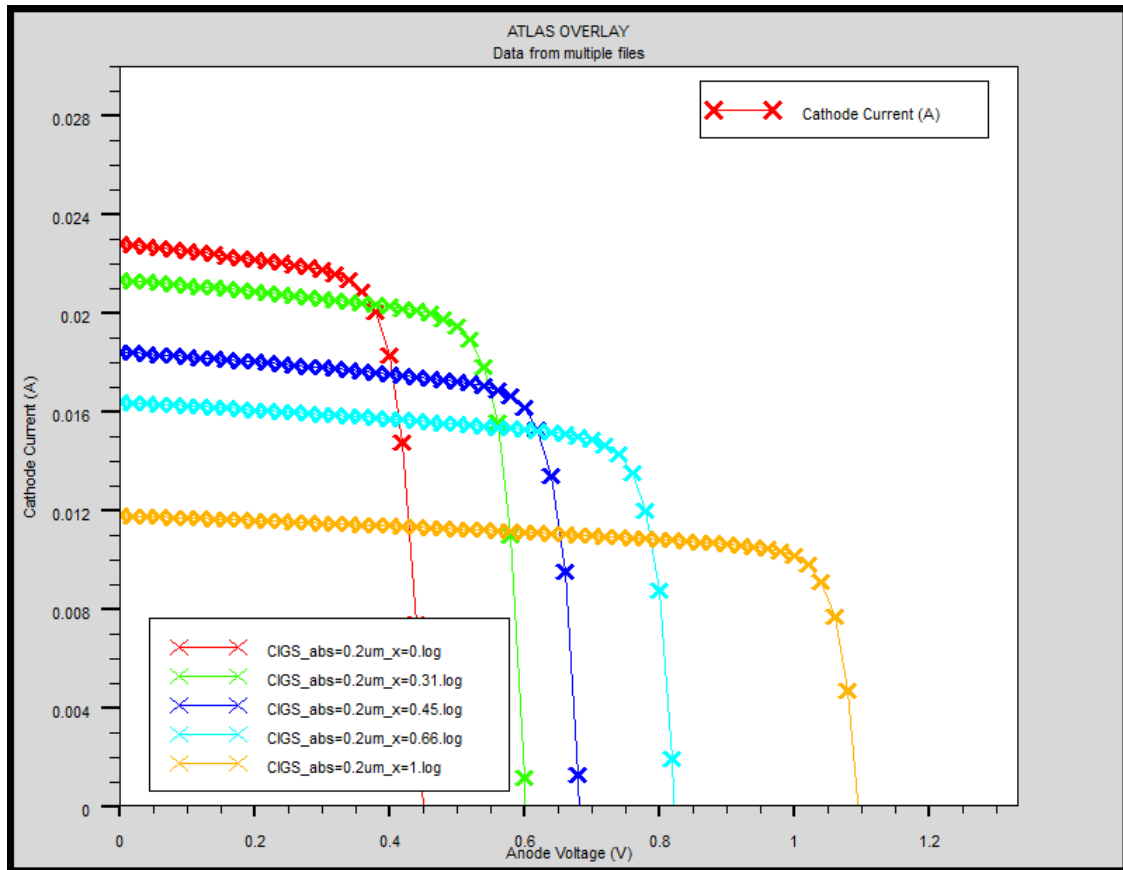
Les performances de la cellule tirées d'après les courbes de la caractéristique (I-V) sont récapitulées dans le tableau (IV.5). Presque les mêmes remarques sont tirées après la variation de la concentration du galium x dans le composé CIGS. Le rendement augmente rapidement de 7.6 à 10.1%. On remarque qu'il y a une diminution de rendement de 71% de la valeur initiale obtenue dans le premier cas (2000 nm). ceci dit qu'il y a une diminution de l'absorption dans la couche CIGS.



Figures (IV.4) : Caractéristiques (I-V) de la cellule CIGS avec différentes concentrations du gallium x et 1500 nm épaisseur de l'absorbeur.

Epaisseur de CIGS = 1.5 μ m					
Ga/(In+Ga)	0	0.31	0.45	0.66	1
V _{co} (V)	0.532757	0.683831	0.765988	0.907967	1.18646
J _{cc} (mA/cm ²)	43.25	40.6849	37.5186	33.5412	29.7922
FF (%)	80.2908	83.0197	84.0915	85.5652	86.9655
Rendement (%)	18.5004	23.0974	24.1669	26.0583	30.7399

Tableau (IV.4) : Les paramètres photovoltaïques de la cellule CIGS pour différentes valeurs de Ga/(Ga+In).



Figures (IV.5) : Caractéristiques (I-V) de la cellule CIGS avec différentes concentrations du gallium x et pour 200 nm comme épaisseur de l'absorbeur.

Epaisseur de CIGS =0.2 μm					
$Ga / (In+Ga)$	0	0.31	0.45	0.66	1
V_{co} (V)	0.449435	0.601132	0.681483	0.822703	1.09467
J_{cc} (mA/cm ²)	22.7832	21.3335	18.4053	16.3646	11.7672
FF (%)	74.2241	76.6683	77.275	78.3588	78.8777
Rendement (%)	7.60023	9.83213	9.69252	10.5496	10.1604

Tableau (IV.5) : Les paramètres photovoltaïques de la cellule CIGS pour différentes valeurs de $Ga/(Ga+In)$.

IV.5 Cellule solaire à double-jonctions : Structure tandem CGS/CIGS

Une cellule photovoltaïque tandem est un empilement de deux cellules simples. En combinant deux cellules (une cellule individuelle à grand gap à base de CGS et une autre cellule à base de petit gap à base de CIGS) absorbant dans des domaines spectraux différents, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples individuelles distinctes. Elle a une sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde, et un rendement élevé. Son coût est cependant plus élevé et sa réalisation plus complexe en raison de la difficulté de réalisation.

Une fois qu'on met l'empilement de deux cellules individuelles :

- ✚ la première cellule, s'appelle : Cellule supérieure 'en anglais : Top cell' est une cellule à grand gap (1.7 eV) à base de CGS ;
- ✚ la deuxième cellule, s'appelle : Cellule inférieure 'en anglais : Bottom cell' est une cellule à grand gap variable à base de CIGS (1.01 - 1.7 eV).

Le plus important dans les cellules tandems est l'épaisseur de l'absorbeur de la cellule supérieure. On va donc étudier l'effet de l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieur, pour deux épaisseurs différentes 150 et 200 nm, l'épaisseur du buffer CdS est fixé à 50 nm.

a) Cas de l'épaisseur de la couche CGS = 150 nm et de la couche CdS = 50 nm

La structure de la cellule tandem CGS/CIGS est bien présentée par Tonyplot du logiciel Atlas SILVACO. Elle est illustrée dans la Figure (IV.6). Les paramètres de base des couches ZnO et CdS des deux cellules CIGS ont été maintenues identiques (Tableau IV.1). Pour la cellule supérieur on va prendre le cas de la concentration du galium $x = 1$ donc le matériau absorbeur utilisé est le CGS. Pour la cellule inférieure on va prendre le cas de la concentration du galium $x = 0.3$ donc le matériau absorbeur utilisé est le $\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2$ (CIGS).

Résultats et discussions

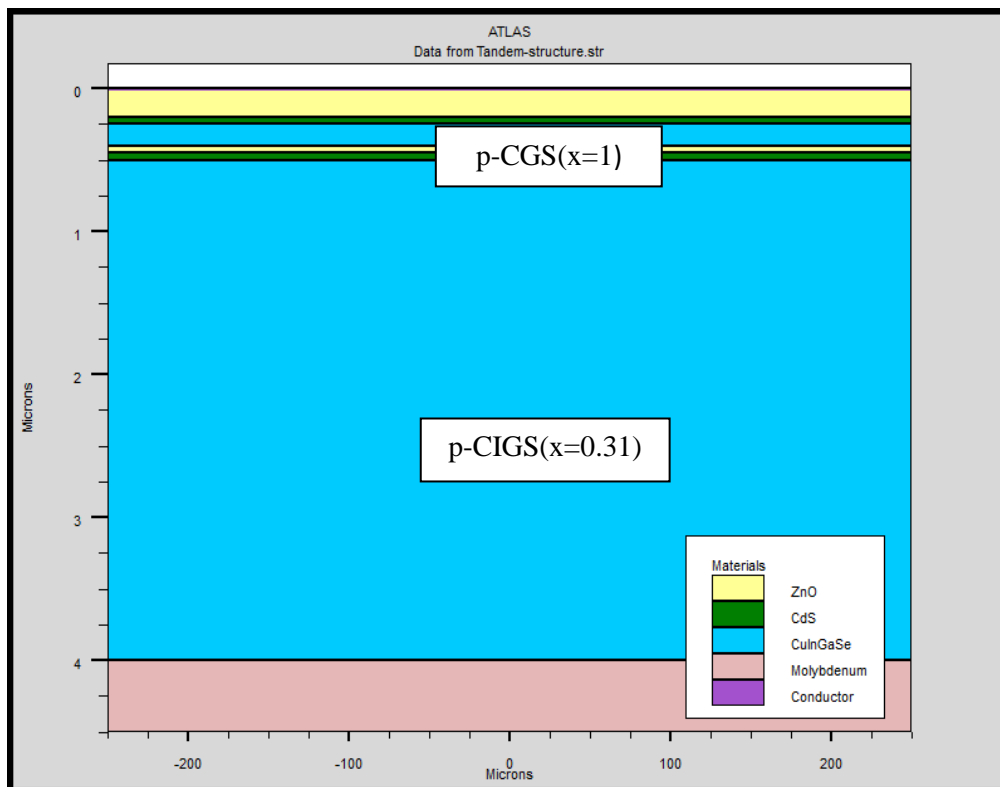
Après la simulation, on a affiché les trois courbes à la fois de la caractéristique (I-V) correspond aux trois cellules solaires : cellule inférieure, cellule supérieure et celle de la cellule tandem (voir la figure (IV.7)). Les performances tirées de chaque cellule sont récapitulés dans le Tableau (IV.6).

Plusieurs remarques ont été tirées de la caractéristique (I-V) de la figure (IV.7) et des performances affichées dans le tableau (IV.6):

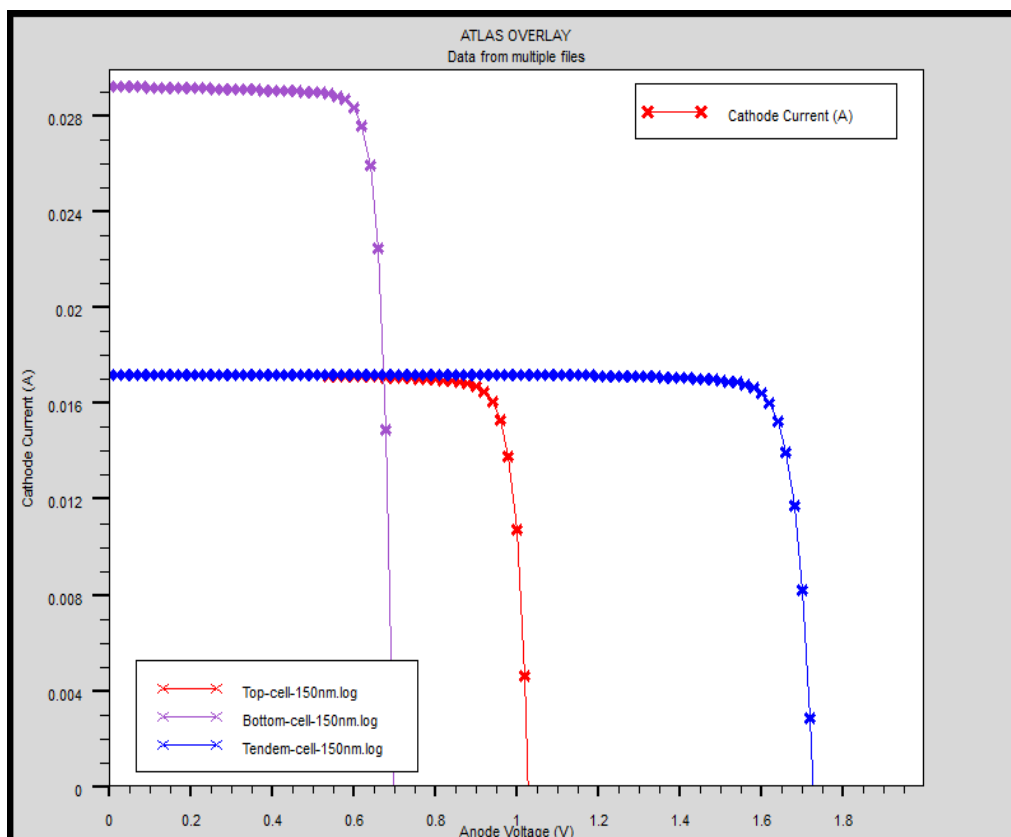
- ✚ Le courant induit à la cellule tandem égale dans tous les cas au minimum des courants des deux cellules supérieure et inférieure, donc on voit clairement dans le

tableau (IV.6) que le courant de court-circuit J_{cc} dans le cas de la cellule tandem (17.2243 mA/cm²) est égale presque le courant court-circuit J_{cc} de la cellule supérieur CGS (17.2258 mA/cm²).

- ✚ La tension de circuit-ouvert de la cellule tandem est égale à la somme des deux tensions de circuit-ouvert des deux cellules empilées (montées en série).
- ✚ Le rendement de conversion total de la cellule tandem CGS/CIGS n'est pas forcément la somme des deux rendements, puisque il est fonction des trois paramètres : J_{cc} , V_{co} et FF.



Figures (IV.6) : Structure de la cellule tandem CGS/CIGS affichée par Tonyplot.



Figures (IV.7) : Caractéristiques (I-V) des trois cellules solaires : cellule inférieure, cellule supérieure et celle de la cellule tandem CGS/CIGS pour une épaisseur de CGS = 150 nm.

Epaisseur de CGS =0.15 μm				
	Icc (mA/cm²)	Vco (v)	FF (%)	Rendement (%)
Cellule supérieure	17.2258	1.02754	85.7471	15.1774
Cellule inférieure	29.2701	0.698253	83.7242	17.1115
Cellule tandem	17.2243	1.72706	88.5798	26.3502

Tableau (IV.6) : Paramètres photovoltaïque de la cellule tandem CGS/CIGS, pour une épaisseur de CGS =0.15 μm.

b) Cas de l'épaisseur de la couche CGS = 200 nm et de la couche CdS = 50 nm

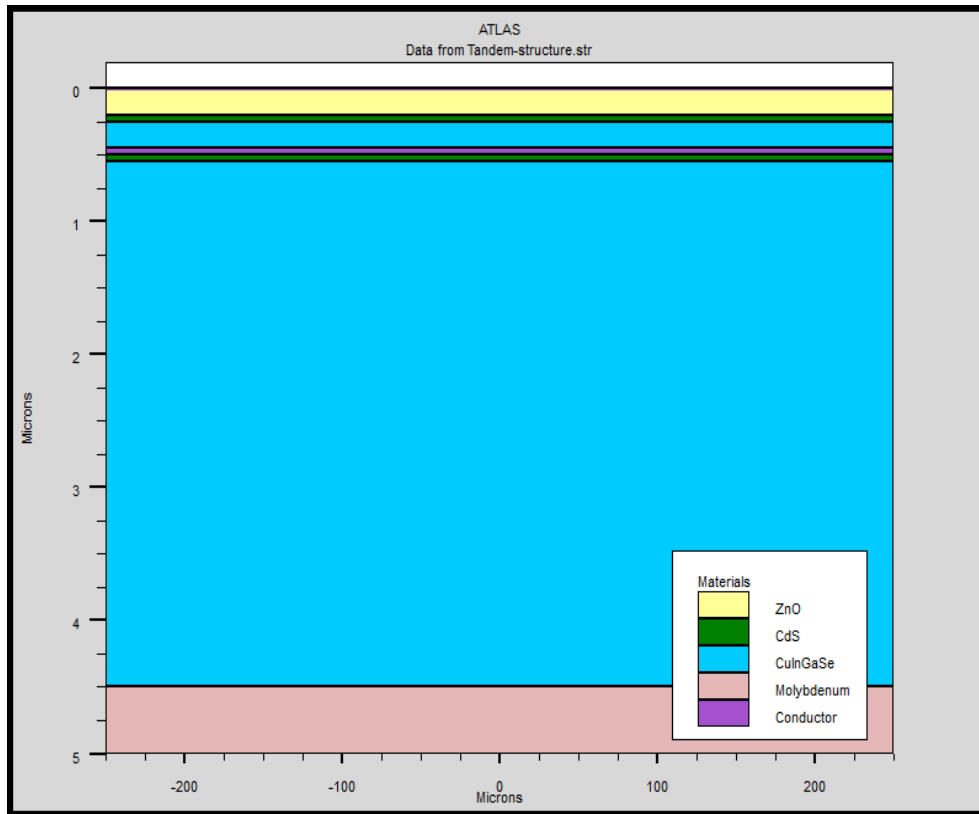
Dans le cas où l'épaisseur de l'absorbeur CGS égale à 200 nm, la structure globale simulée est bien présentée par Tonyplot dans la Figure (IV.8). Le but dans ce cas est de déterminer l'effet de l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieure sur les performances de la structure globale.

Résultats et discussions

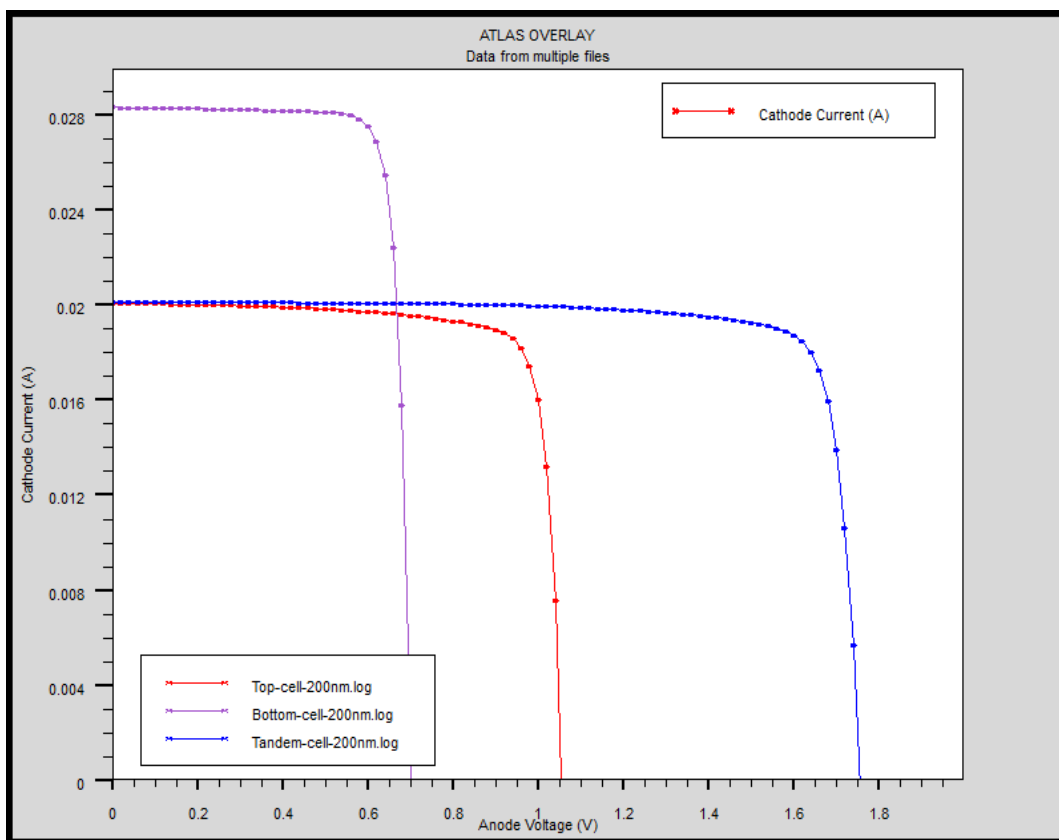
Après la simulation, on a affiché les trois courbes à la fois de la caractéristique (I-V) correspond aux trois cellules solaires : cellule inférieure, cellule supérieure et celle de la cellule tandem (voir la figure (IV.9)). Les performances tirées de chaque cellule sont récapitulés dans le Tableau (IV.7).

Presque les mêmes remarques ont été tirées que les précédentes :

- ✚ Le courant induit à la cellule tandem égale dans tous les cas au minimum des courants des deux cellules supérieure et inférieure, donc on voit clairement dans le tableau (IV.7) que le courant J_{cc} dans le cas de la cellule tandem (20.1349 mA/cm^2) est égale presque le courant J_{cc} de la cellule supérieur CGS (20.0893 mA/cm^2).
- ✚ La tension de V_{co} de la cellule tandem est égale à la somme des deux tensions V_{co} des deux cellules empilées.
- ✚ Le rendement de conversion total de la cellule tandem CGS/CIGS n'est pas forcément la somme des deux rendements, puisque il est fonction des trois paramètres : J_{cc} , V_{co} et FF.
- ✚ Une remarque importante a été tirée du tableau (IV.7) est que l'augmentation de l'épaisseur de la couche CGS induit à la fois à l'augmentation du courant I_{cc} de la cellule supérieure et la diminution du courant I_{cc} de la cellule inférieure, due peut être à la diminution de l'ensoleillement dans la cellule inférieure par l'augmentation de l'épaisseur de CGS, ou par l'augmentation de l'absorption dans la cellule supérieure.



Figures (IV.8) : Structure de la cellule tandem CGS/CIGS affichée par Tonyplot.



Figures (IV.9) : Caractéristiques (I-V) des trois cellules solaires : cellule inférieure, cellule supérieure et celle de la cellule tandem CGS/CIGS pour une épaisseur de CGS = 200 nm.

	Epaisseur de CGS =0.2 μm			
	Jcc (mA/cm ²)	Vco (v)	FF (%)	Rendement (%)
Cellule supérieure	20.0893	1.05335	82.5809	17.475
Cellule inférieure	28.353	0.700979	83.8803	16.6711
Cellule tandem	20.1349	1.75559	84.8907	30.0077

Tableau (IV.7) : Paramètres photovoltaïque de la cellule tandem CGS/CIGS, pour une épaisseur de CGS =0.2 μm .

IV.6 Effet de l'épaisseur de la couche CdS

La structure de la cellule tandem CGS/CIGS est présentée par Tonyplot dans la Figure (IV.10). Les paramètres de base de la CdS des deux cellules ont été maintenues identiques (Tableau IV.1) sauf l'épaisseur de la couche buffer CdS de la cellule supérieure, qui est maintenue 100 nm. Le but dans ce cas est de déterminer l'effet de l'épaisseur de la couche CdS de la cellule supérieure sur les performances de la structure globale.

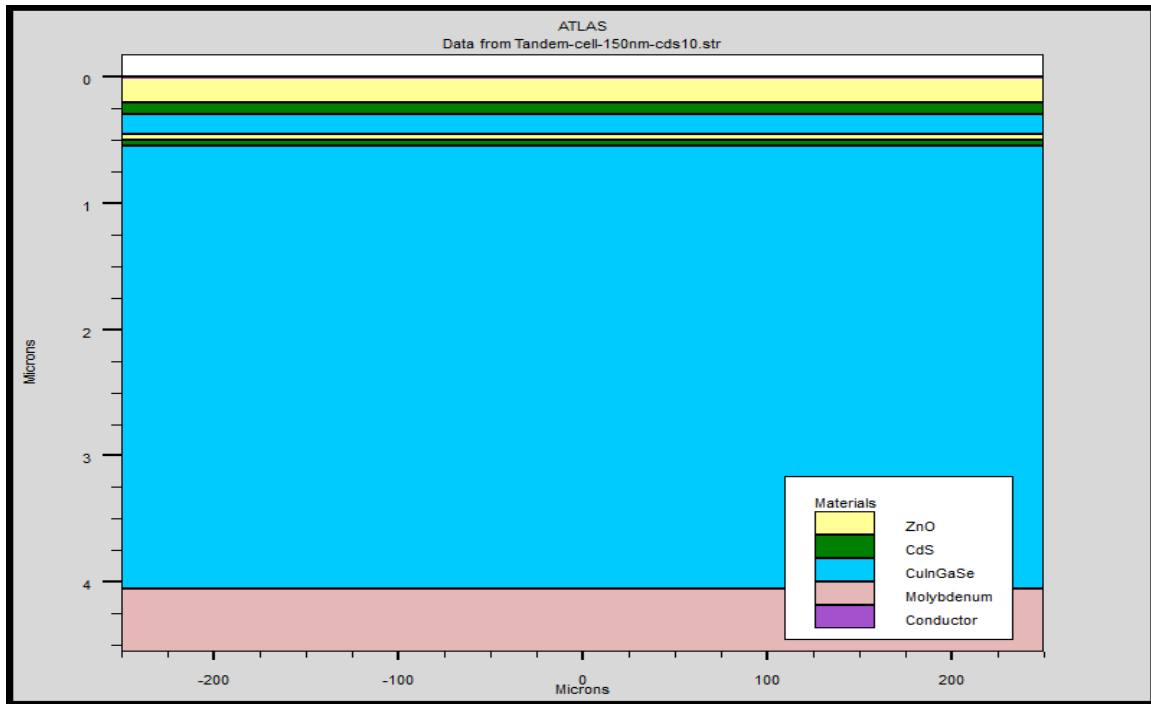
Résultats et discussions

Après la simulation, on a affiché les trois courbes à la fois de la caractéristique (I-V) correspond aux trois cellules solaires : cellule inférieure, cellule supérieure et celle de la cellule tandem (voir la figure (IV.10)). Les performances tirées de chaque cellule sont récapitulés dans le Tableau (IV.8).

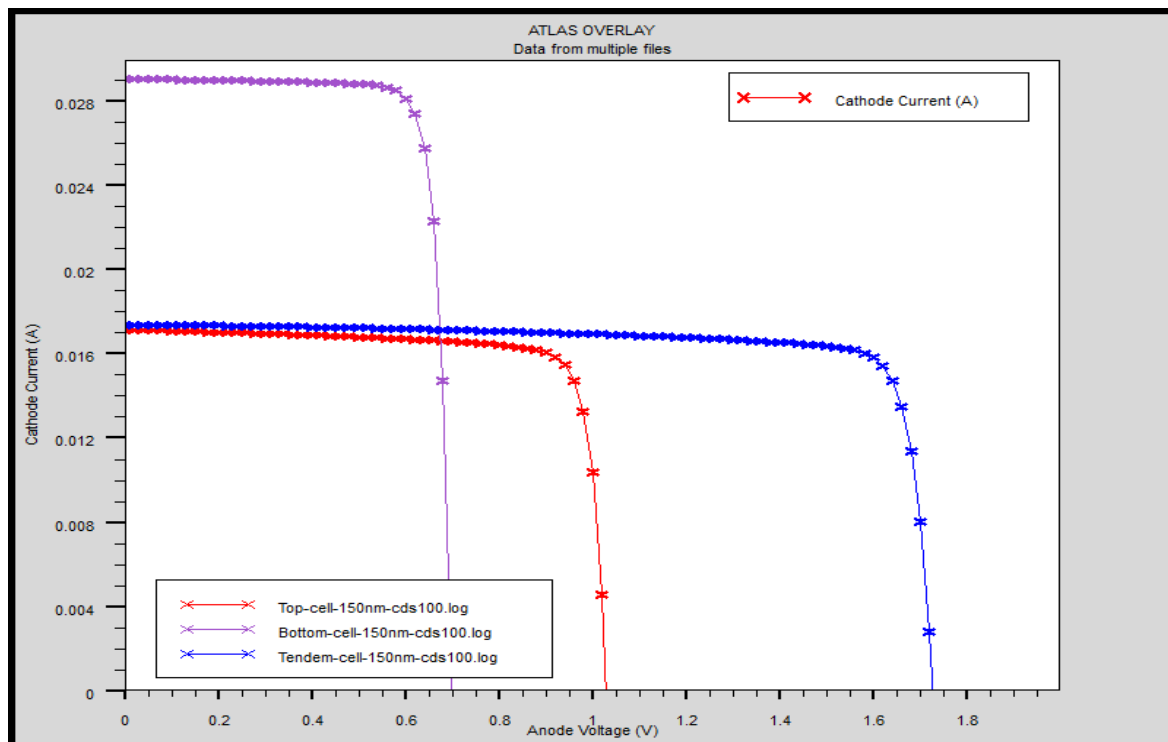
Deux remarques ont été tirées de la caractéristique (I-V) et des deux tableaux (IV.6) et (IV.8) sont :

- ✚ Le courant de court-circuit Jcc et la tension de circuit-ouvert Vco des trois cellules presque les mêmes pour les deux épaisseurs de la couche CdS,
- ✚ Le facteur de forme a connu une légère diminution lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche CdS, conduit à une petite diminution du rendement.

Comme conclusion, l'épaisseur de la couche CdS de la cellule supérieur n'a effectivement aucun effet sur les performances de la cellule tandem CGS/CIGS.



Figures (IV.10) : Structure de la cellule tandem CGS/CIGS affichée par Tonyplot.



Figures (IV.11) : Caractéristiques (I-V) des trois cellules solaires : cellule inférieure, cellule supérieure et celle de la cellule tandem CGS/CIGS pour une épaisseur de CdS = 100 nm et de CGS = 150 nm.

	Épaisseur de CGS = 150 nm et de CdS = 100 nm			
	Jsc (mA/cm ²)	Vco (v)	FF (%)	Rendement (%)
Cellule supérieure	17.1638	1.02786	82.7407	14.5971
Cellule inférieure	29.094	0.697986	83.7141	17.00
Cellule tandem	17.4108	1.72718	84.3617	25.3689

Tableau (IV.8) : Paramètres photovoltaïque de la cellule tandem CGS/CIGS, pour une épaisseur de CGS = 0.15 μ m et de CdS = 100 nm.

IV.7 Conclusion

Dans notre travail, nous avons étudié par simulation numérique la structure des cellules solaires individuelle à base de CIGS et double-jonctions CGS/CIGS en utilisant le logiciel double jonctions Atlas SILVACO.

Au début, nous avons simulé la structure de la cellule CIGS individuelle afin de déterminer l'effet de l'énergie de gap et l'épaisseur de la couche CIGS sur les paramètres photovoltaïques: J_{cc} , V_{co} , FF et le rendement de la cellule solaire standard.

Le but visé de la deuxième partie est d'étudier l'effet des paramètres géométriques de la couche CGS et CdS de la cellule supérieure dans la structure tandem.

Enfin, on peut dire que la cellule tandem donne une meilleure efficacité de conversion dans le domaine du visible par l'empilement des deux cellules solaires à différents gap.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est d'étudier l'empilement de deux cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se_2 à gap différents dans la technologie photovoltaïque et leur influence sur le rendement électrique tout en identifiant certains verrous qui limitent cette technologie, ceci dans le but d'optimiser le temps et le coût de fabrication de ces cellules photovoltaïques en couches minces à base de CIGS.

Nous avons utilisé la modélisation numérique par le logiciel (2D)Atlas-SILVACO pour étudier les caractéristiques de ces dispositifs photovoltaïques. Le but de la modélisation numérique est de faire une étude assez approfondie sur les performances des cellules solaires individuelle et tandem 'double-jonctions' à base de Cu(In,Ga)Se_2 .

La densité de courant de court-circuit J_{CC} , la tension de circuit-ouvert V_{CO} , le facteur de forme FF et le rendement électrique η pour une structure simple et double-jonctions ont été déterminés à partir de la caractéristiques (I.V). L'étude de la cellule individuelle et la comparaison avec des résultats expérimentaux nous a permis de valider et d'assurer le bon fonctionnement de notre modèle développé sur Atlas-SILVACO.

D'autre part, nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques des deux couches CGS et CdS de la cellule supérieure dans la structure tandem CGS/CIGS. Plusieurs remarques ont été tirées:

- ✚ Le courant induit dans la cellule tandem égale dans tous les cas au minimum des courants des deux cellules supérieure et inférieure ;
- ✚ La tension de circuit-ouvert de la cellule tandem est égale à la somme des deux tensions de circuit-ouvert des deux cellules empilées (montées en sérié).
- ✚ Le rendement de conversion total de la cellule tandem CGS/CIGS n'est pas forcément la somme des deux rendements, puisque il est fonction des trois paramètres : J_{cc} , V_{co} et FF .
- ✚ L'augmentation de l'épaisseur de la couche CGS induit à la fois à l'augmentation du courant I_{cc} de la cellule supérieure et la diminution du courant I_{cc} de la cellule inférieure, due peut être à la diminution de l'ensoleillement dans la cellule inférieure par l'augmentation de l'épaisseur de CGS, ou par l'augmentation de l'absorption dans la cellule supérieure.
- ✚ La variation de l'épaisseur de la couche CdS n'a pas un effet considérable sur le courant de court-circuit I_{cc} et sur la tension de circuit-ouvert V_{co} pour les trois type des cellules.

On peut dire à la fin de cette étude qu'on a choisi un logiciel très puissant et très adapté pour ce type des structures : 'SILVACO', pour sa force et sa diversité de calcul et surtout pour son aptitude de nous offrir une modélisation à deux dimensions, et à cause aussi de sa disponibilité chez plusieurs chercheurs dans les laboratoires de notre université.

En conclusion, nous pouvons dire que l'empilement des deux cellules solaires à base de CIGS dépend étroitement des paramètres physiques et géométriques de la cellule supérieure à grand gap dans la structure tandem et que la couche buffer joue un rôle secondaire dans la conversion photovoltaïque.

Comme perspectives, nous voudrions bien de faire des études pour voir l'influence des autres paramètres, en prenant en considération les défauts existes dans les niveaux profonds et superficiels des absorbeurs de la structure tandem et aussi pour d'autres composés tel : CZTS, CdTe, GaAs, pérovskites

RÉFÉRENCES

REFERENCES

- [1] Ullal HS, Zweibel K, Von Roedern B, Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Anaheim, CA, USA; 1997, p. 301.
- [2] B. DL, Romeo A, Terheggen M, Döbeli M, Zogg H, Tiwari AN, Thin Solid Films 451-452 (2004) 536-543.
- [3] T. JR, Szalaj A, Keane J, Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, 2000; 1042–1045.
- [4] I. Repins, S. Glynn, J. Duenow, T.J. Coutts, W. Metzger, and M.A. Contreras, Conference Paper NREL/CP-520-46235, juin 2009.
- [5] P. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann and M. Powalla, Prog. Photovolt. Res. Appl. 19(2011)894-897.
- [6] K. Ramanathan, M.A. Contreras, C.L. Perkins, S. Asher, S.F. Hasoon, J. Keane, D. Young, M. Romero, W. Metzger, R. Noufi, J. Ward, A. Duda, Prog. Photovolt: Res. Appl 11 (2003) 225.
- [7] A. Ricaud, «Module Photovoltaïques, Filières Technologiques», Techniques de l'ingénieur D 3940, 2005.
- [8] A. BOURAIYOU, «élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe₂ par électrodéposition » ; thèse de doctorat, 2009 université mentouri – constantine, PP 15 26 ; 43-44.
- [9] L. Ribeaucourt « Electrodepôt et sélénisation d'alliages Cu-In-Ga en vue de la synthèse de couches minces de Cu (In, Ga) Se₂ pour cellules solaires », Thèse De Doctorat De L'université Pierre Et Marie Curie, 2011 ; PP17-20.
- [10] N. Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités", Thèse Doct., Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (2005).
- [11] B. SPINNER, Edouard FABRE, Jean Claude MULLER, Une Politique De Recherche Et Développement Pour Des Energies Durables, « Les Composants photovoltaïques pour la production d'énergie » p104, 2003.
- [12] L. Bailly, «Cellules Photovoltaïques Organiques Souples A Grande Surface ». Thèse de doctorat à l'université Bordeaux I. 2010.

- [13] Ph. Jackson, Dimitrios Hariskos, Erwin Lotter, Stefan Paetel, Roland Wuerz, Richard Menner, Wiltraud Wischmann, Michael Powalla, «New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells beyond 20%», Progress in photovoltaic, 2011.
- [14] R. Hull, R.M. Osgood, jr, J. Parisi H. Warlimont, WIDE GAP CHALCOPYRITES (1 Cu-Chalcopyrite – Unique Materials For Thin-Films Solar Cells 1, 2). Edition Springer 2006.
- [15] I. Bouchama, "Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires CuIn_{1-x}Ga_xSe₂", Thèse de doctorat, Université de Sétif (2012).
- [16] A. Bouloufa, "Etude et caractérisation des semiconducteurs ternaires et quaternaires CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ par spectroscopie photoacoustique", Thèse de doctorat, Université de Sétif (2008).
- [17] A. Bouraiou, "Elaboration et caractérisation des couches minces CuInSe₂", Thèse Doctorat, Univ. Mentouri, Constantine, 2009.
- [18] T. Nakada, Y. Hirabayashi, T. Tokado, D. Ohmori, T. Mise, Sol. Energy 77 (2004) 739.
- [19] S. Ikeda, Ryo Kamai, Sun Min Lee, Tetsuro Yagi, Takashi Harada, Michio Matsumura, Solar Energy Materials & Solar Cells, article in press (2011).
- [20] B. R. Pamplin, Progress in Crystal Growth Charact. 1 (1979) 331.
- [21] Donald UN, Neamen «Physiques semi-conducteur et principes des dispositifs de base» troisième édition.
- [22] R. Klenk, «Characterisation and modeling of chalcopyrite solar cells», Thin Solid Films, J. Appl Phys 2001.387: p. 135-140.
- [23] J. Verschraegen, M. Burgelman «Numerical modeling of intra-band tunneling for heterojunction solar cells in SCAPS», J. Appl. Phys pp:6277-6278.
- [24] K. Yang, J.R. East, G.I. Haddad, Solid-State Electron, 36 (1993) 321.
- [25] R. Stratton, Phys. Rev. 125 (1962) 67.
- [26] K. YANG, JACK R. EAST and GEORGE I. HADDAD «Numerical modeling of abrupt heterojunctions using a thermionic-field emission boundary condition».
- [27] Ana Kanevce, "ANTICIPATED PERFORMANCE OF Cu(In,Ga)Se₂ SOLAR CELLS IN THE THIN-FILM LIMIT", These PhD, Colorado, USA, 2007.
- [28] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2011

- [29] Fatima ABDO, "CROISSANCE DE COUCHES MINCES DE SILICIUM PAR EPITAXIE EN PHASE LIQUIDE À BASSE TEMPERATURE POUR APPLICATIONS PHOTOVOLTAÏQUES", Thèse PhD.
- [30] Anjun Han, Yi Zhang, Wei Song, Boyan Li, "Structure morphology and properties of thinned Cu(In, Ga)Se₂ films and solar cells", Thèse PhD, 2012.
- [31] M. ORGERET, "Les piles solaires : le composant et ses applications", Livre.
- [32] Markus Gloeckler, "DEVICE PHYSICS OF Cu(In,Ga)Se₂ THIN-FILM SOLAR CELLS" Thèse PhD. Colorado, USA, 2007.
- [33] D. Bradley P, "Advanced Thermo-Photovoltaic Cells Modeling, Optimized for Use in Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGS) for Mars and Deep Space Missions", Thèse PhD., Naval post-graduate school, Monterey California, 2004.
- [34] ATLAS User's Manuel, Device simulation software", SILVACO International, California. 2011.
- [35] B.Garcia, "Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas", Thèse PhD., Naval post-graduate school, Monterey California, 2007.
- [36] S. Daniel, "Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas", Thèse PhD., Naval post-graduate school, Monterey California, 2012.
- [37] TonyPlot User's Manual, Device simulation software", SILVACO International, California. 2012.
- [38] DeckBuild User's Manual, "Device simulation software", SILVACO International, California. 2013.
- [39] D. Vasileska, G. Stephen M, "Computational Electronics", Department of Electrical Engineering, Arizona State University. 2006.
- [40] S. MOSTEFA K, "Etude et Simulation de Cellules Photovoltaïques a Couches Minces à Base de CIS et CIGS", Mémoire magistère, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen. 2012.
- [40] J. Lavery, "Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco", Thèse PhD., Naval post-graduate school, Monterey California, 2008.
- [42] D. Wassila Née KAZI-TANI, "Modelisation des Structures Photovoltaïques : Aspects Fondamentaux et Appliqués", Thèse Doctorat, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen. 2011.

- [43] G, Adam. R, modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software”, Thèse PhD., Naval post-graduate school, Monterey California, 2012.
- [44] P. Michalopoulos, "A novel approach for the development and optimization of state of the art photovoltaic devices using silvaco”, Thèse PhD., Naval post-graduate school, Monterey California, 2002.
- [45] F. Konstantinos , "Modeling and simulation of A dual-Junction CIGS Solar cell using silvaco atlas", Thèse PhD., Naval post-graduate school, Monterey California, 2012.
- [46] “Efficiency and band gap energy” [Cours online]. Available:
<http://www.grc.nasa.gov/www/RT/RT1999/images/5410hepp-f3.jpg>
- [47] D.S. Albin, “A study on the optical and microstructural characteristics of quaternary Cu(In,Ga)Se₂ polycrystalline thin films", 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conf., May 21–25, pp. 562, 1990.

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude par modélisation numérique de la cellule solaire tandem CGS/CIGS en couches minces en utilisant l'outil de simulation deux dimensions Atlas SILVACO.

Dans un premier temps, les paramètres photovoltaïques de la cellule individuelle à base de CIGS ont été calculés, ces paramètres sont validés par d'autres valeurs mesurées expérimentalement. L'effet de l'épaisseur et l'énergie de gap de l'absorbeur CIGS a été étudié.

Dans un deuxième temps, une variation des paramètres géométriques des deux couches CGS et CdS de la cellule supérieure dans la structure tandem CGS/CIGS a été étudiée.

Mots clés : Cellules solaires, structure tandem, Cu(In,Ga)Se_2 , couches minces, Atlas SILVACO.

Abstract

The objective of this work was the study with numerical modeling of CGS/CIGS tandem solar cells using 2D - Atlas SILVACO simulator.

In the first time, the photovoltaic parameters of CIGS single cell were calculated. This parameters were validated by other experimental measurements values. The effects of the thickness and gap energy of CIGS material was studied.

In the second time, a variation of geometrical parameters of both CGS and CdS layers of the top cell in the tandem structure has been studied.

Keywords: Solar cells, tandem structure, Cu(In,Ga)Se_2 , thin films, Atlas SILVACO.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة المحاكاة الرقمية الخلايا الشمسية المزدوجة CGS/CIGS ذات الطبقات الرقيقة بإستعمال أداة المحاكاة Atlas Silvaco .

في الوهلة الأولى، قمنا بحساب المعايير الكهروضوئية للخلاية المنعزلة CGS، قمنا بتأكيد هذه المعايير بقياسات تطبيقية، كما قمنا بدراسة تأثير السمك وطاقة تباعد الطبقات.

في الوهلة الثانية، قمنا بدراسة تغير المعايير الهندسية لكل من الطبقتين CGS و CdS للخلاية العليا داخل تركيب الخلايا الشمسية المزدوجة CGS/CIGS.

كلمات مفتاحية: الخلايا الشمسية، الخلايا الشمسية المزدوجة، Cu(In,Ga)Se_2 ، الطبقات الرقيقة، Atlas Silvaco