

N° d'ordre:

Année : 2019/2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

THESE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR EN SCIENCES

Option : Microélectronique

Présentée par

BOUANANI BOUALEM

Thème

Simulation et Optimisation des Cellules Solaires
Monolithiques à Double Hétérojonction, à Base
de CIGS, Utilisant le Logiciel Atlas-Silvaco.

Soutenu le : / /2020 devant le jury:

Mme BENAMARA Zineb	<i>Professeur</i>	<i>Université de Sidi Bel Abbès</i>	<i>Présidente</i>
Mr JOTI Abdelaziz	<i>Professeur</i>	<i>Université de Sidi Bel Abbès</i>	<i>Directeur de thèse</i>
Mr SAHNOUN Mohammed	<i>Professeur</i>	<i>Université de Mascara</i>	<i>Examineur</i>
Mme OULD ABBAS Amaria	<i>Professeur</i>	<i>Université de Tlemcen</i>	<i>Examineur</i>
Mr MANSOURI Sedik	<i>Professeur</i>	<i>Université de Sidi Bel Abbès</i>	<i>Invité</i>

Résumé

Les cellules solaires en couches minces à base de CIGS attirent plus d'attention récemment dans des applications photovoltaïques, grâce à leurs propriétés électriques intéressantes. En effet, le rendement de ces cellules solaires a dépassé les 22% ces dernières années. Une des raisons la plus importante qui limitent l'amélioration de ce rendement est les pertes dues à la thermalisation et non absorption des photons. Dans ce contexte, un autre concept a été développé pour les cellules solaires à multijonctions, qui reposent sur la conversion multispectrale et conduit à une meilleure exploitation du spectre solaire.

Notre travail est focalisé autour de cet axe ; une simulation et une optimisation moyennant le simulateur Atlas-Silvaco, d'une cellule solaire monolithique à double hétérojonctions structurée CIGS/CIGS a été effectuée, dans le but de concevoir une structure ayant un rendement électrique optimal et déduire ses paramètres photovoltaïques optimaux.

En premier temps, une simulation de deux sous cellules a été effectuée individuellement et comparée par rapport à d'autres résultats publiés dans la littérature pour tester et valider la précision des modèles et des paramètres de simulation utilisés.

Ensuite, on réalise une optimisation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS et sa bande interdite pour chacune des sous cellules, afin d'obtenir la meilleure configuration de la structure d'une cellule solaire tandem donnant un meilleur rendement de conversion possible.

La meilleure configuration de la cellule solaire tandem CIGS/CIGS présente une densité de courant de court circuit de 18.82mA/cm^2 , une tension en circuit ouvert de 1.84V , un facteur de forme de 82.54% et un rendement de conversion de 27.03% .

Cela correspond aux épaisseurs optimales de $0.18\mu\text{m}$ et $3.2\mu\text{m}$ respectivement, pour la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure et inférieure, tandis qu'une bonne combinaison les bandes interdites de 1.68eV et 1.13eV a été obtenu respectivement pour la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure et inférieure.

Mots clés : Cellule solaire tandem, chalcopyrite, monolithique, CIGS, Silvaco.

Remerciements

Avant tout je remercie DIEU qui m'a aidé à réaliser ce travail.

Ce travail de thèse a été effectué au sein du Laboratoire de Microélectronique Appliquée de l'Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès. Je remercie vivement Mme BENAMARA Zineb, Professeur à l'université de Sidi Bel Abbès, de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Je remercie mon encadreur Mr JOTI Abdelaziz, Professeur à l'université Djilali Liabès Sidi Bel Abbès, pour m'avoir suivi durant mon travail dans le cadre de cette thèse, pour ses conseils précieux et la compétence de son encadrement.

Je remercie encore une fois Mme BENAMARA Zineb pour avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie Mr SAHNOUNE Mohamed, Professeur à l'université Mustapha Stambouli de Mascara, pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie également Mme OULD ABBAS Amaria, Professeur à l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, pour avoir accepté de juger ce travail.

Mes remerciements vont également à Mr MANSOURI Sedik, Professeur à l'université Djilali Liabès Sidi Bel Abbès, pour avoir nous honorer avec sa présence ainsi qu'à juger mon travail.

Je remercie aussi mes amis : A.Makhri, M.Sehil, D.Bendaha, A.Ghazi, B Tahari, A.Khadid, B.El-khadi.

Je dédie ce modeste travail

A mes parents, Pour leur amour qui m'ont porté tout au long de ces années.

A ma femme et mon fils

A mes frères et sœurs,

A ma très grande famille,

A tous mes amis.

Sommaire

Résumé	i
Remerciements.....	ii
Dédicaces	iii
Sommaire.....	iv
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xv
Liste des abréviations.....	xvi
Introduction Générale.....	01

Chapitre I : Généralités sur la théorie de la cellule solaire

I. Introduction.....	05
II. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	05
II.1. Source d'énergie solaire	05
II.2. Spectre solaire	06
II.3. Conversion photovoltaïque	08
II.4. Effet photovoltaïque	08
II.5. Gisement solaire	09
II.6. Notion de masse d'air	10
III. Cellule solaire conventionnelle	12
III.1. Jonction PN	12
III.2. Notions de gap direct et indirect	14
III.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	15
III.3.1. Absorption de la lumière	16
III.3.2. Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique	17
III.3.3. Collecte des charges	18
III.4. Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque	19
III.5. Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire	22
III.5.1. Courant de court circuit I_{cc}	22
III.5.2. Tension de circuit ouvert V_{co}	22
III.5.3. Facteur de forme FF.....	23

III.5.4. Puissance maximale P_{\max}	23
III.5.5. Réponse spectrale RS	23
III.5.6. Rendement électrique η	24
III.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	24
III.6.1. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale.....	25
III.6.2. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire réelle.....	26
IV. Conclusion	28
Références bibliographiques	29

Chapitre II : État de l'art de la technologie des cellules solaires

I. Introduction.....	33
II. Historique de la conversion photovoltaïque.....	33
III. Facteurs limitant le rendement.....	35
III.1. Pertes physique.....	35
III.1.1. Absorption partielle.....	35
III.1.2. Recombinaisons radiatives.....	36
III.1.3. Recombinaisons Auger.....	37
III.2. Pertes technologiques.....	38
III.2.1. Pertes optiques et résistives.....	38
III.2.2. Recombinaison volumique.....	39
III.2.3. Recombinaison surfacique.....	40
IV. Méthodes d'amélioration des performances des cellules solaires.....	41
IV.1. Contacts face avant et face arrière.....	42
IV.2. Texturation de la surface.....	43
IV.3. Passivation des faces avant et arrière.....	45
IV.4. Couche antireflet	45
IV.5. Champ électrique BSF.....	46
V. Différentes filières photovoltaïques.....	47
V.1. Première génération.....	48
V.1.1. Silicium monocristallin	48
V.1.2. Silicium polycristallin	49
V.2. Deuxième génération.....	50

V.2.1. Silicium amorphe hydrogéné.....	50
V.2.2. Tellure de Cadmium.....	51
V.2.3. Chalcopyrite à base Cu-III-VI ₂	52
V.2.4. Sulfure de Cuivre, de Zinc et d'Etain (CZTS).....	53
V.3. Troisième génération	53
V.3.1. Cellules organiques	54
V.3.2. Cellules nanocristallines à colorant	55
V.3.3. Cellules multijonctions.....	56
VI. Conclusion	57
Références bibliographiques	58

Chapitre III : Cellules solaires en couches minces à base CIGS

I. Introduction.....	62
II. Propriétés fondamentales de CuInSe ₂	62
II.1. Historique de matériau	63
II.2. Structure cristallographique du composé CuInSe ₂	64
II.3. Diagramme de phase de CuInSe ₂	65
II.4. Influence du Gallium	66
II.5. Orientation cristalline	69
II.6. Propriétés électroniques	70
II.6.1. Bande interdite	70
II.6.2. Défaut dans CuInSe ₂	72
II.6.2. 1. Défauts intrinsèques	72
II.6.2.2. Défauts extrinsèques	73
II.6.3. Type de conductivité	74
II.6.4. Joints de grains	76
II.7. Propriétés optiques	76
II.7.1. Constante optique	76
II.7.2. Coefficient d'absorption	77
III. Structure d'une cellule solaire à couche mince à base CIGS	78
III.1. Diagrammes des bandes d'énergies de la cellule CuInSe ₂	79
III.2. Différentes couches de la cellule photovoltaïque	80

III.2.1. Substrat	80
III.2.2. Contact arrière	81
III.2.3. Couche absorbante	82
III.2.4. Couche tampon	82
III.2.5. Couche fenêtre	83
III.2.6. Contact avant	83
IV. Méthodes des dépôts en couches minces	84
IV.1. Co-évaporation	85
IV.2. Spray Pyrolyse	89
V. Conclusion	90
Références bibliographiques	91

Chapitre IV : Etude des cellules solaires à multijonctions

I. Introduction.....	95
II. Concept d'une cellule solaire multijonctions	95
II.1. Limite théorique des cellules solaires simples	95
II.1.1. Limite théorique du courant de court circuit I_{cc}	96
II.1.2. Limite théorique de la tension de circuit ouvert V_{co}	96
II.1.3. Limite théorique du facteur de forme FF.....	96
II.1.4. Limite du rendement η	97
II.2. Principe de base des cellules multijonctions	97
II.3. Quelques dates	99
III. Configuration des cellules multijonctions	100
III.1. Concept basé sur le découpage du spectre solaire	100
III.2. Concept basé sur l'empilement mécanique de cellules	101
III.3. Concept basé sur la croissance monolithique de cellules	103
III.3.1. Caractéristique $I(V)$ d'une cellule tandem monolithique.	104
IV. Jonction tunnel dans le concept monolithique	105
IV.1. Effet tunnel interbande	107
IV.2. Modèle NLBBT: Champ électrique non uniforme	108
IV.3. Caractéristique $I(V)$ d'une jonction tunnel	109

V. Défis technologique d'une cellule multijonction monolithique.....	111
V.1. Choix de la combinaison optimale des gaps des sous cellules.....	111
V.2. Constante du réseau	113
V.3. Coefficient de la dilatation thermique	114
V.4. Critère imposé sur la jonction tunnel	115
VI. Conclusion	115
Références bibliographiques	116

Chapitre V : Présentation du simulateur Atlas-Silvaco

I. Introduction.....	119
II. Présentation du Silvaco	119
II.1. Outils interactifs	120
II.1.1. DeckBuild	120
II.1.2. Tonyplot	121
II.1.3. DevEdit	121
II.1.4. Manager	121
II.1.5. MaskViews	122
II.1.6. Optimiseur	122
II.1.7. SPDB (Process Data Base)	122
II.2. Outils de simulation	122
II.2.1. Athena	122
II.2.2. SSuprem3	122
II.2.3. Atlas	122
III. Atlas.....	123
III.1. Principe de fonctionnement du simulateur Atlas	124
III.2. Entrées et sorties du simulateur Atlas	126
III.3. Structure d'un programme du simulateur Atlas	127
III.3.1. Spécification de la structure	128
III.3.2. Spécification des modèles physiques	131
III.3.3. Sélection de la méthode numérique	132
III.3.4. Spécification des solutions	133
III.3.5. Analyse des résultats	133

IV. Conclusion	134
Références bibliographiques	135

Chapitre VI : Résultats de la simulation et discussions

I. Introduction.....	137
II. Paramètres et modèles de la simulation	137
II.1. Présentation de la structure simulée	137
II.2. Paramètres de la simulation	138
II.3. Modèles de la simulation	139
III. Résultats de la simulation	140
III.1. Simulation de la cellule solaire inférieure à base CIGS	140
III.2. Simulation de la cellule solaire supérieure à base CIGS.....	142
III.3. Simulation de la cellule solaire tandem à base CIGS.....	144
IV. Optimisation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire tandem.....	146
IV.1. Optimisation du rendement de la cellule solaire inférieure (CIGS)	146
IV.1.1. Effet du gap de la couche absorbante CIGS.....	147
IV.1.2. Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS.....	149
IV.2. Optimisation du rendement de la cellule solaire supérieure (CIGS).....	151
IV.2.1. Effet du gap de la couche absorbante CIGS.....	152
IV.2.1. Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS.....	154
IV.3. Comparaison des caractéristiques J(V) de la cellule tandem avant et après optimisation	157
IV.4. Réponse spectrale	158
V. Conclusion	159
Références bibliographiques	160
Conclusion générale	162

Liste des figures

Fig.1.1. Présentation de l'absorption du rayonnement solaire depuis son émission jusqu'à son arrivée à la surface de la terre	06
Fig.1.2. Définition de l'Air Mass AM_x	10
Fig.1.3. Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5.....	11
Fig.1.4. Structure d'une jonction PN (à gauche), son diagramme de bandes (à droite).....	13
Fig.1.5. Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction ...	13
Fig.1.6. Structure de bande schématique d'un semiconducteur à gap direct (a) et à gap indirect (b).....	14
Fig.1.7. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	15
Fig.1.8. Les phénomènes de réflexion, transmission et absorption.....	16
Fig.1.9. Mécanisme de création d'une paire électron-trou par photon.....	18
Fig.1.10. Caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairage.....	20
Fig.1.11. Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire.....	21
Fig.1.12. Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.....	25
Fig.1.13. Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.....	26
Fig.1.14. influence théorique de la résistance série et la résistance parallèle d'une cellule photovoltaïque sur sa courbe $I(V)$	27
Fig.1.15. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque (modèle à deux diodes).....	27
Fig.2.1. Absorption de différents photons par un matériau semiconducteur.....	35
Fig.2.2. Différentes pertes dues aux mécanismes d'absorption dans le c-Si. (1) Thermalisation des photons d'énergie supérieure à 1.12eV; (2) Photons d'énergie inférieure à 1.12eV non absorbés.....	36
Fig.2.3. Schéma descriptif du processus de recombinaison radiative	37
Fig.2.4. Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger.....	37
Fig.2.5. Schéma descriptif du processus de recombinaison Schokley-Read-Hall.....	39
Fig.2.6. Schéma descriptif du processus de recombinaison en surface.....	40

Fig.2.7. Composition d'une cellule photovoltaïque.....	42
Fig.2.8. Image MEB de la surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramide.....	44
Fig.2.9. structure de cellule PERL à base de Silicium avec une texturation de pyramides inversées en face avant.....	44
Fig.2.10. Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée.....	45
Fig.2.11. Le principe de la couche antireflet.....	46
Fig.2.12. Le principe du champ électrique BSF.....	47
Fig.2.13. La chaîne de production de cellules photovoltaïques en Silicium.....	48
Fig.2.14. Panneau solaire en Silicium polycristallin.....	49
Fig.2.15. Schéma de principe d'une cellule à colorant.....	55
Fig.2.16. Principe de base des cellules solaires à multijonctions.....	56
Fig.3.1. Structures cristallographiques du CuInSe_2 (a) Sphalérite; (b) Chalcopyrite; (c) Cu-Au. Sphères noires: Cuivre; Sphères rouges: Indium; Sphères vertes: Sélénium.....	65
Fig.3.2. Diagramme de phase pseudo-binaire entre les composés $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$	66
Fig.3.3. Irradiance solaire perçue au niveau de la mer et rendement quantique calculé en fonction du gap de l'absorbeur.....	67
Fig.3.4. Variation de la concentration des défauts en fonction de la bande interdite.....	68
Fig.3.5. Diffractogramme des rayons X de $\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2$	69
Fig.3.6. Principaux types de gradients de bande interdite dans les couches de CIGS.....	71
Fig.3.7. Représentation des indices de réfraction (réelle et imaginaire) en fonction de l'énergie pour le CIGS, avec $x=0$ et $x=0.2$	77
Fig.3.8. Coefficient d'absorption des matériaux (CIS, CdTe, GaAs, a-Si: H, mono-Si et CdS).....	78
Fig.3.9. Schéma de l'empilement typique des cellules solaires à base de CIGS.....	78
Fig.3.10. Diagramme de bandes d'une cellule CIS.....	79

Fig.3.11. Processus de dépôt de couches minces.....	84
Fig.3.12. Schéma d'un procédé de Co-évaporation pour la synthèse de couches minces de CIGS à partir de sources élémentaires Cu, In, Ga et Se.....	86
Fig.3.13. Flux de métaux et profil de température de substrat utilisés dans un procédé en trois étapes de synthèse du CIGS par Co-évaporation	87
Fig. 3.14. Schéma d'un équipement de dépôt par Spray Pyrolyse.....	89
Fig.4.1. Rendement théorique maximum d'une jonction pn et p-i-n calculé par les modèles de Green, Kiess.....	97
Fig.4.2. Schéma de principe d'une cellule multijonctions.....	98
Fig.4.3. Association de plusieurs cellules solaires pour une conversion multispectrale.....	100
Fig.4.4. Schéma de principe d'empilement mécanique des cellules solaires.....	101
Fig.4.5. Caractéristique I(V) obtenues pour deux configurations électriques de cellules multijonctions.....	102
Fig.4.6. (a) Schéma synoptique d'une cellule solaire monolithique. (b) Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire tandem avec interconnexion des diodes Tunnel.....	103
Fig.4.7. Caractéristiques I(V) d'une cellule solaire supérieure, inférieure et tandem.....	104
Fig.4.8. Cellule multijonction de configuration monolithique (a) sans jonctions tunnel (b) avec jonction tunnel.....	106
Fig.4.9. Vision semiclassique de l'effet tunnel interbande sur un diagramme de bande..	107
Fig.4.10. Schéma de Non-Local Band-to-Band en polarisation inverse	108
Fig.4.11. Caractéristique I(V) d'une jonction tunnel.	109
Fig.4.12. Diagramme de bande de la jonction tunnel en polarisation inverse.....	110
Fig.4.13. Diagramme de bande de la jonction tunnel en polarisation directe.....	110
Fig.4.14. Diagramme de bande de la jonction tunnel en jonction PN.....	111
Fig.4.15. l'évolution de la largeur de bande interdite en fonction du paramètre de maille des composés ternaires CuInSe ₂ , CuGaSe ₂ , CuInS ₂ et CuGaS ₂	113
Fig.4.16. Schéma descriptif du phénomène de la dilation thermique.....	114
Fig.5.1. Organigramme de la structure VWF.....	120
Fig.5.2. Fenêtre principale de DeckBuild.	120

Fig.5.3. Fenêtre principale de Tonyplot	121
Fig.5.4. Entrées et sorties d'Atlas.....	126
Fig.5.5. Maillage à deux dimensions de la cellule solaire à base de CIGS.....	129
Fig.5.6. Définition des régions et des matériaux de la cellule solaire à base de CIGS...	129
Fig.5.7. Définition des électrodes de la cellule solaire à base de CIGS.....	130
Fig.5.8 Définition de dopage de la cellule solaire à base de CIGS.....	130
Fig.6.1. Structure schématique de la cellule solaire tandem CIGS.....	137
Fig.6.2. Structure de la cellule inférieure à base de CIGS obtenu par Atlas-Silvaco.....	140
Fig.6.3. Caractéristique J(V) de la cellule inférieure à base de CIGS.....	141
Fig.6.4. Structure de la cellule supérieure à base de CIGS obtenu par Atlas-Silvaco.....	142
Fig.6.5. Caractéristiques J(V) de la cellule solaire supérieure à base de CIGS.....	143
Fig.6.6. Structure de la cellule tandem CIGS/CIGS obtenu par Atlas-Silvaco.....	144
Fig.6.7. Caractéristique J(V) de la cellule solaire tandem CIGS/CIGS, la cellule inférieure et la cellule supérieure à base CIGS.....	145
Fig.6.8. Caractéristiques J(V) de la cellule inférieure à base CIGS pour différentes valeurs de la concentration du Ga.....	147
Fig.6.9. Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule inférieure à base CIGS en fonction de la concentration du Ga.....	148
Fig.6.10. Caractéristiques J(V) de la cellule inférieure à base CIGS pour différentes épaisseurs de la couche absorbante CIGS.....	149
Fig.6.11. Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule inférieure à base CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS.....	150
Fig.6.12. Caractéristiques J(V) de la cellule supérieure à base CIGS pour différentes valeurs de concentration du Ga.....	152
Fig.6.13. Variation de la concentration du Ga (X) de la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure à base CIGS en fonction les rendements des cellules tandem, supérieure et inférieure	153
Fig.6.14. Caractéristiques J(V) de la cellule supérieure à base CIGS pour différentes épaisseurs de la couche absorbante CIGS.....	154

Fig.6.15. Densité de courant de court circuit des cellules supérieure et inférieure à base CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante du CIGS de la cellule supérieure..... 155

Fig.6.16. Caractéristique J(V) de la cellule solaire tandem CIGS/CIGS, les cellules inférieure et supérieure à base CIGS après l'optimisation..... 156

Fig.6.17. Caractéristiques J(V) de la cellule solaire tandem CIGS/CIGS avant et après l'optimisation..... 157

Fig.6.18. Courbes de rendements quantiques de cellules inférieure et supérieure à base CIGS en fonction de la longueur d'onde..... 158

Liste des tableaux

Tableau.1.1. Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.....	07
Tableau.1.2. Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique.....	10
Tableau.3.1. Quelques défauts identifiés dans CuInSe ₂ , et leurs types.....	73
Tableau.3.2. Type de conduction dans CuInSe ₂ en fonction des écarts Δs et Δm	75
Tableau.4.1. Limites théoriques radiatives des rendements de cellules multijonctions sous un éclairement 1 et 1000 soleils.....	112
Tableau.5.1. Groupes de commande d'Atlas et déclarations primaires.....	128
Tableau.6.1. Paramètres de base des matériaux utilisés dans la simulation.....	138
Tableau.6.2. Comparaison les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire inférieure avec ceux de la référence [3, 9].....	141
Tableau.6.3. Comparaison les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire supérieure avec ceux des références [3, 10, 11].....	143
Tableau.6.4. Paramètres photovoltaïques de la cellule supérieure, de la cellule inférieure, de la cellule tandem, et la cellule à simple jonction.....	145
Tableau.6.5. Paramètres photovoltaïques de la cellule supérieure CIGS, de la cellule inférieure CIGS et de la cellule tandem CIGS/CIGS après optimisation.....	156
Tableau.6.6. Paramètres photovoltaïques de la cellule tandem CIGS avant et après optimisation.....	157

Liste des abréviations

BC	Bande de Conduction
BV	Bande de Valence
AM	Air Mass
ASA	Agence Spatiale Allemande
ZCE	Zone de Charge d'Espace
MPP	Maximal Power Point
STC	Standard Test Conditions
EQE	Rendement Quantique Externe
EQI	Rendement Quantique Interne
RS	Réponse Spectrale
CdTe	Tellurure de Cadmium
CIGS	Sélénure de Cuivre d'Indium et de Gallium
CZTS	Sulfure de Cuivre de Zinc et d'Etain
Se	Sélénium
SRH	Schokley Read Hall
CAR	Couche Anti Reflective
BSF	Back Surface Field
ITO	Oxyde d'Indium Etain
OVC	Ordered Vacancy Compound
CdS	Sulfure de Cadmium
ZnO	Oxyde de Zinc
a- Si	Silicium amorphe
ΔE_c	Conduction Band Offset
SLG	Soda Lime Glass
Mo	Molybdène
CBD	Chemical Bath Deposition
TCO	Oxydes Conducteurs Transparents

FF	Facteur de Forme
PVD	Physical Vapor Deposition
CVD	Chemical Vapor Deposition
NLBBT	Non Local Band to Band Tunneling
CTE	Coefficient de Dilatation Thermique
TCAD	Technology Computer Aided Design
SILVACO	Silicon Valley Corporation
VWF	Virtual Wafer Fabrication
SPDB	Process Data Base

Introduction

générale

Introduction générale

La demande énergétique mondiale a augmenté sans cesse à cause de l'accroissement de la population et aussi de la croissance économique des pays émergents. A l'échelle mondiale, la production actuelle en énergie est essentiellement basée sur des ressources dites "non renouvelables" telles que le pétrole, le gaz naturel, le charbon ou encore l'uranium. Ces dernières représentent 80% de la consommation d'énergie mondiale et selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), celle-ci pourrait augmenter de 45% d'ici à 2030.

Cependant, ces ressources fossiles représentent une source importante d'émission de gaz à effet de serre qui contribue fortement au réchauffement climatique de la planète. D'autre part, leurs réserves sont limitées pour pouvoir satisfaire aux besoins croissants en énergie de la population mondiale. Outre cette limitation, elles sont réparties inégalement dans le monde, ce qui crée des tensions et des conflits géopolitiques. Toutes ces causes incitent à se tourner vers de nouvelles sources d'énergie moins polluantes et moins controversées que les énergies fossiles et nucléaires.

Une des solutions pour le futur de la planète, sont les énergies dites "renouvelables", l'énergie solaire photovoltaïque est la source d'énergie la plus prometteuse parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est l'une des formes non polluantes et silencieuses, consiste de transformer directement de l'énergie du rayonnement solaire en électricité, elle est se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée "Cellule Solaire" basé sur un effet dit "Effet Photovoltaïque".

Un des principaux obstacles pour que le panneau photovoltaïque devient plus populaire est le coût par watt d'électricité produite par ce dernier qui est dans la plupart des cas non concurrentiel à celui produit par les méthodes conventionnelles.

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient.

L'un des moyens proposés pour la diminution du coût par watt, est de diminuer considérablement la quantité de matériaux semiconducteurs entrants dans la composition de chaque cellule et augmenter sa durée de vie. Afin de répondre à cette problématique, plusieurs types de semiconducteurs ternaires et quaternaires ont été développés et proposés sous forme de couches minces. Parmi les semiconducteurs quaternaires les plus prometteurs pour la fabrication des cellules solaires en couche minces est le diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CuInGaSe_2 ou CIGS) sous sa forme chalcopyrite, qui

offre des avantages exceptionnels tel que un coefficient d'absorption très élevé et un Gap d'énergie direct qui peut varier en fonction de la concentration du Gallium dans le composé.

Un nouveau concept des cellules solaires consiste de faire un empilement des cellules classique afin d'exploiter la quasi totalité du spectre solaire peut être considéré comme une autre solution permet également de diminuer le rapport coût par watt.

L'objectif de ce présent travail est de faire une étude par simulation numérique des cellules solaires monolithiques à double hétérojonctions à base CIGS en utilisant le simulateur Atlas-Silvaco afin de trouver les paramètres technologiques et électriques de la structure optimale qui correspond au meilleur rendement de conversion possible.

Ce manuscrit s'organise de la façon suivante:

Dans le premier chapitre, nous allons rappeler quelques notions de bases indispensables sur le rayonnement solaire, la conversion photovoltaïque et l'effet photoélectrique. Nous rappellerons ensuite le principe de fonctionnement d'une cellule solaire à simple jonction PN, sa caractéristique $I(V)$ et les paramètres essentiels qui permettent de calculer le rendement d'une cellule solaire, ainsi que les différents modèles théorique d'une cellule photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera destiné à la technologie des cellules photovoltaïques. En première temps, on verra en détail les différentes pertes dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée, qui viennent influencer le rendement d'une cellule photovoltaïque. Ensuite, nous décrirons quelques innovations nécessaires afin d'améliorer le rendement de conversion photovoltaïques, puis nous citons des principales technologies qui seront passées en revue, leurs avantages et inconvénients, mais aussi leurs performances actuelles.

En troisième chapitre, nous allons particulièrement nous intéresser au matériau CIGS. Nous allons présenter ses propriétés fondamentales, à savoir sa structure cristalline, ses propriétés électriques et optiques ainsi que les différents défauts de ce matériau. Une partie de ce chapitre sera consacrée à décrire la structure la plus répandue d'une cellule solaire à base de CIGS, le rôle et les caractéristiques des différentes couches constituant la structure. Ceci sera suivi par des brèves définitions de quelques procédés de dépôt les plus sollicités pour la technologie de couches minces.

En quatrième chapitre, Nous présenterons un état de l'art des cellules solaires multijonctions. En premier temps, nous allons décrire le principe de base des cellules multijonctions, et les différentes configurations de cette approche. Ensuite, nous allons traiter un aperçu général sur la jonction tunnel et son rôle principal dans la configuration

monolithique. Enfin, nous allons parler sur quelques défis de la technologie d'une cellule solaire multijonctions de configuration monolithique.

Le cinquième chapitre sera consacré à la présentation relativement bien détaillée sur le logiciel de simulation Atlas-Silvaco et notamment les différents blocs utilisés dans la simulation des dispositifs à semiconducteurs. Par la suite, nous démontrons les diverses commandes utilisés pour la modélisation des dispositifs et en particulier les cellules solaires.

Le dernier chapitre présentera les résultats de la simulation numérique de deux sous cellules individuellement et la cellule solaire tandem à base CIGS par le simulateur Atlas-Silvaco. En suite, nous chercherons à optimiser l'épaisseur de la couche absorbante CIGS et sa bande interdite pour chacune des sous cellules, et d'obtenir la meilleure configuration de la structure tandem qui correspond au meilleur rendement de conversion possible.

Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale, qui sera un aboutissement aux résultats obtenus ainsi que les perspectives de notre thèse.

Chapitre I

Généralités sur la théorie de la cellule solaire

Sommaire

I. Introduction.....	05
II. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	05
II.1. Source d'énergie solaire	05
II.2. Spectre solaire	06
II.3. Conversion photovoltaïque	08
II.4. Effet photovoltaïque	08
II.5. Gisement solaire	09
II.6. Notion de masse d'air	10
III. Cellule solaire conventionnelle	12
III.1. Jonction PN	12
III.2. Notions de gap direct et indirect	14
III.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	15
III.4. Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque	19
III.5. Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire	22
III.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	24
IV. Conclusion	28
Références bibliographiques	29

I. Introduction

L'énergie solaire qui est inépuisable au cours du temps s'inscrit dans une perspective environnementale viable et durable, elle apporte la solution au problème de l'épuisement des combustibles fossiles. Une cellule solaire est un dispositif photovoltaïque destiné à convertir la lumière du soleil en énergie électrique, pour la fournir dans une charge adaptée de manière efficace.

Dans le cadre de ce chapitre, nous allons présenter tout d'abord quelques notions de bases indispensables sur le rayonnement solaire, la conversion photovoltaïque et l'effet photoélectrique pour mieux appréhender la suite de l'étude. La deuxième partie est consacrée à étudier de la cellule solaire conventionnelle, nous décrirons son principe de fonctionnement, sa caractéristique $I(V)$ et les paramètres essentiels qui nous permettent de calculer le rendement d'une cellule solaire, ainsi que quelques modèles théoriques d'une cellule photovoltaïque. Cela après avoir présenté les notions de base sur la jonction PN, qui présente l'essentiel de la base de cellules solaires.

II. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

II.1. Source d'énergie solaire

Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques s'impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée. Tout commence à 150 millions de Km de la terre avec le soleil, cet immense réacteur nucléaire principalement composé de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. [1, 2]

Au sein de soleil, la fusion des noyaux d'hydrogène (H_2) pour former des noyaux d'hélium (He) émet principalement sous forme de rayonnement électromagnétique dans une large gamme s'étalant de l'ultraviolet à l'infrarouge et même dans les ondes radio. [1, 2]

Cette énergie qui descend en ligne droite vers la terre ne peut pas nous parvenir sur la terre en intégralité, car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère par absorption et par diffusion.

En effet, l'atmosphère est formée d'une majorité d'azote et d'oxygène (respectivement 78% et 21%), mais aussi de l'argon, du CO₂, de la vapeur d'eau, et la fameuse couche d'ozone de la stratosphère, dont le rôle de filtrage des ultraviolets les plus durs est si important. Les poussières et les nuages ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire. [3]

Tous ces éléments constituant l'atmosphère contribuent à modifier la distribution spectrale du rayonnement solaire. Fig.1.1 schématise ces processus et leur influence relative.

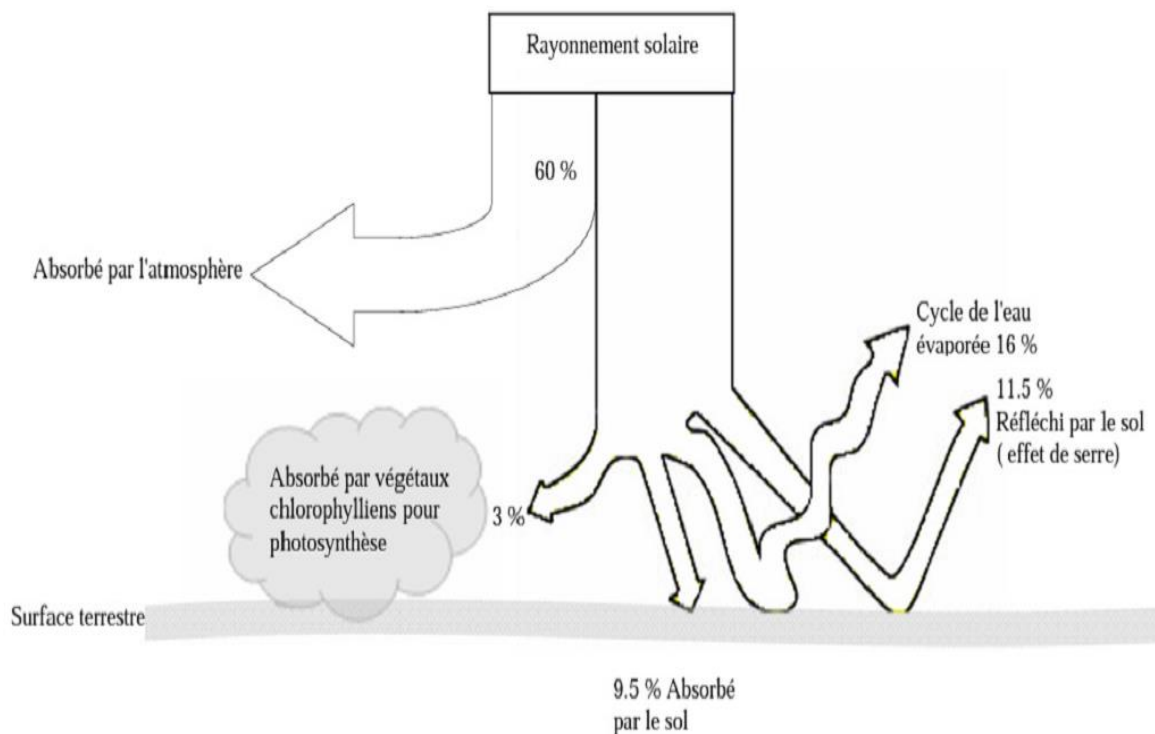


Fig.1.1. Présentation de l'absorption du rayonnement solaire depuis son émission jusqu'à son arrivée à la surface de la terre.

II.2. Spectre solaire

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueurs d'onde. La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. [4]

Ce n'est qu'au XX^e siècle que seront enfin réconciliées ces deux théories dites ondulatoire et corpusculaire de la lumière, grâce à la découverte du photon par Planck et Einstein. Car en pratique la lumière a bien une double nature :

(i) C'est une onde électromagnétique, soit une oscillation périodique, caractérisée par sa longueur d'onde λ ou sa fréquence ν ; plus la fréquence est élevée plus la longueur d'onde est faible et inversement :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où C est la célérité de la lumière.

(ii) C'est aussi un faisceau de photons qui sont comme des "grains de lumière" porteurs d'une quantité d'énergie, qui dépend de leur longueur d'onde, selon la formule de Louis de Broglie:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.2)$$

Où h est la constante de Plank. [5, 6]

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0.2 μm (ultraviolet) et 4 μm (infrarouge), avec un maximum d'énergie pour 0.5 μm . 97.5% de l'énergie solaire est comprise entre 0.2 μm et 2.5 μm . De 0.4 μm à 0.78 μm , le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes, pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. [7]

Le tableau.1.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

Tableau.1.1. Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.

$\lambda(\mu\text{m})$	$E_{\text{photon}}(\text{eV})$	Zone
0.2	6.2	Ultraviolet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Comme nous avons cité auparavant, le soleil produit une énergie incommensurable, elle équivaut à plus de 7000 fois l'énergie consommée par l'humanité. Mais cette énergie n'est pas facile à capter, l'homme a développé des techniques pour utiliser l'énergie du soleil. [2]

II.3. Conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée, il peut être simplement définie comme la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement solaire) en énergie électrique continue. Elle utilise pour cela des modules photovoltaïques composés de cellules solaires (photopiles), Les cellules solaires sont des composants à semiconducteurs, qui produisent de l'électricité lorsqu'elles sont exposées au soleil. Cette énergie lumineuse des photons incidents est donc convertie en énergie électrique par ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.

II.4. Effet photovoltaïque

On ne peut expliquer l'effet photovoltaïque sans évoquer l'effet photoélectrique, qui a été observé pour la première fois par Antoine Becquerel. Un courant électrique était généré lorsque deux électrodes immergées dans un fluide étaient exposées à la lumière. Ses travaux présentés en 1839 par son fils Edmond Becquerel ne furent expliqués que bien plus tard par les théories d'Albert Einstein, pour lesquelles il obtint le prix Nobel de physique en 1921. [8]

Il faut attendre 1954 pour que le premier moderne du photovoltaïque démarre, les chercheurs des laboratoires Bell remarquèrent par hasard, qu'en présence de lumière des diodes PN généraient un courant. [8]

Quelques mois plus tard, ils présentaient des cellules solaires à base de Silicium avec des rendements de conversion de l'ordre de 6%. Cette technologie a par la suite été fortement développée et de devenir de nos jours une solution énergétique viable. [8]

Tout simplement, l'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre, correspond à une interaction du rayonnement électromagnétique avec les semiconducteurs. Il consiste en l'apparition de petite quantité du courant dans un semiconducteur soumis à une source lumineuse généralement c'est un éclairage solaire. [9]

Quand un photon arrive sur un matériau semiconducteur, deux possibilités s'imposent ; dans le cas où le photon possède une énergie plus faible que l'énergie de gap (E_g) du semiconducteur, dans ce cas le matériau est transparent pour ce photon. [9]

Dans le cas où le photon possède une énergie équivalente ou supérieure à E_g , dans ce cas le photon est absorbé par le matériau semiconducteur, qui se traduit par une génération d'une paire électron-trou, avec la transition d'un électron de la bande de valence (B_v) vers la bande de conduction (B_c) et la création d'un trou dans B_v . [9]

Si l'on arrive à séparer cette paire électron-trou et collecter les porteurs avant qu'ils ne se recombinent, on obtient un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe.

II.5. Gisement solaire

La puissance lumineuse reçue par un mètre carré dans les conditions AM1.5 est égale à 1KW, et ce sont sous ces conditions que la puissance crête d'une cellule est mesurée. Mais celles-ci ne sont réalisées que très rarement hors laboratoire, et lorsqu'il s'agit d'installer des panneaux solaires, il est plus judicieux de connaître le taux d'éclairement à leur futur emplacement.

Dans ce cas, il suffit de connaître l'éclairement annuel d'une zone pour calculer facilement la puissance électrique qui y sera générée par les panneaux. Des mesures de la puissance solaire reçue annuellement (ou insolation) ont été effectuées dans différentes régions du globe, afin d'estimer le 'gisement solaire'. [10,11]

Les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites de l'Agence Spatiale Allemande (ASA), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200kWh/m²/an dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800kWh/m²/an limités à la partie sud de l'Europe. [12]

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le Tableau.1.2, selon l'ensoleillement reçu annuellement. [12]

Tableau.1.2. Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique. [12]

Régions	Littoral	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

II.6. Notion de masse d'air

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la terre est appelée 'la constante solaire'. Cette constante est d'environ 1.35kW/m² au-dessus de la couche atmosphérique et est réduite sur terre à 1kW/m² par l'effet de réflexion et d'absorption avec les particules existants dans la couche atmosphérique. [1]

Afin de bien comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborés dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion masse d'air (Air Masse en anglais). On appelle masse d'air, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversé par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu. [1]

A l'aide des points O, A, M et cet angle h représenté à Fig.1.2, on écrit la longueur du trajet d'un rayon solaire à traversé l'atmosphère par la formule: [13]

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \tag{1.3}$$

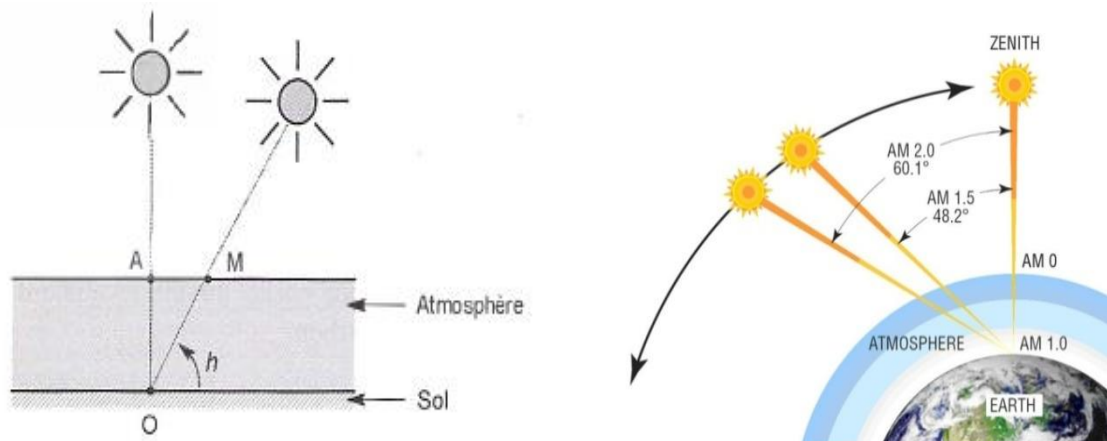


Fig.1.2. Définition de l'Air Mass AM_x.

En chaque point x , la valeur de la masse d'air (AM_x) est donnée par le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée au vertical du lieu (zénith), où x est donné par : [13, 14]

$$x = \frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} = \theta \quad (1.4)$$

(i) AM0 représente le spectre solaire en dehors de l'atmosphère, sa puissance est de 1350W/m^2 , (ii) AM1 correspond au soleil à la verticale $\theta=0^\circ$ avec une puissance d'incidence de 925W/m^2 , (iii) AM2 est obtenu pour un angle de 60° et à une puissance d'environ 691W/m^2 , (iv) AM1.5 défini par l'angle 48.2° au-dessus de l'horizon, d'une intensité de 844W/m^2 est approprié pour les applications terrestres.[6]

Fig.1.3. montre trois courbes liées à la radiation spectrale solaire qui est la puissance par unité de superficie par unité de longueur d'onde.

AM1.5G; G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, c'est le spectre standard le plus étudié donne une irradiance de 970W/m^2 , mais a été arrondi à 1kW/m^2 . [12]

AM1.5D ; qui ne tient compte que des radiations directes. [12]

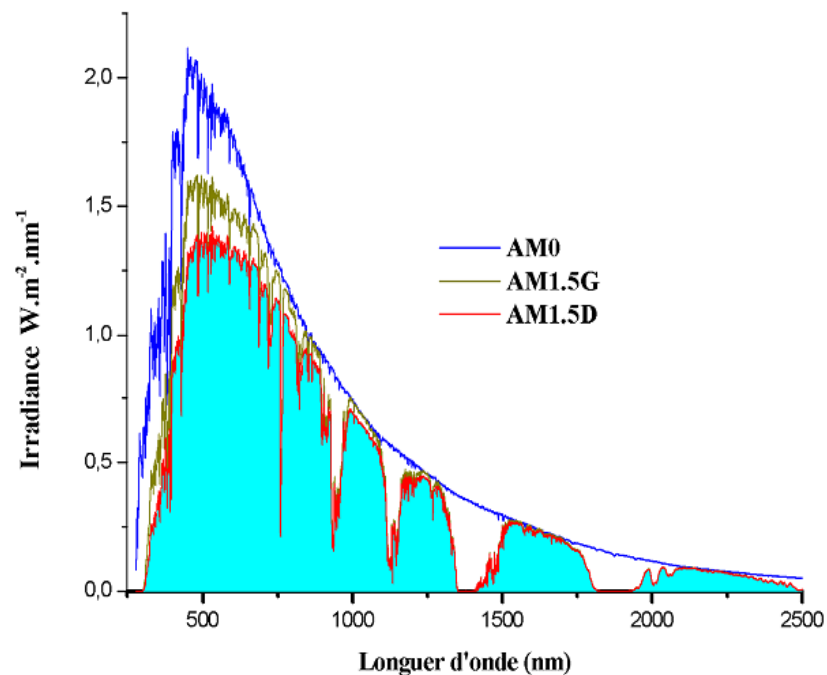


Fig.1.3. Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5.

III. Cellule solaire conventionnelle

Comme nous avons cité auparavant, 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 semiconducteurs; dit "des cellules solaires" ou "des cellules photovoltaïques", qui basées elles même sur la technologie des semiconducteurs et la jonction PN. Pour cela une étude théorique d'une cellule solaire nécessite une certaine connaissance théorique sur la jonction PN. [15]

III.1. Jonction PN

Un semiconducteur 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 semiconducteur 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. [16]

Quand deux semiconducteurs de type P et de type N sont mis en contact, un flux d'électrons et des trous diffuse respectivement vers la zone P et N, pour uniformiser la distribution des concentrations des porteurs dans la structure.

Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement.

Une zone de déplétion appelée aussi "zone de charge d'espace" (ZCE) est formée de chaque côté de l'interface. Un champ électrique est créé dans la zone de déplétion, dirigée de la région de type N vers la région de type P. Ce champ va créer une barrière de potentiel, qui va empêcher les porteurs électrons et trous de diffuser respectivement vers la région P et la région N. [9, 17]

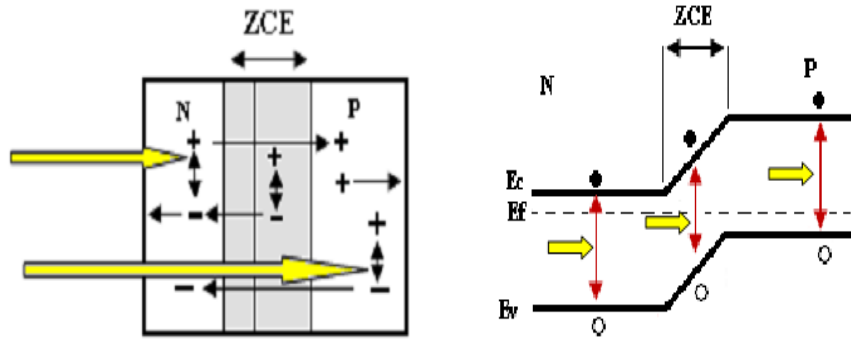


Fig.1.4. Structure d'une jonction PN (à gauche), son diagramme de bandes (à droite). [14]

Les jonctions constituées par la mise en contact de deux régions différemment dopées d'un même semiconducteur, sont appelées "homojonctions". Par contre, les jonctions réalisées par la juxtaposition de deux matériaux différents sont appelées "hétérojonctions". [18]

Le schéma de Fig.1.5 donne une description schématique des décalages de bandes de conduction et de valence pour deux types d'hétérojonction.

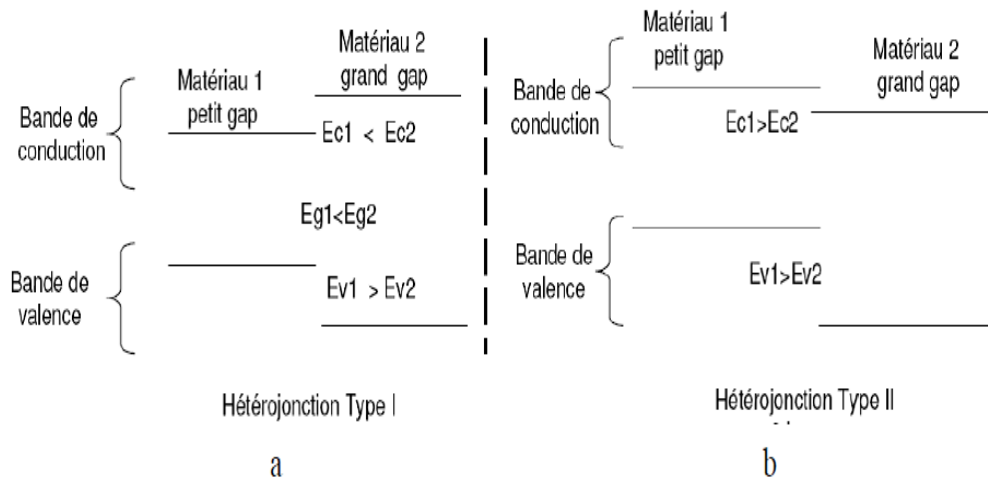


Fig.1.5. Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction.

Pour l'hétérojonction de type I (Fig.1.5. a), les offsets de bande pour la bande de conduction et de valence agissent comme des barrières de potentiel, et gardent les électrons et les trous dans le matériau de plus petite bande interdite. Une énergie est donc nécessaire pour faire déplacer les porteurs du matériau petite bande interdite au matériau grande bande interdite.

Les hétérojonctions de type II (Fig.1.5. b), dites "à bande interdite décalée" favorisent le déplacement d'un seul type de porteurs. [19]

Selon le type de dopage utilisé pour les semiconducteurs, deux hétérojonctions se distinguent:

(i) L'hétérojonction iso-types, pour lesquelles les deux semiconducteurs sont de même type de dopage, les porteurs qui diffusent dans la zone de charge d'espace sont majoritaires, donc le courant total est celui des porteurs majoritaires. [19]

(ii) L'hétérojonction aniso-types, pour lesquelles les deux semiconducteurs sont dopés différemment, les porteurs qui sont émis thermiquement à l'interface d'un semiconducteur, deviennent dans l'autre des porteurs minoritaires. [19]

III.2. Notions de gap direct et indirect

L'écart entre la bande de valence et de conduction ou "gap", représente une caractéristique fondamentale des semiconducteurs. Fig.1.6 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap.

Lorsque le matériau semiconducteur soumis à une excitation externe, par exemple un photon incident dont l'énergie $E = h\nu$ est supérieure à l'énergie de gap du matériau, peut permettre le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction. On considère alors que l'électron ayant rejoint la bande de conduction est excité, et qu'il laisse un trou (équivalent à une charge positive) dans la bande de valence. [20]

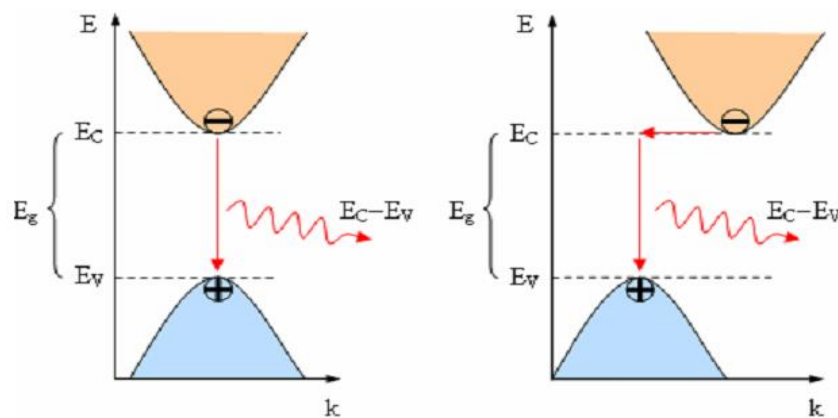


Fig.1.6. Structure de bande schématique d'un semiconducteur à gap direct (a) et à gap indirect (b).

Le transfert d'énergie entre le photon incident et l'électron de la bande de valence respecte les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Le vecteur d'onde k des photons a cependant une valeur beaucoup plus faible que celui des électrons. Les transitions énergétiques de ceux-ci se font alors sans changement de vecteur d'onde mais verticalement dans l'espace des k .

Dans l'espace réciproque, si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction coïncident pour la même valeur du vecteur d'onde k , alors le semiconducteur est à gap direct. Le gap est indirect lorsque les transitions radiatives entre les extrêmes des bandes ne peuvent se faire qu'avec la participation d'un phonon. Les phonons sont des vibrations du réseau fournissant ou absorbant la quantité de mouvement nécessaire aux déplacements de charges. [12]

Les transitions faisant appel aux phonons (gap indirect) sont donc moins probables que dans le cas d'un gap direct. L'effet photoélectrique est donc plus ou moins important en fonction du matériau semiconducteur utilisé. [21]

III.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire repose principalement sur trois mécanismes, dont l'action conjuguée de manière quasi simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique ; (i) L'absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif, (ii) La conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron trou dans le matériau semiconducteur, (iii) La collecte des particules générées dans le dispositif. [22]

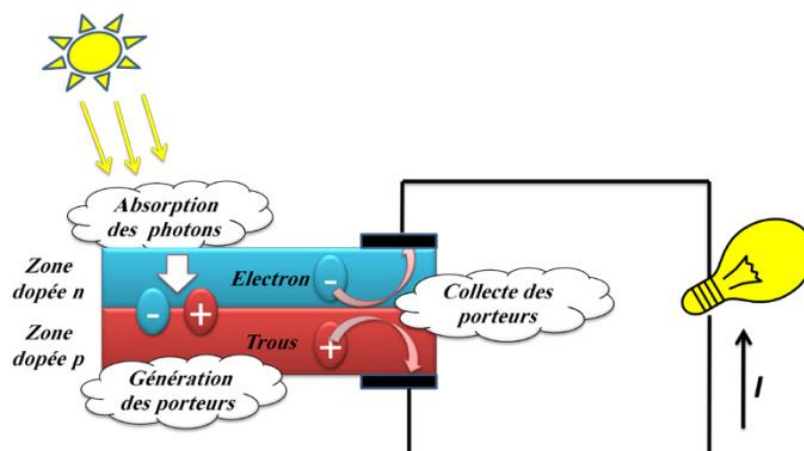


Fig.1.7. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

III.3.1. Absorption de la lumière

Le phénomène d'absorption est la première étape nécessaire au processus de conversion photovoltaïque. La lumière se compose de photons, chaque photon est un porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde. Ceux-ci peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers. Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un semiconducteur peut subir principalement trois événements optiques, comme le montre Fig.1.8 :

(i) La réflexion; la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.

(ii) La transmission ; où cette fois la lumière traverse l'objet.

(iii) L'absorption; où ici la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme, à savoir généralement sous forme thermique. [13]

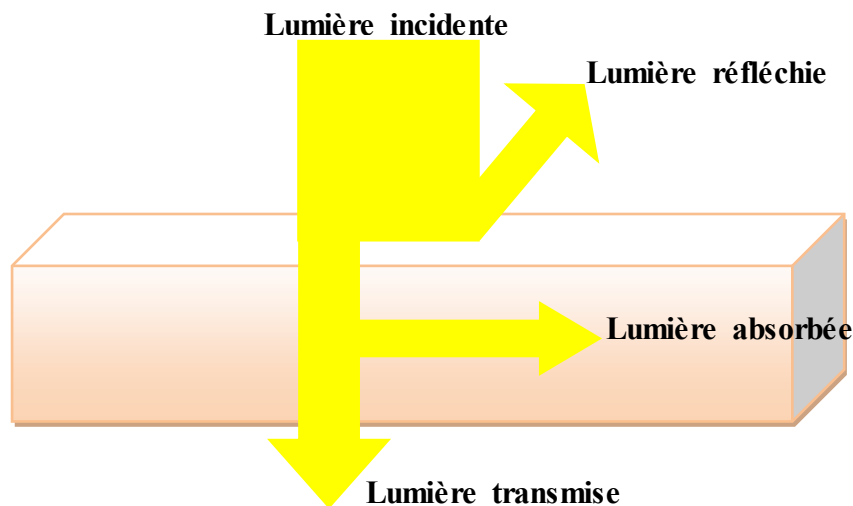


Fig.1.8. Les phénomènes de réflexion, transmission et absorption.

En effet, pour avoir un rendement plus élevé, le matériau devrait avoir un coefficient d'absorption plus élevé et un faible coefficient de réflexion. De plus, pour tout faisceau lumineux qui traverse un matériau solide d'épaisseur l , donne naissance à un faisceau transmis (I) selon la loi Beer Lambert donnée par l'expression 1.5:

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (1.5)$$

□ I_0 : Faisceau incident, α : Coefficient d'absorption, l : L'épaisseur du matériau.

La transmittance et l'absorbance T et A sont exprimées comme suit :

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha l} \quad (1.6)$$

$$A = -\log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = -\log_{10}(T) \quad (1.7)$$

La densité optique est donnée par:

$$DO = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) = 0.43\alpha.l \quad (1.8)$$

La densité optique exprimée à l'expression (1.8) est une grandeur qui mesure la diminution de l'intensité du faisceau lumineux lors de son passage dans un matériau absorbant. Elle dépend essentiellement du coefficient d'absorption α et de l'épaisseur de matériau. [23]

III.3.2. Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique

Tout solide est constitué d'atomes qui comprennent un noyau et un ensemble d'électrons gravitant autour. Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont les électrons contenus dans la matière semiconductrice. [24]

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe leur énergie par collision à un électron périphérique (les plus éloignés du noyau) en l'arrachant littéralement de son noyau. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique dans la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. [24]

La création d'un porteur libre correspond à une transition soit entre les bandes (B_v - B_c) de ce porteur soit entre un niveau d'énergie et une bande: [25]

(i) Transition d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction qui correspond à la création d'une paire électron-trou.

(ii) Transition d'un électron d'un niveau E_D (situé dans la bande interdite) vers la bande de conduction. Il reste une charge fixe positive (atome ionisé) et un électron dans B_c .

(iii) Transition d'un électron de la bande de valence vers un niveau E_A du gap. Il reste une charge négative fixe et un trou (dans B_v).

Cette paire électron-trou est susceptible de produire un courant si l'on l'attire ensuite vers l'extérieure. Si non elle revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. [6]

Un photon de fréquence ν ayant une énergie $h\nu$ au minimum égale à E_g , peut en cédant cette énergie faire passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction (Voir Fig.1.9) :

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} \geq E_g \quad (1.9)$$

Où λ est la longueur d'onde du photon et c la vitesse de la lumière.

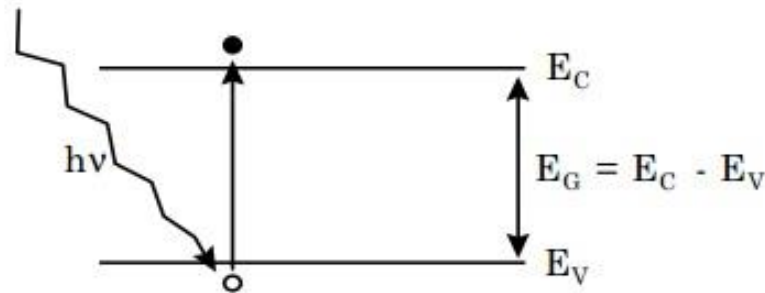


Fig.1.9. Mécanisme de création d'une paire électron-trou par un photon.

La longueur d'onde maximale susceptible de contribuer à la création de porteurs s'obtient avec l'équation (1.10) : [25]

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad (1.10)$$

Ce seuil dépend du matériau, c'est tout simplement parce que la structure électronique est différente pour chaque type d'atomes et donc les énergies mises en jeu également. [6]

III.3.3. Collecte des charges

Quand la cellule solaire (jonction PN), est exposée à la lumière, les photons incidents créent des porteurs dans les zones P et N et dans la zone de charge d'espace (ZCE). Les porteurs générés doivent être collectés et envoyés dans le circuit extérieur. Cependant, ils auront un comportement différent suivant la région de leur création. [6]

Dans les régions neutres N et P, les porteurs minoritaires en excès, suite à un gradient de concentration, diffusent vers la zone de charge d'espace (ZCE). Les porteurs qui atteignent ZCE sont propulsés par le champ électrique interne vers les régions où ils deviennent des porteurs majoritaires, les électrons vers la région N et les trous vers la région P. Ces porteurs forment le photocourant de diffusion. [12]

Dans ZCE, les paires électron-trou créées sont aussitôt dissociées par le champ électrique interne qui règne dans cette région. La probabilité de collecte de ces porteurs est plus grande. Les électrons sont émis vers la région N et les trous vers la région P. Ces porteurs forment le photocourant de génération. [12]

Les photocourants de diffusion et de génération vont s'ajouter pour donner le photocourant résultant I_{ph} qui correspond à un courant de minoritaires dont l'intensité est proportionnelle à l'éclairement. [26]

Quand la cellule est connectée à une charge, les électrons photogénérés et collectés dans la région N se recombinent avec les trous de la région P via le circuit externe, ce qui correspond à la circulation d'un courant électrique fournie par la cellule solaire. [6]

La distance caractéristique sur laquelle les porteurs minoritaires peuvent diffuser et arriver à ZCE avant de se recombiner représente la longueur de diffusion L_d . Elle est liée au coefficient de diffusion D et à la durée de vie moyenne τ des porteurs minoritaires par la relation :

$$L_d = \sqrt{D\tau} \quad (1.11)$$

Ainsi, les porteurs générés loin de ZCE situés à une distance supérieure à L_d seront perdus par recombinaison. [12]

III.4. Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque

Dans l'obscurité, la cellule photovoltaïque se comporte comme une diode classique et présente une caractéristique I(V) semblable. Sous illumination, un photocourant est créé, qui est la somme de trois composantes, le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type P, le courant de photogénération dans ZCE et le courant de diffusion des phototrous de la région de type N. [23]

Ces différentes contributions s'ajoutent pour créer I_{ph} , c'est un courant de porteurs minoritaires proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant s'oppose au courant de diode, appelé courant d'obscurité I_{obsc} , qui résulte de la polarisation du composant. [23]

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

$$I = I_{\text{obsc}} - I_{\text{ph}} = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) - I_{\text{ph}} \quad (1.12)$$

Avec

$$I_{\text{obsc}} = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (1.13)$$

Où q : charge élémentaire, K : constante de Boltzmann, T : température (K°), V : tension aux bornes de la jonction (Volt), I_s est le courant de saturation de la diode (Ampère), n est le facteur d'idéalité de la diode. [27]

Si l'on met la cellule en court circuit, la cellule ne délivre aucune puissance ($V=0$), de même, si on mesure la tension sans mettre de charge pour faire débiter du courant ($I=0$), on est en circuit ouvert, donc la puissance électrique est nulle.

Dans ces deux cas, on peut mesurer deux caractéristiques importantes d'une cellule ; le courant de court circuit (I_{cc}) et la tension en circuit ouvert (V_{co}). Entre ces deux points, on peut placer des charges variables (par exemple des résistances) pour tracer une caractéristique $I(V)$. Celle-ci semble être une simple translation de la caractéristique de la diode mais en réalité, le photocourant est dépendant de la tension. [23]

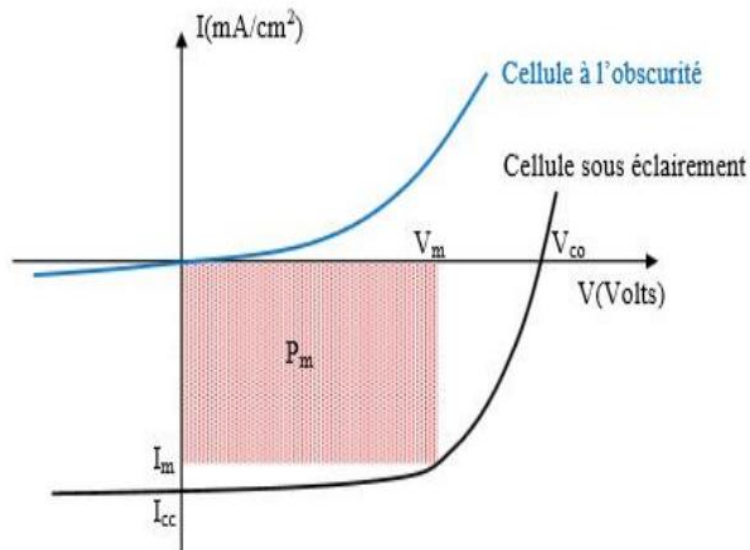


Fig.1.10. Caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement.

Fig.1.10 représente la caractéristique $I(V)$ sous illumination et à l'obscurité typique d'une cellule solaire à jonction PN. En réalité I_{cc} a une valeur négative, ce qui signifie bien que la cellule est un générateur lorsqu'elle est éclairée. Par convention, on inverse l'axe des courants de pour tracer la courbe de la caractéristique $I(V)$, comme illustré à Fig.1.11.

Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque en trois zones:

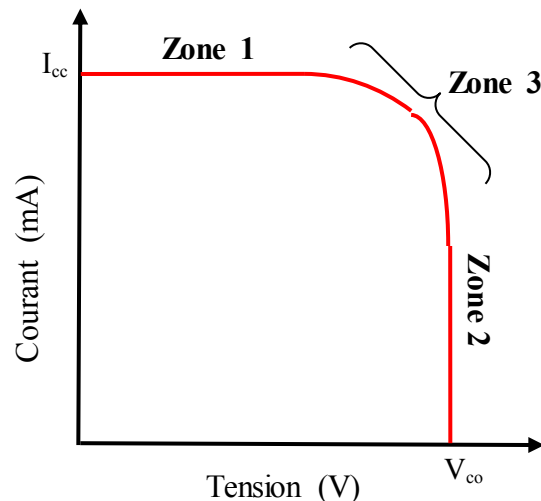


Fig.1.11. Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire.

(i) La zone 1: Une zone assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$.

(ii) La zone 2: Une zone assimilable à un générateur de tension V_{co} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s .

(iii) La zone 3: Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} . C'est dans cette zone qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé "point de puissance maximum" ou "MPP" (Maximal Power Point) dont les coordonnées sont l'intensité de puissance maximale (I_{max}) et la tension de puissance maximale (V_{max}), et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées. [7]

III.5. Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire

A partir de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque représentée sur Fig.1.11, on peut déterminer les performances d'une cellule solaire sous les conditions STC (Standard Test Conditions). Les principaux paramètres photovoltaïques sont ; le courant du court circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme, la puissance maximale, la réponse spectrale et le rendement électrique. Des brèves définitions de ces paramètres, ainsi que leurs déterminations de la caractéristique sont données ci-après.

III.5.1. Courant de court circuit I_{cc}

Si les deux électrodes sont en court circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par le champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court circuit ($I_{cc} = I(V = 0)$), qui correspond au courant de photogénération (I_{ph}) par le rayonnement. [9]

Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairé, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température. [28]

Pour une cellule solaire idéale I_{cc} est égal au I_{ph} . Il définit la quantité de paire électron-trou générée qui traverse la jonction sans recombinaison.

$$I_{cc} = I_{ph} = q G (L_n + L_p) \quad (1.14)$$

Où L_n , L_p les longueurs de diffusion des électrons et des trous respectivement; G le taux de génération ; q : Charge élémentaire. [23]

III.5.2. Tension de circuit ouvert V_{co}

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction. C'est la tension alors mesurée aux bornes des électrodes lorsque la sortie est en circuit ouvert. Elle est appelée "la tension de circuit ouvert" ($V_{co} = V(I = 0)$). [9]

Elle dépend de la différence des travaux de sortie des électrodes et de la résistance Shunt. Elle décroît avec la température et varie avec l'intensité lumineuse. [28]

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.15)$$

Ou K est la constante de Boltzmann, T la température absolue, q la charge électrique, et I_s le courant de saturation. [6]

III.5.3. Facteur de forme FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule photovoltaïque ; c'est le facteur de remplissage qui représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{\max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{oc}$, Il est défini par la relation suivante: [29,30]

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} I_{cc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad (1.16)$$

III.5.4. Puissance maximale P_{\max}

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit (V.I) est maximum. Si V_m et I_m sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximum est la surface du plus grand rectangle de côtés V_m et I_m qu'on peut inscrire sous la courbe I(V) (Fig.1.11). [30]

$$P_{\max} = (I \cdot V)_{\max} = I_{\max} \cdot V_{\max} \quad (1.17)$$

Dans le cas d'une cellule idéale, la puissance maximale correspondrait à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court circuit I_{cc}

$$P_{\max \text{ idéal}} = V_{oc} \cdot I_{cc} \quad (1.18)$$

III.5.5. Réponse spectrale RS

On appelle réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque, l'efficacité avec laquelle elle transforme l'énergie d'un rayonnement d'une certaine longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau constituant la cellule photovoltaïque, car lorsqu'une cellule solaire est soumise au rayonnement solaire, seule une partie du rayonnement solaire sera transformée en électricité. [31]

La réponse spectrale (RS) est le rapport entre le courant généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. Elle est donnée par la relation :

$$RS(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\Phi(\lambda) \cdot S} \quad (1.19)$$

Où: J_{cc} : Densité de courant de court circuit ($A \cdot cm^{-2}$); λ Longueur d'onde (nm). P_{inc} : Puissance incidente reçu par l'échantillon ($w \cdot cm^{-2}$), $\Phi(\lambda)$: est le flux lumineux incident ($W \cdot m^{-2}$), S : est la surface de la cellule (m^2). [32]

La réponse spectrale RS est aussi donnée par la relation suivante:

$$RS(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} \cdot EQE(\lambda) \quad (1.20)$$

Avec h : Constante de Planck ($\text{kg.m}^2.\text{s}^{-1}$); c : Célérité de la lumière dans le vide (m.s^{-1}); q : Charge élémentaire (C); λ : Longueur d'onde monochromatique (nm).

EQE représente le rendement quantique externe de la cellule, c'est le rapport entre le nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. [32]

Pour une longueur d'onde donnée, le rendement quantique externe est égal à 1 si chaque photon génère un électron. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle le rendement quantique interne (EQI).

Ce paramètre donne le pourcentage d'électrons participant au photocourant par rapport au nombre de photons qui ont été réellement absorbés dans la cellule:

$$EQI(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)A(\lambda)T(\lambda)} \quad (1.21)$$

Avec $R(\lambda)$: Réflectivité de la cellule; $T(\lambda)$: Rayonnement transmis à travers la cellule ; $A(\lambda)$: Absorption dans les couches non actives (%). [28, 30]

III.5.6. Rendement électrique η

Le rendement de conversion exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} I_{ccFF}}{P_{in}} \quad (1.22)$$

Le rendement de panneaux solaires dépend du lieu géographique, la couverture nuageuse, le moment dans l'année, etc. [30]

III.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation de la cellule photovoltaïque dépend du choix du circuit électrique équivalent. Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour modéliser le comportement non linéaire des jonctions semiconductrices. Parmi ces modèles, on trouve le modèle à une diode et celui de deux diodes. [23]

III.6.1. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale

Dans l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique. Selon si la tension appliquée est supérieure ou inférieure à une tension seuil, la diode est respectivement passante ou bloquante. La densité de courant I_D dans la diode suit une équation de type Shockley:

$$I_D = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \tag{1.23}$$

Avec I_s le courant de saturation sous polarisation inverse, n le facteur d'idéalité ($0 < n \leq 1$ où 1 est le cas idéal). [29]

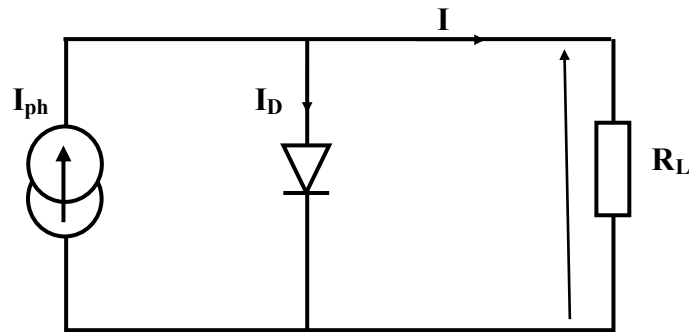


Fig.1.12. Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.

Si l'on considère le cas simple d'une cellule idéale à une jonction soumise à un flux lumineux, celle-ci fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent est représenté sur Fig.1.12.

Il est schématisé par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant qui modélise le courant photogénéré. On peut admettre qu'en présence de lumière il y a apparition d'un photocourant supplémentaire I_{ph} , dont le sens est opposé au courant direct. R_L est la résistance de charge du circuit extérieur. [29, 33]

En branchant un circuit extérieur sur la cellule éclairée, on recueille ce courant sous lumière vaut:

$$I(V) = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) - I_{ph} \tag{1.24}$$

Et la tension V est donnée par:

$$V = n U_t \ln\left(\frac{I_{ph} + I_s + I}{I_s}\right) \tag{1.25}$$

Où $U_t = \frac{KT}{q}$, n est le facteur d'idéalité. [33]

III.6.2. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire réelle

Fig.1.13 représente la modélisation de la cellule photovoltaïque par le modèle à une seule diode. Pour tenir compte des limitations de la cellule et calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant une source de courant, ainsi que les résistances série R_s et parallèle (shunt) R_{sh} représentent les résistances parasites de la cellule photovoltaïque. [34]

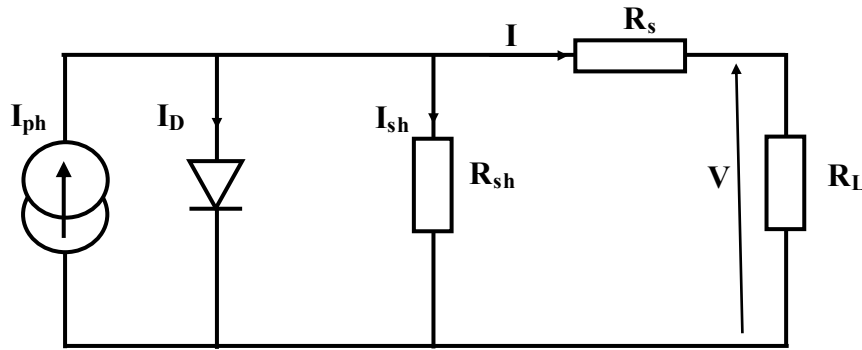


Fig.1.13. Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.

En branchant un circuit extérieur sur la cellule éclairée, on recueille ce courant sous lumière vaut :

$$I(V) = I_s \left(\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nKT}\right) - 1 \right) + \frac{V-IR_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (1.26)$$

La résistance série R_s modélise les pertes résistives dans la structure, les résistances de contact aux interfaces métal/semiconducteur et celles du métal à proprement parler, la pente de la courbe $I(V)$ au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série ($\frac{1}{R_s}$). Afin de limiter son influence sur le courant de la cellule, R_s doit être minimisée en optimisant les contacts métal/semiconducteur et en diminuant la résistivité du matériau.

Un compromis est à trouver entre cette dernière et la recombinaison des porteurs ; un dopage trop élevé entraîne des recombinaisons trop importantes. Les valeurs de résistivité retenues sont comprises en général entre 0.5 et 5 $\Omega \cdot cm$ pour le substrat initial. [12, 35]

Le deuxième est la résistance shunt R_{sh} qui correspond aux pertes dans la surface (courants de fuite) et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. La pente de la courbe $I(V)$ au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($\frac{1}{R_{sh}}$). [34]

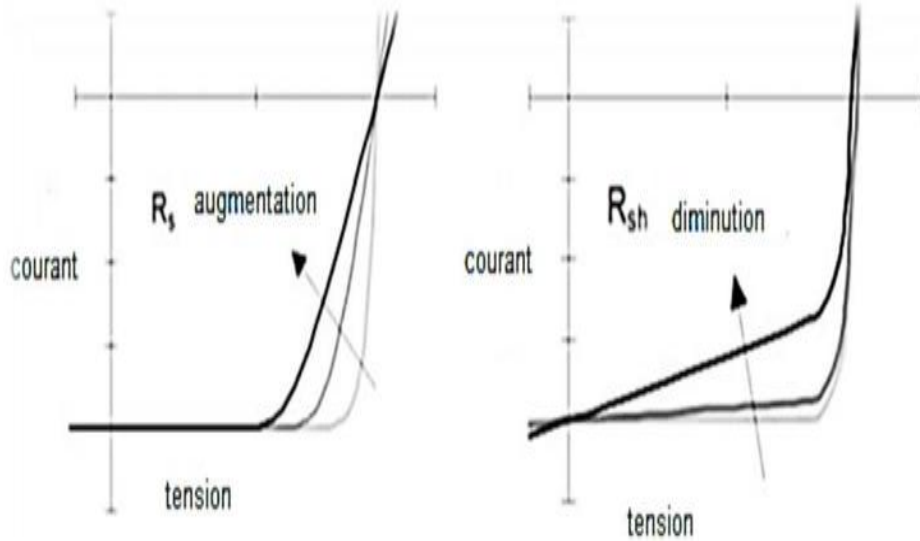


Fig.1.14. influence théorique de la résistance série et la résistance parallèle d'une cellule photovoltaïque sur sa courbe I(V).

Les allures de la caractéristique I(V) pour plusieurs valeurs de R_s et R_{sh} sont représentées sur Fig.1.14.

Plus la pente de la courbe intensité tension à $V=V_{oc}$ est grande, plus la résistance série est faible et plus la valeur du facteur de forme sera élevée, entraînant une amélioration des performances du dispositif.

D'un autre côté plus la pente de la courbe intensité tension à $I=I_{sc}$ est grande, plus la résistance parallèle est faible et plus la valeur du facteur de forme sera basse, entraînant une diminution des performances du dispositif. [34]

Il existe aussi un autre schéma équivalent qui est souvent utilisé pour la modélisation des cellules photovoltaïques et qui utilise une deuxième diode en parallèle avec la première comme montre le schéma ci-dessous: [29]

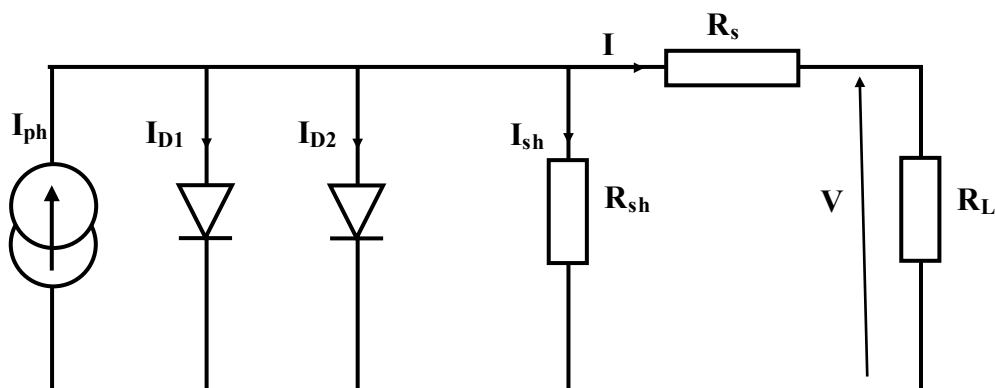


Fig.1.15. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque (modèle à deux diodes).

L'équation déterminant la densité de courant dans ce modèle est donc :

$$I = I_1 + I_2 + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (1.27)$$

$$I = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 KT}\right) - 1 \right) + I_{s2} \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 KT}\right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (1.28)$$

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire est ainsi composé d'une source de courant et de deux diodes en parallèle. La source de courant modélise le courant photogénéré I_{ph} . La première diode (facteur d'idéalité $n_1 \approx 1$) correspond au courant de diffusion dans la base et l'émetteur. I_{s1} est le courant de saturation de ce phénomène. I_2 est le courant de génération/recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace, avec I_{s2} le courant de saturation et n_2 le facteur d'idéalité de la seconde diode (facteur d'idéalité $n_2 \approx 1$). [12]

IV. Conclusion

Ce chapitre partagé en deux parties, nous a permis en premier lieu de donner des initiations nécessaires sur le rayonnement solaire et le mécanisme de la conversion photovoltaïque. En second lieu nous avons présenté une étude générale sur les cellules solaire conventionnelle, pour cela nous avons fait un survol sur la théorie de la jonction PN, ensuite nous avons vu le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, ses caractéristiques $I(V)$ à l'obscurité et sous l'éclairement, suivi de brèves définitions sur les principaux paramètres photovoltaïques, et nous avons terminé par décrire quelques modèles théoriques d'une cellule solaire dans les cas idéal et réel.

Références bibliographiques

- [1] Benoit Brousse "Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique" Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Année 2004
- [2] Daniel Lincot "lumière du ciel énergie de la terre la conversion photovoltaïque au service hommes" Institut de recherche et de développement sur l'énergie photovoltaïque, Année 2015.
- [3] Benaïcha Mouna "Contribution à l'étude des propriétés physiques et électriques des composés semi-conducteurs III-V. Application à l'effet photovoltaïque" Thèse de Doctorat, Université El-hadj Lakhdar Batna1, Année 2018.
- [4] Amar Hichem "Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSélénure de Cuivre Indium Galium $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS)" Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, Année 2014
- [5] Anne Labouret, Michel Viloz "Installations photovoltaïques, Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau" Edition5, Agence de l'environnement et la maîtrise de l'énergie.
- [6] Hfayed Massika "Simulation numérique d'une Cellule solaire (p/n) en GaAs" Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra, Année 2014.
- [7] Corinne ALONSO "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie" Mémoire d'Habilitation, Université Paul Sabatier Toulouse III, Année 2003.
- [8] P.H. Nguyen, Christine Michel, J. Bottin "Etude de la conversion photovoltaïque : effets des résistances parasites des photopiles" Phys. Appl. 18 (1983) 775-779
- [9] Henry Mathieu Hervé Fanet "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques" Edition 6.
- [10] Amina Benhammou "Optimisation d'un nouveau système de séchage solaire modulaire pour plantes aromatiques et médicinales" Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Année 2010.
- [11] A.Mefti, M.Y. Bouroubi, H. Mimouni "Evaluation du potentiel énergétique solaire" Bulletin des énergies renouvelables - N° 2 Décembre 2002.
- [12] Ouddah Mourad "Etude du silicium poreux destiné aux cellules solaires" Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, Année 2009
- [13] Anne Labouret, Michel Viloz "Energie solaire photovoltaïque" Edition2.
- [14] Zouak Belkacem "Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité" Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, Année 2012.
- [15] Assia Bouraiou "Élaboration et caractérisation des couches minces CuInSe_2 par Électrodéposition" Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Année 2009.

- [16] Harish Sankaranarayanan "Fabrication of CIGS Absorber Layers Using a Two-Step Process for Thin Film Solar Cell Applications" Thèse de Doctorat, Université Florida Sud, Année 2004.
- [17] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled "Etude de la jonction PN d'un semiconducteur à l'équilibre thermodynamique" Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126
- [18] Abderrezek Mahfoud "Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement" Thèse de Doctorat, Université Sétif 1, Année 2015.
- [19] Bali Amina "Etude comparative entre les cellules solaire de type p+-AlGaAs/p-GaAs/n-GaAs et une autre de type n+-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs" Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider-Biskra, Année 2013.
- [20] Mohammedi Mohammed "Etude et simulation de cellules photovoltaïques a contacts arrières inter-digités sous environnement Silvaco" Mémoire de Magister, Université Abou Bakr Blekaid Tlemcen, Année 2012.
- [21] Baldomero Garcia, Jr "Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas" Thèse de Doctorat, Université Monterey, California, Année 2007.
- [22] Brahim Lakehal "Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky" Mémoire de Magister, Université de Batna, Année 2009.
- [23] Moulay Ahmed Slimani "Cellules solaires pérovskites imprimées et optimisation des couches pérovskites pour les cellules tandems" Mémoire de Magister, Université du québec, Année 2009.
- [24] Boukaraba Mohamed, Zorrig Heythem "Effet de la couche buffer dans les cellules solaires Tandem à base de CIGS" Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf M'sila, Année 2017.
- [25] A. Chovet , P. Masson "Physique des semiconducteurs" Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille, Année 2004/2005
- [26] Maachou Fatima "Analyse et optimisation des paramètres photovoltaïques dans les cellules solaires à simple jonction, tandem et triple-jonction en technologie couches minces de silicium" Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, Année 2018
- [27] Rosi Ranan, Md. Mahmudul Islam, K.M.Asif-Ul-Islam, "Performance analysis of thin film tandem solar cell using different materials and maximizing efficiency of solar panel by solar tracking using fpga" Institut militaire des sciences et de la technologie Bangladesh, Année 2013.
- [28] Dib Wassila "Modélisation des structures photovoltaïques aspects fondamentaux et appliqués" Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkïd De Tlemcen, Année 2010.
- [29] Zouad Mohamed Samir, Mahieddine Mohamed "Etude et simulation d'une cellule solaire à multi-jonctions à base de InGaN" Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida, Année 2014.

- [30] Roshanak RADBEH "Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones" Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Année 2008.
- [31] Antonio Luque, Steven Hegedus "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering" 2003.
- [32] Belarbi Asma "Elaboration et Caractérisation optique des couches d'oxydes et Applications" Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Année 2018.
- [33] Souici Fatma Zohra "Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe₂)" Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, Année 2009
- [34] Guanoune Walid "Simulation des performances des cellules solaires à base de matériaux organiques" Mémoire de Magister, Université des Freres Mentouri Constantine, Année 2015.
- [35] Mathieu Urien "Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible" Thèse de doctorat, Université Bordeaux I Année 2008.

C

hapitre II

État de l'art de la technologie des cellules solaires

Sommaire

I. Introduction.....	33
II. Historique de la conversion photovoltaïque.....	33
III. Facteurs limitant le rendement.....	35
III.1. Pertes physique.....	35
III.2. Pertes technologiques.....	38
IV. Méthodes d'amélioration des performances des cellules solaires.....	41
IV.1. Contacts face avant et face arrière.....	42
IV.2. Texturation de la surface.....	43
IV.3. Passivation des faces avant et arrière.....	45
IV.4. Couche antireflet	45
IV.5. Champ électrique BSF.....	46
V. Différentes filières photovoltaïques.....	47
V.1. Première génération.....	48
V.2. Deuxième génération.....	50
V.3. Troisième génération	53
VI. Conclusion	57
Références bibliographiques	58

I. Introduction

La technologie des cellules photovoltaïques n'a pas encore atteint son plein potentiel, plusieurs études ont été mises en œuvre afin de diminuer le coût de production et d'optimiser les rendements de conversion. Cela conduit à l'émergence de nombreuses filières photovoltaïques avec des matériaux moins coûteux et de procédés plus simples.

Dans ce contexte, on va consacrer ce chapitre pour la technologie des cellules photovoltaïques. En première lieu et après avoir rappelé quelques dates sur l'histoire de cellules photovoltaïque qui établit la position des cellules solaires par rapport aux autres systèmes de production d'énergie électrique, puis on verra en détail, les différentes pertes dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée, qui viennent influencer le rendement d'une cellule photovoltaïque.

Ensuite, on parlera de quelques innovations nécessaires afin d'améliorer le rendement de conversion photovoltaïques. On traite aussi dans cette partie consacrée aux principales technologies qui seront passées en revue (silicium cristallin ou amorphe, CdTe, CIGS, CZTS, etc.), leurs avantages et inconvénients, mais aussi leurs performances actuelles.

II. Historique de la conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque (ou photoélectrique) se définit par la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement solaire) en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière.

Le phénomène a été découvert par le physicien Antoine Becquerel en 1839 qui mis en évidence l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique, lorsque celle-ci était exposée à la lumière naturelle. [1]

Le terme "photovoltaïque" vient du grec "photos" qui signifie lumière et de "Volta" du nom du physicien italien "Alessandro Volta" qui en 1800 découvrit la pile électrique. [2]

En 1875, Werner Von Siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semiconducteurs, mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire. [3]

Ce n'est que bien plus tard en 1883, que Charles Fritts réalisa la première cellule solaire en illuminant un cristal de Sélénium (Se) recouvert d'une fine couche d'or (Au), avec un rendement de conversion de l'ordre de 1 à 2%. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, cette découverte reste comme une curiosité scientifique dans les laboratoires. [4]

Le phénomène effet photovoltaïque n'a été compris qu'en 1905 quand Einstein et Planck ont présenté le principe du photon [5]. Cependant, une cellule solaire relativement efficace générant une quantité raisonnable de puissance n'a pas été créée jusqu'en 1954, lorsque les trois chercheurs américains du laboratoire Bell aux USA, Chapin, Pearson et Prince ont développés une cellule solaire à base de Silicium, avec un rendement énergétique de 6%. [1]

En 1959, les Américains lancèrent un satellite Vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïques. Tous les grands laboratoires s'intéressent à cette nouvelle technologie, et, en 1960, M. Rodot et H. Valdman réalisèrent la première cellule photovoltaïque au Centre National de la Recherche Scientifique. [6]

D'autre part, suite à la crise économique des années 1970, la flambée des prix du pétrole en 1973 et les accidents des installations nucléaires Three Mile Island (USA 1979) et Tchernobyl (URSS 1986), ce qui renforce l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables. Et en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware. [7]

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. La croissance de l'industrie fut spectaculaire, et notamment à travers de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tel que : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. En 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque, parcourt une distance de 4000km en Australie. [7]

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001. [8]

De 2010 à 2016: la puissance installée du parc photovoltaïque mondial a été multipliée par six fois entre fin 2010 (50GW) et fin 2016 (305GW). [9]

Le solaire à concentration, le dépôt sur ruban, les panneaux à couche fine et les matériaux organiques constituent aujourd'hui les principaux axes de recherche et d'innovation future. [9]

III. Facteurs limitant le rendement

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale, différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la fois de la nature du matériau et à la technologie utilisée. On peut classer les pertes en deux grands facteurs:

III.1. Pertes physique

III.1.1. Absorption partielle

La première limitation correspond au phénomène d'absorption qui dépend de l'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique. Alors tous les photons possédant une énergie inférieure au gap de l'absorbeur (E_g), ils ne peuvent pas générer de porteurs libres et traversent le matériau sans être absorbés et sont donc perdus. En revanche les photons d'énergie supérieure au gap ne pourront générer qu'une seule paire électron-trou.

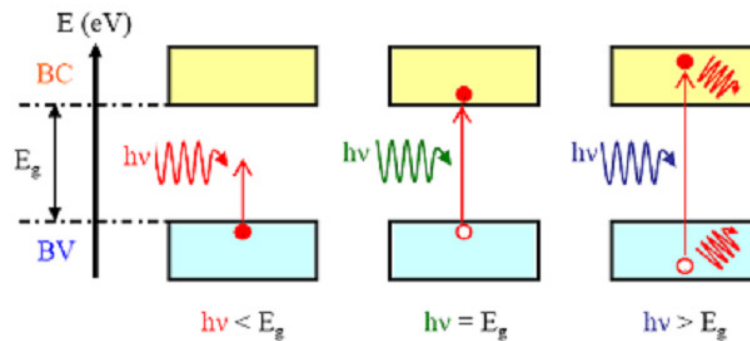


Fig.2.1. Absorption de différents photons par un matériau semiconducteur.

Comme illustré sur Fig.2.1, l'énergie excédentaire est perdue sous forme de chaleur. Sous un éclairage d'AM1.5, cette perte est évaluée à 33% dans le cas du Silicium. [10, 11]

Le surplus d'énergie entraînera un phénomène de thermalisation qui permettra au porteur de charge excité de relaxer cette énergie excédentaire pour revenir au niveau de E_c via une émission de phonons. Macroscopiquement, cela se traduit par un échauffement du matériau.

Fig.2.2 montre le spectre exploité par une cellule c-Si par rapport au spectre solaire AM1.5. Avec un confinement optique idéal, la densité de courant de court circuit maximale ($I_{cc\ max}$) d'une cellule c-Si peut atteindre 42.5mA/cm^2 sous un éclairnement AM1.5. [12, 13]

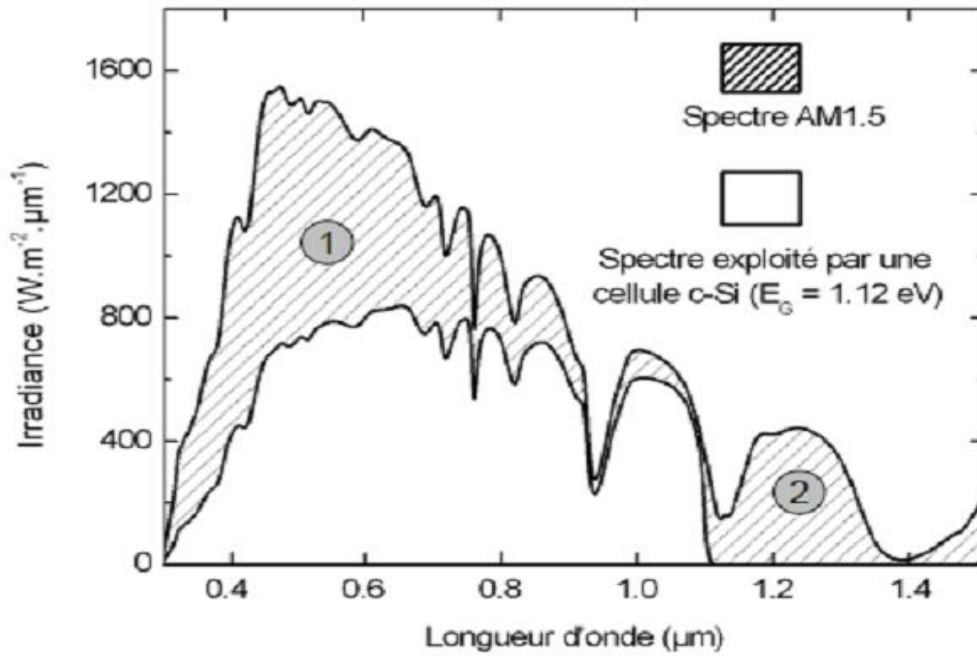


Fig.2.2. Différentes pertes dues aux mécanismes d'absorption dans le c-Si. (1) Thermalisation des photons d'énergie supérieure à 1.12eV ; (2) Photons d'énergie inférieure à 1.12eV non absorbés.

III.1.2. Recombinaisons radiatives

Dans un semiconducteur pur doté d'une structure de bande à transitions directes, le mécanisme de recombinaison radiative (interbandes) domine les autres phénomènes. C'est l'inverse de la création d'une paire électron-trou par un photon.

Un électron de la bande de conduction va se recombiner directement avec un trou de la bande de valence. Lors de cette transition, l'énergie est libérée sous la forme d'un photon (Fig.2.2). L'énergie du photon émis étant égale ou proche de celle du gap, il pourra avec une faible probabilité être recyclé et créer une nouvelle paire électron-trou. En revanche pour un gap indirect, les recombinaisons radiatives sont peu probables. [14, 15]

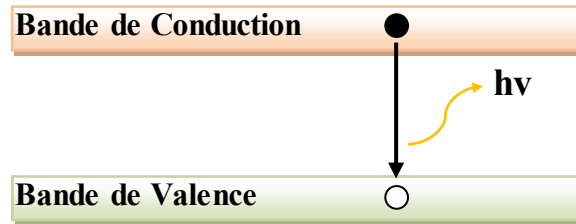


Fig.2.3. Schéma descriptif du processus de recombinaison radiative.

Le taux de recombinaison radiative (R_D) est proportionnel à la fois au nombre d'électron et au nombre de trous :

$$R_D = B(pn - n_i^2) \quad (2.1)$$

Où: B est le coefficient de recombinaison radiative. [16]

III.1.3. Recombinaisons Auger

La recombinaison Auger est considérée comme une interaction à trois particules, lorsque l'énergie de l'électron qui se retombe dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre ou un trou sur un niveau profond de la bande de valence.

Cette recombinaison nécessite donc trois particules: au moins un trou et un électron et la troisième peut être un trou ou un électron. Ce type de recombinaison est similaire à la recombinaison de bande à bande, mais la troisième particule reçoit l'énergie à partir de la recombinaison. [14, 17]

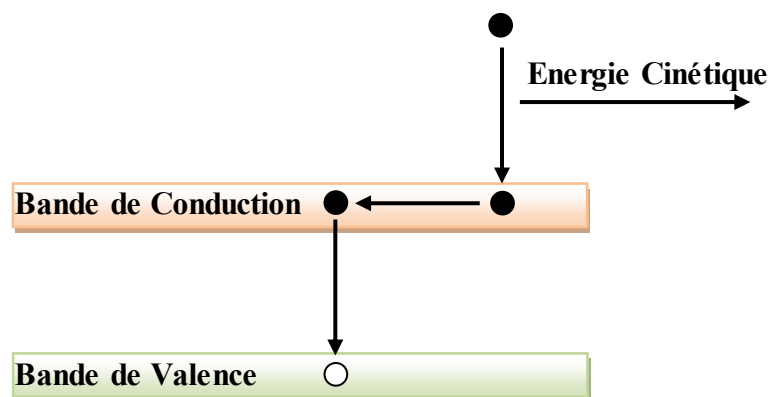


Fig.2.4. Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger.

Ce mécanisme est prédominant pour les régions de très fortes concentrations de porteurs. Le taux de recombinaison Auger est donné par la relation suivante: [17, 18]

$$R_{Au} = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \quad (2.2)$$

Avec: C_n et C_p sont des coefficients d'Auger.

III.2. Pertes technologiques

La différence entre le rendement maximal théorique et ce lui obtenu expérimentalement peut être due à des pertes technologiques, c'est-à-dire qui est potentiellement évitables par l'utilisation de technologies adaptées. Les pertes les plus importantes proviennent de facteurs optiques et résistifs, mais aussi des recombinaisons volumiques et surfaciques.

III.2.1. Pertes optiques et résistives

L'effet photovoltaïque provoque, sur certains matériaux, l'émission d'une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Cette quantité dépend généralement par la quantité de photons pénétrant dans le semiconducteur. Alors que la quantité de photons est elle-même dépend par le coefficient de réflexion (R) de la surface de la cellule solaire. Pour un flux de photon incident (Φ_0), le flux pénétrant dans le semiconducteur est $(1 - R)\Phi_0$, et $R\Phi_0$ est la quantité réfléchi. Afin de diminuer les réflexions, la surface de la cellule est texturée et recouverte d'une couche antireflet. [19, 20]

De manière analogue, il y'a une autre limite technologique engendrée par le taux d'ombrage, qui tient compte de la couverture partielle de la surface de la cellule par une partie opaque correspondant à la surface des contacts métalliques de la face avant (la grille métalliques). Généralement ce taux d'ombrage représente environ 5 à 6% de la surface totale. [20]

En ce qui concerne les pertes résistives, les possibilités d'améliorations ce type de pertes dépendent fortement de la structure de cellule utilisée. Des phénomènes de résistance série peuvent provenir de conductivités insuffisantes dans le semiconducteur, dans les métallisations, ainsi qu'au contact métal/semiconducteur.

Un second type de pertes résistives provient de courts circuits (shunts) entre les électrodes positives et négatives de la cellule. Ces différentes pertes résistives influencent fortement la valeur du facteur de forme des cellules solaires. [12, 14]

III.2.2. Recombinaison volumique

Les deux mécanismes Auger et radiatifs ne dépendent que du dopage et pas des défauts et des centres de recombinaison associés. Ils sont souvent masqués par un mécanisme appelé recombinaison volumique dû à la présence inévitable des impuretés et imperfections cristallines dans le matériau d'un semiconducteur, causent l'apparition de niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite. [21]

La recombinaison en volume est une recombinaison assistée par un piège se produit lorsqu'un électron tombe dans un piège, ou un niveau d'énergie au sein de la bande interdite résultant d'un défaut structural ou impuretés. Une fois que le piège est rempli, il ne peut accepter un autre électron. Les électrons occupant le piège, dans un deuxième temps, s'installent dans des états de la bande de valence vides, complétant ainsi le processus de recombinaison. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence. [15]

Le modèle physique décrivant les recombinaisons en volume est basé sur le modèle de Read-Shokley-Hall (SRH) : [22]

$$R_{\text{SRH}} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p \left(n + n_i \exp \frac{E_i - E_T}{kT_L} \right) + \tau_n \left(p + n_i \exp \frac{-(E_i - E_T)}{kT_L} \right)} \quad (2.3)$$

Où τ_n , τ_p sont les durée de vie des électrons et des trous, n_i est un niveau de concentration intrinsèque, E_i est le niveau d'énergie intrinsèque de Fermi, E_T est le niveau d'énergie de piège, et T_L est la température du réseau en Kelvin.

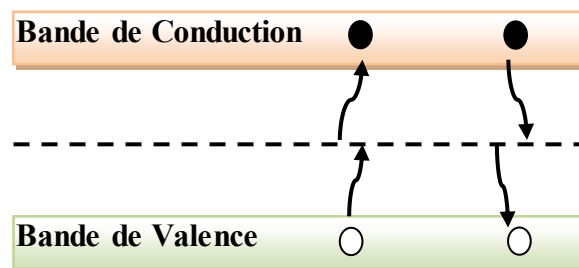


Fig.2.5. Schéma descriptif du processus de recombinaison Schokley-Read-Hall.

L'efficacité de ce processus dépend de la densité des niveaux profonds et par suite, de la qualité du matériau utilisé et de sa technologie d'élaboration. [23]

III.2.3. Recombinaison surfacique

La surface d'un semiconducteur est un lieu des nombreux défauts (polissage pour les cristaux, attaque chimique, etc.) perturbent sa continuité du réseau cristallographique. Ceci entraîne la présence de liaisons non satisfaites des atomes de surface ou liaisons pendantes. Les atomes d'un matériau semiconducteur auxquels il manque une liaison covalente ne sont donc pas dans une configuration électronique stable (liaisons non saturées). [13, 21]

Quand on éclaire le matériau semiconducteur, la recombinaison superficielle provoque une concentration des porteurs minoritaires en excès, moins importante en surface que dans le volume. Alors les porteurs photogénérés diffusent vers la surface donnant naissance à un courant de fuite par diffusion. [21]

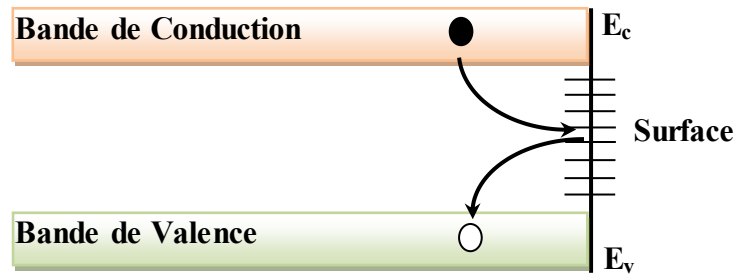


Fig.2.6. Schéma descriptif du processus de recombinaison en surface.

Le taux de recombinaison Shockley-Read-Hall en surface est donné par l'expression suivante: [22]

$$R_{\text{Surf}} = \frac{p_s n_s - n_i^2}{\left(\frac{n_s + n_i \exp \frac{E_{ts} - E_i}{kT}}{S_{p0}} \right) + \left(\frac{p_s + n_i \exp \frac{E_i - E_{ts}}{kT}}{S_{n0}} \right)} \quad (2.4)$$

Où: n_s et p_s sont les densités des électrons et des trous en surface, S_{n0} et S_{p0} sont les vitesses de recombinaisons des électrons et des trous respectivement.

On a :

$$S_{n0} = \sigma_n v_{th} N_{ts} \quad \text{et} \quad S_{p0} = \sigma_p v_{th} N_{ts} \quad (2.5)$$

Où N_{ts} est la densité d'états de surface par unité de surface, v_{th} est la vitesse thermique des porteurs de charge, σ_n et σ_p sont les sections de capture efficaces du défaut.

IV. Méthodes d'amélioration des performances des cellules solaires

Les performances des cellules se sont améliorées au fil des ans, les coûts n'ont cessé de baisser, et les systèmes photovoltaïques se sont relativement démocratisés. La problématique globale demeure néanmoins l'augmenter les rendements de conversion, mais aussi dans une optique industrielle la diminution de coût de production, afin de rendre ce mode de production d'énergie attractif par rapport aux moyens thermiques traditionnels. [24]

Les premières cellules solaires c-Si réalisées dans les années 50 utilisaient des substrats de type N (dopés Phosphore). Ces premières cellules étaient constituées seulement d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. À cette époque, leur première application, militaire, était destinée à l'alimentation des satellites. L'absorbeur et l'émetteur qui forment la jonction PN sont au cœur du fonctionnement de la cellule. Les substrats de type P se révélant plus résistants aux radiations, les cellules photovoltaïques ont ensuite été développées sur du c-Si dopé Bore. [13, 25]

Plusieurs innovations ont permis d'augmenter le rendement des cellules. Les recherches menées depuis le début des années 80, avaient pour but principal d'améliorer le rendement des cellules photovoltaïques. Cette amélioration repose principalement sur une optimisation continue de la structure des cellules, pour permettre un meilleur confinement optique et une diminution des recombinaisons volumiques et surfaciques, sans pour cela provoquer des pertes résistives. [13]

Plusieurs technologies avancées sont nécessaires pour réduire les pertes dans ce type de cellules et augmenter le rendement :

- (i) Texturation de surface.
- (ii) Passivation des faces avant et arrière.
- (iii) Couche antireflet (CAR).
- (iv) Champ électrique BSF (Back Surface Field).

Fig.2.7 présente l'architecture classique de la cellule photovoltaïque standard avec quelques améliorations possibles permettant d'optimiser le rendement de conversion photovoltaïque. [26]

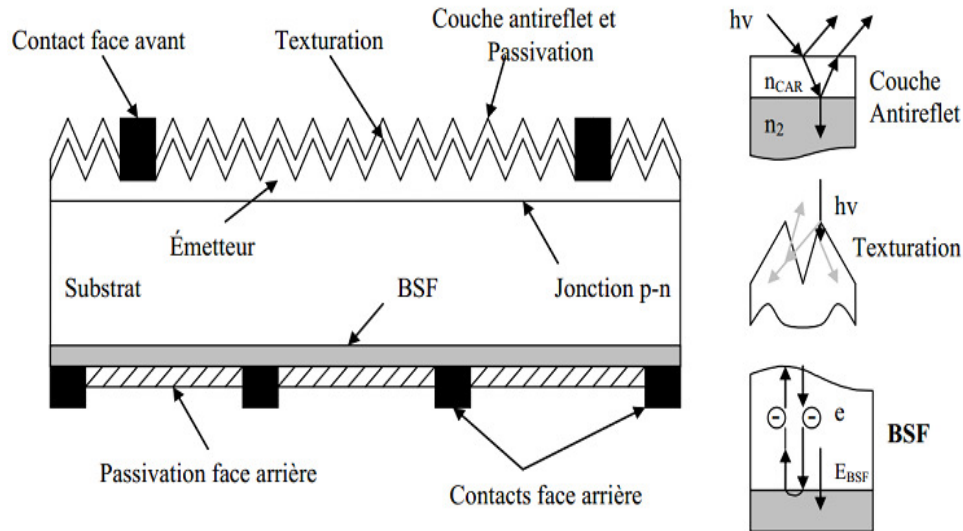


Fig.2.7. Composition d'une cellule photovoltaïque.

IV.1. Contacts face avant et face arrière

De chaque côté de la jonction PN, on dépose des contacts métalliques (les électrodes) afin de collecter et envoyer les porteurs photo générés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique $I(V)$ du contact doit être linéaire. [23]

La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré ainsi que le rendement. [25]

Sur la face avant, celle qui reçoit la lumière, l'électrode a une forme de grille afin d'optimiser la collecte des porteurs photogénérés tout en laissant passer la lumière. Si la grille est trop espacée, la lumière pourra passer facilement, de nombreuses charges seront créées, néanmoins, une partie des porteurs n'aura pas le temps d'être collectée avant de se recombiner. A l'opposé, si la grille est trop resserrée, tous les porteurs pourront être collectés, cependant moins de lumière pourra passer et être absorbée par le matériau créant ainsi moins de charges. [27]

Pour certaines technologies, il est possible d'utiliser des électrodes qui doivent être simultanément transparentes et conductrices comme l'ITO (Oxyde d'Indium Etain) ou le ZnO. Leur transparence est liée à la valeur de leur bande interdite tandis que leurs propriétés électriques dépendent de la composition des couches et d'un éventuel dopage.

On dépose généralement une première couche non dopée de ZnO puis une couche dopée de ZnO:Al ou de ITO. En effet, la couche de ZnO intrinsèque, donc non conductrice, évite tout courant de fuite entre la couche absorbante et le contact supérieur. Dans ce cas, le problème de la grille ne se pose plus puisque cette couche recouvre toute la cellule. [27]

Sur la face arrière, le matériau déposé est un métal sur le fond de l'absorbeur, dont le rôle est de collecter les porteurs photogénérés et les envoyer vers la charge externe. Cette couche sert également de couche réfléchissante pour les photons qui n'ont pas été absorbés à leur premier passage.

Dans les cellules standards, les exigences du matériau de contact arrière sont d'avoir une faible résistivité, de ne pas entraver le flux de porteurs majoritaires. Le matériau de contact arrière devient plus important et plus intéressant lorsque les cellules deviennent plus minces, parce que le profil de production de porteurs se déplace plus près de lui.

Les conditions de base pour un matériau de contact arrière autre qu'être conductrices sont:

- (i) Qu'il devrait former un contact ohmique avec l'absorbeur.
- (ii) Qu'ils ont un bas taux de recombinaison pour des porteurs minoritaires.
- (iii) Qu'ils montrent de l'inertie aux étapes de transformation suivantes.
- (iv) Qu'ils ont de préférence une réflectivité légèrement élevée.

La recombinaison au contact arrière peut devenir une issue critique dans la performance de cellules. La recombinaison de contact arrière devient dominante dès que la longueur de diffusion deviendra égale ou plus grande que l'épaisseur de l'absorbeur. [8]

IV.2. Texturation de la surface

La réflexion de rayons lumineux à la surface du dispositif photovoltaïque est à l'origine de pertes importantes conduit à une dégradation significative de conversion photovoltaïque. Afin de minimiser ces pertes, une technique de texturation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule.

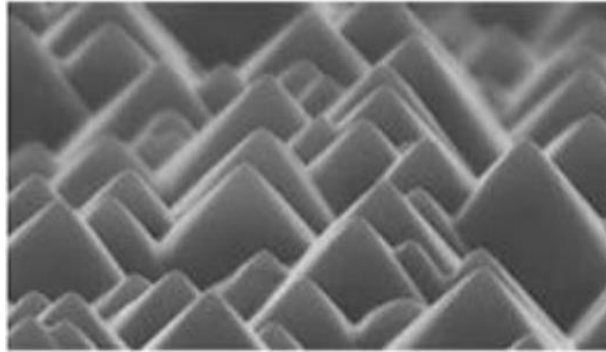


Fig.2.8. Image MEB de la surface d'une couche de silicium texturée en forme de pyramide.

Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface du wafer de Silicium [13], généralement de forme pyramides (Fig.2.8) ou de pyramides inversées (Fig.2.9). [28]

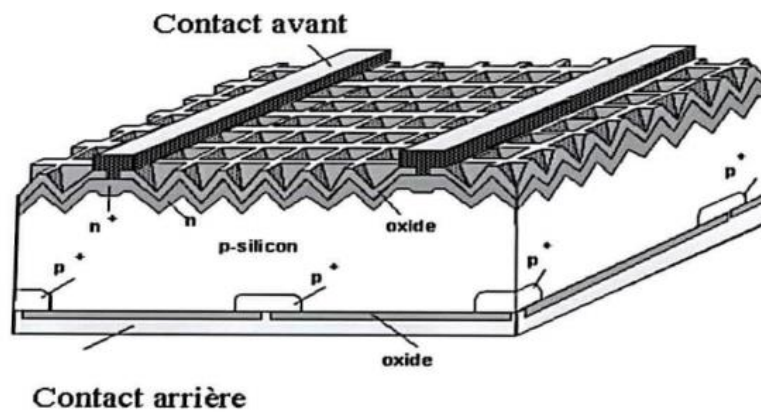


Fig.2.9. structure de cellule PERC à base de Silicium avec une texturation de pyramides inversées en face avant.

Le relief créé permet de minimiser les réflexions directes à la surface grâce aux facettes des pyramides, et assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité. [25]

Dans le cas d'une double réflexion (Fig.2.10), le coefficient de réflexion total devient R^2 , ce qui entraîne une baisse de la réflexion totale de cette surface. [13]

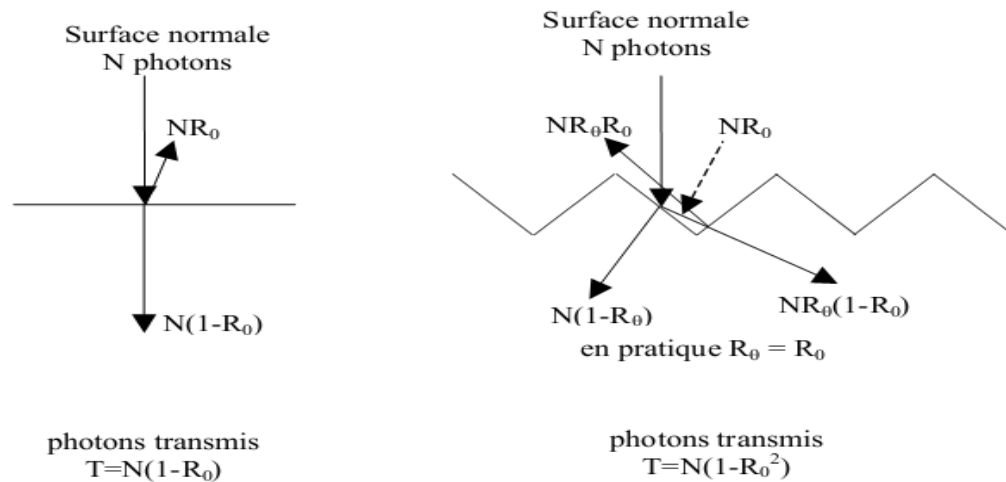


Fig.2.10. Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée. [10]

Les techniques industrielles de texturation se font le plus souvent par voie chimique alcaline (KOH, NaOH, TMAH). Cependant, les voies acide et sèche font l'objet d'un intérêt croissant en particulier pour les matériaux multicristallins [29]. Cette texturation peut se faire au niveau du substrat, dans ce cas toutes les couches déposées ensuite présentent la même texturation, ou bien seulement sur la dernière couche déposée. [27]

IV.3. Passivation des faces avant et arrière

La surface des semiconducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de Silicium (SiO_2) et le Nitrure de Silicium Hydrogéné ($\text{SiN}_x\text{:H}$). [20]

IV.4. Couche antireflet

Une couche antireflet (Anti Reflective CAR) déposée sur la face avant des cellules aide à minimiser la réflexion de la lumière, et améliorer le confinement optique. La CAR permet d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et le semiconducteur. Pour cela, il est nécessaire que cette couche possède un indice de réfraction n_{CAR} ainsi qu'une épaisseur d_{CAR} adaptée au milieu extérieur d'indice n_{ext} . [30]

Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{\text{CAR}} = \frac{(2N+1)}{4 n_{\text{CAR}}}, N = 1,2,3 \dots \quad (2.6)$$

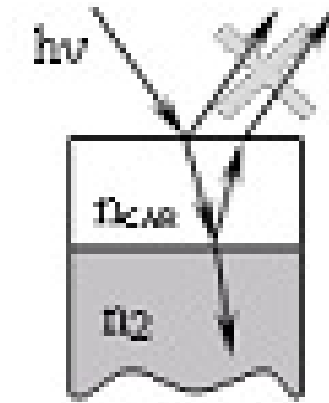


Fig.2.11. Le principe de la couche antireflet.

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface Air/CAR et CAR/semiconducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents). [20]

Différentes couches antiréfléctives sont utilisées en photovoltaïque, elles peuvent être isolantes comme le TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 et SiN_x ou conductrice comme le ZnO ou l'ITO. [23]

IV.5. Champ électrique BSF

En face arrière des cellules solaires, il est nécessaire de contacter la base à l'aide d'un contact métallique. Au contact, la vitesse de recombinaison de surface atteint des valeurs très élevées qui diminuent le rendement des dispositifs. Pour réduire le taux de recombinaison sur cette face arrière, il est possible de diminuer les défauts d'interface ou d'éloigner un des types de porteurs. L'efficacité d'un champ répulsif en face arrière a été d'abord démontrée par la réalisation d'un gradient de dopage. [30]

Le champ électrique arrière (BSF: Back Surface Field) est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base (par exemple, jonction P^+P). Ce dernier consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation.

La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison (voir Fig.2.12).

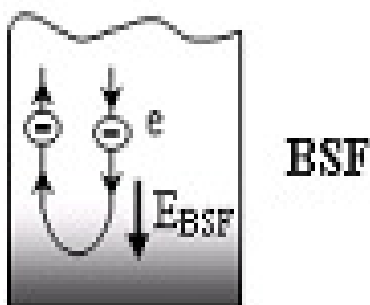


Fig.2.12. Le principe du champ électrique BSF.

Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est constamment réduite. Afin de réaliser une économie de matière première le Silicium multicristallins présente désormais des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires élevées. [6]

V. Différentes filières photovoltaïques

Dans la technologie des cellules photovoltaïques, plusieurs conceptions ont été mises en œuvre afin de réaliser un dispositif photovoltaïque avec des matériaux moins coûteux et de procédés plus simples. Les technologies de cellules solaires se sont succédé au fil du temps, Ils donnent lieu à de nombreuses filières photovoltaïques, certains sont commercialisées ainsi que d'autres sont encore en phase d'expérimentation et de développement, elles se distinguent par les matériaux utilisés, les procédés de fabrication et le nombre de jonctions utilisées au sein de la cellule.

Si bien qu'on parle aujourd'hui de technologies de première, seconde et troisième génération:

- (i) La première génération rassemble les cellules à base de Silicium monocristallin et multicristallin.
- (ii) La deuxième génération rassemble les cellules dites à couches minces.
- (iii) La troisième génération appartient à toutes les autres technologies (les cellules organiques, cellule de Grätzel, cellule à boîtes quantiques, etc.). [23]

V.1. Première génération

Cette génération d'une simple jonction utilise généralement le Silicium cristallin (c-Si) de type P comme une couche absorbeur. C'est la technologie qui domine actuellement le marché du photovoltaïque avec plus de 90% des cellules vendues (Silicium cristallin et multicristallin). [31]

Cela revient aux nombreux avantages de Silicium, notamment la disponibilité de cette ressource puisque ce matériau est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène (25.7% de la croûte terrestre) [32], et au fait qu'il n'est pas toxique et chimiquement stable dans le temps, le Silicium possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques, et en plus il peut se doper facilement (avec le Phosphore ou le Bore). [20]

Cette filière est elle même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du Silicium employé, elle comporte deux technologies: le Silicium monocristallin et le Silicium polycristallin. [4]

V.1.1. Silicium monocristallin

Le Silicium monocristallin utilisé dans cette technologie caractérise par une très grande pureté, il comporte des grains parfaitement ordonnés de taille supérieure à 10cm [33], avec une très faible quantité de défauts. En laboratoire, le meilleur rendement pour cette technologie atteint le 24.7%, tandis que le rendement des modules commercialisés affiche un chiffre de l'ordre de 17 à 18%. [28]

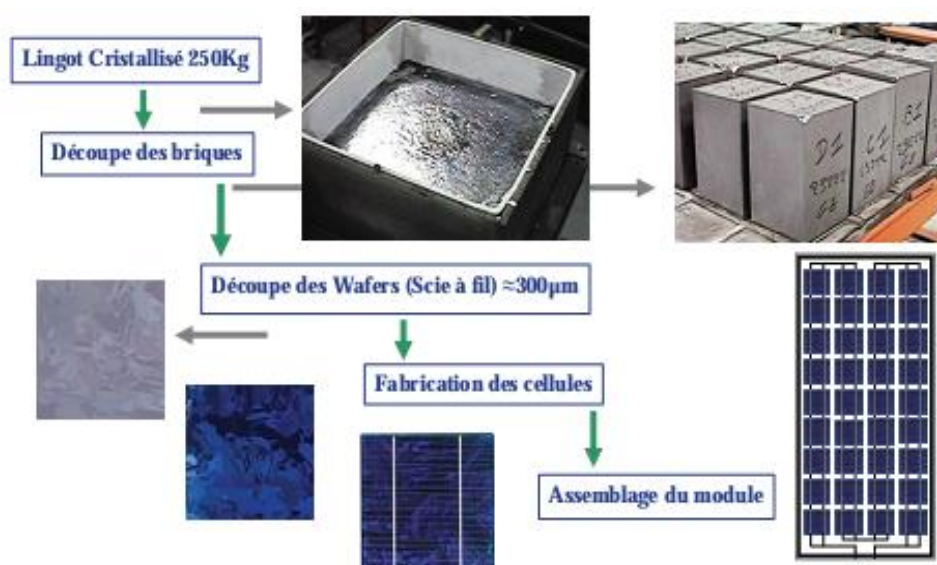


Fig.2.13. La chaîne de production de cellules photovoltaïques en Silicium.

Cependant, le Silicium monocristallin n'est pas présent à l'état pur. Il passe par des différentes étapes avant être exploité :

(i) La fabrication des lingots de Silicium par la méthode de Czochralski.

(ii) Le découpage du lingot en plaquettes (300 μ m).

(iii) La fabrication des cellules, par traitement des plaquettes de Silicium monocristallin.

(iv) La fabrication des modules par connexion des cellules entre elles et encapsulation.

Toutes ces opérations de production basée sur les wafers de Silicium est très énergivore et donc très chère. [32]

V.1.2. Silicium polycristallin

À partir des années 1970, le Silicium polycristallin a été utilisé dans les cellules photovoltaïques, afin de réduire les couts de fabrication. Les techniques d'élaboration de Silicium polycristallin sont moins onéreuses donc moins d'énergie, mais sa qualité photovoltaïque est moins bonne, à cause de la présence des grains d'une taille variant entre le millimètre et quelques centimètres, avec d'orientations cristallographiques différentes, séparés entre eux par des interfaces, appelées joints de grains. Et qui contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ces zones recombinantes ont un effet néfaste sur les performances photovoltaïques. [19, 34]



Fig.2.14. Panneau solaire en Silicium polycristallin.

Le rendement en laboratoire des cellules solaires en Silicium polycristallin est légèrement inférieur au celui des cellules à base Silicium monocristallin, il atteint 18%, et entre 11 à 15% pour les modules commerciaux des grandes plaquettes de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ou $15 \times 15 \text{ cm}^2$. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles que les cellules monocristallines. [23]

La première génération, qu'elle soit Silicium monocristallin ou polycristallin, possède de nombreux avantages, mais elle affiche un coût élevé en raison d'une grande quantité de matière première (300 μm d'épaisseur) et son procédé de fabrication qui exige une température de plus de 1000°C avec une croissance très lente. [35]

De plus, l'inconvénient majeur du Silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect de valeur 1,12eV, qui entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct, et ne correspondant pas exactement au maximum d'intensité du spectre solaire. [23]

V.2. Deuxième génération

La technologie en couches minces (Thin Film) que l'on appelle souvent les cellules de deuxième génération, se présente comme une solution fiable, afin de réduire le coût élevé de technologie de la première génération. C'est pour cette raison qu'un autre axe de recherche s'est créé à partir des années 1980, avec un objectif prioritaire de réduire le coût de fabrication. Cette technologie repose sur l'utilisation de matériaux à fort coefficient d'absorption, permettant la réalisation d'absorbeur en couche mince d'épaisseur inférieure à quelque μm . Les matériaux semiconducteurs les plus utilisés en couche minces sont le Silicium amorphe hydrogéné (a – Si: H), Chalcopyrite à base CuIIVI_2 , le Tellure de Cadmium (CdTe).

V.2.1. Silicium amorphe hydrogéné

Du fait de son fort coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au Silicium cristallin, et notamment son gap direct qui permet un processus d'absorption plus efficace, le a – Si permet de réaliser des cellules solaires en technologie couches minces [36]. Cependant, sa structure atomique non cristallisée présente une grande densité de défauts, ce qui limite son rendement de conversion, entre 5 à 6%. [8]

Mais vers la fin des années soixante, Chittick et al a observé qu'en déposant le Silicium amorphe par un plasma de Silane (SiH_4), plus de 99.9% des défauts étaient saturés par l'hydrogène, ce qui rendait l'alliage a – Si: H utilisé comme matériau semiconducteur dans des dispositifs photovoltaïques. [8]

Ce matériau offre l'avantage d'être déposé sur de grandes surfaces, d'avoir un fort coefficient d'absorption qui permet d'envisager la fabrication de cellules à l'aide de couches minces, il réagit bien en présence d'une faible luminosité, la disponibilité et la non toxicité du matériau dans l'environnement et enfin d'utiliser très peu d'énergie lors de sa fabrication. Tout ces avantages, permettant d'abaisser significativement les coûts de production d'un module photovoltaïque à la base du a – Si: H. [32, 33]

Cette filière représente actuellement plus de 8.5% du marché mondial [1]. Un rendement record de 13.4% a été atteint en laboratoire pour des cellules solaires a – Si: H, mais les cellules commerciales affichent plutôt des valeurs comprises entre 6 à 8%. [37]

Le principal inconvénient du a – Si: H provient de la dégradation de ses performances avec le temps passé sous éclairage, de plus les cellules solaires à base a – Si: H délivrent des faibles rendements en plein soleil, de 6% à 8%, mais avec un prix de fabrication plus intéressant. Ce type de cellules trouve ses applications principales dans de petits appareils tels les calculettes, les montres, etc. [35]

V.2.2. Tellurure de cadmium

Du fait de nombreux avantages de Tellurure de Cadmium (CdTe) à savoir un gap direct de 1,45eV est idéalement adapté au spectre solaire, son très grand coefficient d'absorption ($>10^5 \text{ cm}^{-1}$) fait que la quasi totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de 2 μm , de plus, de nombreuses méthodes existent pour déposer CdTe avec une vitesse de dépôt très élevée tout en gardant une qualité raisonnable, Il était admis que la filière à base de CdTe représentait l'une des approches les plus prometteuses pour le photovoltaïque terrestre. [33]

Le Tellurure de Cadmium est employé en tant que un semiconducteur dopé P, un autre matériau est donc requis pour réaliser la jonction PN, à savoir du Sulfure de Cadmium dopé N (CdS). Les premières cellules solaires structurées CdTe/CdS/SnO₂/Verre ont été étudiées en 1964, et les premiers modules CdTe/CdS sont apparus en 1972. [37]

D'un point de vue rendement énergétique, la filière CdTe, présente des rendements de 21.5% en laboratoire et de 11% pour des modules commerciaux. Les recherches montrent que le CdTe pourrait atteindre un rendement de 15% pour un prix de 0.5€/W_c à moyen terme. [38]

Malgré les avantages ci-dessus du CdTe, il souffre de certaines limitations:

(i) La sensibilité de cette cellule à l'humidité.

(ii) On ne sait toujours pas bien contrôler le dopage de type P du CdTe, naturellement N, à cause des lacunes de Cd.

(iii) La difficulté de réaliser des contacts ohmiques stables.

(iv) L'inconvénient majeur associé à la présence de Cadmium (Cd) qui est un matériau toxique le rend relativement inapproprié à une application destinée au grand public. [39]

V.2.3. Chalcopyrite à base Cu-III-VI₂

L'émergence des cellules solaires à base des matériaux à structures Chalcopyrites, a fait suite à la préparation d'hétérojonctions CuInSe₂/CdS à partir d'un monocristal CuInSe₂, par S.Wagner et coll de Bell Téléphone en 1974/1975. Ces hétérojonctions avaient des rendements solaires de l'ordre de 5%. [40]

Les composés ternaires Chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement le CuGaSe₂, le CuInS₂, le CuAlSe₂ et le CuInSe₂. Du fait de leurs grands coefficients d'absorption optique, une épaisseur de 1.5 à 2µm est suffisante pour absorber la partie utile du spectre solaire. [40]

Le composé de Sélénure de Cuivre et d'Indium (CIS), d'une structure Chalcopyrite, dont la conductivité est de type P, est un matériau très prometteur, Les cellules à base de ce composé ternaire ont récemment atteint des rendements de 20.1% [8]. Cependant, son gap de 1,04eV limite la tension de circuit ouvert et donc le rendement de la cellule. [41]

Afin de dépasser ce problème, des travaux portent aujourd'hui sur l'introduction des atomes de Ga ou Al qui se substituent partiellement les atomes de l'In, de façon à élargir sensiblement la bande interdite. En laboratoire, Le rendement de conversion actuel des cellules à base de composés Chalcopyrites quaternaires du type Cu(Ga,In)Se₂ atteint 22,9%, et 11 à 13% pour les modules commercialisés. [41]

Malgré les nombreux avantages de la filière à base de composés Chalcopyrites, cette technologie utilise des métaux rares comme l'Indium et le Gallium. Pour information, il en faut environ 5g pour construire un panneau solaire CIGS, et 1g pour fabriquer un écran plat de 15 pouces. Selon diverses estimations, les réserves mondiales d'Indium seront épuisées d'ici une vingtaine d'années. [41]

V.2.4. Sulfure de Cuivre, de Zinc et d'Etain (CZTS)

Malgré la promesse de couches minces de CdTe et Cu(Ga,In)Se₂ Chalcopyrite, les deux technologies s'appuient sur des éléments qui sont toxiques et rares dans la croûte terrestre. Pour atteindre l'objectif de la technologie photovoltaïque rapport coût efficacité, il est nécessaire d'explorer de nouveau matériau quaternaire comme Sulfure de Cuivre, de Zinc et d'Etain (Cu₂ZnSnS₄ ou CZTS) qui est un nouveau matériau absorbeur pour les cellules solaires à couches mince.

Le composé quaternaire du CZTS possède des de prometteuses propriétés optiques ; un gap de 1,5eV est idéalement adapté au spectre solaire. De plus, son très grand coefficient d'absorption de l'ordre de 10⁴cm⁻¹, fait que le quasi totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de quelque µm. Ce qui signifie la grande possibilité de sa production commerciale. [40]

Ce matériau offre aussi l'avantage d'être composé d'éléments abondants et non toxiques pour la santé ou l'environnement. De plus, ses constituants de base seraient cinq fois moins coûteux que ceux de la filière CIGS. [35]

Le rendement des cellules CZTS atteint à peine 11,1%, soit la moitié de celui des cellules CIGS, ce qui explique que la technologie CZTS n'ait pas encore été industrialisée. Seul le faible rendement des cellules CZTS pose actuellement le problème. [40]

V.3. Troisième génération

Afin de minimiser les inconvénients et les obstacles rencontrés dans les générations précédentes telles que coût de fabrication très élevé, la disponibilité des matériaux ou bien leurs toxicités. Plusieurs concepts sont proposés conduisent à l'émergence d'une troisième génération de cellules solaires, qui est encore au stade de la recherche mais avec des perspectives très prometteuses offre bien la possibilité de répondre à ces problématiques dans un avenir proche. On va citer les plus intéressantes comme les cellules organiques, les cellules nanocristallines à colorant, les cellules multifonctions.

V.3.1. Cellules organiques

Ce type de cellules photovoltaïques constitue une tentative de réduction du coût de l'électricité photovoltaïque, et elles bénéficient en effet du faible coût des semiconducteurs organiques comme les polymères et les molécules semiconductrices, ainsi que de nombreuses simplifications potentielles dans le processus de fabrication. [33]

En 1978, les chercheurs de l'IBM Thomas J. Watson Research Center prévoyaient que les valeurs des rendements des cellules photovoltaïques organiques pourraient dépasser les 1% [35]. Ce rendement n'a été atteint qu'en 1986, lorsque l'équipe de Tang montre qu'une cellule composée d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion. [33]

Cette application particulière des semiconducteurs organiques commence à attirer l'attention en 2000 lorsque le rendement a sauté au 4% grâce aux travaux de J. Xue. Puis il a été encore amélioré par une équipe de chercheurs à l'université du Nouveau Mexique qui ont obtenu un rendement de 5.2%, est arrivé enfin à un rendement record de 7.9% obtenu par SOLARMER [43]. Actuellement son record de rendement de conversion dépasse les 10%. [11]

L'intérêt de ce type de cellules vient du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées en grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques à basse température, en voie liquide et sur des substrats flexibles. [35]

Elles ouvrent également la voie aux applications légères et souples. Enfin, les cellules solaires organiques avec leurs faibles coûts de matière première, leurs faibles besoins énergétiques de production et leurs capacités à être fabriquées à grande échelle sont des candidates sérieuses à fort potentiel de développement photovoltaïque à long terme. [35]

Mais le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures), ces technologies n'ont pas encore atteint une longévité et une efficacité suffisantes en vue d'applications commerciales à grande échelle. [33]

V.3.2. Cellules nanocristallines à colorant

Ce type des cellules a développé dans le début des années 90 par Pr Graëtzel et son équipe à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, ces cellules sont composées d'un oxyde semiconducteur inorganique, un électrolyte et un colorant. Généralement, on utilise l'oxyde titane pour son large gap de 3.2eV, avec un électrolyte liquide dans lequel l'oxyde semiconducteur est noyé et un colorant organique qui sert d'absorbeur de photon. [33, 43]

Le principe de fonctionnement de ces cellules est le suivant: un colorant (ou sensibilisateur, noté S dans Fig.2.15) est greffé sur une couche de fines particules de TiO_2 . Le rayonnement solaire excite ce sensibilisateur et le promeut à un état excité S^* , état qui lui permet de délivrer un électron directement au TiO_2 , qui joue donc le rôle de cathode. Le sensibilisateur est régénéré grâce à un médiateur D, lui même régénéré à l'anode. [33]

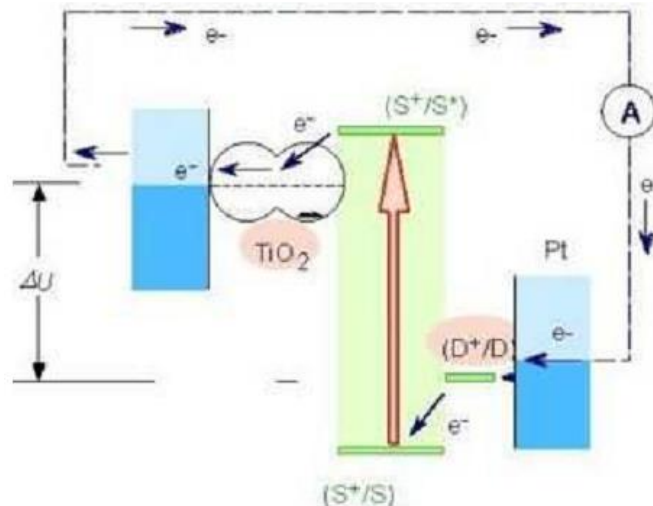


Fig.2.15. Schéma de principe d'une cellule à colorant.

Les cellules nanocristallines se caractérisent par leur longue durée de vie et leurs stabilités au fil des années, en plus leur simple fabrication qui ne nécessite pas de grandes installations comme il est le cas pour les cellules inorganiques. Actuellement, ce genre de cellules représente les meilleurs rendements dans la catégorie des cellules solaires de troisième génération avec un rendement en laboratoire de 10.4% obtenu par la société Sharp. [43]

Cependant, comme pour toutes les cellules solaires celles-là aussi présentent un inconvénient au niveau de l'électrolyte liquide, il s'agit des fuites. Les chercheurs ont remplacé cet électrolyte liquide par un solide. Malheureusement, ça n'a pas donné d'aussi bons résultats que sur sa première forme. [43]

V.3.3. Cellules multijonctions

Il est parfois difficile de trouver un matériau absorbant l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption. Les cellules multijonctions III-V répondent à cette problématique. En effet il suffit d'utiliser un système à plusieurs niveaux, en empilant des entités photovoltaïques différentes possédants des gaps décroissants, où chacune jonction optimisée pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. Ce qui permet de minimiser des pertes dues à la thermalisation et d'exploiter le quasi totalité du spectre solaire avec des rendements de conversion très importants. [30, 33]

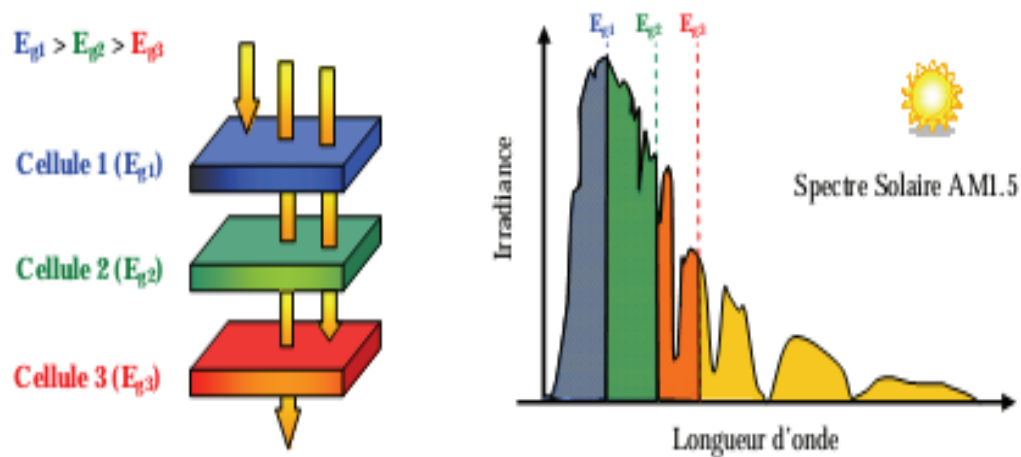


Fig.2.16. Principe de base des cellules solaires à multijonctions.

Des cellules photovoltaïques multijonctions à base d'associations de matériaux semiconducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, etc.) ont été mises au point depuis les années 60 présentant des rendements très élevés supérieurs parfois à 40% obtenus sous lumière concentrée. [34]

Ces types des cellules sont couramment exploités dans l'industrie spatiale, mais pas par les particuliers, tant elles sont coûteuses. Cependant, cette technologie n'est efficace qu'à une seule condition: les panneaux doivent suivre la course du soleil. En effet, le rayon lumineux concentré doit en permanence être axé sur la cellule si l'on souhaite générer un courant. [34]

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé un bref survol sur l'histoire des cellules photovoltaïques. Nous avons présenté aussi, les principaux facteurs limitant leur rendement de conversion, ainsi que les différentes technologies utilisées par l'industrie pour avoir un bon rendement. Enfin nous avons vu les différentes filières du photovoltaïque, en citant leurs avantages et inconvénients, mais aussi leurs performances actuelles. Le chapitre suivant est le sujet d'une étude sur les cellules solaires à base de CIGS et de quelques techniques et méthodes expérimentales les plus sollicitées pour le dépôt de ce matériau.

Références bibliographiques

- [1] Mathieu Urien "Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible" Thèse de doctorat, Université Bordeaux I Année 2008.
- [2] Mohamed Ouled Salem "Analyse, Modélisation et Simulation des Pertes dans un Module Photovoltaïque à Base de Silicium Monocristallin" Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Année 2010.
- [3] Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane "Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque" Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, Année 2015.
- [4] Maachou Fatima "Analyse et optimisation des paramètres photovoltaïques dans les cellules solaires à simple jonction, tandem et triple-jonction en technologie couches minces de silicium" Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de SBA, Année 2018
- [5] Walid El-Huni "Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V" Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, Année 2016.
- [6] Ben Ali Mourad, Rahmouni Seddik "Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In,Ga)Se₂" Mémoire de Master, Université Ahmed Draïa Adrar, Année 2018.
- [7] Site web <http://tpeenergiephotovoltaïque.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaïque/historique-de-la-cellule-photovoltaïque.html>
- [8] Mostefa Kara Selma "Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS" Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Année 2012.
- [9] Site web <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque>
- [10] Zighed Lilia "Etude de l'influence de nouveaux films anti réfléchissants sur la conversion photovoltaïque" Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Année 2007.
- [11] Djemai Mounira "Effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)" Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra, Année 2014.
- [12] Thibaut Desrues "Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière" Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Année 2009
- [13] Mohammedi Mohammed "Etude et simulation de cellules photo voltaïques a contacts arrières inter-digités sous environnement Silvaco" Mémoire de Magister, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, Année 2012.
- [14] José Miguel Navarro "Cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible" Thèse de Doctorat, Université Toulouse III, Année 2008.

- [15] Omar Ibrahim Elmi "Nouvelles structures de cellules solaires à base de silicium: Texturation, passivation et association de réseaux de nanostructures métalliques avec une couche Down-Conversion" Thèse de Doctorat, Université De Lille 1, Année 2017.
- [16] W. Gigrlach, H. Schlangenotto, H. Maeder "On the radiative recombination rate in silicon" *phys. stat. sol. (a)* 13, 277 (1972).
- [17] J. Dziewior and W. Schmid "Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon" *Appl. Phys. Lett.* 31, 346 (1977)
- [18] Mekelleche Sidi Mohammed "Modélisation et simulation de nouveaux matériaux destinés à la production d'énergie photovoltaïque" Mémoire de Master, Université Abou Bakr Blekaid Tlemcen, Année 2015.
- [19] Bensmain Asmaa "Investigation de l'ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonction a_SiH/cSi Modélisation et simulation numérique" Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de SBA, Année 2018
- [20] Nichiporuk Oleksiy "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières inter-digités" Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, Année 2005.
- [21] Mancer Mansoura "Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs_GaAs)" Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, Année 2012.
- [22] Atlas User's Manual, Device simulation software", SILVACO International, California. 2012.
- [23] Dib Wassila "Modélisation des structures photovoltaïques aspects fondamentaux et appliqués" Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkïd De Tlemcen, Année 2010.
- [24] Erwann Fourmond "Contribution au photovoltaïque de première génération du matériau silicium aux couches diélectriques" Mémoire d'HABILITATION, Institut national des sciences appliquées de Lyon et l'Université Claude Bernard Lyon I, Année 2011.
- [25] Madoui Fateh "Etude et simulation d'une cellule solaire double jonction à base de GaAs/Ge" Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida, Année 2015.
- [26] David Reaux "Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si Hc-Si) modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface" Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, Année 2017.
- [27] Zouad Mohamed Samir, Mahieddine Mohamed "Etude et simulation d'une cellule solaire à multi-jonctions à base de InGaN" Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida, Année 2014.
- [28] M.A. Green*, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham "Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells" *Solar Energy Materials & Solar Cells* 65 (2001) 9-16
- [29] Djeriouat Khadidja "Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions GaInP/GaAs" Mémoire de Magister,

- Université Abou Bekr Belkïd De Tlemcen, Année 2011.
- [30] Melouki Dilmi "Étude des performances de la cellule InGaPGaAsGe par simulation" Mémoire de Master, Université Mohammed Boudiaf De M'sila, Année 2016.
- [31] Les Avis de L'ADEME "Le solaire photovoltaïque" Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ADEME, Avril 2016.
- [32] Belghoul Hanifa "Effet de l'épaisseur de la couche fenêtre sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction" Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Année 2017
- [33] Loïc Bailly "Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface" Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, Année 2010.
- [34] Oussidhoum Samira "Etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simple et multiple" Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, Année 2015.
- [35] Menassel Née Haloui Hafsia "Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches minces" Thèse de Doctorat, Université D'oum El Bouaghi, Année 2017.
- [36] Bouguenna Ibrahim Farouk "Modélisation et optimisation d'une cellule solaire tandem a-SiH/a-SiGe" Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf Oran, Année 2009.
- [37] Assia Bouraiou "Élaboration et caractérisation des couches minces CuInSe₂ par Électrodéposition" Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Année 2009.
- [38] Petibon Stéphane "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques" Thèse de doctorat, Université Toulouse III, Année 2009
- [39] Chaoua Makhlof "Effet des couches conductrices et transparentes sur les performances des cellules solaires Cu(In,Ga)Se₂" Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Année 2014.
- [40] Daranféd Ouarda "Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de Cu₂ZnSnS₄" Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine1, Année 2013.
- [41] Daniel Lincot, Jean-François Guillemoles "Cellules solaires en couches minces à base de CuInSe₂" Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque: disponible sur <http://www.refletsdelaphysique.fr> ou <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/2007060>
- [42] Bernard Equer "Un dossier photovoltaïque dans Reflets de la physique" Dossier de la Société Française de Physique, Année 2017.
- [43] Mohamed Mimoune "Étude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies" Mémoire de Magister, Université du Québec, Année 2016.

Chapitre III

Cellules solaires en couches minces à base CIGS

Sommaire

I. Introduction.....	62
II. Propriétés fondamentales de CuInSe_2	62
II.1. Historique de matériau	63
II.2. Structure cristallographique du composé CuInSe_2	64
II.3. Diagramme de phase de CuInSe_2	65
II.4. Influence du Gallium	66
II.5. Orientation cristalline	69
II.6. Propriétés électroniques	70
II.7. Propriétés optiques	76
III. Structure d'une cellule solaire à couche mince à base CIGS	78
III.1. Diagrammes des bandes d'énergies de la cellule CuInSe_2	79
III.2. Différentes couches de la cellule photovoltaïque	80
IV. Méthodes des dépôts en couches minces	84
IV.1. Co-évaporation	85
IV.2. Spray Pyrolyse	89
V. Conclusion	90
Références bibliographiques	91

I. Introduction

Depuis une quarantaine d'années, beaucoup d'efforts de recherche ont été réalisés sur un grand nombre de matériaux, afin d'arriver à des cellules photovoltaïques en couches minces qui possèdent un bon rendement de conversion avec un faible coût.

Le Séléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CuInGaSe_2 ou CIGS) dans sa structure Chalcopyrite est un semiconducteur prometteur pour les applications photovoltaïques, ce qui est dû à ses propriétés électrique et optique qui sont variables en fonction des conditions de préparation et des techniques d'élaboration, et notamment son coefficient d'absorption qui est très élevé dans la gamme du spectre solaire. Ceci permet d'utiliser le CIGS comme un matériau de base dans la fabrication des composants électroniques pour satisfaire des besoins industriels spécifiques.

Dans ce chapitre, nous allons particulièrement nous intéresser au CIGS. Nous commencerons par donner un aperçu sur les propriétés fondamentales du CIGS, à savoir sa structure cristalline, son diagramme d'équilibre, ses propriétés électriques et optiques ainsi que les différents défauts dans ce matériau.

Puis, nous décrivons la structure la plus répandue d'une cellule solaire à base de CIGS, le rôle et les caractéristiques des différentes couches constituant la cellule. Ceci sera suivi par des brèves définitions de deux techniques et méthodes d'élaboration les plus sollicitées pour la technologie de couches minces tels que : Co-évaporation, et Spray Pyrolyse.

II. Propriétés fondamentales de CuInSe_2

Le rendement d'une telle cellule solaire est fortement dépendant des propriétés du matériau absorbeur. Dans le cas présent on s'intéresse plus particulièrement au composé CuInSe_2 , et leurs alliages, regroupés sous le terme $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se})_2$ noté CIGS, sa structure cristalline ainsi que sa composition qui peut fortement influencer ses propriétés optiques et électroniques.

La bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire dans le cadre d'optimiser le rendement d'une cellule solaire à base de CIGS.

II.1. Historique de matériau

C'est en 1876 que le premier composant photovoltaïque a été réalisé en élaborant mécaniquement une couche de Sélénium entre deux électrodes. [1]

Le premier matériau étudié de cette filière est le CuInSe_2 , il a été synthétisé pour la première fois en 1953 par Hahn. [2]

La majorité des connaissances fondamentales sur le composé CuInSe_2 tandis que les propriétés électriques, optiques et structurales de Chalcopyrites ternaires, ont été examinées dans les années 1960 et les années 1970. [3]

L'émergence des cellules solaires à basées des matériaux Chalcopyrites, a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ par S.Wagner et coll. de Bell Téléphone en 1974/1975. S.Wagner et coll. avaient rapporté la préparation d'hétérojonctions PN $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ à partir d'un monocristal CuInSe_2 , dont la conductivité est de type P, sur lequel une couche mince de CdS de 5 à $10\mu\text{m}$ d'épaisseur avait été déposée. Ces hétérojonctions avaient des rendements solaires de l'ordre de 5%. [4, 5]

Plus tard, Pamplin a édité plusieurs revues au sujet de la thermodynamique des changements de phase. Ces travaux étaient presque entièrement consacrés aux monocristaux. Il a été élaboré sous forme de couches minces polycristallines comme couche active en 1983. [2]

Les premiers rendements obtenus étaient de l'ordre de 10%, enregistrés par la société Boeing Corp, en utilisant le procédé de la Co-évaporation à trois creusets. En 1987, la société Arco Solar a donné un rendement de 10.1%. Ce n'est qu'à partir de 1990 que la substitution du Gallium par l'Indium a été réalisée, pour former les composés quaternaires CIGS dans le but d'améliorer les rendements de conversion photovoltaïque déjà obtenus. [2]

Par la suite, des couches à gradient de composition ont été réalisées, permettant d'obtenir des valeurs de V_{co} importantes tout en conservant des valeurs de I_{cc} identiques. [3]

Il a fallu presque dix ans pour que ce résultat soit concrétisé dans la production industrielle des modules solaires. L'année 1998 marque la date du premier module solaire industrialisé à base de CIGS. [2]

Le rendement record de 22.3% a été atteint le 8 décembre 2015 par une cellule solaire d'environ $0,5\text{cm}^2$ de Solar Frontier Japon. [6]

II.2. Structure cristallographique du composé CuInSe_2

Le semiconducteur Sélénure de Cuivre et d'Indium (CuInSe_2) appartenant au groupe I-III-VI₂ cristallise sous trois formes allotropiques dérivées de la structure Zinc Blende; à savoir la structure Sphalérite, la structure Cu-Au, et les structures Chalcopyrite. [7, 8]

La structure Sphalérite appartient au système cubique à faces centrées, là où les ions Cu^+ et In_3^+ sont répartis de façon aléatoire sur les sites cationiques et les anions (atomes de Se) sont aux centres des tétraèdres cationiques et forment un réseau cubique à faces centrées (Fig.3.1.a). [7]

La structure Chalcopyrite du CuInSe_2 appartient au système tétragonal, elle peut être décrite comme un empilement de deux structures Zinc Blende dans lequel les sites tétraédriques sont occupés par des atomes du groupe III (Se) (anions), et les atomes des groupes I (Cu) et II (In) (cations) sont répartis de façon ordonnée dans les sites cationiques. [9]

La maille élémentaire primitive de la structure Chalcopyrite est constituée de huit atomes ;(i) deux atomes de cuivre Cu, (ii) deux atomes d'indium In (iii) et quatre atomes de sélénium Se [7], où chaque atome de Se est lié tétraédriquement à deux atomes de Cu et d'In, tandis que chaque atome de Cu ou d'In est entouré par quatre atomes de Se. [10]

La présence de deux cations différents (La longueur de la liaison In-Se est de 2.57 Å et celle de Cu-Se est de 2.43 Å) induit une légère déformation de la structure par rapport à la structure Zinc Blende. Alors la structure tétraédrique devienne stressée et la valeur de "c" subi un changement relative par rapport à la valeur de "a". Cette distorsion peut être estimée par le rapport $\left(2 - \frac{c}{a}\right)$. Les paramètres "a" et "c" pour le CuInSe_2 sous sa structure Chalcopyrite sont respectivement 5.784Å et 11.614Å. [7]

La structure Cu-Au résulte d'un agencement ordonné différent de celui rencontré pour la structure Chalcopyrite. Les ions Cu^+ et In_3^+ sont là encore répartis de façon ordonnée sur les sites cationiques, mais les plans (001) sont constitués cette fois-ci alternativement des cations Cu^+ ou In_3^+ . [11]

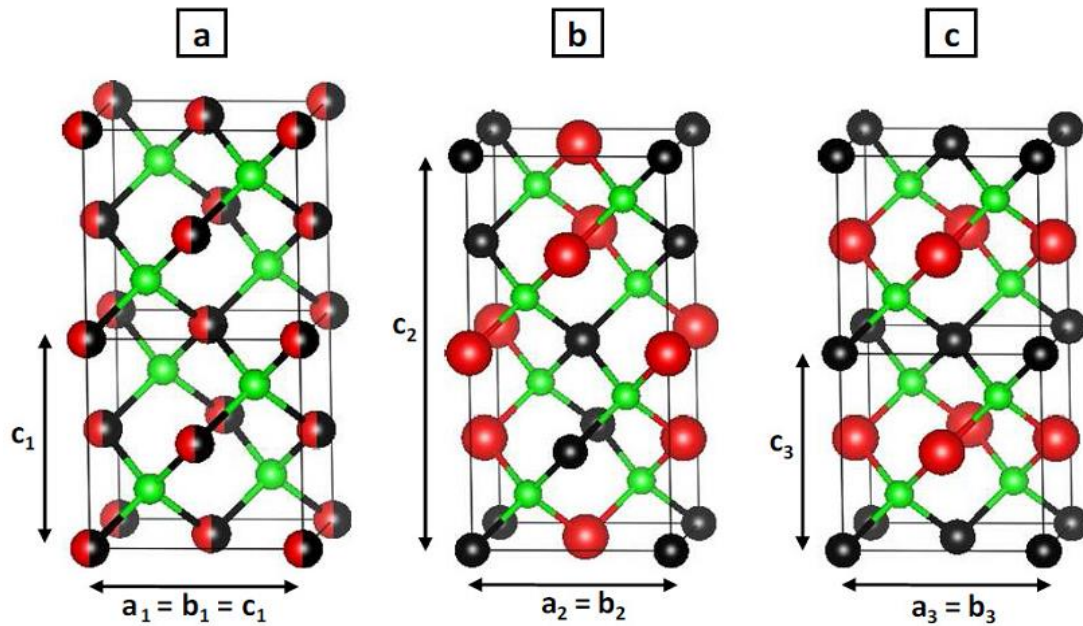


Fig.3.1. Structures cristallographiques du CuInSe_2 (a) Sphalérite; (b) Chalcopyrite; (c) Cu-Au. Sphères noires: Cuivre; Sphères rouges: Indium; Sphères vertes: Sélénium.

Il a été montré expérimentalement que la structure Chalcopyrite est plus intéressante pour la conversion photovoltaïque. La structure cristallographique de cette famille de matériaux leur assure une grande stabilité, leur permettant même de résister aux rayonnements cosmiques très élevés de l'espace. [2]

II.3. Diagramme de phase de CuInSe_2

Fig.3.2 montre le diagramme de phase pseudo-binaire $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$ qui est généralement utilisé dans la croissance de CuInSe_2 et qui permet de mettre en évidence les différentes phases qui peuvent être présentes. Sachant que le Sélénium est généralement apporté en excès lors des procédés d'élaboration du CIS, mais c'est essentiellement le taux de Cu (ratio $\left[\frac{\text{Cu}}{\text{In}}\right]$) qui détermine la position, et donc le type de phases formées sur cet axe. [12]

Le composé Chalcopyrite $\alpha - \text{CuInSe}_2$ existe dans une gamme de composition restreinte comprise entre 23,8 et 24,8% at de Cu, ce qui correspond à un rapport $\left[\frac{\text{Cu}}{\text{In}}\right]$ compris entre 0,9 et 0,98, entre la température ambiante et 800°C. [11, 12]

Avec l'augmentation de la température apparaît la structure Sphalérite $\delta - \text{CuInSe}_2$, présente entre 600 et 1000°C. Pour un rapport $\left[\frac{\text{Cu}}{\text{In}}\right]$ supérieur à 0,98 (entre 0 et 25,2 % at d'indium), les phases Cu_2Se et $\alpha - \text{CuInSe}_2$ coexistent jusqu'à 780°C environ. [11, 12]

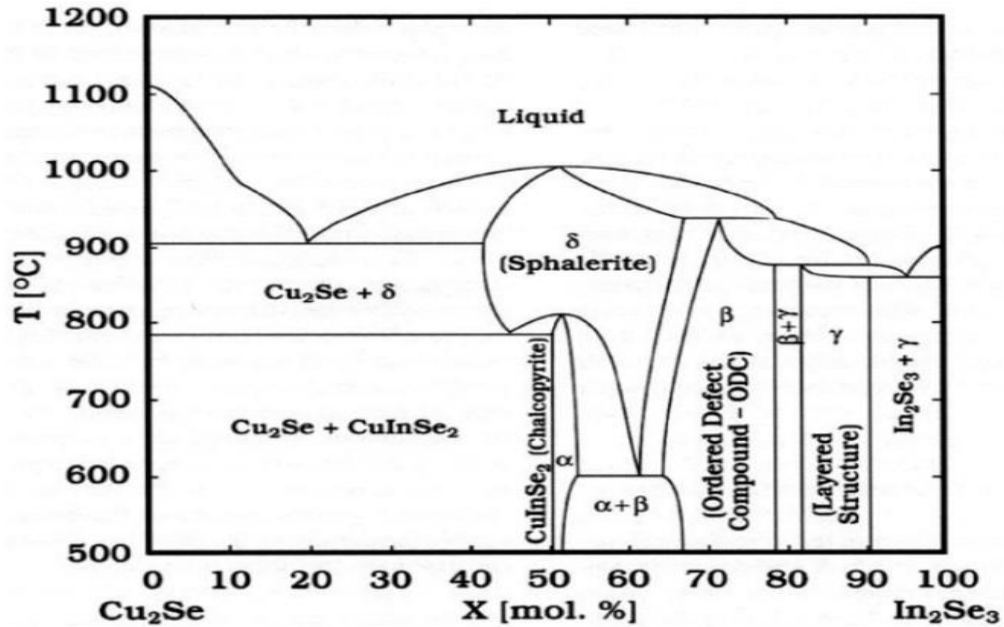


Fig.3.2. Diagramme de phase pseudo-binaire entre les composés $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$.

Pour un rapport $\left[\frac{\text{Cu}}{\text{In}}\right]$ supérieur à 0,9 (entre 25,2 et 50% at d'Indium) apparaissent les phases de type OVC (Ordered Vacancy Compound) comme $\beta - \text{CuIn}_3\text{Se}_5$, puis $\gamma - \text{CuIn}_5\text{Se}_8$ stables jusqu'à 850°C environ. Ces deux phases sont dérivées de la phase $\alpha - \text{CuInSe}_2$ dans laquelle s'est formé le couple de défauts ($2V_{\text{Cu}}^- + \text{In}_{\text{Cu}}^{+2}$) (deux lacunes de Cu(I) et substitution d'un atome de Cu(I) par un atome de In (III)), électriquement neutre. [11, 12]

II.4. Influence du Gallium

Malgré ces avantages, les cellules photovoltaïques à base de CIS ne sont pas à leur limite prévue (25%), les difficultés surviennent dans la production des cellules solaires ayant les mêmes caractéristiques physiques nécessaires dans la fabrication des modules photovoltaïques. [13]

Plusieurs éléments peuvent être incorporés dans le système CuInSe_2 en tant qu'atomes substitutionnels. C'est l'un des moyens pour modifier les propriétés électroniques et structurales du matériau en raison des possibilités potentielles de ces éléments supplémentaires. Notamment, on peut modifier la structure électronique de bande, la concentration en porteurs, les réactions chimiques et les mécanismes de croissance. Parmi les éléments les plus prometteurs à incorporer avec succès au système ternaire CuInSe_2 sont le Gallium ou l'Aluminium. [2]

Le changement d'une proportion d'Indium par le Gallium (Ga) pour former de composé quaternaire Cu(In,Ga)Se_2 améliore les propriétés physico-chimiques de ce matériau et notamment son gap qui doit suffisamment faible pour récolter le maximum de photons, mais également il doit suffisamment élevée afin que la cellule photovoltaïque présente une tension de circuit ouvert satisfaisante. [15, 14]

Fig.3.3 présente l'irradiance solaire perçue au niveau de la mer ainsi que le rendement théorique maximum.

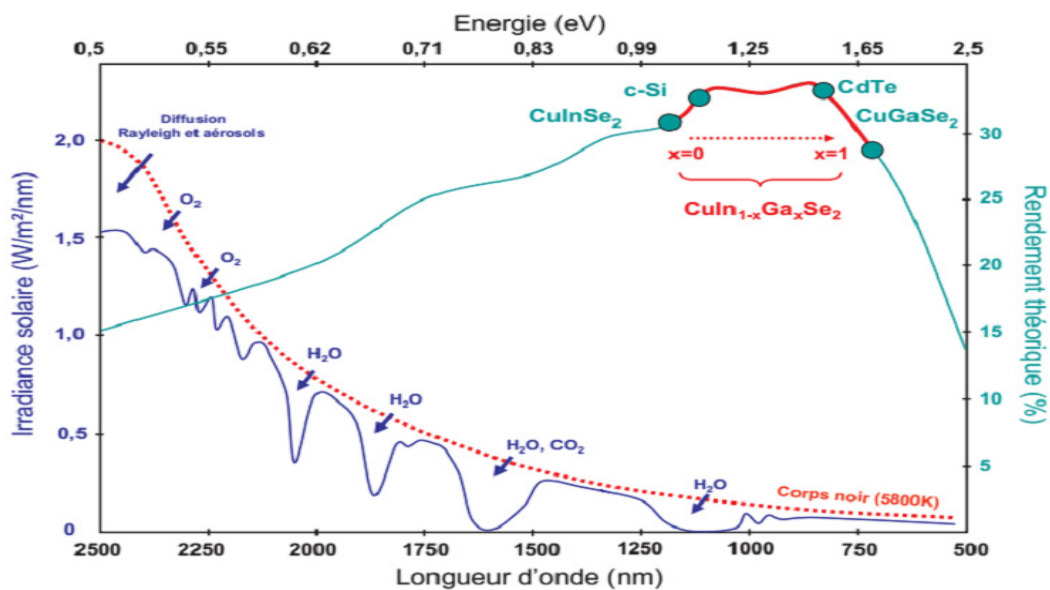


Fig.3.3. Irradiance solaire perçue au niveau de la mer et rendement quantique calculé en fonction du gap de l'absorbeur. [15]

On peut y voir que pour optimiser le rendement d'une cellule solaire, la couche active de ce dernier doit posséder un gap compris entre 1 et 1,7 eV environ. Par ailleurs, plusieurs études tendent à démontrer que les rendements optimaux seraient obtenus pour des gaps compris 1,4 et 1,5 eV. [15]

L'insertion de Ga dans le CuInSe_2 permet d'obtenir un composé dont la valeur de la bande interdite est comprise entre 1,02 et 1,68eV. Dans le cas du CIGS, les sites des atomes du groupe III sont donc occupés par des atomes d'In ou de Ga, dans des proportions dépendant de la composition de l'alliage, le rapport $\frac{\text{Ga}}{(\text{In}+\text{Ga})}$ détermine le taux d'atomes de Ga qui remplacent les atomes d'Indium dans la structure. [10, 16]

Bien qu'il soit bénéfique d'ajouter Ga pour améliorer les propriétés de CIS, il y a une limite à laquelle il sert favorable. Une teneur plus élevée en Ga de 40% a un effet néfaste sur la performance du dispositif, parce qu'elle effectue négativement les propriétés de transport du film d'absorbeur de CIGS. Les dispositifs courants et à haute efficacité sont préparés avec des énergies de gap dans la gamme de 1.20 à 1.25eV, ceci correspond à un rapport de $\frac{\text{Ga}}{(\text{In}+\text{Ga})}$ entre 25 et 30%. [17]

L'addition du Ga augmente non seulement de bande du gap mais a également d'autres effets bénéfiques. L'addition de Ga améliore l'adhérence du film au substrat de Molybdène. La concentration en porteur dans l'absorbeur est également rapportée à l'augmentation avec l'addition du Ga. D'ailleurs, les défauts chimiques, les affinités d'électron et de trou, les morphologies de film et les constantes de maille sont également affectées par l'addition de Ga. [17]

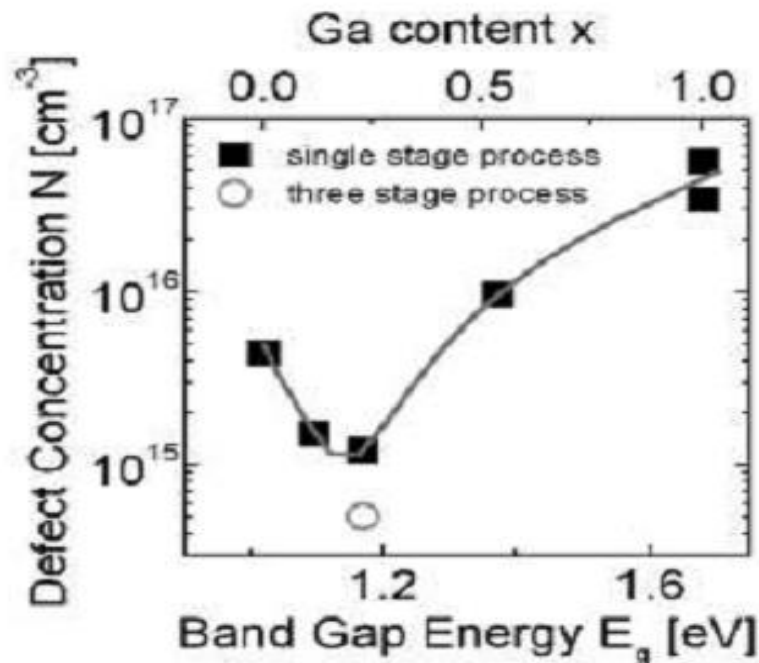


Fig.3.4. Variation de la concentration des défauts en fonction de la bande interdite.

Comme montre Fig.3.4, On observe une diminution de la densité de défauts pour une quantité optimale de Ga ($\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.3$) dans un composé $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$. La présence d'un nombre plus faible de défauts implique moins de pertes par recombinaison dans le volume de l'absorbeur. [18]

II.5. Orientation cristalline

Le CIGS employé dans les dispositifs photovoltaïques est une couche mince polycristalline. Dans la majorité des cas, les plans cristallins parallèles à la surface sont des plans (112) et (220/204) (et dans une moindre mesure, les plans (116/312)). On utilise la notation (220/204) car les plans (220) et (204) ne sont pas discernables en diffraction de rayons X pour les compositions de CIGS utilisées dans l'état de l'art (soit $x = \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.3$). [8]

En effet, dans le CIS pur la distance interplanaire des plans (220) est inférieure à celle des plans (204). Dans le cas du CGS pur, c'est l'inverse. La variation de composition du CIGS entraîne une variation des distances interplanaires entre ces deux extrêmes. Ainsi, pour des compositions proches de $x=0.3$, $d_{220} \approx d_{204}$. La notation des plans (116/312) s'explique de la même manière. [8]

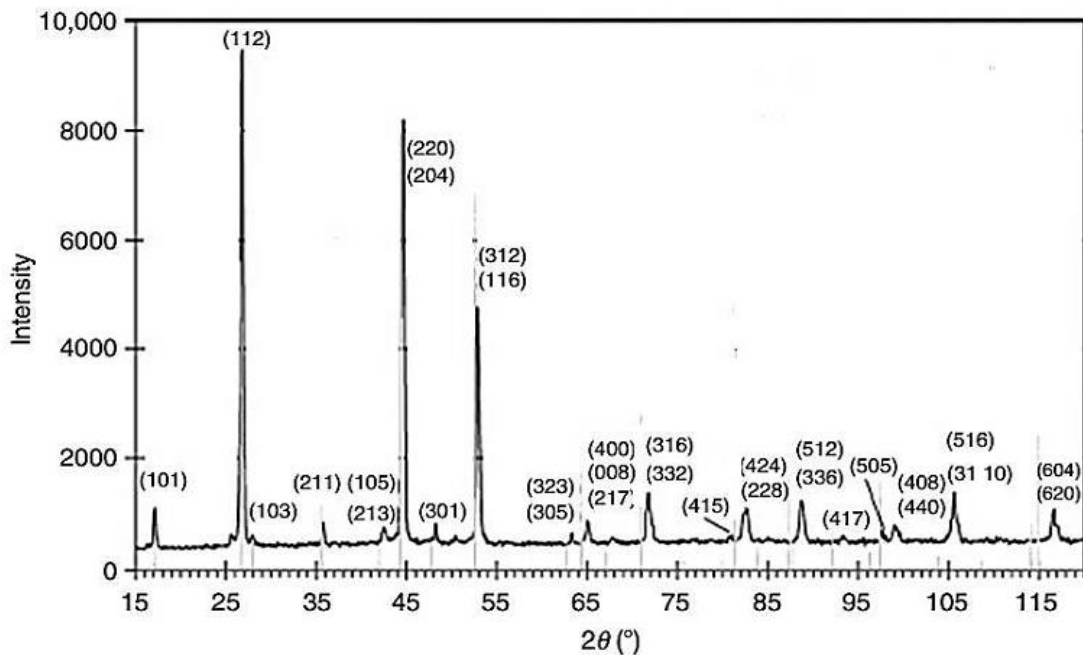


Fig.3.5. Diffractogramme des rayons X de $\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2$. [8]

L'orientation cristalline du CIGS dépend fortement des conditions dans lesquelles il est élaboré, mais aussi des propriétés du substrat. La plupart des études montrent que l'orientation (220/204) permet d'obtenir de meilleures performances photovoltaïques. Il n'existe actuellement pas d'explication claire de cet effet. [19]

II.6. Propriétés électroniques

II.6.1. Bande interdite

Une des issues avec les piles solaires CuInSe_2 est leur V_{co} relativement inférieur qui est principalement dû à son petit espace de bande. Cette limitation est surmontée en ajoutant des quantités commandées de Gallium pour remplacer l'Indium dans la structure CIS. [17]

Des mesures effectuées de l'énergie de la bande interdite du CuInSe_2 ont montré une valeur autour de 1.01eV à la température ambiante et approximativement de 1.68eV pour CuGaSe_2 (CGS). Et comme le CIGS est une solution solide de ces deux matériaux, sa bande interdite du CIGS peut varier entre les valeurs de ces deux composés. [19]

La dépendance de l'énergie de la bande interdite du CIGS en fonction de la concentration de Ga de la couche et peut se calculer selon l'équation suivante:

$$E_g^{\text{CIGS}}(x) = (1 - x)E_g^{\text{CIS}} + xE_g^{\text{CGS}} - b(1 - x) \quad (3.1)$$

Soit

$$E_g^{\text{CIGS}}(\text{eV}) = 1.01(1 - x) + 1.65x - 0.15(1 - x) \quad (3.2)$$

Où $x = \frac{\text{Ga}}{[\text{Ga} + \text{In}]}$ représente le taux d'atomes de Ga qui remplacent les atomes d'Indium dans la structure et b un facteur de désordre compris entre 0.15 à 0.24eV. [20]

La présence d'un gradient de concentration en Ga dans la couche d'absorbeur permet donc d'obtenir une variation de la bande interdite dans l'épaisseur du matériau. Ce gradient de gap fait l'objet de nombreuses études dans le domaine du CIGS. En effet, il peut être contrôlé dans les procédés usuels de dépôt de CIGS tels que la Co-évaporation en 3 étapes.

Fig.3.6 présente les 4 types de gradients de gap principalement rencontrés dans les cellules CIGS.

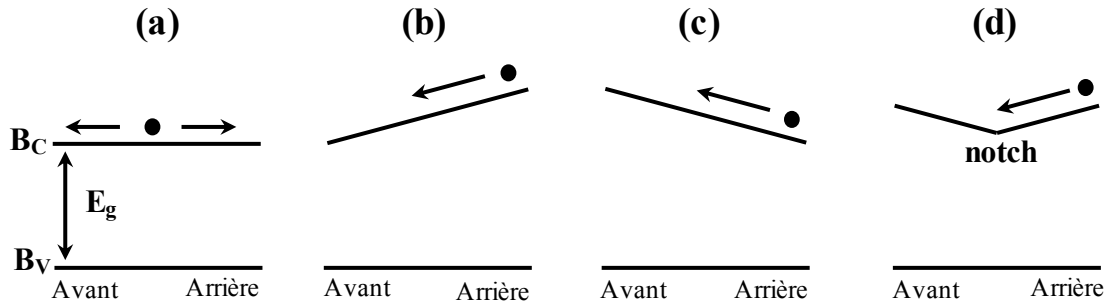


Fig.3.6. Principaux types de gradients de bande interdite dans les couches de CIGS. [14]

(i) Dans le cas de gap constant (Fig.3.6.a); les bandes sont plates et aucun gradient n'est présent, le transport des électrons n'est pas particulièrement influencé par la structure de bandes. [19]

(ii) Dans le cas de gradient de gap normal (Fig.3.6.b), le gap au contact arrière est plus grand que le gap au contact avant, ce différence de potentiel induite facilite ainsi le transport des électrons vers ZCE. De plus, du fait de la présence d'un plus grand gap au contact arrière, les recombinaisons dans cette même zone sont réduites. [19]

Pour les cellules à base de Silicium, il est possible de diminuer les recombinaisons au contact arrière par la réalisation d'un champ BSF, cela se fait par une réalisation d'un gradient de dopage. Mais dans les cellules solaires à base de CIGS, le BSF peut être réalisé avec un gradient de gap. [14]

(iii) Dans le cas de gradient de gap inverse (Fig.3.6.c) ; là où le gap au contact avant est plus grand que le gap au contact arrière. Le fait de la présence d'un grand gap au niveau de la jonction, les recombinaisons dans ZCE sont réduites. [14]

(iv) Dans le cas de double gradient (Fig.3.6.d), il est en effet composé d'une première zone allant du contact arrière jusqu'à une position communément appelée "notch" d'un gap plus faible, dans la seconde partie, le gradient est inversé et remonte vers contact avant. [14]

Pour les cellules de plus hauts rendements, la teneur en Ga est ajustée en fonction de la profondeur de la couche de CIGS. En effet, une concentration plus riche en Ga au niveau des interfaces avant et arrière de la couche CIGS (interfaces CdS/CIGS et Mo/CIGS) permet d'améliorer la séparation des porteurs de charge photogénérés et de réduire les phénomènes de recombinaison. [3]

Cela permet d'optimiser à la fois V_{co} , qui augmente pour une bande interdite plus large au niveau de la jonction, et I_{cc} qui augmente pour une bande interdite plus faible, grâce à une absorption plus importante au sein de l'absorbeur. [21]

Cependant, il a été également, démontré qu'en présence de trop forts gradients de Ga, "le notch" peut aussi agir comme barrière aux électrons et comme source de recombinaisons. [14]

II.6.2. Défaut dans $CuInSe_2$

Un monocristal idéal peut être construit par une répétition régulière dans tout l'espace d'unités structurales identiques, les atomes sont rangés aux nœuds d'un réseau périodique, le résultat donc est un ensemble ordonné de noyaux et d'électrons liés entre eux par des forces essentiellement coulombiennes. Loin du cas idéal tout écart à la périodicité d'un réseau ou à la structure d'un cristal est un défaut. [13]

Les propriétés des matériaux semiconducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont généralement introduits intentionnellement pour assurer une bonne conductivité électrique ou de manières non intentionnelles. [2]

Parmi les défauts d'un réseau cristallin on peut citer les défauts ponctuels se divisant en deux parties ; les défauts intrinsèques et les défauts extrinsèques. [13]

II.6.2. 1. 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. [22]

Les principaux défauts intrinsèques qui sont généralement présents dans les ternaires $CuInSe_2$ se divisent en trois parties: [2]

(i) **Lacunes**: ce défaut peut définir comme l'absence d'un atome en un site normalement occupé [13]. Elles se forment surtout à la surface des cristaux [22], Ce type de défaut est présenté dans le composé ternaire ABC_2 par VA, VB, VC [13]. Dans le CIS, les lacunes sont présentées par ; Les vacances de cuivre V_{Cu} , Les vacances d'Indium V_{In} et Les vacances de sélénium V_{Se} . [22]

(ii) **Interstitiels**: les atomes se logent dans les sites normalement interdits. Ce type de défaut est présenté par A_i , B_i , C_i . Il existe deux types d'interstitiels: les auto-interstitiels sont les atomes de même nature que ceux du cristal, et les hétéro-interstitiels sont les atomes de nature différente que ceux de cristal [13]. Dans le CIS, il est représenté par : Cu_i , In_i ou Se_i . [22]

(iii) **Antisites (substitutionnels)**: sont les atomes qui occupent les places des autres atomes. Ces défauts sont présentés par $A_B A_C$, $B_A B_C$, $C_A C_B$ [13]. Dans le CIS, il est représenté par: Cu_{In} , Cu_{Se} , In_{Cu} , In_{Se} , Se_{Cu} , Se_{In} . [22]

Dans le tableau.3.1 nous avons rapporté quelques défauts intrinsèques et leurs types identifiés dans le composé ternaire $CuInSe_2$. [23]

Tableau.3.1. Quelques défauts identifiés dans $CuInSe_2$, et leurs types.

Défaut	Type de défaut
Cu_{In}	Accepteur
V_{In}	Accepteur
V_{Se}	Accepteur
V_{Cu}	Accepteur
Se_i	Accepteur
Se_{In}	Accepteur
In_{Cu}	Donneur
Se_{Cu}	Donneur
Cu_i	Donneur

II.6.2.2. 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 augmenter la conductivité électrique. Les caractéristiques des matériaux semiconducteurs sont fortement influencées par ce type des défauts. Ces derniers sont souvent 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. [22]

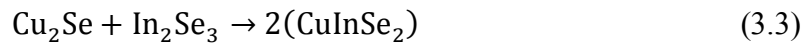
Généralement, un état de défaut est dit ‘‘peu profond’’ si son niveau d’énergie est proche du minimum de la bande de conduction ou du maximum de la bande de valence. Dans le cas contraire, il est appelé ‘‘niveau profond’’. [22]

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. [22]

II.6.3. Type de conductivité

Contrairement aux autres semiconducteurs ordinaires tels que le Silicium, l’introduction de défauts dans les matériaux CIGS est possible sans avoir recours à des atomes étrangers. En effet, l’opération est purement intrinsèque. Ce sont les défauts intrinsèques qui sont responsables du dopage du matériau (intrinsèquement dopé). Ils peuvent être des lacunes, des substitutions, ou des défauts complexes résultant de la présence de plusieurs types de défauts en attraction électrostatique.

Considérons le composé ternaire CuInSe_2 de type I-III-VI₂, on peut supposer qu’il résulte d’une réaction chimique entre deux binaires selon l’équation suivante:



D’une manière générale, dans cette réaction si on a un excès de l’un des réactifs, on a un écart à la molécularité (Δm) et le composé n’est pas formé d’un nombre équivalent de moles. L’écart à la molécularité est alors défini comme la quantité de Cu_2Se nécessaire pour neutraliser les moles de In_2Se_3 .

S’il y a un excès de l’un des éléments constituant le composé, on parle d’un écart à la stœchiométrie (Δs), qui présente l’écart par rapport à la règle d’occupation des sites par quatre électrons associés à un excès, ou à un déficit d’un électron pour la formation d’une liaison. [12, 24]

Les relations qui décrivent l’écart à la molarité (Δm) et à la stœchiométrie (Δs) sont données par Kluin et Mollerv. [12, 24]

$$\Delta m = \frac{[\text{Cu}]}{[\text{In}]} \quad (3.4)$$

$$\Delta s = \frac{2[\text{Se}]}{[\text{Cu}] + 3[\text{In}]} - 1 \quad (3.5)$$

L'écart entre ces rapports et la valeur zéro indique :

$$\Delta m > 0 \Rightarrow \frac{[Cu]}{[In]} > 1: \text{Le film CIS est riche en Cuivre.}$$

$$\Delta m < 0 \Rightarrow \frac{[Cu]}{[In]} < 1 \text{ Le film CIS est riche en Indium.}$$

$$\Delta s > 0 \Rightarrow \left[\frac{Se}{Cu+In} \right] > 1: \text{Le film CIS est en excès de Sélénium.}$$

$$\Delta s < 0 \Rightarrow \left[\frac{Se}{Cu+In} \right] < 1 \text{ Le film CIS est en déficit de Sélénium. [23]}$$

Le $CuInSe_2$ peut avoir une conductivité électrique de type N ou de type P, dominée par les écarts à la composition stœchiométrique, qui se traduisent par la présence de nombreux défauts dans la structure du matériau, dont certains sont électriquement chargés.

Le tableau.3.2 rassemble les différents types de conductivités que peut avoir le $CuInSe_2$ en fonction des rapports $\left[\frac{Cu}{In} \right]$ et $\left[\frac{Se}{Cu+In} \right]$. [15]

Tableau.3.2. Type de conduction dans $CuInSe_2$ en fonction des écarts Δs et Δm .

$\left[\frac{Se}{Cu + In} \right] > 1$	$\left[\frac{Cu}{In} \right] > 1$	Type P avec une résistivité faible.
	$\left[\frac{Cu}{In} \right] < 1$	Type P avec une résistivité moyenne, ou Type N avec une résistivité forte.
$\left[\frac{Se}{Cu + In} \right] < 1$	$\left[\frac{Cu}{In} \right] > 1$	Type P avec une résistivité faible.
	$\left[\frac{Cu}{In} \right] < 1$	Type P avec une résistivité forte, ou Type N avec une résistivité faible.

Selon les deux écarts, le film préparé avec un excès de Cu ($\Delta m > 0$) sont toujours de type P de faible résistivité, quelque soit le rapport $\left[\frac{Se}{Cu+In} \right]$. Le film préparé avec un excès d'In ($\Delta m < 0$) peuvent être du type P ou N, de résistivité faible ou forte selon le rapport $\left[\frac{Se}{Cu+In} \right]$.

Par un recuit sous une haute pression de Se, le matériau de type N peut être converti en type P, inversement, un recuit dans une basse pression de Se, sa conductivité peut être changée en type N. [5]

II.6.4. Joints de grains

Le CIGS utilisé dans les cellules solaires est polycristallin et possède donc des joints de grains. A ces interfaces, le CIGS présente divers défauts structuraux chargés positivement, principalement des lacunes de Sélénium V_{Se} . [8]

D'un point de vue électrique, les grains de joints sont préjudiciables à la performance des cellules solaires de deux façons:

(i) ils agissent comme des pièges pour la recombinaison de photoélectrons générés avec des trous. Ce qui a été identifié comme un mécanisme de perte importante de dispositifs photovoltaïques polycristallins en général et en particulier le dispositif photovoltaïque à base de CIGS.

(ii) ils contribuent à la formation d'une charge de surface positive, située aux limites des grains. Il en résulte une charge positive dans une région de déplétion et une barrière de potentiel pour les électrons dans le voisinage des joints de grains. Ainsi, le dopage effectif de type P de la couche CIGS est diminué. [17]

L'un des intérêts du CIGS est que sa structure électronique aux joints de grains n'est pas fatale pour les performances de la cellule. La première explication vient du fait que les défauts chargés sont passivés par l'apport d'oxygène (exposition à l'air) ou de Sodium présent dans le substrat. [8]

II.7. Propriétés optiques

II.7.1. Constante optique

Des mesures d'ellipsométrie sur des échantillons monocristallins ont été réalisées et les fonctions diélectriques ont été obtenues avec l'indice de réfraction complexe pour des polarisations différentes. A partir de ces mesures une valeur de largeur de bande interdite de 1,04eV de $CuInSe_2$ a été déterminée.

Une étude similaire a été faite sur des lingots polycristallins de CIGS ayant des compositions différentes de $x = \frac{Ga}{(Ga+In)}$ à 1. Des courbes décrivant l'indice de réfraction complexe, n_c , pour des échantillons avec $x=0$ et 0.2 sont reproduites dans Fig3.7. [8]

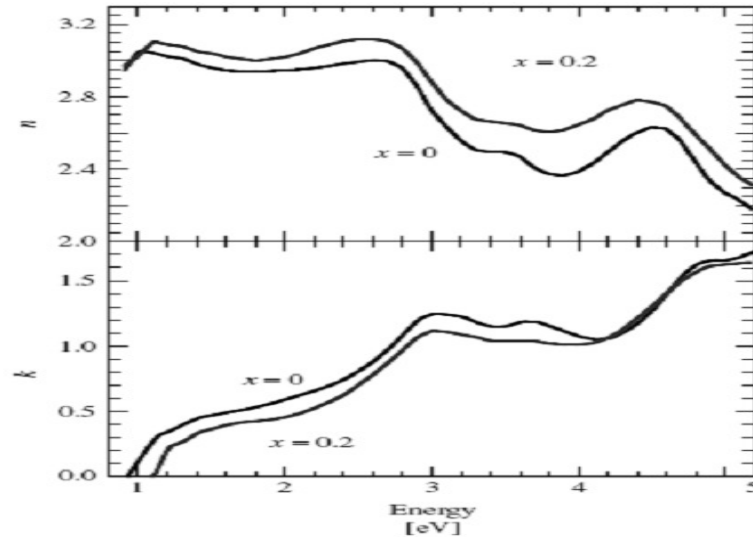


Fig.3.7. Représentation des indices de réfraction (réelle et imaginaire) en fonction de l'énergie pour le CIGS, avec $x=0$ et $x=0.2$. [25]

Généralement les propriétés optiques dépendent considérablement de l'indice de réfraction complexe, ce dernier est donné par la relation suivante :

$$n_c = n + ik \quad (3.6)$$

Où n est l'indice de réfraction, k le coefficient d'extinction. [13]

L'indice de réfraction complexe k peut être utilisé pour calculer d'autres paramètres optiques comme le coefficient d'absorption :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3.7)$$

Avec k est l'indice imaginaire, λ est la longueur d'onde du photon.

II.7.2. Coefficient d'absorption

Si le composé CIGS est utilisable dans des dispositifs photovoltaïques en couches minces, c'est parce qu'il possède un gap direct. De ce fait, l'absorption des photons ayant une énergie proche du gap ne nécessite pas l'intervention de phonons et il en résulte un coefficient d'absorption très élevé, plus grand que 10^5cm^{-1} dans le domaine du visible et le proche infrarouge. Pour une énergie de photon $h\nu$ donnée, le coefficient d'absorption vaut approximativement:

$$\alpha(h\nu) = B\sqrt{h\nu - E_g} \quad (3.8)$$

Avec B , une constante de proportionnalité, qui dépend des densités des états liés à l'absorption de photon et E l'énergie d'irradiation.

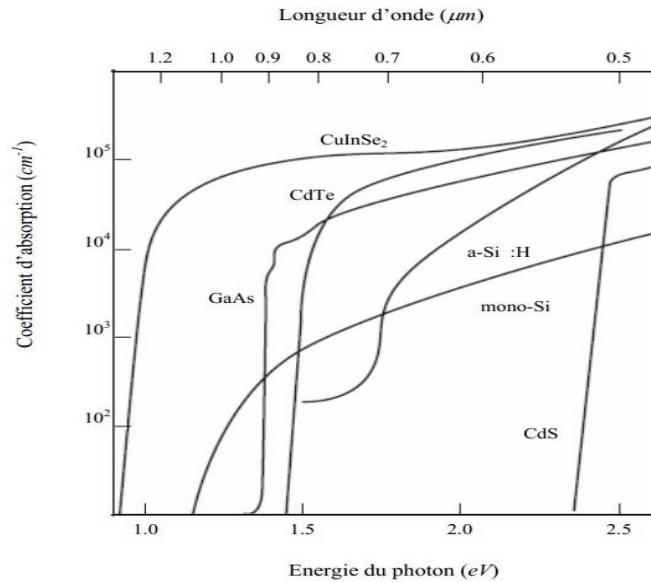


Fig.3.8. Coefficient d'absorption des matériaux (CIS, CdTe, GaAs, a-Si: H, mono-Si et CdS).

Fig.3.8 compare le coefficient d'absorption optique du CIS à celles des autres des matériaux (CdTe, GaAs, CdS, etc.) en fonction de l'énergie des photons incidents.

On remarque qu'il existe un écart d'un ordre de grandeur entre les autres des matériaux et le CIS, ce qui montre l'intérêt de ce dernier pour une utilisation en couches minces. Ainsi, une couche de CIGS d'une épaisseur de $1\mu\text{m}$ suffit à absorber 95% du spectre solaire pour les photons dont l'énergie est supérieure à E_g . [5]

III. Structure d'une cellule solaire à couche mince à base CIGS

La structure la plus répandue d'une cellule solaire à base de CIGS est présentée sur Fig.3.9.

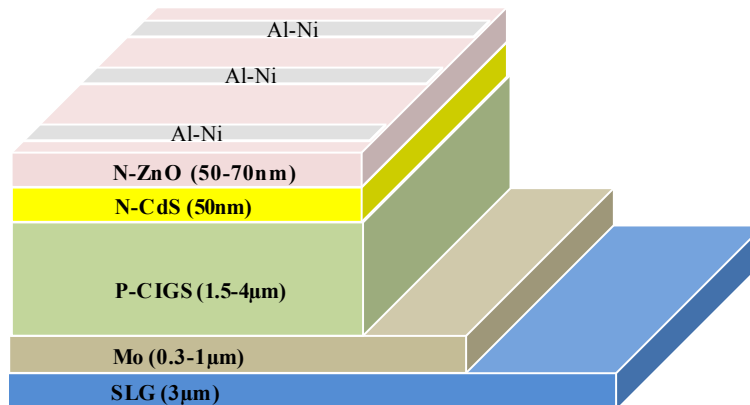


Fig.3.9. Schéma de l'empilement typique des cellules solaires à base de CIGS.

Le substrat le plus commun est un verre sodé d'une épaisseur de 3 μm . Ce dernier est recouvert sur un côté de molybdène (Mo) servant comme un contact arrière. L'hétérojonction est formée entre les semiconducteurs CIGS et ZnO, avec une fine couche d'accord interfacique de CdS et de ZnO intrinsèque.

Le CIGS a un dopage de type P, alors que le ZnO est de type N grâce à l'incorporation d'Aluminium (Al). Ce dopage asymétrique est à l'origine de ZCE qui s'étend davantage dans le CIGS que dans le ZnO.

Le ZnO dopé sert également de contact face avant pour la collection de courant. Les dispositifs expérimentaux, typiquement d'une surface de 0,5 cm^2 présentent une grille de Ni/Al déposée sur la face avant pour contacter le ZnO. [10,26]

III.1. Diagrammes des bandes d'énergies de la cellule CuInSe_2

Contrairement aux cellules solaires au Silicium, les cellules au CIGS sont du type hétérojonction, c'est-à-dire que les régions P et N sont constituées de matériaux différents. Fig.3.10 montre le diagramme de bandes associé à l'empilement des composants constituant une cellule solaire à base CIGS.

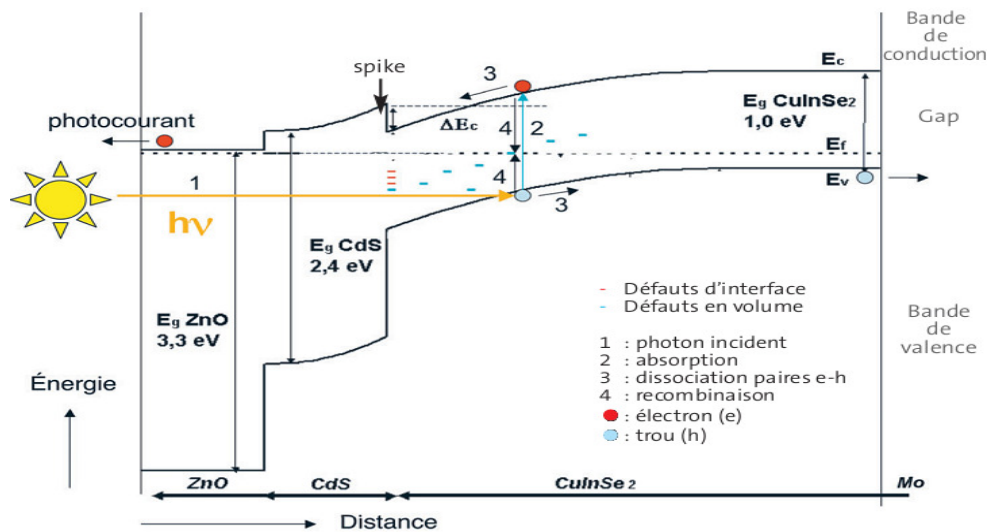


Fig.3.10. Diagramme de bandes d'une cellule CIS.

La différence des affinités électroniques (écart en énergie séparant le niveau de Fermi du niveau du vide) des deux matériaux constituant la jonction (CdS/CIGS) se traduit par une discontinuité de bande interdite. [14]

La discontinuité au niveau de la bande de conduction ou ΔE_c (Conduction Band Offset) conditionne la circulation des porteurs minoritaires dans le dispositif. Elle doit posséder une hauteur optimale afin d'atteindre de hauts rendements [16]; trop haute (vers la positive), elle s'oppose au passage des électrons photogénérés, réduisant le photocourant [10]; trop basse (vers la négative), permet aux électrons de la couche fenêtre (CdS) de injecter vers l'absorbeur (CIGS), en raison de la position de la bande de conduction de CIGS, qui est au dessus de celle de CdS, les électrons vont avoir une probabilité relativement élevée de se recombiner avec les défauts présents à l'interface. [12]

Au voisinage de l'interface CIGS/CdS, la valeur optimale de ΔE_c est d'environ 0.3eV, elle obtenue pour un gap de CIGS=1,15eV. Une courbure de la bande de conduction supérieure à 0.5eV crée une barrière forte pour les électrons photogénérés limitant ainsi, le transport du courant. [20]

La couche de ZnO intrinsèque complète la couche tampon sur le plan électrique, en évitant le contact direct avec le ZnO:Al électriquement dégénéré. Du fait de largeurs de bande interdite élevées, les couches de ZnO et tampon laissent passer le rayonnement visible (d'où leur nom de couches fenêtre), qui est ensuite absorbé dans la couche de CIGS. [16]

Les caractéristiques des cellules vont donc, au final, dépendre étroitement de celles des couches individuelles et de leurs interfaces. L'augmentation, par exemple, de la largeur de bande interdite du CIGS va s'accompagner d'une augmentation de la tension de circuit ouvert au détriment du photocourant. [16]

III.2. Différentes couches de la cellule photovoltaïque

Comme nous pouvons le voir sur Fig.3.9 ci-dessus, il existe six éléments principaux dans la photopile en couches minces, à savoir:

III.2.1. Substrat

Le choix du substrat est la première étape dans l'élaboration d'une cellule solaire. Il doit répondre à différents critères chimiques et mécaniques, qui le rendent apte à suivre toutes les étapes de fabrication de la cellule, sans en détériorer la qualité, tout en ayant un coût limité. [20]

Parmi les critères retenus, on citera notamment les suivants:

- (i) Sa rigidité.
- (ii) Son coefficient de dilatation.
- (iii) Sa température maximale d'utilisation.
- (iv) Son état de surface qui doit être parfaitement lisse. [20]

Il existe trois catégories de substrat: le verre, les métaux, et les polymères. On utilise généralement un substrat en verre sodocalcique (SLG Soda Lime Glass) en raison de sa production facile à grande échelle et à faible coût. Outre sa bonne tenue mécanique durant tout le procédé de fabrication du dispositif photovoltaïque est un avantage à ne pas négliger. Son coefficient d'expansion thermique est adapté à celui de l'absorbeur CIGS et permet ainsi d'éviter des décollements et autres défauts entre l'électrode face arrière et la jonction PN. En revanche son utilisation exclue toute température de procédé supérieure à 580°C sous peine de déformation et de risques de casse. [27]

III.2.2. Contact arrière

Afin d'assurer la collecte des porteurs photogénérés, une couche de Molybdène (Mo) avec une épaisseur de 0.3 à 1µm, dit contact arrière, est déposée par pulvérisation cathodique sur le substrat. [28]

Bien que d'autres métaux ont été étudiés, Mo reste le matériau le plus utilisé parce qu'il présente un certain nombre d'avantages:

- (i) Il remplit le rôle primordial d'un contact métallique qui consiste à collecter les porteurs pour les transmettre à la charge externe.
- (ii) c'est un bon conducteur électrique.
- (iii) compte tenu de sa température de fusion très élevée (2623°C), le Mo peut résister aux différents traitements thermiques qui s'imposent dans la fabrication des cellules.
- (iv) son coefficient d'expansion thermique adapté et sa faible résistance de contact avec l'absorbeur. [12]

Le bon comportement électronique de l'interface formée entre le CIGS et le Mo serait dû à la présence d'une fine couche de MoSe₂ d'une épaisseur de 10nm et d'un gap de 1.4eV plus élevé que celui du CIGS, qui permet de diminuer les recombinaisons à l'interface de ces deux couches. Cette couche permet également d'assurer un contact ohmique entre Mo et le CIGS et d'éviter la zone de déplétion créée par l'interface semiconducteur/métal. [21]

III.2.3. Couche absorbante

Une couche absorbante est la partie essentielle de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous, elle doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption de l'ordre de 10^5 cm^{-1} 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 à 1.7eV, sa conductivité doit être de type P, et de l'ordre de 1 à $10^{-2} \Omega\text{-cm}^{-1}$. [5]

Dans le cas présent, le CIGS. Il s'agit d'un semiconducteur de type P de la famille I-III-VI sous sa forme Chalcopyrite, qui forme la première partie de l'hétérojonction PN. L'épaisseur standard des couches CIGS dans les cellules solaires à couche mince CIGS est actuellement de 1,5 μm à 4 μm . Les méthodes de dépôt du CIGS sont variées, les plus communes étant la Co-évaporation et le recuit de précurseurs métalliques en présence de vapeurs de Sélénium. [4]

III.2.4. Couche tampon

Si un contact entre couche absorbante et couche fenêtre est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister, mais son rendement sera limité par:

(i) L'inadaptation des bandes interdites.

(ii) 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:

(i) Une bande interdite intermédiaire permettant une transition souple entre celle du semiconducteur et celle de la couche fenêtre, soit une valeur comprise entre 2.4 et 3.2eV.

(ii) Une conductivité de type N pour former la jonction avec la couche absorbante qui elle est de type P; de plus, afin d'éviter les effets de fuites de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante, soit de l'ordre de $10^{-3} \Omega \text{ cm}^{-1}$.

(iii) Morphologiquement elle doit être très homogène pour éviter tout effet de court circuit au niveau des joints de grains. [29]

Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de Sulfure de Cadmium (CdS), de type N, c'est le matériau le plus utilisé, qui généralement déposée par la technique de dépôt par bain chimique (Chemical Bath Deposition, CBD) permet un recouvrement optimal de la surface de la couche absorbante CIGS. [20]

L'épaisseur typique d'une couche tampon en CdS est d'environ 50nm, ce recouvrement permet la formation de la jonction et la passivation de défauts sur toute surface libre de l'absorbeur; il permet également de protéger efficacement la surface de l'absorbeur du dépôt de la couche de ZnO par pulvérisation cathodique. [20]

Cependant, en raison de la toxicité du Cadmium, la communauté scientifique travaille depuis déjà quelques années pour substituer la couche CdS par un film plus écologique, ne contenant plus de Cadmium toxique, les matériaux les plus prometteurs étant des composés communs (Zn, Mg) (O, S) $\text{In}_2(\text{S}, \text{Se})_3$, etc., ou de Sulfure d'Indium (métal plus rare). [9]

III.2.5. Couche fenêtre

Le contact avant d'une pile solaire doit être en même temps transparent et conducteur. Différents Oxydes Conducteurs Transparents (TCO) ont été expérimentés. Les piles solaires de CIGS utilisent plus fréquemment l'Oxyde de Zinc (ZnO) dopé d'Aluminium (ZnO: Al). Ce dernier a une large bande de gap de 3.3eV et a de bonnes propriétés électriques et optiques (une transmission de 90% dans la gamme de 400-1000nm et une résistivité de 9.10 à $4 \Omega \cdot \text{cm}$).

Une combinaison d'une qualité intrinsèque (i-ZnO) et d'une couche de ZnO dopée est généralement employée, car cette double couche rapporte des rendements uniformément plus élevés.

Il a été constaté que des paramètres de cellules, en particulier, le facteur de forme (FF) varie avec l'épaisseur des couches intrinsèques de ZnO. Le rendement le plus élevé a été réalisé une couche d'i-ZnO d'épaisseur environ 70nm.

D'autre part, quand la couche d'i-ZnO est très épaisse, la performance de cellules s'est dégradée en raison de l'augmentation de la résistance en série. Par conséquent une épaisseur optimale de la couche d'i-ZnO est nécessaire pour une meilleure performance de la pile solaire. [17]

III.2.6. Contact avant

Enfin, une grille métallique est déposée sur chaque cellule afin d'améliorer l'extraction des porteurs de charge photogénérés. Ces grilles sont composées d'une superposition d'une couche de Nickel (50nm) et d'une couche d'Aluminium ($2\mu\text{m}$) déposées par évaporation par canon à électron. [9]

Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation d'aluminium qui forme un contact ohmique à l'avant du dispositif. A ceci est parfois ajoutée une couche antiréflexion (MgF_2). Ces matériaux ne sont bien évidemment pas choisis au hasard et doivent posséder des propriétés physico-chimiques bien particulières. [9]

IV. Méthodes des dépôts en couches minces

Il existe une large gamme de méthodes de préparation des matériaux en couches minces utilisées dans la fabrication des dispositifs photovoltaïques telles que les cellules à base de Si en couches minces de CdTe ou de CIGS etc.

Certaines permettent d'atteindre de très hauts rendements en laboratoire, mais le coût du procédé et sa mise en œuvre peuvent s'avérer difficiles à développer à grande échelle, tandis que d'autres sont moins efficaces, mais économiques est facilement transposables en industrie. [4]

Les principales méthodes les plus connues utilisées pour élaborer les couches minces sont présentes sur Fig.3.11.

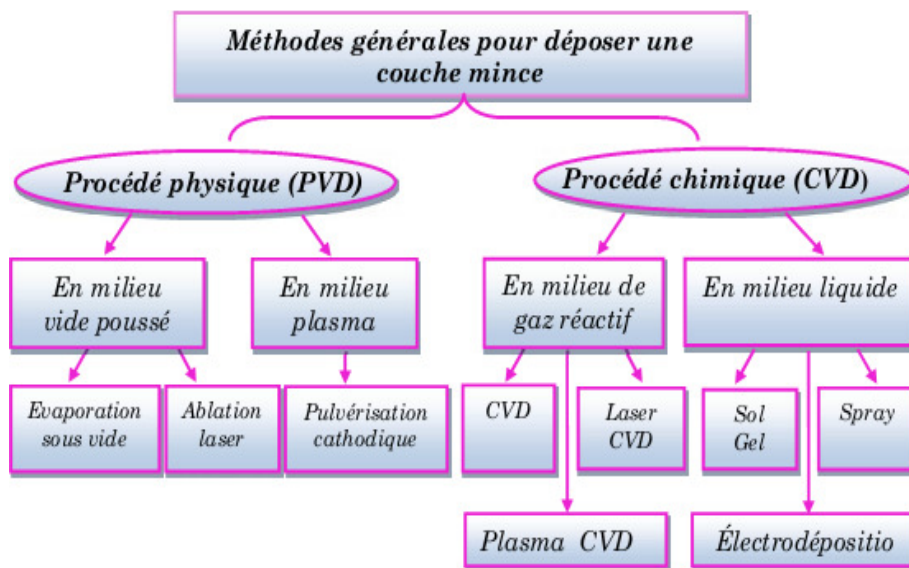


Fig.3.11. Processus de dépôt de couches minces.

Elles se divisent en deux techniques principales: (i) Les méthodes de dépôt physiques (PVD); qui sont généralement utilisées en recherche, (ii) et les méthodes chimiques (CVD) sont utilisées industriellement. [30]

Il est généralement connu que tous les procédés d'élaboration des films minces se reposent toujours sur le même principe qui s'effectue en trois principales étapes:

(i) le premier processus est de produire des espèces ioniques, moléculaires ou atomiques appropriées.

(ii) le second est de transporter ces espèces molécules ou les atomes sur un substrat.

(iii) le troisième processus est de condenser ces espèces sur ce même substrat, soit directement soit par l'intermédiaire d'une réaction chimique ou électrochimique afin de former un dépôt solide. [7]

Dans ce qui suit, nous nous intéressons uniquement par deux techniques d'élaboration du composé CIGS : La méthode de Co-évaporation des trois éléments qui a permis d'atteindre les plus hauts rendements, et la méthode de Spray Pyrolyse, qui certainement très simple à mettre en œuvre, mais son rendement matière est assez faible. Nous donnerons des brèves définitions de ces deux techniques, leurs propriétés obtenues ainsi que les performances de la cellule pour chaque technique d'élaboration. [5]

IV.1. Co-évaporation

La Co-évaporation est une méthode de dépôt physique qui consiste simplement à évaporer ou à sublimer (Faire passer directement de l'état solide à l'état gazeux) le matériau à déposer dans un creuset sous vide en le chauffant à haute température. Le matériau évaporé est déposé par condensation sur le substrat à recouvrir. [30]

Dès que la température de liquéfaction (le passage d'un état gazeux à l'état liquide) est dépassée, il se trouve que la pression de vapeur du matériau est sensiblement supérieure à celle résiduelle dans l'enceinte. Alors des atomes du matériau s'échappent et se propagent en ligne droite jusqu'à ce qu'ils rencontrent un obstacle.

Cette rencontre peut être le fait soit d'une surface solide (substrat, paroi de l'enceinte) soit d'un atome ou d'une molécule se déplaçant dans l'espace. Dans le cas de rencontre d'une surface, il y aura séjour de l'atome sur la surface avec échange d'énergie et si la surface est sensiblement plus froide que l'atome il y a condensation définitive. La rencontre d'une molécule résiduelle se traduit généralement par une déviation de l'atome d'évaporant. Cela est réalisé dans les systèmes courants où la pression est de l'ordre de 10^{-6} torr. [31]

Fig.3.12 montre une installation d'une Co-évaporation comme celle utilisée pour la préparation des cellules solaires et du mini modules à l'échelle du laboratoire.

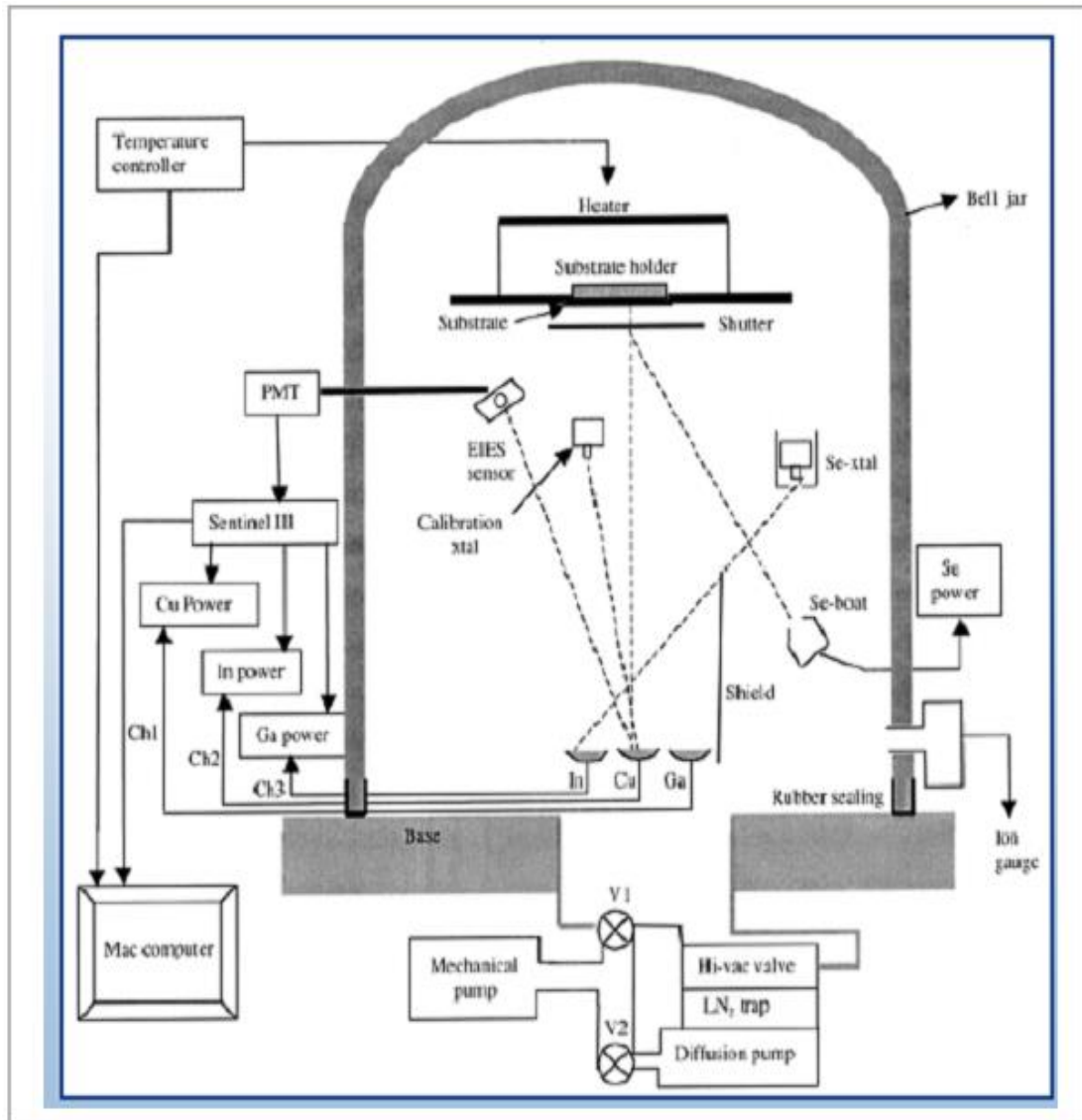


Fig.3.12. Schéma d'un procédé de Co-évaporation pour la synthèse de couches minces de CIGS à partir de sources élémentaires Cu, In, Ga et Se.

La procédure de dépôt permettant d'atteindre les meilleurs rendements de conversion est constituée de trois étapes, appelée Three-Stage-Process, développée par le laboratoire national des énergies renouvelables (National Renewnables Energies Laboratory, NREL) aux Etats-Unis, et désormais majoritairement privilégiée par les laboratoires. [31]

Le procédé de Co-évaporation à partir de sources élémentaires, optimisé pour obtenir des cellules de haut rendement, se compose typiquement de trois étapes, présentées en Fig.3.13.

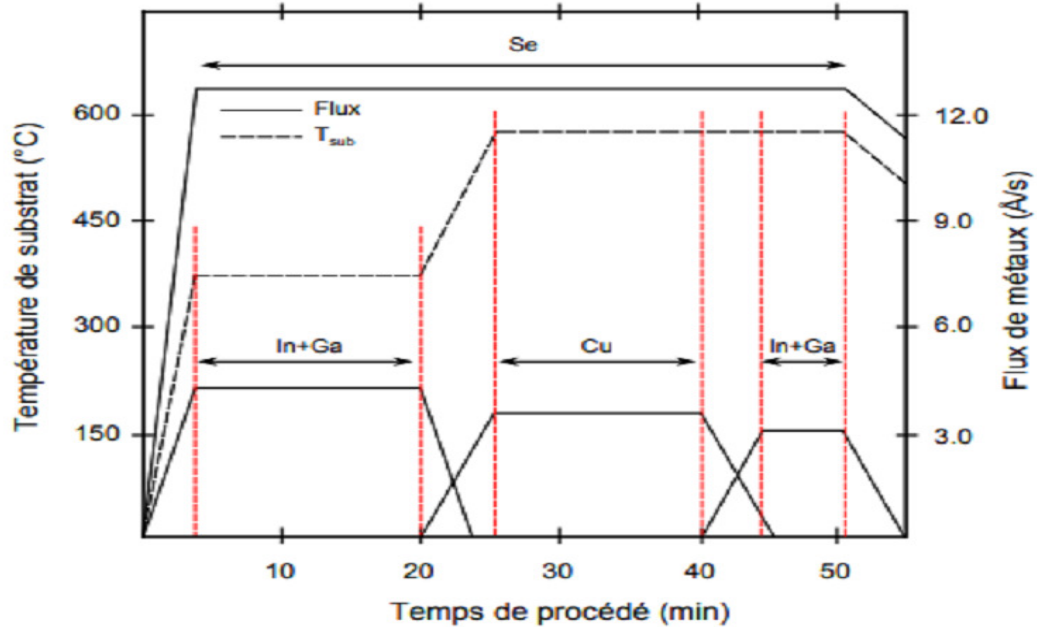


Fig.3.13. Flux de métaux et profil de température de substrat utilisés dans un procédé en trois étapes de synthèse du CIGS par Co-évaporation.

Dans le dépôt par Co-évaporation du CIGS, chacune des quatre sources est contrôlée en température et calibrée quant à son émission. Sur un contact arrière en Mo de $0,25\mu\text{m}$ d'épaisseur déposé sur du verre ordinaire préalablement nettoyé à l'ammoniaque, et maintenu à une température comprise entre 450 et 550°C , sont déposés simultanément le Se dont le creuset est chauffé entre 300 et 320°C , le Cu à 1360°C , l'In à 900°C et le Ga à 990°C . [5]

Le dépôt de l'absorbeur se déroule ensuite en trois étapes :

(i) Dans un premier temps, le dépôt débute par l'évaporation sur un substrat portée à 550°C de In et Ga en présence d'un excès de Se, de façon à obtenir une phase de type $(\text{In,Ga})_2\text{Se}_3$. Les taux d'évaporation des sources sont contrôlés par un thermocouple de façon à obtenir une couche de $1\mu\text{m}$ d'épaisseur et une teneur de Ga d'environ 30% en 40 minutes de première étape. [30]

(ii) Durant la deuxième étape la température du substrat est augmentée entre 550 et 600°C et le Cu est évaporé en présence de Se de façon à enrichir progressivement le dépôt en Cu. La présence de phases de type Cu_2Se lors de cette étape favorise l'interdiffusion des éléments et la formation de gros grains. L'évaporation du Cu est maintenue jusqu'à l'obtention d'une couche globalement riche en Cu. [30]

(iii) La dernière étape permet de réajuster la composition globale par évaporation de In et Ga en présence d'un excès de Se jusqu'à l'obtention d'une couche légèrement déficitaire en Cu, et conduit à une surface moins rugueuse qu'après l'étape riche en Cu. [11]

Ce procédé conduit à la formation d'une couche de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ possédant un double gradient de Ga, avec une teneur en Gallium plus riche vers la face arrière (proche du contact arrière en Mo) et proche de la surface (à l'interface CIGS/CdS). La largeur de bande interdite est donc plus importante vers la face arrière et en surface de l'absorbeur, ce qui est à l'origine des rendements de conversion les plus élevés pour les cellules à base de CIGS. [31]

Cette technique présente comme avantages; un contrôle facile de la vitesse d'évaporation des éléments et une possibilité de réaliser des couches très minces. On peut ajuster facilement la composition, et d'obtenir des films de haute cristallinité avec peu d'impuretés. [32]

Mais le changement d'échelle pour obtenir de grands panneaux reste difficile, et la technique est coûteuse en énergie à cause du vide poussé (de l'ordre de 10^{-6} torr). De plus, elle ne permet qu'une utilisation partielle des matériaux utilisés dans les creusets d'évaporation puisque le matériau se dépose aussi sur les parois de l'évaporateur. [32]

Le meilleur rendement obtenu par ce procédé est de l'ordre 20,3% réalisé par le laboratoire ZSW, et de 17,8% obtenu par l'Institut des matériaux Jean ROUXEL (IMN) avec un rapport $\frac{\text{Ga}}{(\text{Ga}+\text{In})}$ de 20 à 30%. [31, 33]

IV.2. Spray Pyrolyse

Cette méthode est très simple, n'exige pas de produits chimiques de haute qualité, c'est une technique extrêmement facile pour la préparation de couches de toute composition. La méthode a été utilisée pour le dépôt des films denses, et la production de poudres, même des dépôts multicouches peuvent être facilement préparés en utilisant cette technique. [34]

Le Spray Pyrolyse a été employé pour plusieurs décennies dans l'industrie du verre et dans la production de pile solaire, Fig.3.14 donne une représentation schématique de cette technique.

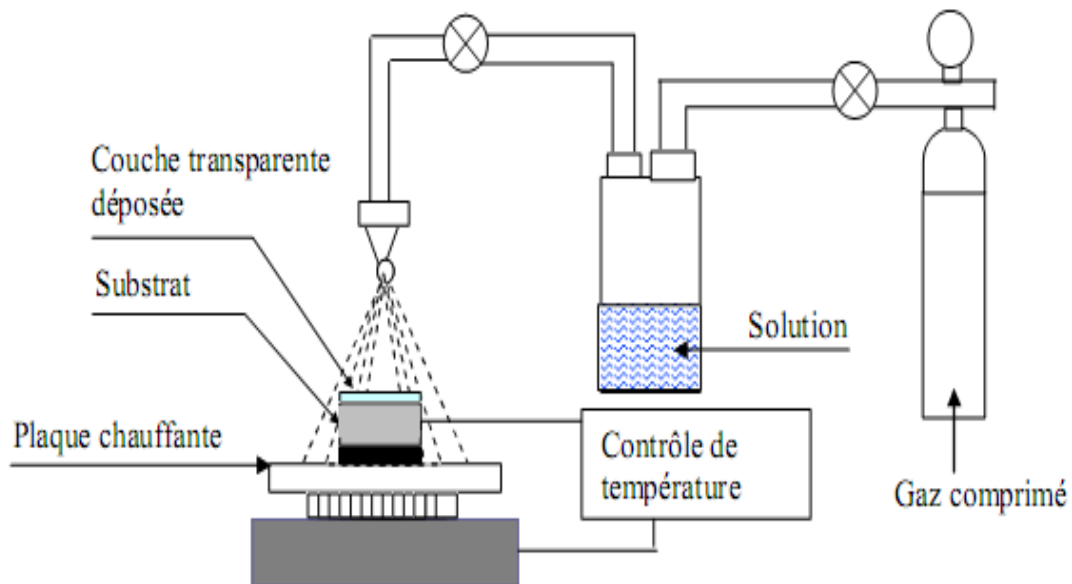


Fig. 3.14. Schéma d'un équipement de dépôt par spray pyrolyse.

Le dépôt de couches minces par la technique Spray Pyrolyse se traduit par la pulvérisation d'une solution d'un sel de métal sur un substrat chauffé. L'impact des gouttelettes sur le substrat conduit à la formation de structure sous forme de disque qui subit une décomposition thermique. La forme et la taille du disque dépendent du volume de la gouttelette, la température de substrat.....etc. [30]

Pour la synthèse du CuInGaS_2 , Cette technique consiste à pulvériser (projeter un liquide en fines gouttelettes) sur un substrat chauffé une solution contenant des précurseurs de Cu, In, Ga et Se. En contact du substrat, les éléments vont se décomposer et réagir ensemble sous l'effet de la chaleur. Les sources sont généralement le Chlorure d'Indium (InCl_3), le Chlorure Cuivreux (CuCl) et la diméthylsélénourée. [31]

Le Spray Pyrolyse est une technique de dépôt très utilisée pour l'élaboration des couches minces de semiconducteurs. Elle présente un avantage important qui est le faible coût et la simplicité de sa mise en œuvre. [31]

Un rendement record de 9,5% a été obtenu par cette méthode en 2005 par Theresa John et al d'une cellule structurée ITO/CuInS₂/In₂S₃/Ag, donc il est difficile de pouvoir comparer directement ce résultat à ceux obtenus par les différentes méthodes de dépôt des couches minces. [31]

Bien que très adaptée aux dépôts sur de grandes surfaces, elle a l'inconvénient de conduire à des couches mal cristallisées et contenant de nombreuses impuretés. [31]

V. Conclusion

Cette partie est une étude bibliographique sur les cellules solaires à base de CIGS structurée grille/ZnO/CdS/CIGS/Mo/verre. En premier temps nous avons présenté les propriétés fondamentales du matériau absorbeur CIS et ses alliages avec le Gallium (Cu(In,Ga)Se₂), à savoir sa structure cristalline, ses propriétés électriques et optiques, ainsi que les différents défauts intrinsèque et extrinsèque. Ceci est suivi par un aperçu général sur l'empilement typique de la structure des cellules solaires à base de CIGS, et définir en détail les éléments principaux de la structure. Finalement, le chapitre s'achève par des brèves définitions de deux techniques et méthodes d'élaboration les plus utilisées pour la technologie de couches minces tels que: la Co-évaporation, et le Spray-Pyrolyse. Ceci, pour mieux comprendre le comportement de cellules solaires à base de CIGS à simple jonction et les maîtriser, afin d'introduire tous ses techniques dans les cellules solaires à multijonctions dans le prochain chapitre.

Références bibliographiques

- [1] Mohamed Mimoune "Étude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies" Mémoire de Magister, Université du Québec, Année 2016.
- [2] Chaoua Makhoulouf "Effet des couches conductrices et transparentes sur les performances des cellules solaires $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ " Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Année 2014.
- [3] Chadel Asma "Optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches des cellules photovoltaïques à base de CIGS" Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Année 2018.
- [4] Souici Fatma Zohra "Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe_2)" Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, Année 2009
- [5] Bouafia Mounir, Deblaoui Laid "Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium CIGS" Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, Année 2012
- [6] Zouhair El Jouad "Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques" Thèse de Doctorat, Université Bretagne Loire, Année 2017.
- [7] Assia Bouraiou "Élaboration et caractérisation des couches minces CuInSe_2 par Électrodéposition" Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Année 2009.
- [8] Haddad Yassine "Elaboration et Caractérisation de Couches Minces de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ " Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Année 2014.
- [9] Ben Ali Mourad, Rahmouni Seddik "Simulation et optimisation d'une cellule solaire à base de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ " Mémoire de Master, Université Ahmed Draïa Adrar, Année 2018.
- [10] Amar Hichem "Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSéléniure de Cuivre Indium Galium $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2(\text{CIGS})$ " Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, Année 2014
- [11] Bouima Haithem "Elaboration et Caractérisation de Couches Minces de $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$ destinées au Photovoltaïque" Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Année 2019.
- [12] Ouissem Benhalima "Etude et élaboration du composé ternaire CuInSe_2 en couches minces pour des applications photovoltaïques" Thèse de Doctorat, Univer Site Badji Mokhtar Annaba, Année 2018.
- [13] Sator Fatima Zohra "Application de la spectroscopie de photoacoustique dans l'analyse des propriétés optiques des effets d'implantation de Ne^+ et de Xe^+ dans CuInSe_2 " Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif,

- Année 2012.
- [14] Naïma Touafek "Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ " Thèse de Doctorat, Université Des Frères Mentouri Constantine, Année 2015.
- [15] Fayçal Chouia "Optimisation du processus d'élaboration de la couche absorbante des cellules solaires à base des matériaux à structure chalcopyrite" Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Année 2018.
- [16] Daniel Lincot, Jean-François Guillemoles "Cellules solaires en couches minces à base de CuInSe_2 " Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque/<http://www.refletsdelaphysique.fr> ou <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/2007060>
- [17] Mostefa Kara Selma "Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS" Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Année 2012.
- [18] Elbar Mourad "Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco" Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, Année 2018
- [19] Charles Roger "Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques" Thèse de Doctorat, Université De Grenoble, Année 2006.
- [20] Marie Buffiere "Synthèse et caractérisation de couches minces de Zn(O,S) pour application au sein des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se_2 " Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Année 2011.
- [21] Ferouani Abdelmadjid "Etude par simulation et modélisation électriques des cellules photovoltaïques en couche mince à base de Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS)" Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, Année 2016.
- [22] Boukaraba Mohamed, Zorrig Heythem "Effet de la couche buffer dans les cellules solaires Tandem à base de CIGS" Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf M'sila, Année 2017.
- [23] Omar Meglali "Etude de l'influence des Conditions de Dépôt sur les Propriétés Physico-chimiques des Couches Minces CuXY_2 (X: Al,In; Y: Se,Te)" Thèse de Doctorat, Université de Constantine 1, Année 2014.
- [24] Linda Saad Hamideche "Etude des propriétés du matériau ternaire CuInSe_2 à base de Cu de la famille des chalcopyrites Cu-III-VI_2 " Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Année 2012.
- [25] Antonio Luque, Steven Hegedus "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering" 2003.
- [26] Atek Mourad "Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS" Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, Année 2013.

- [27] Florian Oliva ‘‘Modélisation, caractérisation et optimisation des procédés de traitements thermiques pour la formation d’absorbeurs CIGS’’ Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Année 2014.
- [28] Fotis, Konstantinos ‘‘Modeling and simulation of a dual-junction CIGS solar cell using Silvaco ATLAS’’ Thèse de Doctorat, Université de Monterey, California, Année 2012.
- [29] Bouafia Halima, Messaoudi Chahira ‘‘Etude et simulation d’une cellule photovoltaïque à base des chalcopyrites’’ Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M’sila, Année 2018.
- [30] Daranféd Ouarda ‘‘Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ’’ Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine1, Année 2013.
- [31] Aurélien DUCHATELET ‘‘Synthèse de couches minces de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ pour cellules solaires par électrodépôt d’oxydes mixtes de Cuivre-Indium-Gallium’’ Thèse de Doctorat, Université de Lille1, Année 2012.
- [32] Lydie Ribeaucourt ‘‘Electrodépôt et sélénisation d’alliages Cu-In-Ga en vue de la synthèse de couches minces de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ pour cellules solaires’’ Thèse de Doctorat, Université Pierre Et Marie Curie, Année 2011.
- [33] L. Béchiri, M. Benabdeslem, N. Benslim, L. Mahdjoubi , G. Nouet ‘‘Morphologie et Propriétés Physiques des Couches Minces (300°A) Co-évaporées de CuInSe_2 ’’ Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 33-36.
- [34] Kenza Kamli ‘‘Elaboration et caractérisations physico-chimique des couches minces de sulfure d’étain par spray ultrasonique: Effet des sources d’étain’’ Mémoire de magister, Université Mohamed Khider-Biskra, Année 2013

C h a p i t r e I V

Etude des cellules solaires à multijonctions

Sommaire

I. Introduction.....	95
II. Concept d'une cellule solaire multijonctions	95
II.1. Limite théorique des cellules solaires simples	95
II.2. Principe de base des cellules multijonctions	97
II.3. Quelques dates	99
III. Configuration des cellules multijonctions	100
III.1. Concept basé sur le découpage du spectre solaire	100
III.2. Concept basé sur l'empilement mécanique de cellules	101
III.3. Concept basé sur la croissance monolithique de cellules	103
IV. Jonction tunnel dans le concept monolithique	105
IV.1. Effet tunnel interbande	107
IV.2. Modèle NLBBT: Champ électrique non uniforme	108
IV.3. Caractéristique I(V) d'une jonction tunnel	109
V. Défis technologique d'une cellule multijonction monolithique.....	111
V.1. Choix de la combinaison optimale des gaps des sous cellules.....	111
V.2. Constante du réseau	113
V.3. Coefficient de la dilatation thermique	114
V.4. Critère imposé sur la jonction tunnel	115
VI. Conclusion	115
Références bibliographiques	116

I. Introduction

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques sont constituées d'une simple jonction PN. Néanmoins le rendement de cette cellule est limité, parce que seulement une faible partie du spectre solaire est absorbée et que les photons d'énergie très grande par rapport au gap du matériau génèrent des électrons chauds qui vont perdre leur énergie en excès sous forme de chaleur.

L'approche d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, permet de limiter les pertes d'absorption et d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi totalité avec des rendements de conversion très importants.

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques notions générales sur des cellules multijonctions. En premier temps, nous allons parler sur le rendement théorique maximum d'une cellule solaire conventionnelle limité par le modèle Shockley-Queisser et la nécessité d'adopter l'approche d'un système multijonctions.

En suite, nous allons décrire le principe de base des cellules multijonctions, et les différentes configurations de cette approche, ainsi que une aperçu général sur la jonction tunnel et son rôle principal dans la configuration monolithique. Enfin, nous allons donner quelques défis de la technologie d'une cellule solaire multijonction monolithique.

II. Concept d'une cellule solaire multijonctions

II.1. Limite théorique des cellules solaires simples

La limite théorique maximum du rendement d'une cellule solaire d'une seule jonction PN, est généralement décrite par la limite Shockley-Queisser. Ce modèle est également connu sous le nom limite de bilan détaillé (Detailed Balance). Il a été calculé par William Shockley et Hans J. Queisser en 1961, ce qui donne un rendement maximal de 30% à 1,1eV pour une cellule solaire en Silicium. [1]

Récemment, plusieurs groupes ont étudié les performances limites des cellules solaires, comme les travaux de M. Green et de H. Kiess, ainsi qu'une estimation pour la jonction p-i-n fait par F.Meillaud et al. [2]

II.1.1. Limite théorique du courant de court circuit I_{cc}

La limite de I_{cc} est obtenue avec l'hypothèse que tout photon ayant une énergie supérieure au gap de matériau absorbeur (E_g) est absorbé et crée une paire électron-trou, et que l'efficacité de collection des porteurs est 100%. Autrement dit, I_{cc} est calculé, pour chaque E_g , par l'intégration mathématique du flux de photons du spectre solaire entre E_g et l'infini.

$$I_{cc} = q \int_{\lambda_g}^{\infty} N_{ph}(\lambda) d\lambda = q \int_{E_g}^{\infty} N_{ph}(E) dE \quad (4.1)$$

Où λ_g est la longueur d'onde correspondant à E_g , N_{ph} est le flux de photons, qui est exprimé en $[m^{-2}.s^{-1}.nm^{-1}]$ s'il est en fonction de longueur d'onde, ou $[m^{-2}.s^{-1}.eV^{-1}]$ s'il est en fonction de l'énergie. [2]

II.1.2. Limite théorique de la tension de circuit ouvert V_{co}

Selon, l'expression du courant délivré sur une charge par une cellule solaire éclairée définie dans le premier chapitre par équation (1.12), et sachant que ($I(V_{co}) = 0$), nous avons:

$$V_{co} = nkT \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (4.2)$$

Où I_s est la densité de courant de saturation, définie dans le même chapitre par équation (1.13), mais il peut être simplifié par :

$$I_s = I_{s0} \exp \left(\frac{-E_g}{nkT} \right) \quad (4.3)$$

Où I_{s0} égale $1,5.10^8 [mA/cm^2]$ pour le modèle de Green, et $4.105 E_g^2 [mA/cm^2]$ pour le modèle de Kiess, et $5.10^4 [mA/cm^2]$ estimation de F.Meillaud pour la jonction p-i-n. [2]

II.1.3. Limite théorique du facteur de forme FF

La limite théorique de FF est calculée par l'équation (1.16) définie dans le premier chapitre. Le I_{max} et V_{max} sont obtenus par le calcul du point maximal dans la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire sous illumination. [2]

II.1.4. Limite du rendement η

En utilisant l'équation (1.22) définie dans le premier chapitre, nous pouvons déduire la limite théorique du rendement en fonction de E_g . Fig.4.1 montre les limites théoriques du rendement optimal en fonction de gap pour les trois modèles Green, Kiess et qu'une estimation de F.Meillaud pour la jonction p-i-n. [2]

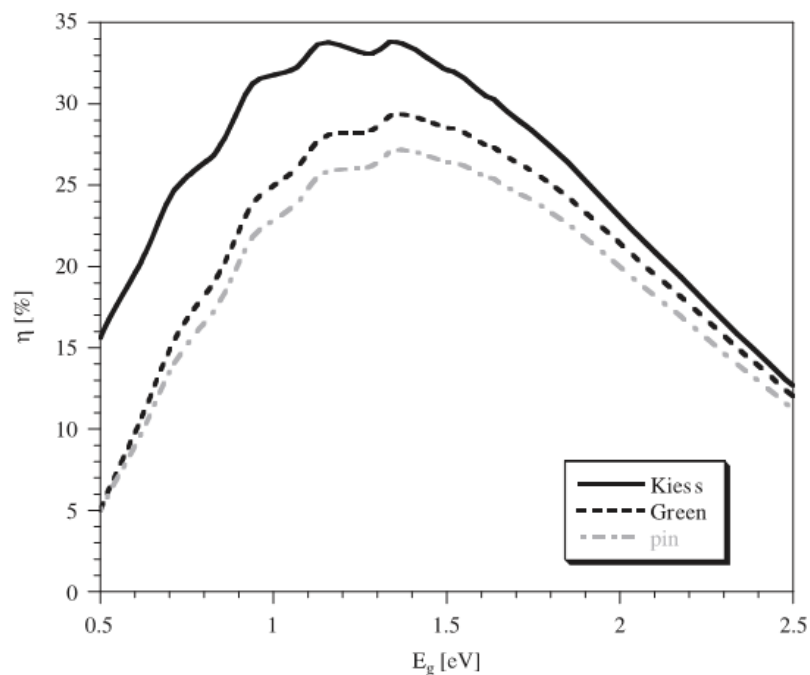


Fig.4.1. Rendement théorique maximum d'une jonction pn et p-i-n calculé par les modèles de Green, Kiess. [2]

Les cellules solaires à simple jonction atteignent des rendements assez proches de la limite de Shockley-Queisser, avec 26.7% en Silicium monocristallin et 29.1% en GaAs. [3]

Afin de dépasser cette limite, un nouveau concept des cellules solaires consiste de subdiviser le large de solaire spectre en différentes gammes d'énergie et de convertir chaque gamme avec une cellule d'une bande interdite bien adaptée.

II.2. Principe de base des cellules multijonctions

Depuis le début du développement des cellules photovoltaïques, la quête permanente est d'augmenter le rendement et de réduire les coûts de conversion. Jusqu'à présent, l'approche de réalisation des cellules en tandem ou autrement dit "les cellules multijonctions" démontre le meilleur rendement de conversion d'énergie. [4]

L'objectif des cellules multijonctions est la réduction des deux principales causes de perte de rendement des cellules d'une simple jonction, les pertes résultant du non absorption des photons d'énergie $h\nu < E_g$ et les pertes thermiques associées à la thermalisation des photoporteurs chauds créés par les photons d'énergie $h\nu > E_g$. [5]

L'utilisation d'un empilement de cellules solaires (sous cellules) dans une structure de cellules multijonctions permet de diviser le spectre solaire sur de plus petites sections, où le gap des couches actives décroît successivement à mesure que le rayonnement solaire pénètre dans la structure si bien que chaque cellule absorbe une partie du spectre solaire, comme illustré à la Fig.4.2. [5]

Les cellules supérieures, à grands gaps, absorbent et convertissent les photons de haute énergie, et transmettent les photons de basse énergie aux cellules sous jacentes de gaps plus petits. Ces dernières absorbent alors et convertissent les photons de plus basse énergie. De cette façon, Les pertes par thermalisation sont ainsi minimisées car chaque cellule convertit des photons d'énergie $h\nu \sim E_g$. [6]

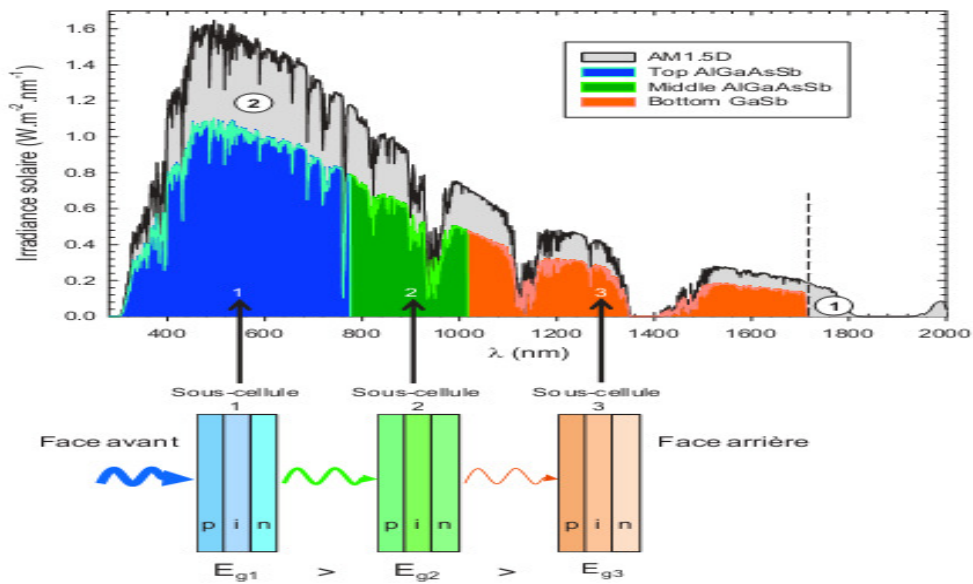


Fig.4.2. Schéma de principe d'une cellule multijonctions.

Fig.4.2 présente le spectre d'irradiance solaire AM1.5D en fonction de la longueur d'onde avec un exemple d'absorption des sous cellules qui constitueraient une cellule photovoltaïque triple jonctions. Les énergies de gap des trois sous cellules qui illustrent cette figure sont $E_{g1}=1,64\text{eV}$, $E_{g2}=1,22\text{eV}$ et $E_{g3}=0,726\text{eV}$. [8]

Le fait d'utiliser des cellules multijonctions permet une plus grande utilisation du spectre solaire. De plus, chaque jonction travaille avec son rendement optimum, absorbant la plage spectrale qui lui est propre, et de ces deux faits, le rendement des cellules photovoltaïques est amélioré. [7]

Dans la zone ① de la Fig.4.2; Les photons d'énergie inférieure au plus petit des gaps des sous cellules ne sont pas absorbés et donc ils sont perdus par transmission.

Dans la zone ② de la Fig.4.2; Un photon absorbé génère en principe une seule paire électron-trou, lorsque l'énergie apportée par un photon est supérieure à l'énergie de gap, l'excès d'énergie est perdue sous forme de chaleur au réseau cristallin, ceci présente les pertes par thermalisation. [8]

II.3. Quelques dates

Jusqu'à présent, l'approche de réalisation des cellules solaires multijonctions démontre le meilleur rendement de conversion d'énergie. La solution proposée en 1955 par E.D Jackson, puis brevetée en Amérique par Wolfen en 1960, donna naissance au concept des cellules à multijonctions [6]. Mais le concept n'a pas été appliqué à cette époque compte tenu de la difficulté rencontrée dans la technique de la croissance des semiconducteurs. [9]

Cependant, les premières démonstrations expérimentales du concept furent réalisées en 1978 par Moon et al, l'idée de ce travail à été basé sur l'utilisation de systèmes optiques afin de répartir le spectre solaire sur plusieurs cellules en fonction de la longueur d'onde.

Après le développement de la technique de croissance des couches de semiconducteur par épitaxie, La première cellule solaire multijonction à base de a-Si:H a été préparée par Hamakawa et al en 1981; il s'agit d'une cellule photovoltaïque p-i-n déposée par plasma avec un rendement de conversion autour de 4% ont été obtenu. [10]

La tentative suivante pour développer des cellules solaires multijonction a été destinée à des applications spatiales, des cellules multijonctions en semiconducteurs III-V ont été réalisées. En 1982, un rendement de 15.7% est obtenu pour une cellule tandem de structure AlGaAs/GaAs réalisée par Varian et al. [9]

En 1990, un très bon rendement de 27.3% a été obtenu pour une cellule solaire tandem de GaAs/GaAs sans concentrateur et 34.2% pour la même structure avec concentrateur. [9]

En 1996, la société United Solar Systems a rapporté des cellules solaires tandem a-Si:H/a-Si:H avec un rendement initial de 11.4% et un rendement stabilisé de 10.1% par Platz et al. [10]

En 1998, un rendement initial de 13% et un rendement stabilisé de 11.5% ont été rapportées par Saito et al, employant des cellules solaires a-Si/ μ c-Si où presque seulement la cellule supérieure est responsable de la dégradation de cette structure empilée. [10]

III. Configuration des cellules multijonctions

Comme nous l'avons dit plus haut, une structure d'une cellule multijonction peut donc être assimilée à un empilement de sous cellules solaires, Chaque cellule reçoit ainsi la partie du spectre solaire adaptée aux matériaux qui la constituent. Au cours des années, différents configuration de fabrication de cellules multijonctions ont été étudiés dans ce domaine: (i) Le découpage du spectre solaire; (ii) L'empilement mécanique de cellules; (iii) La croissance monolithique de jonctions. [7]

III.1. Concept basé sur le découpage du spectre solaire

Cette approche est considérée comme l'approche la plus simple dans sa conception, elle est basée sur l'utilisation de systèmes optiques (prismes ou miroirs dichroïques) permettant la répartition spatiale de la lumière sur plusieurs cellules en fonction de la longueur d'onde. Chaque cellule reçoit ainsi la partie du spectre solaire adaptée aux matériaux (gap) qui la constituent. Le schéma de principe de cette méthode est présenté sur Fig.4.3. [11]

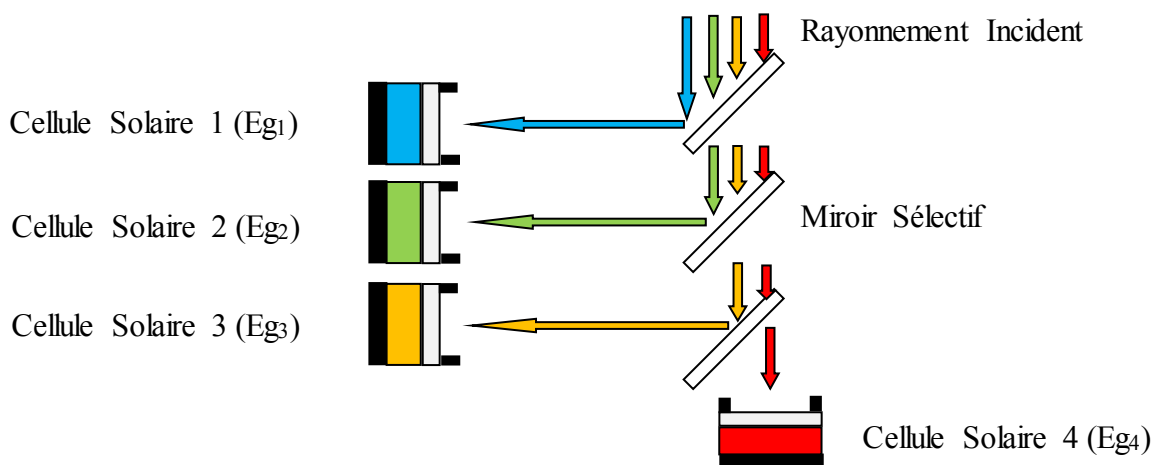


Fig.4.3. Association de plusieurs cellules solaires pour une conversion multispectrale.

Le miroir permet ainsi une meilleure adaptation du spectre solaire au système de cellules utilisées, la connections des cellules étant indépendante. Le contrôle de la fréquence de la lumière se fait à l'aide de filtres sélectifs. L'alignement, l'efficacité du miroir, le câblage individuel de chaque cellule rend cette approche indésirable, notamment lorsque la puissance électrique délivrée augmente. [11]

III.2. Concept basé sur l'empilement mécanique de cellules

Le principe de cette méthode consiste à construire un empilement mécanique de cellules placées sur le même trajet optique mais chaque cellule devient électriquement isolée des autres.

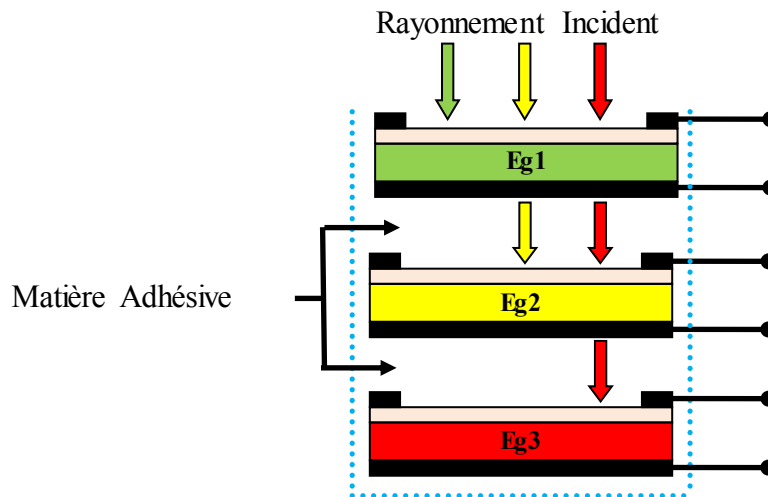


Fig.4.4. Schéma de principe d'empilement mécanique des cellules solaires ($E_{g1} > E_{g2} > E_{g3}$).

Fig.4.4 présente le schéma de principe d'un empilement mécanique de cellules multijonctions. Pour séparer les cellules, on utilise une matière adhésive (matériau isolant) par exemple: le verre, le plastique ou SiN_x qui assure une bonne isolation électrique ainsi qu'un bon couplage optique et thermique entre les sous cellules. [11]

Le gros avantage de ce concept est de pouvoir utiliser des cellules de natures cristallographiques très différentes sans contrainte sur les paramètres de maille des matériaux. Autre avantage, il est possible de connecter séparément chaque sous cellule et de pouvoir ainsi les associer à volonté, en série ou en parallèle, pour optimiser le comportement électrique de la cellule et son rendement. [8]

Avec ce type de montage, il est possible de faire de l'ingénierie de diodes.

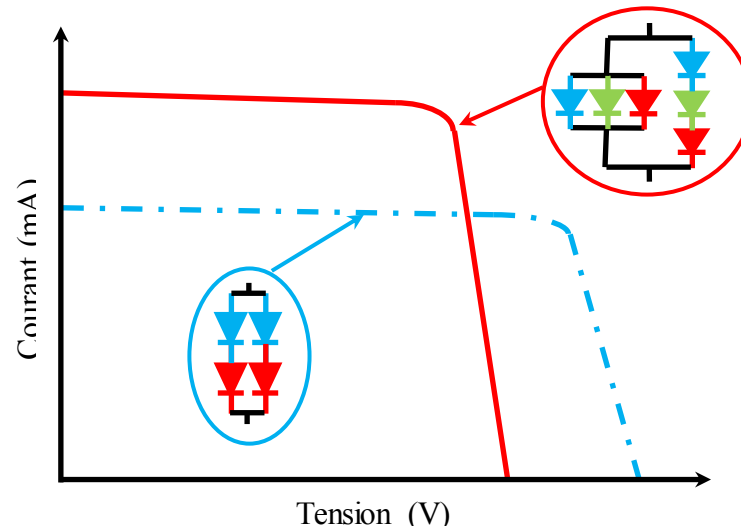


Fig.4.5. Caractéristique $I(V)$ obtenues pour deux configurations électriques de cellules multijonctions.

Fig.4.5 est une illustration de ce que l'on peut faire lorsqu'on est libre de mettre les cellules en série et/ou en parallèle. La ligne pointillée représente la caractéristique de quatre cellules, deux fois deux diodes en série branchées en parallèle. La ligne continue représente la caractéristique de six cellules, trois diodes en parallèle et trois en série, le tout branché en parallèle. [7]

Selon le câblage, il est possible d'augmenter la densité de courant de court circuit ou la tension de circuit ouvert du système électrique en jouant sur le nombre de photodiodes et sur leur assemblage série et/ou parallèle. [7]

La difficulté principale de la mise en œuvre est l'alignement des grilles de chaque sous cellule. Celles-ci doivent en effet être parfaitement à l'aplomb les unes des autres afin de limiter l'ombrage. Cet empilement mécanique présente également l'inconvénient de ne pas assurer une bonne dissipation thermique du composant à cause de l'air présent dans l'espace entre les sous cellules. [8]

La connexion et l'isolation électrique entre les couches ajoutent une étape supplémentaire à sa technique de fabrication (interconnexions électriques, le couplage optique et l'emboîtement de la cellule) et augmente les pertes d'ombre. [8]

III.3. Concept basé sur la croissance monolithique de cellules

Le principe de ce concept de ces cellules est le même que celui des structures à empilement mécanique, par la mise en série et sur le même trajet optique une ensemble des sous cellules constituées de matériaux à d'énergie de bande interdite différentes. Chaque cellule jouant le rôle d'un filtre pour la cellule suivante. [13]

La différence fondamentale avec les structures à empilement mécanique tient au fait que les sous cellules sont toutes épitaxiées de façon monolithique sur un seul substrat, ce qui impose que les sous cellules soient toutes en accord de maille (même polarité) avec le substrat. [14]

La deuxième contrainte imposée par cette approche est liée à la difficulté d'extraction des électrons photogénérés, qui pour être collectés sur les deux contacts doivent traverser tout l'empilement en franchissant plusieurs barrières de potentiel, ce qui implique la réalisation de région conductrice avec contact ohmique entre chacune des jonctions, assurer une bonne connexion électrique entre les sous cellules. [14]

Ces liaisons sont assurées généralement par des jonctions tunnel de haute qualité, qui agissent comme des diodes en polarité inverse, permettant l'inversion de polarité N/P nécessaire au passage d'une sous cellule à l'autre. [11]

Le principe d'un empilement monolithique de cellules multijonction est illustré par Fig.4.6, ainsi que le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à triple jonctions avec interconnexion des diodes Tunnel.

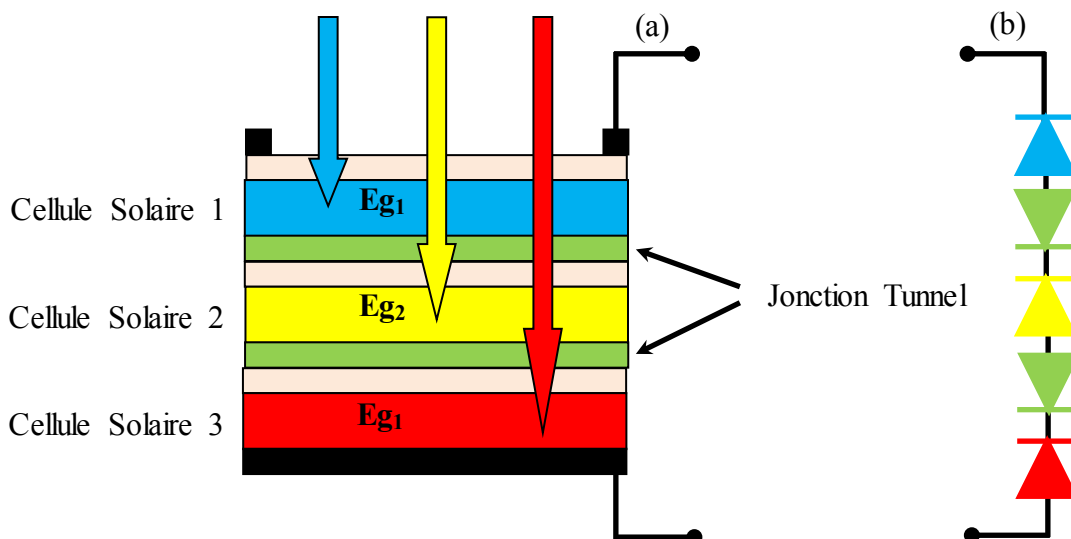


Fig.4.6. (a) Schéma synoptique d'une cellule solaire monolithique. (b) Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire tripjonctions avec interconnexion des diodes Tunnel.

III.3.1. Caractéristique I(V) d'une cellule tandem monolithique

Fig.4.7 illustre la caractéristique I(V) d'une cellule tandem et des deux sous cellules constituant la structure.

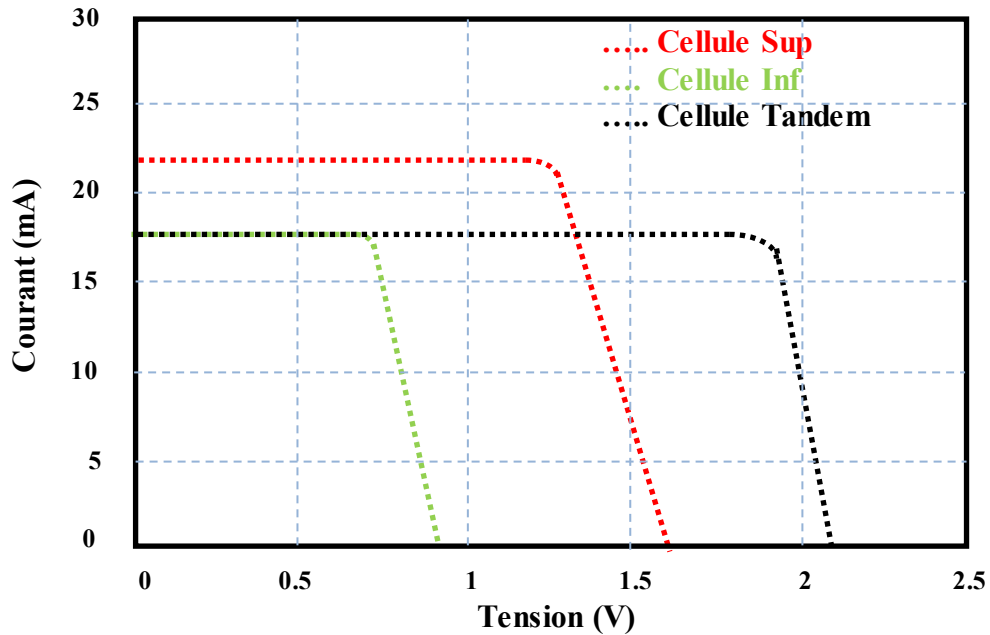


Fig.4.7. Caractéristiques I(V) d'une cellule solaire supérieure, inférieure et tandem.

D'après cette caractéristique, nous utilisons les notations suivantes :

(i) $I_{cc\ Tandem}$, $V_{co\ Tandem}$: Le courant de court circuit et la tension de circuit ouvert de la cellule solaire multijonction.

(ii) $I_{cc\ Sup}$, $V_{co\ Sup}$: Le courant de court circuit et la tension de circuit ouvert de la cellule solaire supérieure.

(iii) $I_{cc\ Inf}$, $V_{co\ Inf}$: Le courant de court circuit et la tension de circuit ouvert de la cellule solaire inférieure. [12]

Le courant de court circuit de la cellule tandem sera donné par la plus petite valeur des deux courants de court circuit des cellules solaires supérieure et inférieure. [12]

$$I_{cc\ Tandem} \approx \text{Min} \{ I_{cc\ Sup}, I_{cc\ Inf} \} \approx I_{cc\ Inf} \quad (4.4)$$

Tandis que la tension en circuit ouvert de la cellule solaire tandem est égale la somme des tensions en circuit ouvert des deux cellules supérieure, et inférieure: [12]

$$V_{co\ Tandem} = V_{co\ Sup} + V_{co\ Inf} \quad (4.5)$$

Le courant de court circuit de cellule solaire dépend généralement par les propriétés électriques et optiques de sa couche absorbante, notamment son gap et son coefficient d'absorption mais aussi son épaisseur. Ce qu'implique plus la cellule est mince, plus la transmission sera importante et sa couche absorbante est incapable d'absorber tous les photons incidents, une partie de la lumière sera transmise à travers cette cellule. [11]

Par conséquent, dans une configuration multijonctions, l'épaisseur de la couche absorbante de cellule supérieure a un important rôle d'améliorer le rendement électrique de structure tandem. Comme le courant de court circuit de la cellule tandem est limité par le plus petit des courants des deux sous cellules. Un bon choix de l'épaisseur de la cellule supérieure permet assurer une égalité des courants de court circuit des sous cellules donné par l'équation (4.6), ce qu'on appelle 'Current Matching', cela conduit à une optimisation des performances de la cellule tandem : [11]

$$I_{cc \text{ Tandem}} = I_{cc \text{ Sup}} = I_{cc \text{ Inf}} \quad (4.6)$$

Le principal avantage de l'approche monolithique, par rapport à l'approche mécanique, est assuré un meilleur contact entre les différentes jonctions, ce qui assure une meilleure dissipation thermique de l'ensemble. [8]

Un autre avantage de ces structures est la réduction du nombre de contacts et soudures qui sont souvent à l'origine de défaillances dans les composants. La diminution du nombre de contacts contribue ainsi à augmenter la fiabilité de la cellule. [8]

La conception de ce type de système est essentiellement le sujet de notre travail qui consiste une étude par simulation numérique d'une cellule tandem monolithique à base de CIGS, afin d'optimiser leur performances.

IV. Jonction tunnel dans le concept monolithique

Lorsque la région de type P de la cellule supérieure serait directement lié à la région de type N de la cellule inférieure, une jonction PN parasite avec une direction opposée aux autres apparaît entre les deux cellules de la structure multijonction. Par conséquent, une accumulation des porteurs se produirait à l'interface des sous cellules adjacentes provoquant alors une distorsion du champ électrique dans la structure et du coup une baisse du potentiel de diffusion. Il en résulte ainsi une dégradation des performances de la cellule multijonction (Fig.4.8 (a)). [11]

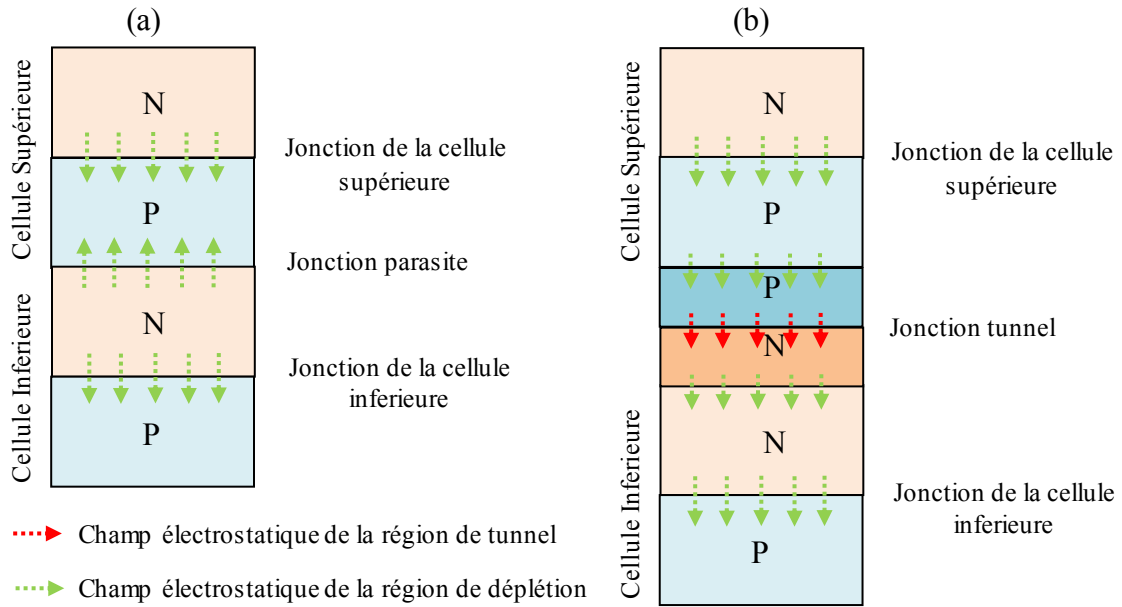


Fig.4.8. Cellule multijonction de configuration monolithique (a) sans jonctions tunnel (b) avec jonction tunnel. [15]

Afin de réduire cet effet, L'interconnexion entre les deux cellules de la structure monolithique est assurée par une jonction tunnel, déposer par la technique d'épitaxie. La possibilité de création de cette jonction est apparue en 1958, quand le scientifique Japonais Leo Esaki découvrit la possibilité d'augmenter la concentration des impuretés dans les jonctions de $1:10^7$ à $1000:10^7$ atomes dans le semiconducteur.

Cette augmentation dans la concentration des impuretés permet d'avoir une résistance négative dans la caractéristique de la diode, au niveau des bandes d'énergies. La bande interdite se rétrécit et le niveau de Fermi va se trouver alors dans les bandes elles mêmes, à cause du dopage élevé du matériau. Cela permet aux électrons de percer un tunnel à travers la barrière, sans changement dans leur énergie (Fig.4.8 (b)).

Afin d'éviter la réduction des performances de la cellule multijonction, la jonction tunnel doit être transparente aux longueurs d'onde absorbées par la cellule inférieure, ce que on appel la connexion optique. [15]

IV.1. Effet tunnel interbande

Le phénomène de l'effet tunnel a été découvert en 1927 par Oppenheimer. Selon la théorie quantique, l'effet tunnel est le passage d'un électron à travers la jonction PN, même s'il n'a pas l'énergie nécessaire pour la traverser.

Cette contradiction s'explique par le fait que dans une jonction PN fortement dopée entre deux semiconducteurs dégénérés, la bande interdite se rétrécit et le niveau de Fermi va se trouver alors dans les bandes elles mêmes, ce qui permet d'obtenir un diagramme de bande à l'équilibre avec un recouvrement ΔE en énergie des bandes de valence et de la bande de conduction (Fig.4.9). Par conséquent, les électrons peuvent facilement traverser la bande interdite par effet tunnel.

Dans les composants semiconducteurs, le phénomène de l'effet tunnel peut se produire dans une même bande; par exemple dans la bande de conduction à l'hétérojonction entre deux matériaux présentant un désalignement de bande (offset), comme il peut aussi se produire entre les bandes différentes. [16, 17]

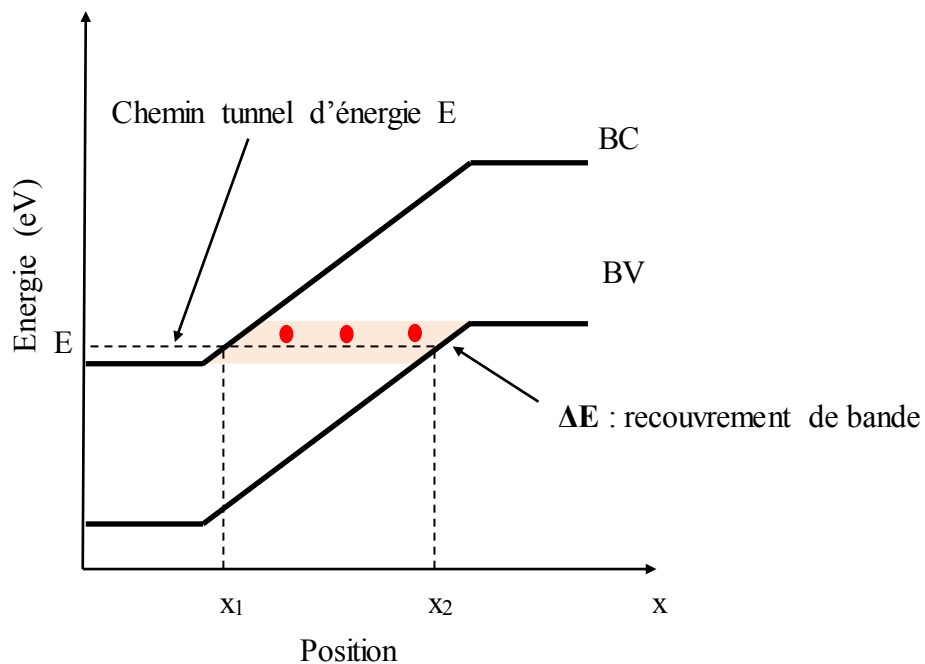


Fig.4.9. Vision semiclassique de l'effet tunnel interbande sur un diagramme de bande. [18]

IV.2. Modèle NLBBT: Champ électrique non uniforme

Plusieurs modèles conçus pour d'effet tunnel interbande semiclassiques sont disponibles dans la littérature, permettent de calculer la densité de courant tunnel en fonction de la tension. Nous présentons ici le modèle le plus utilisé dans les logiciels TCAD commerciaux Silvaco Atlas et Sentaurus Devices connu sous le nom NLBBT (Non Local Band to Band Tunneling). Le terme Non Local vient de la prise en compte de la non uniformité du champ électrique sur l'intégralité du chemin tunnel. [18]

Fig.4.10 présente une jonction PN polarisée en inverse, le processus d'effet tunnel interbande est supposé comme un transfert d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction à travers la bande interdite.

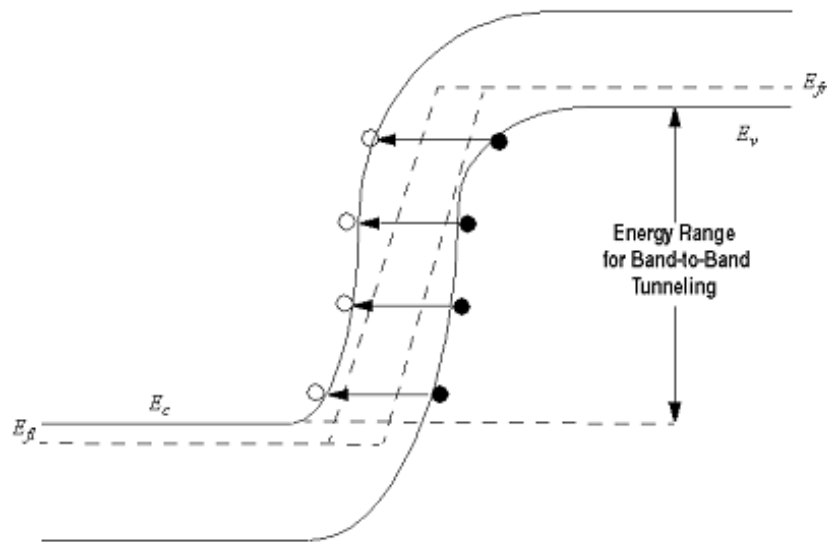


Fig.4.10. Schéma de Non Local Band to Band en polarisation inverse.

Le courant net par unité de surface pour un électron avec une énergie longitudinale E et une énergie transversale E_T est donné par l'expression suivante:

$$J(E) = \frac{q}{\pi\hbar} \iint T(E) [f_l(E + E_T) - f_r(E + E_T)] \rho(E_T) dE dE_T \quad (4.7)$$

Où $T(E)$ est la probabilité de transmission par effet tunnel d'un électron d'énergie E , E_T est la densité d'états bidimensionnelle correspondant aux deux composantes transversales du vecteur d'onde, f_l et f_r sont les fonctions de Fermi-Dirac sur les côtés gauche et droite. [19]

IV.3. Caractéristique I(V) d'une jonction tunnel

La caractéristique I(V) de la jonction tunnel est très important car il explique pourquoi les jonctions tunnel peuvent être utilisées pour une connexion à faible résistance électrique entre deux jonctions PN.

Fig.4.11 présente la caractéristique I(V) d'une jonction tunnel, elle peut se diviser en trois régions. En premier région, le courant augmente à partir des valeurs négatives jusqu'à un pic I_p pour une augmentation relativement faible de la tension.

En deuxième région, le courant diminue, même si la tension augmente, jusqu'à un minimum relatif appelé "vallée" correspond à la tension V_v , cette région est appelée une zone de résistance négative car elle agit comme si la résistance diminuait avec l'augmentation de la tension.

En troisième région, le courant recommence à augmenter avec l'augmentation de la tension, cette région correspond à la caractéristique de la diode I(V) habituelle. [17, 20]

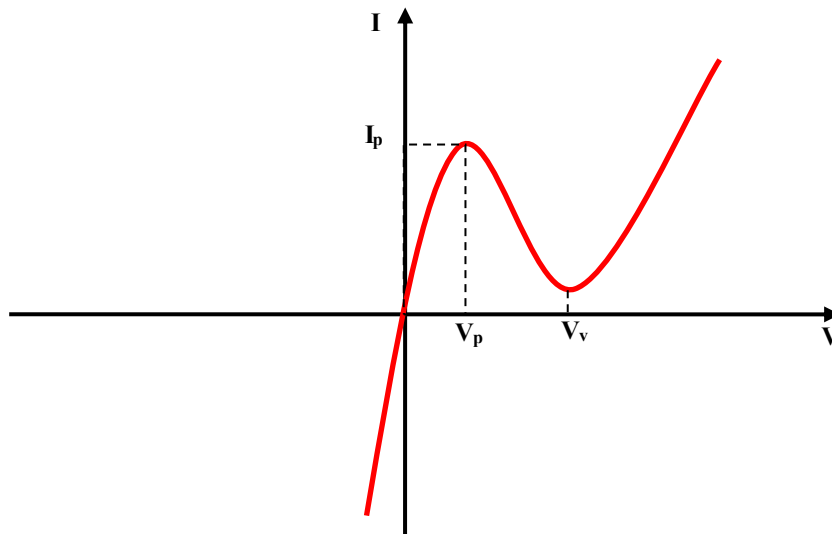


Fig.4.11. Caractéristique I(V) d'une jonction tunnel.

La caractéristique I(V) d'une jonction tunnel se comprend aisément en analysant l'évolution des diagrammes de bande lorsqu'un potentiel V est appliqué aux bornes de la jonction.

(i) Lorsque la jonction est polarisée en inverse ($V < 0$), La barrière de potentiel devient plus fine, donc la probabilité d'effet tunnel augmente. Le courant ($I < 0$) important va donc traverser la jonction tunnel à partir des états occupés de la région P vers les états libres de la région N (Fig.4.12). [15]

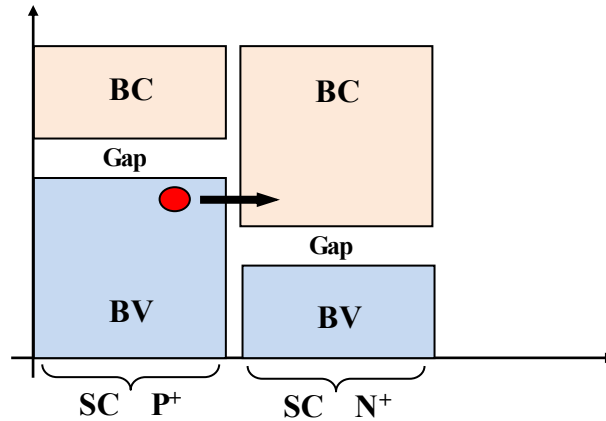


Fig.4.12. Diagramme de bande de la jonction tunnel en polarisation inverse.

(ii) Lorsque la jonction est polarisée en directe ($0 < V < V_v$), la tension externe force certains électrons à traverser de la bande de conduction du type N à la bande valence du type P par effet tunnel, il en résulte donc un courant proportionnel à la tension jusqu'à un pic I_p correspond à la tension V_p (Fig.4.13). [15]

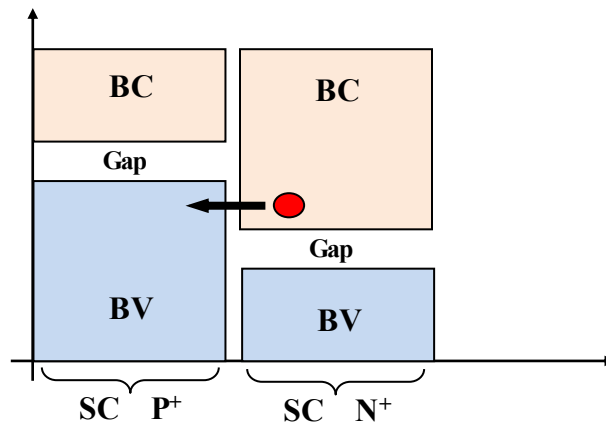


Fig.4.13. Diagramme de bande de la jonction tunnel en polarisation directe.

Par la suite, à une faible augmentation de tension appliquée ($V > V_p$), la barrière de potentiel devient de plus en plus large et on aura donc une décroissance du courant, ce qui se traduit par une diminution de la probabilité d'effet tunnel. [15]

(iv) Lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension vallée ($V > V_v$), on retrouve un comportement de jonction PN classique, où les électrons passent vers la barrière de potentiel par diffusion (Fig.4.14). [15]

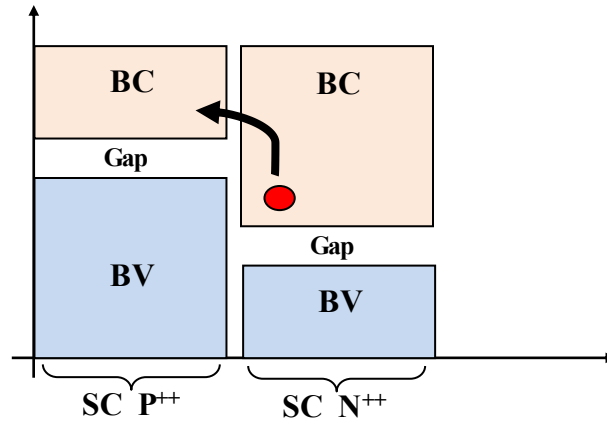


Fig.4.14. Diagramme de bande de la jonction tunnel en jonction PN.

En équilibre thermodynamique ($V = 0$), La probabilité d'effet tunnel n'est pas négligeable, les échanges de part et d'autre dus à l'excitation thermique arrivent à un équilibre presque instantanément et aucun courant ne s'établit dans le semiconducteur. [17, 20]

V. Défis technologique d'une cellule multijonction monolithique

Les performances d'une cellule multijonction monolithique sont fortement dépendantes de la qualité structurale, optique et électronique des matériaux utilisés. Quatre facteurs peuvent limiter les performances de cette approche.

V.1. Choix de la combinaison optimale des gaps des sous-cellules

Comme nous l'avons dit plus haut, l'utilisation d'un empilement des sous cellules dans une structure de cellules multijonctions est dans le but d'exploiter la quasi-totalité de spectre solaire, afin d'optimiser le rendement photovoltaïque. De façon que les cellules supérieures, à grands gaps, absorbent et convertissent les photons de haute énergie, et transmettent les photons de basse énergie aux cellules sous jacentes de gaps plus petits. Ces dernières absorbent alors et convertissent les photons de plus basse énergie.

Alors un bon choix de la combinaison optimale des gaps des sous cellules composant une cellule multijonctions, permet d'attendre le meilleur rendement possible de la structure multijonction.

Dans ce cadre, le modèle de Shockley-Queisser a également été étendu aux cellules multijonctions, il permet de déduire la combinaison optimale des gaps des sous cellules composant une cellule multijonctions. Il s'agit ici d'une limite théorique haute, en raison d'hypothèses fortement simplificatrices de la théorie de Shockley-Queisser. [7]

Tableau.4.1. Limites théoriques radiatives des rendements de cellules multijonctions sous un éclairement 1 et 1000 soleils. [7]

Nb de jonctions	J1 (eV)	J2 (eV)	J3 (eV)	J4 (eV)	J5 (eV)	J6 (eV)	Rendement 1 soleil	Rendement 1000 soleil
1	1.12	/					33.3%	40.8%
2	1.57	0.93	/				45.3%	54.3%
3	1.74	1.17	0.69	/			50.9%	61.6%
4	1.88	1.38	0.97	0.53	/		54.1%	65.7%
5	2.02	1.54	1.19	0.81	0.53	/	56.6%	67.4%
6	2.13	1.68	1.37	1.07	0.78	0.51	58.0%	69.7%
∞	/						68.2%	86,8%

Dans le Tableau.4.1 nous présentons les combinaisons optimales de gaps calculées à partir du ce modèle développé pour les cellules multijonctions, en fonction du nombre de jonctions des sous cellules, ainsi que les rendements maximum atteignent sous une illumination de 1 et 1000soleils.

Théoriquement, on peut utiliser un nombre illimité de cellules dans la conception des cellules solaires à multijonctions. Mais dans la réalité, le processus de conception et de fabrication de ce composant se complique exponentiellement avec le nombre des cellules à ajouter. Cependant, des réalisations pratiques arrivent jusqu'à trois ou quatre cellules. [9]

La famille des matériaux I-III-VI₂ permet naturellement la conception et la réalisation de cellules multijonctions. Il est possible en effet d'ajuster à la fois la largeur de la bande interdite et le paramètre de maille des semiconducteurs en changeant la composition d'alliages utilisant la substitution de l'Indium par le Gallium, et/ou du Sélénium par le Soufre, cela permet d'augmenter la largeur de la bande interdite entre 1,0 et 2,4eV en variant la composition de la solution solide Cu(In_{1-x}Ga_x)(Se_{1-y}Se_y)₂. [21]

V.2. Constante du réseau

Un autre défi pour cette approche est la possibilité de réaliser de bonnes épitaxies de l'ensemble des sous cellules constituant la structure de façon monolithique sur un seul substrat. Il faut cependant savoir qu'un désaccord de maille supérieur de 0,1% entre deux couches d'épitaxiées est reconnu comme la source principale de dégradation dans la cellule solaire durant son fonctionnement, et il peut générer la diffusion des impuretés indésirables et la création des centres de recombinaison pour les porteurs minoritaires.

Le paramètre de maille du substrat détermine la nature des matériaux utilisables, ce qui en limite les possibilités de choix des matériaux désignés pour fabriquer les différentes couches des cellules solaires multijonction. [11, 22]

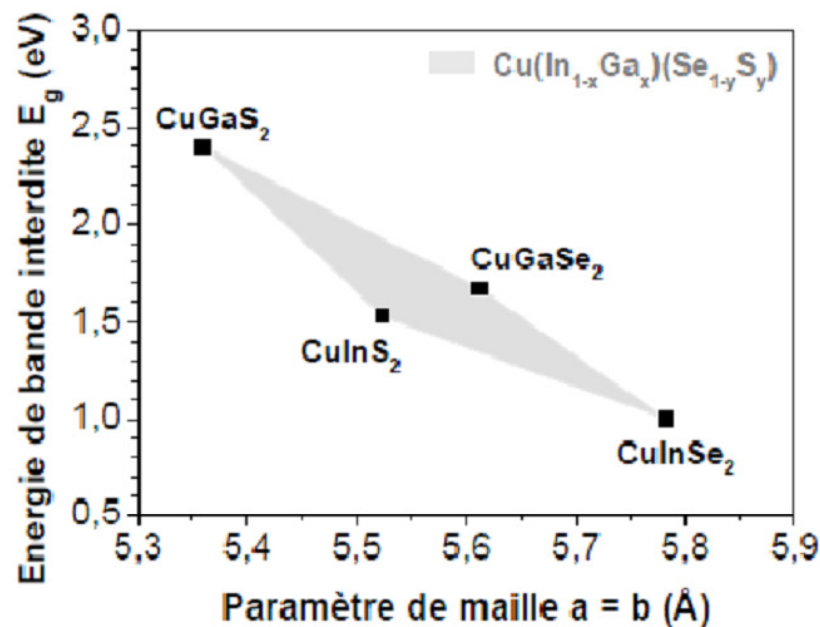


Fig.4.15. l'évolution de la largeur de bande interdite en fonction du paramètre de maille des composés ternaires CuInSe_2 , CuGaSe_2 , CuInS_2 et CuGaS_2 .

Le diagramme présenté sur la Fig.4.15, représente l'évolution de la largeur de bande interdite, en fonction du paramètre de maille "a" pour les composés ternaires CuInSe_2 , CuGaSe_2 , CuInS_2 , CuGaS_2 . Le polygone gris représente toutes les valeurs de bande interdites accessibles par formation de l'alliage quaternaire $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{1-y}\text{S}_y)$. [23]

V.3. Coefficient de la dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique (CTE) est défini comme l'augmentation relative du volume d'un système lorsque l'on fait varier la température.

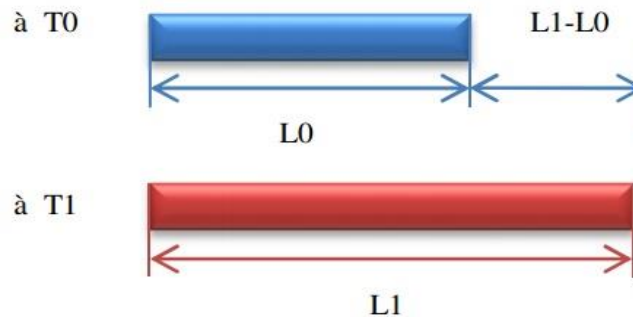


Fig.4.16. Schéma descriptif du phénomène de la dilatation thermique.

La valeur de la dilatation thermique ΔL est donnée par la relation suivante : [9]

$$L_1 - L_0 = \alpha \times L_0 \times (T_1 - T_0) \quad (4.8)$$

$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T \Rightarrow \alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \times \Delta T} \quad (4.9)$$

Avec : ΔL (mm) est la dilatation due à une variation de température, α (1/K ou 1/°C) est le coefficient de dilatation thermique linéaire, L (mm) est la longueur caractéristique, ΔT (K ou °C) est la différence de température (température initiale - température finale).

Considérons maintenant un assemblage de deux matériaux, de faible épaisseur, dont les coefficients de dilatation thermique sont différents. Lors d'une élévation de température, chacun de ces matériaux subit donc des contraintes, selon son propre coefficient de dilatation thermique.

Ces contraintes peuvent être responsables de plusieurs types de problème, comme la mauvaise adhésion d'une couche ou la forte courbure d'une plaquette suite à un dépôt. Elles peuvent également entraîner la modification des caractéristiques d'une couche telle que sa résistivité électrique ou sa capacité à propager des fissures par fatigue. [24]

V.4. Critère imposé sur la jonction tunnel

Les cellules solaires multijonctions d'une configuration monolithique nécessitent des jonctions tunnel afin d'assurer un très bon couplage optique et électrique entre les sous-cellules de la structure monolithique, la jonction tunnel doit satisfaire aux conditions suivantes :

(i) Les matériaux des jonctions tunnels doivent respecter la condition du désaccord de maille.

(ii) La cellule inférieure doit supporter la température élevée lors de la croissance épitaxiée de la jonction tunnel.

(iii) La jonction doit assurer un contact ohmique entre la cellule supérieure et la cellule inférieure, avec une faible résistance.

(iv) Elle doit être transparente aux photons d'énergie inférieure au gap du matériau traversé. [9]

VI. Conclusion

Ce chapitre présente quelques notions de base indispensables sur les cellules solaires à multijonctions. Nous avons abordé le principe de base d'un système multijonctions et la nécessité d'adopter cette approche. Des brèves définitions de différentes configurations multijonctions, ainsi que la jonction tunnel et son rôle primordial, pour assurer la connexion entre les sous-cellules dans la configuration monolithique ont été étudiés. Enfin, nous avons décrit quelques défis technologiques de cette configuration. Le prochain chapitre sera une brève présentation du simulateur Atlas-Silvaco.

Références bibliographiques

- [1] William Shockley, Hans J. Queisser ‘‘Detailed Balance Limit of Efficiency of PN Junction Solar Cells’’ J. Appl. Phys. 32, 510 (1961)
- [2] Walid El-Huni ‘‘Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments’’ Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, Année 2016.
- [3] Martin A. Green, all ‘‘Solar cell efficiency tables (Version 55)’’ Prog Photovolt Res Appl. 2020 ;28:3 – 15.
- [4] Sergii Tutashkonko ‘‘Elaboration du Ge mesoporeux et etude de ses proprietes physicochimiques en vue d'applications photovoltaïques’’ Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke Année 2011, disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/260147443>
- [5] Maachou Fatima ‘‘Analyse et optimisation des paramètres photovoltaïques dans les cellules solaires à simple jonction, tandem et triple-jonction en technologie couches minces de silicium’’ Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, Année 2018
- [6] Martin A.Green ‘‘Third Generation Photovoltaics Advanced Solar Energy Conversion’’ Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, University of South Wales, Sydney, Australia
- [7] Emmanuel Giudicelli ‘‘Evaluation d’une filière technologique de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-V)-Sb pour applications aux très fortes concentrations solaires’’ Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, Année 2016.
- [8] Alexandre Vauthelin ‘‘Fabrication et caractéristiques de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-Sb) pour applications sous fortes concentrations solaires’’ Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, Année 2018.
- [9] Abderrezek Mahfoud ‘‘Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement’’ Thèse de Doctorat, Université Sétif 1, Année 2016.
- [10] Bouguenna Ibrahim Farouk ‘‘Modélisation et Optimisation d’une Cellule Solaire Tandem a-Si/H-a-SiGe’’ Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf d’Oran, Année 2009.
- [11] Indranil Bhattacharya ‘‘Design and Modeling of Very High-Efficiency Multijunction Solar Cells’’ Thèse de Doctort, Florida State University, Année 2013.
- [12] Antonio Luque, Steven Hegedus ‘‘Handbook of Photovoltaic Science and Engineering’’ 2003.
- [13] Arto Aho ‘‘Dilute Nitride Multijunction Solar Cells Grown by Molecular Beam Epitaxy’’ Thèse de Doctorat, Tampere University of Technology, Année 2015.
- [14] Melissa Jane Archer ‘‘Multijunction Solar Cells on Epitaxial Templates’’ Thèse de Doctorat, California Institue Of Technology, Année 2008.

- [15] Michalopoulos, Panayiotis "A novel approach for the development and optimization of state-of-the-art photovoltaic devices using Silvaco" Thèse de Doctorat, Université Monterey, California, Année 2002.
- [16] Société Française de physique Anglet, France "École d'été sur l'effet tunnel dans les solides" Revue de Physique Appliquée Tome 5, Décembre 1970.
- [17] Site Web <https://www.radartutorial.eu/21.semiconductors/hll2.fr.html>
- [18] Kévin Louarn "Etude et réalisation de jonctions tunnel à base d'hétérostructures à semi-conducteurs III-V pour les cellules solaires multijonction à très haut rendement" Thèse de Doctorat, Université Toulouse 3, Année 2018.
- [19] Atlas User's Manual, Device simulation software", Silvaco International, California. 2012.
- [20] Site web https://fr.qwe.wiki/wiki/Multi-junction_solar_cell
- [21] Subba Ramaiah Kodigala "Thin Films and Nanostructures Cu(In Ga)Se₂ Based Thin Film Solar Cells" Solar Cell & LED Technology, Thousand Oaks, CA, 91360 and Department of Physics & Astronomy California State University Northridge, CA, 91330 Volume 35, 2010.
- [22] R. Planel "Propriétés optiques des semi-conducteurs et de leurs hétérostructures" disponible sur le site <http://sfo.edpsciences.org> ou <http://dx.doi.org/10.1051/sfo/1998009>
- [23] Djemai Mounira "Effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)" Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra, Année 2014.
- [24] Jean-Baptiste Sauveplane "Caractérisation thermomécanique de films métalliques déposés en couche mince pour la simulation de la fiabilité de composants microélectroniques de puissance" Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Année 2007.

Chapitre V

Présentation du simulateur Atlas-Silvaco

Sommaire

I. Introduction.....	119
II. Présentation du Silvaco	119
II.1. Outils interactifs	120
II.2. Outils de simulation	122
III. Atlas.....	123
III.1. Principe de fonctionnement du simulateur Atlas	124
III.2. Entrées et sorties du simulateur Atlas	126
III.3. Structure d'un programme du simulateur Atlas	127
IV. Conclusion	134
Références bibliographiques	135

I. Introduction

Le simulateur Tcad (Technology Computer Aided Design) est un ensemble complet d'outils indépendants permettant la simulation physique et technologique de dispositifs électroniques. Il permet d'associer l'aspect de conception technologique à la simulation électrique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Plusieurs simulateurs sont existés dans le marché, nous citons à titre d'exemple; PC1D, AMPS1D, ISE, SYNOPSIS, SCAPS, SILVACO... etc. [1]

Dans ce chapitre, nous présentons une description relativement détaillée sur Silvaco. Ce logiciel 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.

II. Présentation du Silvaco

Silvaco (SILicon VALley COrporation) est une société internationale Américaine, ayant son siège à Santa Clara, Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation, 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 jusqu'aux schémas des circuits intégrés de pointe et des outils d'extraction. [2]

Le logiciel Tcad-Silvaco est un logiciel de simulation 2D/3D basé sur la méthode des éléments finis, a été fondé en 1984 par le Dr. Ivan Pesic. Ce logiciel peut modéliser non seulement des comportements électriques, optiques et thermiques des dispositifs, mais aussi des processus technologiques des structures électroniques comme le dépôt, la gravure, et le dopage par implantation ou diffusion. [3]

En conséquence, ces simulations permettent d'optimiser les différents paramètres de fabrication et de prévoir le comportement des dispositifs semiconducteurs, notamment les cellules solaires. Ces outils peuvent être divisés en deux catégories : outils de cœur et outils interactifs. [3]

Le Tcad Silvaco inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces et de nouvelles techniques de maillage, permettant ainsi d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateur est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles. [4]

Sous Silvaco l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semiconducteurs s'appel VWF (Virtual Wafer Fabrication). Les composants de base de VWF sont: [4]

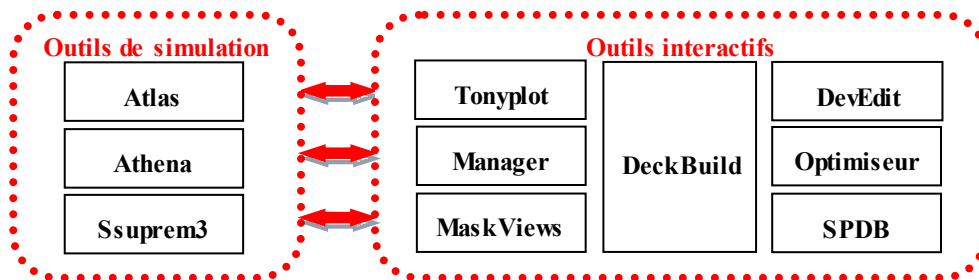


Fig.5.1. Organigramme de la structure VWF. [4]

II.1. Outils interactifs

Ce sont des outils qui nous permettent de communiquer avec les simulateurs et de visualiser les résultats obtenus.

II.1.1. DeckBuild

DeckBuild est un environnement de développement et d'exécution les programmes de simulation pour tous les simulateurs Silvaco.

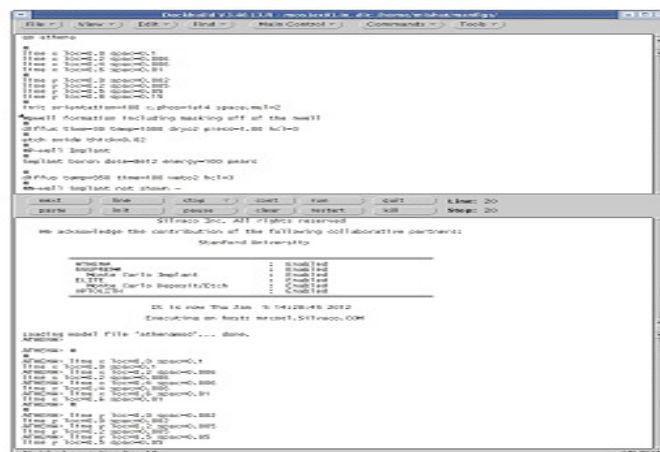


Fig.5.2. Fenêtre principale de DeckBuild.

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. DeckBuild offre une aide et une prise en charge qui permet d'éviter l'apprentissage d'une syntaxe de commande généralement très complexe. [5]

II.1.2. Tonyplot

Tonyplot est un environnement de visualisation et d'analyse de résultat des simulations (structure du composant électronique, profil de dopage etc.), Il permet aussi de tracer différentes courbes des résultats, comme la courbe J(V) ou EQE. Il peut fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de VWF, comme DeckBuild, VWF ou SPDB. Selon le programme de simulation, Tonyplot peut donner des caractéristiques de sortie en une dimension (1D), deux dimensions (2D), ou trois dimensions (3D). [1]



Fig.5.3. Fenêtre principale de Tonyplot.

II.1.3. DevEdit

DevEdit est un éditeur de structure et outil de maillage permettant de générer ou de modifier la structure du dispositif à simuler. DevEdit peut être contrôlé par des lignes de commande ou par un écran graphique interactif. [6]

II.1.4. Manager

Manager est un outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF. [5]

II.1.5. MaskViews

MaskViews est un outil de dessin des masques. [5]

II.1.6. Optimiseur

Optimiseur est un outil d'optimisation pour la calibration des simulateurs de processus et dispositifs. Cet outil permet un ajustage automatique des paramètres électriques ou processus en jouant sur un ou plusieurs paramètres d'entrée. [6]

II.1.7. SPDB (Process Data Base)

C'est un produit séparé, ce n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement ainsi que les données qui décrivent les conditions des expériences. [8]

II.2. Outils de simulation

Ce sont les simulateurs qui réalisent les fonctions pour lesquelles ils sont destinés.

II.2.1. Athena

Athena est un simulateur 2D de procédés technologiques qui permet des simulations rapides et précises de toutes les étapes effectuées en salles blanches (diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt etc) et ainsi d'obtenir la structure du dispositif (couches constitutives, dimensions, géométrie) avec les profils de dopage. [4]

II.2.2. SSuprem3

SSuprem3 est un simulateur de procédé 1D avec prolongements simples de simulations des dispositifs. [6]

II.2.3. Atlas

Atlas est un simulateur 2D ou 3D de dispositifs semiconducteurs qui permet d'obtenir leurs caractéristiques électriques (statiques ou dynamiques). [6]

III. Atlas

L'outil de simulation Atlas est un simulateur de modélisation de composants électroniques, il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semiconducteurs en régime (DC), (AC), transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique externe, il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, et des données importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. [4]

Comme le reste des applications Tcad, elle est basée sur nombreuses publications, dont la précision et l'exactitude sont vérifiées par de nombreux chercheurs. Cette variété offre les fonctionnalités suivantes et d'autres:

- ✓ Les petits signaux AC et DC, et la dépendance complète en temps.
- ✓ Les modèles de transport Drift Diffusion.
- ✓ Les modèles de transport hydrodynamique et par équilibre d'énergie.
- ✓ Echauffement du réseau et dissipation de la chaleur.
- ✓ Hétérojonctions graduées et abruptes.
- ✓ Interactions optoélectroniques avec traçage général des rayons lumineux
- ✓ Matériaux amorphes et poly cristallins.
- ✓ Environnements de circuits Généraux.
- ✓ Emission Stimulée et radiation.
- ✓ Statistique Fermi Dirac et Boltzmann.
- ✓ Modèles de mobilité avancés.
- ✓ Effets des forts dopages.
- ✓ La dynamique complète des pièges donneurs et accepteurs.
- ✓ Contacts Ohmic, schottky et isolants.
- ✓ Recombinaison SRH, radiative et superficielle.
- ✓ Impact d'ionisation (Local et Non -Local).
- ✓ Grilles Flottantes.
- ✓ Injection de porteurs Chauds.
- ✓ Modèle de transport quantique.
- ✓ Courants d'émission thermo- ionique. [6]

III.1. Principe de fonctionnement du simulateur Atlas

La simulation des cellules solaires consiste à comprendre le comportement physique et électrique de ce composant électronique. Des années de recherche dans la physique des dispositifs à base de semiconducteurs ont conduit à la réalisation des modèles mathématiques qui sont capable d'opérer dans quasiment n'importe quel dispositif électronique. [7]

Un ensemble fondamental d'équations rassemblent le potentiel électrostatique et les densités de porteurs de charge dans un domaine de simulation bien précis. Ces équations, qui sont résolues via des logiciels spécifiques de simulation des dispositifs à base de semiconducteurs, sont dérivées des équations de Maxwell. Elles sont principalement: L'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport. [7]

L'équation de Poisson lie les variations dans le potentiel électrostatique aux densités locales de charge. Les équations de continuité ou de transport décrivent le mode par lequel les densités d'électrons et des trous se comportent en fonction des processus de transport, de génération et de recombinaison. [7]

Les simulateurs existants sur le marché ont le même principe de fonctionnement. Ils résolvent les équations différentielles qui régissent le fonctionnement des dispositifs électroniques par des méthodes numériques (éléments finis, moindre carré, méthode de monté Carlo, etc.). [8]

Cette partie a pour objectif de présenter le mode de fonctionnement d'un simulateur des composants. Ces outils ont pour fonction première de résoudre les équations fondamentales des semiconducteurs, avec une problématique de détermination d'un grand nombre d'inconnues: la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique, le champ électrique, les densités de courant, etc. [7]

Ces grandeurs physiques internes évoluent au sein du composant dans le temps et l'espace. Elles apparaissent sous une forme discrétisée, comme une suite d'éléments finies. Sous cette condition, les équations traitées dans ces simulateurs peuvent être résolues de façon dynamique en tout point. [7]

L'équation de Poisson montre une relation entre le potentiel et la densité des porteurs, elle est donnée par l'expression suivante :

$$\varepsilon \Delta V + q(p - n + N_D^+ - N_A^-) = 0 \quad (5.1)$$

Où ε est le constant diélectrique ; ΔV le Laplacien du potentiel ; q est la charge élémentaire d'électrons, N_A^- et N_D^+ sont les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisées, n, p sont les densités des porteurs. [9]

L'évolution temporelle des densités de porteurs doit obéir aux équations de continuité (conservation des charges) pour les électrons et les trous :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q} \text{div } \vec{j}_n \quad (5.2-1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p + \frac{1}{q} \text{div } \vec{j}_p \quad (5.2-2)$$

Où G et U sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs; \vec{j}_n et \vec{j}_p sont les densités de courant des électrons et des trous respectivement. [9]

Le courant, pour chaque type de porteur, résulte de deux termes. Le premier correspond à l'entraînement des charges, à la vitesse moyenne \bar{v} , par le champ électrique. Le second correspond à la diffusion des porteurs. [9]

$$\vec{j}_n = -q n \mu_n \overrightarrow{\text{grad } \Psi} + q D_n \overrightarrow{\text{grad } n} \quad (5.3-1)$$

$$\vec{j}_p = -q p \mu_p \overrightarrow{\text{grad } \Psi} - q D_p \overrightarrow{\text{grad } p} \quad (5.3.2)$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad } V} \quad (5.4)$$

Où D_n , et D_p sont les coefficients de diffusion. Ils sont directement reliés aux mobilités des porteurs par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad (5.5)$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad (5.6)$$

Les expressions (5.3-1), (5.3-2) des densités de courant peuvent être reportées dans (5.2-1) et (5.2-2). Les équations (5.1) et (5.2-1), (5.2-2) constituent alors le système de base des équations différentielles couplées potentiel, la densité des électrons et la densité des trous que le simulateur doit résoudre. [9]

La résolution des équations (5.1), (5.2) et (5.3) suppose que l'on explicite les relations liant les différentes grandeurs intervenant dans ces équations de base. De plus, suivant les phénomènes physiques mis en jeu lors de la simulation d'un composant, l'utilisateur est amené à choisir des modèles physiques appropriés. [9]

Les modèles physiques dans les semiconducteurs ont été modélisés sous la forme d'expressions mathématiques reliant le potentiel électrostatique et la densité des porteurs. La modélisation physique est réalisée en tenant compte de la probabilité d'occupation des niveaux d'énergie, de la mobilité des porteurs et des différents types de recombinaison-génération. Ces grandeurs doivent être choisies d'une manière judicieuse pour se rapprocher du comportement physique réel du dispositif. [9]

La résolution des trois équations fondamentales qui régissent le comportement des porteurs de charges nous permet de calculer la caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire. A partir de cette caractéristique l'utilisateur peut déduire aisément la densité de courant de court circuit, la tension en circuit ouvert, ainsi que la puissance maximale que peut débiter la cellule. La résolution analytique étant compliquée et pratiquement impossible, nous avons recours à la résolution numérique qui nécessite un grand nombre d'itérations. [7]

III.2. Entrées et sorties du simulateur Atlas

Atlas a été conçu de façon à pouvoir utiliser les outils interactifs de VWF, qui facilitent son utilisation, Fig.5.4 présente un schéma en block de l'interface d'Atlas et les différents types d'informations qui entrent et sortent de simulateur.

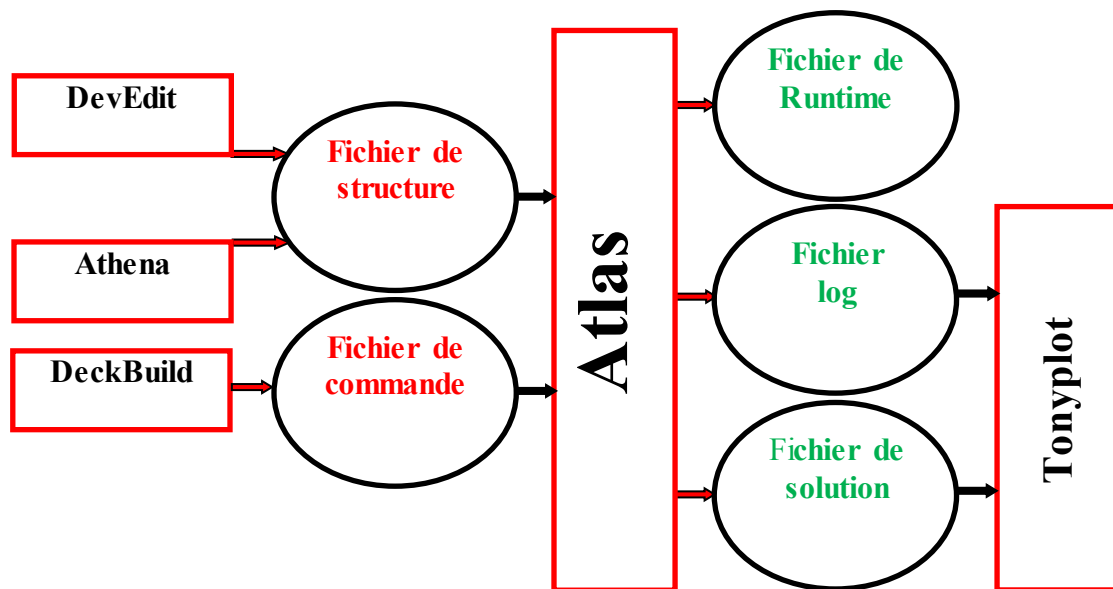


Fig.5.4. Entrées et sorties d'Atlas. [11]

La plupart des simulations sur Atlas utilisent deux entrées: un fichier texte qui contient des commandes à exécuter et un fichier de structure qui définit la structure qui sera simulée. [10]

(i) Fichier Commande (.in) définit la façon dont la simulation doit être conduite (méthodes numériques, modèles physiques, grandeurs physiques à calculer...).

(ii) Fichier Structure (.str) donne la structure du composant (couches constitutives, dimensions, géométrie). [5]

Ensuite, Atlas produit trois types de sortie :

(i) Fichier Runtime est un compte rendu du déroulement de la simulation qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. [5]

(ii) Fichier Log stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (caractéristiques statiques ou évolutions temporelles).

(iii) Fichier de solution stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné. Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation Tonyplot. [5]

III.3. Structure d'un programme du simulateur Atlas

Un fichier de commande Atlas est une séquence d'instructions, Chaque déclaration se compose d'un mot clé qui identifie la déclaration et un ensemble de paramètres. Ce fichier 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. [12]

Nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation d'Atlas. Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement. Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte. [11]

Tableau.5.1. Groupes de commande d'Atlas et déclarations primaires.

Groupe	Déclaration
Spécification de la structure	Maillage
	Régions
	Electrodes
	Dopages
Spécification des modèles physiques	Matériaux
	Modèles
	Contacts
	Interface
Sélection de la méthode numérique	Méthodes
Spécification des solutions	Log
	Solve
	Load
	Save
Analyse des résultats	Extract
	Tonyplot

III.3.1. Spécification de la structure

Dans un programme Atlas, il est nécessaire de bien définir la structure de composant simulé. La construction de la structure consiste en quatre étapes: définition du maillage, définition des régions, définition des électrodes et définition des dopages.

(i) Définition du maillage

Le maillage divise la structure simulée en petits éléments de maille (triangle) pour pouvoir résoudre les équations fondamentales numériquement. La précision des résultats obtenus avec les simulations est fonction du nombre et de la distribution des nœuds dans la maille. [6]

En contre partie, le temps de calcul des solutions est d'autant plus important pour un maillage possède un nombre important de nœuds. Le maillage doit donc être fait de façon à avoir une distribution de nœuds plus abondante dans les régions de fortes variations de profils de dopages et moins importante dans les régions où le dopage est uniforme. Ceci permet d'atteindre un compromis entre le temps de calcul et la précision de la simulation. [6]

La Fig.5.5 montre le maillage d'une structure de la cellule solaire à base de CIGS.

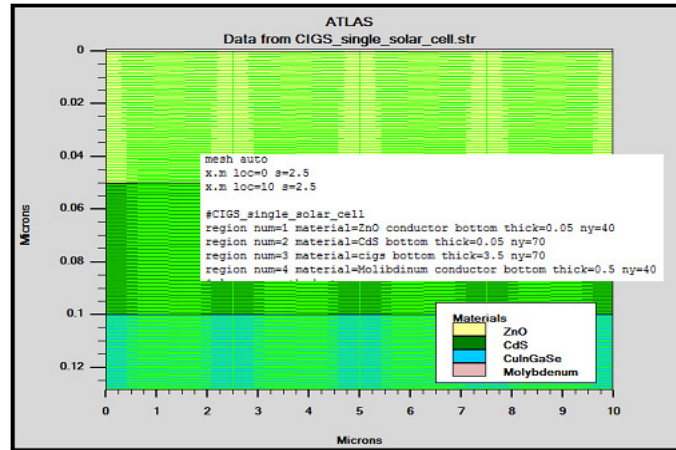


Fig.5.5. Maillage à deux dimensions de la cellule solaire à base de CIGS.

(ii) Définition des régions

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les 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. Les limites de chaque région sont identifiées explicitement dans les axes des x et des y. [13]

La Fig.5.6 montre la façon de définition des matériaux pour chaque région de structure de la cellule solaire à base de CIGS.

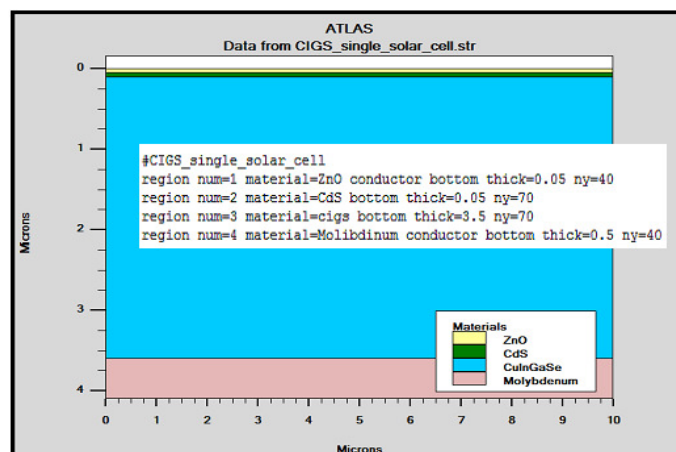


Fig.5.6. Définition des régions et des matériaux de la cellule solaire à base de CIGS.

(iii) Définition des électrodes

La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode. Cependant, Atlas a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définis. [12]

Fig.5.7 montre la position de l’anode et la cathode par des valeurs attribuées à y de structure de la cellule solaire à base CIGS.

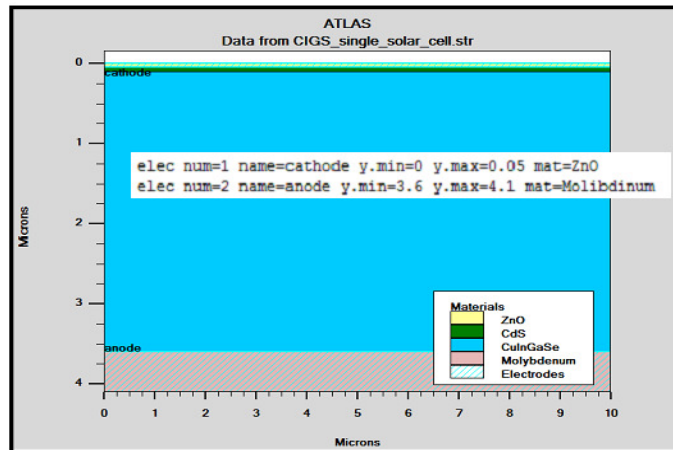


Fig.5.7. Définition des électrodes de la cellule solaire à base de CIGS.

(iv) Définition des dopages

Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage, qui peut être de type N ou P, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien, etc.

Dans l'exemple de Fig.5.8, le dopage est uniforme avec une concentration de $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ dans la région 2 qui est de type N et de concentration uniforme $7 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ dans la région 3 qui est de type P. [1]

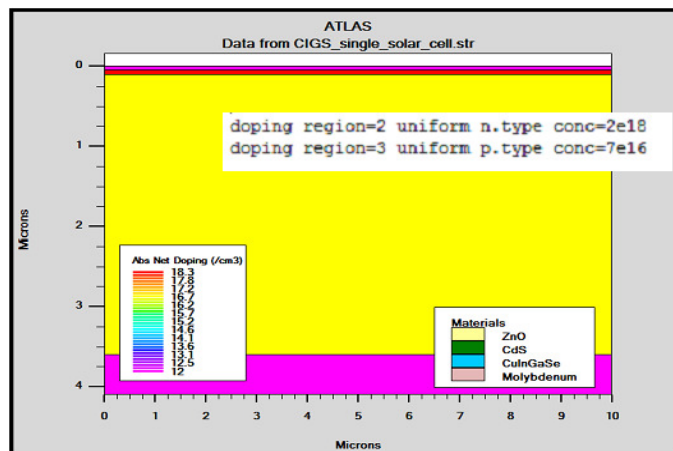


Fig.5.8 Définition de dopage de la cellule solaire à base de CIGS.

III.3.2. Spécification des modèles physiques

Une fois que la structure est complètement assemblée, il est nécessaire de préciser les modèles physiques et de définir les matériaux. La spécification de modèles et matériaux comporte quatre étapes :

(i) Matériaux

Il existe plusieurs paramètres que l'utilisateur peut identifier pour le matériau d'une région donnée nous citons par exemple: les durées de vie, la présence de défauts (avec sa position énergétique, concentration, section efficace de capture), les indices de réfraction, les coefficients d'extinction, le gap d'énergie, etc. Sinon Atlas utilisera ses paramètres par défaut qu'on peut les reconnaître dans le help du logiciel.

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. [13]

(ii) modèles

Il existe plusieurs catégories de modèles physiques concernant: la mobilité, la recombinaison, les statistiques de transporteur, l'impact d'ionisation (pour les champs forts) l'effet tunnel, modèles dépendants de la température (en cas de variation de température), rétrécissement de la bande interdite sous l'effet de dopage, les collisions locales et leurs effets sur la durée de vie et la température locale. Même pour le modèle de transport il y en a plusieurs: Drift diffusion, Equilibre d'énergie, etc. [12]

(iii) Contacts

La déclaration de '*Contact*' est employée pour décrire les électrodes en particulier c.à.d. qu'ils sont ohmiques ou bien de type Schottky. Par nom on veut spécifier l'anode ou la cathode, la spécification des propriétés. Si celle-ci n'est pas spécifiée Atlas considère le contact comme étant ohmique. Si par contre on spécifie par exemple le travail de sortie c'est un contact Schottky. [8]

(iv) Interface

La déclaration ‘‘Interface’’ est employée pour Indiquer les paramètres d’interface aux frontières des semiconducteurs ou des isolants, comme la densité de charge de l’interface, la vitesse de recombinaison superficielle aux interfaces entre les semiconducteurs et les isolants. [3]

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

```
‘‘beam num=1 x.origin=1000 y.origin=-30 angle=90.0 power.file=AM0 dis.spec
reflects=1 front.refl back.refl quantum.eff=1.0’’
```

Cette déclaration définit le nombre des faisceaux lumineux qui est 1.

L’origine du rayon pour des sources optiques 2D; le ‘‘x.origin’’ et le ‘‘y.origin’’ sont les coordonnées x et y de l’origine du faisceau lumineux en microns.

L’angle d’incidence de 90 degrés indique que le rayon est perpendiculaire à la surface éclairée de la cellule solaire.

‘‘Power.file’’ spécifie la source spectrale de la lumière en indiquant le nom d’un fichier d’extension ‘‘.spec’’ qui contient les valeurs des intensités du spectre utilisé en fonction de leurs longueurs d’onde.

Le paramètre ‘‘reflects=1’’ donne le nombre de réflexions du faisceau lumineux.

La déclaration ‘‘front.refl back.refl’’ permet au rayon lumineux de se réfléchir en face avant et arrière de la cellule.

Le paramètre ‘‘quantum.eff=1.0’’ signifie que l’efficacité quantique est égale à 1. [12]

III.3.3. Sélection de la méthode numérique

Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d’équation, deux méthodes essentiellement sont utilisées dans Atlas-Silvaco: Méthode de Gummel et Méthode de Newton

La méthode de Newton correspond à la résolution itérative d’un système regroupant les trois équations différentielles régissant le fonctionnement de la structure.

La méthode de Gummel consiste à découpler en trois sous systèmes le système global décrit précédemment: les trois équations sont résolues itérativement les unes après les autres jusqu’à atteindre la convergence globale des solutions.

L'intérêt potentiel de cet algorithme par rapport à celui de Newton réside dans la réduction des dimensions des systèmes matriciels à résoudre, ce qui permet a priori de diminuer le temps de calcul. [14]

III.3.4. Spécification des solutions

Après avoir sélectionné la méthode numérique il est nécessaire de déterminer les solutions. La spécification de solution est donnée par les déclarations suivantes:

(i) *Log*: permet de créer un fichier de données et d'enregistrer toutes les caractéristiques finales de simulation dans ce fichier. N'importe quel type de données, générées par la commande "*Solve*" est sauvé après la commande "*Log*". [4]

(ii) *Solve*: La déclaration "*Solve*" fait suite à la déclaration "*Log*". Elle effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. [5]

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. [5]

III.3.5. Analyse des résultats

Une fois la solution a été trouvée pour un problème de dispositif à semi conducteurs, les résultats et les informations obtenues par la simulation peuvent être affichés graphiquement avec "*Tonyplot*". En outre, la commande "*Extract*" est utilisée pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure. [12]

IV. Conclusion

Ce chapitre est une description relativement détaillée sur le simulateur Tcad-Silvaco, et notamment son module de simulation Atlas utilisé pour la simulation du comportement électrique des composants électroniques. Nous avons décrit leur principe de fonctionnement basé sur la résolution des équations fondamentales dans les semiconducteurs. Nous utilisons les méthodes numériques des éléments finis, puis avons défini les différents fichiers d'informations échangés par simulateur vers les autres outils interactives. Un aperçu détaillé sur la structure du programme utilisé pour simuler et modéliser notre dispositif photovoltaïque.

Le prochain chapitre présentera la simulation numérique d'une cellule solaire tandem CIGS/CIGS, nos résultats de la simulation obtenus et comparés avec quelques travaux récents ainsi que des remarques, analyses et discussions.

Références bibliographiques

- [1] K. Bessem "Etude par Tcad-Silvaco d'une structure MOS pour la réalisation de capteurs ISFET paramètres technologiques et électrique", Mémoire magister, Université Mentouri de Constantine, Année 2010.
- [2] Site web http://www.Silvaco.com/products/device_simulation/atlas.html. Mai 2012
- [3] Boukaraba Mohamed, Zorrig Heythem "Effet de la couche buffer dans les cellules solaires Tandem à base de CIGS" Mémoire de Master, Université de Mohamed Boudiaf - M'sila, Année 2017.
- [4] Bouaraba Fazia "Etude d'une LED à base d'InGaN pour l'émission de la lumière blanche" Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Année 2012.
- [5] DeckBuild User's Manual, "Device simulation software", Silvaco International, California. 2013.
- [6] Naceur Soufyane "Simulation of Gallium Nitride (GaN) solar cell by Silvaco-Atlas" Mémoire de Master, Université de Med Khider de Biskra, Année 2013.
- [7] S. Daniel "Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas" Thèse de Doctorat, Université Naval post graduate school, Monterey California, Année 2012.
- [8] Mostefa Kara Selma "Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS" Mémoire de Magister, Université Abou BekrBelkïd de Tlemcen, Année 2012.
- [9] D. Truyen "Etude par simulation composant 3D des effets singuliers SEU et SET induits par ions lourds sur le nœud technologique CMOS bulk 180nm" Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Année 2007.
- [10] B.Garcia, "Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using Silvaco Atlas" Thèse de Doctorat, Université Naval post-graduate school, Monterey California, Année 2007.
- [11] Atlas User's Manual, Device simulation software", Silvaco International, California. 2012.
- [12] Ben Aicha Amina, Cherifi Souad, Frioua Chaima "Simulation numérique d'une cellule solaire tandem à couche mince" Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, Année 2019.
- [13] Mancer Mansoura "Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs_GaAs)" Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, Année 2012.
- [14] DIB Wassila "Modélisation des structures photovoltaïques: aspects fondamentaux et appliqués" Thèse de Doctorat, Université Abou BekrBelkïd Tlemcen, Année 2010

C

hapitre VI

Résultats de la simulation et discussions

Sommaire

I. Introduction.....	137
II. Paramètres et modèles de la simulation	137
II.1. Présentation de la structure simulée	137
II.2. Paramètres de la simulation	138
II.3. Modèles de la simulation	139
III. Résultats de la simulation	140
III.1. Simulation de la cellule solaire inférieure à base CIGS	140
III.2. Simulation de la cellule solaire supérieure à base CIGS.....	142
III.3. Simulation de la cellule solaire tandem à base CIGS.....	144
IV. Optimisation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire tandem.....	146
IV.1. Optimisation du rendement de la cellule solaire inférieure (CIGS)	146
IV.2. Optimisation du rendement de la cellule solaire supérieure (CIGS).....	151
IV.3. Comparaison des caractéristiques J(V) de la cellule tandem avant et après optimisation	157
IV.4. Réponse spectrale	158
V. Conclusion	159
Références bibliographiques	160

I. Introduction

Après avoir passé en revue tous les axes essentiels pour l'étude d'une cellule solaire multijonctions, nous allons pouvoir procéder dans ce dernier chapitre de simulation et optimisation une cellule solaire monolithique à double hétérojonctions à base CIGS, afin de concevoir une structure ayant le rendement électrique optimal et déduire ses paramètres photovoltaïques optimaux, tels que la densité de courant de court circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de conversion.

Dans ce qui suit, la simulation et l'optimisation de la structure simulée se feront à l'aide du simulateur bidimensionnel Atlas-Silvaco [1]. En premier temps, une simulation de deux sous cellules sera effectuée individuellement et les a comparés aux autres résultats publiés dans la littérature.

En deuxième temps, nous chercherons à d'optimiser l'épaisseur de la couche absorbante CIGS et sa bande interdite pour chacune des sous cellules, et d'obtenir la meilleure configuration de la structure d'une cellule solaire tandem qui correspond au meilleur rendement de conversion possible. Nous présenterons également une interprétation des résultats de simulation que nous avons obtenus.

II. Paramètres et modèles de la simulation

II.1. Présentation de la structure simulée

La cellule solaire monolithique à double hétérojonctions à base CIGS, que nous voulons optimiser est schématiquement représentée sur Fig.6.1.

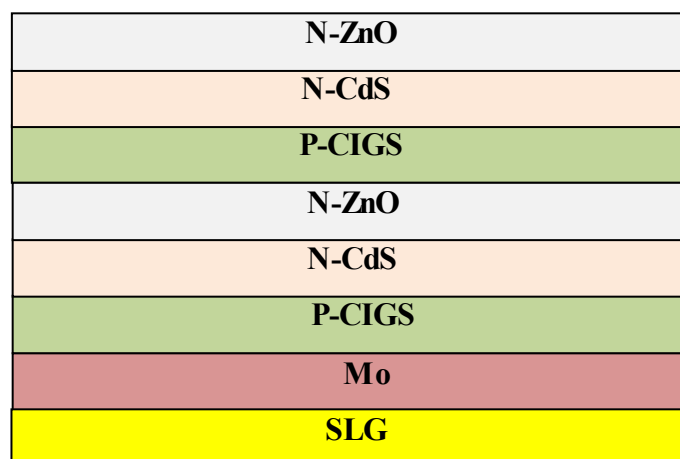


Fig.6.1. Structure schématique de la cellule solaire tandem à base CIGS.

Elle est constituée de deux sous cellules solaires, connectées optiquement et électriquement par une couche d'Oxyde de Zinc (ZnO). La cellule supérieure à base de CIGS possède une fine épaisseur et une large bande interdite, et la cellule inférieure possède une épaisseur standard et une faible bande interdite. Le photocourant généré par la cellule est collecté entre le contact face avant (ZnO) et le contact face arrière (Mo).

Au cours de notre simulation, nous avons travaillé sous les conditions suivantes ; un éclairage de spectre solaire AM1.5 de densité de puissance $100\text{mW}/\text{cm}^2$, et une température ambiante de 300°K .

II.2. Paramètres de la simulation

Les valeurs des paramètres de base des matériaux introduit dans le programme d'Atlas, pour la simulation sont données dans le tableau suivant: [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]

Tableau.6.1. Paramètres de base des matériaux utilisés dans la simulation.

Paramètre des matériaux	ZnO	CdS	CIGS
Bande interdite $E_g(\text{eV})$	3.3	2.4	Varié
Permittivité relative ϵ_r	9	10	13.9
Affinité électronique $\chi_e(\text{eV})$	4.1	4.5	4.8
Concentration des donneurs (accepteurs) $n, p(\text{cm}^{-3})$	n: 10^{18}	n: 10^{18}	p: 2.10^{16}
Mobilité d'électron $\mu_n(\text{cm}^2/\text{Vs})$	100	100	100
Mobilité de trou $\mu_p(\text{cm}^2/\text{Vs})$	25	25	25
Densité effective d'états des électrons $N_c(\text{cm}^{-3})$	$2.2.10^{18}$	$2.2.10^{18}$	$2.2.10^{18}$
Densité effective d'états des trous $N_v(\text{cm}^{-3})$	$1.8.10^{19}$	$1.8.10^{19}$	$1.8.10^{19}$
Densité de défauts			
Densité des états accepteurs (donneurs) de formes gaussiennes $N_{DG}, N_{VG}(1/\text{cm}^3)$	D: 10^{17}	A: 10^{18}	D: 10^{14}
énergie du pic de la gaussienne $E_{GA}, E_{GD}(\text{eV})$	moyen gap	moyen gap	moyen gap
Largeur de la distribution $W_{GA}, W_{GD}(\text{eV})$	0.1	0.1	0.1
section de capture d'électron $\sigma_e(\text{cm}^2)$	10^{-12}	10^{-17}	5.10^{-13}
section de capture de trou $\sigma_h(\text{cm}^2)$	10^{-15}	10^{-12}	10^{-15}
Interface CdS/CIGS	10^5	10^5	10^5
Interface CdS/CIGS	10^5	10^5	10^5
Contact avant	10^5	10^5	10^5
Contact arrière	10^5	10^5	10^5

II.3. Modèles de la simulation

Une large sélection de modèles pouvant être utilisés dans les simulations dispositif électronique avec Atlas. Les modèles que nous avons utilisés dans notre simulation sont comme suit :

(i) Le modèle de densité d'états (DOS) a été utilisé afin de modéliser la densité de défaut dans les couches polycristallines CIGS et CdS. Deux distributions de défauts de formes gaussiennes ont été considérées ; les états donneurs dans la couche absorbante CIGS et les états accepteurs dans la couche tampon CdS. Les distributions de défauts des accepteurs et des donneurs sont données par:

$$g_{GA}(E) = N_{GA} \exp \left[- \left[\frac{E_{GA} - E}{W_{GA}} \right]^2 \right] \quad (6.1)$$

$$g_{GD}(E) = N_{GD} \exp \left[- \left[\frac{E - E_{GD}}{W_{GD}} \right]^2 \right] \quad (6.2)$$

Où E est l'énergie des défauts, les indices (G, A, D) signifient les états de défaut gaussien, accepteur et donneur, respectivement. La densité des états se caractérise par la densité effective des états N_{GA} ou N_{GD} , l'écart d'énergie standard W_{GA} ou W_{GD} , l'énergie du pic de la forme gaussienne, E_{GA} ou E_{GD} . La position des états de défaut recombinant réside dans une distribution étroite proche du milieu de bande d'énergie. [1]

(ii) Le modèle de recombinaison volumique Shockely-Read-Hall (SRH) a été considéré pour calculer les taux de recombinaison des porteurs qui dépend de la densité des états situés dans la bande interdite. Le taux de recombinaison de SRH en présence d'états défectueux dans le semiconducteur est donnée par l'expression (2.3) défini dans le deuxième chapitre.

(iii) Le modèle de recombinaison surfacique Shockely-Read-Hall (SRH) a été considéré pour calculer les taux de recombinaison surfacique des porteurs entre deux matériaux différents (CdS/CIGS et aux contacts avant et arrière). Une expression générale de ce modèle est donnée par la formule (2.4) défini dans le deuxième chapitre.

(iv) Le modèle de tunneling bande à bande non local (NLBBT) a été considéré pour modéliser la couche transparente d'interconnexion ZnO entre les sous cellules de la structure tandem.

III. Résultats de la simulation

Dans ce qui suit, on va présenter la simulation des deux sous cellules (supérieure et inférieure) individuellement, afin d'assurer le bon fonctionnement des deux structures avant de les mettre dans la structure tandem.

III.1. Simulation de la cellule solaire inférieure à base CIGS

Dans cette partie, on s'intéresse à la cellule solaire à base CIGS d'une simple jonction, qui va être utilisée par la suite comme une cellule inférieure pour la structure tandem. Cette cellule simple est composée essentiellement d'une d'une couche fenêtre optique conductrice et transparente de ZnO de type N sert contact avant, une couche tampon CdS de type N et une couche absorbante CIGS de type P, le contact arrière est assuré par une couche de Molybdène (Mo) déposée sur un substrat en verre sodé.

La structure de la cellule solaire à base CIGS d'une simple jonction obtenue à l'aide Atlas-Silvaco est présentée dans Fig.6.2.

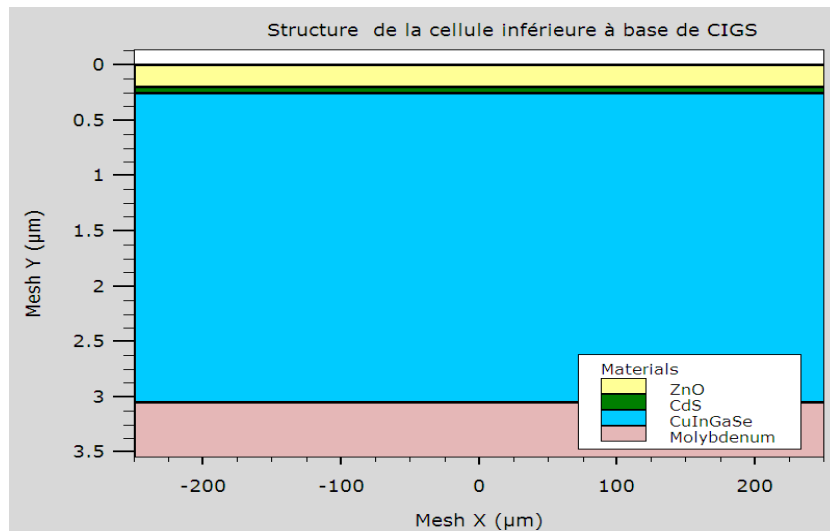


Fig.6.2. Structure de la cellule inférieure à base de CIGS obtenu par Atlas-Silvaco.

L'épaisseur standard de la couche absorbante CIGS est entre $2\mu\text{m}$ à $4\mu\text{m}$ [3, 4, 6,7], une valeur de $2.8\mu\text{m}$ a été choisie pour notre simulation. La concentration du Ga a été fixée à 30%, ce qui correspond à la bande interdite de 1.27eV [3]. L'épaisseur de la couche ZnO a été fixée à $0.2\mu\text{m}$ et $0.05\mu\text{m}$ pour la couche CdS. [3]

En implémentant les paramètres de la simulation mentionnés au tableau.6.1, la caractéristique $J(V)$ de la cellule inférieure à base CIGS sous éclairage AM 1.5 est donnée par Fig.6.3.

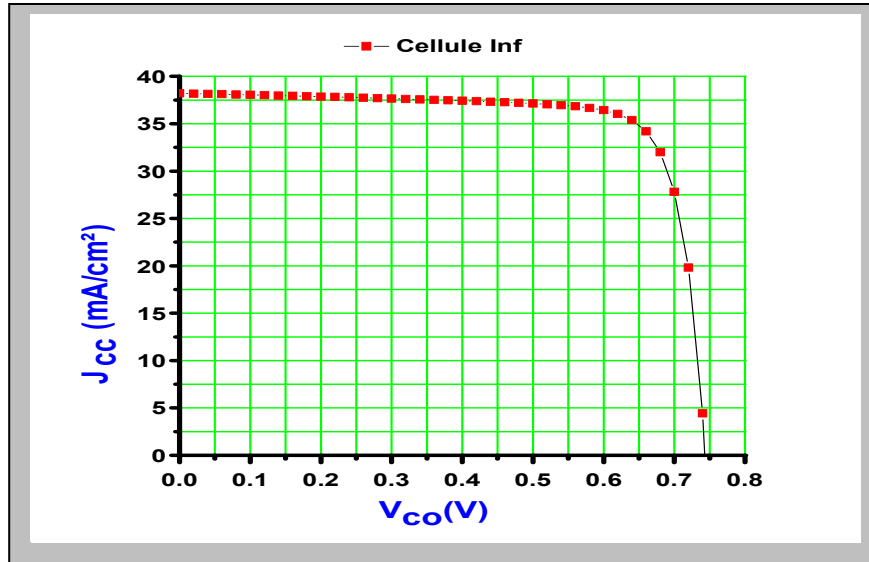


Fig.6.3. Caractéristique $J(V)$ de la cellule inférieure à base de CIGS.

Les paramètres photovoltaïques de la cellule inférieure à base de CIGS simulé sous éclairage AM1.5 et comparées avec des résultats expérimentaux sont présentés dans le tableau.6.2.

Tableau.6.2. Comparaison les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire inférieure avec ceux de la référence [3, 9].

	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Notre simulation	0.74	38.26	79.75	22.69
Simulation de [3]	0.73	38.96	78.21	22.45
Expérimental de [9]	0.74	38.77	79.5	22.9±0.5

Afin de tester et valider la précision des modèles et des paramètres de simulation choisis, une comparaison de nos résultats de la simulation avec d'autres résultats de simulation et expérimental a été faite. Comme nous pouvons voir, on a trouvé un bon accord entre nos résultats et ceux des références [3, 9].

III.2. Simulation de la cellule solaire supérieure à base CIGS

Les paramètres de la simulation utilisés dans cette partie pour les différentes couches ZnO, CdS et CIGS formants la cellule supérieure sont présentés dans le tableau.6.1.

Les épaisseurs des couches ZnO et CdS ont été fixé à $0.2\mu\text{m}$ et $0.05\mu\text{m}$ respectivement. [3]

L'épaisseur de la couche absorbante CIGS pour la cellule supérieure est entre $0.18\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$ dans [3, 10, 11], une valeur de $0.26\mu\text{m}$ a été choisie pour notre simulation. Le contact arrière est assuré par une couche de Molybdène (Mo) de $0.4\mu\text{m}$. [3]

La concentration du Ga de la couche absorbante CIGS a été fixée à 100%, ce qui correspond au Gap de 1.68eV . [11]

La structure de la cellule solaire supérieure à base CIGS obtenue à l'aide Atlas-Silvaco est présentée dans Fig.6.4.

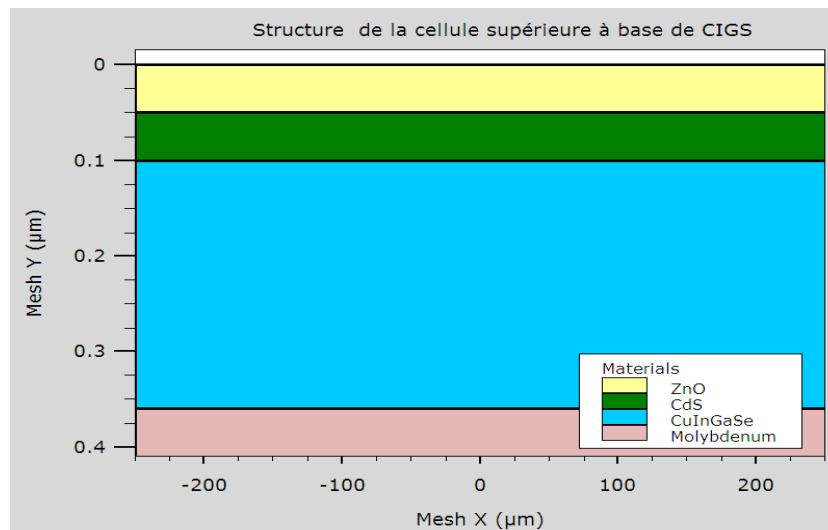


Fig.6.4. Structure de la cellule supérieure à base de CIGS obtenu par Atlas-Silvaco.

Après avoir entré les paramètres des différents matériaux, on prélève la caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire supérieure à base de CIGS sous éclairnement AM1.5 donnée par Fig.6.5.

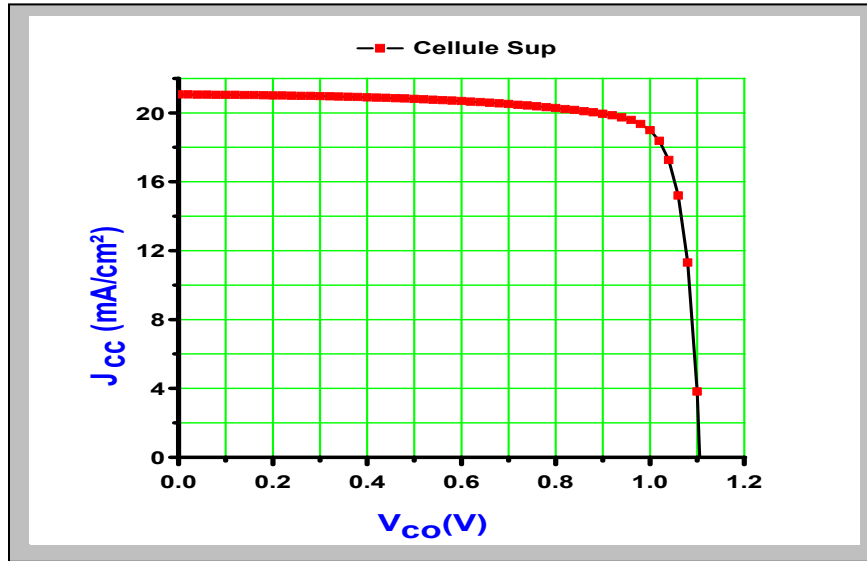


Fig.6.5. Caractéristiques J(V) de la cellule solaire supérieure à base de CIGS.

Les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire supérieure à base de CIGS obtenus à partir de la caractéristique J(V) sont résumés dans le tableau.6.3. Nous avons comparé nos résultats avec ceux publiés dans la littérature.

Tableau.6.3. Comparaison les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire supérieure avec ceux des références [3, 10, 11].

	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Notre simulation	1.18	20.18	80.12	18.98
Simulation de [10]	1.11	21.13	80.42	18.92
Simulation de [3]	1.14	18.94	76.14	16.54
Simulation de [11]	1.007	19.13	86.40	16.65

Les valeurs de la densité de courant de court circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de conversion, reportées sont respectivement: 20.18mA/cm², 1.18V, 80.94% et 18.98%. Ainsi nos valeurs de simulation sont dans la gamme des références [3,10, 11].

III.3. Simulation de la cellule solaire tandem à base CIGS

La structure de la cellule solaire tandem obtenue à l'aide Atlas-Silvaco est bien présentée dans Fig.6.6. Elle est constituée d'un empilement des deux sous cellules à base de CIGS dont le but d'absorber une large gamme du spectre.

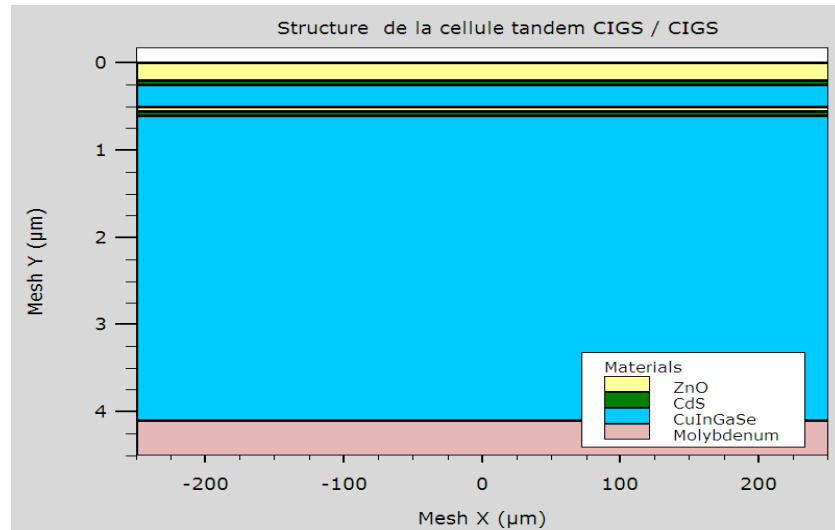


Fig.6.6. Structure de la cellule tandem CIGS/CIGS obtenu par Atlas-Silvaco.

Les paramètres de base des couches ZnO, CdS et CIGS des deux sous cellules ont été maintenues identiques (Tableau.6.1).

Pour la cellule supérieure, la concentration du Ga de la couche absorbante CIGS est fixée à 100%, et son épaisseur est fixée à $0.26\mu\text{m}$.

Pour la cellule inférieure, la concentration du Ga de la couche absorbante CIGS est fixée à 30%, et son épaisseur est fixée à $2.8\mu\text{m}$.

Les caractéristiques $J(V)$ de la cellule solaire tandem CIGS/CIGS, la cellule inférieure et la cellule supérieure à base CIGS sont représentées sur Fig.6.7.

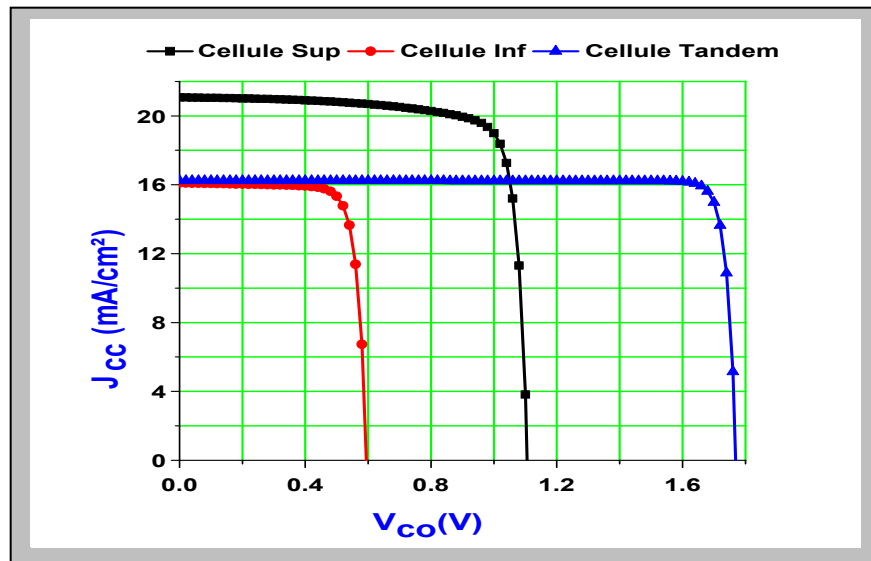


Fig.6.7. Caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire tandem CIGS/CIGS, la cellule inférieure et la cellule supérieure à base CIGS.

Les paramètres photovoltaïques de la cellule supérieure, la cellule inférieure, la cellule tandem, et la cellule à simple jonction sont récapitulés dans le tableau.6.4.

Tableau.6.4. Paramètres photovoltaïques de la cellule supérieure, de la cellule inférieure, de la cellule tandem, et la cellule à simple jonction.

	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Cellule supérieure	1.18	20.18	79.17	18.48
Cellule inférieure	0.59	16.84	82.42	08.63
Cellule tandem	1.77	16.89	86.38	25.35
Cellule simple jonction	0.74	38.26	79.75	22.69

La cellule supérieure présente une densité de courant de court circuit de 20.18mA/cm², une tension de circuit ouvert de 1.18V, un facteur de forme de 79.17% et un rendement de conversion de 18.48%.

La cellule inférieure présente une densité de courant de court circuit de 16.84mA/cm², une tension de circuit ouvert de 0.59V, un facteur de forme de 82.42% et un rendement de conversion de 8.63%.

Pour la cellule tandem, nous observons que la densité de courant de court circuit est limitée par la faible densité de courant de court circuit de la cellule inférieure (16.84 mA/cm^2), Tandis que, la tension de circuit ouvert de 1.77V , elle est exactement égal à la somme des deux tensions de circuit ouvert des deux cellules empilées.

Il est clair de voir que la densité de courant de court circuit dans le cas de la cellule tandem a diminué par rapport à la cellule simple, de 38.26 mA/cm^2 à 16.89 mA/cm^2 , en raison de la faible quantité de la lumière arrivée à la cellule inférieure. Par contre, la tension de circuit ouvert de la cellule tandem de 1.77V est pratiquement supérieure à celle de la cellule simple (0.74V). De plus, son rendement de conversion a été bien amélioré par rapport à celui de la cellule simple de 22.69% à 25.35% .

Il est à observer que les performances de la cellule simple peuvent être améliorées en utilisant le concept multijonctions. Mais aussi un bon accord entre les densités de courant de court circuit des sous cellules composantes la structure tandem, ainsi que un bon choix de leur combinaison optimale des gaps peuvent conduire au meilleur rendement possible obtenu par la cellule tandem. Cela implique une optimisation de quelques paramètres des cellules supérieures et inférieures est nécessaire afin d'attendre notre objective.

IV. Optimisation des performances de la cellule solaire tandem

Après avoir défini notre structure de cellule solaire tandem à base CIGS, dans cette partie nous allons faire une optimisation de quelques paramètres ayant une grande influence sur le rendement de la cellule dans le but d'obtenir le rendement optimum.

Les paramètres dont il est question sont l'épaisseur et la bande interdite de la couche absorbante des sous cellules formants la structure tandem. L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement électrique afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

IV.1. Optimisation du rendement de la cellule solaire inférieure (CIGS)

Dans la suite de cette section, nous allons analyser l'effet de la bande interdite et l'épaisseur de la couche absorbante CIGS de la cellule solaire inférieure sur ses performances, pour déterminer les meilleurs paramètres photovoltaïques de cette dernière.

IV.1.1. Effet du Gap de la couche absorbante CIGS

Dans un premier temps, nous allons procéder par faire varier la bande interdite de la couche absorbante CIGS de la cellule inférieure. Son épaisseur reste fixe à $2.8\mu\text{m}$ pendant les calculs. Pour calculer la bande interdite du composé quaternaire CIGS, en fonction de la concentration du Ga, on a utilisé la formule défini dans le troisième chapitre par l'équation (3.2).

L'effet de la variation de la concentration du Ga (X) de la couche absorbante CIGS dans un intervalle allant 0 à 50% sur la caractéristique J(V) de la cellule inférieure est illustré sur Fig.6.8.

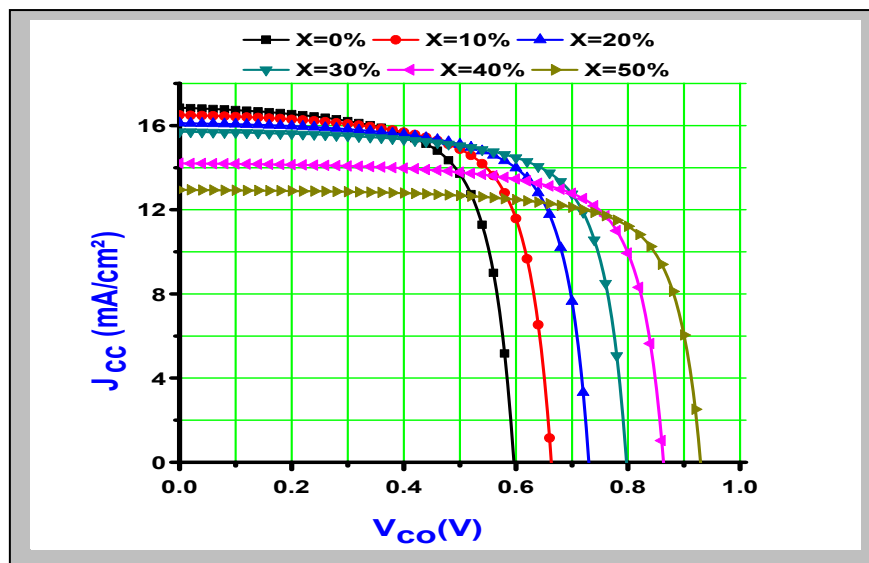


Fig.6.8. Caractéristiques J(V) de la cellule inférieure à base CIGS pour différentes valeurs de la concentration du Ga (X).

En ce qui concerne les caractéristiques J(V) illustrées sur Fig.6.8, on constate une augmentation proportionnelle de la tension de circuit ouvert avec l'augmentation de la largeur de bande.

Par contre, la densité de courant de court circuit est variée en sens inverse. Les paramètres de photovoltaïques de la cellule inférieure tirée d'après les caractéristiques J(V) sont reportés sur Fig.6.9.

Fig.6.9.a, Fig.6.9.b, Fig.6.9.c, et Fig.6.9.d illustrent respectivement les variations de la densité de courant de court circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de conversion fournie par la cellule inférieure en fonction de la concentration du Ga.

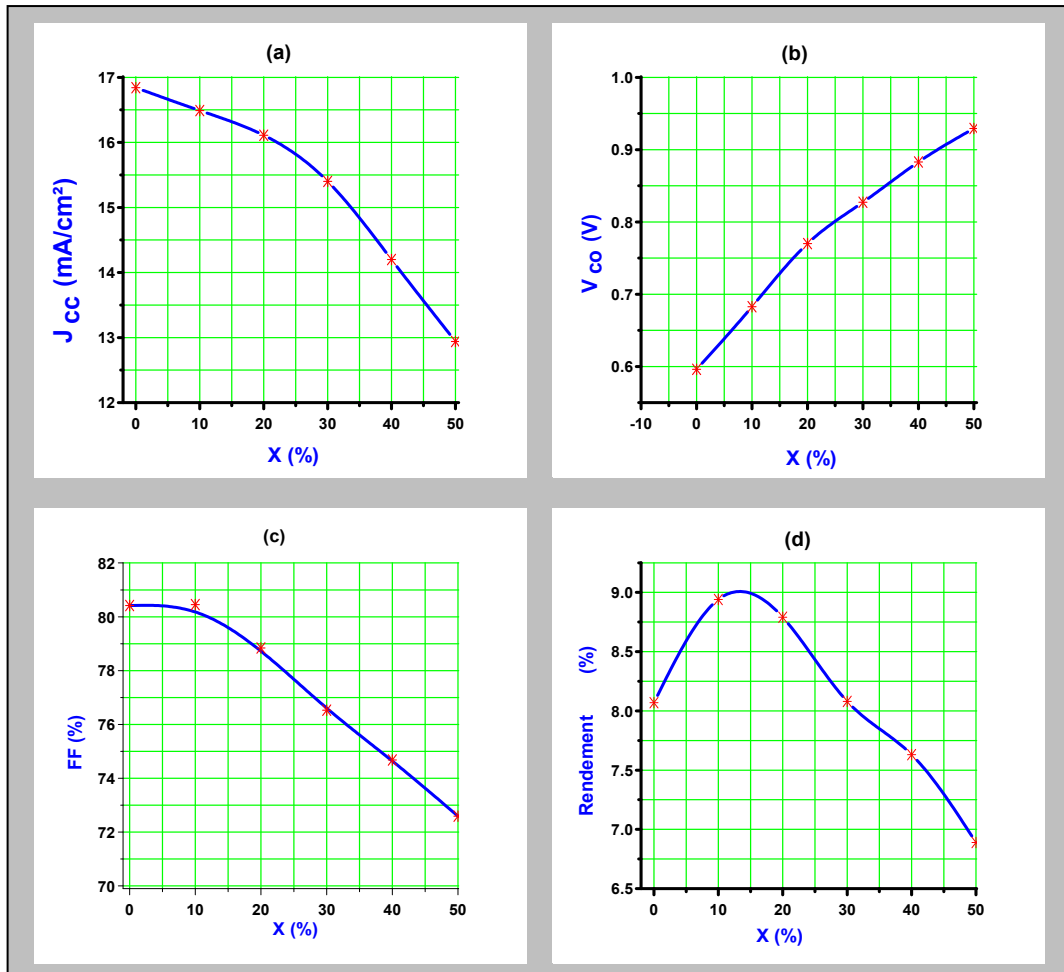


Fig.6.9. Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule inférieure à base CIGS en fonction de la concentration du Ga (X).

Fig.6.9.a, montre que la densité de courant de court circuit est inversement proportionnelle à l'augmentation de la concentration du Ga, qui induit par conséquent une augmentation de la largeur de bande interdite, qui va provoquer une modification du spectre d'absorption de la couche absorbante CIGS. En effet, avec un gap plus grand, la cellule n'absorbe que les photons les plus énergiques, les photons à faible énergie ne seront pas absorbés.

Si on prend la courbe de la tension de circuit ouvert en fonction de la concentration du Ga illustrée dans Fig.6.9.b, on remarque que la tension de circuit ouvert est proportionnelle à la concentration du Ga, contrairement à la densité de courant de court circuit. Selon l'équation (6.3), une augmentation de la bande interdite de la couche absorbante CIGS entraîne une augmentation du potentiel de la barrière (V_{bi}), qui dépend de la tension de circuit ouvert.

$$qV_{bi} = E_g - KT \cdot \ln \left(\frac{N_{CB} \cdot N_{VB}}{N_A \cdot N_D} \right) \quad (6.3)$$

Où q est la charge électronique, N_{CB} la densité effective des états dans la bande de conduction, N_{VB} la densité effective des états dans la bande de valence, N_A la densité des accepteurs et N_D est la densité des donneurs. [11]

D'après Fig.6.9.d, nous remarquons une petite augmentation du rendement de 8.07% jusqu'à sa valeur maximale de 8.97%, pour une concentration du Ga variant de 0 jusqu'à 10% (1.13eV), puis il se décroît continuellement avec l'augmentation de la concentration du Ga. Cette diminution est principalement due à la diminution de la densité de courant de court circuit comme on le voit sur Fig.6.9.a, en même temps l'augmentation de la tension de circuit ouvert ne permet pas de compenser cette diminution.

IV.1.2. Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS

On se propose maintenant d'optimiser de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS de la cellule solaire inférieure, pour obtenir de meilleures performances.

Fig.6.10 montre les caractéristiques $J(V)$ de la cellule solaire inférieure à base CIGS, sous éclairage AM1.5, pour différentes épaisseurs de la couche absorbante CIGS, allant de $2.8\mu\text{m}$ à $4\mu\text{m}$. On a fixé la bande interdite de cette couche à sa valeur optimale, qui est déjà trouvée (1.13eV).

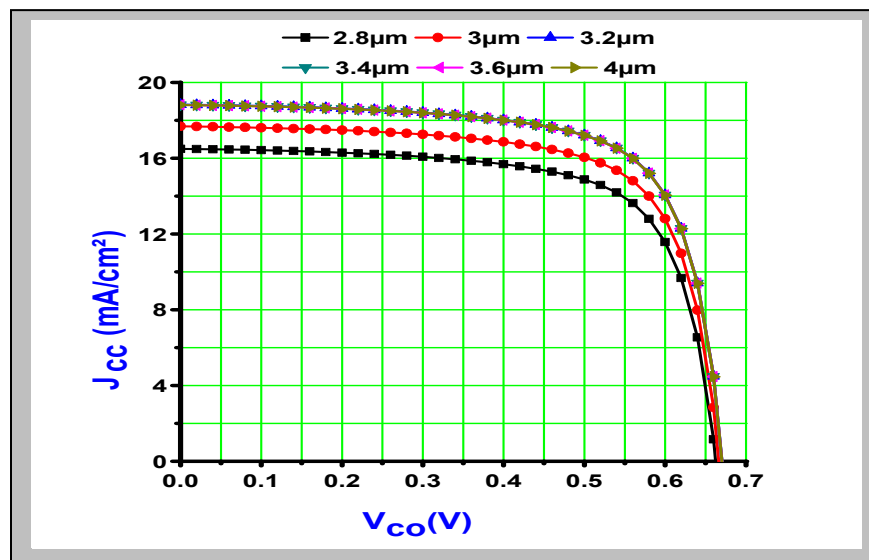


Fig.6.10. Caractéristiques $J(V)$ de la cellule inférieure à base CIGS pour différentes épaisseurs de la couche absorbante CIGS.

Les paramètres de photovoltaïques de la cellule inférieure issus des caractéristiques J(V) sont reportés sur Fig.6.10.

Fig.6.11.a, Fig.6.11.b, Fig.6.11.c, et Fig.6.11.d illustrent respectivement les variations de la densité de courant de court circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de conversion fournie par la cellule inférieure pour différentes épaisseurs de la couche absorbante CIGS.

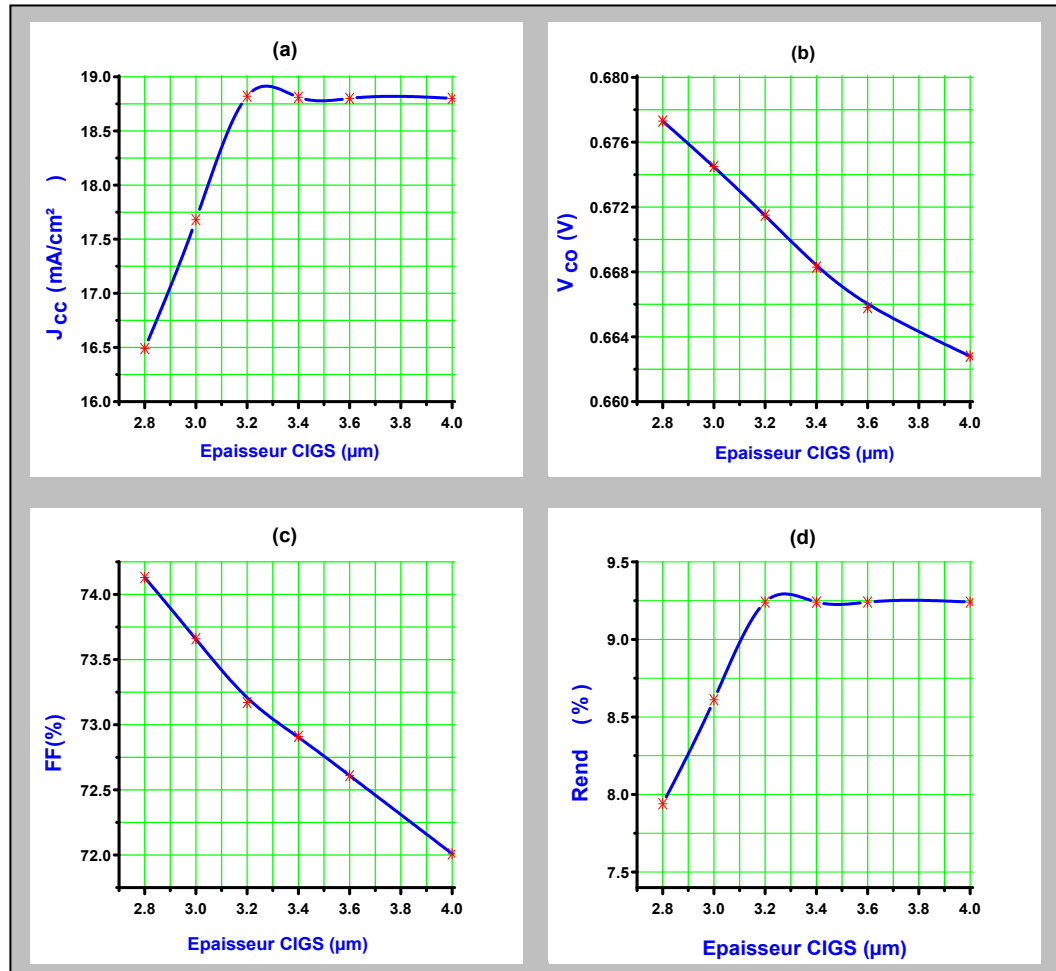


Fig.6.11. Variation des paramètres photovoltaïques de la cellule inférieure à base CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS.

D'après Fig.6.11.a, On constate que la densité de courant de court circuit est proportionnelle à l'épaisseur de la couche absorbante CIGS, jusqu'à la valeur 3.2 µm, on peut justifier cela par une meilleure absorption optique, qui augmente avec l'épaisseur de cette couche. Arrivant à un certain niveau, la densité de courant de court circuit reste presque inchangée et commence à se dégrader lentement, vu qu'une très grande épaisseur de la couche absorbante CIGS va impliquer une réduction du courant.

Ce qui peut être expliqué par le fait que la distance parcourue par les photoporteurs augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante, réduisant ainsi la probabilité de leur collection.

D'après Fig.6.11.b, on remarque que l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS, s'accompagne d'une légère diminution de la tension de circuit ouvert, presque inchangeable. On peut justifier cela par une augmentation de la densité de défauts, qui influence négativement sur la bande interdite et provoque une transition interbande assisté par des pièges.

On peut aussi remarquer sur Fig.6.11.c, que le facteur de forme a connu une légère diminution lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche absorbante CIGS, ceci est causé par une augmentation de la valeur de la résistance série, qui s'accompagne l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante, ceci permet de diminuer le facteur de forme.

D'après Fig.6.11.d, Nous constatons que le rendement de conversion de la cellule solaire inférieure augmente progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS, jusqu'à où il atteint sa valeur maximale de 9.11% à une épaisseur de 3.2 μ m, puis il se fixe pour commencer à diminuer au fur et à mesure qu'on augmente l'épaisseur de la couche absorbante CIGS.

Durant cette optimisation, le rendement de la cellule inférieure atteint sa valeur maximale de 9.09%, pour une densité de courant de court circuit de 17.98mA/cm², une tension de circuit ouvert de 0.67V et un facteur de forme de 79.13%. Ces paramètres photovoltaïques optimaux sont obtenus, pour une épaisseur de la couche absorbante CIGS de 3.2 μ m et une concentration de Ga de 10%, qui correspond à une largeur de bande interdite de 1.13eV.

IV.2. Optimisation du rendement de la cellule solaire supérieure (CIGS)

Après avoir fait l'optimisation de la cellule inférieure et trouvé l'épaisseur de la couche absorbante du GIGS et sa bande interdite optimales, on passe maintenant à optimiser l'épaisseur de la couche absorbante GIGS et sa bande interdite de la cellule supérieure.

IV.2.1. Effet du Gap de la couche absorbante CIGS

Dans cette partie, nous allons étudier par une simulation, l'effet de la bande interdite de la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure sur les rendements de la cellule tandem, la cellule supérieure et la cellule inférieure.

L'épaisseur de la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure est fixée à $0.26\mu\text{m}$. Après la simulation, on a trouvé une série des courbes de la caractéristique $J(V)$ pour une concentration du Ga (X) allant de 50 à 100%. Les caractéristiques $J(V)$ sont illustrées dans Fig.6.12.

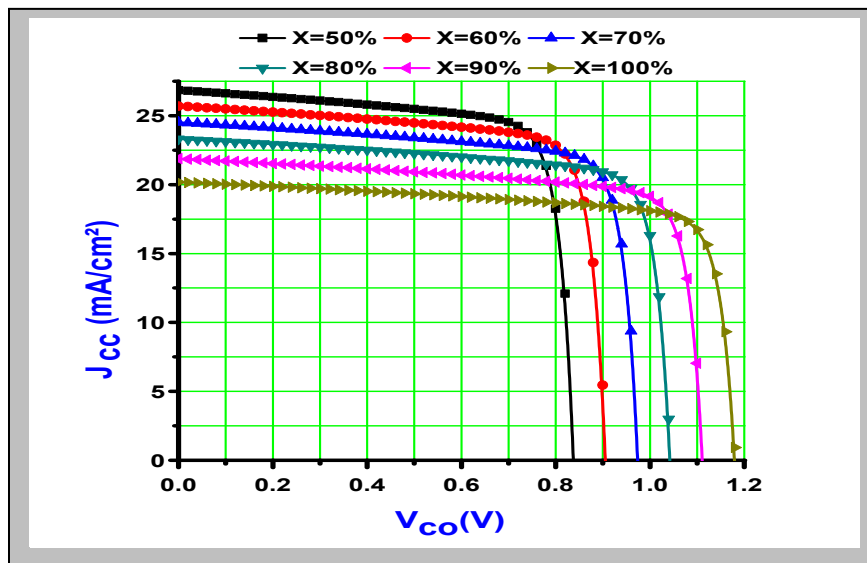


Fig.6.12. Caractéristiques $J(V)$ de la cellule supérieure à base CIGS pour différentes valeurs de concentration du Ga (X).

On constate que la variation de la concentration du Ga (X) provoque un changement très important dans la caractéristique $J(V)$ de cellule supérieure. Pour des concentrations élevées, la tension de circuit ouvert augmente tangiblement, accompagné d'une chute de la densité de courant de court circuit remarquable.

Les rendements de la cellule supérieure, la cellule inférieure et la cellule tandem en fonction de concentration du Ga (X) de la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure sont bien présentées respectivement dans Fig.6.13.a, Fig.6.13.b, Fig.6.13.c, Fig.6.13.d.

D'après Fig.6.13.a, nous remarquons que le rendement de la cellule supérieure est inversement proportionnel à la concentration du Ga (X) de la couche absorbante CIGS, ceci a déjà justifié au dessus.

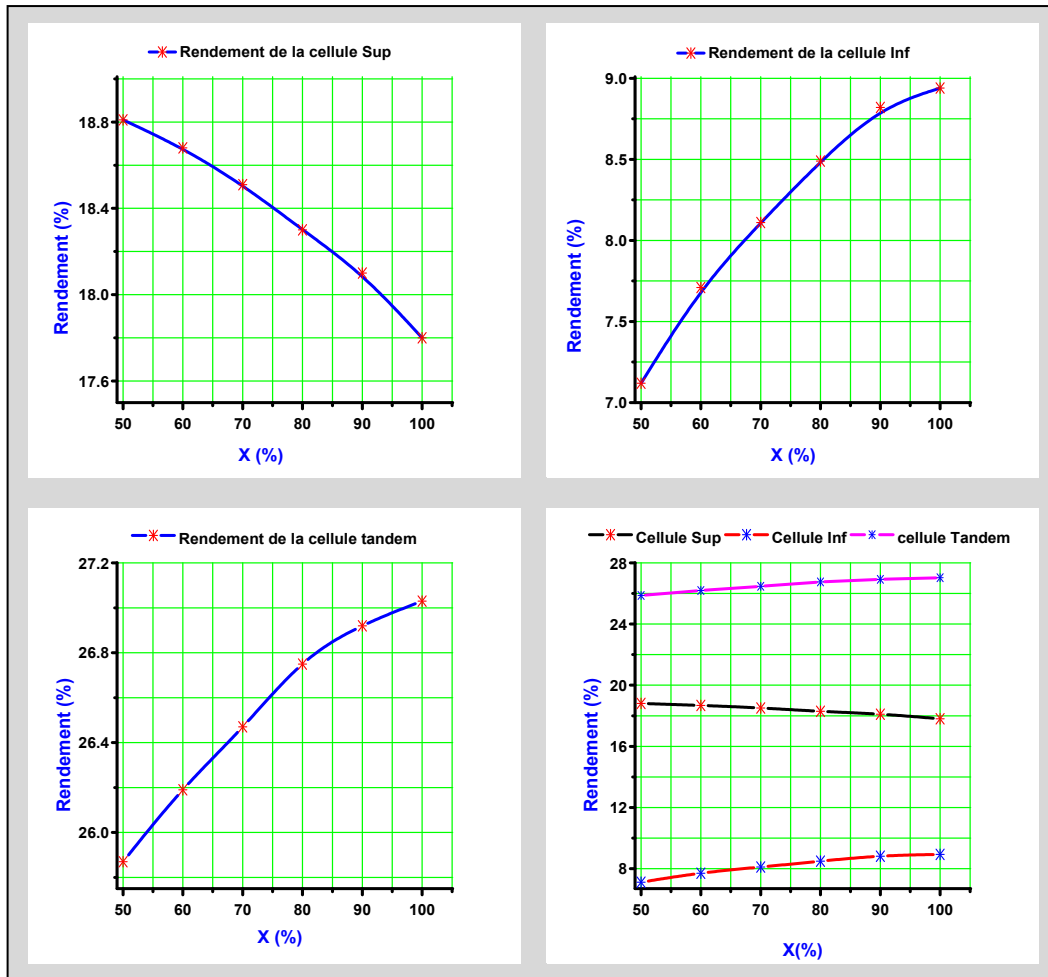


Fig.6.13. Variation de la concentration du Ga (X) de la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure à base CIGS en fonction des rendements des cellules tandem, supérieure et inférieure.

Par contre, le rendement de la cellule inférieure illustré dans Fig.6.13.b augmente continuellement avec l'augmentation de la concentration du Ga (X) de la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure, ce qui permet aussi d'augmenter le rendement de la cellule tandem (voir Fig.6.13.c). Ceci peut être expliqué par un chevauchement des bandes interdites des sous-cellules dans une même gamme de longueur d'onde, alors que l'intérêt du concept multijonctions consiste à diviser le spectre solaire en différentes gammes d'énergie, où chaque gamme est convertie par la cellule, qui possède une bande interdite bien adaptée à cette gamme.

Le rendement de la cellule tandem atteint sa valeur maximale de 26.71%, pour une concentration du Ga (X) de la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure de 100% correspondant à la bande interdite de 1.68eV.

IV.2.1. Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS

Dans ce qui va suivre nous allons faire une optimisation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure. Nous allons varier l'épaisseur de cette couche absorbante CIGS de $0.26\mu\text{m}$ à $0.10\mu\text{m}$, afin établir une égalité des densités des courants entre les sous cellules, cela induit une optimisation des performances de structure tandem, la concentration du Ga (X) de la couche absorbante CIGS a été fixée à 100%.

En considérant les conditions de l'illumination par le spectre AM1.5, les caractéristiques J(V) de la cellule solaire supérieure à base de CIGS pour différentes épaisseurs de la couche absorbante CIGS variant de $0.10\mu\text{m}$ à $0.26\mu\text{m}$ sont illustrées dans Fig.6.14.

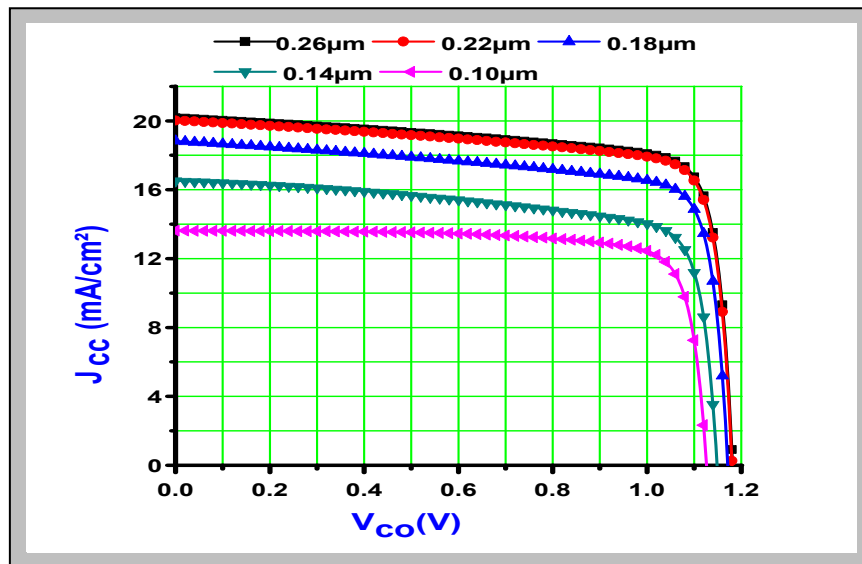


Fig.6.14. Caractéristiques J(V) de la cellule supérieure à base CIGS pour différentes épaisseurs de la couche absorbante CIGS.

Nous remarquons que la caractéristique J(V) de la cellule supérieure est fortement influencée par la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS et surtout la densité de courant de court circuit.

Les densités de courant de court circuit des cellules supérieure et inférieure en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure sont illustrées dans Fig.6.15.

D'après Fig.6.15, on remarque bien que la densité de courant de court circuit de la cellule supérieure varie proportionnellement avec l'épaisseur de sa couche absorbante CIGS contrairement à celle de la cellule inférieure.

Quand l'épaisseur de la couche absorbante CIGS de la cellule supérieure augmente, cela conduit à la fois à une augmentation de la densité de courant de court circuit de la cellule supérieure et une diminution de la densité de courant de court circuit de la cellule inférieure.

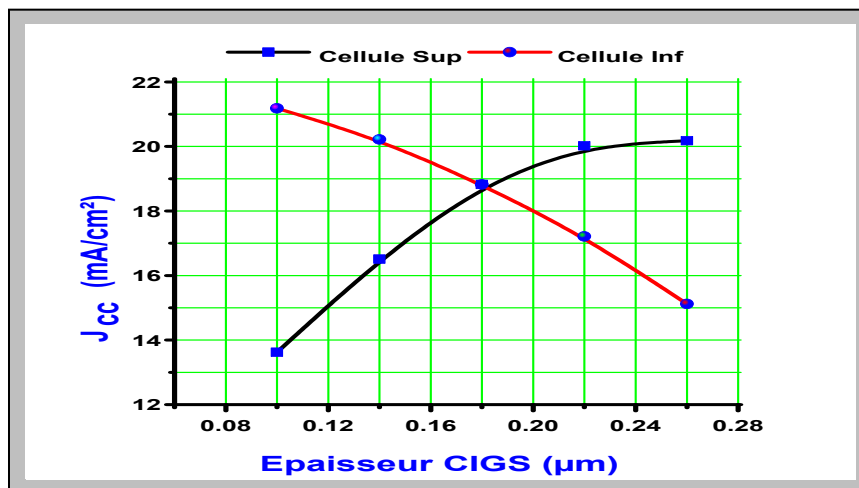


Fig.6.15. Densité de courant de court circuit des cellules supérieure et inférieure à base CIGS en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante du CIGS de la cellule supérieure.

Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la capacité d'absorption dans la cellule supérieure et par conséquent la diminution de la quantité de la lumière absorbé par la cellule inférieure. Le point d'intersection de deux courbes détermine la valeur d'égalité de la densité de courant de court circuit entre les sous cellules (18.82mA/cm²) et l'épaisseur optimale de couche absorbante CIGS de la cellule supérieure (0.18µm). Le rendement de la structure tandem enregistré à ce point est égal de 27.03%.

Fig.6.16. présente les caractéristique J(V) de la cellule supérieure, la cellule inférieure et la cellule tandem après optimisation, sous l'éclairement AM1.5G.

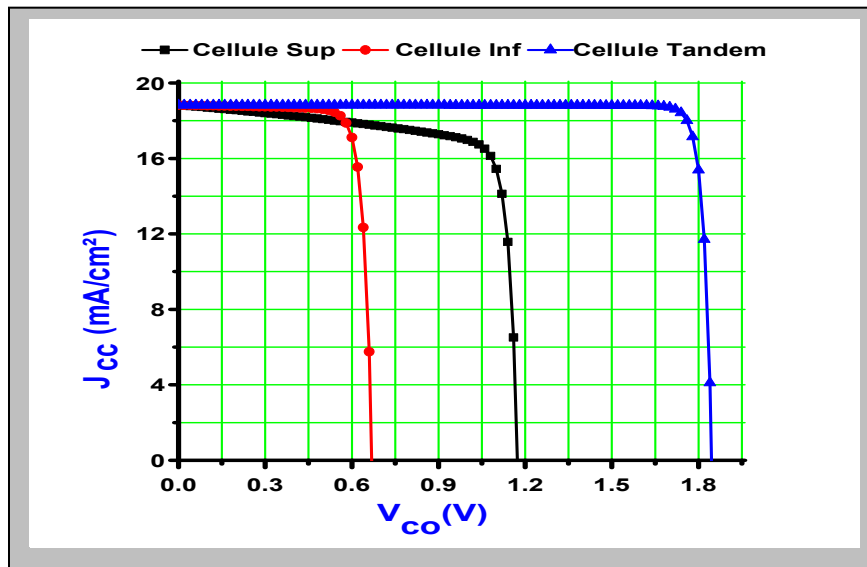


Fig.6.16. Caractéristique J(V) de la cellule solaire tandem CIGS/CIGS, les cellules inférieure et supérieure à base CIGS après l'optimisation.

Les paramètres photovoltaïques de la cellule supérieure, la cellule inférieure et la cellule tandem tirés à partir des caractéristiques J(V) de Fig.6.16, sont récapitulés dans le tableau.6.5.

Tableau.6.5. Paramètres photovoltaïques de la cellule supérieure CIGS, de la cellule inférieure CIGS et de la cellule tandem CIGS/CIGS après l'optimisation.

	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Cellule supérieure	1.17	18.82	81.12	17.83
Cellule inférieure	0.67	18.82	79.17	09.24
Cellule tandem	1.84	18.82	82.54	27.03

D'après le tableau.6.5, nous observons que la cellule tandem partage la même densité de courant de court circuit de 18.82mA/cm² avec les sous cellules, ce qu'on appelle le "courant matching". Tandis que, la tension de circuit ouvert de 1.84V, elle est exactement égal à la somme des deux tensions de circuit ouvert des deux cellules empilées.

IV.3. Comparaison des caractéristiques J(V) de la cellule tandem avant et après optimisation

On présente dans Fig.6.17 les caractéristiques J(V) de la cellule tandem CIGS/CIGS avant et après optimisation obtenue par Atlas-Silvaco.

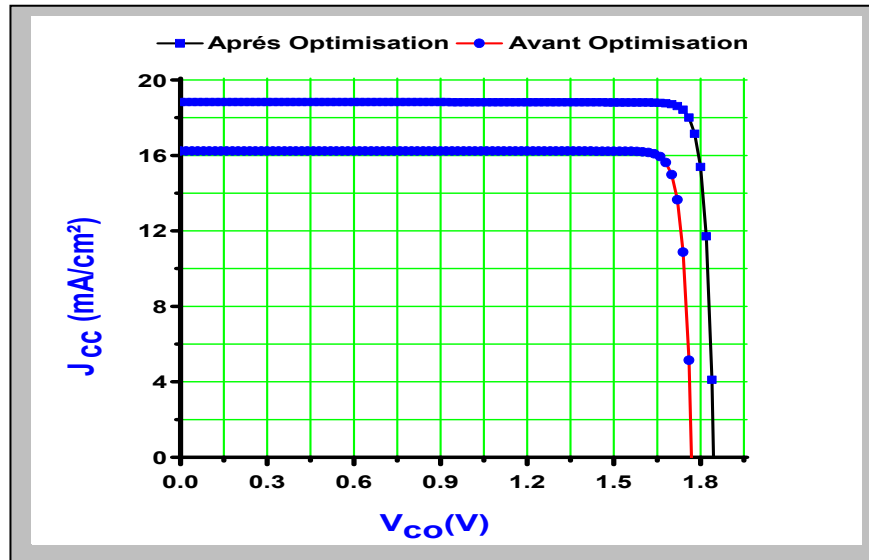


Fig.6.17. Caractéristiques J(V) de la cellule solaire tandem CIGS/CIGS avant et après l'optimisation.

Comme il est représenté dans Fig.6.17, on constate que les paramètres photovoltaïques de la cellule tandem après l'optimisation sont bien améliorés par rapport aux ceux de la même cellule avant l'optimisation. Les paramètres photovoltaïques de la cellule tandem tirés à partir des caractéristiques J(V) de Fig.6.15 sont récapitulés dans le tableau.6.14.

Tableau.6.6. Paramètres photovoltaïques de la cellule tandem CIGS avant et après optimisation.

	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Avant optimisation	1.77	16.89	84.38	25.35
Après optimisation	1.84	18.82	78.54	27.03

La cellule tandem avant l'optimisation présente une densité de courant de court circuit de 16.89 mA/cm², une tension de circuit ouvert de 1.77V, un facteur de forme de 84.38% et un rendement de conversion de 25.35%.

La cellule tandem après l'optimisation présente une densité de courant de court circuit de 18.82mA/cm^2 , une tension de circuit ouvert de 1.84V , un facteur de forme de 78.54% et un rendement de conversion de 27.03% .

IV.4. Réponse spectrale

Fig.6.18 représente les rendements quantiques des sous cellules supérieure et inférieure en fonction de longueur d'onde.

Il en ressort de ces courbes que chaque sous cellule absorbe une partie du spectre solaire. La cellule supérieure à base de CIGS dont le gap est de 1.68eV absorbe les courtes longueurs d'ondes de la zone du visible (0.35 à $0.6\mu\text{m}$) alors que la réponse spectrale de la cellule inférieure à base de CIGS dont le gap est de 1.13eV est décalée par rapport à cellule supérieure vers les longueurs d'ondes grandes de la zone du rouge et du proche infrarouge (0.6 à $1.1\mu\text{m}$). Il en résulte une meilleure exploitation du spectre solaire par la cellule tandem.

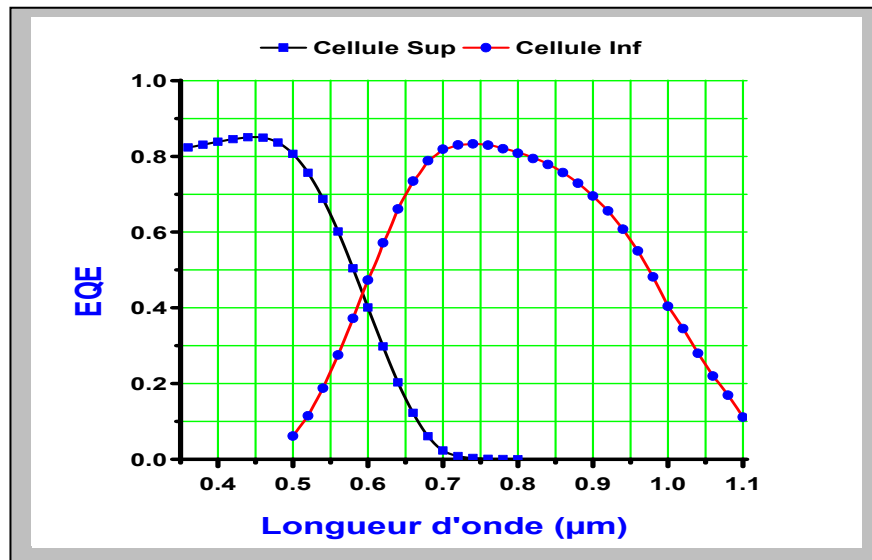


Fig.6.18. Courbes de rendements quantiques de cellules inférieure et supérieure à base CIGS en fonction de la longueur d'onde.

V. Conclusion

L'outil Atlas-Silvaco est notre simulateur pour mener cette étude de cellules solaires à double hétérojonctions à base de Sélénium de Cuivre, Indium et de Gallium (CIGS), dans le but d'optimiser les performances de la structure simulée. En premier temps, les sous cellules (supérieure et inférieure) sont simulés individuellement. Les paramètres de sortie sont comparés aux autres résultats publiés dans la littérature.

Un rendement de 18.48% et 22.69% ont été trouvé respectivement pour la cellule supérieure et la cellule inférieure, ce qui présente un bon accord avec les résultats obtenus par les auteurs [3, 9] et [3, 10, 11].

Nous avons étudié ensuite, l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS et sa bande interdite pour chacune des sous cellules dans le but d'optimiser les performances de la cellule tandem CGIS/CIGS.

Une épaisseur de 0.18 μm et 3.2 μm respectivement de la couche absorbante CIGS pour la cellule supérieure et inférieure, ainsi qu'une combinaison de bande interdite de 1.68eV pour la cellule supérieure et de 1.13eV pour celle inférieure peut être considéré comme une meilleure configuration de la structure de la cellule solaire tandem étudiée.

Cette structure donne un rendement de 27.03% qui est plus grand par rapport au celui de la même structure avant l'optimisation (25.35%).

Références bibliographiques

- [1] Atlas User's Manual, Device simulation software, SILVACO International, California. 2012.
- [2] Santiago Torres-Jaramillo, all "Optimizing two and four-terminal CuGaSe₂ CuInGaSe₂ tandem solar cells for achieving high efficiencies" *Optik International Journal for Light and Electron Optics* 175 (2018) 71–77.
- [3] Fotis, Konstantinos "Modeling and simulation of a dual-junction CIGS solar cell using Silvaco ATLAS" Thèse de Doctorat, Université Naval post-graduate school, Monterey California, Année 2012.
- [4] Jonas Pettersson "Modelling band gap gradients and Cd-free buffer layer in CIGS solar cells" Uppsala University, Année 2012.
- [5] Kang Luo, all "Theoretical simulation of performances in CIGS thin-film solar cells with cadmium-free buffer layer" *Journal of Semiconductors*, Vol. 38, No. 8, August 2017.
- [6] M. Gloeckler, all "Numerical modeling of CIGS and CdTe solar cells setting the baseline" 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion May 11-18.2003 Osokn. Japan.
- [7] Philip Jackson, all "Properties of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with new record efficiencies up to 21.7%" *Phys. Status Solidi RRL* (2014) 1–4.
- [8] Lindahl, J "Atomic layer deposition of zinc tin oxide buffer layers for Cu(In,Ga)Se₂ solar cells" Uppsala University, Année 2015.
- [9] Martin A. Green, all "Solar cell efficiency tables (Version 53)" *Prog Photovolt Res Appl.* 2019; 27:3–12.
- [10] M. Elbar, S. Tobbeche "Numerical simulation of CGSCIGS single and tandem thin-film solar cells using the Silvaco-Atlas software" *Energy Procedia* 74 (2015) 1220 – 1227.
- [11] Jiyon Song, all " Modeling and Simulation of a CGS/CIGS Tandem Solar Cell" 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion , Osaka, Japan, May 11- 18, Vol. 1, pp. 555 - 558 (2003).

Conclusion

générale

Conclusion générale

Ce présent travail est focalisé sur l'étude par simulation numérique, d'une cellule solaire monolithique, à double hétérojonctions, à base de CIGS, dans le but de concevoir une structure optimale, donnant le meilleur rendement électrique possible. La simulation numérique s'est faite à l'aide du simulateur bidimensionnel Atlas-Silvaco.

De ce fait, une étude bibliographique a été effectuée, afin de nous permettre de mieux comprendre le sujet de notre étude. Au premier temps, nous avons rappelé quelques notions de bases sur le rayonnement solaire, ainsi que la théorie des cellules solaires conventionnelles.

Nous avons survolé l'état de l'art sur la technologie des cellules photovoltaïques et les différentes contraintes, qui causent les pertes pouvant influencer les performances d'une cellule photovoltaïque.

Nous avons consacré ensuite une étude plus ou moins détaillée, sur les cellules solaires en couches minces, à base de CIGS.

La partie technologique et une présentation récente sur les cellules solaires à multijonctions a été traitée, par une synthèse des différentes techniques, technologies et records concernant les performances et le rendement de ce type de photopiles.

Une partie de ce travail a été consacré à la présentation relativement détaillée sur le logiciel de simulation Atlas-Silvaco.

Enfin, notre étude s'achèvera par une dernière partie, qui présentera et traitera nos résultats issus de la simulation numérique de la structure étudiée, par le biais du simulateur Atlas-Silvaco. En premier lieu, Nous avons commencé par modéliser et simuler individuellement les sous-cellules, afin d'assurer leur bon fonctionnement avant de les mettre en œuvre dans une structure tandem. Un rendement de conversion de 22.69% a été obtenu pour la cellule inférieure étudiée individuellement, ce qui a trouvé un bon accord avec ceux publiés par [3, 9]. En ce qui concerne la cellule supérieure, une similitude de son rendement de conversion de 18.98% a été obtenue avec les résultats publiés par les références [3, 10, 11].

En second étape, on effectue une simulation d'une cellule solaire à double hétérojonctions, constituée de deux sous cellules solaires (Tandem); une cellule supérieure à base de CIGS, à large bande interdite ($E_g=1.68\text{eV}$) et une cellule inférieure à base de CIGS, à faible bande interdite ($E_g=1.27\text{eV}$), connectées optiquement et électriquement par une couche ZnO (liaisons électrique et optique avec le contact arrière).

Un rendement de conversion de 25.35% qui été obtenu pour le structure tandem. Il est à observer que les performances de la cellule simple peuvent être améliorées, en utilisant le concept multijonctions ; mais une optimisation de quelques paramètres des sous cellules est nécessaire, afin d'obtenir le meilleur rendement électrique possible fourni par notre cellule finale tandem.

Dans la troisième partie de notre travail, nous avons opté pour l'épaisseur et la bande interdite de la couche absorbante CIGS, des sous cellules comme des paramètres d'optimisation. En premier temps, nous avons traité la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS et sa bande interdite de la cellule inférieure. Ensuite, nous avons optimisé l'épaisseur de la couche absorbante CIGS et sa bande interdite de la cellule supérieure.

Une épaisseur de 3.2 μm de le couche absorbante CIGS pour la cellule inférieure, et de 0.18 μm pour celle la cellule supérieure et une bande interdite de 1.13eV de le couche absorbante CIGS pour la cellule inférieure, et de 1.68eV pour celle la cellule supérieure.

Ces performances obtenues après une simulation avec tous ces paramètres physiques et une bonne modélisation, nous ont permis de maximiser le meilleur rendement possible qui est de 27.03% fourni par notre structure tandem.

Perspectives

En proche vision, nous proposons d'étudier l'influence de la jonction tunnel sur les performances de la cellule solaire monolithique à double hétérojonctions à base CIGS, et l'optimisation des paramètres essentiels tels que son épaisseur et dopage.

Cela se fait par une continuité de notre travail utilisant toujours le simulateur Atlas-Silvaco et autre, nous utilisons pour cela, le modèle NLBBT adopté par notre simulateur afin de modéliser cette jonction.

Une autre perspective est d'utiliser une autre couche pour notre photopile pour constituer un tandem triple-hétérojonction ; ceci pour pousser les limite de cette technologie à exploiter le maximum du spectre solaire.

ABSTRACT

Thin-film solar cells based CIGS have attracted more attention recently in the photovoltaic applications, thanks to their interesting electrical properties. Indeed, the efficiency of these solar cells has exceeded 22% in recent years. One of the reasons that limit the improvement of this efficiency is losses due to thermalization and not absorption. In this context, another concept has been developed, called multi-junction cells, which are based on multi-spectral conversion, leading to better exploitation of the solar spectrum.

Our work focused around this axis, a simulation and optimization using an Atlas-Silvaco simulator, of a monolithic double junction solar cell in CIGS/CIGS in order to design a structure with optimal electrical efficiency and deduce the optimal photovoltaic parameters has been performed.

Firstly, a simulation of two sub-cells cells was done individually, and compared them with other results reported in the literature, in order to test and validate the precision of the models and simulation parameters used. Secondly, optimization of the CIGS absorbent layer thickness and its band Gap for each of the sub-cells, in order to obtain the best configuration of the tandem solar cell structure, giving the best possible conversion efficiency has been done.

The best CIGS/CIGS tandem solar cell configuration has present a short circuit current density of 18.82mA/cm², an open-circuit voltage of 1.84V, a fill factor of 82.54% and conversion efficiency of 27.03%. This corresponds to the optimal thicknesses of 0.18μm and 3.2μm respectively for the CIGS absorbent layer of the top and bottom cell, while a good combination band Gap of 1.68eV and 1.13eV was obtained respectively, for the CIGS absorbent layer of the top and bottom cell.

Keywords: Tandem solar cell, chalcopyrite, monolithic, CIGS.

ملخص

لقد جذبت الخلايا الشمسية المكونة من الطبقات الرقيقة (CIGS) الاهتمام الكبير في الآونة الأخيرة في التطبيقات الكهروضوئية، و ذلك بفضل خصائصها الكهربائية الجيدة. حيث تجاوز مردودها 22% في السنوات الأخيرة. ولكن من بين الأسباب التي تعيق تحسين هذا المردود هو عدم الاستغلال الكامل لطيف الشمس. في هذا السياق ، تم تطوير مفهوم آخر ، يسمى الخلايا متعددة الوصلات ، والتي تقوم على التحويل متعدد الأطياف ، مما يؤدي إلى استغلال أفضل للطيف الشمسي. يدور عملنا حول هذا المحور ، وهو محاكاة وتحسين باستخدام التطبيقية (Atlas) ، خلية شمسية مزدوجة الوصلات متجانسة في CIGS / CIGS من أجل تصميم خلية كهربائية مثالية واستنباط المعلمات الكهروضوئية المثلى.

أولاً ، تم إجراء محاكاة لخليتين من الخلايا الفرعية بشكل فردي ومقارنتهما بنتائج أخرى تم نشرها في المجالات العلمية من أجل التحقق من دقة النماذج ومعايير المحاكاة المستخدمة. ثانياً ، تم تحسين سمك طبقة ماصة CIGS ونطاقها الفجوة لكل من الخلايا الفرعية من أجل الحصول على أفضل تكوين لهيكل الخلايا الشمسية الترادفية مما يوفر أفضل كفاءة تحويل ممكنة.

أفضل خلية الشمسية الترادفية CIGS/CIGS تعطي كثافة تيار دائرة كهربائية قصيرة تبلغ 18.82ملم امبر/سم² ، فرق كمزن دائرة كهربائية مفتوحة 1.84 فولت ، عامل تعبئة 82.54% وكفاءة تحويل 27.03% . هذا يتوافق مع السمك المثالي 0.18ميكرومتر و 3.2ميكرومتر على التوالي لطبقة CIGS الماصة للخلية العلوية والسفلية ، في حين تم الحصول على فجوة نطاق جيد من 1.68الكترفولت و 1.13الكترفولت على التوالي لطبقة CIGS الماصة من الأعلى والأسفل.

كلمات البحث: الخلايا الشمسية الترادفية ، الكالكوبرايت ، متجانسة ، CIGS