



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : Électrotechnique

OPTION : Energies renouvelables en électrotechniques

Thème

**Etude et simulation d'une nouvelle structure
des cellules photovoltaïque à base de CZTSSe
(Cu(In,Ga)Se₂(CIGS)/Cu₂ZnSn(S,Se)₄(CZTSSe)
CdS/ZnO par SCAPS-1D**

Réalisé par :

Naama Tahar

Dada Kada

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
VILBOIS Leila Amal	MAA	Président
BELAKHDAR Aissa	MCB	Examineur
SELMANE Naceur	MCA	Encadreur
BIRANE Mouhoub	MCA	Co-Encadreur

Promotion : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant tout, Nous remercions Allah le tout puissant qui nous a données la force, la volonté et le courage Pour réaliser ce Modest travail Nous remercions notre encadreur

Dr.SELMANE Naceur Et Co-Encadreur Dr.MOUHOUB Birane Enseignants à l'université de Thelidji Ammar Laghouat Pour nos avoir guide dans ce travail. Nous remercions tous les membres de jury qui ont accepté d'examiner ce modeste travail. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Notre parents pour leur soutien, la confiance, leur encouragement à tous les moments

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail :

A nos très chers parents.

A nos très chers frères et sœurs.

A tous les amies.

Naama Tahar

Dada Kada

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Listes des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Listes des symboles et abréviations	x
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires	4
I.1. Introduction	4
I.2. Energie solaire	4
I.3. Rayonnement solaire	4
I.3.1. Rayonnement direct.....	5
I.3.2. Rayonnement diffus	5
I.3.3. Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol	6
I.3.4. Rayonnement global.....	6
I.4. Masse d'air	7
I.5. Spectre de référence	8
I.6. L'effet photovoltaïque	9
I.6.1. Principe de fonctionnement de la cellule solaire	9
I.7. Les caractéristiques de la cellule solaire	10
I.7.1. Courant de court-circuit	10
I.7.2. Tension de circuit-ouvert.....	11
I.7.3. Puissance électrique.....	11
I.7.4. Facteur de forme.....	12
I.7.5. Rendement de conversion	12
I.7.6. Réponse spectrale	12
I.7.7. Rendement quantique.....	13
I.8. Matériaux photovoltaïques	13
I.9. Différent type de dopage	14
I.9.1. Semiconducteur dopé n.....	14
I.9.2. Semiconducteur dopé p.....	15
I.10. La jonction P-N	15
I.11. Différentes technologies photovoltaïques	15
I.11.1. Première génération.....	15
I.11.1.1. Le silicium monocristallin	15
I.11.1.2. Le silicium polycristallin.....	16
I.11.2. Deuxième génération	17

I.11.2.1. Le silicium amorphe	18
I.11.2.2. Le tellure de Cadmium (CdTe)	18
I.11.2.3. Les chalcopyrites I-III-VI2.....	18
I.11.3. Troisième génération.....	18
I.12. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque[10].....	19
I.12.1. Les avantages.....	19
I.12.2. Les inconvénients	19
I.13. Conclusion	21
Chapitre II : Cellule solaire photovoltaïque à base de CZTSSe.....	23
II.1. Introduction.....	24
II.2. Les couches minces	24
II.2.1. Définition d'une couche mince	24
II.2.2. Propriétés des couches minces	24
II.2.3. Applications des couches minces	25
II.2.4. Principe de dépôt de couches minces	25
II.2.5. Techniques de dépôt des couches mince	26
II.2.5.1. Dépôt en phase vapeur physique (PVD).....	26
II.2.5.1.a) Evaporation thermique.....	27
II.2.5.2. Dépôt en phase vapeur chimique (CVD)	27
II.2.5.2.a) Spray pyrolyse	28
II.2.6. Méthodes de préparation de couches minces de Cu ₂ -II-IV-S ₄	29
II.3. Hétérojonction	29
II.4. Les cellule solaire à base CZTS	29
II.5. Les propriétés de CZTS.....	30
II.5.1. Propriétés électriques	31
II.5.2. Propriétés optiques	33
II.6. Fabrication d'une cellule à base de Cu₂ZnSnS₄.....	35
II.6.1. La couche absorbante.....	36
II.6.2. La couche tampon	36
II.6.3. La couche d'oxyde transparent conducteur (TCO)	37
II.7. Conclusion	38
Chapitre III : Simulation d'une cellule solaire Photovoltaïque à base de CZTSSe	40
III.1. Introduction.....	41
III.2. Equations fondamentales dans les semiconducteurs	41
III.2.1. Equation de Poisson	42
III.2.2. Equations de continuité.....	42
III.2.3. Equations de transport	43
III.3. Simulation des cellules solaires	45
III.3.1. Simulation	45
III.3.2. Logiciel de simulation	45
III.4. Utilisation du logiciel SCAPS	46

III.4.1. Lancer SCAPS.....	47
III.4.2. Définir le problème.....	47
III.4.3. Définir le point de fonctionnement.....	48
III.4.4. Sélection des caractéristiques à simuler.....	49
III.4.5. Lancer le calcul.....	49
III.4.6. Afficher les courbes simulées :.....	49
III.4.7. Les courbes I-V.....	50
III.5. Définition d'une cellule solaire :	51
III.5.1. Edition de la structure d'une cellule solaire:.....	51
III.5.2. Contacts :	52
III.5.3. Définition des couches :	53
Chapitre IV : Résultats et discussions	57
IV.1. Introduction	58
IV.2. Structure de la cellule étudiée	58
IV.2.1. La couche absorbante	59
IV.2.2. La couche tampon.....	59
IV.2.3. La couche fenêtre.....	60
IV.3. Paramètres physiques utilisés dans la simulation.....	60
IV.4. Résultats et discussion.....	61
IV.4.1. Influence de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à l'aide de CIGS uniquement.....	61
IV.4.1.1. Optimisation de l'épaisseur de la couche CdS.....	61
IV.4.1.2. Optimisation de l'épaisseur de la couche ZnO	64
IV.4.1.3. Optimisation de l'épaisseur de la couche CIGS.....	66
IV.4.2. Influence du dopage de chaque couche sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à l'aide de CIGS uniquement	68
IV.4.2.1. Optimisation du dopage de la couche en CdS.....	69
IV.4.2.2. Optimisation du dopage de la couche ZnO	71
IV.4.2.3. Optimisation du dopage de la couche en CIGS.....	73
IV.4.2.4. Optimisation de l'épaisseur de la couche CZTSSe.....	75
IV.4.2.5. Optimisation du dopage de la couche en CZTSSe	77
IV.4.3. Influence de la température sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.....	79
IV.4.4. Influence de la résistance série sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire....	81
IV.5. Les résultats de la simulation après l'optimisation des couches	83
IV.6. Conclusion	85
Conclusion générale.....	109

Listes des figures

N° de figure	Titre	Page
I.1	Le Soleil (document SOHO-EIT/ ESA-NASA).	21
I.2	Analyse spectrale du rayonnement solaire.	23
I.3	Types de rayonnement solaire reçus au sol.	24
I.4	Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.	24
I.5	Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre.	25
I.6	Spectre solaire AM1.5 .	26
I.7	Effet photovoltaïque.	27
I.8	représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.	27
I.9	le photon incident crée une paire électron / trou.	28
I.10	Courbe courant-tension d'un photogénérateur.	30
I . 11	Les rendements en fonction de l'énergie du gap des matériaux.	32
I. 12	Jonction métallurgique (PN).	34
I. 13	panneau-solaire-monocristallin-polycristallin.	35
I.14	Les deux catégories des cellules solaire PV à base de wafer et les couches.	35
I.15	Pourcentage de marché des couches minces.	37
I. 16	Meilleure recherche - Tableau d'efficacité des cellules.	38
II.1	Techniques de dépôt des couches minces .	47
II.2	Méthodes de chauffages en évaporation thermique sous vide.	48
II.3	Schéma de principe de dépôt chimique en phase vapeur.	49

II.4	Structure Kasterite dans laquelle CZTS se cristallise. Elle est dérivée de la structure sphalerite par dupliquer la cellule unitaire.	52
II.5	La variation de la résistivité en fonction du rapport Cu/ (Zn+Sn) .	55
II.6	Spectre typique de transmittance d'une couche mince de CZTS.	56
II.7	Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de Cu_2ZnSnS_4 .	58
III.1	Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.	71
III.2	Définir le problème.	72
III.3	Le point de fonctionnement .	73
III.4	Panneau de illumination .	73
III.5	Panneau des bandes d'énergie.	75
III.6	Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairage.	76
III.7	Définition de la structure d'une cellule solaire.	77
III.8	Panneau des propriétés des contacts .	78
III.9	Propriétés de la couche ajoutée.	80
III.10	Propriétés des dopages définis.	80

III.11	Modèle de l'absorption.	80
III.12	Définition des types de recombinaison présents.	81
IV.1	vue schématique des cellules solaires CIGS, (b) vue schématique de la structure CZTSSe/ CIGS.	86
IV.2	a) JCC en fonction de la tension. b) JCC & VCO en fonction de l'épaisseur de la couche tampon CdS. c) Rendement & FF en fonction de l'épaisseur de la couche tampon CdS.	91
IV.3	a) JCC en fonction de la tension. b) JCC & VCO en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO. c) Rendement & FF en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO.	93
IV.4	a) JCC en fonction de la tension. b) JCC & VCO en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS. c) Rendement & FF en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS.	96
IV.5	a) JCC en fonction de la tension. b) JCC & Voc en fonction du dopage de la couche CdS , c) Rendement & FF en fonction du dopage de la couche CdS.	99

IV.6	<p>a) JCC en fonction de la tension.</p> <p>b) JCC & VCO en fonction du dopage de la couche ZnO .</p> <p>c) Rendement & FF en fonction du dopage de la couche ZnO.</p>	101
IV.7	<p>a) JCC en fonction de la tension.</p> <p>b) JCC & VCO en fonction du dopage de la couche CIGS.</p> <p>c) Rendement & FF en fonction du dopage de la couche CIGS.</p>	103
IV.8	<p>a) JCC en fonction de la tension.</p> <p>b) JCC & VCO en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSSe.</p> <p>c) Rendement & FF en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSSe.</p>	106
IV.9	<p>a) JCC en fonction de la tension.</p> <p>b) JCC & VCO en fonction du dopage de la couche CZTSSe .</p> <p>c) Rendement & FF en fonction du dopage de la couche CZTSSe.</p>	108
IV.10	<p>a) JCC en fonction de la tension.</p> <p>b) JCC & Voc en fonction de la température.</p> <p>c) Rendement & FF en fonction de la température.</p>	110
IV.11	<p>a) JCC & VCO en fonction de la résistance série R_s,</p> <p>b) Rendement & FF en fonction de la résistance série R_s.</p>	112
IV.12	la caractéristique J-V de cellule à base de CZTSSe sous l'éclairement AM1.5.	115

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
II.1	Les propriétés électriques des composes CZTSSe	54
IV.1	Les paramètres physiques d'entrée pour les matériaux des couches ZnO, CdS, CZTSSe et CIGS [4,15, 16,17].	88
IV.2	Effet de l'épaisseur de la couche CdS sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CZTSSe.	89
IV.3	Effet de variations de l'épaisseur de la couche ZnO sur les caractéristiques électriques de la cellule PV à base de CZTSSe.	92
IV.4	Effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CZTSSe.	94
IV.5	Les valeurs optimales de l'épaisseur pour chaque couche.	97
IV.6	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales de l'épaisseur de chaque couche.	97
IV.7	L'influence du dopage de la couche CdS sur les performances de la cellule photovoltaïque.	98
IV.8	L'influence du dopage de la couche ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque.	100

IV.9	L'influence du dopage de la couche CIGS sur les performances de la cellule photovoltaïque.	102
IV.10	Effet de l'épaisseur de la couche CZTSSe sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	105
IV.11	Effet du dopage de la couche CZTSSe sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	107
IV.12	Effet de la température sur les caractéristiques électrique de la cellule solaire.	109
IV.13	Effet de la résistance série (RS) sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.	111
IV.14	Comparaison avec des autres résultats de simulation.	113

Listes des symboles et abréviations

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
E	Energie.
$E(x)$	Champ électrique.
Eg	Largeur de la bande interdite (gap).
$\rho(x)$	Densité de charges électriques
$\alpha(\lambda)$	Coefficient d'absorption.
$G(\lambda, x)$	Taux de génération des paires électron-trous
$E_{cl}(\lambda)$	Eclairement solaire au sol
$F(\lambda)$	Flux solaire au sol
n, p	Concentration des électrons et des trous respectivement
n_0, p_0	Concentration des électrons et des trous à l'équilibre respectivement
j_n, j_p	Densité de courant des électrons et des trous respectivement
j_s	Densité de courant de saturation inverse
J_{ph}	Densité de courant de photo génération
J	Densité de courant de sortie de la cellule
J_{sc}	Courant de court circuit
$\tau_n \tau_p$	Durée de vie des électrons et des tous respectivement
μ_n, μ_p	Mobilité des électrons et des trous respectivement
D_n, D_p	Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement
L_n, L_p	Longueur de diffusion des électrons et des trous respectivement
L_c	Longueur de collection effective
L_{in}, L_{ip}	Longueur de diffusion effective des électrons et des trous respectivement.

N_A, N_D	Concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs respectivement
U_n, U_p	Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement
T	Température de la cellule
Q	Facteur de qualité
n_i	Concentration intrinsèque
S_n, S_p	Vitesse de recombinaison des électrons et des trous à la surface respectivement
$\epsilon, \epsilon_0,$	Permittivité du vide, permittivité relative et permittivité totale respectivement
$R(\lambda)$	Coefficient de réflexion
λ_{min}	Longueur d'onde du spectre solaire minimale
λ_{max}	Longueur d'onde du spectre solaire maximale
R_s	Résistance série
R_{sc}	Résistance parallèle
q	Charge de l'électron
$U_t = KT/q$	Potentiel thermodynamique
V_d	Potentiel de diffusion
V	Tension de sortie de la cellule.
V_{co}	Tension de circuit ouvert
FF	Facteur de forme
$SR(\lambda)$	Réponse spectrale
η	Rendement de conversion
P_m	Puissance maximale

$N(E)$	Densité des états
x_{czts}	Epaisseur de la couche CZTS
x_{cds}	Epaisseur de la couche CdS
x_{zno}	Epaisseur de la couche ZnO
PV	photovoltaïque
c-Si	Le silicium cristallin
a-Si	Le silicium amorphe
CIGS	$CuIn_xGa_{1-x}Se_2$
CZTSSe	$Cu_2ZnSn(S_xSe_{1-x})_4$
CZTS	Cu_2ZnSnS_4
CZTSe	$Cu_2ZnSnSe_4$
AM	La masse d'air
ppm	parties par million
BV	La bande de Valence
BC	La bande de conduction
PVD	Dépôt physique en phase vapeur
TCO	Oxyde conducteur transparent
CdS	Le sulfure de cadmium
ZnO	Oxyde de zinc
EQE	Rendement quantique externe

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'accroissement de la population et le développement industriel ont contribué à accroître les besoins énergétiques mondiaux [1]. L'énergie a toujours été le moteur de l'activité humaine, ou elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement du monde. Cette énergie est actuellement produite à partir de sources fossiles non renouvelables notamment le pétrole, le gaz et le charbon. En effet, la rareté et la pollution provenant de ces sources et la crise énergétique des années 1970 ont conduit les pays très consommateurs d'énergie à chercher des sources alternatives [2]. À l'heure actuelle, de nombreux canaux de recherche se sont donc orientés vers l'exploitation des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire en tant que source abondante et propre, produite par la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique, soit thermique ou PV. L'énergie solaire photovoltaïque est produite par des cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs [3].

Actuellement, plusieurs matériaux solaires ont été utilisés pour la conversion photovoltaïque en raison de leurs propriétés optiques et électroniques [4]. La majeure partie du marché photovoltaïque est basée sur le silicium [5]. Le silicium de première génération utilise le silicium cristallin (monocristallin ou poly-cristallin) comme matériau absorbant [5]. A ce jour, le rendement record de ces cellules est de 26.1% [6]. Au cours des dernières décennies, les couches minces dites de deuxième génération sont des alternatives intéressantes au silicium et sont développées dans le but d'augmenter les rendements et de réduire les coûts de fabrication [7]. Elles ont l'avantage d'avoir des matériaux à bande interdite direct et un coefficient d'absorption plus élevé [8]. Par conséquent, les composés les plus communs pour faire des cellules solaires en couches minces sont le tellure de cadmium (CdTe) et le cuivre d'indium gallium séléniure (CIGS) (le rendement record de 22 %) [5, 7]. Actuellement, le plus grand inconvénient est la rareté et le coût élevé des éléments, tels que l'indium et le gallium, et la toxicité du cadmium, qui ont soulevé des inquiétudes quant aux limites de la production de cellules photovoltaïques. Pour résoudre ces problèmes, de nouveaux matériaux à base d'éléments plus abondants et non toxiques sont nécessaires pour produire des cellules solaires respectueuses de l'environnement [9]. En revanche, les matériaux à base des éléments calogènes ont émergé un grand intérêt dans le domaine photovoltaïque [7].

Pour cela, un grand nombre d'équipes de recherches élaborent d'autres matériaux en couches minces à base des éléments calogènes pour fabriquer des cellules solaires à moindre coût et plus performantes [3]. Dans ce contexte, les calogènes se sont les éléments de 6ème(VI) colonne du tableau périodique des éléments chimiques, parmi eux, on trouve l'oxygène(O), le soufre (S), le sélénium (Se), le tellure (Te) et le polonium (Po) [5]. Actuellement, le CZTSSe ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) est un semi-conducteur quaternaire qui cristallise dans une structure peut être de type kesterite ou stannite [5], fait de cuivre, zinc, étain, et le soufre, ce sont des éléments

non toxiques et abondants dans la croûte terrestre [10]. Ce dernier, il est un candidat prometteur qui possède des propriétés très importantes, il a l'avantage d'avoir une bande interdite directe de 1.5 eV, un coefficient d'absorption plus élevé ($> 10^4 \text{cm}^{-1}$) qui est convenable pour développer des cellules solaires en couches minces [11]. A ce jour, le rendement record pour une cellule réalisée à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ est de 12.6 % [5].

Notre but dans ce travail, est l'étude par simulation d'une cellule solaire à base de CZTSSe avec le simulateur SCAPS-1D dans les conditions standard ($T=25^\circ\text{C}$ et sous illumination de AM 1.5) et fait l'optimisation de quelques paramètres physiques de chaque couche tel que l'épaisseur et le dopage pour l'amélioration du rendement. En outre, l'étude de l'effet de la température sur les paramètres de sortie de la cellule comme la densité de courant de court-circuit (J_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF) et le rendement (η).

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre : on fait rappel aux notions générales sur les cellules solaires photovoltaïques ;
- Le deuxième chapitre : est consacré à la description des techniques les plus sollicitées pour l'élaboration des couches minces en général et le CZTSSe en particulier ;
- Dans le troisième chapitre : nous présenterons les équations du modèle d'une cellule solaire photovoltaïque et le l'outil de simulation SCAPS-1D ;

Dans le dernier chapitre : nous présentons et discutons les résultats obtenus.

Référence

- [1] DARANFED 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 en Science physique , Université de MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 2013.
- [2] OUSSIDHOUM Samira, « Etude comparative des performances des cellules solaire à jonctions simple et multiple », Mémoire de magister, Université MOULOUD MAMMERI Tizi-Ouzou ,2015.
- [3] BOUGUERROUMA Kamel, « Etude des Chalcogénures de métaux de transition (MoS_2 , WS_2 , MoSe_2 , WSe_2) en couches minces pour des applications photovoltaïques. », mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, 2016.
- [4] MENASSEL 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 ELBOUAGHI.
- [5] SLIMANI TLEMCANI Taoufik, « Etude expérimentale de films minces de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ élaborés par électrodéposition et spray ultrasonique : Application à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, université Mohammed V–Rabat MAROK, 2016.
- [6] NERL <http://WWW.nerl.gov/ncpv/images/efficiency-chart.pdf>
- [7] ALPHOUSSEYNI Sagna, « Etude et élaboration par Close-Spaced Vapor Transport(CSVT), d'absorbateurs $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopiles à faible coût.», thèse de doctorat, université de PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2016.
- [8] 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 de ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN.
- [9] TEMGOUA Solange, « Optimisation et compréhension des dispositifs à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x, \text{Se}_{1-x})_4$ pour applications photovoltaïques en couches minces. », Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie , 2016.
- [10] Joël Hervé nkuissi tchognia et al, Performances des cellules solaires à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) : Une analyse par simulations numériques via le simulateur SCAPS, Afrique Science 11(4)(2015),16-23.
- [11] GUITOUNI Samira, « Elaboration et étude de structures à base de couches minces de ZnO et de chalcogénures (CIS, CZTS) pour des applications photovoltaïques », Thèse de doctorat en physique énergétique, université de MENTOURI- Constantine1, 2017.

**CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS
SUR LES CELLULES
SOLAIRES**

I.1.Introduction

À ce sujet, nous allons passer en revue quelques principes fondamentaux dans le domaine photovoltaïque. Nous commencerons par quelques notions sur les sources d'énergie photovoltaïque. À la suite de cela, nous allons sur les semi-conducteurs, la jonction PN, et panneau photovoltaïque, ainsi que de leurs photovoltaïques caractéristiques et un bref aperçu les différentes techniques branches disponibles. Et on termine par les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques.

I.2.Energie solaire

Le soleil est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.



Figure I.1 : Le Soleil (document SOHO-EIT/ ESA-NASA)[1].

L'énergie solaire est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, est gratuite, inépuisable et disponible partout dans le monde.[2]

I.3.Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans une gamme de longueurs d'onde varié entre 100-400 nm. La (Figure I.2) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée au rayonnement solaire se décompose à basé sur les éléments suivants :

- ✚ 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm) ;
- ✚ 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm) ;
- ✚ 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm).

La terrestre atmosphère reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 (kW / m²), en plus ou moins 3% en fonction de la façon dont la mesure la terre se déplace à une distance à partir de ou vers le soleil au cours de sa rotation autour de lui. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m². La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.

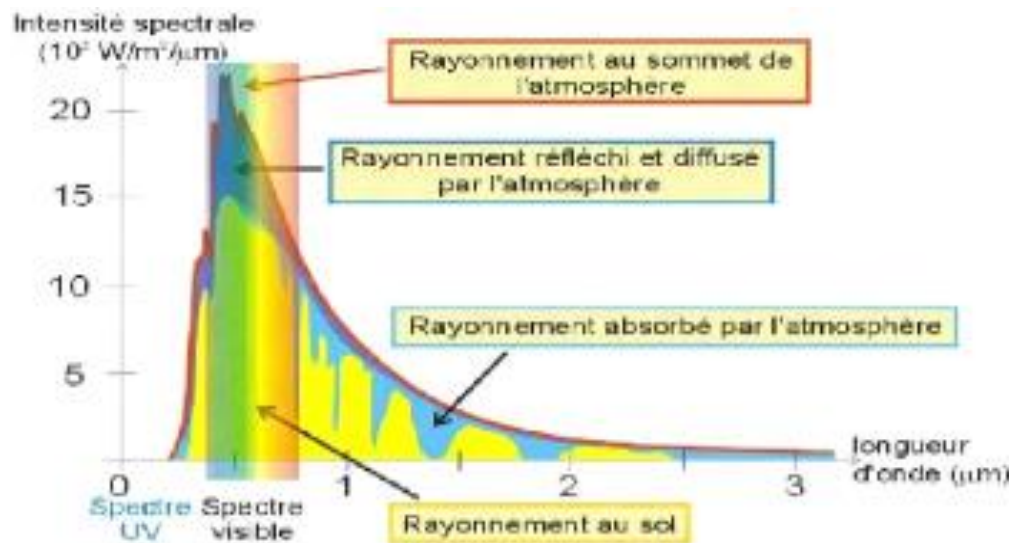


Figure I.2 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [2].

Il y a quatre types de rayonnement:[3]

I.3.1.Rayonnement direct

La conversion du rayonnement direct est un problème trigonométrique. La différence entre le rayonnement global et diffus est représentée par le rayonnement direct sur un plan horizontal.

I.3.2.Rayonnement diffus

Elle est due à l'absorption et la diffusion d'une partie de la global solaire rayonnement par l'atmosphère, comme bien que sa réflexion par les nuages et les aérosols.

I.3.3. Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

I.3.4. Rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol.

Dans la figure ci-dessous figure (I.3) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface Terrestre

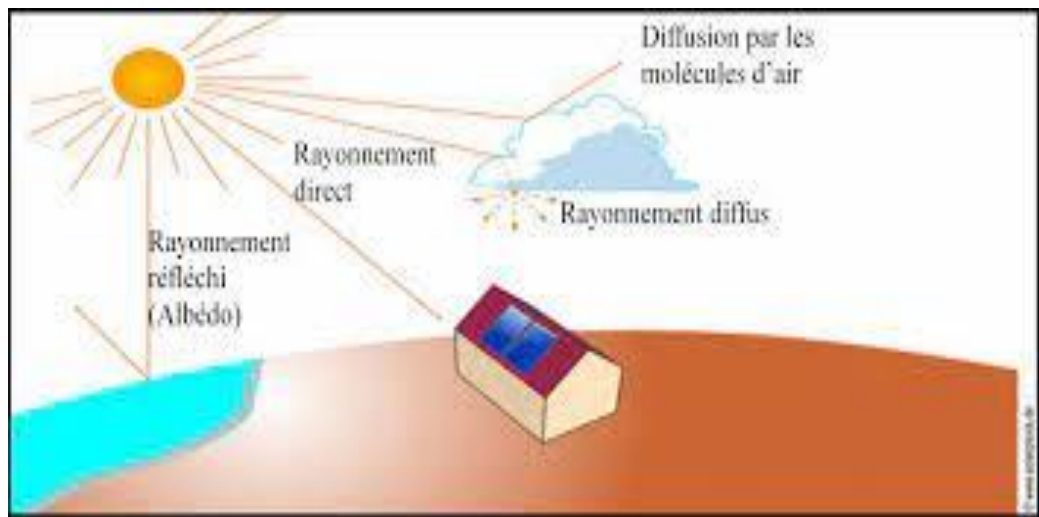


Figure I.3 : Types de rayonnement solaire reçus au sol [2].

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts paramètre carré (W/m^2). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons.

Dans la figure (I.4) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du lever au coucher du soleil.

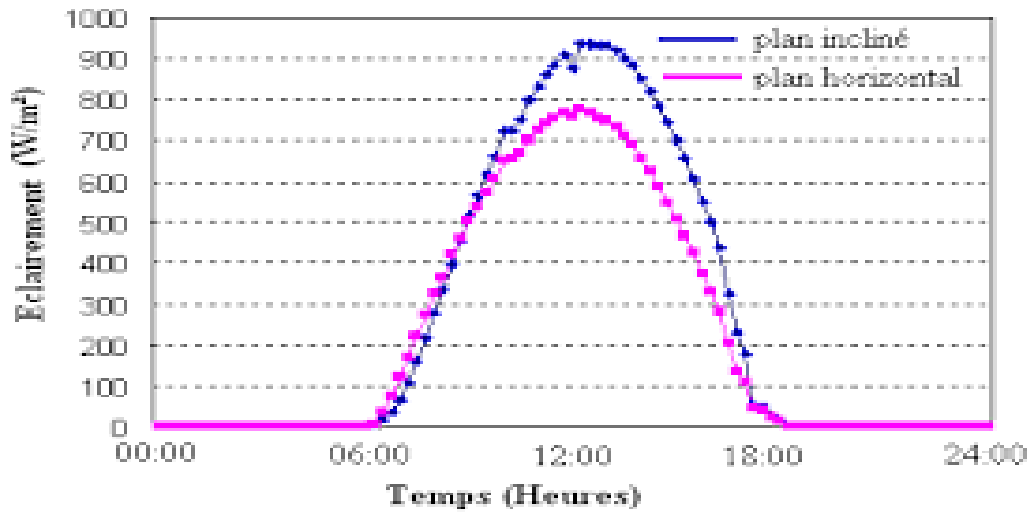


Figure I.4 : Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné [2].

I.4.Masse d'air

Pour tenir compte de la longueur effective parcourue à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct, on introduit la notion de masse d'air (AMx) (Figure I.5). Elle correspond à la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. La masse d'air est exprimée comme un multiple du parcours traversé en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb.

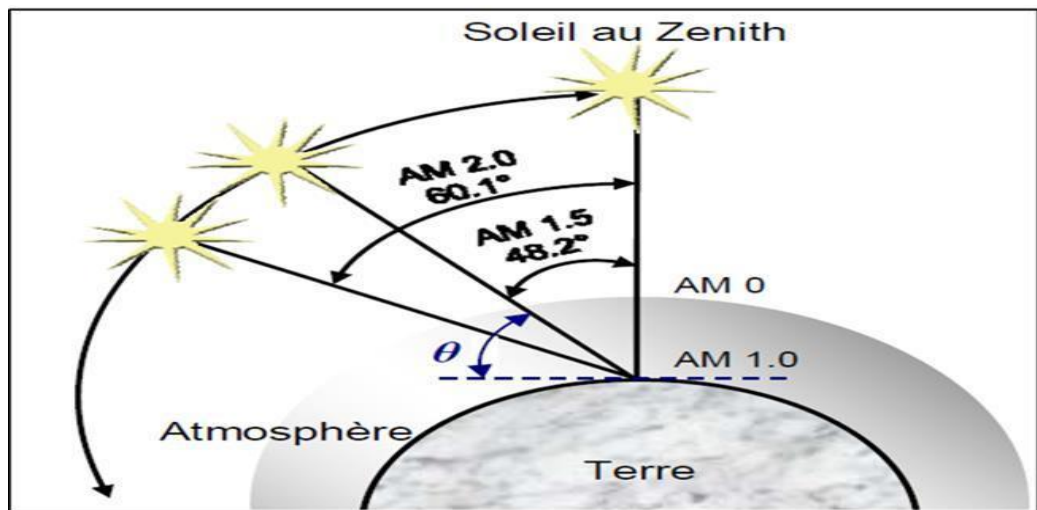


Figure I.5 : Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre [3].

L'équation (1) donne la valeur de la masse d'air à chaque point.

$$AM = \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (\text{I.1})$$

Où l'angle θ est l'élévation solaire, c'est-à-dire l'angle en radian entre le rayonnement solaire et le plan horizontal. Le spectre solaire AM0, correspond à une masse d'air nulle pour un éclairage solaire au-delà de l'atmosphère à incidence normale. Pour un ciel clair avec le soleil à l'aplomb, on a le rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). L'éclairage solaire arrivant sur la terre avec un angle de 48° est de 1000 W/m^2 (soit 100 mW/cm^2) avec une masse d'air AM1.5.

Le spectre solaire AM1.5 est composé de 3~4 % de lumière ultraviolette (< 390 nm), de 45 % de lumière visible (390-750 nm) et de 52 % de lumière infrarouge [proche IR (750-1400 nm) = 38 % et IR Lointain (> 1400 nm) = 14%][4].

I.5.Spectre de référence

Hors atmosphère, l'amplitude et la distribution du spectre du rayonnement solaire sont parfaitement définies. Il n'en est pas de même au niveau du sol ou en raison de multiple paramètres atmosphériques, cette amplitude et cette distribution spectrale peuvent varier. Il est donc nécessaire de définir un spectre de référence, qui puisse être adopté au niveau international pour que des mesures comparatives soient possibles.

Le spectre représenté sur la (Figure I.6) donne en fonction de la longueur d'onde l'irradiance spectrale, c'est-à-dire la puissance associée au rayonnement par tranche de longueur d'onde et par unité de surface.

Ce spectre de référence correspond, à la traversée par le rayonnement d'une couche atmosphérique de référence spectre AM1,5[4].

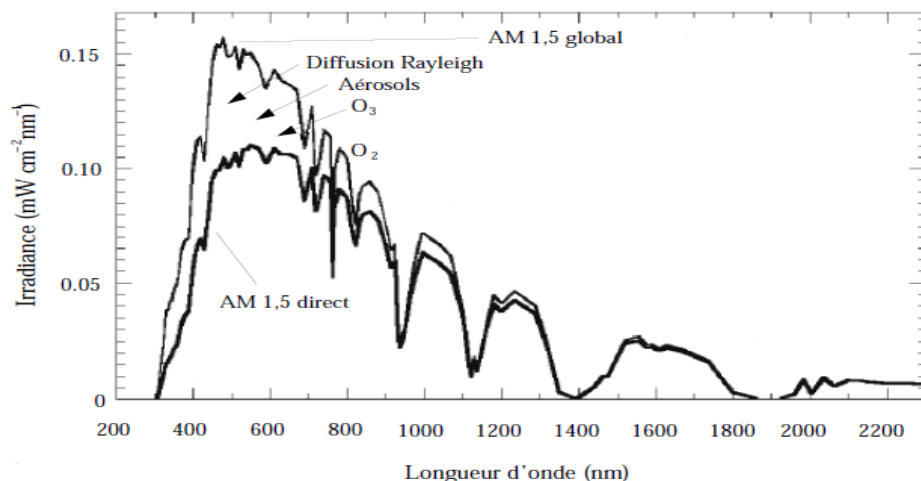


Figure I.6 : Spectre solaire AM1.5[3].

I.6.L'effet photovoltaïque

Quand une jonction est exposée à un rayonnement, des paires-trous avec suffisamment d'énergie peuvent produire une paire d'une alternance d'électrons paires dans les N et P zones.

Ou

$$E = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

En eV.

Quand un paquet de photons « heurte » la cellule, il peut transmettre son énergie aux électrons des semi-conducteurs.[5]

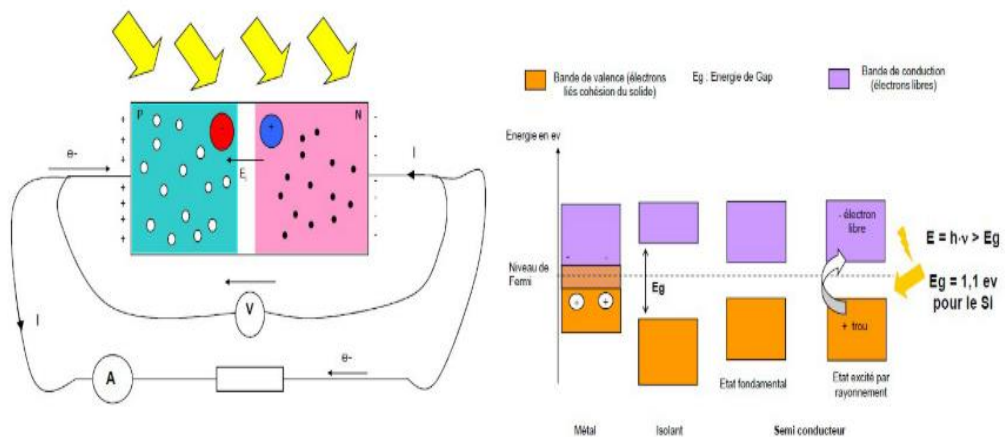


Figure I.7: Effet photovoltaïque [4].

I.6.1.Principe de fonctionnement de la cellule solaire

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés.

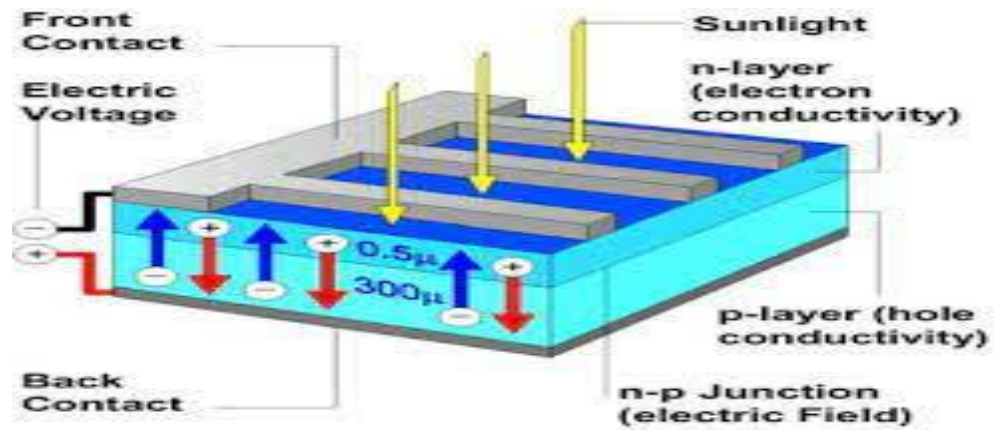


Figure I.8 : représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie ($h\nu$) à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure[6].

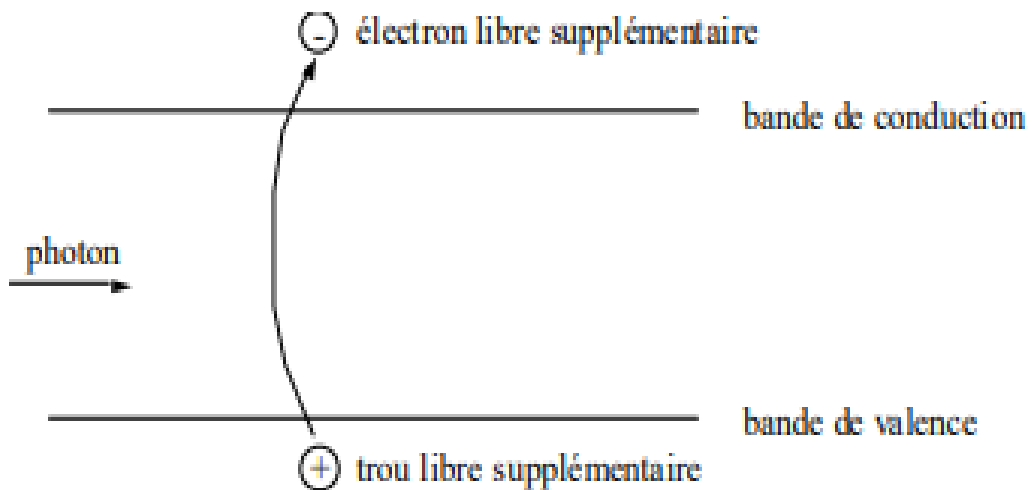


Figure I.9 : le photon incident crée une paire électron / trou [5].

I.7. Les caractéristiques de la cellule solaire

I.7.1. Courant de court-circuit

À l'inverse du point de circuit ouvert, lorsqu'on place le photogénérateur en court-circuit, il débite son courant maximal, mais aucune tension. C'est le courant que l'on peut mesurer en branchement direct sur un ampèremètre [1].

On appelle ce courant maximal à tension nulle courant de court-circuit. C'est-à-dire que : $I_{cc} = (V = 0)$ pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant photovoltaïque I_{ph} .

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (\text{I.3})$$

I.7.2. Tension de circuit-ouvert

La tension de circuit ouvert V_{oc} correspond à un courant nul $I = 0$. La tension de circuit ouvert est exprimée selon l'équation suivante :

$$V_{oc} = \frac{k}{T} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{I.4})$$

Avec :

k : Constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

I.7.3. Puissance électrique

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

En effet, suivant la formule $P = U \times I$, pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit $U \cdot I$ est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m figure (I.10).

On a coutume d'appeler U_m et I_m la tension et le courant correspondant à ce point

$$P_m = U_m \cdot I_m \quad (\text{I.5})$$

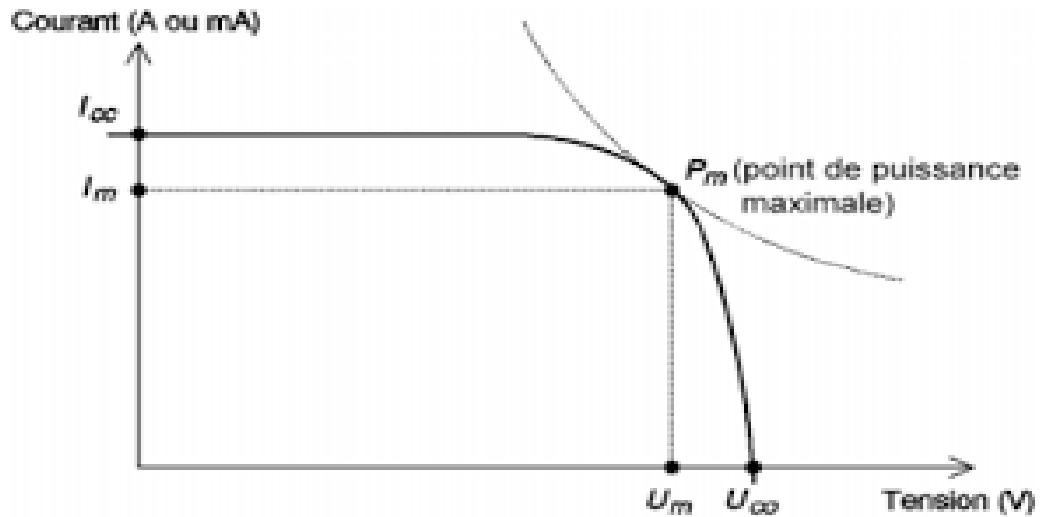


Figure I.10 : Courbe courant-tension d'un photogénérateur [6].

I.7.4. Facteur de forme

Cette puissance est maximale (notée : P_{\max}) pour un point de fonctionnement P_M (I_m, V_m) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{oc}). Ce point P_m est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox , Oy et les droites $x = I_m$ et $y = V_m$ passe par un maximum[7].

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.6)$$

I.7.5. Rendement de conversion

Le rendement, η des cellules PV 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} [7]. Il s'exprime selon l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = FF \frac{V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.7)$$

I.7.6. Réponse spectrale

À réponse spectrale d'une cellule solaire PV c'est l'efficacité de la transformation d'énergie solaire en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau formant la cellule solaire. La réponse spectrale s'exprime selon l'équation suivant :

$$Q(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{e\varphi(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad (\text{I.8})$$

Avec :

$Q(\lambda)$: Réponse spectrale, $\varphi(\lambda)$: Le flux de photon incidents à la même longueur d'onde (m), $J_{sc}(\lambda)$:

La densité du courant de court-circuit, e : La charge élémentaire de l'électron et $R(\lambda)$: Le coefficient de réflexion de la surface frontale.

I.7.7.Rendement quantique

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre de charges électroniques collectées et le nombre de photons incidents sur une surface photo-réactive. Son expression est la suivante :

$$QE(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\varphi_0(\lambda)} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

$J_{ph}(\lambda)$ le photocourant à la longueur d'onde λ , q la charge d'un électron, $\varphi_0(\lambda)$ le flux de photon incident par unité de surface.

On distingue deux types de rendements quantiques dans le cas des cellules solaires. Le rendement quantique externe (EQE), qui prend en compte les effets de pertes optiques (lumière non absorbée ou réfléchi), et le rendement quantique interne qui ne prend pas en compte les phénomènes de réflexion. Grâce à le rendement quantique, il est possible d'avoir accès à l'énergie de bande interdite de l'absorbeur E_g .

I.8.Matériaux photovoltaïques

Plusieurs matériaux peuvent être utilisés dans une cellule photovoltaïque. Le choix du matériau repose sur divers facteurs dont sa capacité d'absorber les photons provenant des rayons solaires. En effets, le rayonnement solaire contient des lumières de différentes longueurs d'ondes. Une partie du spectre solaire, partie qui dépend de la valeur du gap E_g du semi-conducteur, est absorbée et participe à la création de paires "électron-trou". Dans un semi-conducteur, le photon d'énergie adéquate pourra promouvoir un électron de la bande de valence (BV) vers la bande de conduction (BC). Cette transition génère deux types de porteurs, les électrons de conduction, et des trous. Ces paires (électron-trou) d'énergie E_g pourront servir à générer un courant avant leur recombinaison. Le paramètre prédominant dans le choix d'un semi-conducteur pour la conversion photovoltaïque est donc la largeur de sa bande interdite E_g . Bien entendu, d'autres paramètres vont intervenir dans ce choix. Sur la

figure(I.11), nous montrons à titre d'illustration le rendement en fonction de l'énergie de gap de quelques matériaux semi-conducteurs[8].

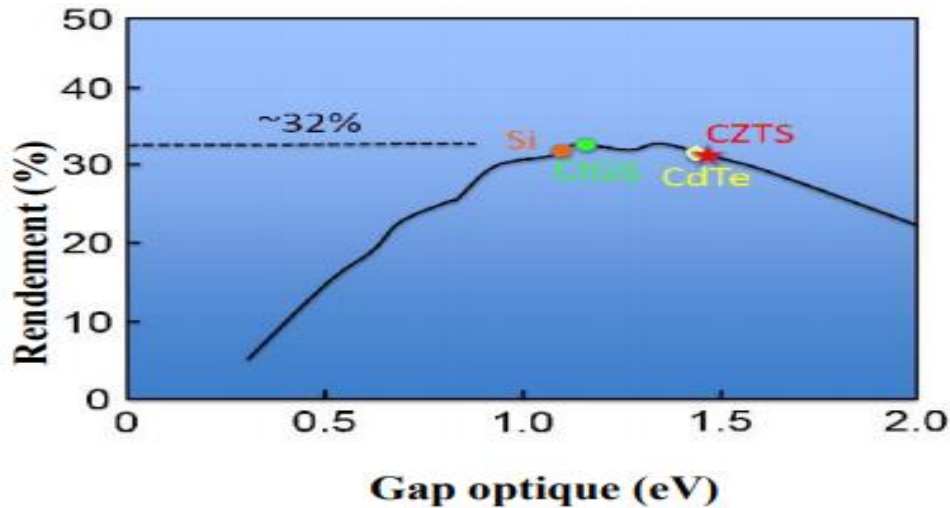


Figure I.11 : Les rendements en fonction de l'énergie du gap des matériaux [9].

Un semi-conducteur est un corps non cristallin non conducteur à l'état pur, mais susceptible de conduire de l'électricité suite à un traitement spécifique, le dopage. Cette semi-conduction est obtenue en introduisant des impuretés, par dopage n (pour négatif) ou p (pour positif) : cela augmente la conductivité des semi-conducteurs.

Ce traitement est utilisé dans le cas du silicium qui est à la base des cellules photovoltaïques qui constituent les panneaux solaires. La conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celles des métaux (bons conducteurs) et celle des isolants[9].

I.9. Différent type de dopage

Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels ; Ils servent de base aux semi-conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés pour Modifier leur comportement. Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques[10].

I.9.1. Semiconducteur dopé n

Matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est Largement supérieure à la concentration en trous. La concentration de donneurs sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs ($N_D - N_A > 0$). Ce qui correspond à la définition d'un semi-conducteur dopé n.

À la température ambiante pratiquement, tous les donneurs sont ionisés et si la concentration en atomes donneurs est N_d , la densité de porteurs libres du semiconducteur sera : $n = n_0 + N_D$

Où est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

I.9.2.Semiconducteur dopé p

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électrons. La concentration d'accepteurs sera donc supérieure à la concentration de donneurs ; ($N_A - N_D > 0$)[10].

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé p, la concentration en trous du semiconducteur sera : $P = P_0 + N_A$

I.10.La jonction P-N

Une jonction PN est formée par la juxtaposition d'un semi-conducteur dopé type P (appelé anode) et d'un semi-conducteur dopé type N (appelé cathode), tous les deux d'un même monocristal semi-conducteurs, (Figure I.12). Lorsque ces deux types de semi-conducteurs sont mis en contact, un régime électrique transitoire s'établit de part et d'autre de la jonction, suivi d'un régime permanent. Une jonction simple forme une diode[11].

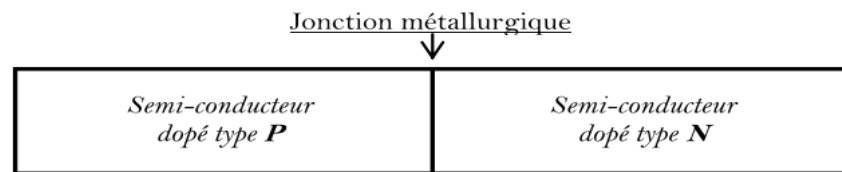


Figure I.12 : Jonction métallurgique (PN)[11].

I.11.Différentes technologies photovoltaïques

Parmi les différentes technologies de la production d'énergie disponibles, le photovoltaïque apparaît comme la voie la plus propre qui utilise la source la plus abondante et durable. Historiquement, il existe trois générations de cellules photovoltaïques. [12]

I.11.1.Première génération

Actuellement, la grande majorité (plus de 85% du marché) des cellules solaires commercialisées sont à base de silicium. La filière silicium correspond à la première génération des cellules solaires qui utilisent le silicium cristallin (monocristallin ou polycristallin) comme matériau absorbeur

I.11.1.1.Le silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées sur le marché de l'énergie photovoltaïque. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un obstacle et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium polycristallin.

1.11.1.2. Le silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. Elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 11 et 15% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles que les cellules monocristallines.



Figure I.13 : panneau-solaire-monocristallin-polycristallin [12].

La réduction du coût de fabrication des cellules photovoltaïques est la principale raison pour laquelle les cellules en couches minces ont vu le jour. La réduction de matière utilisée est un avantage clé pour les filières des couches minces. La figure (I.14) présente la structure spécifique des différents types de cellules solaires.

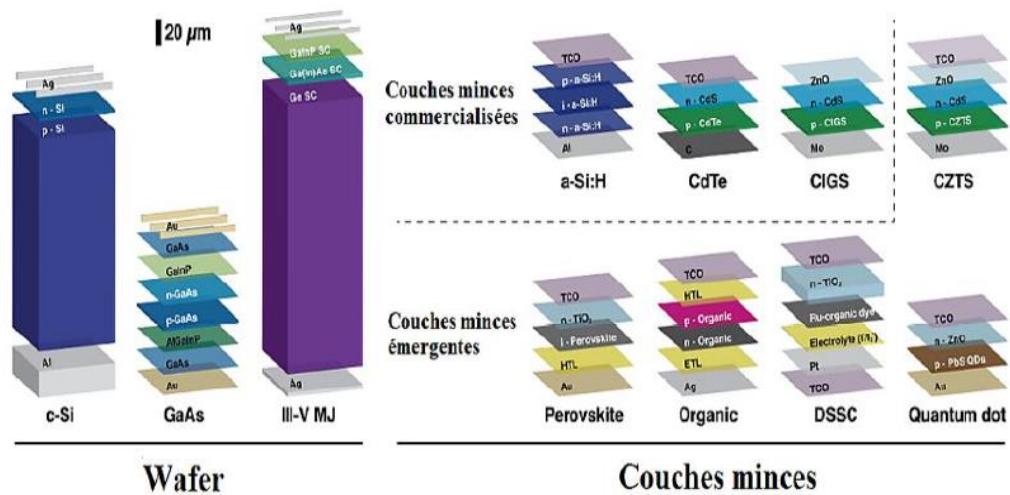


Figure I.14 : Les deux catégories des cellules solaire PV à base de wafer et les couches [12].

I.11.2. Deuxième génération

La technologie des couches minces représente une alternative prometteuse à la technologie cristalline, elles ont l'avantage du moindre coût par rapport à celle du silicium cristallin en raison de plusieurs facteurs, tels que les faibles consommations de matière et d'énergie lors de leurs fabrications. Bien que leur part du marché soit faible aujourd'hui les perspectives de croissance sont prometteuses.

Par principe, une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques "µm". Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques.

Les technologies photovoltaïques en couches minces offrent plusieurs avantages :

- ✚ Elles utilisent souvent des matériaux semi-conducteurs qui ont une bande interdite directe, et donc ont des coefficients d'absorption très élevés. Par conséquent, seule une faible épaisseur, généralement de quelques micromètres est suffisante pour absorber la totalité de la lumière incidente sur la couche absorbante. Celle-ci prévoit d'importantes économies dans le coût des matériaux ;
- ✚ Elles utilisent un type de techniques relativement peu coûteuses de dépôt sous vide pour le traitement des cellules solaires à couches minces. Ce qui réduit les coûts de traitement.

Les trois technologies émergentes sont aujourd'hui comme indiqué à la figure (I.15) :

- ✚ Le silicium amorphe et microcristallin noté TFSi (Thin-Film Silicon) ;
- ✚ Le semi-conducteur polycristallin CdTe (Tellure de Cadmium) ;

✚ L'alliage $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) CIGS.

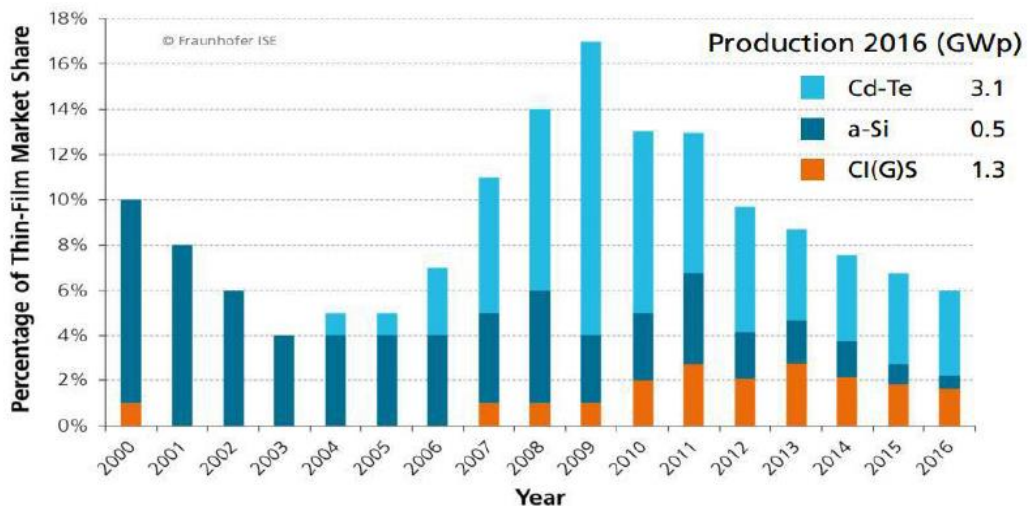


Figure I.15 : Pourcentage de marché des couches minces [12].

Les principaux matériaux absorbeurs utilisés en couches minces sont :

1.11.2.1. Le silicium amorphe

Qui représente un matériau dont le comportement peut être assimilé à celui d'un matériau à gap direct contrairement au silicium cristallin des cellules PV de première génération. Les cellules PV à base de silicium amorphe sont les cellules les moins chères du marché mais le rendement de conversion théorique est faible. Actuellement, le record est de 10,7 %.

1.11.2.2. Le tellure de Cadmium (CdTe)

Malgré des rendements très intéressants dépassant les 20%, des problèmes non négligeables se posent à savoir : l'agressivité pour l'environnement le Cadmium est toxique et polluant.

1.11.2.3. Les chalcopyrites I-III-VI2

CuInSe_2 (CIS) et $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) : Le matériau CIS avec une largeur de bande interdite de 1 eV est un matériau prometteur pour la conversion PV. Le CIGS expose actuellement le meilleur rendement de production pour une cellule par rapport à toutes les filières de couches minces avec des rendements de 21.7% en laboratoire. La rareté de l'indium et du gallium ainsi que la toxicité du sélénium (peut se combiner avec l'hydrogène et fournir du H_2Se hautement toxique) peuvent constituer un obstacle pour cette filière.

I.11.3. Troisième génération

Cette génération regroupée par un ensemble des technologies pour répondre à ces problématiques des matériaux employés dans la deuxième génération. Le but est d'engendrer des matériaux de propriétés identiques, mais constitués d'éléments moins chers, abondants et

moins toxiques. Elle a l'avantage de pouvoir être déposées en grande surface et à grande vitesse. Elle ouvre également la voie à l'application légère, normale et souple. L'effet photovoltaïque a observé depuis 30 ans dans les matériaux semiconducteurs organiques. Dans cette génération, il ya plusieurs types de cellules : les cellules organiques, de Grätzel, celles photo- électrochimiques et les cellules inorganiques.

Récemment, le CZTS est un nouveau matériau semi-conducteur à base des éléments abondants cuivre (Cu), zinc (Zn) , étain (Sn) et le soufre (S). Ces éléments sont largement présents dans la croûte terrestre, donc à faible coût, non-toxique et bon marché par rapport à l'indium et au gallium. Un rendement maximum de 12.6% est obtenu avec des cellules solaires à base de CZTS. Il est possible qu'il devienne dans les années à venir un matériau en couches minces concurrent à grande échelle.

I.12.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque[10]

I.12.1.Les avantages

- ✚ Une haute fiabilité ; les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des Constructeurs ;
- ✚ Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux ;
- ✚ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt ;
- ✚ Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé ;
- ✚ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet.

I.12.2.Les inconvénients

- ✚ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- ✚ L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions ;
- ✚ Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %) ;

- ✚ Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées ;
- ✚ Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient. Judicieusement choisis.

I.13.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions nécessaires sur les cellules photovoltaïques. On explique le fonctionnement de la cellule solaire et ces différentes caractéristiques et composants de base. Ensuite, nous avons cités les différentes technologies photovoltaïques. Finalement nous avons présenté les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque. Dans le chapitre suivant on va présenter la cellule solaire à base de (CZTSSe).

Références

- [1]. CUMUNEL, A.L.P. and J.-P.B.B. FARAGGI, Cellules solaires (Les bases de l'énergie photovoltaïque) 5e édition. 2010.
- [2]. Labouret, Anne Villos, Michel. Energie solaire photovoltaïque. Dunod.v6
https://www.toolseurodiscount.com/catalog/pdf/fr/energie_solaire_photovoltaïque.pdf
- [3]. Narimene, D., Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque 2015: UNIVERSITE CONSTANTINE I.
- [4]. SAFIA, M.M.-B. Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$. 2016. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [5]. Mohamed, D.B. Systèmes de conversion de l'énergie Photovoltaïque
- [6]. IBGE, LE PHOTOVOLTAÏQUE 2010.
- [7]. HAOUARI, F.G.-K.B.-S., Lumière et Cellule Solaire. 2016.
- [8]. Halima, L.A.-B., Etude et simulation d'une cellule solaire à base des éléments chalcogènes. 2019: UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [9]. Chatelain, Jean-Daniel. Dispositifs à Semi-conducteur. PPUR Presses polytechniques. 1986.
[Dispositifs à semiconducteur - Jean-Daniel Chatelain - Google Books](#)
- [10]. Ghania, B.A. Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS. 2014. Université Med Khider Biskra
- [11]. SOUICI, D.A. Physique des Semi-conducteurs. 2013. Université de Béjaia, Algérie.
- [12]. Ahlam, L. and B. Halima, Etude et simulation d'une cellule solaire à base des éléments chalcogènes. 2019: UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.

**CHAPITRE II : CELLULE
SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE
À BASE DE CZTSSE**

II.1.Introduction

Parmi les différentes couches minces candidats de cellules solaires, le Cuivre-Zinc Étain Sulfure/Sélénium $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ (CZTSSe) a été identifié comme un matériau à haut potentiel en termes d'énergie Photovoltaïque et bénéficiant de ressources naturelles importantes pour répondre à un Accroissement de la demande mondiale en énergie.

Ce chapitre est consacré essentiellement consacré à la description des techniques les plus sollicitées pour l'élaboration des couches minces en général et le CZTSSe en particulier. On termine ce chapitre par une description des propriétés structurale, optique et électrique du matériau CZTSe.

II.2.Les couches minces

II.2.1.Définition d'une couche mince

Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat". L'une des dimensions de cette couche est son épaisseur qui a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques " nm "a quelques " μm " (typiquement ce sont des couches de 10 ... 100 nanomètres d'épaisseur). Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne est une perturbation de la majorité des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés d'un corps massif très différentes [1].

La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est liée au fait que dans l'état massif on néglige généralement, avec raison, le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince sont au contraire les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. Il est assez évident que plus l'épaisseur sera faible plus cet effet de bidimensionnelle sera important. En revanche, lorsque l'épaisseur d'une couche mince dépassera un certain seuil l'effet d'épaisseur deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif [1].

II.2.2.Propriétés des couches minces

Une couche dite mince est un objet dont l'une des dimensions géométriques est très faible Cela explique un rôle essentiel des interactions surfaciques dans l'établissement des propriétés physiques de ces objets. D'ailleurs, c'est la raison principale pour laquelle les propriétés physiques des couches minces diffèrent de manière significative de celles des corps massiques. L'aire totale des grains cristallins est supérieure à celle des deux faces d'une couche mince.

En général, les couches minces utilisées dans les applications pratiques sont polycristallines ; Leur état est métastable, hors de l'équilibre et éloigné du minimum énergétique. D'un point de vue microscopique, elles se composent de grains cristallins enrichis

par des défauts qui sont séparés par des zones enrichies par des impuretés. Les dimensions des grains cristallins sont du même ordre de grandeur que l'épaisseur de la couche mince.

La microstructure des couches minces est extrêmement sensible aux propriétés chimiques et physiques du matériau mis en jeu lors de sa croissance, ainsi que des conditions physiques de dépôt à chaque étape d'évolution de la couche mince. En particulier, les propriétés des couches minces sont très sensibles à la nature du substrat sur lequel elle est formée. Cela explique, par exemple, le fait que des couches minces d'un même matériau et d'une même épaisseur peuvent présenter des propriétés physiques différentes sur des substrats de nature différente. L'épaisseur de percolation, au-delà de laquelle les îlots coalescent et la couche mince devient continue, varie essentiellement suivant la nature du matériau, la vitesse du dépôt, la température du substrat, l'adhérence de sa surface.

II.2.3. Applications des couches minces

Les couches minces sont utilisées depuis des centaines d'année. L'émaillage constitue un exemple de réalisation de couches. Elles sont utilisées dans des domaines d'applications aussi variés que l'optique avec les couches réflectrices (miroirs) et antireflets [2]; l'électricité avec les couches conductrices métalliques, la mécanique avec les couches abrasives ou résistantes à l'usure et la chimie avec les couches protectrices. Les couches minces ont connu un essor industriel important au milieu du 20ème siècle, majoritairement dans les applications optiques, puis microélectroniques.[2]

II.2.4. Principe de dépôt de couches minces

Pour former une couche mince sur une surface solide (substrat) les particules du matériau du revêtement doivent traverser un milieu conducteur jusqu'à un contact intime avec le substrat.

A l'arrivée sur le substrat une fraction de la particule de revêtement adhère (grâce aux forces de Van der Waals) ou réagissent chimiquement avec le substrat.

Les particules peuvent être des atomes, molécules, ions ou fragment de molécules ionisées. Le milieu de transport peut être solide, liquide, gaz ou vide.

A/ Solide : dans cette situation le substrat est en contact avec le solide, seuls les particules qui diffusent du solide vers le substrat forment une couche. Souvent il est très difficile d'obtenir des films minces par contact entre solides exemple : la diffusion de l'oxygène de la silice pour former une couche mince SiO₂ sur un substrat de silicium.

B/ Liquide : il est facilement utilisable que le premier cas, car le matériau est plus versatile dans cet état (épitaxie en phase liquide, et électrochimique, sol gel).

C/ Gaz ou Vide : dépôt CVD la différence entre le milieu gazeux et le vide est le libre parcours moyen des particules. Il n'existe pas une méthode standard de dépôt de couche mince qui peut être utilisée dans différentes situations. La préparation de substrat est souvent

une étape très importante pour les dépôts de couches minces afin d'obtenir une bonne adhésion.

II.2.5. Techniques de dépôt des couches mince

Pratiquement, il y a deux grandes méthodes de dépôt de films minces: la technique de dépôt en phase vapeur chimique (CVD : Chemical Vapor Déposition) et de dépôt en phase vapeur physique (PVD : Physical Vapor Déposition).

Les méthodes de dépôt physiques sont en général utilisées en recherche, alors que les méthodes chimiques sont également utilisées industriellement, à cause de leur meilleur rendement et la qualité des films obtenus.

La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la figure II.1. [3]

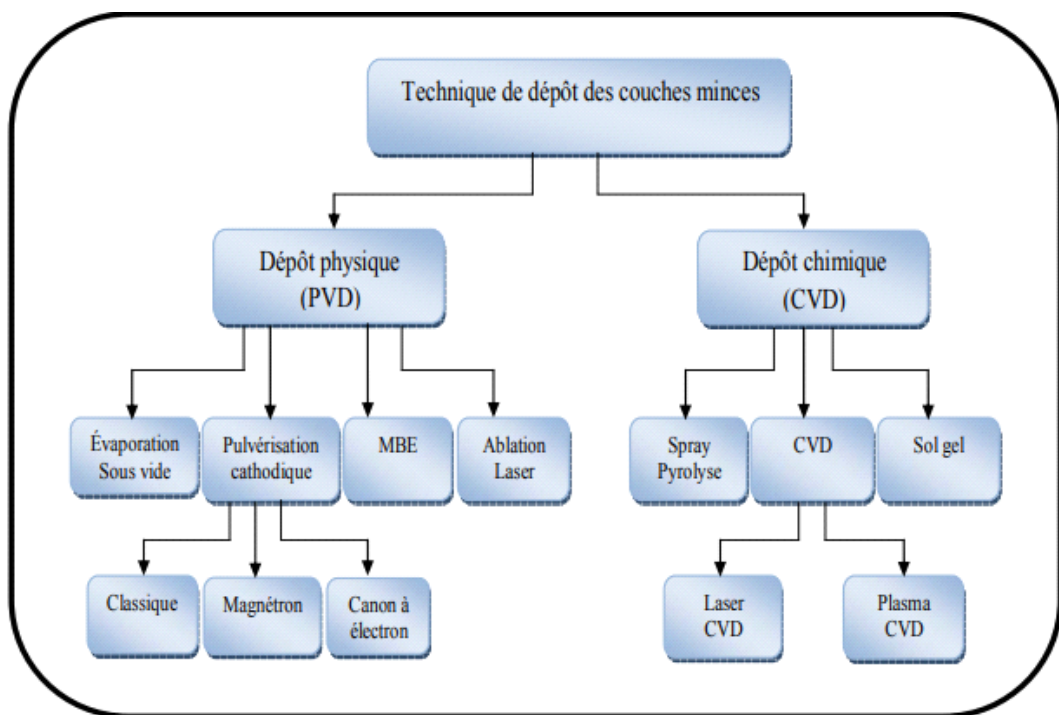


Figure II.1. Techniques de dépôt des couches minces [3]

II.2.5.1. Dépôt en phase vapeur physique (PVD)

Le dépôt en phase vapeur physique (PVD) présente beaucoup d'avantages par rapport au dépôt en phase vapeur chimique. Par exemple, les films sont denses, le processus est facile à contrôler et il n'y a pas de pollution.

Les procédés par PVD regroupent principalement l'évaporation, la pulvérisation sous toutes ses formes et l'ablation laser. [2]

II.2.5.1.a) Evaporation thermique

Cette méthode consiste simplement à évaporer ou à sublimer 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.

Il existe plusieurs méthodes pour chauffer le matériau : à l'aide d'un filament réfractaire par effet Joule, par induction, et à l'aide d'un faisceau d'électrons intense et énergétique. Les différents modes de chauffage sont présentés sur la Figure II.2.[1]

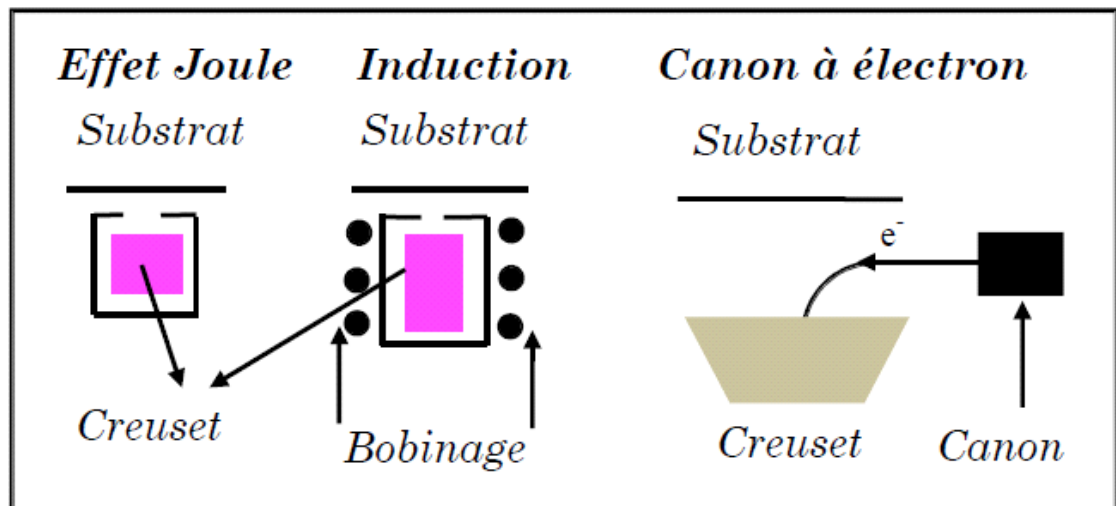


Figure II.2.: Méthodes de chauffages en évaporation thermique sous vide.

L'évaporation thermique est une méthode particulièrement appréciée car elle conduit à l'élaboration de matériaux très purs et d'autant plus que la pression pendant le dépôt est faible.

II.2.5.2. Dépôt en phase vapeur chimique (CVD)

La déposition par les techniques de dépôt chimique en phase vapeur est réalisée grâce à une réaction chimique initiée par des précurseurs gazeux. La réaction est activée par la température du substrat qui fournit l'énergie d'activation nécessaire pour déclencher la réaction chimique.

Les principaux paramètres à contrôler lors des dépôts CVD sont : la nature et la température du substrat, la composition chimique des produits de départ, le ou les flux de gaz, la pression totale et la géométrie de la chambre de réaction.

Parmi les méthodes de synthèse on distingue :

- Le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD).
- Le CVD à pression atmosphérique (AP-CVD).
- Le CVD à basse pression (LP-CVD).

Ces procédés permettent d'obtenir des films cristallisés sans avoir recours à un recuit avec des épaisseurs très variables aussi bien sur substrats isolants que conducteurs possédant en plus une excellente adhérence.

Les principales faiblesses associées à ces techniques sont la déformation du substrat due au gradient thermique et la diffusion d'impuretés provenant du substrat chauffé.[4]

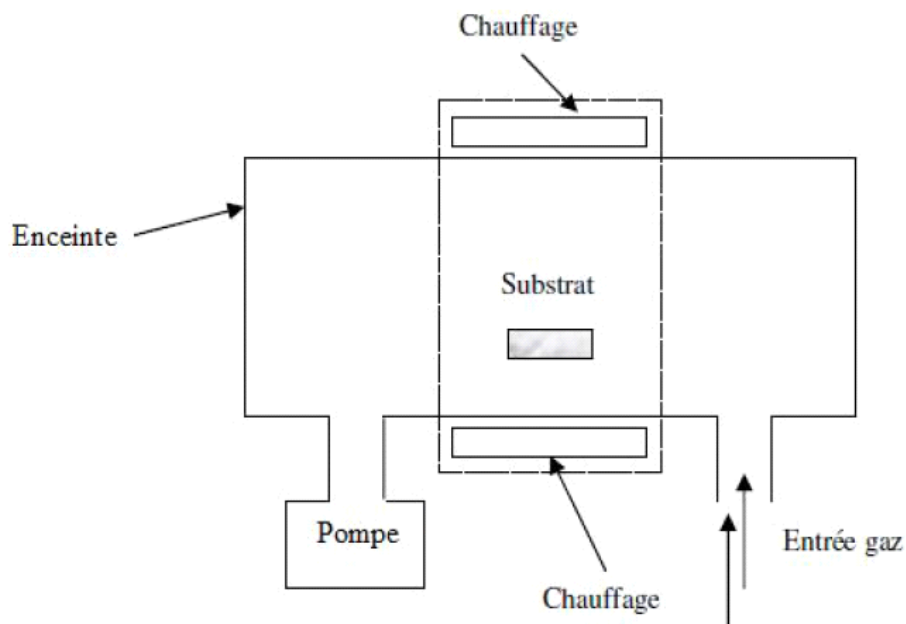


Figure II.3 : Schéma de principe de dépôt chimique en phase vapeur. [4]

II.2.5.2.a) Spray pyrolyse

Le spray pyrolyse est une technique de dépôt utilisée pour préparer les films minces et épais, Les revêtements en céramique et les poudres. A la différence de beaucoup d'autres techniques de dépôt de films, le spray pyrolyse représente une méthode très simple et relativement rentable. 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. [1]

II.2.6. Méthodes de préparation de couches minces de $\text{Cu}_2\text{-II-IV-S}_4$

Divers processus de fabrication des semi-conducteurs quaternaires $\text{Cu}_2\text{-II-IV-S}_4$ en couches minces ont attiré l'attention des chercheurs, nous citons les différentes méthodes suivantes [3] :

➤ Les approches à base de vide

- Techniques d'évaporation sous vide ;
- Pulvérisation cathodique (sputtering) ;
- Salinisation ou sulfuration.

➤ Les approches non-vides

- L'électrodéposition ;
- Pulvérisation par pyrolyse ;

II.3.Hétérojonction

Une hétérojonction est obtenue lorsque deux matériaux semi-conducteurs différents sont associés. Sa réalisation s'effectue par croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit notamment être assez proche).

Selon le type de dopage utilisé pour les semi-conducteurs, deux hétérojonctions se distinguent :

- Les premières sont les hétérojonctions isotypes, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage ;
- Les secondes sont les hétérojonctions anisotypes, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment.[3]

II.4.Les cellule solaire à base CZTS

Le cuivre, le zinc, l'étain, le soufre et le sélénium forment ensemble un matériau semi-conducteur de choix, puisqu'il est fait d'éléments courants et non toxiques.

De nouvelles cellules sont déjà en cours de développement en prévision de la pénurie probable d'indium. Cependant, remplacer les cellules au CIGS représente un véritable défi tant cet absorbant est efficace. Une alternative exploitant le principe de la jonction p-n se démarque néanmoins depuis la fin des années 2000: la cellule CZTS.

Cuivre-zinc-étain-soufre (CZTS) est un semi-conducteur avec d'excellentes propriétés photovoltaïques tels que gap direct-bande, le coefficient d'absorption élevé, et possède une énergie de bande optimale de 1.4 à 1.5 eV fortement souhaitée en matière photovoltaïque.

En outre, les cellules utilisent CZTS abondante (terres rares métaux libres) matériau non toxique et peu coûteux. La disponibilité de cuivre, de zinc, de l'étain et du soufre sur la croûte de notre terre sont de 50 ppm, 75 ppm, 2,2 ppm et 260 ppm respectivement. Pendant ce temps, la disponibilité de l'indium est de 0,049 ppm sur la croûte de la terre qui est relativement très faible par rapport au zinc et de l'étain.[5]

II.5. Les propriétés de CZTS

Ce film semi-conducteur peut être obtenue par le remplacement de la moitié des atomes d'indium dans le CuInS_2 chalcopyrite avec du zinc, et par le remplacement de l'autre moitié avec de l'étain, ce qui est préférable pour la réalisation d'une cellule solaire à faible coût. Donc, quand CdS forme une hétérojonction avec CZTS, il doit être remplacé par le sulfure de zinc (ZnS) parce que le ZnS accorde la bande interdite.

Le meilleur rendement est celui des cellules solaires CZTS pauvres en Cu et riches en Zn favorisant la croissance d'autres phases au cours de la formation du film. En raison de la faible proportion de Zn et la haute proportion de Cu la couche CZTS devient plus un semiconducteur de type-p.[6]

Le CZTS est dérivée de la structure de CIGS par la substitution isoélectronique de deux In (ou Ga, respectivement) atomes par un Zn et un atome Sn. En conséquence, la couche CZTS a des propriétés similaires à la couche de CIGS. Un avantage principal de ce dispositif est que la structure standard des cellules solaires peut être adoptée. La structure cristalline de CZTS est représentée sur Figure II.2 qui est connu comme la structure kesterite et peut être extraite de la structure de sphalerite² par dupliquer la cellule unitaire.

La structure de kesterite est la phase la plus stable de CZTS [7]

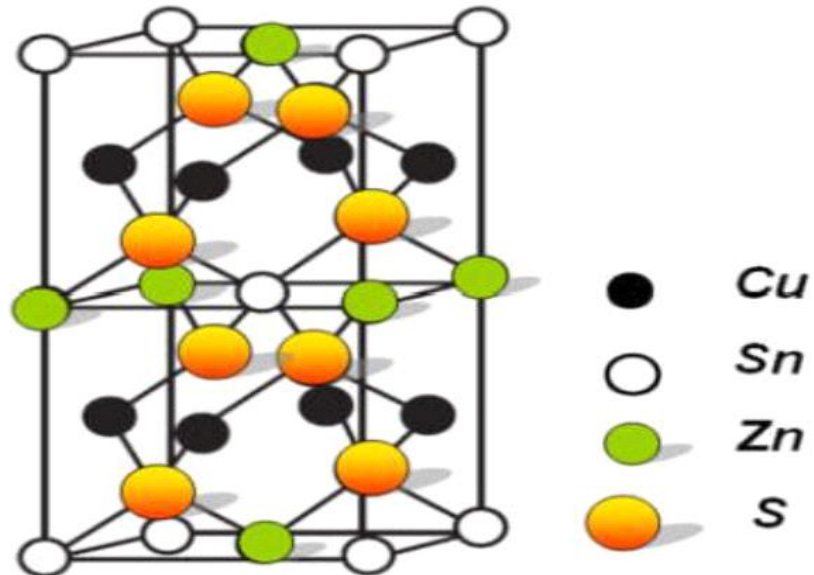


Figure II.4 : Structure Kasterite dans laquelle CZTS se cristallise. Elle est dérivée de la structure sphalerite par duplication de la cellule unitaire [7]

Le CZTS ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) est très étroitement liée au CIGS, comme il est indiqué sur la figure 1. Pour l'essentiel, les éléments coûteux et peu abondants d'indium et de gallium sont remplacés par une 50:50 combinaison de Zn et Sn beaucoup moins cher.

Dans le même temps, Se est remplacé par S (abondant et pas cher), en raison de la largeur de bande interdite de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (1,45 eV). Il est plus proche de la valeur optimale du composé de sélénure correspondant, qui possède une bande interdite plus étroite.[3]

II.5.1. Propriétés électriques

Les principales caractéristiques électriques des matériaux semi-conducteurs résultent des déplacements des porteurs de charge sous l'effet d'un champ électrique, thermique ou magnétique (conductivité électrique, effet Hall, photoconductivité,...). Néanmoins, ces déplacements sont gouvernés par les collisions des porteurs de charge avec les ions, les impuretés ou les défauts du réseau cristallin. Le libre parcours moyen, qui caractérise la distance moyenne parcourue par un électron entre deux chocs successifs, est un paramètre important spécifique de l'état structural du matériau. Le comportement électrique dans les couches minces polycristallines des semi-conducteurs dépend fortement des surfaces délimitant les grains constituant la couche. Car, ces joints de grains sont des zones de grandes densités de défauts et d'impuretés. Ces zones forment des états énergétiques localisés, dans la bande interdite, capables de capturer et d'immobiliser les porteurs de charge. Ainsi que, l'accumulation de ces porteurs fait apparaître des barrières de potentiel au niveau des joints de grains. Cet effet devient important si la taille des grains est de moins d'un micron.[8]

Le système CZTSSe a l'avantage de permettre le réglage de la bande interdite directe, en faisant varier le rapport S: Se, de près de 1 eV pour le composé sélénure pure à environ

1,5 eV pour le matériau sulfuré pur (gamme très utile pour l'énergie solaire terrestre éclairage). D'après les calculs de structure de bande, la bande supérieure de valence dans CZTSSe se compose des orbitales antiliantes Cu 3d et S (Se) 3p (4p), tandis que le bas de la bande de conduction se compose des orbitales antiliantes de Sn 5s et S (Se) 3p (4p). Dans ces calculs, l'atome de Zn n'affecte pas le maximum de la bande de valence ou la bande de conduction minimum.[9]

Les propriétés électriques des composés CZTSSe sont présentées au tableau II.1 pour les films préparés à l'aide de diverses méthodes, telles que la pulvérisation cathodique, co-évaporation et dépôt par spray ultrasonique. Si la mobilité des porteurs minoritaires est un paramètre plus pertinent pour la performance photovoltaïque, les mobilités de Hall signalé sont encore attendues pour tenir compte de la qualité du film.[10]

Tableau II.1 : Les propriétés électriques des composés CZTSSe

Composé	Densité de porteur (cm ³)	Mobilité (cm ² /Vs)	Résistivité (Ω cm)	Méthodes
CZTS	8.2×10^{18}	6.3	0.16	Pulvérisation cathodique
CZTS	8.0×10^{18}	6.0	0.13	Sulfuration
CZTS	$>5 \times 10^{19}$	< 0.1	> 1.3	Pulvérisation cathodique
CZTS			0.02 – 2	Pulvérisation cathodique
CZTSe	2.1×10^{17}	39.7	0.74	DRX
CZTSe			0.1 – 0.8	spray

Tanaka et al, ont élaborés des couches minces à partir de poudre CZTS par la méthode d'évaporation, le type de la conductivité à été déterminé par la méthode de la pointe chaude. Ils ont trouvé que tous les films CZTS ont une conductivité de type p. De plus, ils ont montré que pour le rapport de Zn/Sn = 1.1 il y'a une diminution de la résistivité des films élaborés entre 2.5×10^{-1} et 7.0×10^{-3} (Ωcm) avec l'augmentation du rapport Cu/ (Zn+Sn) (voir la figure II.3).

Cependant, la résistivité pour les films Zn/Sn = 0.95 était presque indépendante avec le rapport Cu/(Zn+Sn), elle est approximativement de l'ordre de 10^{-2} (Ωcm). Ce qui suggère que les films riches en Sn et Cu ont une faible résistivité, pour-cela ils ne sont pas convenables pour la fabrication des cellules solaires. Ce résultat a été confirmé par le fait que le plus haut rendement de cellule solaire a été obtenu dans des films CZTS ayant une composition pauvre en Cu et riche en Zn.

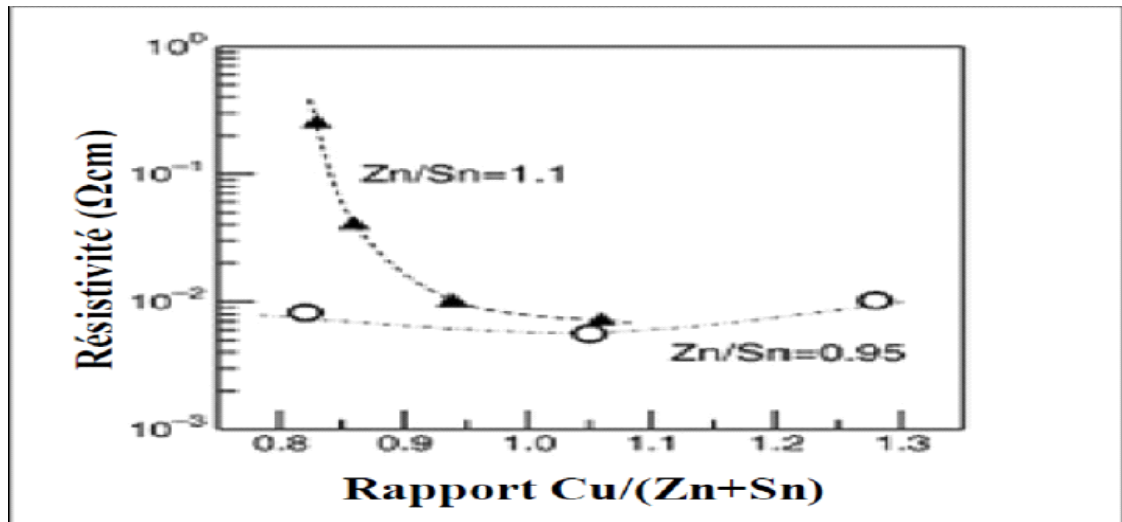


Figure. II.5: La variation de la résistivité en fonction du rapport Cu/ (Zn+Sn) .

II.5.2. Propriétés optiques

Le principe du processus d'absorption dans les semi-conducteurs dépend de l'énergie des photons incidents et de la structure de bande du composé. Un semi-conducteur pur ne peut absorber un photon d'énergie $h\nu$ et exciter un électron d'énergie E_1 de la bande de valence vers la bande de conduction que s'il existe un niveau d'énergie E_2 tel que :

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (\text{II.1})$$

L'énergie minimale du photon apte à réaliser cette transition est le seuil d'absorption optique. Cependant, pour un semi-conducteur, on peut observer des transitions pour des énergies inférieures lorsqu'il existe des états localisés dans la bande interdite. Les électrons qui peuvent participer aux processus d'absorption sont :

- Les électrons fortement liés au réseau cristallin (électrons des couches profondes) ;
- Les électrons de valence ;
- Les porteurs de charge libres (électrons ou trous) ;
- Les électrons liés à des impuretés ou à des défauts du cristal.

L'interaction avec les électrons des couches profondes correspond à des énergies élevées. Par contre, les trois autres mettent en jeu des valeurs plus faibles et concernent des longueurs d'ondes allant de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les films du CZTS ont une transparence optique faible (voir la Figure. II.6). Plusieurs auteurs ont fait des études sur les propriétés optiques des films minces.

Dans ce cas, nous présentons ci-dessous quelques résultats de la littérature.

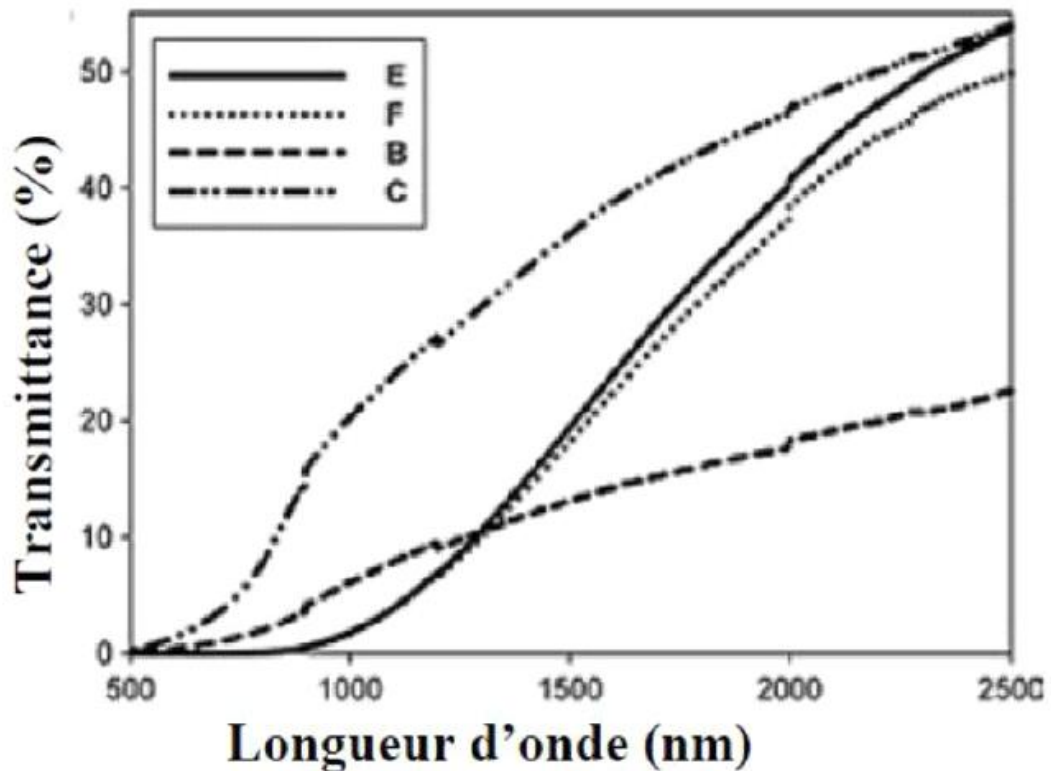


Figure. II.6: Spectre typique de transmittance d'une couche mince de CZTS

En théorie, le spectre d'absorption permet de découvrir toutes les transitions et d'obtenir des informations sur la structure de bande du composé. Expérimentalement, l'allure du spectre d'absorption est une caractéristique optique d'un matériau et évolue avec la composition, les défauts et son état de cristallinité. La probabilité d'absorption du photon détermine le coefficient d'absorption optique ($\alpha h\nu$). L'énergie du gap est déterminée par plusieurs techniques de caractérisation, à savoir les spectres de transmission et de réflexion, l'électro-réflectance et la photoluminescence. L'ensemble de ces techniques a montré que les transitions entre les bandes d'énergies peuvent être décrites par la relation suivante : [8]

$$(\alpha h\nu) = (h\nu - E_g)^n \quad (\text{II.2})$$

Où $h\nu$ est l'énergie du rayonnement incidente, A est une constante et $n = 1/2, 3/2$ ou 2 selon la nature de transition optique : transition directe permise, transition directe interdite et transition indirecte permise respectivement.

On constate que les couches minces de CZTS ont des bonnes propriétés optiques mais elles sont toujours gouvernées par les conditions de préparation. Les principaux paramètres influents sur la valeur du gap dans les structures kesterite sont :

- La température ;
- L'épaisseur de la couche ;

- La composition de la couche.

II.6.Fabrication d'une cellule à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

Une cellule solaire est constituée d'un ensemble de couches minces semiconductrices avec une épaisseur totale d'environ 5 μm (figure II.5). Le substrat de ce composant électronique est en verre ou en ITO. La première étape de fabrication d'une cellule photovoltaïque est le dépôt d'une couche de molybdène ou d'ITO de 1 μm d'épaisseur, généralement par la technique d'évaporation thermique ou par pulvérisation cathodique.

Cette couche constitue le contact ohmique arrière de la cellule ; elle assure l'adhésion entre la couche active de la cellule (la couche absorbante) et le substrat.

La couche la plus importante dans la cellule photovoltaïque est la couche absorbante, en l'occurrence $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ dans notre cas, car elle est responsable de l'absorption des rayonnements solaires ainsi que la génération des porteurs de charges (les électrons et les trous).

Généralement il existe quatre couches principales dans une cellule solaire à couches minces (Figure II.7) en plus du substrat.

- **Le substrat** : généralement en verre, mais on peut utiliser des substrats flexibles ou métalliques ;
- **Le contact inférieur** : c'est un contact ohmique, dans la plupart des cas c'est du Mo ou de l'ITO ;
- **La couche absorbante** : avec une conduction type p, souvent en $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$;
- **La couche tampon** : avec une conduction de type n, souvent en CdS, ZnS, etc ;
- **Une couche d'oxyde transparent conducteur** : en ITO (Indium Tin Oxyde) ou ZnO dopé en Al.

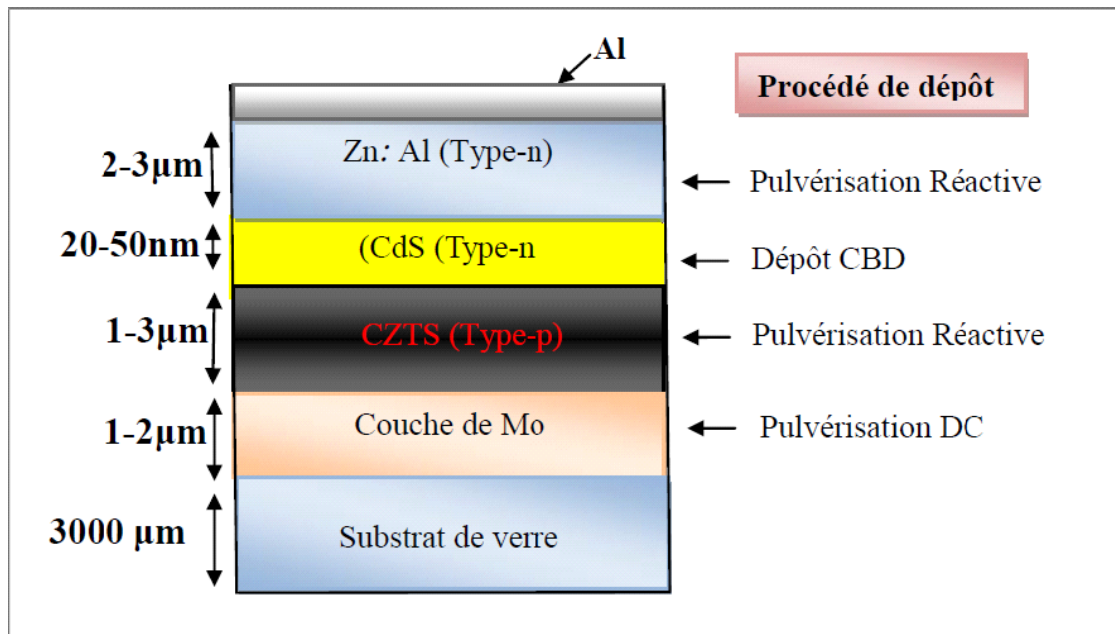


Figure II.7 : Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

II.6.1. La couche absorbante

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1.4-1.6 eV. Sa conductivité doit être de type p, et de l'ordre de $1 \cdot 10^{-2} (\Omega\text{cm})^{-1}$. [5]

II.6.2. La couche tampon

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante et la couche d'oxyde transparent conducteur (TCO). Si un contact couche absorbante/TCO est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister, mais son rendement sera limité par :

- L'inadaptation des bandes interdites ;
- Les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains.

De ce fait, il est préférable d'introduire une fine couche, dite couche tampon, entre ces deux composés afin d'optimiser les performances de la cellule. Cette couche doit avoir les propriétés suivantes :

- Une bande interdite intermédiaire permettant une transition souple entre celle du semi-conducteur et celle du TCO, soit une valeur comprise entre 2.4 et 3.2 eV.
- Une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est, elle, 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 $10^{-3} (\Omega\text{cm})^{-1}$;

- Morphologiquement elle doit être très homogène pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains.

II.6.3. La couche d'oxyde transparent conducteur (TCO)

Cette couche doit être simultanément transparente et conductrice. Dans le domaine du spectre solaire, la transmission des couches doit être supérieure à 80%. La conductivité de ces mêmes couches doit être supérieure à $10^{-3}(\Omega\text{cm})^{-1}$. De telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces de SnO₂, In₂O₃, de leur alliage ITO et de 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 d'ITO. En effet, la couche de ZnO intrinsèque, donc non-conductrice, évite toute fuite de courant entre la couche absorbante et le contact supérieur. Il a été montré que cette couche pouvait être évitée si l'on déposait une couche tampon (CdS par exemple) épaisse.[11]

II.7.Conclusion

Le CZTS est un semi-conducteur avec d'excellentes propriétés photovoltaïques tels que gap direct-bande, le coefficient d'absorption élevé, et possède une énergie de bande optimale de 1.4 à 1.5 eV fortement souhaitée en matière photovoltaïque.

Pratiquement, il y a deux grandes méthodes de dépôt de films minces sous vide : les méthodes physiques PVD, telles que la pulvérisation, l'évaporation et les méthodes chimiques CVD.

Références

- [1] DARANFED O , 'Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, UNIVERSITÉ MENTOURI DE CONSTANTINE 1 , 2013
- [2] MENAKH S , 'Contribution à l'étude des propriétés de films ZnO ' , UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2010
- [3] MELOUAH M , BAKHTI S , 'Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ ' UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2016.
- [4] Belalem A, Sandali W, 'Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ ' UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2017.
- [5] Mme. D 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 CONSTANTINE 1.2013.].
- [6] Hindawi Publishing Corporation. « A Review on Development Prospect of CZTS Based Thin Film Solar Cells ». International Journal of Photoenergy. Volume 2014
- [7] Bernardini, G. P. ; Borrini, D. ; Caneschi, A. ; Benedetto, F. D. ; Gatteschi, D. ; Ristori, S. Romanelli, M.: EPR and SQUID. « magnetometry study of $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ (stannite) and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (kesterite). In: Physics and Chemistry of Minerals». S. 453 461 (2000).
- [8] S.M. Firoz Hasan, M.A. Subhan, Kh.M. Mannan, "The optical and electrical properties of copper indium di-selenide thin films", Optical Materials 14, p. 329–336, (2000).
- [9] T. Maeda, S. Nakamura and T. Wada, "Phase stability and electronic structure of In-free photovoltaic semiconductors, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ by first-principles calculation", Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1165, 1165-M04-03, (2009).
- [10] J.W. Lee, J.D. Cohen and W.N. Shafarman, "The determination of carrier mobilities in CIGS photovoltaic devices using high-frequency admittance measurements", thin solid films 480–481, pp. 336–340, (2005).
- [11] Science Université de Nantes. [En ligne]. [Consulté le 15 Mai 2009]. Disponible sur: <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/recherche/lamp/fr/photop/part3.pdf>

**CHAPITRE III : SIMULATION
D'UNE CELLULE SOLAIRE
PHOTOVOLTAÏQUE À BASE
DE CZTSSE**

III.1. Introduction

Quel que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire. Habituellement, les paramètres à optimiser sont les épaisseurs, les largeurs de la bande interdite (gap) E_g et les niveaux de dopage des différentes couches constituant la cellule. L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum. Cette optimisation peut se faire soit expérimentalement ou soit par simulation.

L'optimisation expérimentale a l'avantage d'être réelle mais elle est fastidieuse, ennuyeuse et coûteuse. En plus, nous n'avons pas accès à certains paramètres de la cellule. Tandis que l'optimisation par simulation, vu qu'elle suit un modèle mathématique du système réel. Elle présente les avantages suivants :

- Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des Paramètres différents ;
- Elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres) ;
- On peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètres interdépendants (par exemple: mobilité, longueur de diffusion et durée de vie).

Dans ce chapitre, on va présenter les équations de base de modélisation utilisées par le logiciel SCAPS, ainsi qu'une brève description de la méthode de simulation par ce logiciel.

III.2. Equations fondamentales dans les semiconducteurs

Des années de recherche dans la physique des dispositifs à la base des semi-conducteurs ont conduit à la réalisation d'un modèle mathématique. [1]

Ce modèle est capable d'opérer dans quasiment n'importe quel dispositif à base de semiconducteurs. Il consiste en un ensemble fondamental d'équations qui 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 la base de semi-conducteurs, sont dérivées des équations de Maxwell. Elles sont principalement : L'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport. 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.

Pour que les équations que nous allons présenter dans la suite de ce chapitre soient résolues, une discrétisation a dû être réalisée afin de les appliquer à une grille d'éléments finis utilisés pour représenter le domaine de simulation.[2]

III.2.1. Equation de Poisson

L'équation de Poisson s'exprime :

$$\text{div } \epsilon \nabla \psi = -\rho \quad (\text{III.1})$$

Où ψ représente le potentiel électrostatique.

- ϵ la permittivité électrique ($\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_r$, ϵ_0 est la permittivité du vide et ϵ_r est la permittivité relative du matériau) ;
- ρ est la densité volumique nette de charges libres.

Le champ électrique est donné par la relation :

$$E = -\text{grad } \psi \quad (\text{III.2})$$

III.2.2. Equations de continuité

Les équations de continuité décrivent la vitesse de variation en fonction du temps des concentrations des porteurs. Les causes de la variation des concentrations des trous ou des électrons sont :

- Les générations dues aux agents externes (qui sont souvent la création de paires électron-trou) ;
- les générations -recombinaisons internes ;
- Les phénomènes de transport (par la présence des courants de conduction ou diffusion).

L'équation de continuité s'exprime par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div } \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (\text{III.3})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div } \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (\text{III.4})$$

G_n et G_p sont les taux de génération pour les électrons et les trous par des agents externes, R_n et R_p sont respectivement les taux de recombinaisons (internes) pour les électrons et les trous, J_n et J_p sont les densités des courants des électrons et des trous.

III.2.3. Equations de transport

Dans le cas des hypothèses de base des équations de la physique des semiconducteurs (le champ magnétique extérieur est nul, la température est uniforme dans toute la structure) les causes de l'apparition des courants électriques sont le champ électrique et le gradient des concentrations des porteurs de charge.

Les courants déterminés par le champ électrique s'appellent courant du champ ou courant de drift. Et les courants déterminés par le gradient de concentration des porteurs s'appellent courant de diffusion.

Dans le cas hors équilibre thermodynamique, nous définissons deux quasi-niveaux de Fermi, un pour les électrons et un pour les trous, ψ et, qui expriment la modification de la probabilité d'occupation des états.

Ainsi les densités des courants des équations de continuité peuvent être approximées à l'aide de la théorie de transport de Boltzmann par le modèle de drift-diffusion [3] (Modèle isothermique de transport). Dans ce modèle, les densités de courants sont exprimées en fonction des quasi-niveaux de Fermi par les expressions :

$$\vec{j}_n = -q\mu_n \nabla \varphi_n \quad (\text{III.5})$$

$$\vec{j}_p = -q\mu_p \nabla \varphi_p \quad (\text{III.6})$$

Avec q est la charge électrique, μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous. Les expressions pour les concentrations des électrons et des trous sont :

$$n = n_{j_e} \text{Exp} \left[\frac{q(\psi - \varphi_n)}{kTL} \right] \quad (\text{III.7})$$

$$p = n_{j_e} \text{Exp} \left[\frac{q(\psi - \varphi_p)}{kTL} \right] \quad (\text{III.8})$$

Avec n_{j_e} est la densité effective intrinsèque. En introduisant ces équations dans les expressions de densité de courant, on obtient :

$$\vec{j}_n = qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla \psi + \mu_n (kTL \nabla (\ln n_{j_e})) \quad (\text{III.9})$$

$$\vec{j}_p = qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla \psi + \mu_p (kTL \nabla (\ln n_{j_e})) \quad (\text{III.10})$$

Avec D_n et D_p sont les coefficients d'Einstein qui ont pour expression :

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad (\text{III.11})$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad (\text{III.12})$$

➤ Diffusion

Les courants de diffusion sont générés par l'existence d'une concentration non uniforme des électrons ou des trous dans le semiconducteur. Il est nettement plus probable qu'une charge d'une zone de concentration élevée se déplace vers une zone de basse concentration que l'inverse. Ce phénomène de diffusion est décrit quantitativement par la première loi de Fick qui montre la proportionnalité entre le flux de particules F et le gradient de leur concentration $\vec{\nabla}C$ selon la relation :

$$\vec{F} = -D \cdot \vec{\nabla}C \quad (\text{III.13})$$

Le facteur de proportionnalité D s'appelle coefficient de diffusion. En appliquant la Relation (III.13) pour les électrons ($C = n$, $D = D_n$) et les trous ($C = p$, $D = D_p$) nous Trouvons les densités des courants de diffusion :

$$\vec{J}_{ndiff} = -q \vec{F}_n = qD_n \nabla_n \quad (\text{III.14})$$

$$\vec{J}_{pdiff} \vec{F}_p = qD_p \nabla_p \quad (\text{III.15})$$

Qui représente en pratique le premier terme des équations (III.9) et (III.10). Notons que le troisième terme des équations (III.9) et (III.10) est aussi un courant de diffusion. Mais il est dû au gradient des densités effectives d'états nie.

➤ Conduction

En présence d'un champ électrique le porteur de charge est accéléré entre deux collisions aléatoires. La direction est donnée par le champ électrique et génère un déplacement moyen avec une vitesse donnée par :

- Pour les électrons :

$$\vec{v}_n = -\mu \vec{E} \quad (\text{III.16})$$

- Pour les trous :

$$\vec{v}_p = -\mu_p \vec{E} \quad (\text{III.17})$$

Dans les mêmes conditions de champ, les vitesses des électrons sont plus grandes que celle des trous. Donc nous avons beaucoup plus de chance de collecter des électrons que des trous. Le courant de drift est donné par :

$$\overline{J_{ncond}} = -qn\overline{v_n} \quad (\text{III.18})$$

$$\overline{J_{pcond}} = -qn\overline{v_p} \quad (\text{III.19})$$

Ainsi le courant de drift est représenté dans le second terme des équations (III.17) et (III.18).

III.3.Simulation des cellules solaires

III.3.1. Simulation

La simulation est un moyen performant d'analyse et de compréhension des phénomènes physiques dans les dispositifs à semi-conducteurs. En effet, il existe une panoplie d'algorithmes et de logiciels différents pour simuler, comprendre, prédire et optimiser le fonctionnement des dispositifs à semi-conducteurs qui peuvent être déterminés à partir de la solution d'équations différentielles bien connues dans la littérature traitant les semi-conducteurs qui sont : l'équation de Poisson et les deux équations de continuité des électrons et des trous. Ces équations rendent compte des phénomènes de conduction dans le volume du semi-conducteur et aussi dans les régions sièges de charge d'espace. A cause de l'aspect non linéaire de ces équations, il est impossible de résoudre analytiquement le système d'équations et l'emploi des méthodes numériques s'avère indispensable.[4]

III.3.2.Logiciel de simulation

le logiciel SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator). En effet, le programme SCAPS permet de résoudre des équations complexes pour des structures composées de couches semi-conductrices. Le choix de ces couches est généralement fait à partir d'un profil de dopage arbitraire et d'une distribution énergétique arbitraire des niveaux profonds des donneurs ou des accepteurs sous différents type d'éclairément. Des itérations de résolutions des équations sont faites jusqu'à convergence de l'algorithme. Ce dernier a fait l'objet de plusieurs études qui ont montré sa forte faisabilité pour ce type de structures [5].

Avec SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires plus les contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou

accepteurs. Les résultats simulés et mesurés sont comparés avec un bon accord théorie pratique.[6]

Ce logiciel a été développé par le département d'électronique et informatique des systèmes (ELIS) de l'université de Gent en Belgique. SCAPS-1D 3201 est un simulateur unidimensionnel pour simuler les caractéristiques électriques (DC et AC) des cellules solaires [7].

Le logiciel peut être téléchargé gratuitement du site [8] : <http://scaps.elis.ugent.be/>

III.4.Utilisation du logiciel SCAPS

Afin de simuler et contrôler tous les paramètres d'un dispositif photovoltaïque au moyen du Logiciel SCAPS nous devons passer par trois grandes fenêtres :

- Fenêtre d'exécution (« action panel ») : elle contient deux blocs : Le premier bloque permet de spécifier les conditions de l'expérience et les points de fonctionnement tels que, la température, la tension, la fréquence, l'illumination, les résistances série et shunt. En revanche, le deuxième bloque permet de sélectionner les grandeurs voulus afin de les simuler à savoir: la caractéristique IV, la capacitance – voltage, la capacitance-fréquence et la réponse spectrale.
- Fenêtre de conception de dispositif et la définition du problème («Définition panel ») : Cette fenêtre permet de définir le dispositif photovoltaïque où l'ajout d'une couche affiche une fenêtre qui contient un grand nombre de paramètres électriques comme l'énergie de gap, la permittivité électrique, l'affinité, le dopage, et le type de dopage. En plus, les défauts de différents types peuvent être définis, à la fois, dans la masse de couches et aux interfaces. En considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux à savoir : le type de charge, la distribution énergétique, la propriété optique et les transitions métastables entre les niveaux.

Toutefois, il faut noter que les Propriétés optiques telles que le coefficient d'absorption et la réflexion face avant et arrière, en fonction de la longueur d'onde, peuvent être importés des fichiers data du logiciel. On note également, que le code du SCAPS contient des fichiers data d'extension.def qui contiennent une conception et une définition du dispositif photovoltaïque standard comme le CdTe et le CIGS. En outre, la conception est modifiable grâce à des champs spécifiques.

- Fenêtre des résultats : Cette fenêtre affiche les résultats de la simulation sous forme de graphe avec la possibilité de les sauvegarder ou exporter leurs valeurs. Le SCAPS est capable de calculer les bandes d'énergie, les concentrations et les courants à un point de fonctionnement donné, les caractéristiques (J-V), les caractéristiques du courant alternatif (C et G en fonction de la tension V et /ou f),

le rendement quantique (également avec polarisation lumière ou tension), et les bandes d'énergies en régime alternatif. [9]



Figure III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

III.4.1.Lancer SCAPS

On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3200.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action.



III.4.2.Définir le problème

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne et on ouvre (par exemple NUMOS CIGS Baseline.def. Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action.

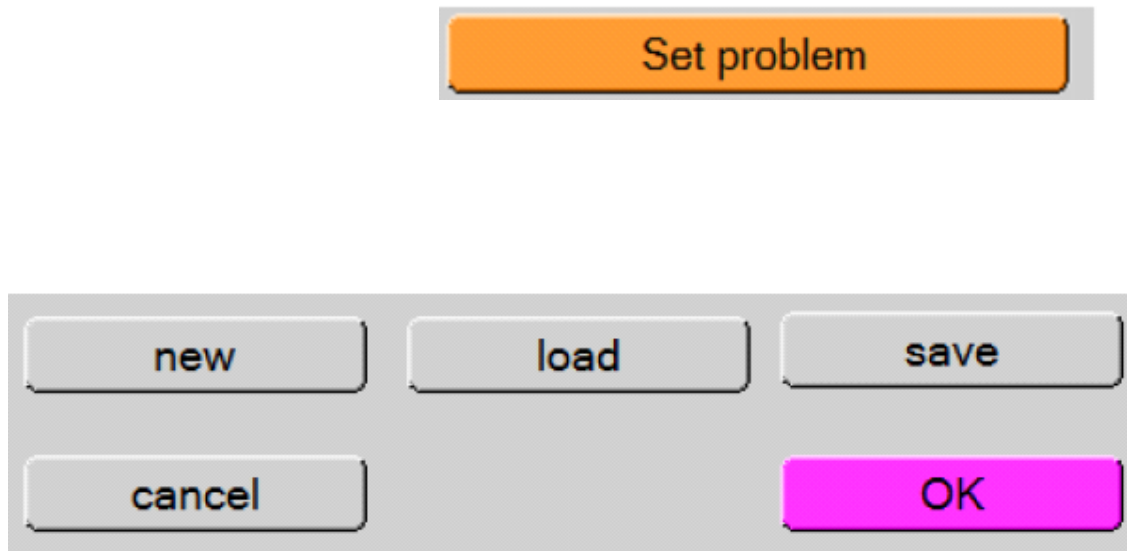


Figure III.2 : Définir le problème.

III.4.3. Définir le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. Ceci implique :

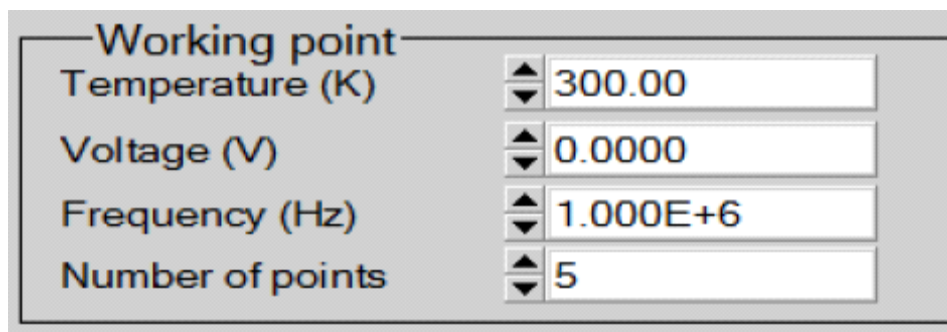


Figure III.3: Le point de fonctionnement .

* **La température T** : Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS : $N_c(T)$, $N_v(T)$, les vitesses thermiques, le voltage thermique kT et tous leurs dérivés sont les seuls variables qui ont une dépendance thermique explicite ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T , les paramètres du matériau correspondant.

* **Le voltage V** : il ne concerne pas les simulations I-V et C-V. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation C-f et $QE(\lambda)$. SCAPS commence toujours à 0 V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.

* **La fréquence f** : elle ne concerne pas les simulations I-V, $QE(\lambda)$ et C-f. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée.

* **L'illumination** : elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour $QE(\lambda)$, elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination on Sun (= 1000 W/m²) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre.

Illumination: Dark Light G(x): From internal SCAPS calculation

Light source for internal G(x) calculation

Spectrum file:
Illuminated side: from right (n-side) left (p-side)
Incident (bias) light power (W/m²)

sun or lamp

Spectrum cut off ? yes no
 Short wavel. (nm)
after cut-off

Long wavel. (nm)

Neutral Dens.
Transmission (%)
after ND

Figure III.4 : Panneau de illumination

III.4.4. Sélection des caractéristiques à simuler

Dans la partie Action du panneau action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler: IV , $C-V$, $C-f$ et $QE(\lambda)$. On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes.

III.4.5. Lancer le calcul



III.4.6. Afficher les courbes simulées :

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la *Figure III.5*. Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez basculer vers un de vos panneaux personnalisés (si vous avez toutefois simulé au moins une seule opération de mesure).

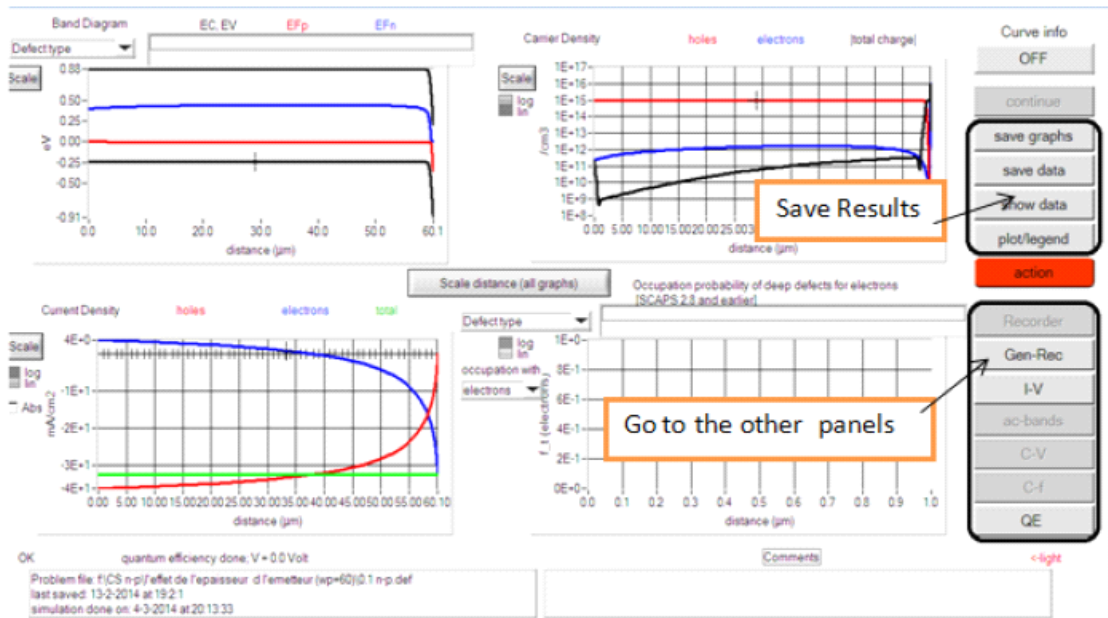


Figure III.5 : Panneau des bandes d'énergie.

III.4.7. Les courbes I-V

La Figure III.5 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. La couleur de la dernière courbe calculée est indiquée (lorsque le graphe est trop encombré, on clique CLEAR ALL GRAPHs dans le panneau d'action). Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe.

Si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, un panneau pop-up apparaîtra, avec des informations concernant le graphe, la courbe ainsi que le point cliqué.

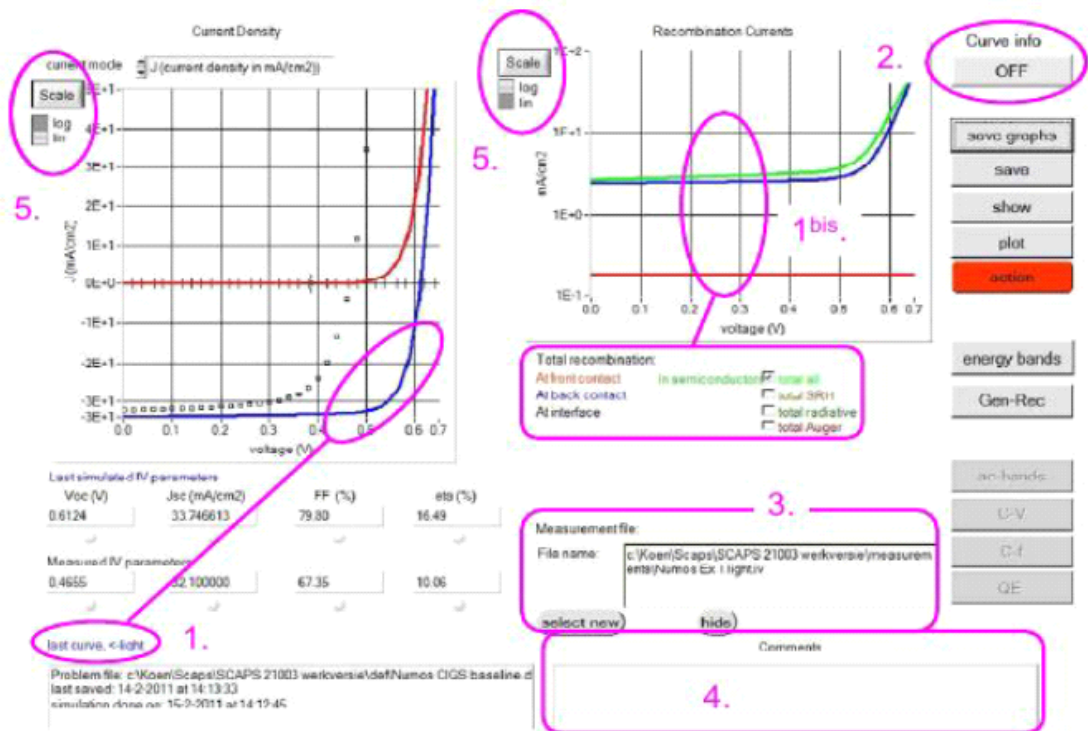


Figure III.6: Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement.

III.5. Définition d'une cellule solaire :

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou Incohérentes.

III.5.1. Edition de la structure d'une cellule solaire :

Quand on clique sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Inter change) d'extension .def qui peuvent s'ouvrir avec Notepad.exe ou Wordpad.exe. Il est déconseillé des les modifier au risque des les rendre inutilisables par la suite.

Les propriétés des couches, des contacts et d'interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la Figure III.7. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.

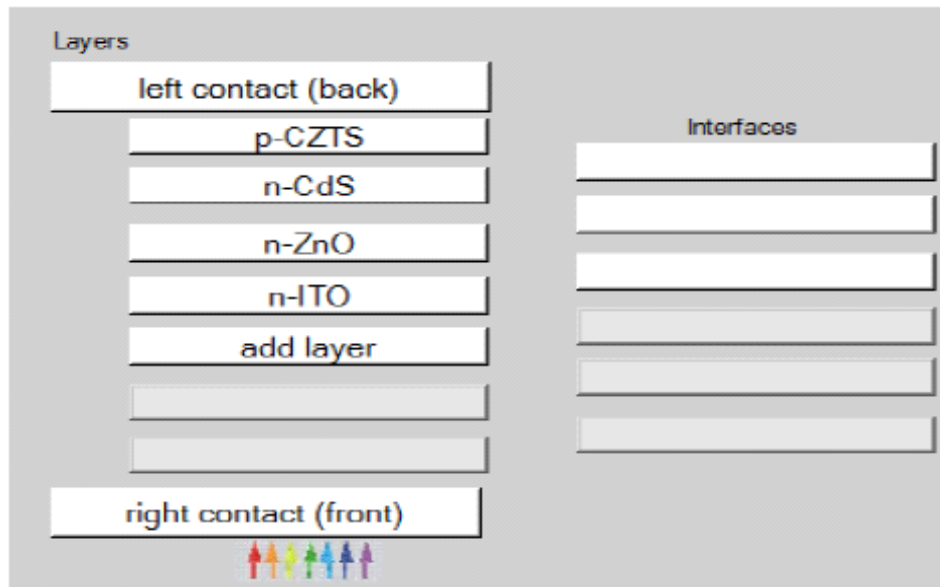


Figure III.7 : Définition de la structure d'une cellule solaire.

III.5.2. Contacts :

Les propriétés des contacts peuvent être introduits soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact 'CONTACT PROPERTIES PANEL' s'ouvre, comme le montre la Figure III.8

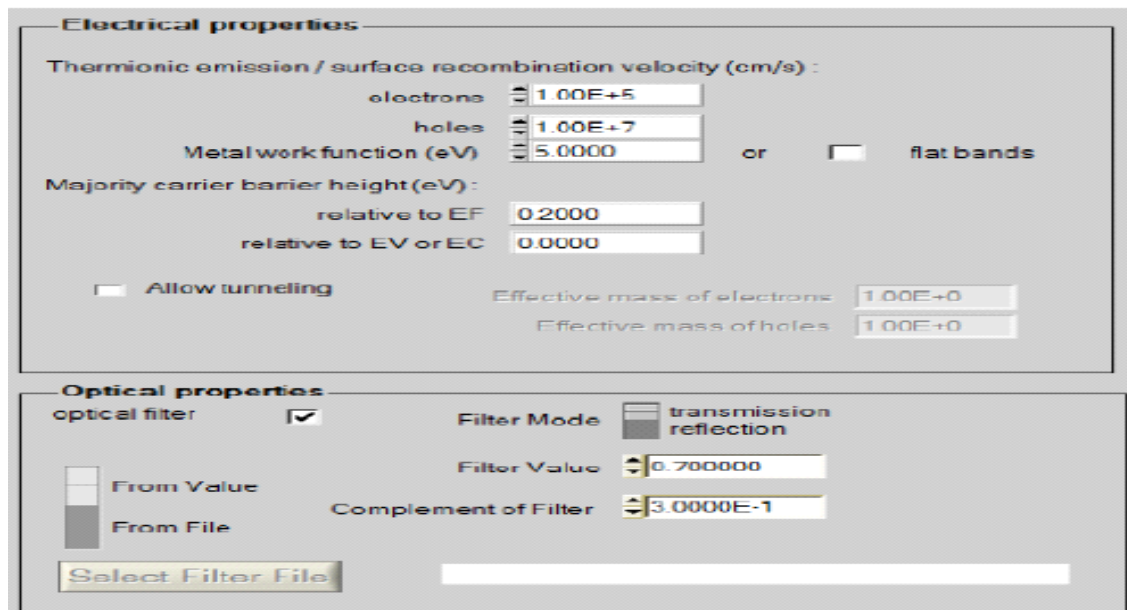


Figure III.8 : Panneau des propriétés des contacts.

Les propriétés des contacts, se divisent en propriétés électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, on définit :

- Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres ;
- Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates) ;
- La barrière des porteurs majoritaires ;
- L'effet tunnel (si on veut en tenir compte).

Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données.

III.5.3. Définition des couches :

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau.

Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage).

Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite.

Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile.

Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, vitesses thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous.

Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel.

Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres.

Dans le cinquième block, figure III.10, on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques,...).

Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme le montre la figure III.9. L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS.

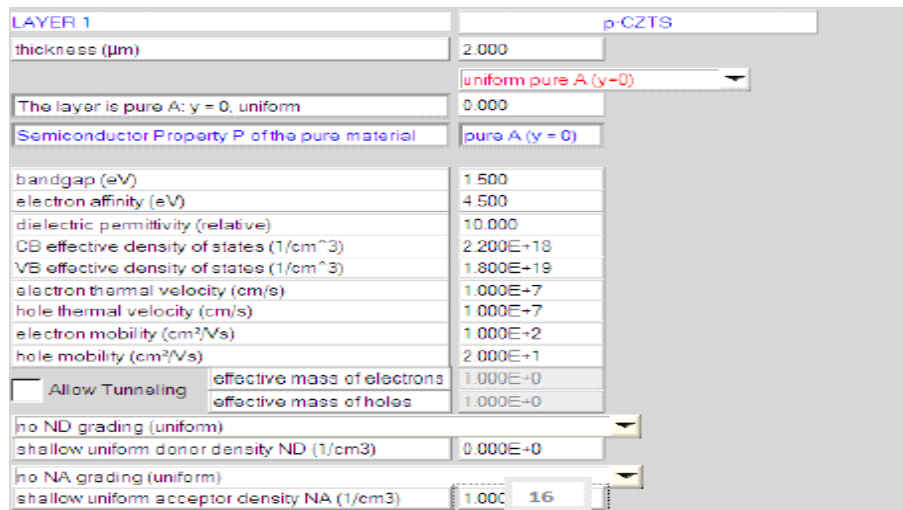


Figure III.9 : Propriétés de la couche ajoutée.

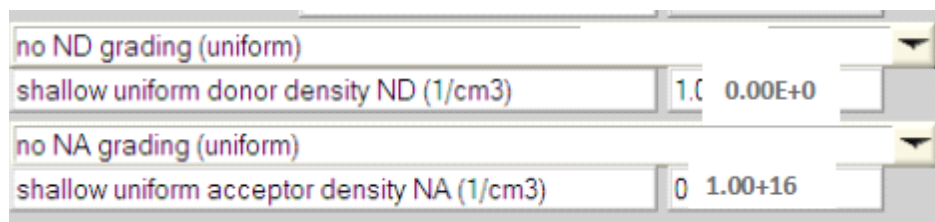


Figure III.10 : Propriétés des dopages définis.

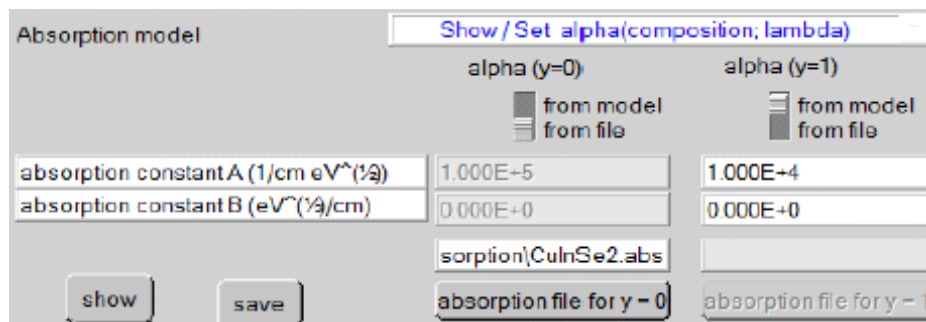


Figure III.11 : Modèle de l'absorption.

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche (Figure III.12). Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges.

Band to band recombination			
Radiative recombination coefficient (cm ² /s)	1.000E-5	1.000E-5	uniform
Auger electron capture coefficient (cm ⁶ /s)	1.000E-25	1.000E-25	uniform
Auger hole capture coefficient (cm ⁶ /s)	1.000E-25	1.000E-25	uniform

Defect 4 of layer 1	
defect type	Single Donor (0/+)
capture cross section electrons (cm ²)	1.000E-15
capture cross section holes (cm ²)	1.000E-15
energetic distribution	Gauß
reference for defect energy level E _i	Above EV (SCAPS < 2.7)
energy level with respect to Reference (eV)	0.600
characteristic energy (eV)	0.200
Nt grading dependent on position x: Nt (x) exponential	
Nt total (1/cm ³)	Left (x=0) 1.000E+15 Right (x=1) 1.000E+14
Nt peak (1/eV/cm ³)	Left (x=0) 2.821E+15 Right (x=1) 2.821E+14

Figure III.12 : Définition des types de recombinaison présents.

Si on introduit les défauts (pièges) ; ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents. On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges.[10]

Références

- [1] PINTO M. R, Conor S. Rafferty and Robert W. Dutton, "PSCES2 - Poisson and continuity equation solver", Stanford Electronics Laboratory Technical Report, Stanford University, September 1984.
- [2] Y. MAROUF. Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco, Mémoire de Magister. Université Med Khider Biskra, 2013.
- [3] SELBERHERR, S. Analysis and simulation of semiconductor devices. Wien, NewYork: Springer-Verlag, 1984. (s.d.).
- [4] Ben Ali M, Rahmouni S. 'Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In,Ga)Se₂', Université Ahmed Draïa Adrar , 2018 .
- [5] Burgelman M, Verschraegen J, Degrave S, Nollet P. Prog Photovoltaics Res Appl 2004;12:143-153.
- [6] M. Burgelman, P. Nollet, S. 'Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells', Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.
- [7] KHELIFI, S. 'Optimisation des paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire réalisée à partir de matériaux ternaires ou quaternaires basés sur les semiconducteurs II-VI . Université 'Djillali Liabes De Sidi Bel Abbes , 2017.
- [8] <http://scaps.elis.ugent.be/>
- [9] TOUAFEK N, 'Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn_{1-x}GaxSe₂', Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2015.
- [10] Ben Abderrazak Gh , 'Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS', Université Med Khider Biskra, 2014.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DICUSSIONS

IV.1.Introduction

Récemment, en raison des coûts élevés de l'expérience (techniques de conception et de caractérisation), les chercheurs se sont concentrés sur la simulation.[1]

La simulation numérique est devenue un incontournable pour tous les domaines de recherche et surtout pour les composants électroniques ou optoélectronique, en particulier dans les cellules photovoltaïques. Ces logiciels de simulation nous donnent l'occasion d'étudier et d'interpréter les résultats obtenus, afin d'optimiser la structure et les différents composants des cellules afin d'améliorer leur efficacité. Parmi les logiciels disponibles, notre choix c'est porté vers le SCAPS -1D.[2]

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude des caractéristiques électriques d'une nouvelle structure de cellules solaires en couches minces, avec Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS), $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$ (CZTSSe) comme couches absorbantes, CdS comme couche tampon et ZnO comme couche fenêtre, Nous avons étudié l'effet de chaque couche de la cellule dans les différents paramètres afin d'améliorer l'efficacité de conversion η (%), la densité de courant de court-circuit I_{CC} , la tension en circuit ouvert V_{CO} , et le facteur de forme FF.

Les résultats obtenus dans cette simulation sont décrits dans la section suivante.

IV.2.Structure de la cellule étudiée

Pour effectuer une simulation dans l'environnement SCAPS-1D, la structure à simuler doit être définie correctement. Une cellule solaire est constituée d'un ensemble de couches minces semi-conductrices, dans notre étude, nous utilisons une cellule PV avec deux couches absorbantes à CIGS et CZTSSe, de la structure (n-ZnO/ n-CdS/ p-CZTSSe/ CIGS). Le schéma simplifié de la structuré est représenté sur la figure (IV.1).

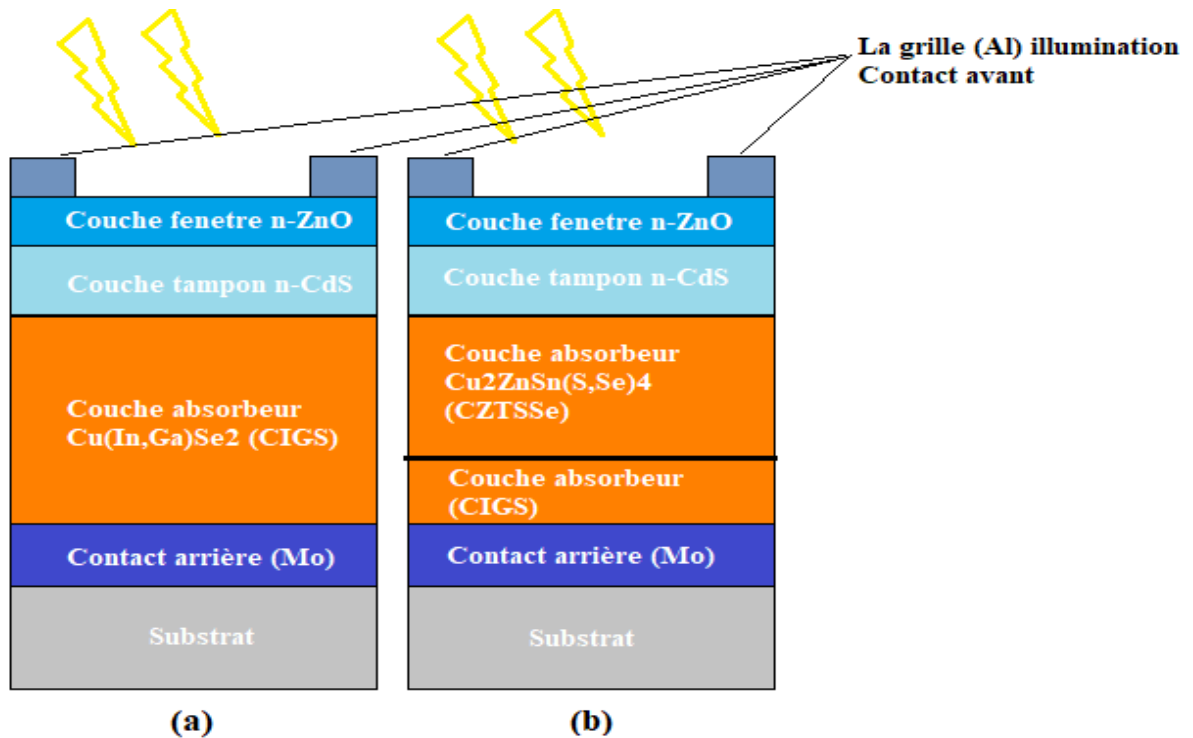


Figure IV. 1 : vue schématique des cellules solaires CIGS, (b) vue schématique de la structure CZTSSe/ CIGS.

Dans le présent travail, nous avons optimisé la structure de cellules solaires à CIGS, après en ajoutant la deuxième couche d'absorbant $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$. L'objectif est de réduire l'épaisseur du CIGS et d'améliorer l'efficacité des cellules solaires. Cela peut contribuer à réduire le coût des cellules solaires à film mince. Il existe trois couches principales dans cette cellule étudiée par le simulateur de SCAPS-1D.

IV.2.1. La couche absorbante

Une couche absorbante est responsable de convertir les photons en paires électrons-trous[11]. Cette couche doit être constituée d'un matériau avec un facteur d'absorption important, en particulier pour le visible, il est donc préférable que ce matériau ait une bande directement interdite, qui est d'un ordre de 1,4-1,6 eV. Sa conductivité doit être de type-p, et de l'ordre de $1 \cdot 10^{-2} (\Omega\text{cm})^{-1}$ [12].

IV.2.2. La couche tampon

La couche tampon est une couche entre la couche absorbante (CZTSSe) et la couche de fenêtre (ZnO). Si un contact entre la couche d'absorption et la couche fenêtre est effectué directement, une jonction photovoltaïque peut exister, mais son efficacité sera limitée par l'inadaptation des bandes interdites et des courants d'écoulement en raison de la présence de zones désordonnées au niveau des articulations du noyau. Il est donc préférable d'introduire une couche mince, appelée couche tampon, entre ces deux composés afin d'optimiser les performances de la cellule.

Cette couche doit avoir les propriétés suivantes :

- Une bande interdite intermédiaire entre 2.4 et 3.2 eV permettant une transition souple entre celle de la couche absorbante et celle de la couche fenêtre.
- Une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est, elle, 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 $10^{-3} (\Omega\text{cm})^{-1}$.
- Morphologiquement elle doit être très homogène pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains [13].

IV.2.3. La couche fenêtre

C'est la couche d'oxyde transparent conducteur (OTC), il doit être simultanément transparent et conductrice. Dans le domaine du spectre solaire, la transmission des couches doit être supérieure à 80% [14]. La conductivité de ces couches doit être supérieure à $10^3 (\Omega\text{cm})^{-1}$. De telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces de SnO_2 , In_2O_3 , de leur alliage ITO (l'oxyde d'Indium dopé à l'étain) et de ZnO (l'oxyde de Zinc) [14]. 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 de ZnO dopé à l'aluminium (ZnO:Al) ou d'ITO. En effet, la couche de ZnO intrinsèque, donc non-conductrice, évite toute fuite de courant entre la couche absorbante et le contact avant. Il a été montré que cette couche pouvait être évitée si l'on déposait une couche tampon (CdS par exemple) plus épaisse [14].

IV.3. Paramètres physiques utilisés dans la simulation

- Propriétés des différentes couches :

Tableau IV. 1: Les paramètres physiques d'entrée pour les matériaux des couches ZnO, CdS, CZTSSe et CIGS [4,15, 16,17].

Propriétés	Couches			
	n-ZnO	n-CdS	P-CZTSSe	P-CIGS
Permittivité diélectrique	10.000	10.000	13.600	10.000
Épaisseur (μm)	0.080	0.100	1.096	1.000
Bande de gap (eV)	3.400	2.450	1.096	1.200
Affinité électronique (eV)	4.550	4.450	4.100	4.500
Densité des états effective dans la BC (N_c (cm^{-3}))	4.000E+18	2.000E+18	2.200E+18	2.000E+18
Densité des états effective dans la BV (N_v (cm^{-3}))	9.000E+18	1.500E+19	1.800E+19	2.000E+18
Mobilité d'électron μ_n ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	5.000E+1	5.000E+1	1.000E+2	5.000E+1
Mobilité du trou μ_p ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	2.000E+1	2.000E+1	2.500E+1	2.000E+1
Densité du donneur N_d (cm^{-3})	5.000E+17	1.000E+15	0	0
Densité de l'accepteur N_a (cm^{-3})	0	0	1.000E+15	1.000E+15

IV.4. Résultats et discussion

IV.4.1. Influence de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à l'aide de CIGS uniquement

Nous avons optimisé les variations des valeurs d'épaisseur dans chaque couche de la cellule à base CIGS.

IV.4.1.1. Optimisation de l'épaisseur de la couche CdS

L'épaisseur de la couche CdS est variée de $0.01\mu\text{m}$ à $1.5\mu\text{m}$ tandis que l'épaisseur de la couche en CIGS est fixe ($1\mu\text{m}$). Les variations de ce paramètre de la couche CdS, tirés des différentes performances électriques, sont vu dans le tableau (IV. 2).

Tableau IV. 2 : Effet de l'épaisseur de la couche CdS sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CZTSSe.

Epaisseur(μm)	V _{co} (Volt)	J _{cc} (mA.cm ⁻²)	FF (%)	η (%)
1.00E-02	0.740387	37.34268	82.3546	22.7695
1.76E-01	0.741896	36.76957	80.9454	22.0812
3.41E-01	0.742403	36.29761	80.0313	21.5664
5.07E-01	0.742633	35.99145	79.7598	21.3185
6.72E-01	0.742735	35.82077	79.8171	21.2356
8.38E-01	0.742787	35.73936	79.9146	21.2147
1.00E+00	0.742817	35.70789	79.9688	21.2113
1.17E+00	0.742841	35.69869	79.9878	21.2115
1.33E+00	0.742863	35.69721	79.991	21.2121
1.50E+00	0.742876	35.69788	79.9891	21.2124

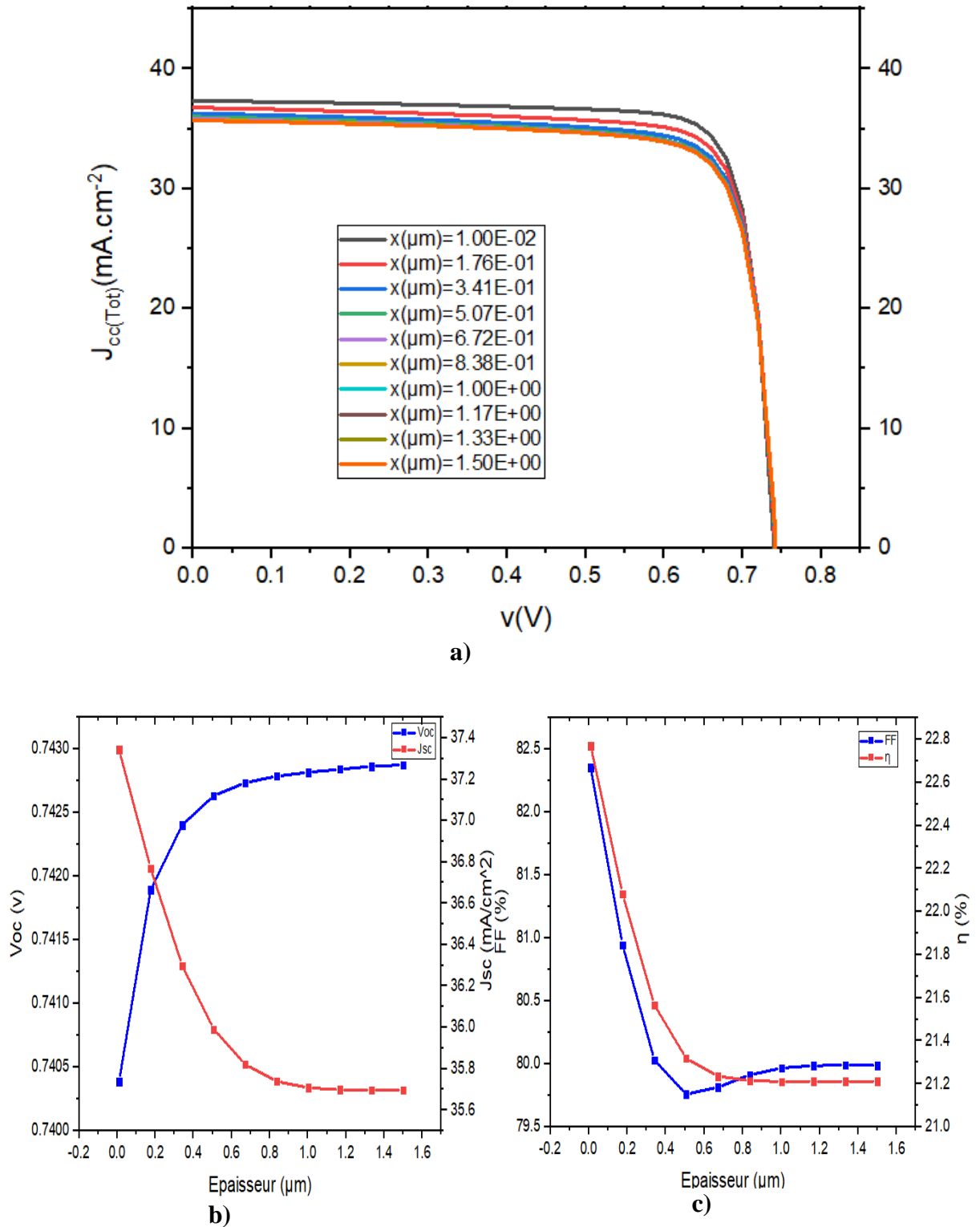


Figure IV.2: a) J_{CC} en fonction de la tension, b) J_{CC} & V_{CO} en fonction de l'épaisseur de la couche tampon CdS, c) Rendement & FF en fonction de l'épaisseur de la couche tampon CdS.

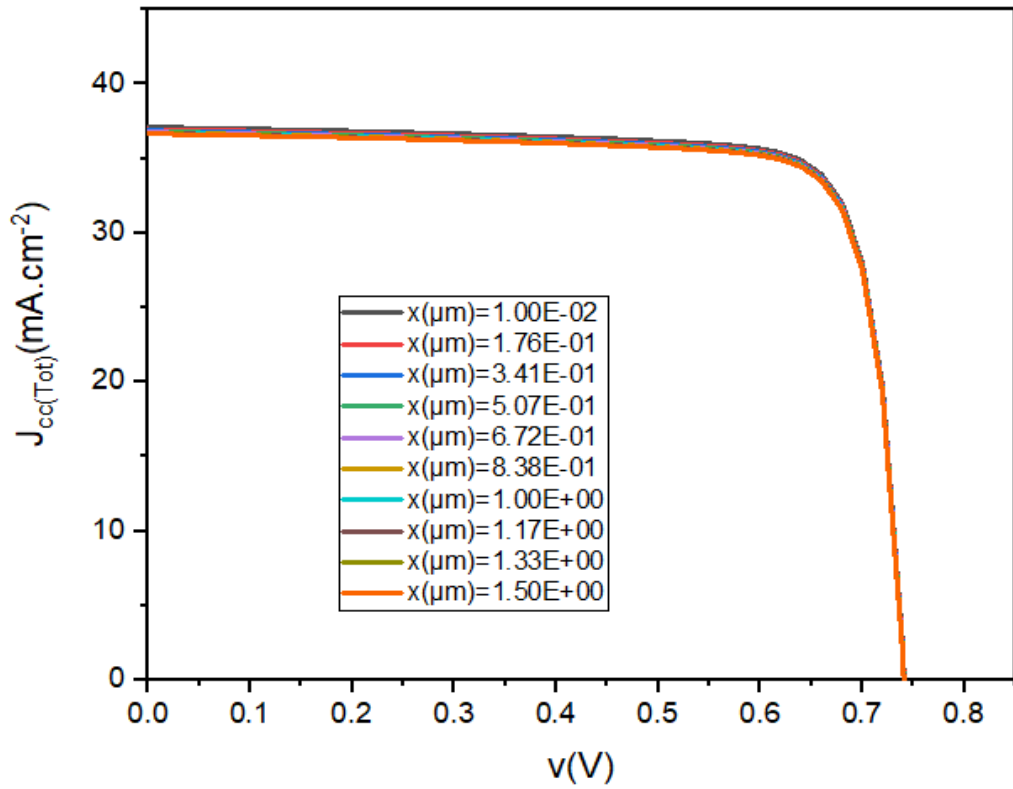
Nous remarquons que la caractéristique I-V s'améliorées pour les petites épaisseurs de CdS. La variation du rendement avec ce paramètre de la couche CdS montre qu'il y a une diminution du η , FF et J_{sc} avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CdS, néanmoins, la tension de circuit ouvert reste constante. Nous obtenons un rendement de 22.78% avec une épaisseur optimale de 0.01 μ m. Ces résultats raisonnables parce que l'énergie du gap de CdS est plus importante que l'énergie de gap de CIGS, alors plus l'épaisseur de CdS augmente plus des photons seront absorbé dans cette couche qui contient une densité élevée de défauts.[19]

IV.4.1.2.Optimisation de l'épaisseur de la couche ZnO

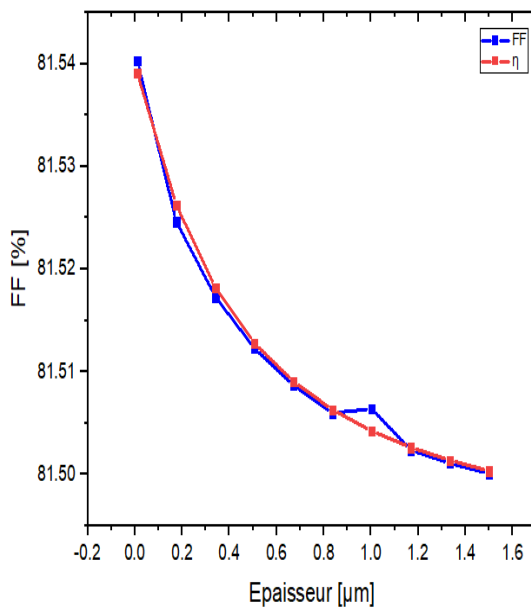
Le premier contact entre les photons et la cellule solaire, est la couche fenêtre ZnO. Cette couche est caractérisée par un gap optique élève presque de 3.4 eV. Les paramètres de la structure, pour différentes épaisseurs de couche ZnO, tirés des différentes caractéristiques électriques, sont résumés dans le tableau (IV.2) tandis que les épaisseurs des couches en CdS et en CIGS sont fixées (0.01 μ m, 1.5 μ m respectivement).

Tableau IV. 3 : Effet de variations de l'épaisseur de la couche ZnO sur les caractéristiques électriques de la cellule PV à base de CZTSSe.

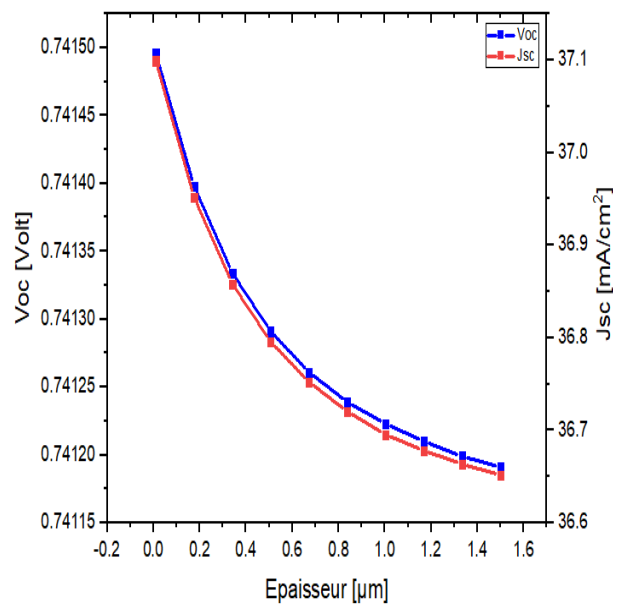
Epaisseur(μ m)	V_{co} (Volt)	J_{cc} (mA.cm ⁻²)	FF (%)	η (%)
1.00E-02	0.741496	37.0991035	81.5403	22.4308
1.76E-01	0.741398	36.9515864	81.5246	22.3343
3.41E-01	0.741334	36.8579562	81.5173	22.2738
5.07E-01	0.741291	36.7956043	81.5123	22.2335
6.72E-01	0.741261	36.7520628	81.5087	22.2053
8.38E-01	0.741239	36.7203942	81.506	22.1848
1.00E+00	0.741223	36.6954659	81.5064	22.1693
1.17E+00	0.74121	36.6781142	81.5024	22.1574
1.33E+00	0.741199	36.6634862	81.5011	22.1479
1.50E+00	0.741191	36.6516497	81.5001	22.1402



a)



b)



c)

Figure IV.3 : a) J_{CC} en fonction de la tension, b) J_{CC} & V_{CO} en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO, c) Rendement & FF en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO.

A partir des résultats par la simulation que nous représentons dans le tableau (IV.3) et dans les figures (IV.3) nous remarquons que l'influence de l'épaisseur sur les performances de la cellule solaire est très faible, ils sont presque constants. Pour les petites épaisseurs le phénomène de générations de paires électrons-trous se passe près des interfaces ce qui réduit le nombre de paires électrons-trous. En d'autres termes la couche de l'émetteur doit être la plus mince possible pour qu'elle puisse faire passer toute l'intensité de la lumière [18]. Donc on peut choisir l'épaisseur la plus petite de la couche en ZnO pour avoir des résultats acceptables du rendement η , du facteur de forme FF, de la densité de courant de court-circuit J_{CC} et la tension de circuit ouvert V_{co} . Il est clair que la valeur optimale de $0.01\mu\text{m}$ donne le rendement avec $\approx 23\%$ de cette couche.

IV.4.1.3. Optimisation de l'épaisseur de la couche CIGS

On a choisi quelques valeurs de l'épaisseur de la couche CIGS pour simuler la variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire. Les résultats de simulation sont résumés dans le tableau (IV.4).

Tableau IV. 4 : Effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CZTSSe.

Epaisseur(μm)	V_{CO} (Volt)	J_{CC} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
1.50E+00	0.753299	37.7810245	83.1611	23.668
1.61E+00	0.755554	37.8599527	83.3186	23.8335
1.72E+00	0.757692	37.9285979	83.4597	23.9848
1.83E+00	0.759732	37.9888702	83.5723	24.1201
1.94E+00	0.761353	38.0422523	83.7038	24.2436
2.06E+00	0.76284	38.0899235	83.8267	24.3571
2.17E+00	0.764255	38.1327648	83.9372	24.462
2.28E+00	0.765608	38.1715335	84.0369	24.5593
2.39E+00	0.766906	38.2068288	84.1268	24.65
2.50E+00	0.768155	38.2391412	84.2083	24.735

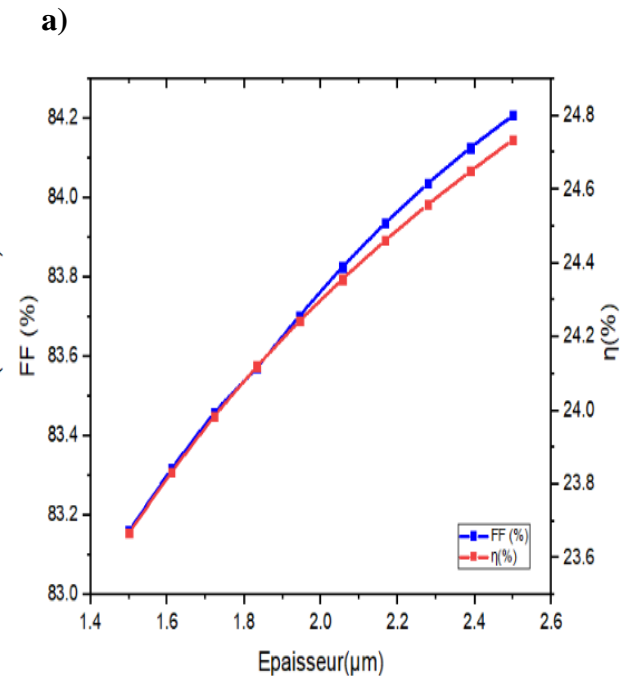
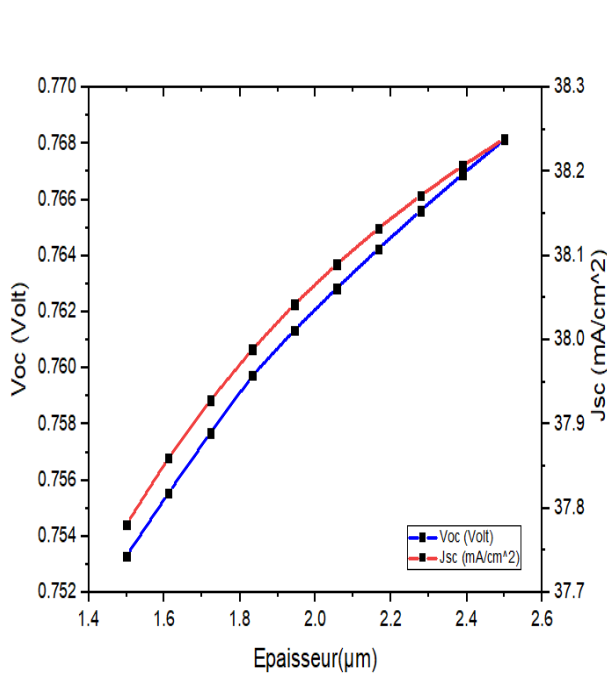
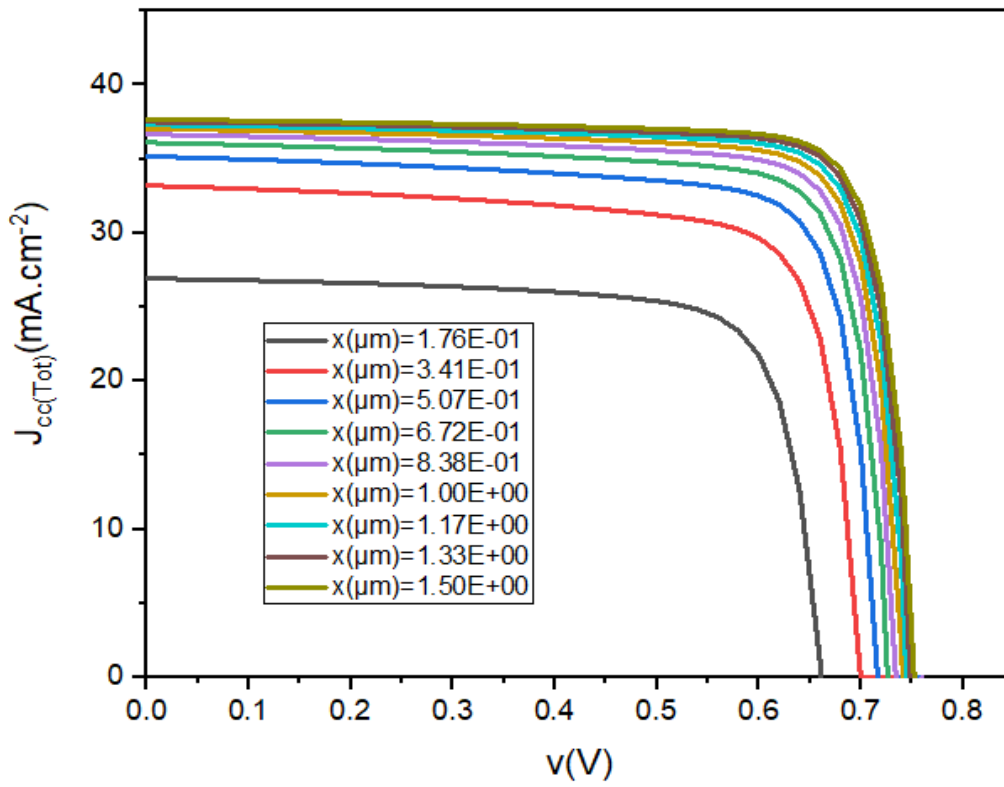


Figure IV.4 : a) J_{CC} en fonction de la tension, b) J_{CC} & V_{CO} en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS, c) Rendement & FF en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS.

D'après les résultats obtenus (voir le tableau IV.4) et les figures (IV.4 a), b) et c)), nous remarquons que, plus on augmente dans l'épaisseur de la couche CIGS au-delà de 2.5 μm , les différentes caractéristiques électriques s'améliorent. Dans la figure (IV.4.b), On observe que la tension en circuit ouvert V_{co} et la densité de courant de court-circuit J_{sc} croissent de façon substantielle par des valeurs 0.77V et 38 mA/cm^2 respectivement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante qui dépasse 2.5 μm . La figure (IV.4.c) montre qu'il y a une élévation remarquable de facteur de forme FF de 84.20% et du rendement η maximal de 24.73% avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CIGS. Le changement de la valeur du rendement quand l'épaisseur varie de 1.5-2.5 μm , C'est-à-dire que plus nous ajoutons d'épaisseur de couche, plus le rendement est augmenté, permet d'obtenir une valeur optimale de l'épaisseur, on va choisir 2.5 μm . Ceci pourrait être dû au fait que plus de photons avec de grandes longueurs d'onde sont absorbés par l'absorbeur lorsque celui-ci est plus large et de ce fait un nombre accru de paires électron-trou est observé. Ceci produira donc des améliorations dans les valeurs de J_{sc} , V_{co} , FF et donc du rendement.[15]

Les résultats de simulation sur l'optimisation de l'épaisseur de chaque couche étudiée sont résumés dans les deux tableaux suivants :

Tableau IV. 5 : Les valeurs optimales de l'épaisseur pour chaque couche.

P-CIGS (μm)	n-CdS (μm)	n-ZnO (μm)
2.5	0.01	0.01

Tableau IV. 6 : Les performances de la cellule pour les valeurs optimales de l'épaisseur de chaque couche.

V_{co} (Volt)	J_{cc} ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	FF (%)	η (%)
0.76	38	84	24.73

IV.4.2. Influence du dopage de chaque couche sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à l'aide de CIGS uniquement

Le matériau est fortement influencé par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie [18]. Dans cette partie nous intéressons d'étudier l'effet de la concentration de dopage pour les couches ZnO, CdS et CIGS sur les caractéristiques électriques pour cela nous utilisons les valeurs optimales de l'épaisseur de ces couches que mentionnes précédentes.

IV.4.2.1. Optimisation du dopage de la couche en CdS

Nous avons varié la concentration du dopage Nd de la couche de CdS dans la marge de $1.00E+15$ à $5.00E+20 \text{ cm}^{-3}$, on prendre la valeur optimale du dopage de la couche ZnO Nd qui est de $5.00E+17 \text{ cm}^{-3}$.

Tableau IV. 7 : L'influence du dopage de la couche CdS sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage ND(cm^{-3})	Voc (Volt)	Jsc (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
1.00E+15	0.789842	38.6969769	85.1132	26.0144
5.56E+19	0.789574	38.7600962	85.4359	26.1468
1.11E+20	0.789573	38.7597411	85.4364	26.1467
1.67E+20	0.789573	38.7595871	85.4366	26.1466
2.22E+20	0.789572	38.7594989	85.4368	26.1466
2.78E+20	0.789572	38.7594413	85.4369	26.1466
3.33E+20	0.789572	38.7594005	85.4369	26.1466
3.89E+20	0.789572	38.7593701	85.437	26.1465
4.44E+20	0.789572	38.7593465	85.437	26.1465
5.00E+20	0.789572	38.7593277	85.4371	26.1465

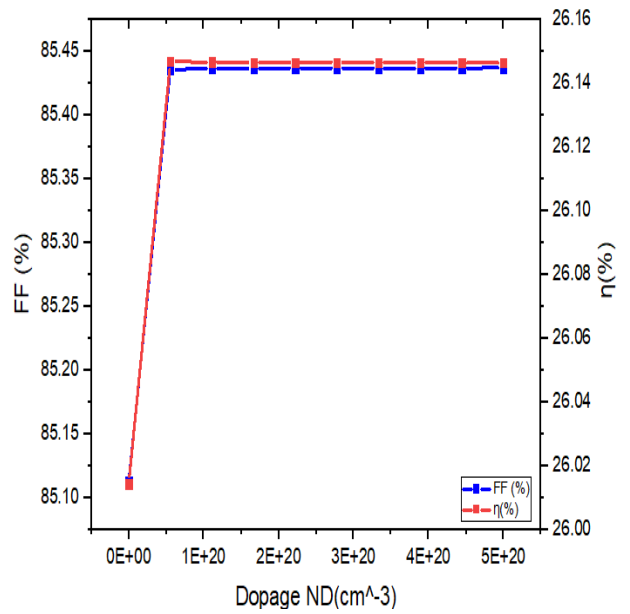
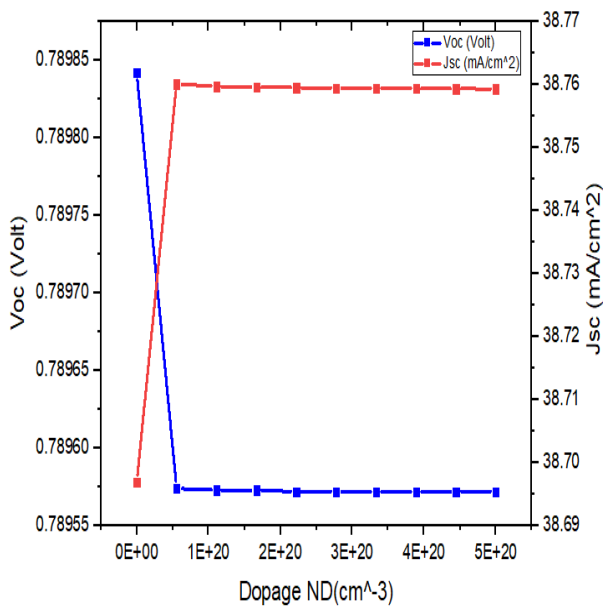
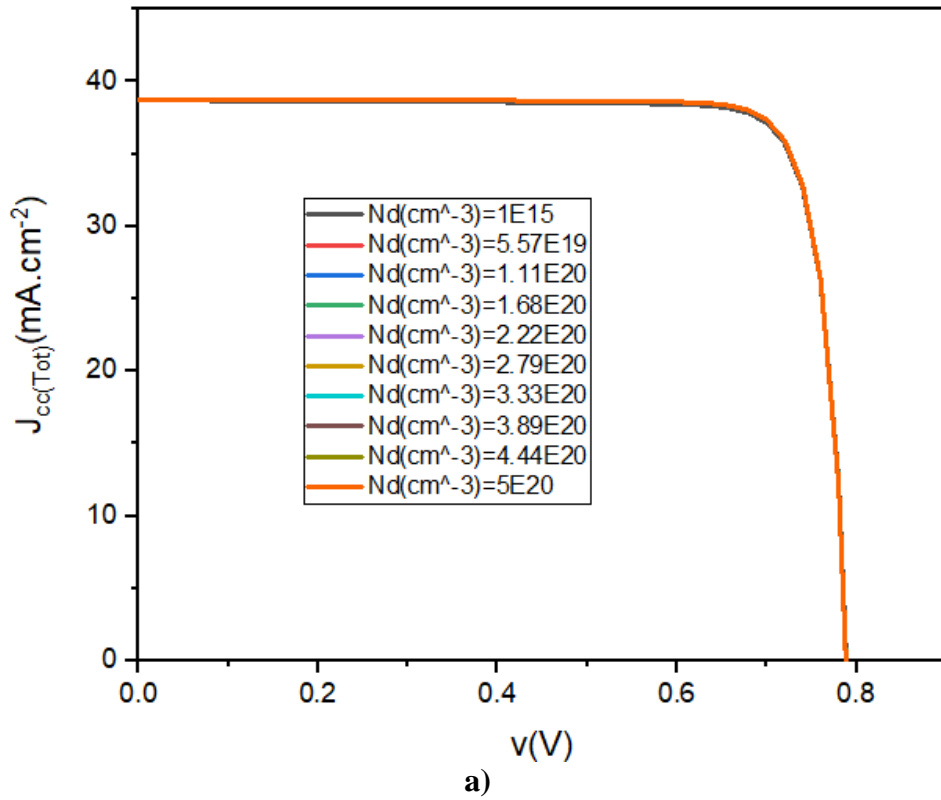


Figure IV.5 : a) J_{CC} en fonction de la tension, b) J_{CC} & V_{oc} en fonction du dopage de la couche CdS , c) Rendement & FF en fonction du dopage de la couche CdS.

Les résultats obtenus (figures IV.5) montrent que l'augmentation du dopage de la couche CdS influe positivement sur le rendement (η) et le facteur de forme (FF). Alors que, la tension de circuit ouvert (V_{co}) presque reste fixe et la densité de courant de court-circuit J_{sc} décroît pour le dopage Nd de $1.1E18\text{cm}^{-3}$, après cette valeur la densité augmente mais avec des petits changements. Donc, la valeur optimale de dopage de couche CdS est de $1.1E20\text{cm}^{-3}$ pour un rendement optimal de 26.14%.

IV.4.2.2. Optimisation du dopage de la couche ZnO

Dans cette couche qui est de type donneur nous avons fait la simulation pour les valeurs de dopage Nd dans la marge de 10^{15} à 10^{20}cm^{-3} on fixe la concentration de dopage par défaut : le donneur Nd de la couche de CdS de $1.1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ et l'accepteur Na de la couche de CIGS de $2 \times 10\text{cm}^{-3}$. Les résultats sont résumés dans le tableau (IV.6).

Tableau IV. 8 : L'influence du dopage de la couche ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage $N_d(\text{cm}^{-3})$	V_{co} (Volt)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
1.00E+15	0.790308	38.6577952	83.3528	25.4656
5.56E+19	0.789769	38.7163081	85.2627	26.0707
1.11E+20	0.789766	38.7175045	85.2672	26.0728
1.67E+20	0.789764	38.7180501	85.2692	26.0737
2.22E+20	0.789763	38.71838	85.2704	26.0743
2.78E+20	0.789763	38.7186065	85.2712	26.0747
3.33E+20	0.789762	38.7187741	85.2718	26.0749
3.89E+20	0.789762	38.7189055	85.2723	26.0752
4.44E+20	0.789762	38.7190115	85.2726	26.0753
5.00E+20	0.789762	38.7190995	85.2729	26.0755

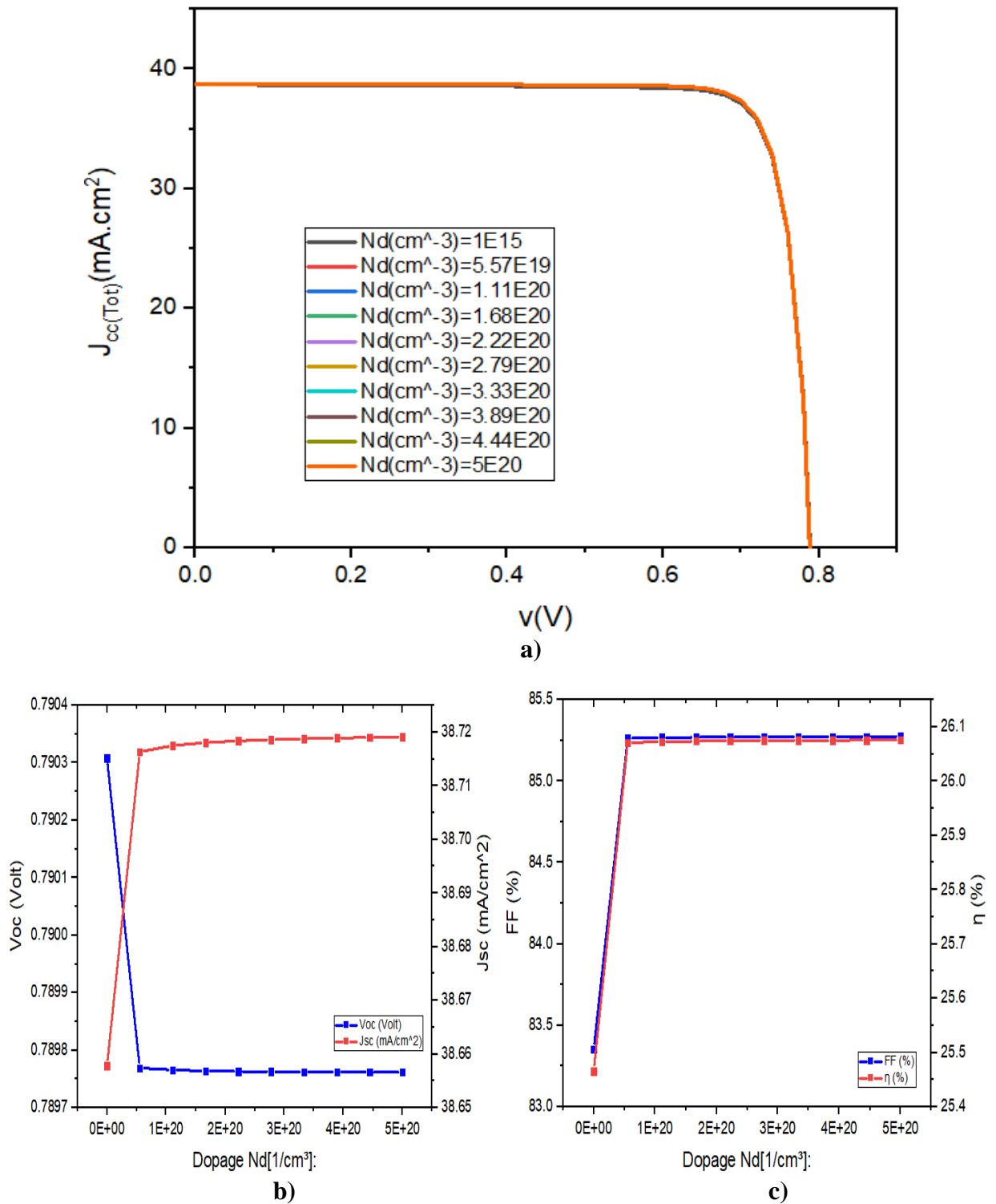


Figure IV.6 : a) J_{CC} en fonction de la tension, b) J_{CC} & V_{CO} en fonction du dopage de la couche ZnO , c) Rendement & FF en fonction du dopage de la couche ZnO.

La lecture des résultats obtenus permet de déduire l'effet du dopage de la couche ZnO sur les performances photovoltaïques, nous remarquons l'augmentation des caractéristiques

électriques qui sont la densité de courant de court-circuit J_{sc} , le facteur de forme FF et le rendement η et la tension de circuit ouvert V_{co} (cette dernière augmente mais par des valeurs non considérable) avec l'augmentation du dopage de la couche ZnO. Lorsque le dopage de la couche ZnO augmente, la barrière de potentiel dans l'hétérojonction ZnO/ CdS/ CIGS diminue, et permet une augmentation de la zone de charge d'espace, d'où une amélioration de la collecte des porteurs photo-générés et donc une augmentation du rendement de conversion [18], il devient 26.07% pour la valeur optimale de 10^{20} cm^{-3} .

IV.4.2.3. Optimisation du dopage de la couche en CIGS

Les valeurs de densité de l'accepteur Na de la couche CIGS est plus importantes pour tout dispositif à jonction p-n car elle gouverne les spécifications du dispositif et il est préférable si on veut obtenir des résultats pertinents de simulation [15]. Pour cela, nous avons varié la concentration de dopage Na de la couche absorbante pour étudier leur effet sur les performances électriques de la cellule étudiée dans la gamme entre 1.11×10^{17} à $5.56 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Les dopages Nd des couches CdS et ZnO sont respectivement 1.1×10^{20} et 10^{20} cm^{-3} .

Tableau IV. 9 : L'influence du dopage de la couche CIGS sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage Na (cm^{-3})	V_{CO} (Volt)	J_{CC} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
1.11E+17	0.868212	38.0926336	86.0711	28.4659
2.22E+17	0.886248	38.0025224	86.25	29.0487
3.33E+17	0.896928	37.9626558	86.3269	29.3941
4.44E+17	0.904317	37.9383362	86.4031	29.6434
5.56E+17	0.9099	37.9210239	86.4725	29.8368

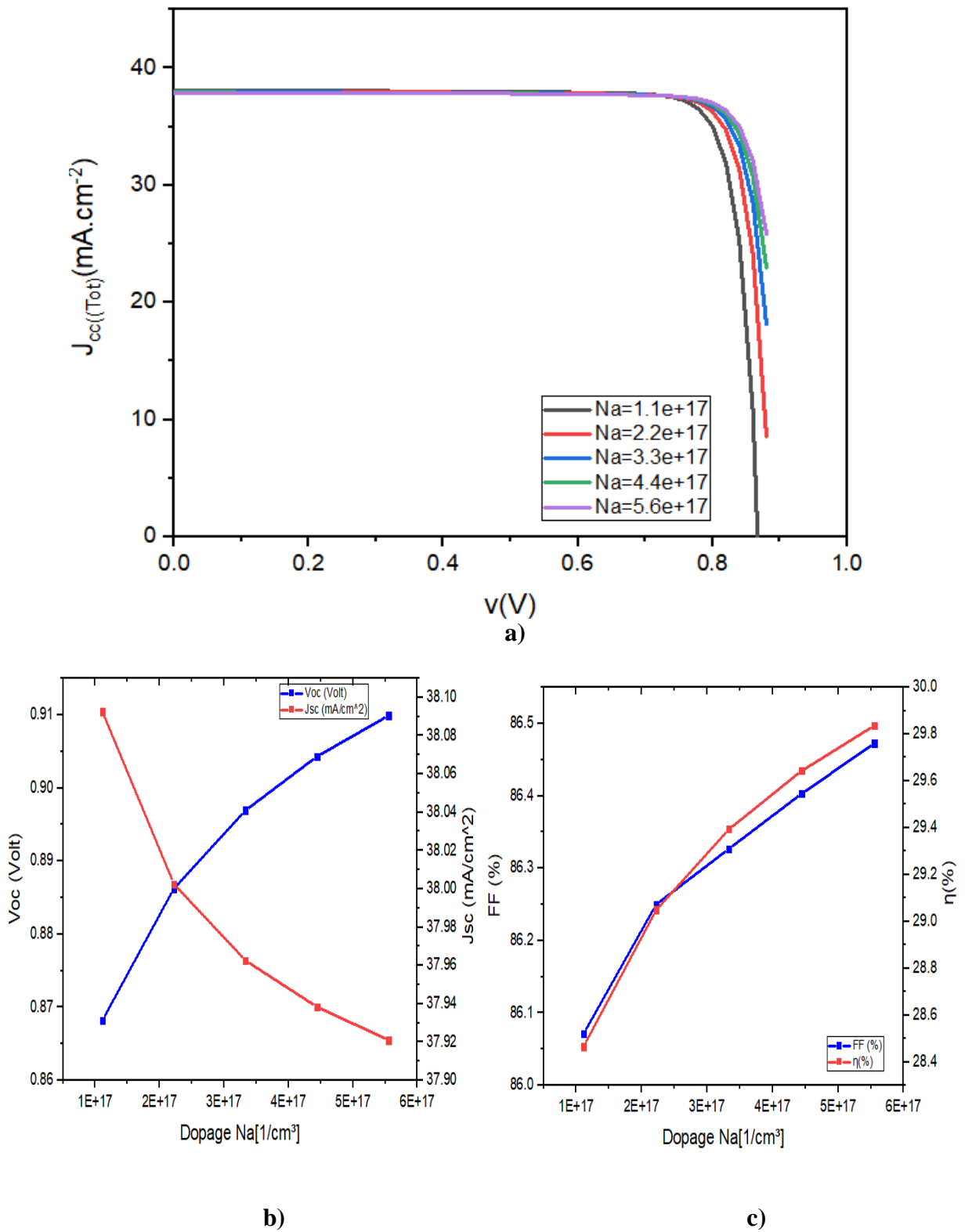


Figure IV.7 : a) J_{CC} en fonction de la tension, b) J_{CC} & V_{CO} en fonction du dopage de la couche CIGS, c) Rendement & FF en fonction du dopage de la couche CIGS.

Afin d'obtenir les effets de dopage Na à partir des résultats qui nous constatons, on peut dire, que les caractéristiques électriques possèdent un seuil de dopage pour la couche CIGS. La tension V_{CO} , le Facteur de forme FF et le rendement η augmentent avec la densité des porteurs (Na), alors que le courant J_{CC} décroît avec celle-ci jusqu'à $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, mais après cette valeur de dopage les valeurs des performances sont négligeables car nous remarquons que la courbe J-V ni est pas fonctionnée. Ceci peut donc réduire la possibilité de collection des électrons libres générés par le rayonnement incident au contact avant et donc contribuer à abaisser la valeur de J_{sc} . Lorsque la concentration des porteurs augmente dans la couche absorbante, le semi-conducteur devient dégénéré et ceci est une raison valable pour limiter les grandes valeurs de Na. Puisque la cellule solaire est confrontée à différentes conditions climatiques, il est important et même nécessaire d'étudier la stabilité de la cellule à différentes température de fonctionnement.[15]

Na (p-CIGS)	Nd (n-CdS)	Nd (n-ZnO)
5.56E+17	5.56E+19	3.89E+20

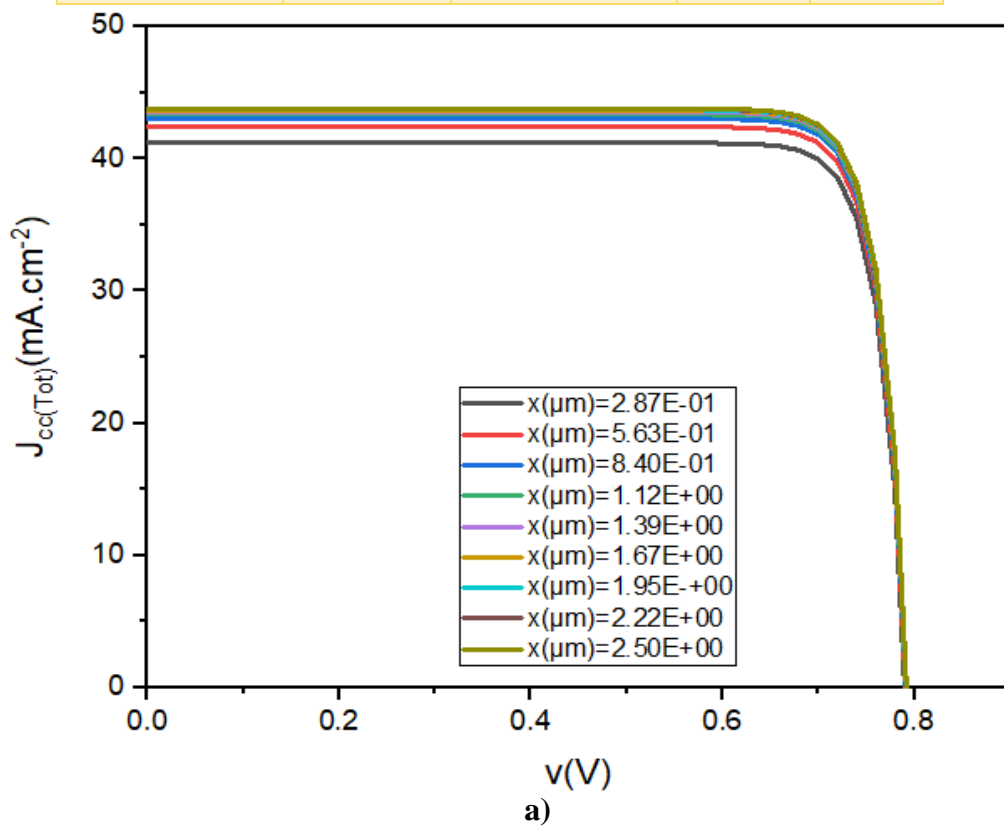
V_{CO} (Volt)	J_{CC} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
0.8	38	86.5	29.84

IV.4.2.4. Optimisation de l'épaisseur de la couche CZTSSe

On a choisi quelques valeurs de l'épaisseur de la couche CZTSSe pour simuler la variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire. Les résultats de simulation sont résumés dans le tableau (IV.10).

Tableau IV. 10 : Effet de l'épaisseur de la couche CZTSSe sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Epaisseur (μm)	V_{CO} (Volt)	J_{CC} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
2.87E-01	0.791359	41.2329768	85.8281	28.0058
5.63E-01	0.792135	42.430206	85.8991	28.8711
8.40E-01	0.792517	43.0398707	85.9173	29.3062
1.12E+00	0.792716	43.3615892	85.9229	29.5346
1.39E+00	0.792826	43.5404018	85.9249	29.6612
1.67E+00	0.792891	43.6462501	85.9256	29.736
1.95E+00	0.792933	43.7135724	85.926	29.7836
2.22E+00	0.792962	43.7597826	85.9261	29.8162
2.50E+00	0.792983	43.7939545	85.9262	29.8404



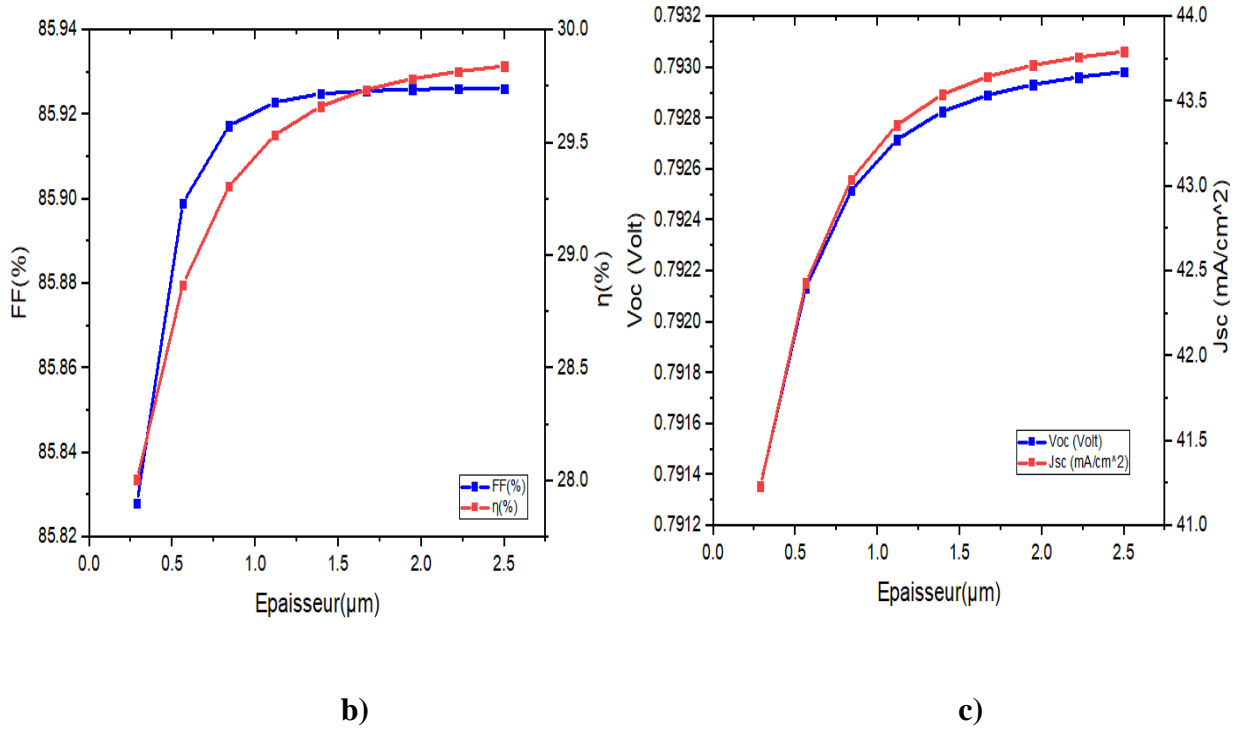


Figure IV.8 : a) J_{CC} en fonction de la tension, b) J_{CC} & V_{CO} en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSSe, c) Rendement & FF en fonction de l'épaisseur de la couche CZTSSe.

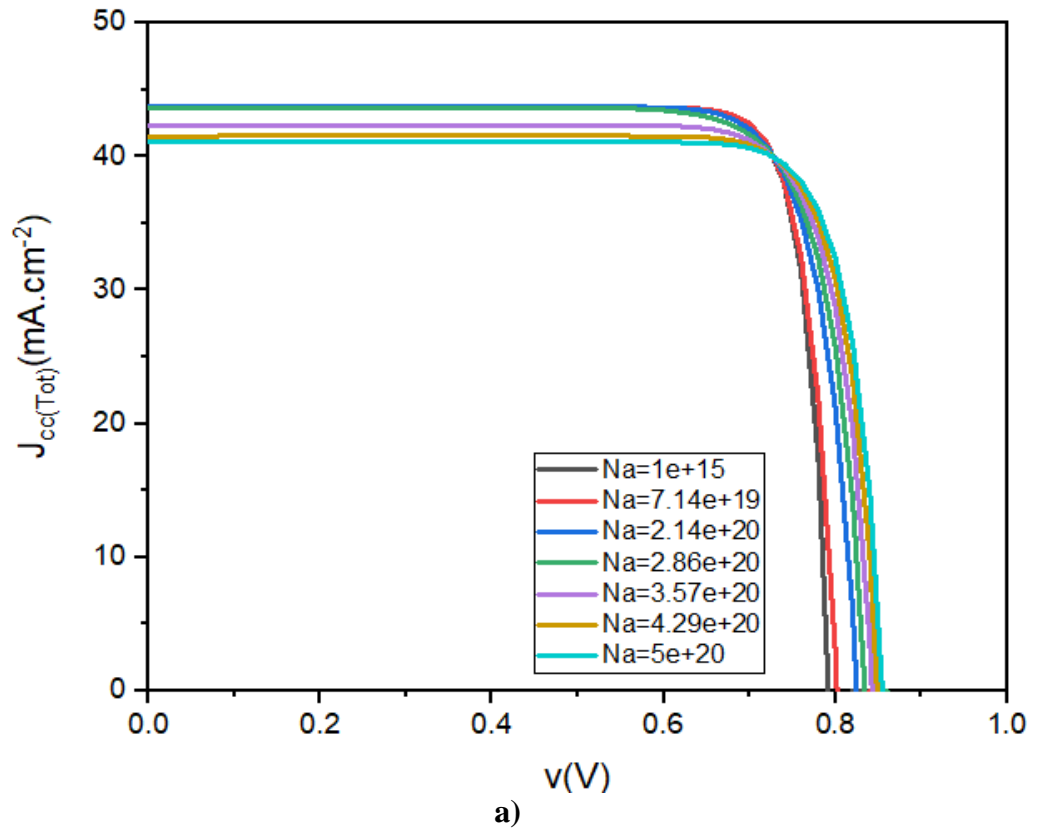
IV.4.2.5. Optimisation du dopage de la couche en CZTSSe

Les valeurs de densité de l'accepteur N_a de la couche CZTSSe est plus importantes pour tout dispositif à jonction p-n car elle gouverne les spécifications du dispositif et il est préférable si on veut obtenir des résultats pertinents de simulation [15]. Pour cela, nous avons varié la concentration de dopage N_a de la couche absorbante pour étudier leur effet sur les performances électriques de la cellule étudiée dans la gamme entre 1×10^{13} à 10^{18} cm^{-3} . Les dopages N_d des couches CdS et ZnO sont respectivement 1.1×10^{20} et 10^{20} cm^{-3} .

Tableau IV. 11 : Effet du dopage de la couche CZTSSe sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Dopage N_a (cm^{-3})	V_{CO} (Volt)	J_{CC} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
1.00E+15	0.792913	43.6813525	85.9258	29.7608
7.14E+19	0.802003	43.7213091	84.8658	29.7579
2.14E+20	0.825358	43.7214263	81.7122	29.4865
2.86E+20	0.835142	43.6412638	80.272	29.2565

3.57E+20	0.843233	42.281246	81.6952	29.1267
4.29E+20	0.84969	41.5230583	82.5741	29.1336
5.00E+20	0.85542	83.1304	29.209	



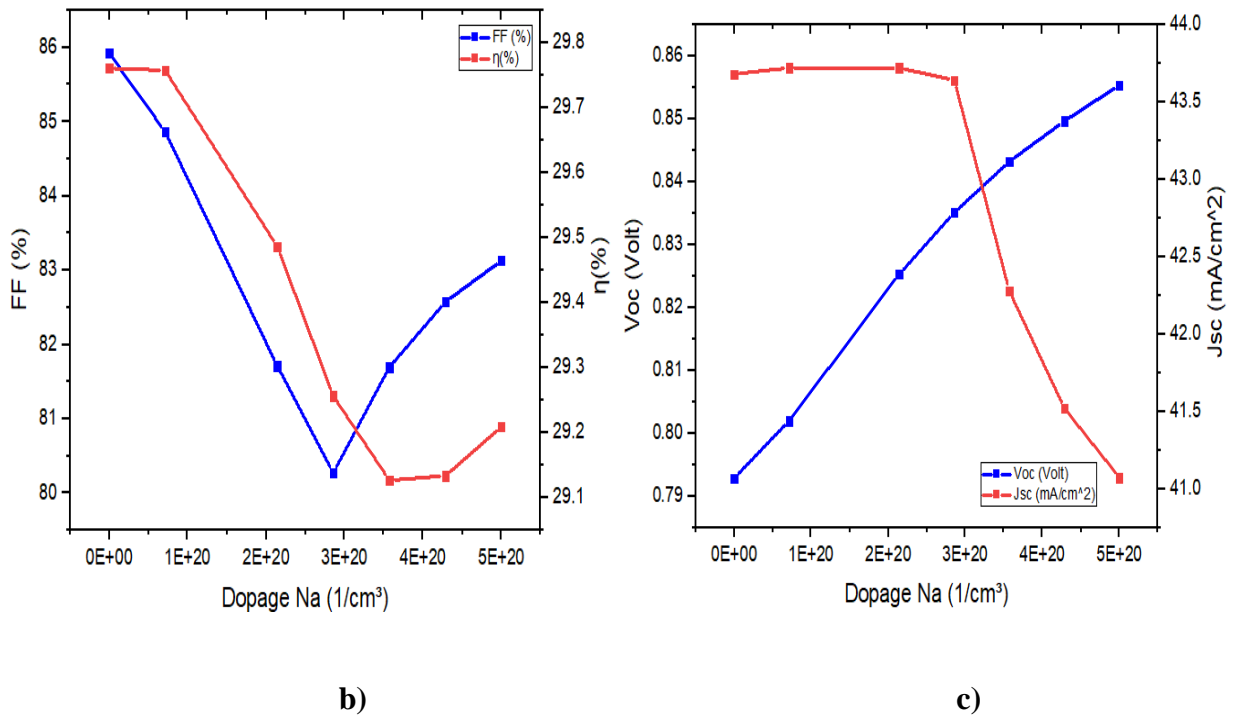


Figure IV.9 : a) J_{CC} en fonction de la tension, b) J_{CC} & V_{CO} en fonction du dopage de la couche CZTSSe , c) Rendement & FF en fonction du dopage de la couche CZTSSe.

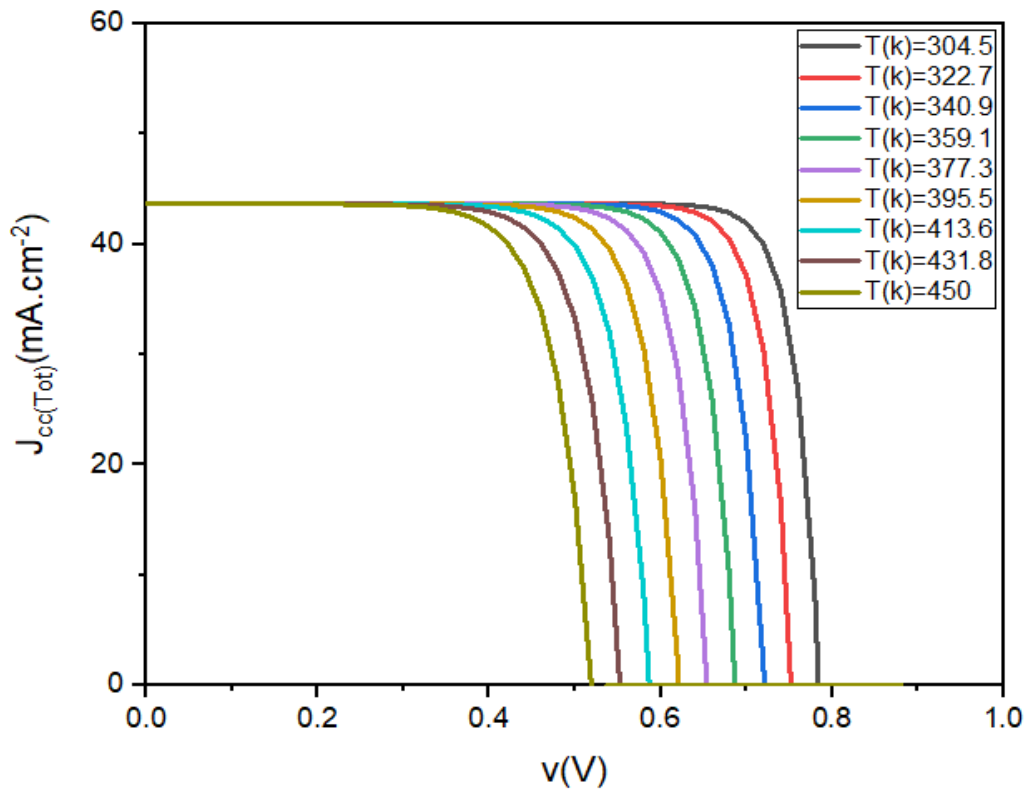
IV.4.3. Influence de la température sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. L'influence de la température sur les paramètres de performance de la cellule a été étudiée pour des températures allant de 305-450 °K avec un pas de 10 °K, on peut obtenir les résultats dans le tableau (IV.12) et les figures (IV.10).

Tableau IV. 12 : Effet de la température sur les caractéristiques électrique de la cellule solaire.

Temperature(K)	Voc (Volt)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
3.05E+02	0.785096	43.6809945	85.6455	29.3711
3.23E+02	0.753022	43.6796417	84.5489	27.8096
3.41E+02	0.720979	43.6783649	83.3411	26.2451
3.59E+02	0.687886	43.6771725	82.1408	24.6791
3.77E+02	0.654806	43.6760824	80.8188	23.1136

3.96E+02	0.621518	43.675053	79.3901	21.5503
4.14E+02	0.587493	43.6741009	77.913	19.9911
4.32E+02	0.553367	43.6732246	76.2941	18.4382
4.50E+02	0.519143	43.6723785	74.5145	16.8941



a)

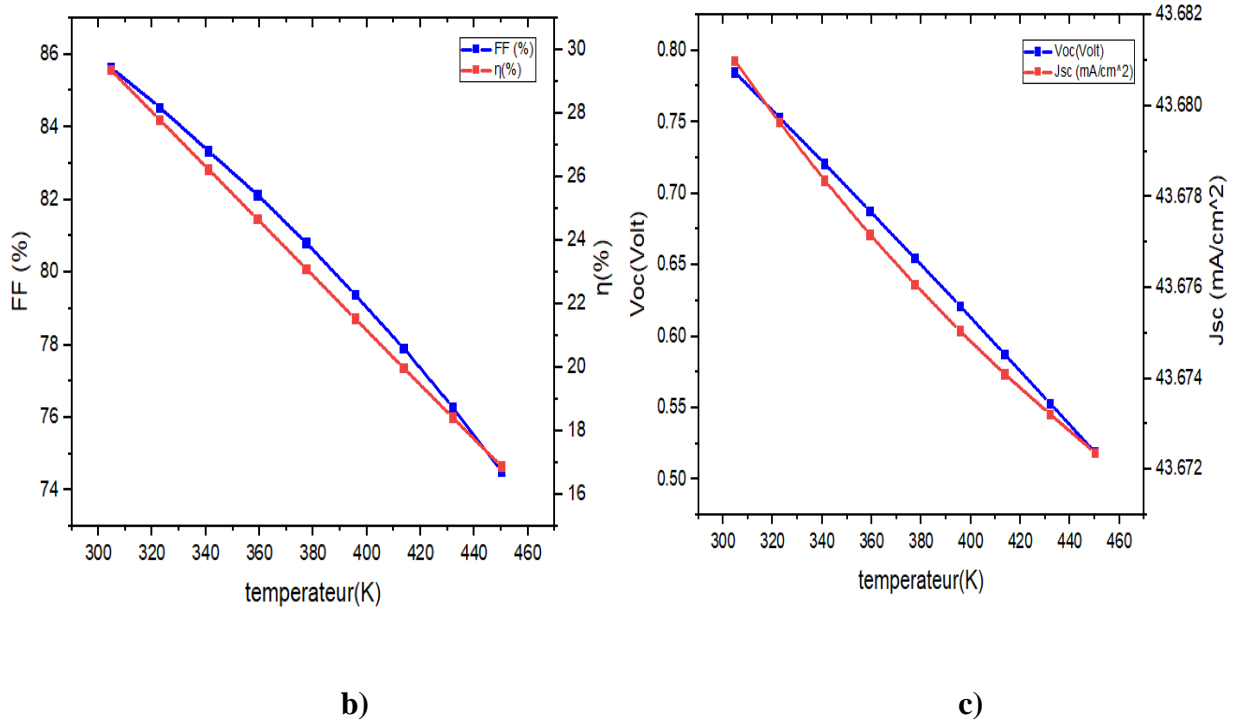


Figure IV.10 : a) J_{CC} en fonction de la tension, b) J_{CC} & V_{oc} en fonction de la température, c) Rendement & FF en fonction de la température.

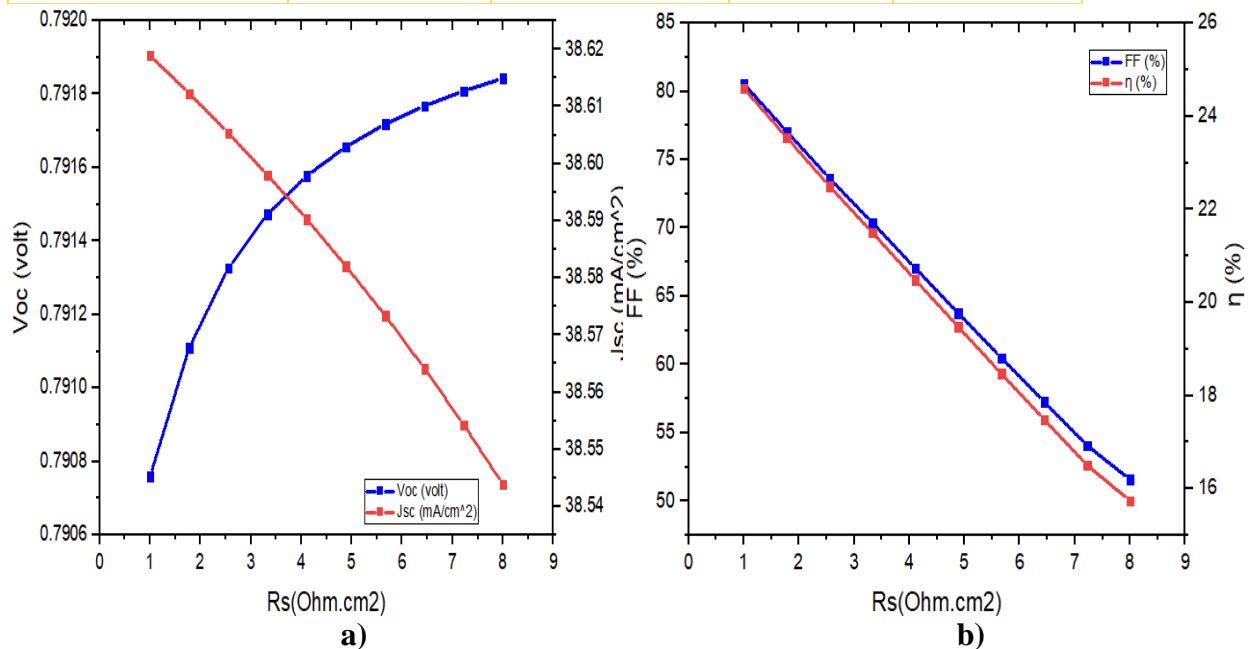
Comme on peut le voir au tableau et les figure (IV.10), les valeurs de V_{oc} , FF et le rendement décroissent fortement avec l'augmentation de la température alors que J_{sc} reste fixe jusqu'à 380 °K puis il décroît lentement avec celle-ci. Lorsque la température augmente, la bande de gap devient plus étroite et ceci accélère le phénomène de recombinaison des paires électrons-trous entre la bande de conduction (BC) et la bande de valence (BV)[18]. Les électrons dans la cellule gagnent plus d'énergie et deviennent par-là plus instables et plus susceptibles à se recombiner avec les trous avant d'atteindre la zone de charge et d'espace et être collectés. Ceci contribue à décroître les valeurs de tension et, de facteur de forme et de rendement de conversion [15]. C'est pour ça, on peut dire que le rendement optimal est de 29.37% pour 305°K.

IV.4.4. Influence de la résistance série sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

En utilisant le simulateur de capacité de cellule solaire (SCAPS), l'effet de la résistance série. On peut obtenir les résultats dans le tableau (IV.13) et les figures (IV.11).

Tableau IV. 13 : Effet de la résistance série (R_s) sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.

R_s (Ohm.cm ²)	V_{CO} (volt)	J_{CC} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
1.00E+00	0.790759	38.618906	80.5585	24.6012
1.78E+00	0.79111	38.6122879	77.0817	23.5458
2.56E+00	0.791327	38.6053247	73.635	22.4951
3.33E+00	0.791473	38.5979821	70.3817	21.5011
4.11E+00	0.791578	38.5902291	67.053	20.4828
4.89E+00	0.791657	38.5820273	63.7572	19.4738
5.67E+00	0.791719	38.5733375	60.4942	18.4745
6.44E+00	0.791768	38.5641109	57.2648	17.4851
7.22E+00	0.791809	38.554297	54.0698	16.5062
8.00E+00	0.791843	38.5438326	51.5845	15.7439

**Figure IV.11 :** a) J_{CC} & V_{CO} en fonction de la résistance série R_s , b) Rendement & FF en fonction de la résistance série R_s .

La résistance série R_s modélise les pertes résistives dans la structure (de base et émettrice), les résistances de contact des interfaces métal/semiconducteur et celles du métal lui-même. Pour minimiser son influence sur le courant de la cellule, R_s doit être minimisée

en optimisant le contact métal/semiconducteur et en diminuant la résistivité du matériau. Un compromis doit être trouvé entre le R_s et la recombinaison des porteurs : un dopage excessif entraîne une recombinaison trop importante.

Dans le présent, nous avons fait varier les valeurs de la résistance série (forme 0-9 Ohm cm^2). Dans la (Figure IV.11) Nous montrons l'effet de la série résistance (R_s) sur le FF et l'efficacité des cellules solaires CIGS/ CZTSSe. Nous voyons que le facteur de forme et l'efficacité des cellules solaires, sont affectés rapidement lorsque nous augmentons la résistance série R_s .

Tableau IV. 14 : Comparaison avec des autres résultats de simulation.

Structure de cellule	V_{co} (V)	J_{CC} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)	Réf
CIGS/ CZTSSe/ CdS/ i-ZnO	0.89	43.41	76.67	29.74	Notre travail
CIGS/ CZTSSe/ CdS/ i-ZnO	0.60	43..7	82.78	21.84	[21]
CIGS/ CZTSSe/ CdS/ i-ZnO	0.56	37.0	79.0	16.5	[22]

IV.5. Les résultats de la simulation après l'optimisation des couches

Après l'insertion de la couche de CZTSSe comme deuxième couche absorbante au-dessus de la couche CIGS, nous avons pris les valeurs optimales obtenus et nous avons tracé la caractéristiques I(V) de notre structure. La figure (IV.12) montre bien les performances de cette structure ($\eta=29.74\%$, $V_{CO}=0.89$ Volt, $J_{CC}=43.41$ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ et $FF=76.77\%$) obtenus.

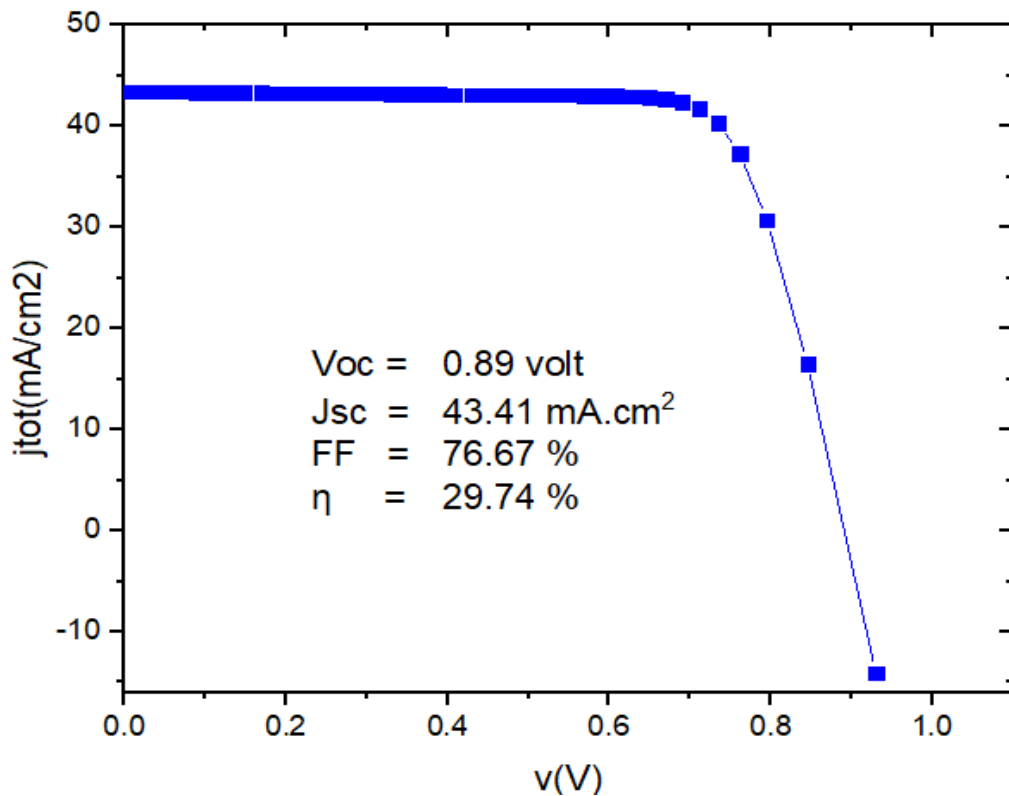


Figure IV.12 : la caractéristique J-V de cellule à base de CZTSSe sous l'éclairement AM1.5.

D'après la figure (IV.12), on remarque que les valeurs des performances électriques de la cellule solaire à base de CIGS sont moins encourageantes que les autres valeurs des caractéristiques électriques de la cellule que nous avons étudié à base de CZTSSe. Le changement du gap c'est peut-être la raison radicale de ces résultats, c'est la réduction de la valeur gap qui identique de 1.11 eV. Le rendement optimal de CZTSSe est de 29.74%.

IV.6. Conclusion

Une couche d'absorbeur $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ a été ajoutée dans une cellule solaire CIGS à jonction unique, ce qui a amélioré l'efficacité jusqu'à 29,74% ($V_{\text{CO}}=0,89$ V, $J_{\text{CC}}=43,41$ mA/cm², FF=76,67%). En utilisant le programme SCAPS, les paramètres de la cellule solaire ont été optimisés pour améliorer les performances de la cellule solaire CIGS en film mince. Nos résultats sont en accord avec la haute efficacité de conversion record trouvée expérimentalement dans la cellule solaire CIGS. Grâce à ce travail, nous pouvons réduire la quantité de matériaux précieux (indium et gallium) utilisés dans le CIGS. Ce qui est très prometteur et d'autres améliorations sont possibles pour les cellules solaires CIGS à faible coût.

Références

- [1] Ouassidhoum Samira, «Etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simple et multiple », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou ,2015.
- [2] Guanoune Walid, « Simulation des performances des cellules solaires à base de matériaux organiques », mémoire de magister, université des frères Mentouri de Constantine, 2015.
- [3] Nadia Messei, «Study of the effect of grading in composition on the performance of thin film solar cells based on AlGaAs and CZTSSe, a numerical simulation approach », thèse de Doctorat, university frères Mentouri Constantine1, 2016.
- [4] Abdulkader.J, Ali.S, Ginan .F, « Numerical analysis of graded band gap CZT(S,Se) solar cells using AMPS-1D », Volume 4, Issue 10, October 2016 .
- [5] Moussaoui, Bouafia, Bouarissa, Benhamadouche, «l'étude par simulation de l'influence du dopage sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires à base de silicium amorphe », Constantine, Algeria, October 30-31, 2016.
- [6] Touafek Naïma, « 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, 2015.
- [7] Liu, Heinzl, Rockett, «A revised version of the AMPS simulation code», Université de Nankai, à Tianjin, Chine et l'Université de l'Illinois, Urbana, Etats-Unis.
- [8] Djeghbala Afaf, «Etude par simulation numérique de l'effet du Dopage et des épaisseurs sur les Caractéristiques électriques d'une Cellule solaire (p/n) en Silicium », Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra, 2013.
- [9] « AMPS -1D Manual for Windows '95/NT», the Electronic Materials and Processing Research Laboratory at the Pennsylvania State University, University Park, PA 16802.
- [10] S. J. Fonash et al, « A manual for AMPS-1D for Windows 95/ NT; A one-dimensional device simulation program for the analysis of microelectronic and photonic structures», Pennsylvania State University, 1997.
- [11] Duchatelet .A, « Synthèse de couches minces de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ pour cellules solaires Par électro dépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium », Thèse de Doctorat, université de Lille1, 2012.
- [12] Katagiri, Jimbom, «Development of CZTS-based thin film solar cells, Nagaoka National College of Technology», 888 Nishikataki, Nagaoka, Niigata 940-8532, Japan, pp.2455–2460, 2008.

[13] DARANFED 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, Constantine, 2013.

[14] Science Université de Nantes. [En ligne]. [Consulté le 15 Mai 2009]. Disponiblesur <http://www.sciences.univnantes.fr/physique/recherche/lamp/fr/photop/part3.pdf>

[15] Hervé, Tchognia, Hartiti, Ndjaka, Ridah, Thevenin, « Performances des cellules solaires à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) : Une analyse par Simulations numériques via le simulateur SCAPS», Afrique SCIENCE 11(4) (2015) 16 – 23.

[16] Parisi, Pernice, Rocca, « Graded Carrier Concentration Absorber Profile for High Efficiency CIGS Solar Cells», Volume 2015, Article ID 410549.

[17] Olopade, Oyebola, Adeleke, « Investigation of some materials as buffer layer in copper zinc tin sulphide ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) solar cells by SCAPS-1D», Advances in Applied Science Research, 3 (6):3396-3400, 2012.

[18] Medjdoub Sarra, «Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération », Mémoire de master, Systèmes et Energies Renouvelables, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2016.

[19] Ben Abderrazak Ghania, « Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS », Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra, 2014.

[20] Rafee Mahbub, Saidul, «Simulation of CZTS thin film solar cell for different buffer layers for high efficiency performance», University of Dhaka, Dhaka-1000, Bangladesh, Received: 13/12/2016, Revised: 02/01/2017 and Accepted: 08/01/2017.

[21] H. Heriche, I. Bouchama, N. Bouarissa , Z. Rouabah , A. Dilmi « Enhanced efficiency of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells by adding $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$ absorber layer», Department of Electronics, Faculty of Engineering, University of M'sila, 28000 M'sila, Algeria.

[22] Henri MARIETTE« Développement de cellules solaires à base de films minces $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$ », Université Joseph Fourier.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons fait une étude par la simulation sur une cellule photovoltaïque en couche mince à base du quaternaire $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTSSe). Notre travail a été réalisé par la simulation numérique, effectuée à l'aide du SCAPS-1D. Dans un premier lieu, nous avons présenté d'une manière générale le matériau de CZTSSe à base des éléments chalcogènes qui sont le soufre(S) et le sélénium(Se), en présentant ses différentes propriétés (structurales, électroniques, optiques et électriques), par la suite on a mentionné les différentes techniques d'élaboration des couches minces à base de CZTSSe. Ensuite, nous donnons des définitions détaillées sur les cellules photovoltaïques, les différentes technologies photovoltaïques et notamment la technologie PV en couche minces.

Après, pour étudier bienveillamment des performances des cellules photovoltaïques, nous avons réalisé la simulation numérique. On optimise les paramètres physiques et électriques tel que les épaisseurs et les dopages pour chaque couche de la cellule afin de voir leurs influences sur la caractéristique électrique de la structure à hétérojonction n-ZnO/ n-CdS/ p- CZTSSe/ CIGS. Puis on va déterminer les valeurs optimales des épaisseurs et des dopages pour chaque couche, qui donnent les meilleures performances pour améliorer l'efficacité de la cellule solaire. Les résultats qui nous extraient de cette étude par simulation à sous éclaircissement ont donné :

- L'augmentation de l'épaisseur de la couche ZnO de façon générale possède une influence très faible sur les performances de la cellule.
- La plus faible épaisseur possible de la couche CdS permet de l'augmentation des performances électriques mais le contraire pour les grandes épaisseurs.
- L'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbant CZTSSe augmente les performances électriques surtout le rendement de conversion η , le facteur de forme FF et la tension de circuit ouvert V_{co} .
- L'accroissement du dopage N_d de la couche ZnO tire de l'augmentation du rendement et le facteur de forme FF de la cellule solaire.

- L'augmentation du rendement et le facteur de forme FF pour une grande valeur de dopage N_d de la couche CdS de 10^{20} cm^{-3} .

les caractéristiques électriques en s'améliorant avec l'augmentation de la concentration de dopage de la couche absorbante CZTSSe. Ensuite, nous avons étudié de la température sur les caractéristiques de sortie de la cellule. L'augmentation de la température entraîne à la diminution du facteur de forme FF et le rendement de conversion η , tel que la valeur optimale de η est correspondant la température ambiante en kelvin (305°K). Dans notre gamme de température, la diminution de FF et le rendement η est presque linéaire avec la température. Enfin, on a comparé les performances des deux absorbeurs (CZTSSe et CIGS), le résultat de simulation montre que le CZTSSe est possède meilleur rendement électrique que le CIGS.

Résumé

Parmi les semi-conducteurs quaternaires les plus prometteurs pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques en couches minces on trouve le $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ CZTSSe composé avec des éléments abondants et non toxiques. En plus d'un gap direct, le CZTSSe et ces atouts, représente un excellent candidat pour alterner les autres matériaux des éléments chalcogènes comme le CIGS et CdTe utilisés dans les photopiles en couches minces. Ce travail a pour but, d'étudier les comportements des caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques à base de CZTSSe passant par l'optimisation des paramètres primordiales tels que l'épaisseur et le dopage des couches de structure typique de ZnO/ CdS/ CZTSSe/ CIGS, on évalue encore l'influence de la température, de la résistance série sur les performances de la cellule solaire, cette étude est effectuée par le simulateur SCAPS-1D.

Mots-clés : CZTSSe, Cellules photovoltaïques, Couches minces, SCAPS-1D.

Abstract

Among the most promising quaternary semiconductors to improve the performance of thin film photovoltaic cells is $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ CZTSSe composed with abundant and non-toxic elements. In addition to a direct gap, the CZTSSe and these assets, represents an excellent candidate to alternate the other materials of chalcogenic elements as the CIGS and CdTe used in thin film photovoltaic cells. This work aims to study the behavior of the electrical characteristics of photovoltaic cells based on CZTSSe through the optimization of key parameters such as the thickness and doping of the layers of typical structure of ZnO / CdS / CZTSSe / CIGS, we also evaluate the influence of temperature, resistance series on the performance of the solar cell, this study is carried out by the simulator SCAPS-1D.

Keywords: CZTSSe, Photovoltaic cells, Thin films, SCAPS-1D.

ملخص

من بين أشباه الموصلات الرباعية الواعدة لتحسين أداء الخلايا الكهروضوئية ذات الأغشية الرقيقة هي $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ CZTSSe المكونة من عناصر وفيرة وغير سامة. بالإضافة إلى الفجوة المباشرة، CZTSSe تمثل هذه الطبقة مرشحاً ممتازاً لتبديل المواد الأخرى من العناصر الكالكوجينية مثل CIGS و CdTe المستخدمة في الخلايا الكهروضوئية ذات الأغشية الرقيقة. يهدف هذا العمل إلى دراسة سلوك الخصائص الكهربائية للخلايا الكهروضوئية بناءً على CZTSSe من خلال تحسين المعلمات الرئيسية مثل سماكة وتنشيط طبقات الهيكل النموذجي لـ ZnO / CdS / CZTSSe / CIGS، كما نقوم بتقييم تأثير درجة الحرارة، و المقاومة على التسلسل أداء الخلية الشمسية، يتم إجراء هذه الدراسة بواسطة جهاز المحاكاة SCAPS-1D.

