

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° : INST 08 /2019



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : INSTRUMENTATION

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

Par:

LAGHOUAG Ahlam
BENCHEIKH Halima

Intitulé

**Etude et simulation d'une cellule solaire à
base des éléments chalcogènes**

Soutenu devant le jury composé de:

BOUCHAMA Idris	Université de M'Sila	Président
BENNACER Hamza	Université de M'Sila	Encadreur
HADJAB Moufdi	Université de Sétif	Co-encadreur
BAKHTI Elhadi	Université de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2018/2019

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. BENNACER Hamza***

Enseignement à l'université de Mohammed Boudiaf –

M'sila

Pour nos avoir guide dans ce travail.

*Nous remercions tous les membres de jury qui ont accepté
d'examiner ce modeste travail.*

Nous tienons à exprimer notre profonde gratitude à

Notre parents pour leur soutien, la confiance,

l'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 amis.

Laghouag ahlam

Ben chiekh Halima

Table des matières

Remerciements.....	ii
Dédicace	iii
Sommaire	iv
Listes des Figure	viii
Listes des Tableaux	xi
Listes des Symboles et Abréviation	
Introduction générale	2

Chapitre I :Généralités sur le matériau CZTS

I.1. Introduction.....	6
I.2. Structure d'une cellule solaire à base de CZTS.....	7
I.3. Structure cristalline des composés I2-II-IV-VI4.....	8
I.5. Propriétés électroniques.....	10
I.6. Propriétés électrique.....	11
I.7. Propriétés optique.....	12
I.7.1. Influence de la température.....	14
I.7.2. Influence de la composition.....	14
I.7.3. Influence de l'épaisseur.....	15
I.8. Technique d'élaboration des couches minces de CZTS.....	15
I.5.1. Les techniques de dépôt des couches minces de CZTS.....	15
I.9. Avantages de CZTS.....	17
I.10. Conclusion.....	17
Références de chapitre I	18

Chapitre II : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

II.1. Introduction.....	22
II.2. L'énergie solaire.....	22
1. L'énergie solaire thermique.....	23
2. L'énergie solaire photovoltaïque.....	23

II.2.1. Le rayonnement solaire.....	23
II.2.1.1. Le spectre solaire.....	23
II.3. L'effet photovoltaïque.....	24
II. 3.1. Principe de fonctionnement de la cellule solaire.....	24
II.3.2. Les caractéristiques de la cellule solaire.....	26
II. 3.2.1. Courant de court-circuit.....	26
II. 3.2.2. Tension de circuit-ouvert.....	27
II.3.2.3.Puissance électrique.....	27
II.3.2.4. Facteur de forme.....	27
II.3.2.5. Rendement de conversion.....	27
II.3.2.6. Réponse spectrale.....	27
II.3.2.7. Rendement quantique.....	28
II.4. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	28
II.4.1. La cellule idéal.....	28
II.4.2. La cellule réelle.....	29
II.4.2.1. Influence de la résistance shunt	30
II.4.2.2. Influence de la résistance série.....	30
II.5. Matériaux photovoltaïque.....	31
II.6. Différentes technologies photovoltaïques.....	32
II.6.1. Première génération	32
II.6.1.1. Le silicium monocristallin.....	32
II.6.1.2. Le silicium polycristallin.....	33
II.6.2. Deuxième génération.....	33
II.6.2.1. Les couches minces.....	34
1. Le silicium amorphe.....	35
2. Le tellure de Cadmium (CdTe).....	35
3. Matériaux chalcopyrites (CIGS)	35

II.6.3. Troisième génération	36
II.7. Structure de cellule solaire en couche mince.....	37
II.7.1. Le substrat.....	37
II.7.2. Le contact arrière.....	37
II.7.3. La couche absorbante.....	37
II.7.4. La couche tampon.....	38
II.7.5. La couche fenêtre.....	38
II.8. Conclusion.....	38
Références de chapitre II	39

Chapitre III : Résultats de la simulation et discussions

III.1. Introduction.....	43
III.2. Présentation du logiciel de simulation AMPS-1D.....	43
III.2.1. Aperçu	43
III.2.2. Fonction de l'AMPS sur PC.....	44
III.2.2.1. Conditions environnementales.....	44
III.2.2. 2. Propriétés générales du matériau.....	45
III.2.2. 3. Paramètres de modélisation.....	46
III.3. Structure de la cellule étudiée.....	46
III.4. Paramètres physiques utilisés dans la simulation.....	49
III.5. Résultats et discussion.....	50
III.5.1. Influence de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire a base de CZTS	50
III.5.1.1. Optimisation de l'épaisseur de la couche ZnO.....	50
III.5.1.2. Optimisation de l'épaisseur de la couche CdS	52
III.5.1. 3. Optimisation de l'épaisseur de la couche CZTS	54
III.5.2. Influence du dopage de chaque couche sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CZTS.....	57
III.5.2.1. Optimisation du dopage de la couche ZnO.....	57

III.5.2.2. Optimisation du dopage de la couche CdS.....	59
III.5.2.3. Optimisation du dopage de la couche CZTS.....	61
III.5.3. Influence de la température sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CZTS	64
III.5.4. Les résultats de la simulation après l'optimisation des couches.....	66
III.5.4.1. Les résultats de la simulation de la cellule à base de CZTS.....	66
III.5.4.2. Les résultats de la simulation de la cellule à base de CZTSe	67
III.6. Conclusion	68
III.7. Références bibliographiques.....	69
Conclusion générale	72
Résumé	

Liste des figures

N° de figure	Titre	N° de page
I.1	Rendements record des cellules solaires à base de CZTS	7
I.2	Schéma de la structure d'une cellule photovoltaïque en couches minces à base	7
I.3	Représentation des structures stannite et k�esterite de CZTS	9
I.4	Représentation de l'énergie de formation des défauts dans le CZTS en fonction de la composition en Cu et représentation des énergies de transition de ces défauts dans la bande interdite	11
I.5	(a) Le coefficient d'absorption optique α en fonction de l'énergie $h\nu$ des photons incidents dans le CZTS ; (b) valeur typique d'énergie de gap	14
I.6	Différentes techniques de dépôt des couches minces de CZTS sous vide	16
I.7	Le meilleur rendement photovoltaïque accomplir par différentes techniques de dépôt pour CZTS, CZTSe	16
II.1	Spectre d'émission solaire sur la surface de la terre	24
II.2	Schéma de principe et diagramme de bande d'une jonction P-N	25
II.3	Principe de fonctionnement de cellule solaire	26
II.4	Caractéristique courant-tension d'une cellule	26
II.5	Schéma équivalente d'une cellule idéal	28
II.6	Schéma équivalente d'une cellule réelle	29
II.7	L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique I-V	30
II.8	L'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V	31
II.9	Les rendements en fonction de l'énergie du gap des matériaux photovoltaïques en couche mince	32
II.10	Cellule photovoltaïque (a) monocristalline et (b) polycristallin	33
II.11	Les deux catégories des cellules solaires PVs à base de wafer et de couche mince	34
II.12	Pourcentage de marché des couches minces	35

II.13	Les différentes techniques et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire	36
II.14	La structure standard des cellules solaires PVs en couche mince	37
III.1	Page d'accueil de l'interface d'AMPS-1D	44
III.2	L'interface des conditions environnementale	45
III.3	L'interface des propriétés électriques de la couche CZTS	46
III.4	Schéma simplifié de structure de cellule substrat en couches minces à base de CZTS	47
III.5	Les performances électriques de La caractéristique J-V sous l'éclairement avant l'optimisation des paramètres	50
III.6	Variation du : tension de circuit ouvert (V_{co}) et la densité de courant de court circuit (J_{sc}) avec l'épaisseur de couche en ZnO	51
III.7	Variation du : Facteur de forme (FF) et rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur de couche en ZnO	52
III.8	Variation du : tension de circuit ouvert (V_{co}) et la densité de courant de court circuit(J_{sc}) avec l'épaisseur de couche en CdS	53
III.9	Variation du : Facteur de forme (FF) et rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur de couche en CdS	54
III.10	Variation du : tension de circuit ouvert (V_{co}) et la densité de courant de court circuit (J_{sc}) avec l'épaisseur de couche en CZTS	55
III.11	Variation du : Facteur de forme(FF) et rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur de couche en CZTS	56
III.12	Influence du dopage de la couche de ZnO sur t le Facteur de forme (FF)	58
III.13	Influence du dopage de la couche de ZnO sur le rendement (η)	59
III.14	Influence du dopage de la couche de CdS sur le facteur de forme (FF)	60
III.15	Influence du dopage de la couche de CdS sur le rendement (η)	61
III.16	Influence du dopage de la couche de CZTS sur le facteur de forme (FF)	62

III.17	Influence du dopage de la couche de CZTS sur le rendement (η)	63
III.18	Variation du facteur de forme en fonction de la température	65
III.19	Variation du rendement en fonction de la température	65
III. 20	L'interface des résultats et leur caractéristique J - V de cellule à base de CZTS sous l'éclairement AM1.5	66
III.21	La caractéristique J - V à obscurité et sous l'éclairement AM1.5	67
III.22	L'interface des résultats pour la caractéristique J - V de cellule à base de CZTSe sous l'éclairement AM1.5	67

Liste des tableaux

N° de Tableau	Titre	N° de page
I.1	Les composés de système adamantin	8
I.2	Atomes et positions des deux structures stannite et kesterite	10
I.3	Les propriétés électriques des composés CZTS	12
III.1	Les paramètres des matériaux des couches ZnO, CdS, CZTS et CZTSe	49
III.2	Effet de l'épaisseur de la couche ZnO sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire PV à base de CZTS	51
III.3	Effet de l'épaisseur de la couche CdS sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CZTS	53
III.4	Effet de l'épaisseur de la couche CZTS sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CZTS	55
III.5	Les valeurs optimales de l'épaisseur pour chaque couche	57
III.6	Les performances de la cellule pour les valeurs optimales d'épaisseur de chaque couche	57
III.7	L'influence de dopage de la couche ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque	58
III.8	L'influence de dopage de la couche CdS sur les performances de la cellule photovoltaïque	60
III.9	L'influence de dopage de la couche CZTS sur les performances de la cellule photovoltaïque	62
III.10	Les valeurs des dopages optimales de chaque couche	63
III.11	Les valeurs des performances pour les valeurs optimales de dopage	64
III.12	Les variations des performances de la cellule solaire pour des différentes valeurs de la température	64
III.13	Comparaison avec des autres résultats de simulation.	66

Listes des Symboles et Abréviations

Symboles	Signification	Unité
J	La densité de courant	mA/cm²
V	Le voltage	V
QE	Le rendement quantique	%
λ	La longueur d'onde de la lumière absorbée par la cellule solaire	μm
J_{cc} (J_{sc})	La densité de courant de court circuit (short circuit)	mA/cm²
V_{co}	La tension de circuit ouvert	volt
FF	Le facteur de forme	%
h	Constante de Planck (6.62×10^{-34} J.s)	J. s
v	La fréquence du rayonnement incident	s⁻¹
c	La vitesse de la lumière dans le vide (3×10^8 m/s)	m /s
η	Le rendement de conversion photovoltaïque	%
I_{ph}	Le photocourant	mA
E_F	L'énergie de Fermi	eV
T	Température absolue	K
E_c	Energie du bas de la bande de conduction	J ou eV
E_v	Energie du haut de la bande de valence	J ou eV
R_{sh}	La résistance parallèle (shunt)	Ω

R_s	La résistance série	Ω
p	Les densités de trous libres	cm⁻³
n	Les densités d'électrons libres	cm⁻³
q	La charge élémentaire (1.6 x10 ⁻¹⁹ C)	C
I_s	La densité de courant de saturation	mA/cm²
N_c	La densité d'états équivalente dans la BC, ramenée en E _c	cm⁻³
N_v	La densité d'états équivalente dans la BV, ramenée en E _v	cm⁻³
μ_n et μ_p	La mobilité des électrons et des trous respectivement	cm²V⁻¹.s⁻¹
N_a	Concentration en impuretés ionisées de type accepteur	cm⁻³
E_g	L'énergie de bande interdite	eV
ZnO	Oxyde de Zinc	-
CdS	Sulfure de Cadmium	
CIGS	Di-sélénium de galium d'indium de cuivre (Cu (In, Ga)Se ₂)	-
CdTe	Tellure de Cadmium	-
CZTS	Soufre d'étain de zinc de cuivre Cu ₂ ZnSnS ₄	
AM1.5	Spectre de la lumière solaire	-
MO	Molybdénium	-
AMPS-1D	Logiciel de simulation [Analysis of Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional (analyse unidimensionnelle des structures micro-électroniques et photoniques)]	-

Introduction générale

Introduction générale

L'augmentation de la population et le développement industriel ont contribué à une augmentation du besoin énergétique mondial [1]. Toujours l'énergie a 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, actuellement, est produite à partir des sources fossiles non renouvelables comme le pétrole, le gaz et le charbon. En effet, la raréfaction et la pollution excitées par ces sources ainsi que la crise énergétique des années 70, ont amené les pays à grande consommation d'énergie à se rechercher aux sources alternatives [2]. A ce moment, pour répondre à ces préoccupations, de nombreuses voies de recherche se sont donc orientés vers l'exploitation des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire comme une source abondante et propre, produite par la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique soit à voie thermique ou bien photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque s'effectue par des cellules PVs à base des semi-conducteurs [3].

Actuellement, plusieurs matériaux solaires ont été exploités dans la conversion photovoltaïque à cause de leurs propriétés optiques et électroniques [4]. La grande majorité du marché photovoltaïque est à base de silicium [5]. La filière silicium dite de première génération, utilise le silicium cristallin (monocristallin ou polycristallin) comme matériau absorbeur [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, elles 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 diséléniure (CIGS) (le rendement record de 22 %) [5,7]. Actuellement, l'inconvénient majeur est la rareté et le coût élevé d'éléments tel que l'indium et le gallium, ainsi que la toxicité de cadmium qui ont provoqué des préoccupations au sujet des limites de production des cellules photovoltaïques [5,7]. Pour résoudre ces problèmes, il est nécessaire de développer de nouveaux matériaux à base d'éléments plus abondants et non toxiques afin de produire des cellules solaires qui respectent l'environnement [9]. En revanche, les matériaux à base des éléments chalcogènes 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 chalcogènes pour fabriquer des cellules solaires à moindre coût et plus performantes [3]. Dans ce contexte, les chalcogènes se sont les éléments de 6^{ème} (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 CZTS ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) 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, se sont des éléments non toxiques et abondants dans la croûte terrestre [10]. Ce matériau, 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 CZTS avec le simulateur AMPS-1D (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures) 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 consiste à trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les matériaux CZTSSe et on revu leurs différentes propriétés électriques, optiques et électroniques. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté brièvement le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et un rappel sur les différentes générations des cellules photovoltaïques réalisées jusqu'à nos jours.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation de notre structure à hétérojonction ZnO/CdS/CZTS avec le simulateur AMPS_1D. Dans le but d'optimiser le rendement de conversion de cette structure. Nous avons par la même occasion, déterminé et discuté l'influence des paramètres physiques, tels que le dopage, l'épaisseur et la température sur les performances de la cellule solaire.

Le travail a été terminé par une conclusion générale qui regroupe tous les résultats obtenus.

Références

- [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'OUUM 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 matériaux

CZTS

I.1. Introduction

Depuis quelques décennies, un grand intérêt est porté aux couches minces qui constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Elles ont une grande capacité pour convertir la lumière solaire en électricité tout en utilisant des épaisseurs d'à peine quelques micromètres. Cependant, la plupart des technologies en couche mince utilisent des éléments rares tels que l'indium, le gallium et le tellure, ce qui fait augmenter de manière significative leur prix qui revient et par conséquent le coût d'électricité produite [1].

La famille des Chalcogénures à base du soufre, du sélénium ou du tellure, est très riche en matériaux photoconducteurs utilisés dans divers capteurs et dans l'architecture des modules photovoltaïques en couches minces [1]. Les plus connus sont le sulfure et le tellure de cadmium (CdS et CdTe), ils sont suivis des composés de types sulfures de cuivre et d'indium (CIS) ou séléniures de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS) qui ont fait l'objet de larges développements industriels et ont atteint un rendement élevé que 20% [1]. Ces matériaux possèdent néanmoins un point faible non négligeable au niveau de leur toxicité (Cadmium et Tellure) et leur rareté (Indium et Gallium). Pour contourner cette limitation majeure [1]. Récemment, un nouveau matériau, le $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) a été proposé [2].

Le CZTS est le semi-conducteur composé I₂-II-IV-VI₄ quaternaire, qui se compose de matériaux abondants, est un nouveau type d'un absorbeur pour les cellules solaires en couches minces. Ce film semi-conducteur peut être obtenu en remplaçant la moitié des atomes d'indium dans CuInS_2 chalcopyrite par du zinc, l'autre moitié avec de l'étain et la substitution du sélénium avec le soufre [3]. Elle est un chalcogénure métallique composé des éléments métalliques cuivre (Cu), zinc (Zn) et étain (Sn) [2]. Ces éléments forment ensemble des matériaux semi-conducteurs de choix, puisqu'ils sont faits d'éléments courants et non toxiques [4].

Un matériau SC à gap direct pour lequel les chercheurs ont porté un intérêt croissant ces dernières années en vue de son intégration dans des dispositifs PV en couche mince. De plus, son coefficient d'absorption est supérieur à 1.10^4 cm^{-1} [2]. Les rendements record avec des cellules utilisant un absorbeur CZTS ont fortement progressé ces dernières années et les voies de synthèse sont nombreuses. Bref, le dernier record pour les composés $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ vers 12,6% [5].

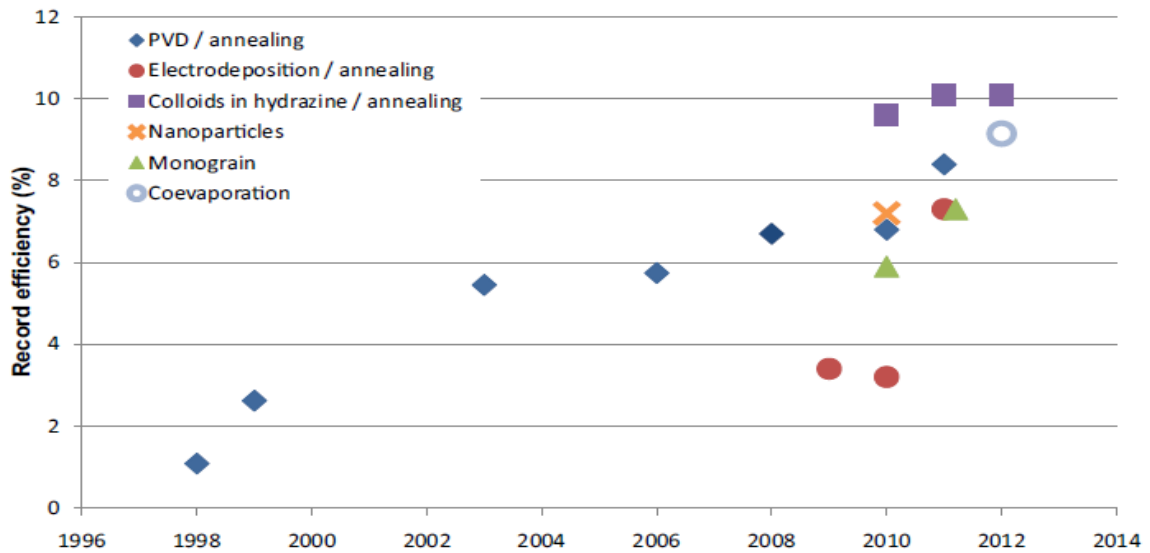


Figure. I.1. Rendements record des cellules solaires à base de CZTS [5].

I.2. Structure d'une cellule solaire à base de CZTS

Dans sa configuration la plus répandue, une cellule CZTS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. Ce dernier est généralement une plaque de verre sodo-calcique (Soda-Lime Glass, SLG). La figure(I.2) Présente la structure d'une cellule à base de CZTS [6].

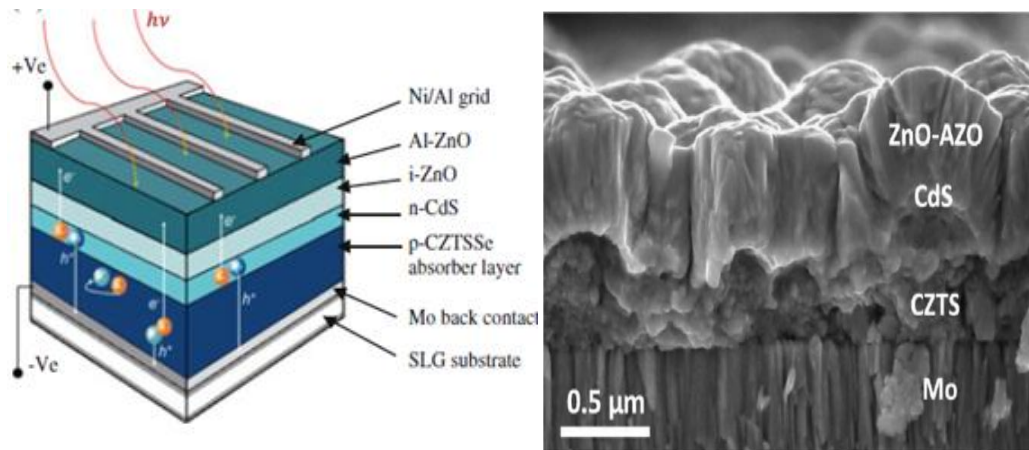


Figure. I.2. Schéma de la structure d'une cellule photovoltaïque en couches minces à base de CZTS [7,8].

Le substrat employé est du verre ou « Soda-lime glass » (SLG), le contact arrière en contact avec le CZTS est en règle générale du molybdène [9]. Le travail d'extraction de ce métal est proche de la bande de valence du CZTS. Comme le $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ est l'absorbeur, l'opacité de contact arrière n'est pas critique. Au contraire, pour assurer une transmission optimale de la lumière, les couches supérieures doivent être transparentes ou suffisamment fines pour être translucides. La couche suivante est composée du matériau semi-conducteur de type (n), le CdS, formant ainsi la jonction P-N avec le CZTS. Ensuite, une couche de ZnO est déposée, elle permet un ajustement progressif des bandes de conduction entre contact avant de ZnO:Al (ZnO dopé à l'aluminium) et le CdS. Enfin, il est possible de terminer l'empilement par une couche mince métallique (de l'aluminium par exemple) afin de faciliter les mesures électriques [9].

I.3. Structure cristalline des composés I₂-II-IV-VI₄

Il est bien connu que dans la structure diamant, tout les composant dont la structure dérive du diamant est appelé "adamantine [10,11]. Les binaires ont la formule commune $\text{A}^{\text{N}} \text{B}^{8-\text{N}}$ (N = 1, 2, 3), les matériaux connus sont les composés $\text{A}^{\text{II}} \text{X}^{\text{VI}}$ (N = 2; A = Zn, Cd, Hg; X = S, Se, Te) qui cristallisent dans la structure cubique de type sphalérite (blende) et dans le type hexagonale wurtzite [10,11]. Pour les composés ternaires la formule est $\text{A}^{\text{N-1}} \text{B}^{\text{N+1}} \text{X}_2^{8-\text{N}}$. Dans les composés $\text{A}^{\text{I}} \text{B}^{\text{III}} \text{X}_2^{\text{VI}}$ (N = 2; A = Cu, Ag, B = Al, Ga, In, X = S, Se, Te). Comme on observe dans le tableau (I, 1) suivant [10,11] :

Tableau. I.1. Les composés de système adamantin [12].

Composés	N=2 (chalcogénures)	N=3 (pnictides)
composés binaires	$\text{A}^{\text{II}} \text{X}^{\text{VI}}$	$\text{A}^{\text{III}} \text{X}^{\text{V}}$
composés ternaires	$\text{A}^{\text{I}} \text{B}^{\text{III}} \text{X}_2^{\text{VI}}$	$\text{A}^{\text{II}} \text{B}^{\text{IV}} \text{X}_2^{\text{V}}$
Composés quaternaires	$\text{A}_2 \text{B}^{\text{II}} \text{C}^{\text{IV}} \text{X}_4^{\text{VI}}$	$\text{A}_2 \text{B}^{\text{II}} \text{C}^{\text{V}} \text{X}_4^{\text{V}}$

Les matériaux CZTS cristallisent dans une structure tétragonale ($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) qui peut être de type kèsterite (groupe d'espace $I\bar{4}$) ou stannite (groupe d'espace $I\bar{4}2m$) [13], ils sont décrites dans des mailles quadratiques, qui dérivent toutes les deux de la structure ZnS sphalérite et tirent leur nom de minéraux naturels de formule générale $Cu_2(Fe_x, Zn_{1-x})SnS_4$ (la stannite est plus riche en fer que la kèsterite) [13,14]. Ces deux modèles structuraux sont très proches, la principale différence entre ces deux structures réside dans la distribution des cations Cu^+ et Zn^{2+} dans les plans perpendiculaires à l'axe C : dans la structure kèsterite, les couches de cations s'alternent suivant l'ordre CuSn, CuZn, CuSn et CuZn à $z = 0, 1/4, 1/2, 3/4$ respectivement. Par contre, la structure stannite présente un ordre d'empilement des couches cationiques ZnSn, Cu_2 , ZnSn, Cu_2 . Une autre différence structurale est la position des anions. Dans la structure stannite, les anions sont situés sur des miroirs de plan (110), alors que dans la structure kèsterite, cette symétrie est perdue, la structure kèsterite est considérée comme étant plus stable que la stannite [5,13]. La position des atomes de cuivre et de zinc diffère selon les structures. Pour la structure Kèsterite, décrite dans le groupe d'espace I-4, les plans perpendiculaires à l'axe C sont constitués ainsi : Plan $Z = 0$: Cu^I & Sn^{IV} , Plan $Z = 1/4$: Zn^{II} & Cu^I .

Concernant la structure stannite (groupe d'espace $I\bar{4}2m$), les atomes sont répartis de la façon suivante : Plan $Z = 0$: Zn^{II} & Sn^{IV} , Plan $Z = 1/4$: Cu^I . (Voir figure I.3)[15].

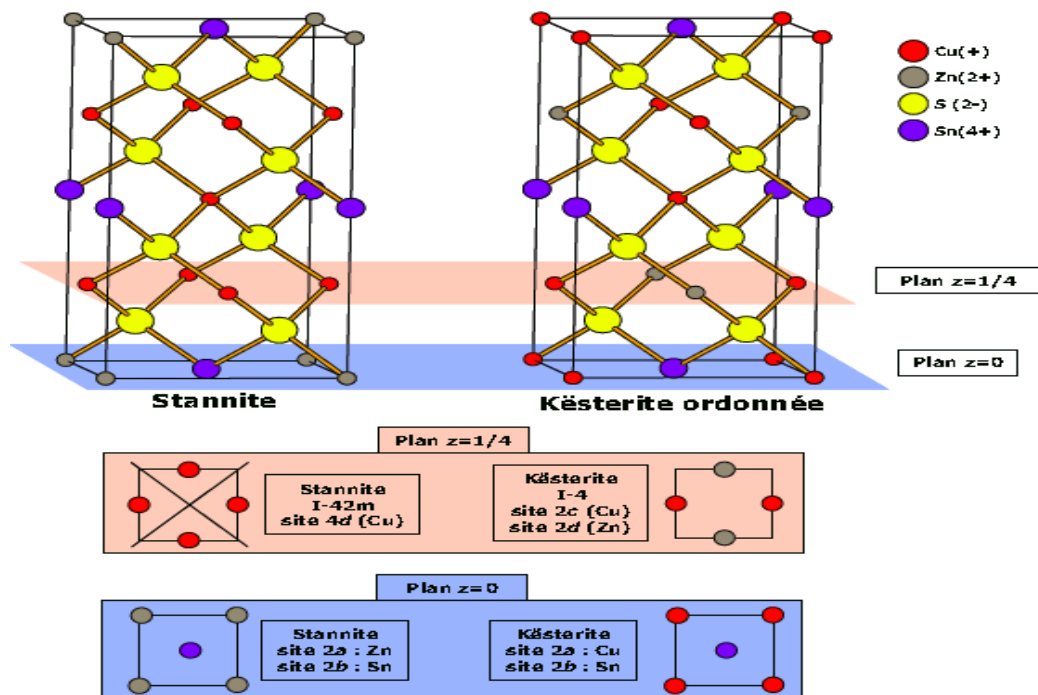


Figure. I.3 .Représentation des structures stannite et kèsterite de CZTS [14,15].

Le tableau I-1 regroupe les atomes et leurs positions pour les deux structures, stannite et kesterite, respectivement. Dont leurs paramètres de la maille conventionnelle sont $a = 5,44 \text{ \AA}$, $c = 10,75 \text{ \AA}$ pour le stannite et $a = 5,44 \text{ \AA}$, $c = 10,88 \text{ \AA}$ pour le kesterite [5,14].

Tableau. I.2. Atomes et positions des deux structures stannite et kesterite [5,14].

Stannite ($I\bar{4}2m$)			Kesterite ($I\bar{4}$)		
Atomes	Sites	Positions	Atomes	Sites	Positions
Zn	2a	(0 0 0)	Cu	2a	(0 0 0)
Sn	2b	($\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ 0)	Cu	2c	(0 $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{4}$)
Cu	4d	(0 $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{4}$)	Sn	2b	($\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ 0)
S	8i	(x x z)	Zn	2d	($\frac{1}{2}$ 0 $\frac{1}{4}$)
			S	8g	(x y z)

I.5. Propriétés électroniques

Le CZTS est un matériau semi-conducteur possédant un gap direct (E_g), variant de 1.4 à 1.7 eV. La valeur optimale du gap dépend de plusieurs facteurs. Du point de vue de l'absorption des photons, il est préférable d'avoir une valeur du gap relativement réduite, permettant d'absorber un spectre plus large (plus grandes longueurs d'onde). Il en résulte un courant plus important délivré par la cellule solaire (J_{sc}) [1]. Cependant, c'est la valeur du gap qui détermine la tension maximale délivrée par la cellule. Afin de maximiser le rendement de conversion, il est donc nécessaire d'obtenir un compromis idéal entre courant et tension. La plupart des résultats expérimentaux publiés dans le domaine des cellules CZTS montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un gap d'environ 1.5 eV [1].

Pour former une jonction P-N avec des matériaux photovoltaïques classiques, on procède en général à un dopage ou un recuit. Par exemple pour le cas du silicium, un dopage volontaire de type n et p sont effectués pour former l'homojonction. Dans le cas du CdTe qui est naturellement de type n, un recuit est opéré pour le rendre de type p afin de

former l'hétérojonction P-N avec le CdS (type n). Contrairement à ces matériaux PV, le semi-conducteur CZTS est naturellement dopé p [15]. Ce comportement a été attribué à la présence de défauts intrinsèques ayant une faible énergie de formation. Dans un composé quaternaire CZTS, on peut trouver plusieurs défauts intrinsèques ponctuels. Pendant la croissance, les défauts de type lacunes (V_{Cu} , V_{Zn} , V_{Sn} , et V_S), de type interstitiels (Cu_i , Zn_i , Sn_i) ainsi que les anti-sites (Cu_{Sn} , Sn_{Cu} , Cu_{Zn} , Sn_{Zn} , et Zn_{Sn}) peuvent se former simultanément ou séparément en introduisant des niveaux d'énergies permis superficiels (proche d'un extremum de l'une des bandes) ou profonds au sein de la bande interdite. Les énergies de formation de ces défauts dépendent du niveau de fermi ainsi que du potentiel chimique des éléments constitutifs. La figure(I.4) présent l'énergie de formation des défauts [15] et récapitule les niveaux d'énergie théoriques correspondant aux principaux défauts cristallins présents dans le CZTS et l'énergie de formation des défauts [1].

Remarque préalable : Quand un atome de nature Y est remplacé par un atome de nature X, la notation X_y est utilisée. Ainsi par exemple Cu_{Zn} correspond au remplacement d'un atome de zinc par un atome de cuivre, et V_{Cu} correspond à une lacune de cuivre [1].

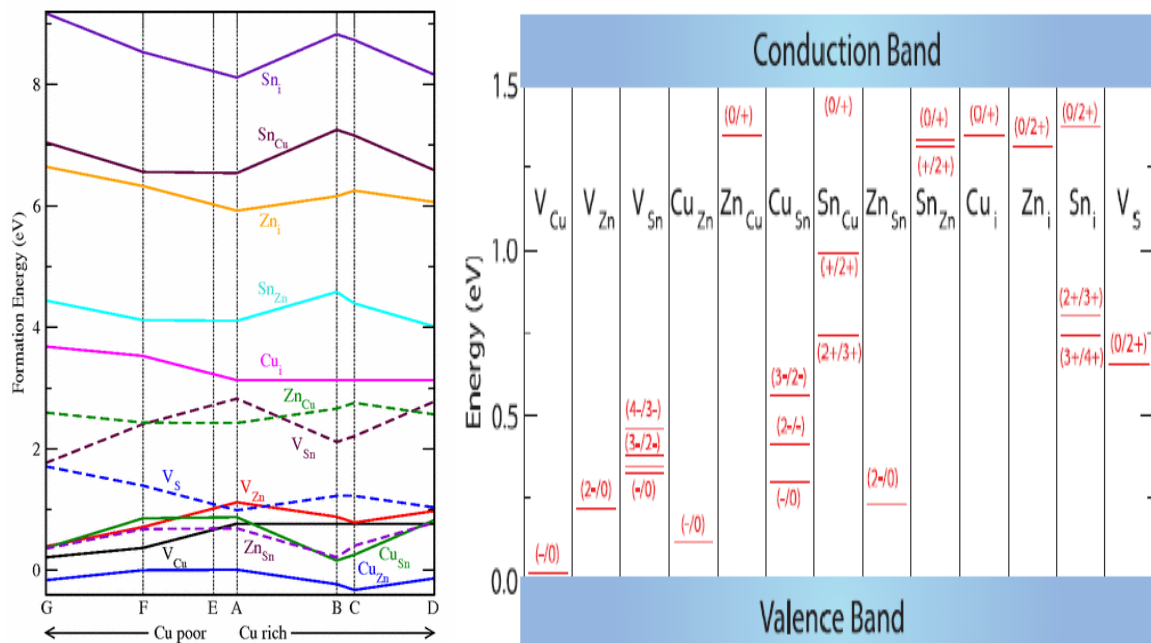


Figure. I.4. Représentation de l'énergie de formation des défauts dans le CZTS en fonction de la composition en Cu et représentation des énergies de transition de ces défauts dans la bande interdite [16,17].

I.6. Propriétés électriques

Les principales caractéristiques électriques des matériaux semi-conducteurs résultent des déplacements des porteurs de charge sous l'effet d'un champ électrique, ou magnétique (conductivité électrique, effet Hall, photoconductivité,...). Pourtant, ces déplacements sont gouvernés par les collisions des porteurs de charge avec les ions, les impuretés ou les défauts du réseau cristallin [6,18].

La plupart des valeurs rapportées de résistivité des couches minces de CZTS sont variées de $\sim 10^{-3}$ - $10^1 \text{ cm} \cdot \Omega$, mais il y a aussi des valeurs de résistivité plus élevées que $10^4 \text{ cm} \cdot \Omega$ ont été également rapportés [6]. On a rapporté que la concentration des porteurs de charge varie entre 10^{16} cm^{-3} à 10^{21} cm^{-3} [6]. Les résultats de mesure de l'effet de hall ont prouvé que la mobilité dans les couches de CZTS a changé simplement de 0.1 à $30 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, alors que la plupart des valeurs éditées étaient dans la gamme de 1 à $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [6]. Les propriétés électriques des composés CZTSSe sont présentées au tableau (I.3) Pour les films préparés à l'aide de diverses méthodes.

Tableau. I.3. Les propriétés électriques des composés CZTS [4].

Composé	Densité de porteur (cm^3)	Mobilité (cm^2/Vs)	Résistivité ($\Omega \text{ cm}$)	Méthodes	Références
CZTS	8.2×10^{18}	6.3	0.16	Pulvérisation Cathodique	[20]
CZTS	8.0×10^{18}	6.0	0.13	Sulfuration	[21]
CZTS	$> 5 \times 10^{19}$	< 0.1	> 1.3	Pulvérisation Cathodique	[22]
CZTS			0.02 – 2	Pulvérisation Cathodique	[23]
CZTSe	2.1×10^{17}	39.7	0.74	DRX	[24]
CZTSe			0.1 – 0.8	Spray	[24]

I.7. 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 [4]. 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 :

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

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 [25].

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 [25]. Les films du CZTS ont une transparence optique faible. Plusieurs auteurs ont fait des études sur les propriétés optiques des films minces [4].

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 (α). L'énergie du gap est déterminée par plusieurs techniques de caractérisation, à savoir les spectres de transmission et de réflexion, l'électrorélectance 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 [4] : $(\alpha h\nu) = A (h\nu - E_g)^n$ (I.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 [10]. Puis, la valeur de E_g peut être déterminée en extrapolant la ligne droite de la E_g est estimée par l'intersection avec l'axe d'énergie ($(\alpha h\nu)^2 = 0$) (voir la figure I.5) [10,11].

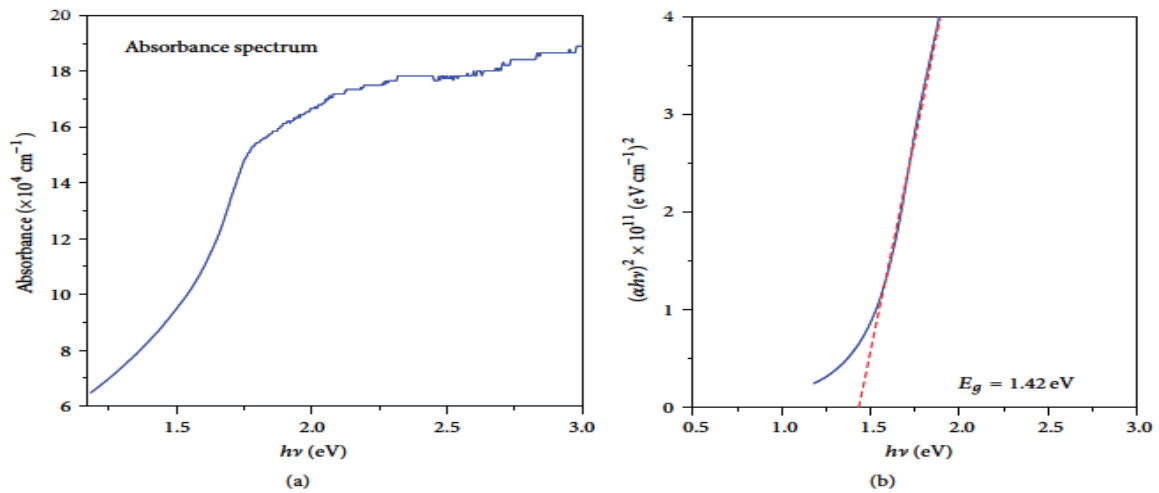


Figure. I.5. (a) Le coefficient d'absorption optique α en fonction de l'énergie $h\nu$ des photons incidents pour le CZTS ; (b) valeur typique d'énergie de gap [26].

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 [4, 10, 11, 25].

I.7.1. Influence de la température

Plusieurs considérations expérimentales ont été reportées sur la variation de l'énergie de gap de CZTS avec la température. Les mesures faites dans différents domaines de température montrent que dans tous les cas le gap diminue linéairement avec l'augmentation de la température [10].

I.7.2. Influence de la composition

Pour toute application en optique, les couches minces doivent être les plus homogènes possibles surtout en composition car elle influe directement sur leurs propriétés optiques. Les études effectuées sur le CZTS par Kunihiko Tanaka et al [27], révèlent que les échantillons pauvres en cuivre ont des énergies de gap calculées de l'ordre de 1.62 eV pour Cu/ (Zn+Sn) de 0.805 et Zn/Sn de 1.15. Les auteurs ont constaté aussi que l'augmentation de la concentration des défauts due à la variation de la composition chimique produit une diminution du gap optique [27].

I.7.3. Influence de l'épaisseur

D'après la littérature, quelques travaux font état d'une variation du gap optique en fonction de l'épaisseur des couches minces de CZTS. Les mesures de l'énergie du gap de CZTS faites pour différentes épaisseurs montrent une diminution du gap lorsque l'épaisseur augmente [28]. A.V. Moholkar et al, reportent des résultats qui montrent des valeurs élevées de l'énergie de gap pour des films très minces. Cette observation est probablement due à l'inhomogénéité et la déviation par rapport à la stœchiométrie durant la formation des couches, quand l'épaisseur augmente, on observe des états de queue de bande, ce qui cause la diminution du gap [10,28].

I.8. Technique d'élaboration des couches minces de CZTS

Pour rappel, une cellule solaire est industrialisée et commercialisée si son rendement global dépasse les 10%, le CZTS pourrait déjà être employé à grande échelle, car en effet, le record d'efficacité actuellement de 12,6%, montre que ce matériau a le potentiel d'être intégré dans diverses applications. Ce record est détenu par Solar Frontier (Japon), pour du CZTS obtenu par méthode Sol-Gel [9]. Le CZTS est connu depuis quelques années déjà, et a été synthétisé par de nombreuses méthodes. Nous distinguons deux grandes familles de procédés de fabrication : les méthodes de synthèse comprenant deux étapes, et celles en une étape.

Les méthodes de synthèse les plus couramment utilisées comportent deux étapes : le dépôt de précurseurs métalliques ou de composés sulfurés, suivi par un traitement thermique en atmosphère sulfurée (S ou H₂S) [9]. La première étape peut se réaliser par l'intermédiaire de différents procédés : l'électrodéposition, l'ablation laser (procédé PLD), par pulvérisation magnétron, ou par évaporation, la stœchiométrie du film est définie par la quantité de métal déposé sur le substrat. Ensuite, le matériau est recuit dans un four à haute température ($\geq 400^{\circ}\text{C}$) en présence de soufre solide qui se vaporise ou en présence d'H₂S [9].

I.8.1. Les techniques de dépôt des couches minces de CZTS

Pratiquement, il y a deux grandes méthodes de dépôt de films minces sous vide : les méthodes physiques et les méthodes chimiques, on différencie les dépôts chimiques en phase vapeur (CVD) des dépôts physiques en phase vapeur (PVD) par le moyen utilisé pour produire la vapeur ; CVD: elle résulte d'une réaction chimique ou de la décomposition d'une molécule ; PVD : elle est produite par un phénomène purement

physique (évaporation thermique, pulvérisation, ...). La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la figure (I.6) [29].

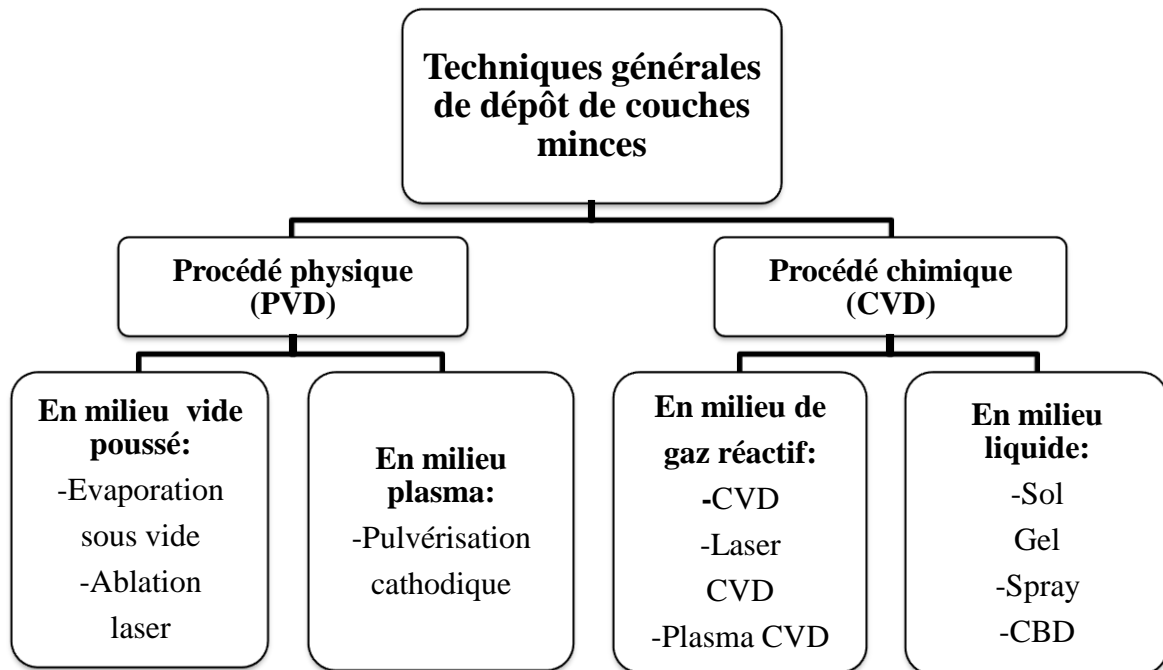


Figure. I.6. Différentes techniques de dépôt des couches minces de CZTS sous vide [30].

Les cellules CZTS peuvent être fabriquées sous vide en utilisant la pulvérisation cathodique, la coévaporation ou le dépôt laser pulsé (PLD pour pulsed laser deposition, aussi appelé ablation laser pulsé) [31]. La technique sous vide d'évaporation a permis d'avoir un rendement de conversion record de 8.4% [7].

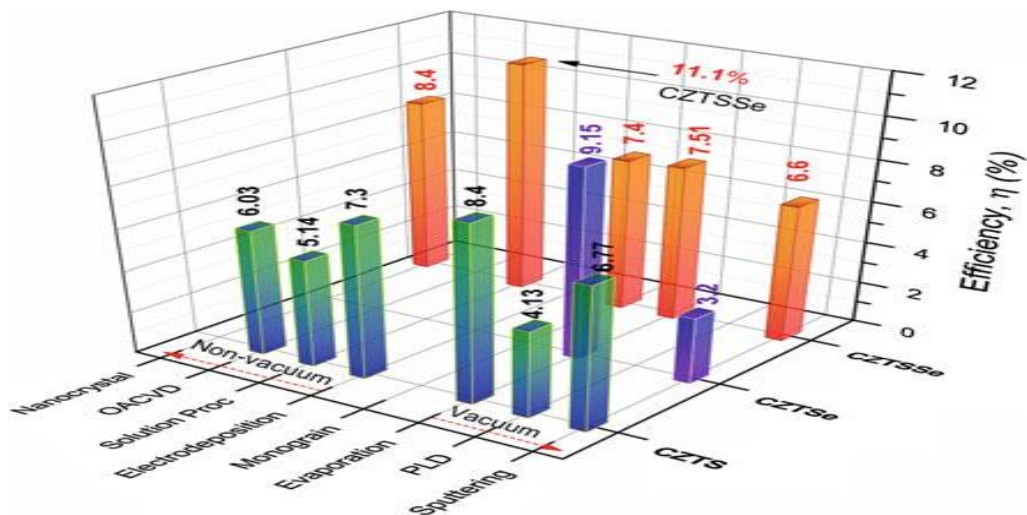


Figure. I. 7. Le meilleur rendement photovoltaïque accomplir par différentes techniques de dépôt pour CZTS, CZTSe [7].

I.9. Les avantages de CZTS

- Une gap direct de 1.5 eV [3]
- L'indice de réfraction est de 2,07 [32].
- Le coefficient d'absorption et de la photoconductivité et de l'ordre de 10^4cm^{-1} [33].
- Des éléments constitutifs de CIGS sont chers (In et Ga). En revanche CZTS est un matériau semi-conducteur comporte des éléments abondants et non-toxiques [22].
- Une efficacité de conversion énergétique est de 6.77% [34].

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit quelques propriétés structurales, électriques et optiques des composés CZTS qui constituent la partie essentielle pour la cellule photovoltaïque (la couche absorbante). Ainsi que la technique couramment utilisée pour synthèse des couches minces de CZTS. Les avantages de matériau CZTS sont mentionnés à la fin.

Le chapitre suivant, on va donner un rappel des généralités sur les cellules solaires et les couches minces.

Références

- [1] Taoufik Slimani, « 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.
- [2] Vincent Foncrose, « Nanocristaux, films et cellules photovoltaïques de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{SSe})_4$ par impression d'encres. », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2015.
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] Mohamed Hamdi, « Caractérisations cristallographiques et études des propriétés électriques des composés $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}, \text{Si})\text{S}_4$ pour des applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de SFAX, 2015.
- [6] 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, université de Mentouri- Constantine1, 2017.
- [7] Sandip, Krishna, Mandal, «Earth-Abundant $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ (CZTSSe) Solar Cells», Springer, 2016.
- [8] Subba Kodigala, « Thin Film Solar Cells from Earth Abundant Materials Growth and Characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{SSe})_4$ Thin Films and Their Solar Cells», Université de California State , Northridge, CA, USA,2014.
- [9] Gravis David, « Synthèse de $\text{Cu}_2\text{SnZnS}_4$ par pulvérisation magnétron réactive : de la caractérisation du plasma à la conception de cellules solaires » Mémoire de master, université de MONS ,2015.
- [10] 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.
- [11] Nouri, Bouallem, « Etude de l'effet de la couche mince CdZnS dans la cellule solaire CZTS », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila ,2017.
- [12] Kentaro ITO «Copper Zinc Tin Sulfide-Based Thin-Film Solar Cells », University of Shinshu Nagano Japan, 2015.

- [13] Solange Temgoua, « 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.
- [14] Léo Choubrac, « Cristallochimie de composés dérivés de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ pour des applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2014.
- [15] Alphousseyni Sagna, « Etude et élaboration par Close-Spaced Vapor Transport (CSVT), d'absorbeurs $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopiles à faible coût. », thèse de doctorat, Université de Perpignan via domitia, 2016.
- [16] 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.
- [17] Raphaël FILLON, « Etude des propriétés électroniques de couches minces de CZTSSe », Thèse de doctorat, université de Grenoble, 2016.
- [18] Dhlamini, Mémoire de Magister, Université de Rand Afrikaans, 2003.
- [19] J. Zhang and L. Shao, « $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films prepared by sulfurizing different multilayer metal precursors », *Sci. China Ser. E Technol. Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 269–272, Jan. 2009.
- [20] Zhang, Shao, « $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films prepared by sulfurization of ion beam sputtered precursor and their electrical and optical properties », *Rare Met. Eng.* 25, pp. 315–319, 2006.
- [21] Tanaka, Nagatomo, Kawasaki, « Preparation of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films by hybrid sputtering », *J. Phys. Chem, Solids* 66, pp. 1978–1981, 2005.
- [22] Ito, Nakazawa, « Electrical and optical properties of stannite-type quaternary Semiconductor thin films ». *Jpn. J. Appl. Phys.* 27, pp. 2094-2097, 1988.
- [23] Kamoun, Bouzouita, « Fabrication and characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films deposited by spray pyrolysis technique », *Thin Solid Films* 515, pp. 5949-5952, 2007.
- [24] Babu, Kumar, « Growth and characterization of co-evaporated $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films for photovoltaic applications », *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41, pp. 7, 2008.
- [25] Guerra Walid, « Etude de la cellule solaire CZTS par AMPS SOFTWARE », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2015.

- [26] Muhunthan, Singh, Thakur, «Interfacial Properties of CZTS Thin Film Solar Cell », Volume, 2014.
- [27] Tanaka, Fukui, , «Chemical Composition dependence of morphological and optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin Films deposited by sol–gel sulfurization and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cell efficiency», *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 838, 842, 2011.
- [28] Moholkara, Shindea, «Synthesis and characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films grown by PLD: Solar cells», *Journal of Alloys and Compounds* 7439–7446, 2011.
- [29] Benghabrit Siham, «Elaboration et caractérisation de couches minces CdS par bain chimique CBD pour application photovoltaïque», thèse doctorat, Université des Sciences et de la Technologie, Oran, 2015.
- [30] Oussidhoum Samira, «Etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simple et multiple », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou ,2015.
- [31] [www. Une cellule solaire sans élément rare-dossier.html](http://www.une-cellule-solaire-sans-élément-rare-dossier.html), visite le 17 /02/2019.
- [32] D. S. Su and S. H. Wei, « Kesterites and Chalcopyrite: A Comparison of Close Cousins», *Appl. Phys. Lett.* 74, pp. 2483–2485, 1999.
- [33] J. Jaffe, Zunger, «Theory of the band-gap anomaly in ABC_2 chalcopyrite semiconductors », *Phys. Rev., B* 29, pp. 1882–1906, 1984.
- [34] H. Katagiri, K. Jimbo, S. Yamada, T. Kamimura, W.S. Maw, T.Fukano, T. Ito, T. Motohiro, « Enhanced conversion efficiencies of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ -based thin film solar cells by using preferential etching technique », *Appl. Phys. Express* 1 041201, pp. 2, 2008.

Chapitre II

Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

II.1.Introduction

L'énergie est essentielle pour le développement socio-économique des nations et la vie quotidienne des peuples. Cette énergie est principalement produite à partir des combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz et le charbon. La diminution et la pollution provoquées par ces sources ainsi que les crises énergétiques et économiques, ont amené les pays à grande consommation d'énergie à s'orienter vers les sources renouvelables et notamment le soleil [1].

Dans la nature, les énergies renouvelables sont des phénomènes naturels on distingue plusieurs types d'énergies renouvelables : l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse et l'énergie solaire. L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie la plus durable et actuellement utilisée dans le monde. L'électricité photovoltaïque est une transformation directe de l'énergie du rayonnement solaire en électricité à travers de cellules photovoltaïques [1]. La recherche a commencé sur les développements des techniques prometteuses pour récupérer cette énergie est basé sur les propriétés des semi-conducteurs. Parmi les différentes technologies photovoltaïques, les cellules PVs à couche mince [2]. Ces couches minces sont basées sur l'hétérojonction, celles à base de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium (CIGS) et celles à base de tellure de cadmium (CdTe), elles produisent les meilleurs rendements. Mais ces couches minces comportent des éléments rares et toxiques. Le développement de nouveaux matériaux à base d'éléments plus abondants et non toxiques est également un défi pour développer les filières photovoltaïques à base de chalcogènes [3]. Dans ce contexte, le CZTS est un candidat prometteur pour remplacer le CIGS et CdTe dans les filières du photovoltaïque en couche mince [4].

II.2. L'énergie solaire

Le soleil est une source d'énergie qui reçoit à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique [5]. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de $1 \text{ (KWc/m}^2\text{)}$ distribuée sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge [5].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

1. **L'énergie solaire thermique** : c'est la production de la chaleur à travers des panneaux obscurs. On peut aussi produire la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité [5].
2. **L'énergie solaire photovoltaïque** : c'est la production directement de l'électricité à partir de la lumière grâce à des panneaux photovoltaïques [5].

II.2.1. Le rayonnement solaire

Le soleil reçu continuellement une grosse quantité d'énergie rayonnante dans le système solaire. La constante solaire égale à 1367 W/m^2 c'est une moyenne obtenue chaque mètre carré du bord externe l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de Km) [6].

II.2.1.1. Le spectre solaire

Le spectre solaire à la surface du terre n'est plus le même dans l'espace, car il est mesuré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O_3 , CO_2 , H_2O , ...) [7]. La valeur réelle du spectre c'est l'influence de la présence des molécules et les situations climatiques [7].

Les performances des cellules solaire peut comparer avec les différents spectres solaires utilisés. La notion d'air masse (AM) quantifie la quantité d'énergie absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle Θ du soleil par rapport au zénith. Sa valeur dépend principalement de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. Le nombre du masse est défini par [7] :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (\text{II.1})$$

L'angle Θ représente l'angle d'élévation du soleil sur l'horizon (90 degré au zénith).

L'intégration de l'irradiante sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) fournie par le rayonnement. Pour simplifier, on utilise les notations suivantes :

- **AM0** : Hors atmosphère (application spatiales). $P \approx 1.3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$
- **AM1** : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (l'équateur).
- **AM1.5 G** : Spectre standard, le soleil est à 45° . $P \approx 1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ [7].

La figure (II.1) montre le spectre d'émission solaire [8].

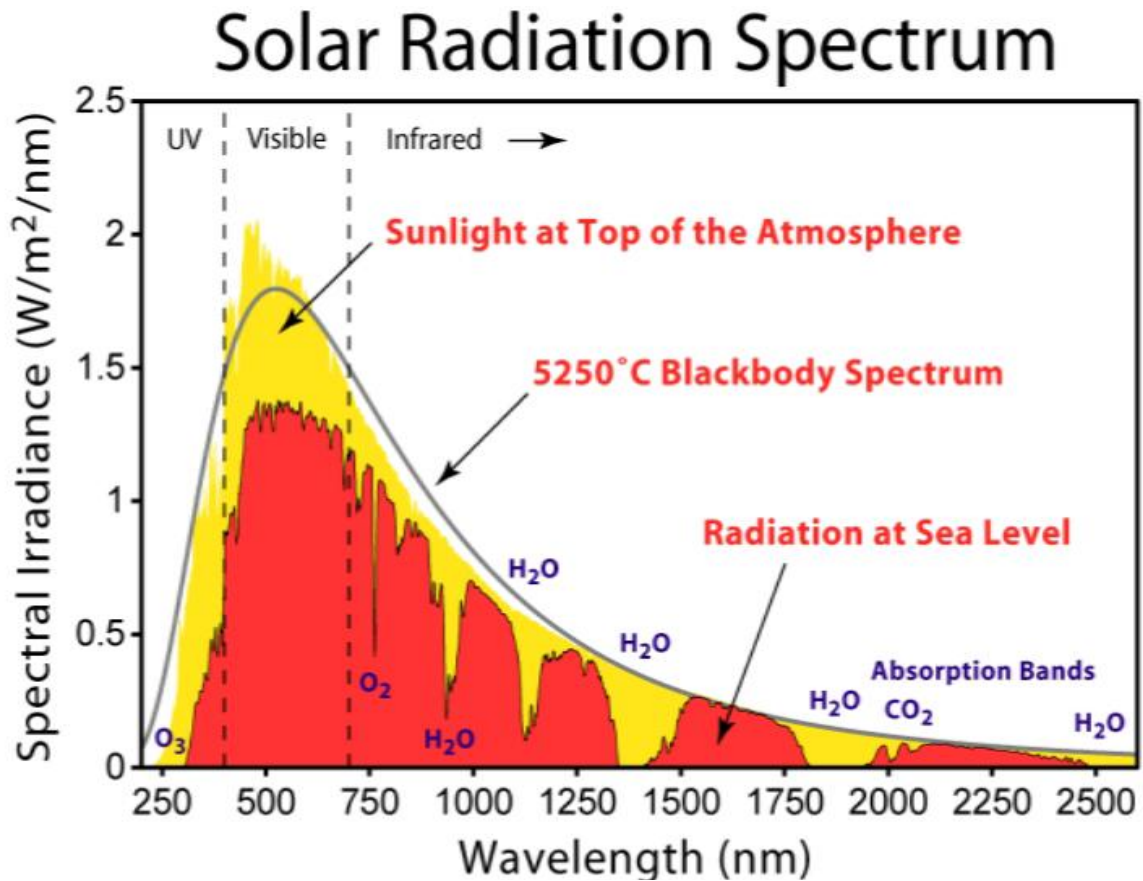


Figure. II.1. Spectre d'émission solaire sur la surface de la terre [8].

II.3. L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec qui indique la lumière . Découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque c'est la transformation directe du rayonnement solaire en énergie électrique de type continu directement utilisable au moyen de cellules solaires [9].

II. 3.1. Principe de fonctionnement du cellule solaire

Le plus petit élément dans le système photovoltaïque c'est la cellule, c'est une dispositif électronique composée par des matériaux semi-conducteurs capables de convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique [1,10]. Cette transformation est basée sur trois mécanismes physiques liés et simultanés:

- L'absorption des photons par le matériau (dont l'énergie des photons est supérieure à celle associée à la bande interdite E_g ($E_{ph}=h\nu$)).
- La conversion de l'énergie absorbée (photon) en énergie électrique qui correspond à la création des paires électrons - trous.

- La collection des charges générées dans le dispositif dans un circuit électrique [7].

Les cellules solaires sont des modes de fonctionnement basé sur les semi-conducteurs et de la jonction p-n [11]. Un semi-conducteur est un matériau présentant une bande interdite E_g (eV) entre la bande de valence (BV) et la bande de conduction (BC), avec le niveau de Fermi dans la bande interdite [11]. La position du niveau de Fermi est fonctionné la majoritaire des porteurs de charges. Dans un semi-conducteur de type n, les électrons sont les porteurs de charge majoritaires, dans ce cas, le niveau de Fermi se situe près de la bande de conduction. Alors que, pour un semi-conducteur de type p, les trous se sont majoritaires, et donc, le niveau de Fermi est proche de la bande de valence. Lors du contact entre les zones p et n, les porteurs majoritaires de chacune propagent à travers la surface de contact, il se crée une zone chargée positivement du côté du région n et une zone chargée négativement du côté du région p. Cette zone de transition est appelée zone de charge d'espace (ZCE) ou bien la zone de déplétion. Le gradient de concentration des porteurs majoritaires induit la présence d'un champ électrique permanent dans cette ZCE à l'équilibre. Les niveaux de Fermi des deux zones s'égalisent, ce qui provoque une courbure du diagramme de bande, introduisant une barrière de potentiel à l'interface [12]. Une jonction p-n est formée par un semi-conducteur de type p et de type n. Lorsque les deux semi-conducteurs sont du même matériau, c'est l'homojonction comme le cas des cellules à base de silicium. Par contre, l'hétérojonction c'est la jonction formée par deux matériaux semi-conducteurs différents [11]. le principe de la jonction est présenté dans la figure (II.2).

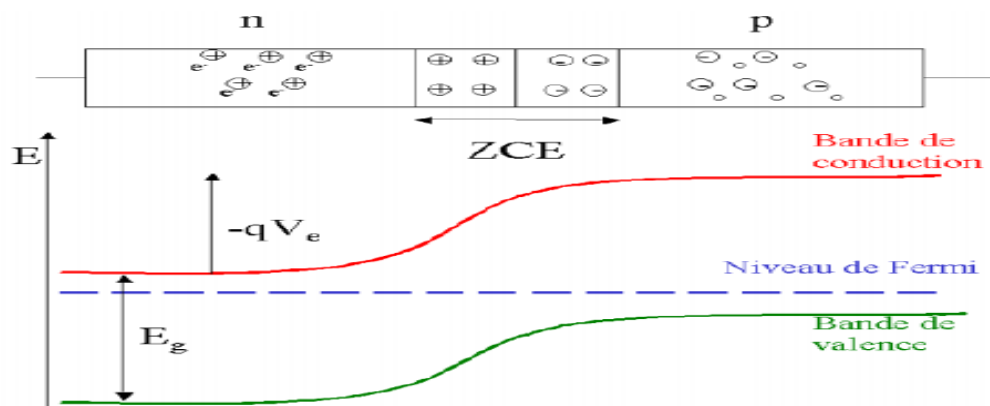


Figure. II.2. Schéma de principe et diagramme de bande d'une jonction PN [12].

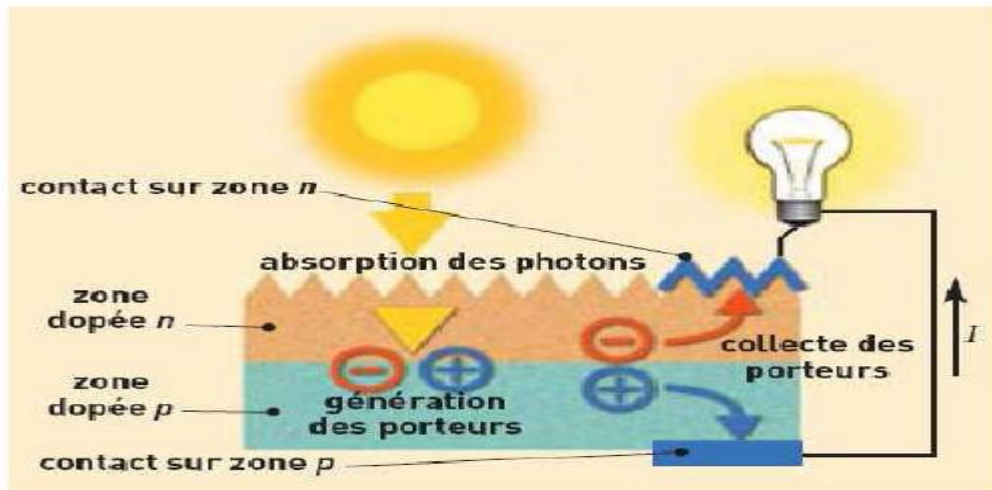


Figure. II.3. Principe de fonctionnement du cellule solaire [6].

II.3.2. Les caractéristiques de la cellule solaire

Les caractéristiques (J-V) d'une cellule solaire sous éclairement ou à l'obscurité est présenté dans la figure (II.4).

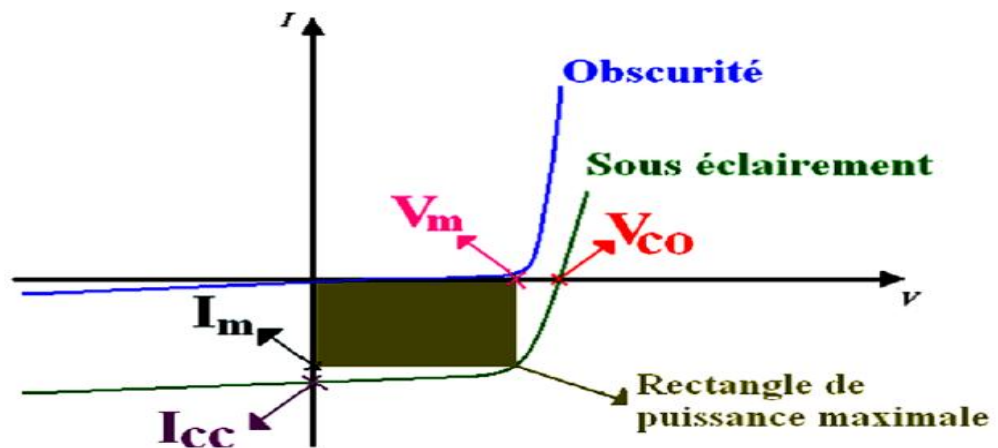


Figure. II.4. Caractéristique courant-tension d'une cellule [7].

II. 3.2.1. Courant de court-circuit

Le courant de court circuit est le courant débuté par la cellule sous éclairement en court-circuitant la sortie. 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} . [6]

$$I_{cc} = I_{ph} \tag{II.2}$$

II.3.2.2. 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 [67] :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{II.3})$$

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

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

II.3.2.3. Puissance électrique

La puissance électrique produite par une cellule solaire PV sous éclairage est égale au produit de l'intensité du courant et de la tension. Il faut ainsi fonctionner au point de puissance maximal p_{max} [7].

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (\text{II.4})$$

II.3.2.4. Facteur de forme

Le facteur de forme exprime le rapport entre la puissance maximal et la puissance idéal ($V_{oc} \cdot I_{cc}$) [7].

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II.5})$$

II.3.2.5. Rendement de conversion

Le rendement de conversion η est le rapport de la puissance fournie par la cellule sur la puissance incidente (l'éclairage). Il s'exprime selon l'équation suivante [7] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{inc}} = FF \frac{V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{inc}} \quad (\text{II.6})$$

II.3.2.6. Réponse spectrale

La réponse spectrale d'une cellule solaire PV c'est l'efficacité de la transformation d'énergie solaire en énergie électrique [13]. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau formant la cellule solaire [13]. La réponse spectrale s'exprime selon l'équation suivant :

$$Q(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{e\phi(\lambda) \times (1-R(\lambda))} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$Q(\lambda)$: Réponse spectrale, $\phi(\lambda)$: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.

II.3.2.7. 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[3]. Son expression est la suivante :

$$QE(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q \phi_0(\lambda)} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$J_{ph}(\lambda)$ le photocourant à la longueur d'onde λ , q la charge d'un électron, $\phi_0(\lambda)$ 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 [3]. Grâce à le rendement quantique, il est possible d'avoir accès à l'énergie de bande interdite de l'absorbeur E_g [3].

II.4. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

II.4.1. La cellule idéal

Dans le cas idéal, la cellule représente une jonction PN, elle est schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon l'équation (II.9) [10] :

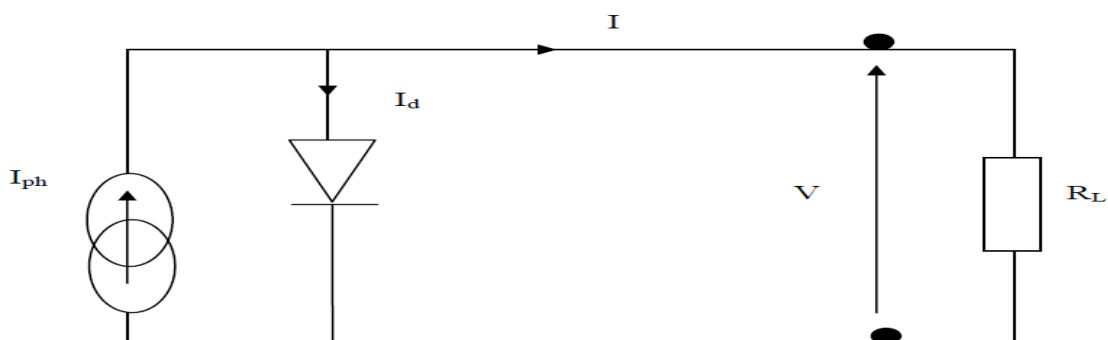


Figure. II.5. Schéma équivalente d'une cellule idéal [14].

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{II.9})$$

Avec :

I : courant délivré par la cellule, I_{ph} : courant de court-circuit (A), I_d : courant dans la diode (A).

La caractéristique (I-V) d'une diode est une caractéristique non linéaire donnée par la

relation suivante [10]:

$$I_D = I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.10})$$

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

$$V_T = \frac{A.K.T_j}{q} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

V_T : potentiel thermique, K : la constante de Boltzmann est égale à $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K, A : le facteur d'idéalité de la jonction, T_j : la température de jonction ($^{\circ}\text{C}$), I_s : le Courant de saturation de la diode (A), q : la charge de l'électron est égale à $1.6 \cdot 10^{-19}$ C, V_{PV} : tension délivré par la cellule (V), V_D : la tension aux bornes de la diode (V).

II.4.2. La cellule réelle

La cellule réelle est caractérisée par un schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant qui indique la conversion du photon lumineux en énergie électrique, deux résistances R_s et R_{sh} avec un diode en parallèle qui modélise la jonction PN [15]. Comme indiqué dans la figure (II.6).

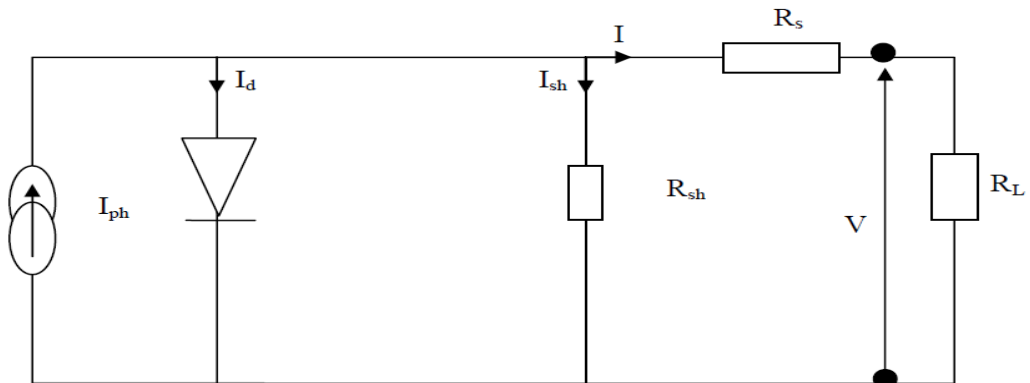


Figure. II.6. Schéma équivalente d'une cellule réelle [14].

Le courant généré par le module est donné par l'équation :

$$I(V) = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.13})$$

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V+R_s I}{n.U_T}\right) - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

I_d : le courant de la diode (A) , I_s : le courant de saturation (A), I_{sh} : le courant shunt I_{ph} : le photocourant généré , R_s, R_{sh} : les résistances série et shunt respectivement [14].

II.4.2.1. Influence de la résistance shunt

La résistance shunt R_{sh} : est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En général, la résistance shunt est très élevée [16]. L'influence de la résistance shunt sur la caractéristique I-V se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe I-V de la cellule dans la zone de fonctionnement comme une source de courant.[16]

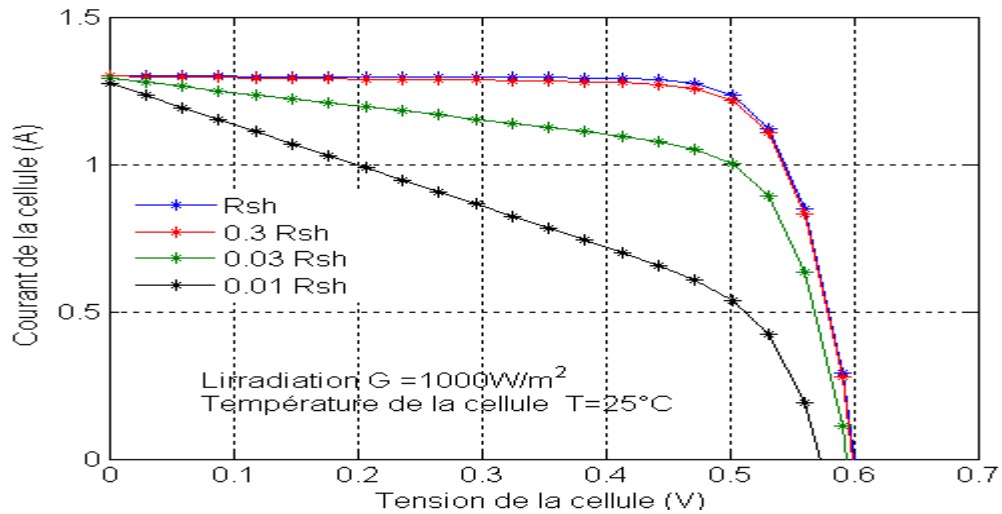


Figure. II.7. L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique (I-V) [16].

II.4.2.2. Influence de la résistance série

La résistance série R_s est liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux [17]. Elle se comporte comme un générateur de tension, ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court circuit [16].

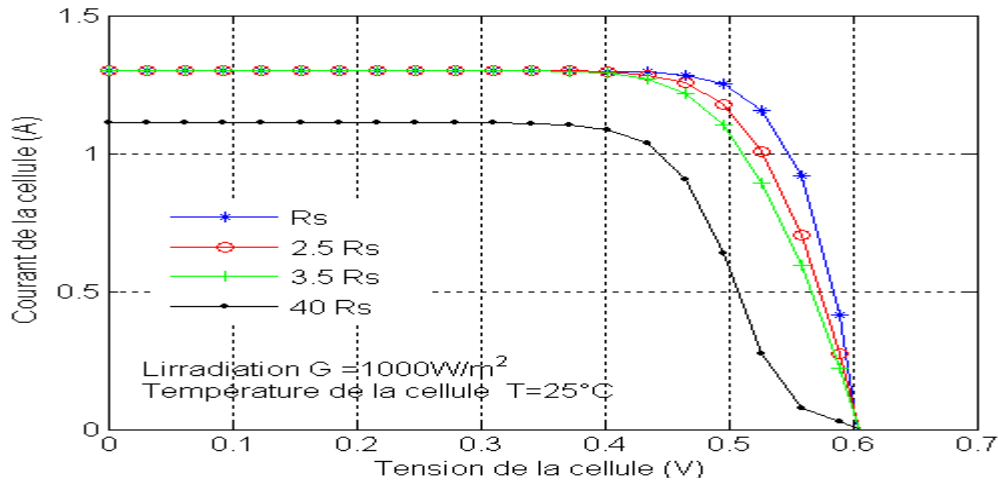


Figure. II.8. L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique (I-V) [16].

D'après les figures (II.7) et (II.8) on peut remarquer que la puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance shunt, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante [16]. Pour améliorer les performances des cellules solaires PVs et minimiser les pertes, il faut diminuer R_s et augmenter R_{sh} [17].

II.5. 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 effet, 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(II.9), nous montrons à titre d'illustration le rendement en fonction de l'énergie de gap de quelques matériaux semi conducteurs [18].

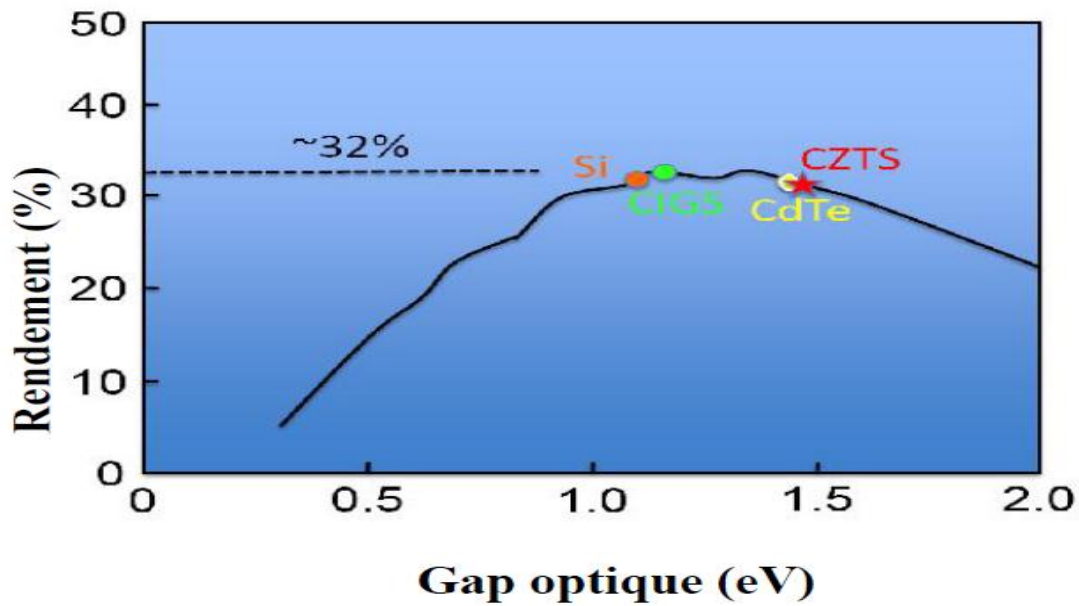


Figure. II.9. Les rendements en fonction de l'énergie du gap des matériaux photovoltaïques en couche mince [18].

II.6. 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 [11].

II.6.1. Première génération

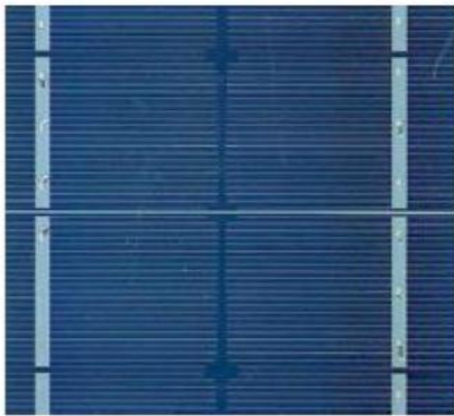
Actuellement, la grande majorité (plus de 85% du marché) des cellules solaires commercialisées sont à base de silicium [19]. La filière silicium correspond à la première génération des cellules solaires qui utilisent le silicium cristallin (monocristallin ou polycristallin) comme matériau absorbeur [13].

II.6.1.1. Le silicium monocristallin

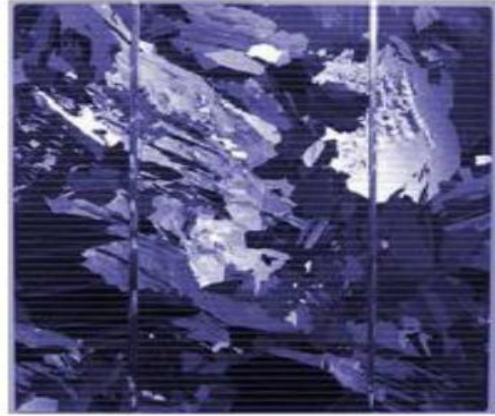
Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées sur le marché de l'énergie photovoltaïque [12]. 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 [12].

II.6.1.2. 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 [12].



(a)



(b)

Figure. II.10. Cellule photovoltaïque (a) monocristalline et (b) polycristallin [12].

II.6.2. Deuxième génération

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 [3]. La figure (II.11) présente la structure spécifique des différents types de cellules solaires [3].

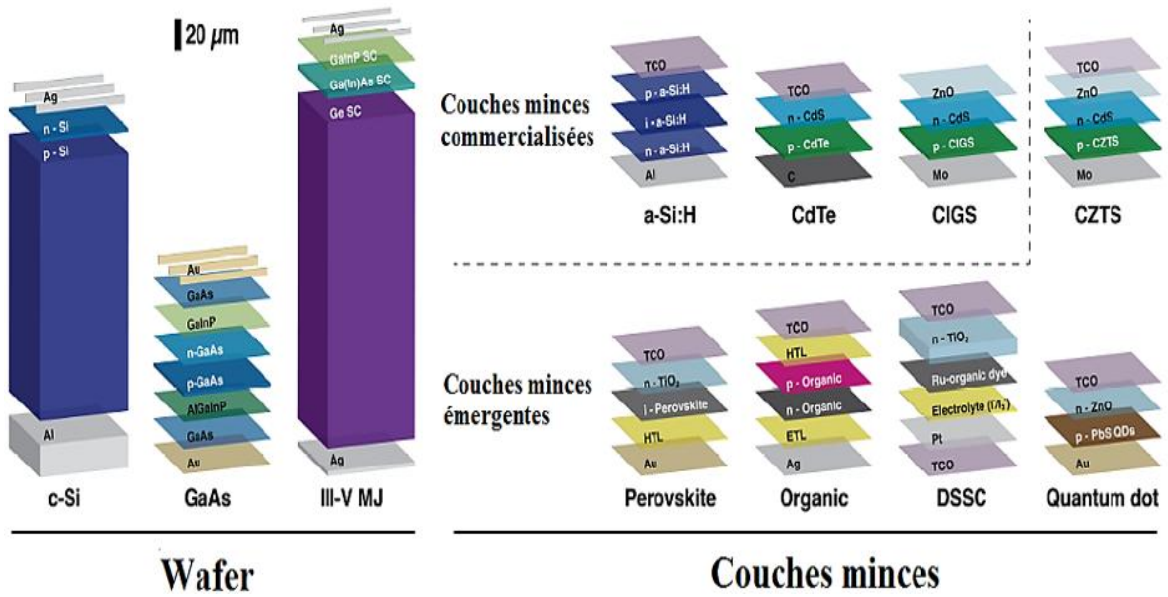


Figure. II.11. Les deux catégories des cellules solaire PVs à base de wafer et les couches minces[3].

II.6.2.1. Les couches minces

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[1].

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 [20].

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 élevé. 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 prédit d'importantes économies dans le coût des matériaux [21].

- Elles utilisent un type de techniques relativement peu coûteuse de dépôt sous vide pour le traitement des cellules solaires à couches minces. Ce qui réduit les coûts de traitement [20].

Les trois technologies émergentes sont aujourd'hui comme indiqué à la figure (II.12) :

- Le silicium amorphe et microcristallin noté TFSi (Thin-Film Silicon).
- Le semi-conducteur polycristallin CdTe (Tellure de Cadmium).
- L'alliage $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) CIGS [22].

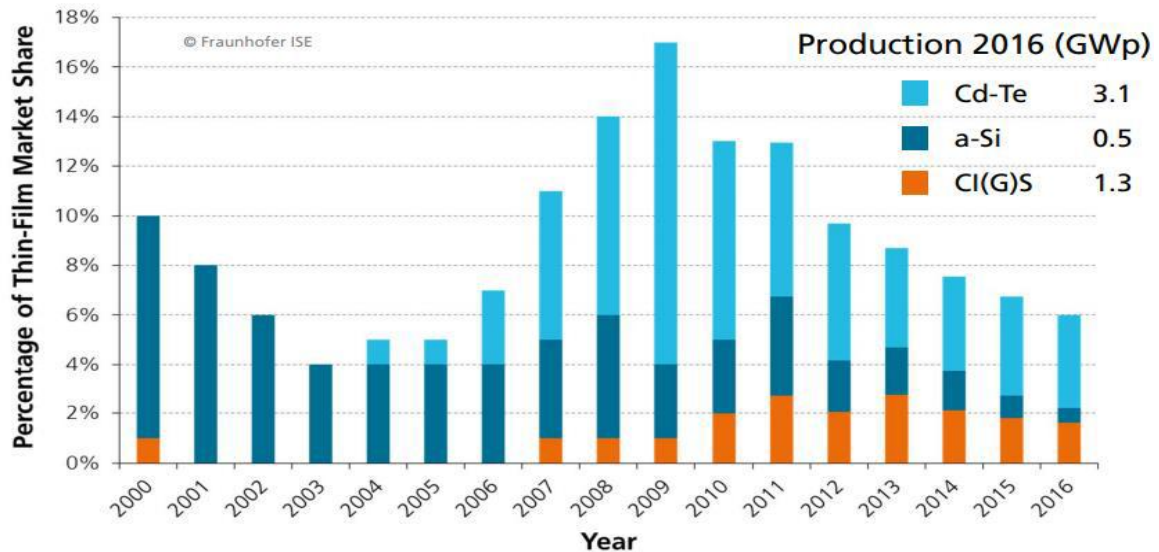


Figure. II.12. Pourcentage de marché des couches minces [20].

Les principaux matériaux absorbants utilisés en couches minces sont:

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 % [19].
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 [19].
3. **Les chalcopyrites I-III-VI₂** : CuInSe_2 (CIS) et CuInGaSe_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 [13]. La rareté de l'indium et du gallium ainsi

que la toxicité du sélénium (peut se combiner avec l'hydrogène et fournir du H₂Se hautement toxique) peuvent constituer un obstacle pour cette filière [13].

II.6.3. Troisième génération

Cette génération regroupé par un ensemble des technologies pour répondre a ces problématiques des matériaux employés dans la deuxième génération. Le but est de engendrer des matériaux de propriétés identiques, mais constitués d'éléments moins chers, abondants et moins toxiques [8]. Elle a l'avantage de pouvoir être déposées en grande surface et à grande vitesse. Elle ouvre également la voie à l'application légère, nomade et souple [12]. L'effet photovoltaïque a observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques. Dans cette génération, il ya plusieurs types de cellules : les cellules organiques, de Grätzel, celles photo-électrochimiques et les cellules inorganiques [12, 8].

Récemment, le CZTS est un nouveau matériau semi-conducteur à base des éléments abondants cuivre (Cu), zinc (Zn), étain (Sn) et le soufre (S) [19]. 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 [23]. Il est possible qu'il devienne dans les années à venir un matériau en couches minces concurrent à grande échelle [13].

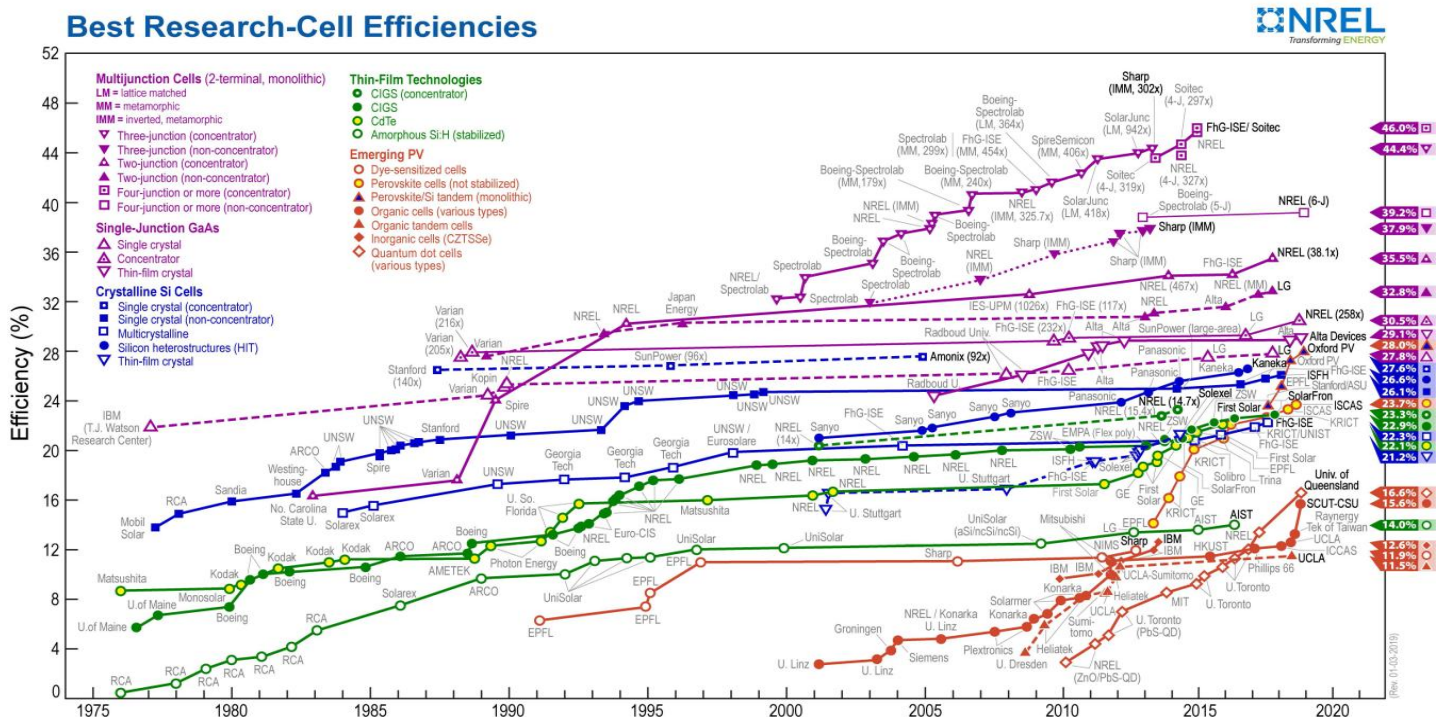


Figure. II.13. Les différents rendements de cellules solaires PV au niveau de laboratoire NREL [23].

II.7. Structure d'une cellule photovoltaïque en couche mince

Généralement, dans une cellule solaire en couches minces, il existe quatre couches principales sont : une couche fenêtre, la couche tampon, la couche absorbante et le contact arrière [2]. Comme présenté dans la figure (II.14)

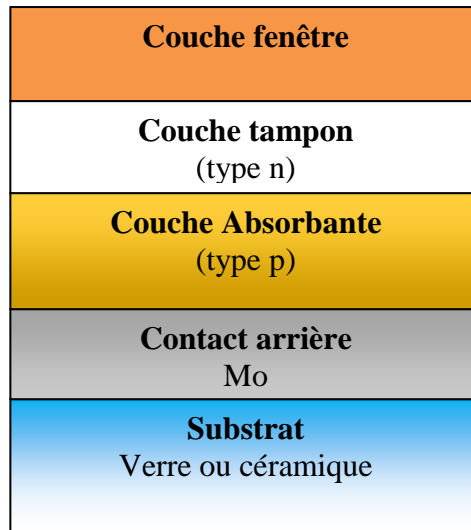


Figure. II.14. La structure standard des cellules solaires PVs en couches minces.

II.7.1. Le substrat

Les substrats se sont des supports permettant la tenue mécanique des différentes couches [11]. Généralement en verre, le plus utiliser des substrats flexibles ou métalliques [18].

II.7.2. Le contact arrière

C'est un contact ohmique, les matériaux utilisés pour les contacts arrière dans la plupart des cas c'est du Mo ou de l'ITO [11,18].

II.7.3. La couche absorbante

La couche la plus importante dans la cellule photovoltaïque est la couche absorbante, car elle est responsable de l'absorption des rayonnements solaires ainsi que la génération des porteurs de charges, les électrons et les trous [18]. Elle a l'avantage d'avoir des matériaux à une bande interdite directe et grand coefficient d'absorption, sa conductivité de type p [18, 20].

II.7.4. La couche tampon

Un semi conducteur de type n située entre la couche absorbante et la couche fenêtre [11]. Divers matériaux ont été utilisés comme couches tampons : ZnS, ZnSe, SnO, InS, ZnO et le CdS, parmi celles-ci, le CdS présente le meilleur rendement [24]. Elle est joué deux rôles, électriquement, la couche tampon d'optimiser l'alignement des bandes entre la couche absorbante et la couche fenêtre et de limiter les recombinaison des porteurs à l'interface de ces deux couches [20]. On outre, elle permet de protéger la surface de l'absorbeur [11].

II.7.5. La couche fenêtre

Cette couche est simultanément transparente et conductrice, de façons à collecter les électrons tout en laissant passer la lumière [20]. cette couche est constituée d'oxyde transparent conducteur OCT [11]. L'OCT couramment utilisé est l'oxyde de zinc ZnO [11]. Cette couche fenêtre est constituée de deux couches , l'une fine (50 à 100 nm) et très résistives, l'autre épaisse (100 à 1500 nm) et peu résistive [20]. La première couche de ZnO intrinsèque permet de réduire les courants de court circuit entre les deux électrode de la cellule et l'outre couche d'oxyde de zinc dopée en aluminium (ZnO : AL) qui permet de récupérer les électrodes photo-générer [11].

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notion 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 la structure de cellules solaires en couches minces. Dans le chapitre suivant on va présenter l'outil de simulation et le discussion des résultats simulées.

Références

- [1] OUSSIDHOUM Samira, « Etude comparative des performances des cellules solaire à jonctions simple et multiple », Mémoire de magister, Université MOULOUD MAMMERRI Tizi-Ouzou ,2015.
- [2] 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.
- [3] 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
- [4] FILLON Raphaël, «Etude des propriétés électroniques de couches minces de CZTSSe », Thèse de doctorat, université de GRENOBLE, 2016.
- [5] HANANOU Fatiha, ROUABAH AICHA «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Mémoire MASTER, université Kasdi Merbah Ouargla,2014
- [6] 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
- [7] KROUR Safia ,«optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque par les algorithmes génétiques », Mémoire de Magister, université de FARHAT ABBES STIF1, 2014 .
- [8] GRAVIS David, « Synthèse de $\text{Cu}_2\text{SnZnS}_4$ par pulvérisation magnétron réactive : de la caractérisation du plasma à la conception de cellules solaires » Mémoire de master , université de MONS ,2015
- [9] BENSACI Wafa,«Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012.
- [10] AIT MOKRANE Abderrahim, MOUSSAOUI Ahmed, «Extraction des Paramètres d'une Cellule Photovoltaïque », Mémoire de Master, université de ABDERRAHMANE MIRA BIJAYA, 2017.
- [11] ALPHOUSSEYNI Sagna, « Etude et élaboration par Close-Spaced Vapor Transport (CSVST), d'absorbeurs $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopiles à faible coût.», thèse de doctorat, UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2016.

- [12] 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.
- [13] SLIMANI TLEMCANI Taoufik, « Etude expérimentale de films minces de Cu_2ZnSnS_4 élaborés par électrodéposition et spray ultrasonique : Application à la conversion photovoltaïque. », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE MOHAMMED V– Rabat MAROK, 2016.
- [14] BENLOUCIF Nistrine , « Potentialités de films de silicium polycristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches. »,Thèse de Doctorat, Université des frères Mentouri –Constantine.
- [15] Dr. BELAID LALOUNI Sofia, Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Université A.MIRA de BEJAIA, Faculté de Technologie, 2015
- [16] HELALI Kamelia,«Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative» , Mémoire de Magister, université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2012 .
- [17] BOUKLI –HACENE Omar, « Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique. », Diplôme de Magister, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2011.
- [18] DARANFED Ouarda, « Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de Cu_2ZnSnS_4 », Thèse de Doctorat , Université de MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 2013.
- [19] FONCROSE Vincent,« Nanocristaux, films et cellules photovoltaïques de $Cu_2ZnSn(S, Se)_4$ par impression d'encres. », Thèse de Doctorat , université de Toulouse,2015.
- [20] 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.
- [21] MOSTEFA KARA Selma, « étude et simulation de cellules photovoltaïques couches minces a base de CIS et CIGS », le diplôme de Magister ,Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, 2012.
- [22] PETIBON Stéphane, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et convention de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat , université de Toulouse III, 2009 .
- [23] NERL <http://WWW.nerl.gov/ncpv/images/efficiency-chart.pdf>.
- [24] Belalem Abdeldjebar, Sandi Walid ,«Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $Cu_2ZnSn(S,S)_4$ », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2017.

Chapitre III

*Résultats de simulation et
discussions*

III.1. Introduction

Récemment, à cause des coûts élevés de l'expérimentation (techniques d'élaboration et de caractérisation), les chercheurs se sont orientés vers la simulation [1]. La simulation numérique est devenue incontournable pour tous les domaines de recherche et surtout pour les composants électroniques ou bien optoélectronique et notamment dans les cellules photovoltaïques. Ces logiciels de simulation nous donnent la possibilité d'étudier et d'interpréter les résultats obtenus, afin d'optimiser la structure et les différents composants des cellules pour améliorer leurs performances. Parmi les logiciels disponibles, notre choix s'est porté vers l'AMPS-1D [2].

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude des caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction (n-ZnO/n-CdS/p-CZTS) en couches minces. Où le semi-conducteur $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) de type p qui est l'absorbeur de la cellule. On a étudié l'influence des différents paramètres pour chaque couche de la cellule afin d'améliorer le rendement de conversion $\eta(\%)$, la densité de courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} et le facteur de forme FF. On va obtenir tout cela à partir le simulateur AMPS-1D pour générer les résultats des caractéristiques électriques de la cellule étudiée et leurs discussions.

III.2. Présentation du logiciel de simulation AMPS-1D

III.2.1. Aperçu

L'AMPS-1D (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures in one Dimension) [3,4] est l'un des logiciels de simulation les plus choisis pour l'analyse et la conception des phénomènes de transport en microélectronique et dans les structures photonique [5]. Il s'agit d'une seule dimension qui est applicable à tout dispositif à deux bornes. Il peut être pour la diode, le capteur photodiode et l'analyse des dispositifs photovoltaïques [2,6].

L'AMPS-1D a été créé et développé par le professeur Stephen Fonash et son équipe d'étudiants à l'Université d'État de Pennsylvanie dans le cadre du soutien de l'Electric Power Research Institute (EPRI). Le projet **AMPS-1D** a été initié et développé pour le système d'exploitation UNIX. Ce logiciel a été développé sous plusieurs versions en UNIX ou bien sous Windows. Pour nous, on a choisi d'utiliser la dernière version de 2012 sous Windows 7 le wxAMPS-1D [7,8]. L'utilisation de ce logiciel est très pratique

car il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque, il permet d'aller jusqu'à 30 couches. En plus, l'AMPS permet l'analyse un large éventail de structures de dispositifs sous illumination/sous tension ou les deux, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en agissant sur les paramètres variables (Largeur, surface, dopage, etc.). Une description détaillée des techniques de solution peut être trouvée dans le manuel d'AMPS [9].

III.2.2. La fonction de l'AMPS sur PC

L'AMPS permet de définir les propriétés du matériau (par exemple : la largeur de sa bande interdite (gap d'énergie), l'affinité, le dopage, les mobilités ... etc.), et la conception du dispositif ; structure contrôlant l'ensemble de la physique du dispositif et sa réponse à la lumière, à la tension appliquée et à la température [10].

Le logiciel wxAMPS-1D se divise en quatre parties. Les trois premières sont pour la programmation où il faut introduire les conditions environnementales, des couches et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation où le logiciel calcule, les bandes interdites, la caractéristique J-V, les courant de recombinaison, la génération... [6].

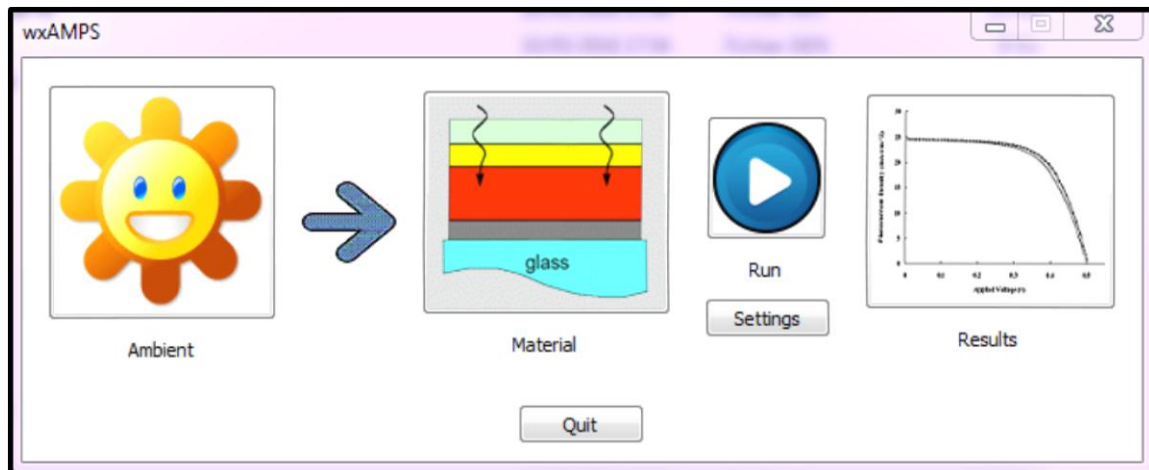


Figure. III.1. L'interface d'accueil de l'AMPS-1D.

Pour faire démarrer la simulation par AMPS-1D, trois types de paramètres sont Nécessaires:

III.2.2.1. Conditions environnementales

Dans l'interface des conditions environnementales on peut jouer sur la température et la lumière .On a fixé la température à 300 °K (température ambiante) avec le choix de l'obscurité ou l'éclairage pour examiner l'influence de ces paramètres sur les performances de la cellule PV. La figure (III.2) présente cette interface d'AMPS-1D.

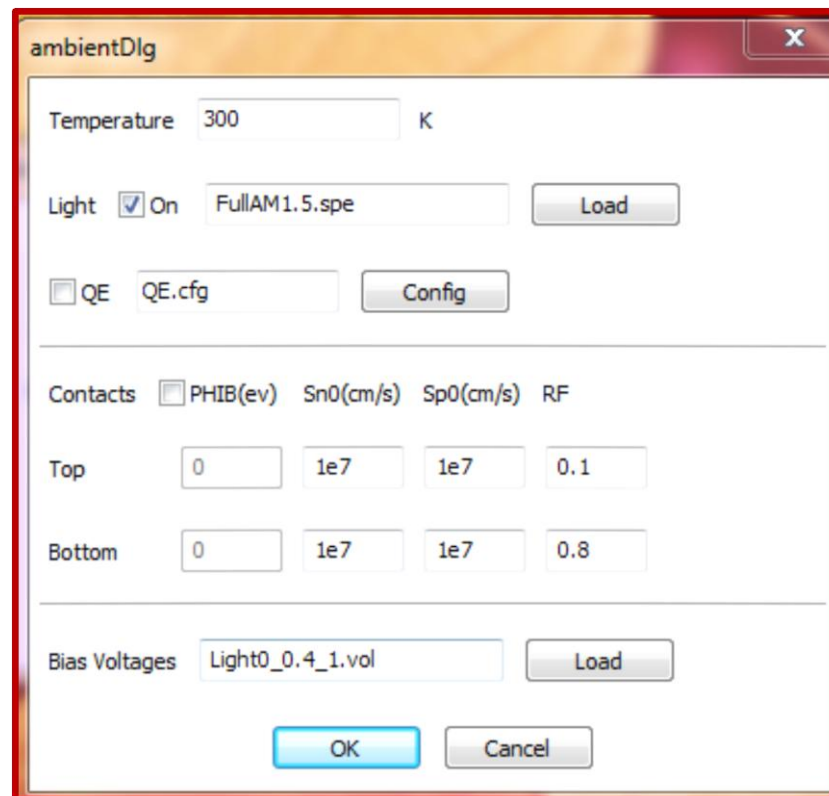


Figure. III.2.L'interface des conditions environnementale.

III.2.2. 2. Propriétés générales des matériaux

Pour une simulation réussie, il faut fixer les paramètres d'entrée les propriétés physiques du matériau pour chaque couche de la structure (ZnO/CdS/CZTS), on mentionne l'épaisseur du matériau, les propriétés électriques (l'énergie de gap, la mobilité, l'affinité, dopage ...), les propriétés optiques et les défauts. L'interface des propriétés du matériau permet de découvrir l'effet de l'épaisseur et le dopage pour chaque couche sur les caractéristiques de la cellule pour obtenir un rendement maximale à travers les modifications dans cette interface.

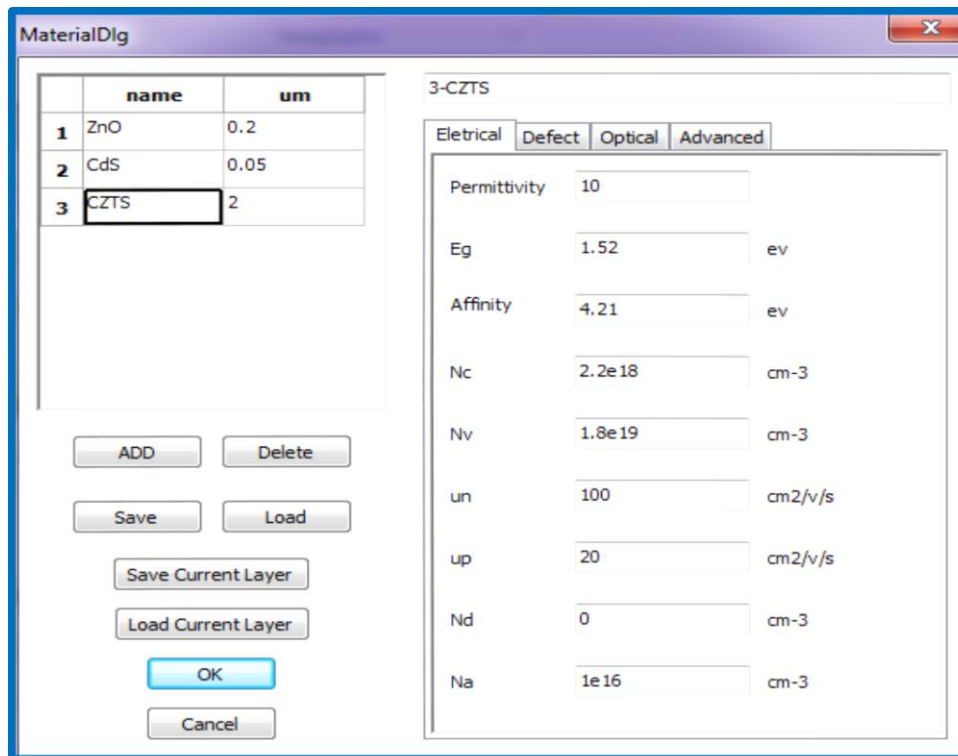


Figure. III.3. L'interface des paramètres électriques d'entrée.

III.2.2. 3. Paramètres de modélisation

Les paramètres de modélisation sont: le type de mode de fonctionnement, l'espacement de la grille pour les calculs numériques, la tension de polarisation pour laquelle la sortie (J-V) et (QE) devraient être générés [6, 7,8].

III.3. Structure de la cellule étudiée

Pour effectuer une simulation sous l'environnement AMPS-1D, il est nécessaire de bien définir la structure à simuler. Une cellule solaire est constituée d'un ensemble de couches minces semi-conductrices, dans notre étude, nous utilisons une cellule PV avec une couche absorbante à CZTS de la structure (n-ZnO/n-CdS/p-CZTS). Le schéma simplifié de la structure est représenté sur la figure (III.4).

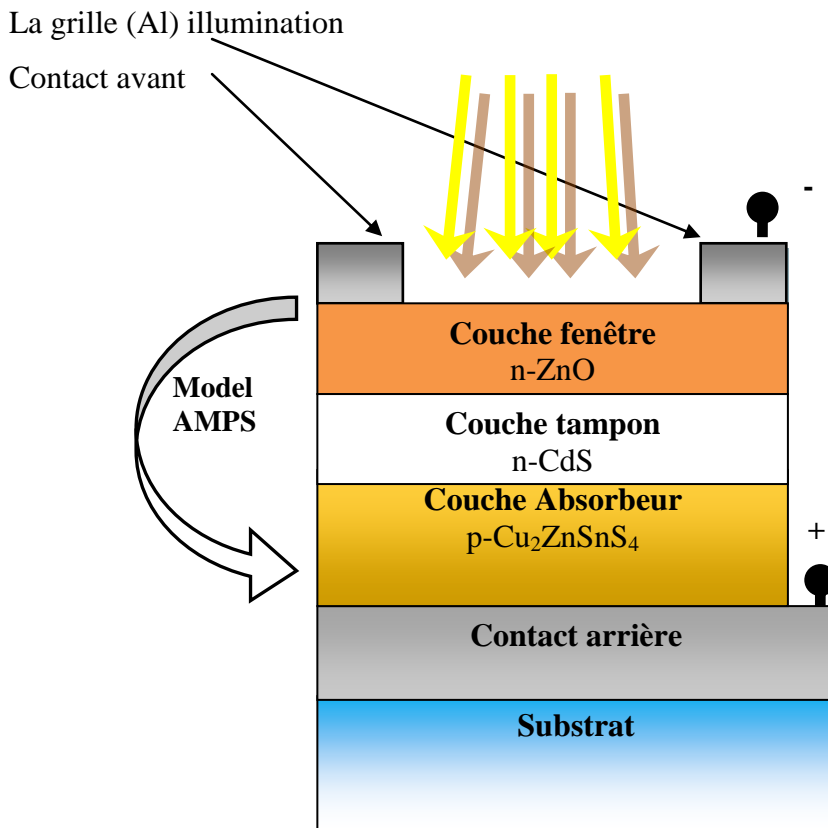


Figure. III.4. Schéma simplifié de la cellule en couches minces à base de CZTS.

Dans cette structure à hétérojonction (n-ZnO/n-CdS/p-CZTS) que nous apercevons dans la figure(III.4), constituée de différentes couches minces on mentionne : le substrat, le contact arrière, la couche absorbante (p-CZTS), la couche tampon (n-CdS), la couche fenêtrée (n-ZnO) et le contact avant. Il existe trois couches principales dans cette cellule étudiée par le simulateur d'AMPS-1D.

III.3.1. 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 à grand coefficient d'absorption notamment dans le 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 $1 \cdot 10^{-2} (\Omega\text{cm})^{-1}$ [12].

III.3.2. La couche tampon

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante (CZTS) et la couche fenêtrée (ZnO). Si un contact entre la couche absorbante et la couche fenêtrée est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister, mais son rendement sera limité par l'inadaptation des bandes interdites et les courants de fuite dus à la présence de

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

- Une bande interdite intermédiaire 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].

III.3.4. La couche fenêtre

C'est la couche d'oxyde transparent conducteur (TCO), 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].

III.4. Paramètres physiques utilisés dans la simulation

➤ Propriétés des différentes couches :

Tableau. III.1. Les paramètres physiques d'entrée pour les matériaux des couches ZnO, CdS, CZTS et CZTSe [4,15, 16,17].

Couche Propriété	n-ZnO	n-CdS	p-CZTS	CZTSe
Permittivité diélectrique	9	10	10	13.6
Epaisseur (μm)	0.2	0.05	2	2
Bande de gap (eV)	3.37	2.4	1.52	1.1
Affinité électronique (eV)	4.4	4.2	4.21	4.36
Densité des états effective dans la BC (N_c (cm^{-3}))	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
Densité des états effective dans la BV (N_v (cm^{-3}))	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
Mobilité d'électron μ_n ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	100	100	100	100
Mobilité du trou μ_p ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	25	25	20	25
Densité du donneur N_d (cm^{-3})	1×10^{18}	1.1×10^{18}	0	0
Densité de l'accepteur N_a (cm^{-3})	0	0	2×10^{15}	5×10^{16}

III.5. Résultats et discussion

➤ Simulation de la cellule avant l'optimisation

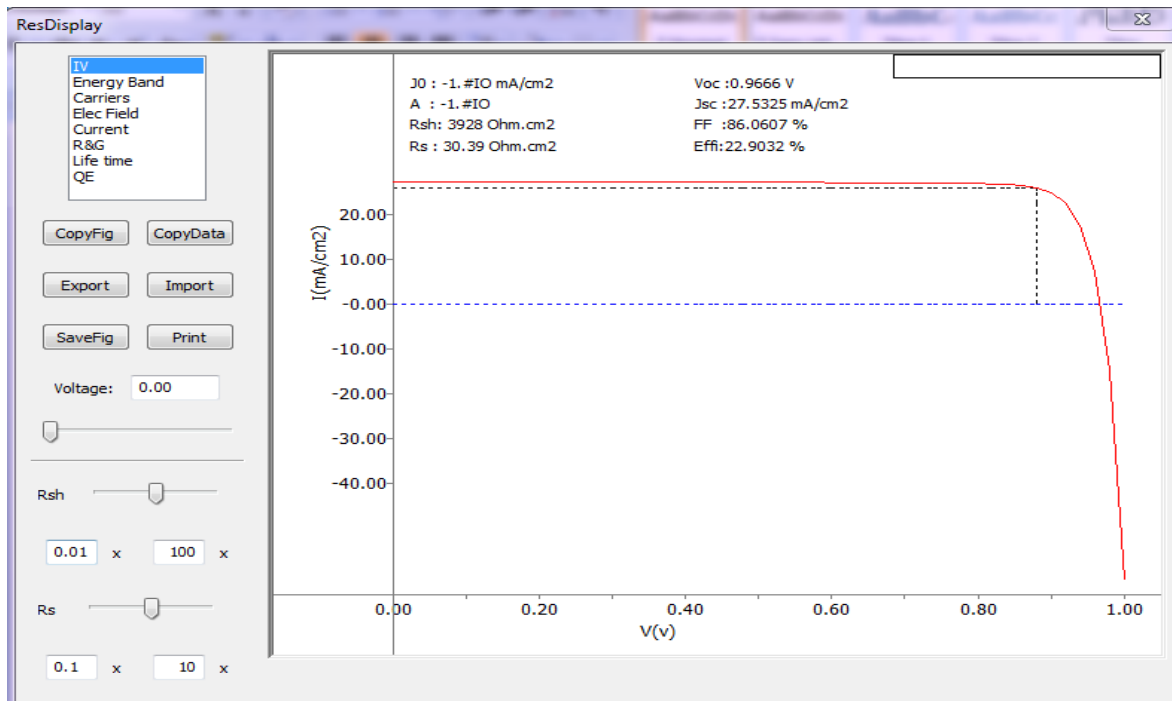


Figure. III.5. Les performances électriques de la caractéristique J-V sous l'éclairement avant l'optimisation des paramètres.

III.5.1. Influence de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule à base de CZTS

Nous avons optimisée les variations des valeurs de l'épaisseur dans chaque couche de la cellule de base étudiée.

III.5.1.1. 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 élevée presque de 3.37 eV. Les paramètres de la structure, pour différentes épaisseurs de couche ZnO, tirés des différentes caractéristiques électriques, sont résumés dans le tableau (III.2) tandis que les épaisseurs des couches en CdS et en CZTS sont fixées (0.05 μm , 2 μm respectivement).

Tableau. III.2. Effet de variations de l'épaisseur de la couche ZnO sur les caractéristiques électriques de la cellule PV à base de CZTS.

L'épaisseur de la couche ZnO (μm)	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
0.5	0.96	27	86.0	22.0
0.4	0.96	27	86.0	22.78
0.3	0.96	27	86.0	22.83
0.2	0.96	27	86.0	22.90
0.1	0.96	27	86.0	22.98
0.08	0.96	27	86.0	22.99
0.05	0.96	27	86.0	23
0.03	0.96	27	86.0	23
0.02	0.96	27	86.0	23
0.01	0.96	27	86.0	23

Les figures (III .6) et (III.7) montrent les courbes des caractéristiques électriques en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

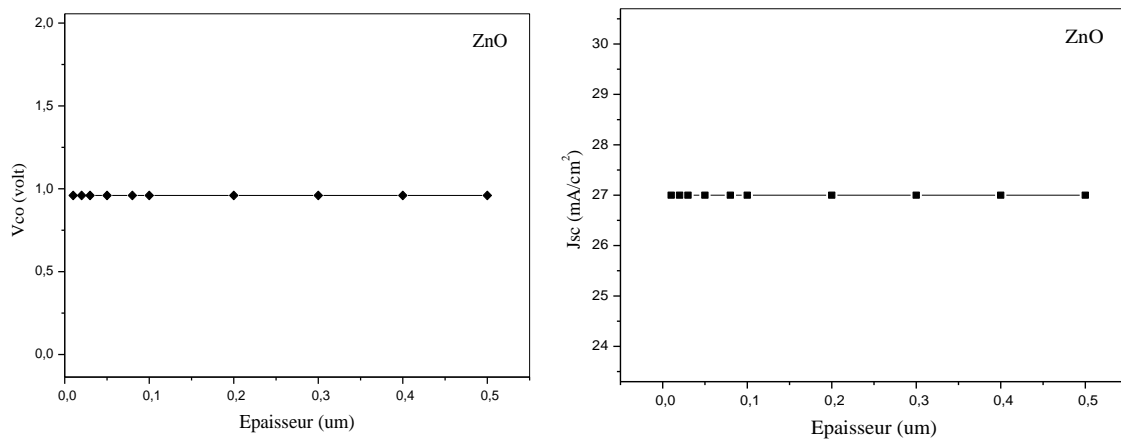


Figure. III.6. Variation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) et la densité de courant de court circuit (J_{sc}) avec l'épaisseur de couche en ZnO.

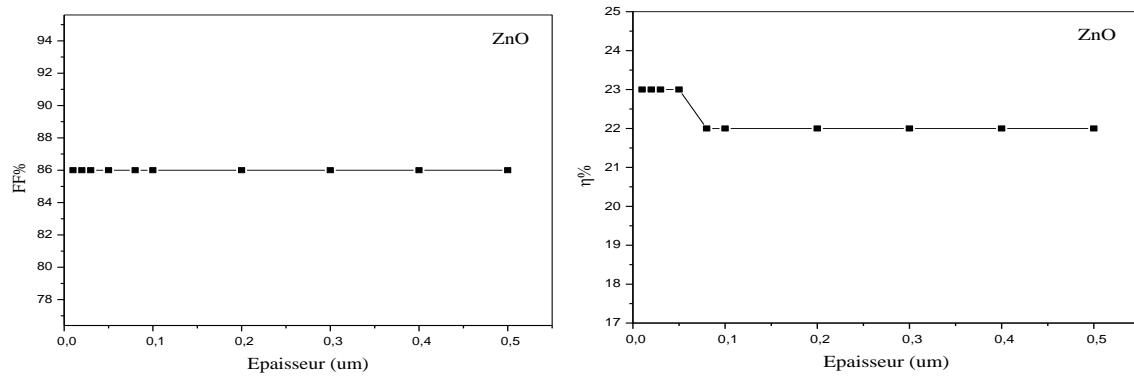


Figure. III.7. Variation du facteur de forme (FF) et du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur de couche en ZnO.

A partir des résultats par la simulation que nous représentons dans le tableau (III.2) et dans les figures (III.5) et (III.6), nous remarquons que l'influence de l'épaisseur sur les performances de la cellule solaire est très faible, ils sont presque constant. 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_{sc} 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 23% de ce film.

III.5.1.2. Optimisation de l'épaisseur de la couche CdS

L'épaisseur de la couche CdS est variée de $0,01\mu\text{m}$ à $0,12\mu\text{m}$ tandis que l'épaisseur de la couche en CZTS est fixe ($2\mu\text{m}$). Les variations de ce paramètre de la couche CdS, tirés des différentes performances électriques, sont vu dans le tableau (III.3).

Tableau. III. 3. Effet de l'épaisseur de la couche CdS sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CZTS.

L'épaisseur de la couche CdS (μm)	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
0.12	0.96	25.65	85.85	21.25
0.09	0.96	26.36	85.93	21.87
0.08	0.96	26.64	85.96	22.11
0.07	0.96	26.94	85.99	22.39
0.06	0.96	27.28	86.03	22.68
0.05	0.96	27.64	86.07	23.00
0.04	0.96	28.05	86.10	23.36
0.03	0.96	28.48	86.14	23.74
0.02	0.96	28.99	86.18	24.18
0.01	0.96	30.05	86.21	25.11

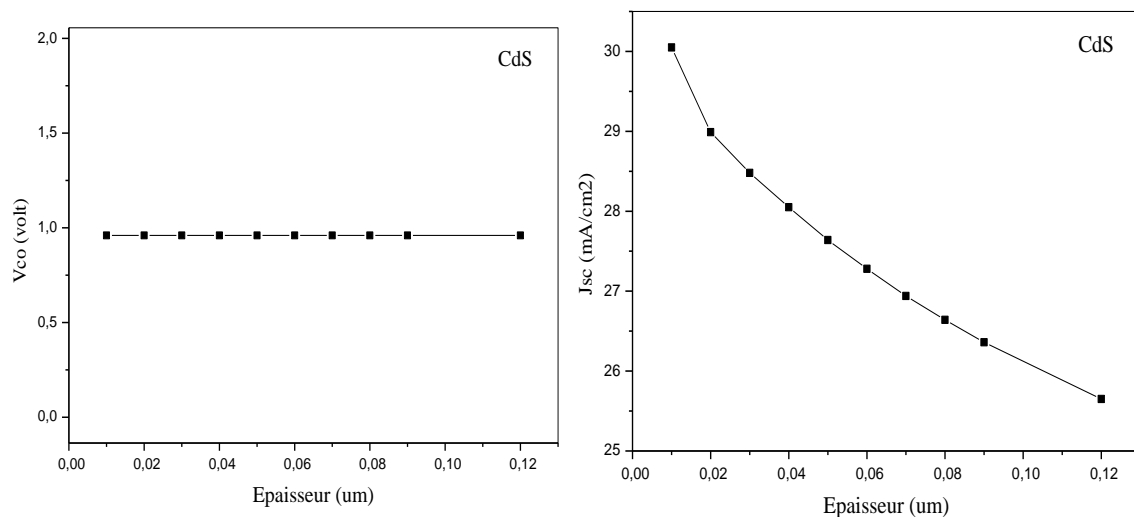


Figure. III.8. Variation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) et la densité de courant de court circuit (J_{sc}) avec l'épaisseur de couche CdS.

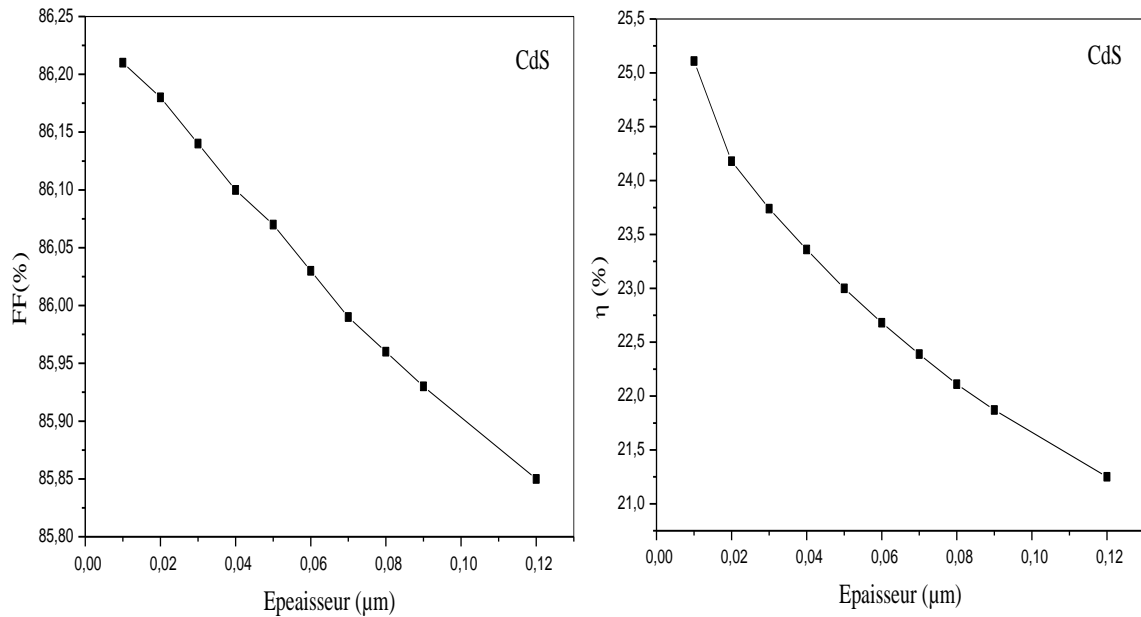


Figure. III.9. Variation du Facteur de forme (FF) et du rendement (η) avec l'épaisseur de la couche CdS.

Nous remarquons que la caractéristique I-V s'améliore 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 25.11% avec une épaisseur optimale de 0.01 μm . Ces résultats raisonnables parce que l'énergie du gap de CdS est plus importante que l'énergie de gap de CZTS, alors plus l'épaisseur de CdS augmente plus des photons seront absorbés dans cette couche qui contient une densité élevée de défauts [19].

III.5.1. 3. Optimisation de l'épaisseur de la couche CZTS

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

Tableau. III.4. Effet de l'épaisseur de la couche CZTS sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.

L'épaisseur de la couche CZTS (μm)	V _{co} (volt)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
1.5	0.9610	29.92	85.37	24.55
2	0.9690	30.05	86.21	25.11
2.5	0.9767	30.14	86.53	25.47
3	0.9820	30.19	86.69	25.70
3.5	0.9855	30.23	86.97	25.91
4	0.9889	30.26	87.22	26.10
4.5	0.9922	30.27	87.34	26.24
5	0.9954	30.29	87.38	26.35
5.5	0.9985	30.30	87.37	26.43
6	0.0000	30.31	1.#INF00	26.51

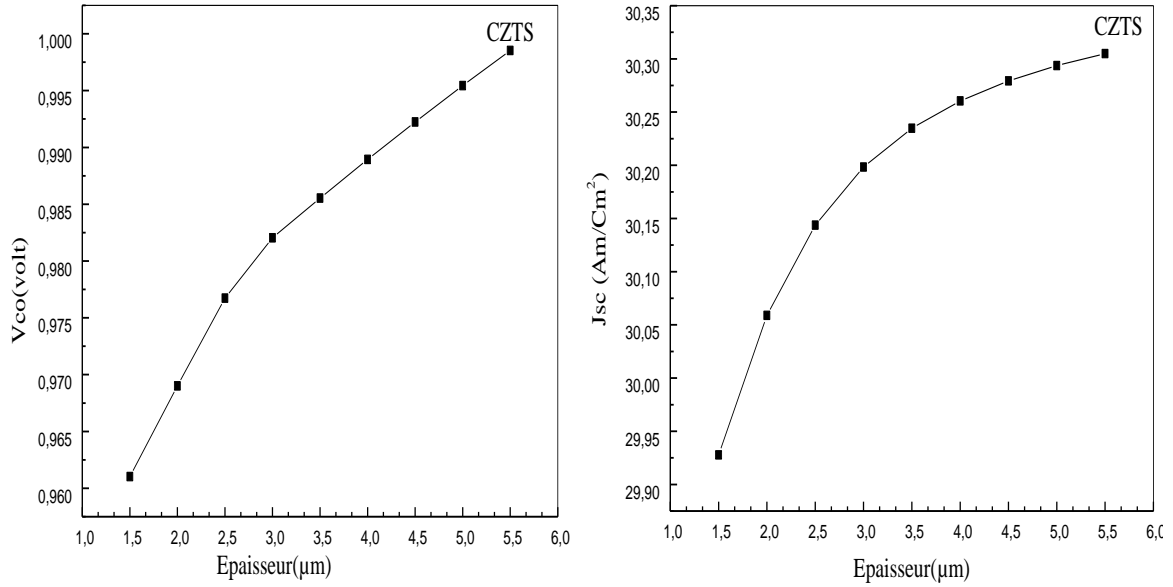


Figure. III.10. Variation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) et la densité de courant de court circuit (J_{sc}) avec l'épaisseur de couche CZTS.

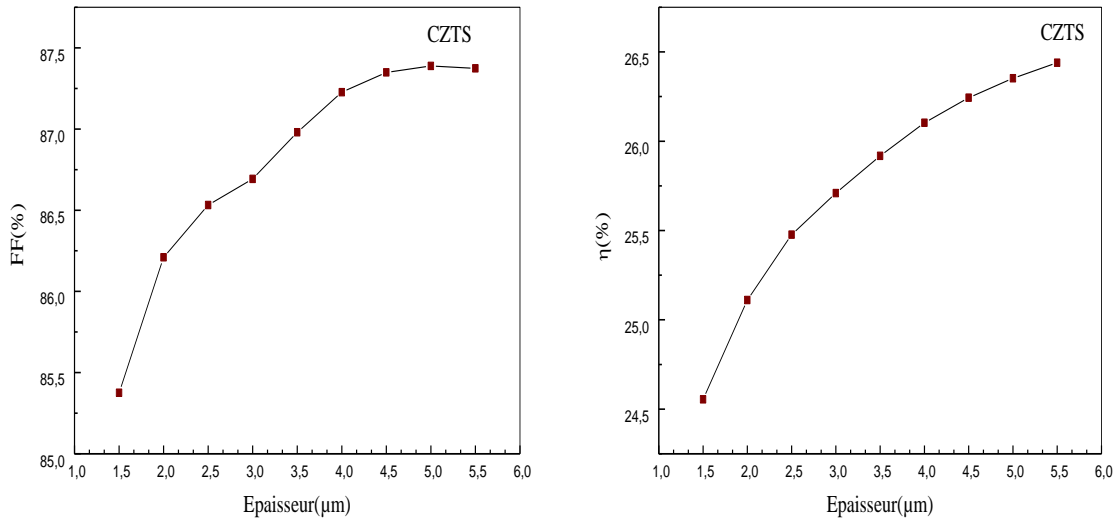


Figure. III.11. Variation de la Facteur de forme (FF) et du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur de la couche CZTS.

D'après les résultats obtenus (voir le tableau III.4) et les figures (III.10, III.11), nous remarquons que, plus on augmente dans l'épaisseur de la couche CZTS au-delà de 2μm, les différentes caractéristiques électriques s'améliorent. Dans la figure (III.10), 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 0.99V et 30.30mA/cm² respectivement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante qui dépasse 5μm.

La figure(III.11) montre qu'il y a une élévation remarquable de facteur de forme FF de 87.37% et du rendement η maximal de 26.43% avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CZTS. Le changement de la valeur du rendement quand l'épaisseur varie de 1.5 et 5.5 μm permet d'obtenir une valeur optimale de l'épaisseur, on va choisir 5.5 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. III.5. Les valeurs optimales de l'épaisseur pour chaque couche.

CZTS (μm)	CdS (μm)	ZnO (μm)
5.5	0.01	0.01

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

V_{co} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
0.99	30.30	87.37	26.43

III.5.2. Influence du dopage de chaque couche sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CZTS

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 couche ZnO, CdS et CZTS sur les caractéristiques électriques pour cela nous utilisons les valeurs optimales de l'épaisseur de ces couches que mentionnes précédent.

III.5.2.1. 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 N_d dans la marge de 10^{15} à 10^{20} cm^{-3} on fixe la concentration de dopage par défaut : le donneur N_d de la couche de CdS de 1.1×10^{18} cm^{-3} et l'accepteur N_a de la couche de CZTS de 2×10^{15} cm^{-3} . Les résultats sont résumés dans le tableau (III.7).

Tableau. III.7. L'influence du dopage de la couche ZnO sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la Couche ZnO N_d (cm^{-3})	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
10^{15}	0.998665	30.293	87.27	26.403
10^{16}	0.998581	30.296	87.33	26.422
10^{17}	0.998548	30.300	87.36	26.432
10^{18}	0.998532	30.304	87.37	26.439
10^{19}	0.998522	30.313	87.38	26.450
10^{20}	0.998524	30.327	87.39	26.465

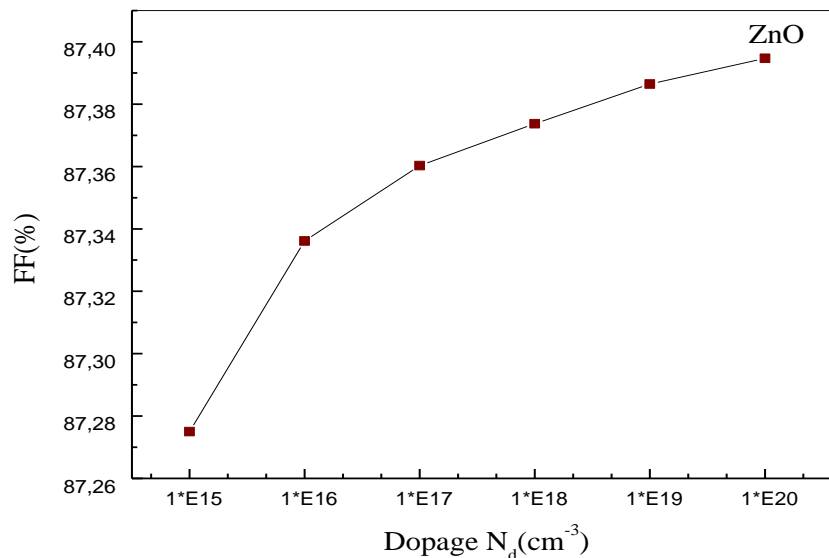


Figure. III.12. Influence du dopage de la couche de ZnO sur le Facteur de forme (FF).

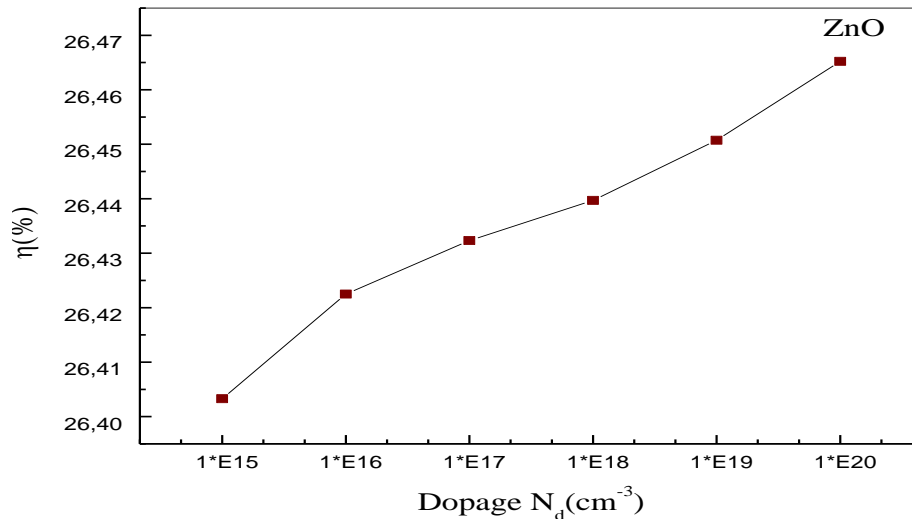


Figure. III.13. Influence du dopage de la couche de ZnO sur le rendement (η).

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} (ce 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/CZTS 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 26.46% pour la valeur optimale de 10^{20}cm^{-3} .

III.5.2.2. Optimisation du dopage de la couche en CdS

Nous avons varié la concentration du dopage N_d de la couche de CdS dans la marge de $1.1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ à $1.1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, on prendre la valeur optimale du dopage de la couche ZnO N_d qui est de 10^{20}cm^{-3} .

Tableau. III.8. L'influence du dopage de la couche CdS sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la Couche CdS N_d (cm^{-3})	V_{co} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
1.1×10^{15}	0.998639	30.3438	87.327	26.4625
1.1×10^{16}	0.998636	30.3435	87.329	26.4626
1.1×10^{17}	0.998613	30.3408	87.342	26.4638
1.1×10^{18}	0.998524	30.3271	87.394	26.4652
1.1×10^{19}	0.998502	30.3331	87.411	26.4750
1.1×10^{20}	0.998500	30.3381	87.415	26.4803

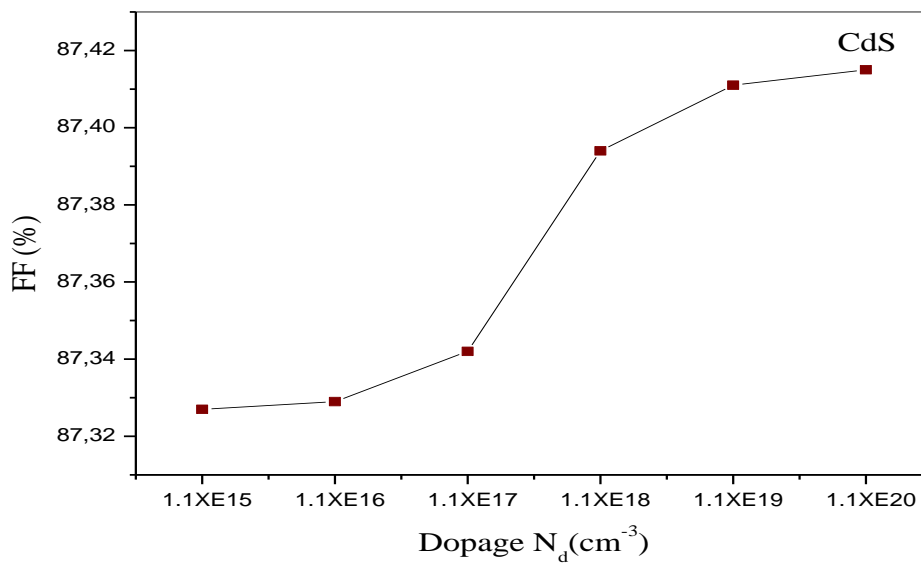


Figure. III.14. Influence du dopage de la couche de CdS sur le facteur de forme (FF).

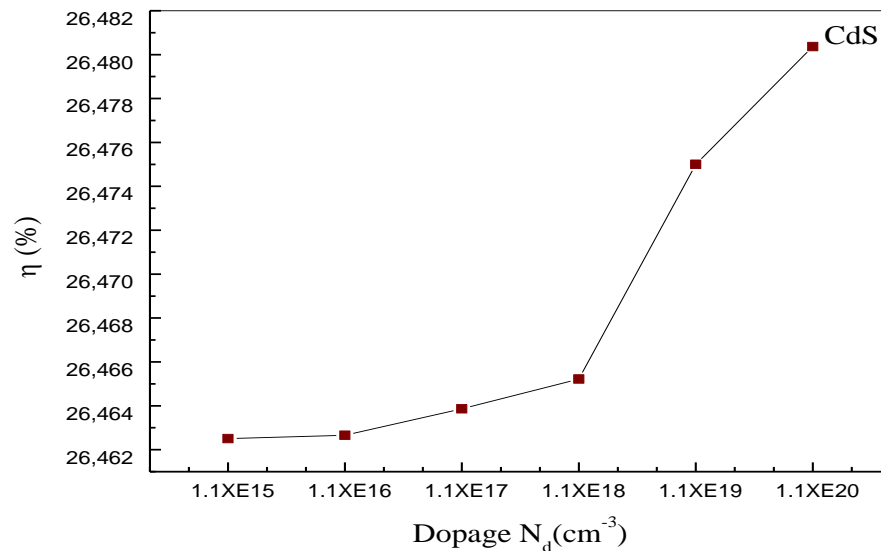


Figure. III.15. Influence du dopage de la couche de CdS sur le rendement (η).

Les résultats obtenus (figures III.14 et III .15) 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 N_d de $1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, après cette valeur la densité augmente mais avec des petits changements. Donc, la valeur optimale de dopage de couche CdS est de $1.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ pour un rendement optimal de 26.48%.

III.5.2.3. Optimisation du dopage de la couche en CZTS

Les valeurs de densité de l'accepteur N_a de la couche CZTS 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. III.9. L'influence du dopage de la couche CZTS sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Dopage de la Couche CZTS N_a (cm^{-3})	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
1×10^{13}	0.84	30.39	81.29	20.86
1×10^{14}	0.90	30.42	85.74	23.73
1×10^{15}	0.97	30.38	87.25	25.97
2×10^{15}	0.99	30.33	87.41	26.48
3×10^{15}	0.00	30.298412	1.#INF00	26.75
1×10^{16}	0.00	30.13	1.#INF00	27.50
10^{17}	0.00	29.75	1.#INF00	28.96
10^{18}	0.00	29.50	1.#INF00	29.36

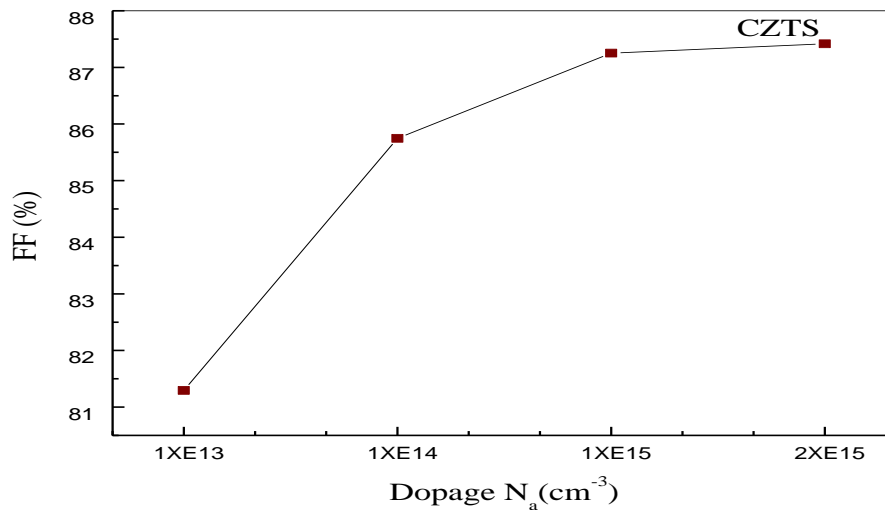


Figure. III.16. Influence du dopage de la couche de CZTS sur le facteur de forme (FF).

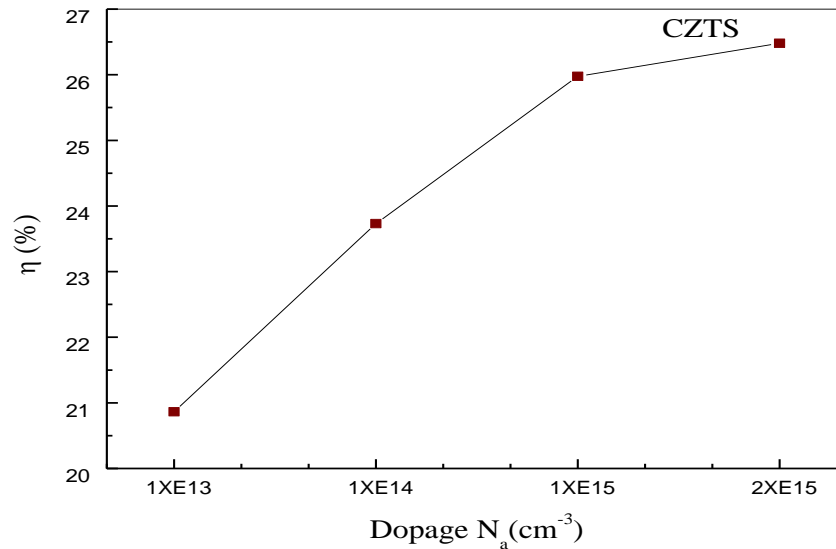


Figure. III.17. Influence du dopage de la couche CZTS sur le rendement (η).

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 CZTS. La tension V_{co} , le Facteur de forme FF et le rendement η augmentent avec la densité des porteurs (N_a), alors que le courant J_{sc} 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 N_a . 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].

Tableau. III.10. Les valeurs des dopages optimales pour chaque couche.

Na (CZTS) (cm^{-3})	Nd (CdS) (cm^{-3})	Nd (ZnO) (cm^{-3})
2×10^{15}	1.1×10^{20}	1×10^{20}

Tableau. III.11. Les paramètres obtenus pour des valeurs optimales du dopage.

V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
0.99	30.33	87.41	26.48

III.5.3. 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 290 à 390 °K avec un pas de 10 °K, on peut obtenir les résultats dans le tableau (III.12) et les figures (III.16 et III. 17).

Tableau. III.12. Les variations des performances de la cellule solaire pour des différentes valeurs de la température.

La température en (°K)	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
290	0.00	30.33	1.#INF00	27.10
300	0.99	30.33	87.41	26.48
310	0.98	30.33	86.93	25.86
320	0.96	30.33	86.51	25.24
330	0.94	30.33	86.06	24.62
340	0.92	30.33	85.59	24.00
350	0.90	30.33	85.10	23.38
360	0.88	30.33	84.58	22.77
370	0.86	30.33	84.05	22.16
380	0.85	30.32	83.49	21.54
390	0.83	30.32	82.90	20.93

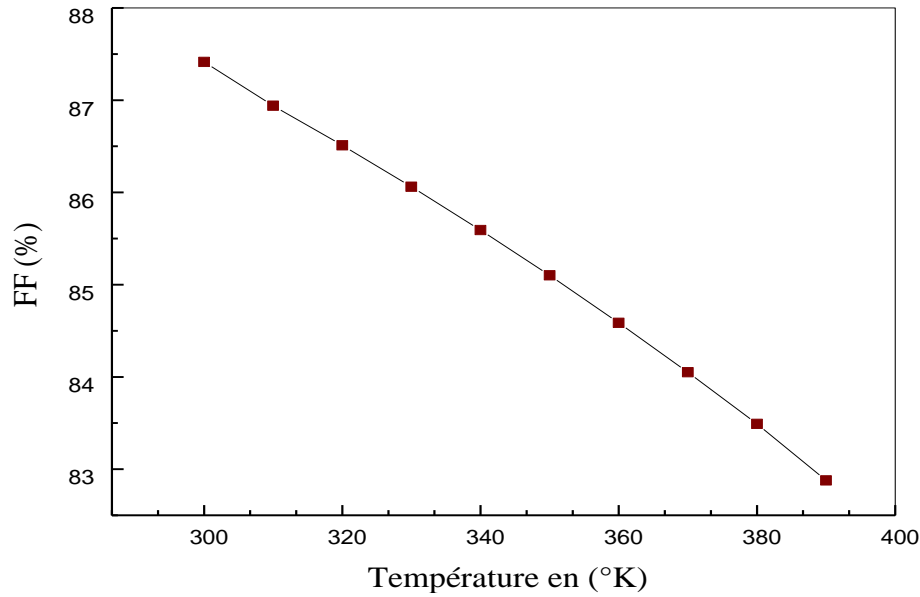


Figure. III.18. Variation du facteur de forme en fonction de la température.

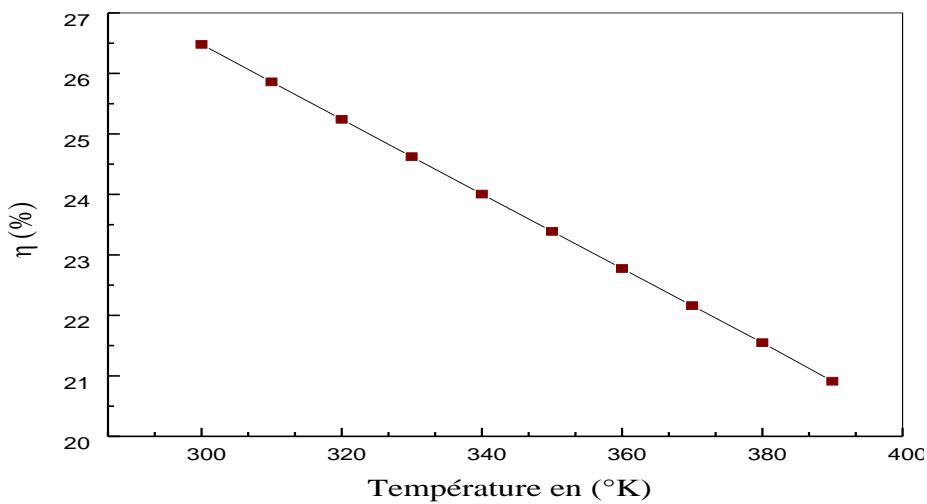


Figure. III.19. Variation du rendement en fonction de la température.

Comme on peut le voir au tableau et les figure (III.18 et III.19), les valeurs de V_{co} , 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 26.48% pour 300°K.

Tableau. III.13. Comparaison avec des autres résultats de simulation.

Structure de cellule	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)	Réf
CZTS/CdS/i-ZnO	0.99	30.33	87.41	26.48	Notre travail
CZTS/CdS/i-ZnO	0.780	51.925	55.83	22.63	[20]
CZTS/CdS/i-ZnO	0.993	29.823	86.30	25.58	[19]
CZTS/CdS/i-ZnO	1.008	35.594	83.7	30.036	[4]

III.5.4. Les résultats de la simulation après l'optimisation des couches

III.5.4.1. Les résultats de la simulation de la cellule à base de CZTS

D'après, la simulation par l'environnement AMPS-1D et l'optimisation des paramètres de chaque couche. On trouve que, l'épaisseur optimale de CZTS est 5.5μm à dopage Na de $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, l'épaisseur de CdS est 0.01μm avec un dopage Nd de $1.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ et l'épaisseur de ZnO est 0.01 μm et un dopage Nd de 10^{20} cm^{-3} . On obtenu les résultats indiqués dans la figure (III.20), qui présente la caractéristique courant-tension (*J-V*) de la cellule solaire hétérojonction (n-ZnO/n-CdS/n-CZTS).

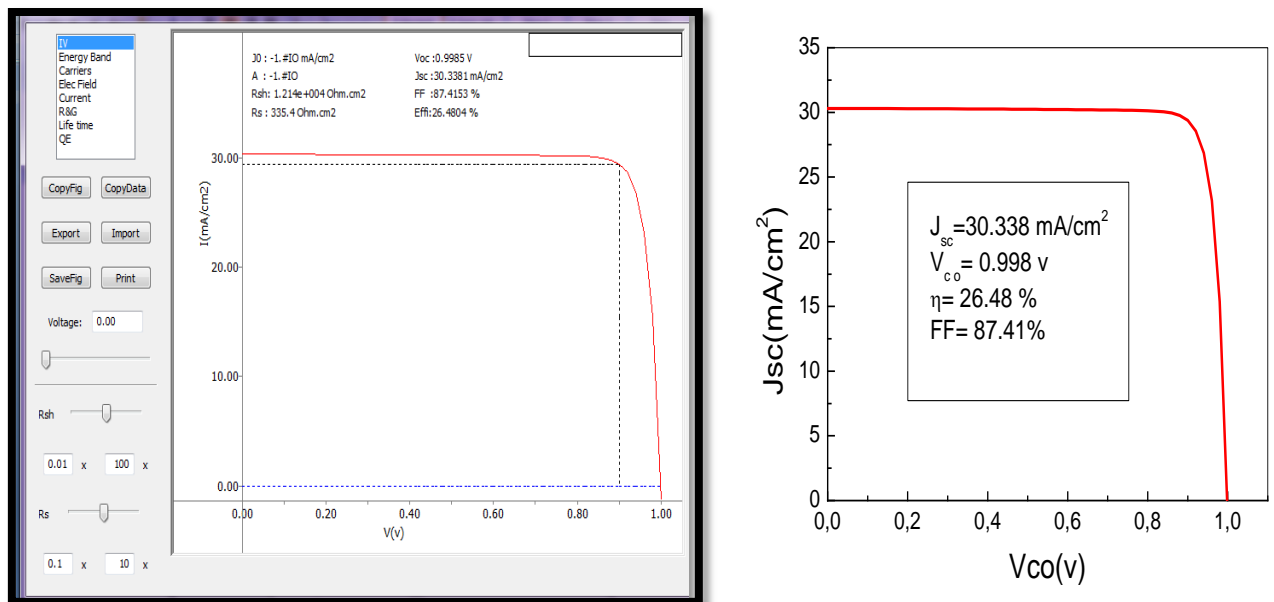


Figure. III.20. L'interface des résultats et leur caractéristique *J-V* de cellule à base de CZTS sous l'éclairement AM1.5.

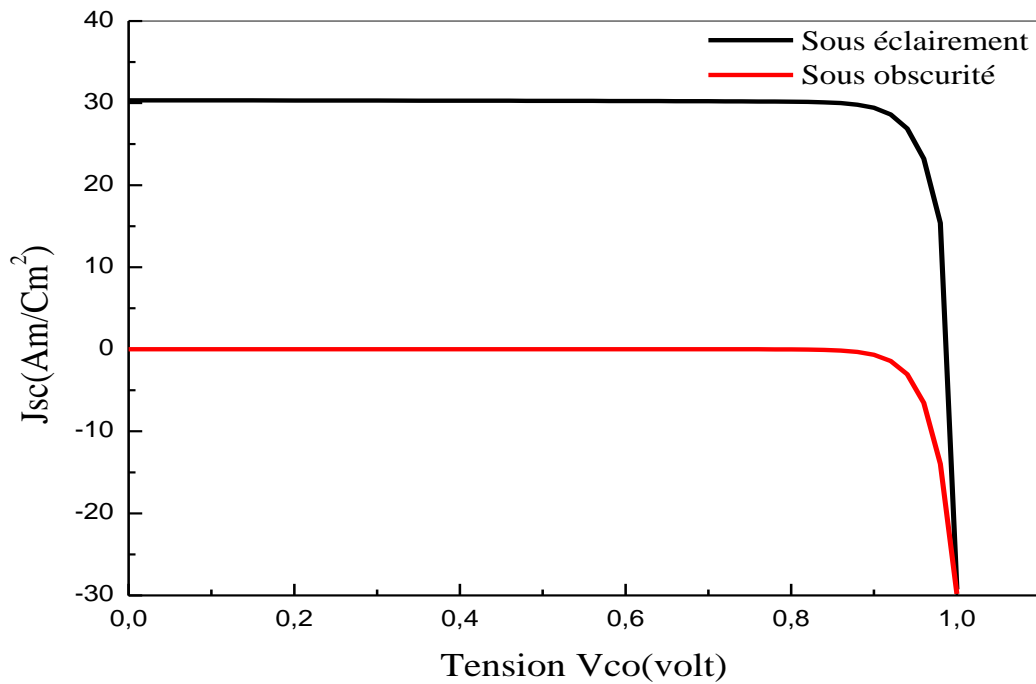


Figure. III.21. La caractéristique J - V à obscurité et sous l'éclairement AM1.5.

III.5.4.2. Les résultats de la simulation de la cellule à base de CZTSe

Nous utilisons les propriétés électriques de la couche CZTSe dans logiciel AMPS-1D on remplaçant la couche de CZTS. Les résultats de simulation sont résumés dans la figure

(III.21).

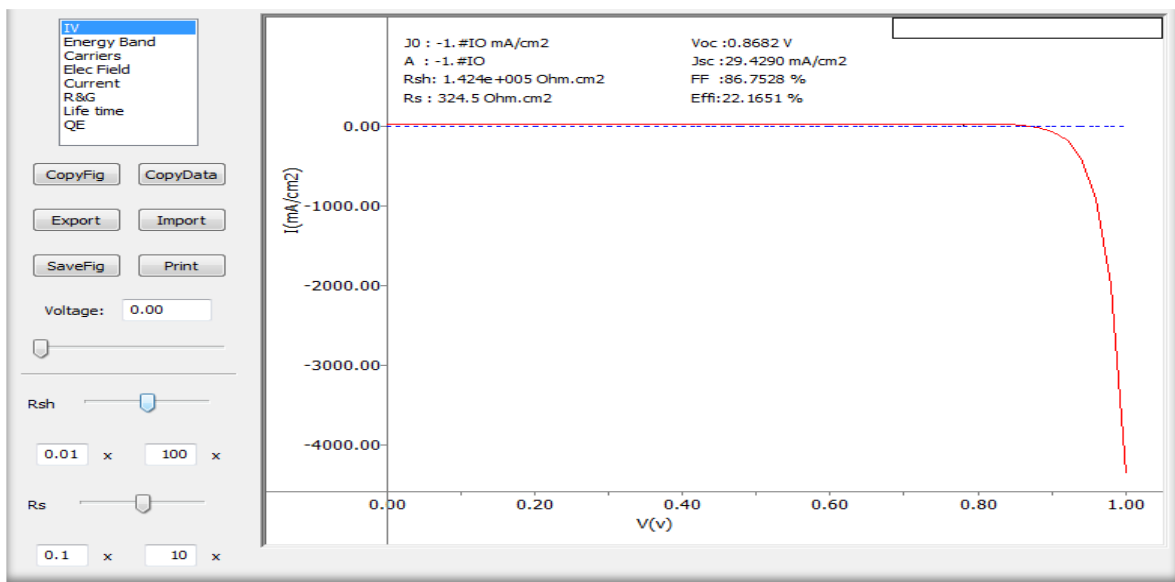


Figure. III.22. L'interface des résultats pour la caractéristique J - V de cellule à base de CZTSe sous l'éclairement AM1.5.

D'après la figure (III.21), on remarque que les valeurs des performances électriques de la cellule solaire à base de CZTSe sont moins encourageantes que les autres valeurs des caractéristiques électriques de la cellule qui nous étudie à base de CZTS. Le changement du gap c'est peut-être le raison radicale de ces résultats, c'est la réduction de la valeur gap qui identique de 1.11 eV. Le rendement optimal de CZTSe est de 22.16%.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les trois couches, CZTS, CdS et ZnO par la simulation de l'environnement l'AMPS-1D. A pour but de concevoir une structure optimale à ZnO/CdS/CZTS qui donne le meilleur rendement électrique. A cet effet, nous avons optimisé les différents paramètres qui sont l'épaisseur et le dopage de chaque couche en essayant de trouver les valeurs optimaux, qui donnent les meilleures caractéristiques électriques car les deux paramètres, ont un effet très significatif sur l'amélioration du rendement de conversion électrique. Puis, on a simulé et étudié l'effet de la température sur cette performance électrique de la cellule étudiée. Ensuite, après l'optimisation des paramètres d'entrée d'AMPS-1D, on a comparé les performances électriques de sortie (J-V) de CZTS et les autres de chalcogénures de CZTSe. D'après la caractéristique *J-V* de la cellule à base de CZTS, on peut dire que cette couche absorbante c'est un bon choix pour les cellules photovoltaïques en couches minces.

Références

- [1] Oussidhoum 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]. Disponible sur : <http://www.sciences.univ-nantes.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.

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 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS). Notre travail a été réalisé par la simulation numérique, effectuée à l'aide de l'AMPS-1D. Dans un premier lieu, nous avons présenté d'une manière générale le matériau de CZTS 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 CZTS. 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-CZTS. 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 extrairons de cette étude par simulation à sous éclaircissement ont données :

- L'augmentation de l'épaisseur de la couche ZnO de façon général 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 CZTS 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 CZTS.

Conclusion général

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 (300°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 (CZTS et CZTSe), le résultat de simulation montre que le $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ est possède meilleur rendement électrique que le $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$.

Résumé

Parmi les semi-conducteurs quaternaires les plus prometteurs pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques en couches minces on trouve le kesterite $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) composé avec des éléments abondants et non toxiques. En plus d'un gap direct, le CZTS 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 CZTS passant par l'optimisation des paramètres primordiales tels que l'épaisseur et le dopage des couches de structure typique de ZnO/CdS/CZTS, on évalue encore l'influence de la température sur les performances de la cellule solaire, cette étude est effectuée par le simulateur AMPS-1D.

Mots-clés : CZTS, Cellules photovoltaïques, Couches minces, AMPS-1D.

Abstract

Among the most promising quaternary semiconductors which belong in a third generation photovoltaic to improve the performances of thin film solar cells is the absorber $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) material composes of material made from abundant and nontoxic elements. These advantages in addition to a direct band gap make it an excellent candidate to alternate the other materials which are based on chalcogènes elements as CIGS and CdTe used in thin film solar cells. The aim behind this work is to study the behaviors of the electric characteristic of photovoltaic cells based on thin CZTS film by the improvement of primordial parameters such as thickness and doping of films forming the typical structure ZnO/CdS/CZTS. Furthermore, we evaluate the temperature influence on solar cell performances. This study is realized by simulation, with AMPS-1D simulator.

Keywords: CZTS, photovoltaic cells, thin film, AMPS-1D.

ملخص

من بين أكثر أشباه النواقل الرباعية الواعدة من اجل تحسين أداء الخلايا الكهروضوئية ذات الطبقات الرقيقة نجد الماص $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) هذه المادة تتكون من عناصر متوفرة وغير سامة بالإضافة إلى نطاقه المستقيم، مركب CZTS مع هذه المكاسب يمثل أفضل بديل لباقي المواد الأخرى والتي تعتمد أيضا على عناصر الكالوجينات مثل مادة CdTe و CIGS. الهدف من وراء هذا العمل هو دراسة سلوكيات الخصائص الكهربائية على أداء الخلايا التي أساسها CZTS من خلال تحسين الإعدادات المهمة مثل السمك و المنشطات للطبقات المشكلة للبنية ZnO/CdS/CZTS, مع دراسة تأثير درجة الحرارة للخلايا الشمسية باستعمال المحاكاة AMPS-1D.

الكلمات المفتاحية: CZTS، الخلايا الكهروضوئية، الطبقات الرقيقة، AMPS-1D.