



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DEL'ENSEUGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMEN**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique Energétique et Energie renouvelables

Par :

**Mme. BERREZOUG Sarra**

Sur le thème

---

## Titre

L'effet des couches de TCO et BSF sur les Paramètres  
Electriques de la Cellule Photovoltaïque  $\text{Cu In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$

---

Soutenu publiquement le 7 juillet 2021 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme BENABADJI Batoul	Docteur	Université de Tlemcen	Président
Mr FEROUANI Abdelmadjid	Docteur	A.M.C. Tipaza	Encadrant
Mme BOUTASTA Amel	Docteur	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mr SEKKAL Abdessamed	Docteur	E.S.S.A. Alger	Examineur
Mme RAHMOUN Khadidja	Professeur	Université de Tlemcen	Co-encadrant

*Année Universitaire : 2020 ~ 2021*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents pour le soutien, l'amour, la patience pour  
que dieu vous garde.*

*A mon mari Rahali Youssef qui a été toujours là pour moi*

*A ma chère fille Nada et mes chères sœur Assia, Dalel, Wissal.*

*A tout la famille Berrezoug et Rahali*

*Merci à tous.*

## Remerciement

*Je remercie Allah tout puissant pour m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Je tiens à remercier mon encadreur Mr FEROUANI Abdelmadjid(MCB), pour m'avoir proposé ce sujet, pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques et sa constante disponibilité. Il s'est toujours montré prêt à me prodiguer ses précieux conseils.*

*J'adresse mes vives reconnaissances à tous les membres du laboratoire URMER ou j'ai réalisé mes travaux,*

*Je remercie également les membres du jury Mme BENABADJI Batoul(Dr), Mme BOUTASTA Amel(Dr), Mr SEKKAL Abdessamed(Dr), Mme RAHMOUN Khadidja (Pr) ont bien voulu examiner le présent travail.*

*Mes remerciements vont également à monsieur DJEFAL Abdelkader (Dr) qui m'a aidé de réaliser les structures cristallines des matériaux.*

*Pour finir, je tiens à remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.*

# Sommaires :

Introduction générale :.....	1
Chapitre I :.....	2
I.1. Introduction :.....	3
I.2.Définition :.....	3
I.3.Les propriétés des TCOs : .....	4
I.3.1. La largeur de la bande interdite des TCOs : .....	4
I.3.2. Propriétés électriques des TCO : .....	4
a. La conductivité électrique $\sigma(\Omega.cm)^{-1}$ :.....	4
b. La résistance surfacique $R_s (\Omega)$ :.....	4
c. La mobilité $\mu$ : .....	5
I.3.3. Les propriétés optiques des TCOs: .....	5
a. Le facteur de transmission T :.....	5
b. Le facteur de réflexion R : .....	5
c. Le facteur d'absorption A : .....	5
d. Le coefficient d'absorption $\alpha$ :.....	6
I.3.4. Le dopage des oxydes transparents conducteurs (TCOs) :.....	6
a-Dopage n : .....	6
b-Dopage P : .....	6
I.3.5. Critères de choix des oxydes transparents conducteurs :.....	8
I.3.6 Applications des TCOs : .....	9
a. Capteurs à gaz :.....	9
b. Revêtements couches protectrices ou intelligentes : .....	10
c. Systèmes optoélectroniques : .....	10
d. Cellules solaires : .....	11
I.3.7. Les oxydes transparents conducteurs :.....	12
1. L'oxyde d'étain $SnO_2$ :.....	12
2. L'oxyde de zinc (ZnO) :.....	13
3. Le dioxyde de titane $TiO_2$ :.....	16
4. ZnMgo :.....	17
I.4 Conclusion : .....	18
Chapitre II : .....	21
II.1. Introduction :.....	22

II.2. Cellule solaire en couche mince à base de CIGS : .....	22
II.2.1. Histoire de la cellule solaire CIGS : .....	22
II.2.2. Matériau CIGS : .....	23
II.2.3. Structure de la cellule CIGS : .....	23
a. Substrat : .....	24
b. Le contact arrière : .....	24
c. Absorbeur : .....	25
d. Couche tampon : .....	25
e. Couche fenêtre : .....	25
f. Jonction p-n : .....	26
II.3. Présentation du logiciel : .....	27
II.3.1. Protocole de simulation : .....	27
II.3.2. Définir le problème : .....	28
II.3.3 Sélection des caractéristiques à simuler : .....	29
II.8. Conclusion : .....	29
Chapitre III : .....	32
III.1. Introduction : .....	33
III.2. Structure simulée : .....	33
III.3 Paramètres de la structure simulée : .....	34
III.4 : Etude la structure de référence Al-ZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS : .....	39
III.4.1. Influence de l'épaisseur de la couche Al-ZnO et i-ZnO : .....	41
III.4.2. Influence de dopage de la couche antireflet (ZnO) : .....	44
III.4.3. Influence de modèle d'absorption sur les paramètres de sortie : .....	46
III.4.4. Influence de la température sur les paramètres de sortie : .....	48
III.4.5. Influence de la couche BSF sur les paramètres de sortie : .....	49
III.5. La structure optimale : .....	50
III.5. Conclusion : .....	51
Conclusion générale .....	55

## Liste des tableaux :

<b>Tableau I- 1:</b> Largeur des bandes interdites de quelques TCO [3]. .....	4
<b>Tableau I. 2:</b> Facteurs de mérite Q pour quelques TCO [3].....	8
<b>Tableau I.3:</b> Propriétés des oxydes transparents conducteurs [8]. .....	9
<b>Tableau I. 4:</b> Quelques propriétés optiques de ZnO [3]. .....	15
<b>Tableau II.1:</b> Les caractéristiques structurales et optiques et le rendement de chaque couche mince [1]. .....	23
<b>Tableau III.1:</b> Paramètres des matériaux des cellules solaires utilisés dans la simulation. ....	35
<b>Tableau III.2:</b> les paramètres de sortie de la cellule obtenu par SCAPS Sans TCO « CdS/CIGS », avec la couche intrinsèque de ZnO « i-ZnO/CdS/CIGS » et avec la couche de ZnO dopé aluminium « Al-ZnO/CdS/CIGS ». .....	36
<b>Tableau III.3:</b> les paramètres de sortie de la cellule obtenu par SCAPS pour différentes TCOs ( Al-ZnO ,TiO2, MgZnO) avec $N_D=1 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ . .....	37
<b>Tableau III.4:</b> les paramètres de sortie de la cellule obtenu par SCAPS pour différentes TCOs (Al-ZnO, TiO2, MgZnO) avec ( $N_D=10^{20} \text{cm}^{-3}$ $N_D=10^{17} \text{cm}^{-3}$ $N_D=1 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ). .....	37
<b>Tableau III.5:</b> Comparaison de nos résultats avec les résultats donnés dans la littérature. ....	41
<b>Tableau III. 6:</b> Effet de l'épaisseur des des couches de Al-ZnO et de i-ZnO sur les paramètres électriques $J_{cc}$ ; $V_{co}$ ; FF ; Pmax ; Jmax ; $\eta$ . .....	42
<b>Tableau III.7:</b> Effet de dopage des couches de Al-ZnO et de i-ZnO sur les paramètres électriques $J_{cc}$ ; $V_{co}$ ; FF ; $\eta$ , Vmax, Imax, Pmax. ....	44
<b>Tableau III.8:</b> effet de la variation de coefficient d'absorption sur les paramètres électriques $J_{cc}$ ; $V_{co}$ ;FF; $\eta$ , Vmax, Imax, Pmax.....	46
<b>Tableau III.9:</b> effet de la température les paramètres électriques $J_{cc}$ ; $V_{co}$ ;FF ; $\eta$ , Vmax, Jmax. ....	48
<b>Tableau III.10:</b> Les paramètres électriques du BSF : SnS [15]. .....	49
<b>Tableau III.11:</b> les paramètres électriques de la cellule CIGS avec et sans la couche BSF (de type SnS). .....	50
<b>Tableau III.12:</b> Les paramètres optimums de la structure Al-ZnO /i-ZnO/CdS/SnS/CIGS en fonction du dopage et l'épaisseur de la couche fenêtre Al-ZnO et la couche intrinsèque i-ZnO. ....	51

## Liste des figures :

<b>Figure I.1:</b> Structure des bandes du : a) TCO non dopé et b) TCO dopé[3].	7
<b>Figure I. 2:</b> Exemple d'une structure de base d'une cellule OLED [10].	10
<b>Figure I.3:</b> Quelques applications des TCO [11].	11
<b>Figure I.4:</b> Représentation schématique de la structure SnO <sub>2</sub> (rutile).	12
<b>Figure I.5:</b> Spectre de transmission d'un film d'oxyde d'étain dope fluor [3].	13
<b>Figure I.6:</b> Représentation schématique de la structure ZnO (wurtzite)	14
<b>Figure. I.7:</b> Représentation schématique de la structure wurtzite de ZnO dopé par Al (Zn <sub>0.97</sub> Al <sub>0.03</sub> O).	16
<b>Figure I.8:</b> Représentation schématique de la structure rutile de TiO <sub>2</sub> .	17
<b>Figure I.9:</b> Représentation schématique de la supercellule (3 3 3) wurtzite de ZnO dopé par Mg (Zn <sub>0.97</sub> Mg <sub>0.03</sub> O)	18
<b>Figure II. 1:</b> Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. (a) schéma de l'empilement des différentes couches, (b) image MEB de la tranche d'une cellule [7].	24
<b>Figure II.2:</b> Structure de bande d'une cellule solaire Cu (In, Ga) Se <sub>2</sub> [20].	26
<b>Figure II.3:</b> Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.	28
<b>Figure II.4:</b> Définition de la structure d'une cellule solaire.	29
<b>Figure III-1 :</b> la structure de la cellule photovoltaïque TCO/i-ZnO/CdS/ CuIn <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> Se/BSF.	34
<b>Figure III.2:</b> Caractéristiques J-V sous AM1 des cellules Al-ZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS, MgZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS, TiO <sub>2</sub> /i-ZnO /CdS/ CIGS. (a) dans les même conditions du dopage N <sub>D</sub> = 1. 10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> (b) pour différents dopage : N <sub>D</sub> (Al-ZnO)= 1. 10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup> , N <sub>D</sub> (TiO <sub>2</sub> )= 1 .10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup> et : N <sub>D</sub> MgZnO)= 1. 10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> .	38
<b>Figure III.3:</b> (a)Caractéristiques J-V en obscurité et sous illumination avec une densité de puissance 100 MW/cm <sup>2</sup> (b) la réponse spectrale de la cellule Al-ZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS.	40
<b>Figure III.4:</b> Effet de l'épaisseur de la couche Al-ZnO/i-ZnO sur le courant de court -circuit $J_{cc}$ ; la tension en circuit ouvert $V_{co}$ ; le factor de forme FF; le rendement $\eta$ et la puissance maximum $P_{max}$ .	43
<b>Figure III.5:</b> Effet de dopage des couches de Al-ZnO et de i-ZnO sur les paramètres électriques $J_{cc}$ ; $V_{co}$ ; $\eta$ .	45
<b>Figure III.6:</b> effet de modèle d'absorption sur rendement et la puissance maximal.	47
<b>Figure III.7:</b> Effet de la température sur rendement et le facteur de forme.	48
<b>Figure III.8:</b> la caractéristique (J-V) de la cellule CIGS avec et sans couche BSF (de type SnS).	50

## Liste des abréviations :

**TCO** : Les oxydes transparents conducteurs.

**BSF** : Back surface field

**SCAPS** : Solar Cell Capacitance Simulator.

$\sigma$  : La conductivité électrique.

$\rho$  : La résistivité.

$R_s$  : La résistance surfacique.

$\mu$  : La mobilité.

$\tau$  : le temps de relaxation entre deux collisions.

$l$  : le libre parcours moyen.

$v_f$  : La vitesse de l'électron.

$m^*$  : masse effective des électrons.

$T$  : Le facteur de transmission.

$I_T$  : L'intensité de la lumière transmise.

$I_0$  : L'intensité de la lumière incidente à sa surface.

$R$  : Le facteur de réflexion.

$I_R$  : L'intensité de la lumière réfléchie au niveau de sa surface.

$I_0$  : L'intensité lumineuse incidente.

$A$  : Le facteur d'absorption.

$\alpha$  : Le coefficient d'absorption.

$T$  : le coefficient de transmission.

$R$  : le coefficient de réflexion.

$d$  : l'épaisseur du film considéré.

$Q_h$  : Facteur de mérite.



# **Introduction générale**

## Introduction générale :

Les cellules solaires en couche mince à base de CIGS ont une excellente stabilité et résistance aux rayonnements [1]. Ils ont un intérêt considérable pour les applications spatiales. Les cellules solaires en couche mince, telles que TCO/CdS/CIGS et TCO/CdS/CIGS/BSF, sont constituées de plusieurs couches de différents semi-conducteurs et métaux. Chaque matériau qui compose une cellule a certaines propriétés physiques et chimiques, et chaque couche affecte les performances de la cellule d'une manière ou d'une autre. Le CIGS est un semi-conducteur ayant un gap d'énergie approprié et un coefficient d'absorption optique élevé dans le domaine visible du spectre solaire. Les oxydes transparents conducteurs (TCO) sont des matériaux combinant la conductivité électrique (il s'agit de semi-conducteurs) et la transmittance dans le domaine visible. Ils sont utilisés en tant qu'électrodes transparentes dans ces dispositifs. Le BSF est obtenu par un gradient de gap, et en même temps, il est utilisé pour améliorer l'efficacité de collecte de porteurs minoritaires.

Améliorer les rendements des cellules solaires reste actuellement l'objectif majeur des recherches scientifiques. L'une des possibilités à atteindre cet objectif est d'étudier l'influence de TCO et la couche BSF sur le rendement d'une cellule solaire à base CIGS. Notre travail est rapporté dans ce mémoire selon trois chapitres.

-Dans le premier chapitre nous présentons une généralité sur les TCO. Une explication des propriétés optiques, électriques et cristallines des oxydes transparents TCOs et leurs applications dans les dispositifs optoélectroniques, a été présenté.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des matériaux CIGS et la cellule en couche mince à base de CIGS. Ensuite nous présentons le logiciel de simulation utilisé SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator).

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats de la simulation et leurs interprétations.

Finalement, dans la conclusion, les principaux résultats sont résumés et des suggestions sont présentées pour des recherches futures.

# **Chapitre I :**

## **Généralité sur les TCOs**

## I.1. Introduction :

Les oxydes conducteurs transparents TCOs caractérisés par leur haute conductivité électrique et leurs propriétés de transmission optique dans le domaine spectral visible. En général, ces deux caractéristiques sont liées à l'épaisseur de la couche déposée. Concernant les oxydes transparents conducteurs (OTC), la coexistence de la double propriété de conductivité électrique et transparence dans le domaine du visible dépend de la nature, le nombre, et arrangements atomiques de cations du métal dans les oxydes à structure cristalline ou amorphe, et la présence des défauts intrinsèques ou extrinsèques.

Les oxydes composés à partir de Cd, Ga, In, Sn et Zn forment une famille importante des TCO. Les TCOs utilisés constitués d'oxydes métalliques tels que l'oxyde d'indium ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ), l'oxyde de zinc ( $\text{ZnO}$ ), le dioxyde d'étain ( $\text{SnO}_2$ ), et leurs dérivés par exemple : l'oxyde d'indium dopé à l'étain ( $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  ou ITO), oxyde de zinc dopé à l'aluminium ( $\text{ZnO} : \text{AL}$ ) ou oxyde d'étain dopé au fluor ( $\text{SnO}_2 : \text{F}$  ou FTO), ces oxyde sont dopée de type n ou p qui est l'intérêt des études dans ces dernière année.

Dans ce chapitre nous présentons une étude bibliographique sur les oxydes transparents conducteurs ainsi que leurs propriétés essentielles (électriques, optiques et cristalline) et quelques applications.

## I.2. Définition :

Historiquement la première coexistence d'une conductivité électrique et d'une transparence optique dans le visible a été observée en 1957 sur des couches minces d'oxydes de cadmium  $\text{CdO}$  [2]. Cependant, les avancés dans le domaine des oxydes transparents et conducteurs ont seulement émergé dans les années 40. Le premier oxyde transparent conducteur qui a été breveté pour sa découverte à l'état non dopé et à l'état dopé est l'oxyde d'étain  $\text{SnO}_2$  [3], ceci, respectivement en 1931 et 1942. En 1971 M. Matsuoka a découvert l'oxyde de zinc  $\text{ZnO}$ . Durant les années 2000, les recherches sur les TCO se sont concentrées sur l'étude et la synthèse des oxydes transparents conducteurs binaires et ternaires tels que : l'oxyde de zinc étain ZTO, l'oxyde de cadmium indium  $\text{Cd-In-O}$  et l'oxyde d'indium étain gallium ( $\text{Ga-In-Sn-O}$ ).

Les oxydes transparents conducteurs (TCO pour Transparent Conducting Oxide) sont des semi-conducteurs dégénérés à large gap ils peuvent être de deux types : type n (conductions assurées par les électrons) et type p (conductions assurées par les trous), ils forment une classe

de matériaux combinant deux propriétés : la conduction électrique et la transmittance dans le domaine visible de la lumière.

Les TCOs les plus connus sont les oxydes d'indium, de cadmium, d'étain, de zinc et de gallium.

### I.3. Les propriétés des TCOs :

#### I.3.1. La largeur de la bande interdite des TCOs :

Les oxydes transparents conducteurs ont un large gap qui varie entre 3,01 et 4,6 eV et leurs bandes interdites varient selon la méthode utilisée pour leurs dépôts.

TCO	Le gap (ev)
SnO <sub>2</sub>	3.6-4.2
ZnO	3.2-3.3
ITO	4.2
ZTO	>3
TiO <sub>2</sub>	3-3.2

Tableau I- 1: Largeur des bandes interdites de quelques TCO [4].

#### I.3.2. Propriétés électriques des TCO :

Les propriétés électriques des oxydes transparents conducteurs sont décrites par celles des semi-conducteurs à large gap.

##### a. La conductivité électrique $\sigma(\Omega.cm)^{-1}$ :

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu = 1/\rho \quad (I.1)$$

L'inverse de la conductivité est la résistivité  $\rho$ .

##### b. La résistance surfacique $R_s(\Omega)$ :

Les oxydes transparents conducteurs sont définies par une grandeur important qui est la résistance surfacique  $R_s$  connue sous le nom de la résistance par carrée. Elle s'exprime par le rapport entre la résistivité  $\rho$  et l'épaisseur  $d$  de la couche d'oxyde.

$$R_s = \rho/d \quad (I.2)$$

**c. La mobilité  $\mu$  :**

La mobilité dépend essentiellement de la diffusion des porteurs de charge dans le réseau du matériau et influe sur la conductivité électrique, et l'augmentation de cette grandeur améliorera les propriétés électriques du TCO.

$$\mu = \frac{q \cdot \tau}{m^*} = \frac{q \cdot l}{m^* \cdot v_f} \quad (\text{I.3})$$

$\tau$  : le temps de relaxation entre deux collisions,

$l$  : Le libre parcours moyen,

$v_f$  : La vitesse de l'électron,

$m^*$  : Masse effective des électrons.

**I.3.3. Les propriétés optiques des TCOs:**

Les propriétés optiques des matériaux sont connus par trois phénomènes essentiels qui sont la transmission **T** (Transmittance ou facteur de transmission), la réflexion **R** (Réflectance ou facteur de réflexion) et l'absorption **A** (absorbance ou facteur d'absorption) et  $\alpha$  (coefficient d'absorption).

**a. Le facteur de transmission T :**

Cette grandeur optique est définie par : le rapport entre l'intensité de la lumière transmise  $I_T$  à travers un matériau par rapport à l'intensité de la lumière incidente à sa surface  $I_0$ :

$$T = I_T / I_0 \quad \text{Et} \quad T(\%) = 100 \cdot T \quad (\text{I.4})$$

**b. Le facteur de réflexion R :**

L'intensité de la lumière qui est réfléchi au niveau de sa surface  $I_R$  par rapport à l'intensité lumineuse incidente  $I_0$ .

$$R = I_R / I_0 \quad \text{Et} \quad R(\%) = 100 \cdot R \quad (\text{I.5})$$

**c. Le facteur d'absorption A :**

$$A = I_A / I_0 \quad \text{Et} \quad A(\%) = 100 \cdot A \quad (\text{I.6})$$

La conservation du flux donne la relation :

$$I_0 = I_A + I_R + I_t \quad (\text{I.7})$$

**d. Le coefficient d'absorption  $\alpha$ :**

La relation entre le flux transmis à la distance  $d$  et coefficient d'absorption illustré est définis par l'équation suivante :

$$T = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (\text{I.8})$$

$T$  : le coefficient de transmission,

$R$  : le coefficient de réflexion,

$d$  : l'épaisseur du film considéré,

$\alpha$ : Le coefficient d'absorption dépendant de la longueur d'onde. La relation entre ses deux paramètres est définie par :

$$\alpha = \frac{4\pi K}{\lambda} \quad (\text{I.9})$$

Avec  $k$  est le coefficient d'extinction.

**I.3.4. Le dopage des oxydes transparents conducteurs (TCOs) :**

Le dopage augmente le nombre de porteur de charge afin d'améliorer la conductivité des matériaux, il est de type n ou p, il peut être de substitution, de vacances ou d'implantations interstitielles. Dépendant de la valence des dopants ou des sites d'implantations, accepteurs ou donneurs il est influencé par la solubilité solide dans le réseau ainsi par la taille du dopant.

**a-Dopage n :**

Le dopage d'un TCO semi-conducteurs de type n peut se faire sur le cation (le métal) ou l'anion (l'oxygène), pour dopé de l'oxyde de zinc ZnO est possible d'utiliser de nombreux éléments tels que l'aluminium(Al) [5], le gallium (Ga) et l'indium(In) [6], quand a le SnO2 il est dopé par des éléments tels qu'Antimoine (Sb), ou des métaux de transitions Cu, Fe, Co et Ni [7].

**b-Dopage P :**

Le dopage de type p reste encore controversé. Ces dernières années ce type de dopage fait partie des études faites sur certains oxydes transparents conducteurs. Le TCO le plus étudié pour ce type de dopage est L'oxyde de zinc, Il est obtenu en remplaçant l'oxygène par l'azote d'aluminium (Al-N) et l'azote (N).

La figure (I.1) montre les structures de bandes paraboliques du TCO non dopé et de TCO dopé. Les parties grisées représentent les états occupés. Où «  $E_{g0}$  » la valeur du gap de matériau intrinsèque et  $E_g$  : la valeur du gap après dopage soit la valeur extrinsèque.

$$E_v^0(k) = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_v^*} \quad (I.10)$$

$$E_c^0(k) = E_{g0} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c^*} \quad (I.11)$$

Le changement du gap est dû au dopage .

L'augmentation du gap résultant de la concentration en porteur se traduit par l'équation :

$$E_g = E_{g0} + \Delta E_g \quad (I.12)$$

Avec :

$E_{g0}$ : Le gap original (correspond au matériau non dopé) ;

$\Delta E_g$ : Le décalage du gap (quantité positive) dû à l'effet Burstein-Moss [8].

La valeur  $\Delta E_g$  est donnée par la théorie de Burstein-Moss [8].

$$\Delta E_g = \frac{\hbar^2}{(2m_{vc}^*)(3n_e\pi^2)^{-2/3}} \quad (I.13)$$

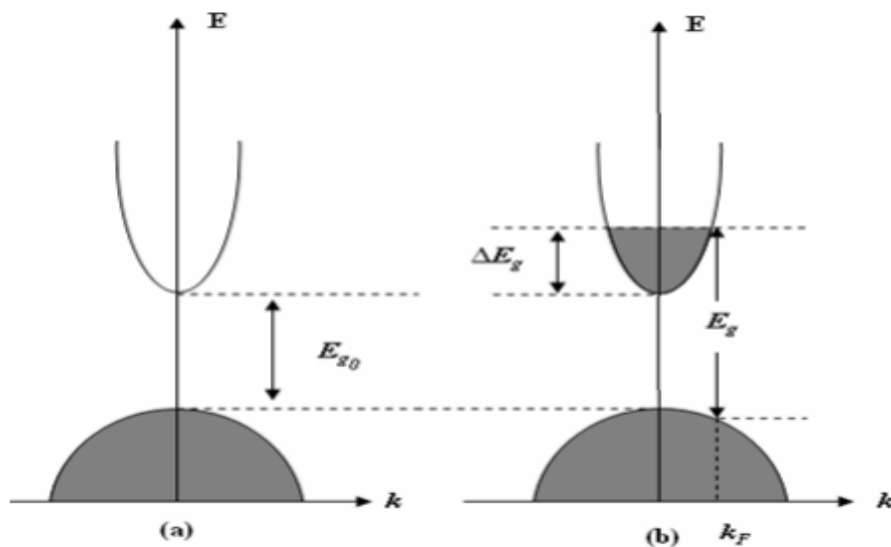


Figure I.1: Structure des bandes du : a) TCO non dopé et b) TCO dopé [3].



**I.3.5. Critères de choix des oxydes transparents conducteurs :**

La synthèse d'un TCO se résume en général à un compromis entre la transparence et la conductivité du film. En 1976 Haacke proposait, une évaluation quantitative de la qualité d'un TCO par le calcul d'un « facteur de mérite » tel que :

$$Q_h = T^{10} / R_s \tag{I.14}$$

Néanmoins, les variations d'épaisseur ne sont pas tenues en compte dans cette définition. Gordon a donc introduit un autre facteur de mérite défini par l'équation :

$$Q_h = \sigma / \alpha = - \{ ( R_s \text{ Ln}( T + R ) ) \}^{-1} = T. \sigma. d \tag{I.15}$$

$\sigma$  [ $\Omega^{-1}cm^{-1}$ ] : Conductivité électrique,

$\alpha$  [ $cm^{-1}$ ] : Coefficient d'absorption,

$R_s$  [ $\Omega$ ] : Résistance surfacique,

T [%] : transmission totale dans le visible,

R [%] : résistivité totale dans le visible,

d [cm] : épaisseur du film.

Les valeurs obtenues pour différents TCO par Gordon sont comprises entre 0 et  $7\Omega^{-1}$ .

Le tableau I.2 donne quelques facteurs de mérite pour des TCO obtenus par CVD, l'oxyde de zinc dopé au fluor (ZnO:F) et le  $Cd_2SnO_4$  ont les meilleurs facteurs de mérite.

Matériaux	Résistance carré	Absorbance dans le visible $\alpha$	Facteur de mérite : Q ( $\Omega^{-1}$ )
ZnO : F	5	0.03	7
$Cd_2SnO_4$	7.2	0.02	7
ZnO : Al	3.8	0.05	5
$IN_2O_3$ : SN	6	0.04	4
$SnO_2$ : F	8	0.04	3
ZnO : Ga	3	0.12	3
ZnO :B	8	0.06	2
$SnO_2$ : Sb	20	0.12	0.4
ZnO : In	20	0.2	0.2

**Tableau I. 2:** Facteurs de mérite Q pour quelques TCO [3].

Il y a d'autres critères qui influent sur le choix des matériaux et de sa méthode de dépôt.

Le choix d'un TCO ne dépend pas uniquement du facteur de mérite. D'autres paramètres liés au matériau, à sa toxicité, à ses performances de gravure et à son coût de production doivent être pris en compte. Dans le domaine des couches minces, la fréquence du plasma, l'uniformité du dépôt et sa rugosité de surface, la stabilité thermique, chimique et mécanique, l'adhérence au substrat sont également importants.

Le tableau (I.3) présente les propriétés physiques des différents TCO :

Propriétés	Matériaux
Haute transparence	ZnO : F ; Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub>
Haute conductivité	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : Sn
Faible fréquence du plasma	SnO <sub>2</sub> : F ; ZnO : F
Haute fréquence du plasma	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : Sn
Travail de sortie important, bon contact avec p-Si	SnO <sub>2</sub> : F ; Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub>
Travail de sortie, bon contact avec n-Si	ZnO : F
Très bonne stabilité thermique	SnO <sub>2</sub> : F ; Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub>
Très bonne stabilité mécanique	SnO <sub>2</sub> : F
Très bonne dureté chimique	ZnO : F
Très bonne résistance au plasma d'hydrogène	ZnO : F
Faible température de déposition	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Sn ; ZnO :B :AG
Faible toxicité	ZnO : F ; SnO <sub>2</sub> : F
Faible cout	SnO <sub>2</sub> : F

**Tableau I.3:**Propriétés des oxydes transparents conducteurs [9].

### I.3.6 Applications des TCOs :

Les caractéristiques du TCO présentées ci-dessus permettent d'envisager de les utiliser dans de nombreuses applications. Dans cette partie, nous présenterons les principales utilisations de ces matériaux.

#### a. Capteurs à gaz :

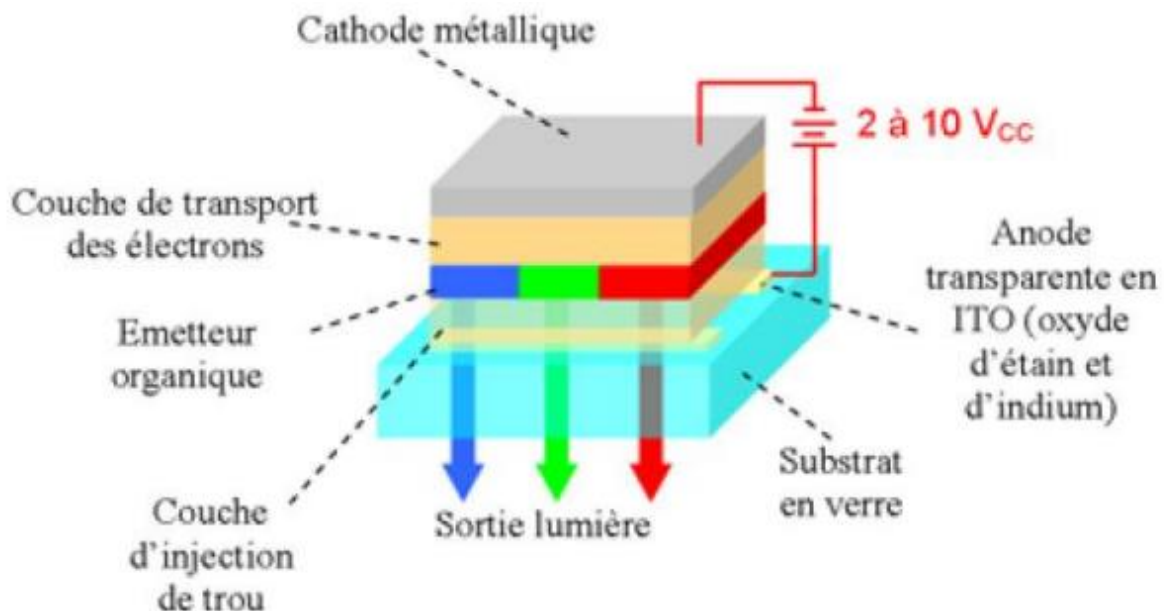
Les propriétés électriques des TCO peuvent changer en présence de certains gaz. Le gaz considéré est absorbé à la surface de la couche mince. Les molécules absorbées peuvent capturer des électrons libres. Par conséquent, cela conduit à une diminution de la conductivité électrique.

**b. Revêtements couches protectrices ou intelligentes :**

Le TCO est également utilisé comme revêtement de surface. L'application la plus simple consiste à appliquer directement l'une de ses caractéristiques. En fait, le TCO reflète le proche infrarouge et l'infrarouge lointain. Cette réflexion peut être utilisée pour créer une couche qui laisse passer la lumière visible mais réfléchit l'infrarouge. Ces matériaux peuvent être utilisés pour fabriquer des miroirs chauffants (Hot Mirror Film (HMF)) et d'autres équipements [8].

**c. Systèmes optoélectroniques :**

Les oxydes conducteurs transparents sont couramment utilisés comme électrodes pour les diodes électroluminescentes organiques (OLED) (figure I-2). Les cellules OLED utilisent en fait le principe des diodes électroluminescentes : lorsque le courant passe de l'anode (+) à la cathode (-), la diode électroluminescente émet de la lumière. Il se compose d'un empilement de fines couches organiques prises en sandwich entre une anode positive transparente et une cathode métallique négative. La diode est située sur un support transparent en plastique ou en verre appelé substrat, et l'épaisseur du composant est d'environ millimètres. D'autres études de photoluminescence ont été réalisées sur des nanoparticules d'oxyde d'indium déposées sur du silicium poreux [10].



**Figure I. 2:** Exemple d'une structure de base d'une cellule OLED [11].

**d. Cellules solaires :**

Le TCO dans la cellule solaire est utilisé comme électrode transparente. Ils doivent avoir une transmittance lumineuse élevée pour permettre Transmettre efficacement les photons à la couche active, et une bonne conductivité électrique, condition nécessaire pour minimiser la perte de transmission des photons Charge photo-générée. Ces deux caractéristiques sont liées à la concentration  $n_v$ : la transmittance est inversement proportionnelle et la conductivité est directement proportionnelle. Par exemple, des concentrations élevées augmenteront la conductivité, mais réduiront également la transmittance dans la gamme visible et proche infrarouge. Cela est dû à l'absorption et à la réflexion des charges gratuites. La valeur optimale de  $n_v$  dépend de l'efficacité quantique de la couche active.



**Figure I.3:** Quelques applications des TCO [12].

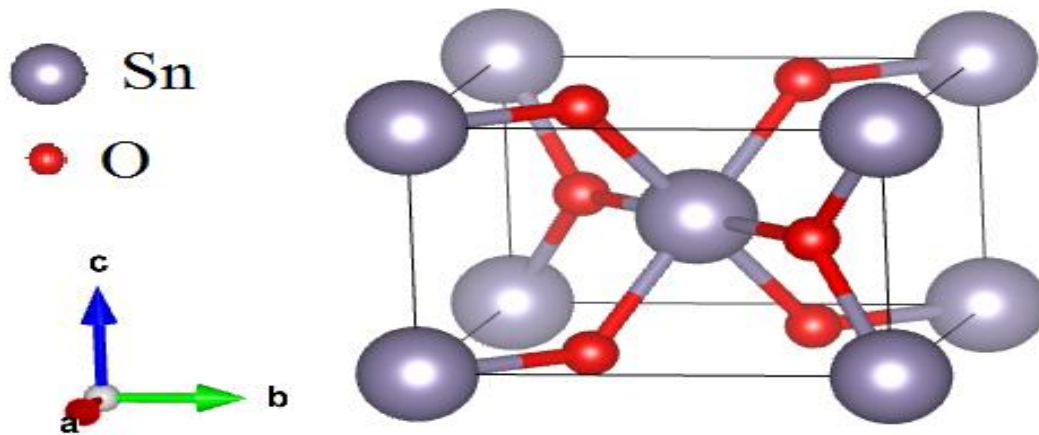
### I.3.7. Les oxydes transparents conducteurs :

#### 1. L'oxyde d'étain $\text{SnO}_2$ :

L'oxyde d'étain ( $\text{SnO}_2$ ) est un oxyde transparent conducteur de type n. Il a été le premier TCO à être commercialisé. Le  $\text{SnO}_2$  est un matériau chimiquement inerte et dur mécaniquement ; il résiste aux hautes températures et il est stable vis à vis de l'atmosphère.

##### a. Structure cristalline :

L'oxyde d'étain  $\text{SnO}_2$  cristallise dans le système tétragonale rutile figure I.4 représenté avec les paramètres suivants :  $a = b = 4.737 \text{ \AA}$  et  $c = 3.186 \text{ \AA}$ . La maille contient six atomes, quatre atomes d'oxygène et deux atomes d'étain. Dans ce système chaque atome d'oxygène est entouré de trois atomes d'étain et tout atome d'étain est entouré de six atomes d'oxygène.



**Figure I.4:** Représentation schématique de la structure  $\text{SnO}_2$  (rutile) (VESTA)

##### b. Gap du $\text{SnO}_2$ :

Le gap de l'oxyde d'étain en couches minces varie entre 3.6 et 4.2 eV. Le gap de l'oxyde d'étain est de type direct Les transitions des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction se font verticalement.

##### c. Propriétés électriques :

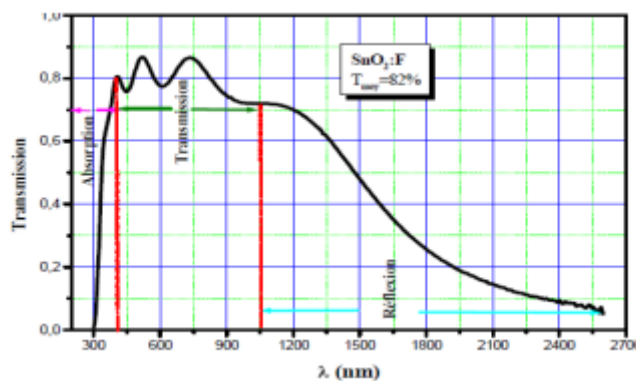
L'oxyde d'étain présente une concentration en électrons libres de l'ordre de  $10^{19}$  à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Celui-ci peut être dopé pour améliorer ses propriétés électriques. Le  $\text{SnO}_2$  est dopé principalement avec l'antimoine (Sb), le fluor (F), l'arsenic (As) et le niobium (Nb). Le fluor augmente la conductivité de l'oxyde d'étain et n'affecte pas sa transmission dans la gamme du visible. Ceci grâce aux grandeurs proches des tailles des atomes d'oxygène ( $r=0.132 \text{ nm}$ ) et du

fluor (0.133 nm) ainsi que des énergies de liaisons Sn-F (466.5 k.J. mol<sup>-1</sup>) et Sn-O (527.6 k.J.mol<sup>-1</sup>).

#### *d. Propriétés optiques :*

Les propriétés optiques de l'oxyde d'étain sont fortement liées aux propriétés électriques de l'oxyde [14] et peuvent être interprétées à partir du modèle de bande. L'interaction d'une radiation électromagnétique avec le matériau peut en effet conduire à des transitions électroniques d'états occupés vers des états vides.

La figure I.5 représente un spectre de transmission optique d'un film SnO<sub>2</sub> : F.



**Figure I.5:** Spectre de transmission d'un film d'oxyde d'étain dope fluor [4].

#### *e. Dopage de l'oxyde d'étain :*

Le dopage extrinsèque de l'oxyde d'étain a été effectué avec une vingtaine d'éléments [Zebda 2007]. Les plus étudiés pour l'obtention de TCO sont Sb, F et Cl.

Le dopage F est préféré pour la réalisation de TCO, puisque le SnO<sub>2</sub> : F combine à la fois une bonne conductivité et une bonne transparence. Il présente ainsi une meilleure figure de mérite que le SnO<sub>2</sub> : Sb qui présente une figure de mérite relativement faible qui vaut 0,4.

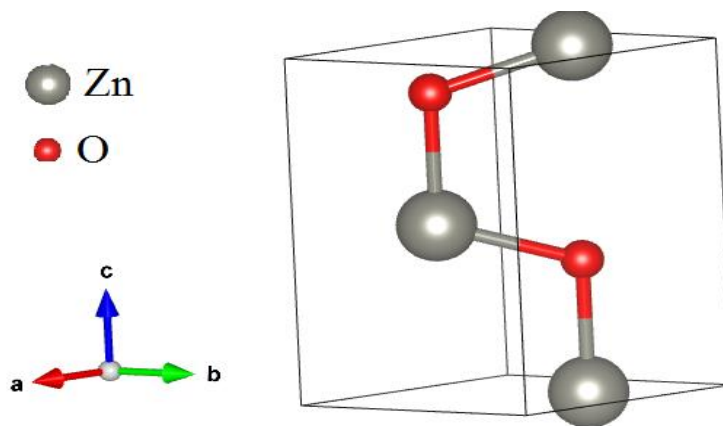
## **2. L'oxyde de zinc (ZnO) :**

Appartient à la famille des semi-conducteurs II-VI, l'oxyde de zinc (ZnO) présente une large bande interdite, conductivité variable. De plus, ses ingrédients sont non toxiques et très abondants sur terre. Les principales applications de l'oxyde de zinc se situent dans des différents domaines de l'industrie chimique et pharmaceutique. Actuellement, il peut également trouver des applications en optoélectronique, photoluminescence, électroluminescence, comme capteur de produit chimique dans les couches minces. Il possède aussi des propriétés

électromécaniques très intéressantes, ce qui lui permet d'être utilisée, à grande échelle, comme conducteur transparent dans les dispositifs acoustiques et dans les lignes à retard micro-ondes ou encore comme matériel piézoélectrique.

#### *a. La structure cristalline :*

L'oxyde de zinc est un oxyde transparent conducteur du groupe II-VI. Il cristallise sous différentes structures comme le sel gemme, le zinc blende et la Wurtzite (Figure I.6). Les films d'oxyde de zinc sont principalement connus sous la structure Wurtzite. Cette structure peut se définir comme un empilement hexagonal d'oxygène ( $a=3,250\text{Å}$ ,  $c=5,205\text{Å}$ ). Les tétraèdres sont liés entre eux par les atomes d'oxygène et leurs centres sont occupés par un cation  $\text{Zn}^{+2}$ . Les atomes d'oxygène et de zinc se trouvent respectivement dans les positions :  $\text{O}_2-(1/3 ; 2/3 ; z)$ ,  $(1/3 ; 2/3 ; 0)$  avec  $z=0,38$ .



**Figure I.6:** Représentation schématique de la structure ZnO (wurtzite) (VESTA)

#### *b. Gap de ZnO :*

La largeur de la bande interdite est de 3.37eV à la température ambiante avec une énergie d'excitation (60meV).

#### *c. Propriétés électriques de ZnO :*

Le ZnO est un semi-conducteur dégénéré, de conductivité de type n, due notamment à un excès de zinc en position interstitielle et/ou la déficience en oxygène. Les états donneurs se trouvent juste au-dessous ou à l'intérieur de la bande de conduction suivant la concentration des atomes donneurs.

En conséquence, le niveau de Fermi  $E_F$  est situé dans la bande de conduction tel que :

$$EF-EC \gg kBT$$

(I.16)

Où : EC est le minimum de la bande de conduction, kB la constante de Boltzmann et T la température ambiante.

#### *d. Propriétés optiques :*

L'oxyde de zinc ZnO est un matériau transparent, son indice de réfraction de sous la forme massive est égal à 2,0. En couches minces, son indice de réfraction et son coefficient d'absorption varient en fonction des conditions d'élaboration des couches. L'indice de réfraction a une valeur variant entre 1,7 et 2,2 suivant les auteurs. L'amélioration de la stœchiométrie du ZnO conduit à une diminution du coefficient d'absorption et à une augmentation de l'énergie de la bande interdite. L'oxyde de zinc dopé entre dans la classe des oxydes transparents conducteurs. Très peu dopé, il peut être utilisé en luminescence.

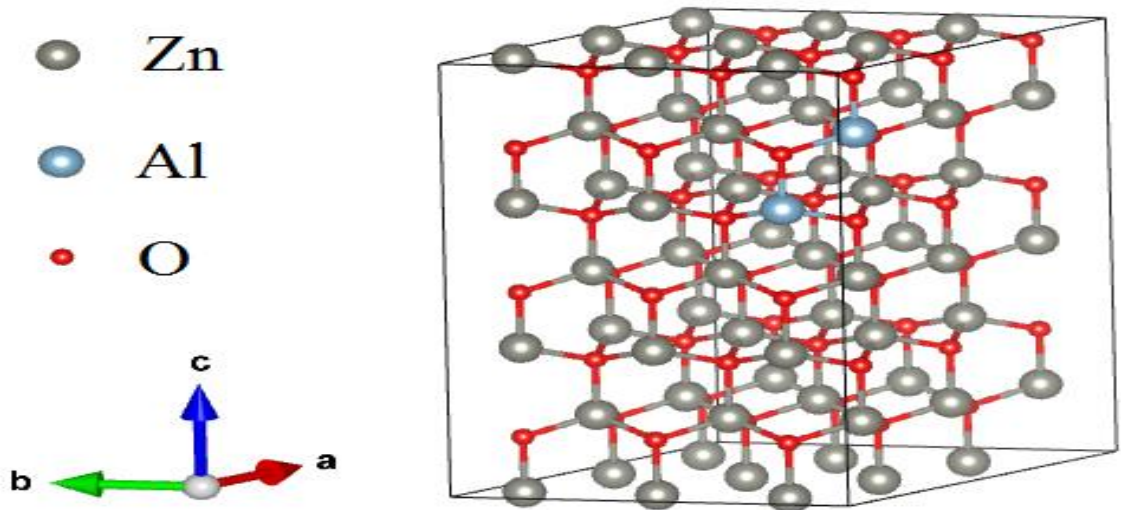
<b>Propriétés</b>	
<b>Coefficient d'absorption</b>	<b><math>10^4 \text{ cm}^{-1}</math></b>
<b>Indice de réfraction a 560 nm</b>	<b>1.8-1.9</b>
<b>Indice de réfraction a 590 nm</b>	<b>2.013-2.029</b>
<b>Largeur de la bande excitonique</b>	<b>60meV</b>
<b>Transmittance</b>	<b>&gt;90 %</b>
<b>Energie de gap</b>	<b>3.37 eV</b>

**Tableau I. 4:** Quelques propriétés optiques de ZnO[4].

#### *e. Le dopage de ZnO :*

Le dopage de l'oxyde de zinc est possible avec de nombreux éléments tels qu'Al, Ga, In, Sn. Les éléments du groupe III (Al, Ga et In) sont des éléments substitutionnels pour le Zn et les éléments du groupe VII (Cl et I) sont des éléments substitutionnels pour l'O.





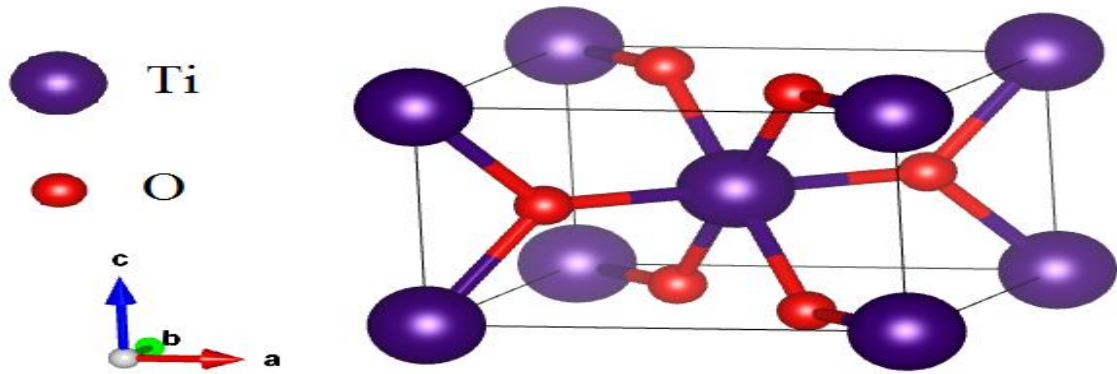
**Figure I.7:** Représentation schématique de la structure wurtzite de ZnO dopé par Al  
( $\text{Zn}_{0.97}\text{Al}_{0.03}\text{O}$ )(VESTA).

### 3. Le dioxyde de titane $\text{TiO}_2$ :

L'oxyde de titane se comporte comme un isolant, alors que quelques défauts suffisent pour le rendre semi-conducteur [13], Il est envisagé de l'utiliser dans le domaine de l'électronique transparente, en tant qu'oxyde transparent conducteur en raison de sa large bande interdite. Il existe sous différentes formes cristallographiques et possède des propriétés physico chimiques différentes. Il cristallise dans les structures : rutile, anatase et brookite.

#### *a. La phase Rutile :*

La phase rutile est tétragonale avec le groupe d'espace  $P4_2/m$  nm (No.136). Deux atomes de Ti en  $(0, 0, 0)$  et  $(1/2, 1/2, 1/2)$  et 4 atomes d'oxygène en  $(u, u, 0)$ ,  $(u, u, 0)$ ,  $(u+1/2, 1/2-u, 1/2)$  et  $(1/2-u, u+1/2, 1/2)$ . La figure I.8 présente la cellule conventionnelle de la structure rutile. Elle se décrit au moyen des deux paramètres de maille  $a$  et  $c$ , et d'un paramètre interne  $u$ .



**Figure I.8:** Représentation schématique de la structure rutile de TiO (VESTA).

*b. Gap du TiO<sub>2</sub> :*

L'oxyde de titane est un semi-conducteur de grand gap qui est de l'ordre de 3,2 eV.

*c. Propriétés électriques :*

Le dioxyde de titane peut être un bon isolant avec un constant diélectrique élevé, ou il peut être un conducteur transparent raisonnable. La plage de conductivité couverte par les échantillons générés s'étend de  $10^{-10} \text{S.m}^{-1}$  à  $10^3 \text{S.m}^{-1}$ .

*d. Les propriétés optiques :*

L'oxyde de titane est un semi-conducteur de grand gap, leur transmittance et indice de réfraction sont élevés dans le domaine du visible, une transmittance de 60 – 80 % [14], et un indice de réfraction de  $n = 2.5088$ .

*e. Dopage :*

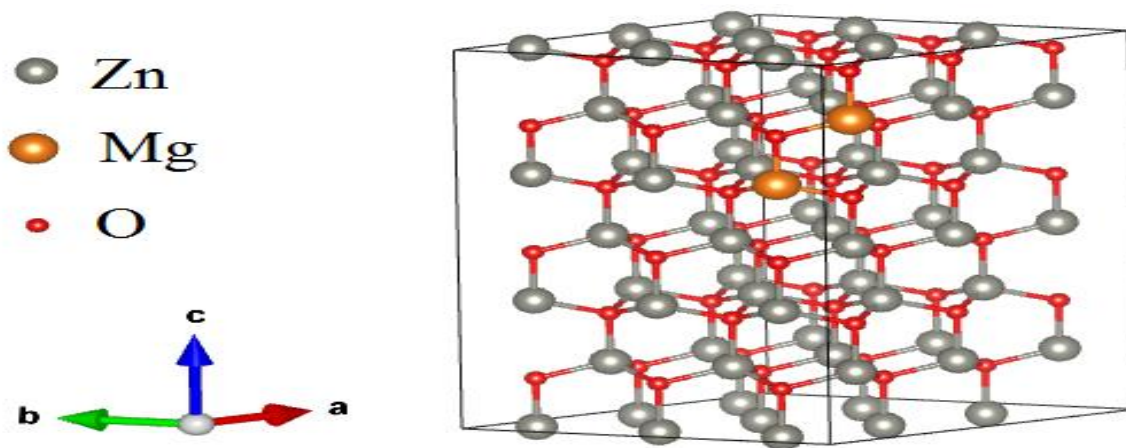
Le TiO<sub>2</sub> est un semi-conducteur de type n, De nombreux travaux ont été réalisés sur le dopage du TiO<sub>2</sub> avec de l'azote, du charbon actif (AC), du soufre, du phosphore ou certains halogénures (comme le fluor), dont le but global est d'améliorer l'efficacité photocatalytique du dioxyde de titane.

**4. ZnMgo :**

ZnO est un semi-conducteur qui a des caractéristiques spécifiques telles que la grande bande interdite qui nous permet de l'utiliser comme TCO.

Afin de réaliser les meilleures performances de ZnO il est nécessaire de dopé la bande interdite par l'introduction de magnésium (Mg) dans le ZnO pour obtenir de ZnMgO.

*a. La structure cristalline de ZnO dopé par Mg (structure wurtzite) :*



**Figure I.9:** Représentation schématique de la super cellule (3 3 3) wurtzite de ZnO dopé par Mg ( $\text{Zn}_{0.97}\text{Mg}_{0.03}\text{O}$ ) (VESTA).

*b. Le gap de ZnMgO :*

Le ZnMgO a une large bande interdite tel que le ZnO non dopée cette bande est de 3.99 eV.

*c. Propriété optique :*

Le ZnMgO a une transmittance d'environ 90% dans la région des longueurs d'onde visibles (400–800 nm), une de  $6,70 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  à  $2,14 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}$  et une mobilité de  $24,7 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$  à  $6,46 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ .

## I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait un rappel sur Les oxydes transparents conducteurs, tout d'abord on a cité leurs propriétés et applications ensuite nous avons présenté ces oxydes par la définition des propriétés optique, électriques, le dopage et leurs gaps aussi on a schématisé leurs structures cristallines.

## Référence:

- [1] Amar Hichem, Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSéléniure de Cuivre Indium Galium  $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  (CIGS), Université Mohamed Khider – Biskra.
- [2] K. Badeker, Electrical Conductivity and Thermo-Electromotive Force of Some Metallic Compounds, *Ann. Phys.* 22, (1907), 749.
- [3] O. Boussoum, « Etude de l'effet d'une couche mince de  $\text{TiO}_2$  sur les paramètres d'une cellule solaire au Silicium ». Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [4] BOUBRIK Nacer, Comparaison des effets antireflets du  $\text{SnO}_2$  et  $\text{ZnO}$  utilisés comme couches antireflet sur les propriétés de la cellule solaire à homo-jonction, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2013.
- [5] C.G. Fonstad, R.H. Rediker, Electrical properties of high-quality stannic oxide crystals. *Journal of Applied Physics*, 1971, 42(7), p. 2911-2918.
- [6] E. Savarimuthu, K.C. Lalithambika, A. Moses Ezhil Raj, L.C. Nehru, S. Ramamurthy, A. Thayumanavan, C. Sanjeeviraja, and M. Jayachandran, 2007, Synthesis and materials properties of transparent conducting  $\text{In}_2\text{O}_3$  films prepared by sol-gel-spin coating technique, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 68(7), p. 1380-1389.
- [7] G. Korotcenkov, S.D. Hana, (Cu, Fe, Co, or Ni)-doped tin dioxide films deposited by spray pyrolysis: Doping influence on thermal stability of the film structure, *Materials Chemistry and Physics*, 113, p. 756–763, 2009.
- [8] G. Jérôme, « Elaboration de couches minces d'oxyde transparents conducteurs par spray CVD assisté par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques ». Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris, 2009.
- [9] K. Laga, « Etude et réalisation du semi-conducteur Transparent  $\text{SnO}_2$  par APCVD. Application Photovoltaïque ». Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2003).
- [10] R. Azouani, 2009, Elaboration de nouveaux nanomatériaux photo catalytiques actifs sous rayonnement visible, Thèse de Doctorat, Université Paris 13.

[11] B. J. Baliga, Power Semiconductor Device Figure of Merit for High-Frequency Applications». Rev. IEEE Electron Device Letters, Vol.10, N 0 .10, 455-457, 1989.

[12] L. Remmache, Silicium poreux passivé par des nitrures et des oxydes de silicium. Application aux revêtements anti réfléchissants ». Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2011.

[13] M. adnane, thèse de doctorat d'état, université des sciences et de la technologie d'oran, 2006.

[14] FraouceneHenia, Effet de la température (traitement thermique) sur les propriétés optoélectroniques et structurales de TiO<sub>2</sub> nanotube, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

# **Chapitre II :**

## **Les cellules en CIGS**

## II.1. Introduction :

En raison de son abondance, l'énergie solaire devient l'une des principales sources d'énergie pour remplacer les combustibles fossiles. Les cellules solaires absorbent des photons à travers des matériaux semi-conducteurs pour convertir cette énergie solaire en énergie électrique. Les semi-conducteurs utilisés pour fabriquer ces cellules solaires font l'objet de nombreuses études, dans le but d'améliorer le rendement de conversion de ces dispositifs. Les principaux matériaux utilisés comme absorbants en couches minces sont le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) et le cuivre indium sélénium (CIS) et leurs variantes  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  (CIGS) selon l'étude.

Dans ce chapitre, nous débuterons par décrire les matériaux CIGS. Ensuite, nous décrivons la cellule solaire à base de ces matériaux tout en étudiant sa structure. A la fin nous présentons logiciel SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) qui est utilisé dans cette étude.

## II.2. Cellule solaire en couche mince à base de CIGS :

### II.2.1. Histoire de la cellule solaire CIGS :

L'émergence des cellules solaires, basées sur les matériaux à structures chalcopyrites, a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$  par S. Wagner et coll. de Bell Téléphone en 1974-1975 [1]. S. Wagner et coll. avaient rapporté la préparation d'hétérojonctions p-n  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$  à partir d'un monocristal  $\text{CuInSe}_2$ , dont la conductivité est de type p, sur lequel une couche mince de CdS de 5- 10 nm d'épaisseur avait été déposée. La réponse photovoltaïque de ces détecteurs pour une lumière incidente à travers la couche fenêtre CdS donnait lieu à de très hauts rendements quantiques (>70%) uniformes entre 0,55 et 1,25  $\mu\text{m}$ . Ces hétérojonctions avaient des rendements solaires de l'ordre de 5%. Les composés ternaires chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement :  $\text{CuGaSe}_2$ ,  $\text{CuInS}_2$ ,  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Al})\text{Se}_2$  et  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  sont présentés dans le Tableau II.1.

Matériau	a (nm)	c (nm)	Eg(eV)	Rendement(%)
CuGaSe <sub>2</sub>	0.560	1.099	1.67	8.3
CuInS <sub>2</sub>	0.551	1.106	1.53	11.4
Cu(InAl)Se <sub>2</sub>	0.575	1.145	1.16	16.9
CuInSe <sub>2</sub>	0.577	1.155	1.02	15.4
Cu(InGa)Se <sub>2</sub>	0.572	1.143	1.12	18.8

**Tableau II.1:** Les caractéristiques structurales et optiques et le rendement de chaque couche mince [1].

### II.2.2. Matériau CIGS :

Le CIGS est une solution solide de CuInSe<sub>2</sub> et CuGaSe<sub>2</sub> [1]. Cela rend sa bande interdite dépendante du rapport de concentration  $x = [\text{Ga}] / ([\text{In}] + [\text{Ga}])$ , qui détermine le taux d'atomes de gallium qui remplacent les atomes d'indium dans la structure. La variation du gap du CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> en fonction de  $x$ , entre les valeurs du CIS (1.02 eV) [3] et du CGS (1.67 eV) [4], suit la relation [5,6] :

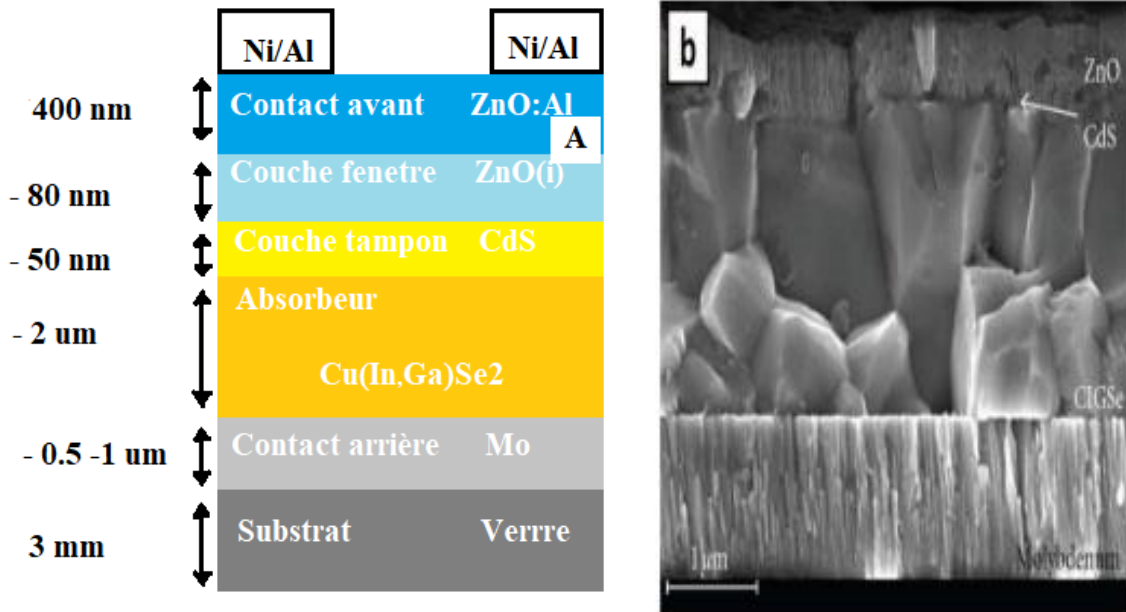
$$E_g(x) = 1.01 + 0.626x - 0.167x(1-x) \quad (\text{II.1})$$

Le CIGS est un matériau avec  $E_g$  compris entre 1,01 eV (CIS) et 1,67 eV (CGS), selon le taux en gallium. Dans le domaine des cellules CIGS, les résultats expérimentaux publiés montrent que le meilleur rendement peut être obtenu avec un gap d'environ 1,2 eV [7], ce qui correspond à un taux de Ga proche de 30 %.

### II.2.3. Structure de la cellule CIGS :

Une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. La structure standard d'une cellule à base de Cu(In, Ga)(Se)<sub>2</sub> est présenté dans la figure II.1 :





**Figure II. 1 :** Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. (a) schéma de l'empilement des différentes couches, (b) image MEB de la tranche d'une cellule [8].

### a. Substrat :

Le substrat le plus utilisé est le verre sodo-calcique, qui présente toutes les propriétés requises. Il contient notamment du sodium, qui diffuse vers le CIGS lors de l'étape de recuit. Son effet bénéfique sur le fonctionnement de la cellule a été démontré par de nombreux auteurs [9].

### b. Le contact arrière :

Constitue l'électrode positive du générateur photovoltaïque est le métal déposé dans la partie inférieure de l'absorbeur, et sa fonction est de collecter les porteurs de l'absorbeur et de les transporter vers une charge externe. Par conséquent, il doit répondre à certaines normes chimiques, mécaniques et économiques. De nombreux métaux ont été étudiés comme le Tungstène, le Molybdène, le Chrome, le Tantale, le Manganèse [10], l'Or, l'Aluminium, l'Argent et le cuivre [11]. Parmi ces métaux, le Molybdène qui est le plus utilisé comme contact arrière des cellules solaires CIGS par les laboratoires de recherche et en industrie, a cause de sa stabilité relative aux températures élevées rencontrées lors du procédé de fabrication du CIGS (de l'ordre de 550 à 600°C), et de sa faible résistance de contact avec le CIGS. Son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt utilisée est la pulvérisation cathodique. La valeur typique de la résistivité de Mo est de l'ordre  $5 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$  ou moins. De plus, il ne réagit pas avec le CIGS ou y diffuse.

### c. Absorbeur :

L'absorbeur est la partie de la cellule où les photons seront convertis en paires électron-trou. Dans la situation actuelle, il s'agit d'un semi-conducteur de type P de la famille I-III-VI, et ses différentes variantes ont été étudiées pour former la formule générale suivante : (Cu, Ag) (In, Ga, Al) (Se, S, Te) <sup>2</sup>. Le remplacement de l'argent par le cuivre, le gallium ou l'aluminium par l'indium et par le soufre ou le tellure par le sélénium peut modifier les caractéristiques du matériau, telles que sa bande interdite. Le composé le plus développé dans la recherche et l'industrie, qui fait également l'objet de nos recherches, est Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>.

### d. Couche tampon :

La couche tampon est un semi-conducteur à conductivité de type n, son gap doit être plus grand que celui de l'absorbeur. Deux rôles lui sont majoritairement attribués : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice. D'un point de vue électrique, cette couche s'adapte à la largeur de bande interdite entre l'absorbeur et la couche fenêtre [12]. Plusieurs semi-conducteurs de type n dont les bandes interdites sont entre 2,0 et 3,6 eV ont été appliquées comme tampon pour les cellules solaires CIGS. Cependant, le CdS déposé par bain chimique (CBD) reste le préféré car il peut toujours fournir des rendements élevés [13, 14, 15].

### e. Couche fenêtre :

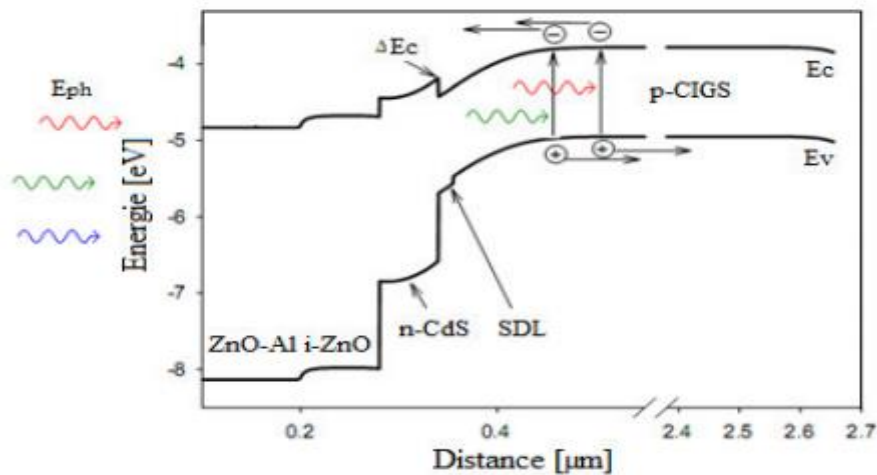
La couche fenêtre doit être transparente afin de laisser suffisamment de lumière au niveau de la zone de jonction et de la couche absorbante du dispositif, et doit être conductrice pour permettre au photo-courant généré d'être transmis au circuit externe sans provoquer trop de pertes. La couche fenêtre est composée d'un oxyde conducteur transparent (TCO) sur lequel est déposée une fine grille métallique (Ni-Al).

La double couche de ZnO est généralement utilisée pour le contact frontal transparent. La première couche est une couche mince de ZnO intrinsèque (i-ZnO), qui est généralement épaisse (50-100 nm) et a une résistance électrique élevée. Il est utilisé pour limiter la formation de court-circuit dans les zones où le CIGS est imparfaitement recouvert par la couche tampon [16]. La deuxième couche est généralement dopée au ZnO avec de l'aluminium (ZnO : Al), mais d'autres dopants tels que le bore (ZnO : B) [17] ou le gallium (ZnO : Ga) [18] sont également présents. L'épaisseur et le dopage de cette couche sont ajustés pour combiner transparence et conductivité. La bande interdite de la couche de fenêtre doit être aussi élevée et

mince que possible pour maintenir la résistance série faible. ZnO et ZnO : Al ont des bandes d'énergie d'environ 3,2 eV et 3,6 à 3,8 eV, respectivement.

### f. Jonction p-n :

La jonction p-n dans les cellules solaires CIGS est formée entre un semi-conducteur de type p (CIGS) et un type n (CdS). Le diagramme de bande d'énergie de cette cellule est illustré à la figure (II.2). La différence d'affinité électronique des deux matériaux qui composent la jonction fait que la bande interdite est discontinue. La courbure de la bande de conduction ou  $\Delta E_c$  (Conduction Band Offset) entre CIGS et CdS est généralement positive, ce qui signifie que la bande de conduction de CdS est plus grande que celle de CIGS.



**Figure II.2:** Structure de bande d'une cellule solaire Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> [19].

Pour un gap de CIGS = 1,15 eV, la meilleure valeur pour la courbure de la bande de conduction est  $\Delta E_c = 0,3$  eV. La courbure de la bande de conduction supérieure à 0,5 eV crée une barrière de potentiel forte pour les électrons photo-générés, limitant ainsi la transmission du courant. En revanche, la courbure de la bande de conduction nulle ou négative provoque une augmentation de la recombinaison à l'interface, limitant ainsi la tension de la batterie. Plusieurs auteurs ont rapporté la présence d'une couche inversée (de type n) à la surface des matériaux CIGS qui est identifiée comme une couche de défaut de surface ou SDL (couche de défaut de surface) [18]. Il a un écart plus important que le CIGS, ce qui réduit la recombinaison à l'interface CdS/CIGS, contribuant ainsi à améliorer les performances de la batterie [20].

### II.3. Présentation du logiciel :

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degrave [21].

Ce logiciel permet de simuler les cellules de la famille  $\text{CuInSe}_2$  et  $\text{CdTe}$ . Il occupe 50 MB d'espace sur le disque et fonctionne sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8.

#### II.3.1. Protocole de simulation :

Le protocole de simulation d'une cellule solaire par logiciel SCAPS est comme suit :

- Etape 1 : après le lancement du logiciel et l'ouverture de la fenêtre d'exécution on modifie les paramètres : la température, la résistance série et parallèle et les paramètres d'illumination.
- Etape 2 : modifier la structure de la cellule à travers la fenêtre « définition panel ».
- Etape 3 : exécuter la simulation « calculate », noter les résultats de simulation ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF) dans la fenêtre « I-V panel », la caractéristique I-V ... On peut afficher et copier ces résultats sous forme de tableau en appuyant « show ».

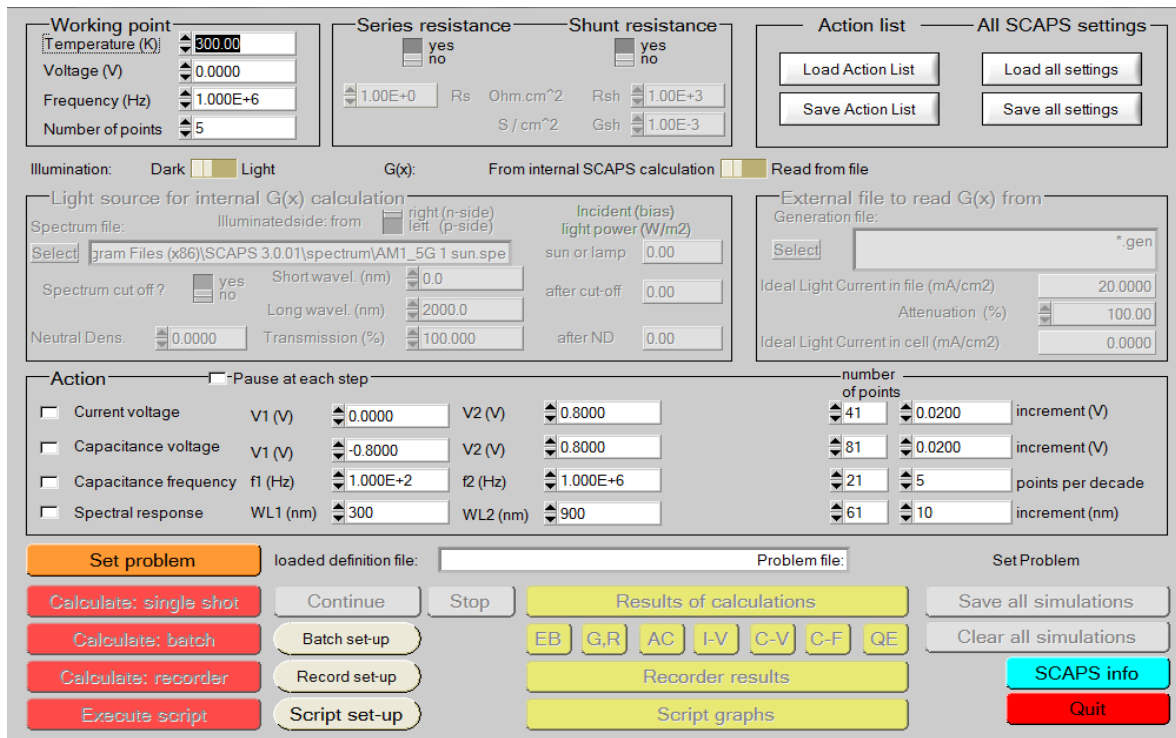


Figure II.3: Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d’action ou principal.

### II.3.2. Définir le problème :

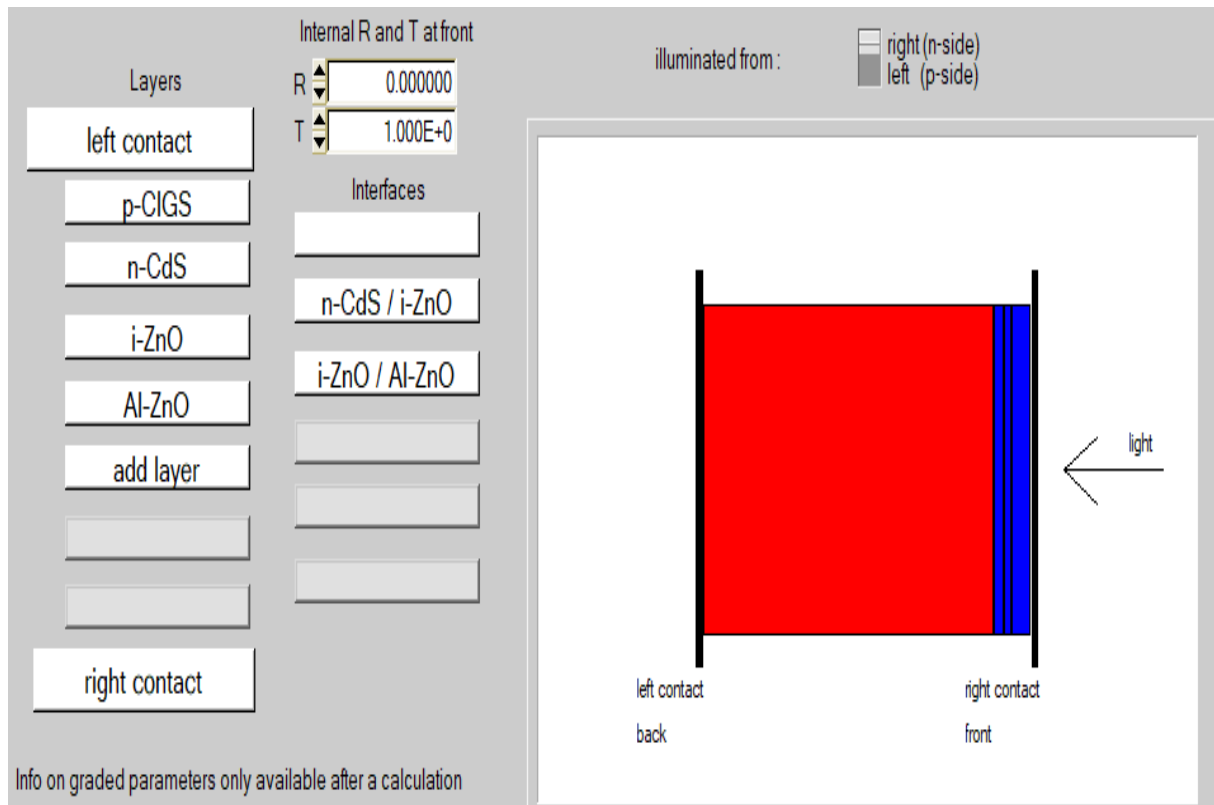
On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d’action pour modifier toutes les propriétés de la cellule Grâce à cette bouton on peut définir le dispositif photovoltaïque via deux méthodes :

New :

→ On peut créer de nouveaux dispositifs photovoltaïques à travers des champs spécifiques, à savoir :

- Add layer : (ajouter une couche) une fenêtre affiche l’orsque l’utilisateur clique sur ce bouton. Elle contient plusieurs paramètres comme énergie de gap, permittivité électrique, l’affinité, dopage, type de dopage .il faut noter que l’utilisateur peut utiliser directement des valeurs standards dans les fichiers data de logiciel.
- Right and left contact : modifier les paramètres optiques et électriques des surfaces extérieures droite et gauche de la cellule.
- Numerical setting : modifier les paramètres numériques de l’affichage des graphes, message d’erreurs et de la convergence.

Le code SCAPS contient des fichiers data d’extension.def qui contiennent une conception et définition de dispositif photovoltaïque standard comme CdTe .la conception est modifiable grâce à des champs spécifiques : add layer ...



**Figure II.4:** Définition de la structure d'une cellule solaire.

Les points de fonctionnement sont relatifs à l'opération de mesure et qui ne varient pas dans la simulation ces points sont la température  $T$ , le voltage  $V$  de la polarisation, la fréquence  $f$  et l'illumination (l'obscurité ou la lumière).

### II.3.3 Sélection des caractéristiques à simuler :

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

## II.8. Conclusion :

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les bases fondamentales à la compréhension de la cellule solaire, nous avons rappelé leur structure, principe de fonctionnement, et les paramètres caractérisant ce dispositif. Nous avons également, décrit les cellules à base CIGS utilisées dans ce travail ainsi que les propriétés des différentes couches constituant cette cellule et nous avons terminé par la présentation de logiciel utilisé dans cette étude.

**Reference:**

- [1] A. Luque, Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)-2012
- [2] D. Xia, J.Z. Li, M. Xu and X. Zhao, « Electrodeposited and selenized CIGS thin films for solar cells », Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 354, 2008, pp. 1447.
- [3] L. Ribeaucourt, G. Savidand, D. Lincot and E. Chassaing. « Electrochemical study of one step electrodeposition of copper-indium-gallium alloys in acidic conditions as precursor layers for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells », Electrochimica Acta. Vol. 56, 2011, pp. 6628.
- [4] C. Honsberg and S. Bowden, « Photovoltaics: Devices, Systems and Applications » Sydney, University of New South Wales, Australia, 1998.
- [5] I. L. Repins, S. Glynn, J. Duenow, T.J. Coutts, W. K. Metzger. And M. A. Contreras, « Required material properties for high-efficiency CIGS modules », Proc. SPIE 7409, Thin Film Solar Technology, 2009.
- [6] A. Luque and S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 1st ed. NJ: Wiley, pp. 574, 2003.
- [7] S. Jung, S. Ahn, J. Ho Yun, J. Gwak, D. Kim and K. Yoon, « Effects of Ga contents on properties of CIGS thin films and solar cells fabricated by co-evaporation technique », Current Applied Physics, Vol.10, 2010, pp. 990.
- [8] W. Shockley, « Electrons and Holes in Semiconductors », D. Van Nostrand Co., Princeton, NJ, 1956, pp. 254.
- [9] F. Kessler, D. Herrmann and M. Powalla, « Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells », Thin Solid Films, Vol. 480-481, 2005, pp. 491.
- [10] K. Orgassa, H. W. Schock and J. H. Werner, « Alternative back contact materials for thin film Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells », Thin Solid Films, Vol. 431-432, 2003, pp. 387.
- [10] R. J. Matson, O. Jamjoum, A. D. Buonaquisti, P. E. Russell, L. L. Kazmerski, P. Sheldon and R. K. Ahrenkiel, « Metal contacts to CuInSe<sub>2</sub> », Solar cells, Vol. 11, 1984, pp. 301.
- [11] M. Buffiere, « Synthèse et caractérisation de couches minces de Zn(O,S) pour application au sein des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> », Thèse de doctorat, université de Nantes, 2011.
- [12] P. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann and M. Powalla, « New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells beyond 20% », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 19, 2011, pp 894.

- [14] I. Repins, M. A. Contreras, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, C. L. Perkins, B. To and R. Noufi, « 19.9%-efficient ZnO/CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> SolarCell with 81.2% Fill Factor », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 16, 2008, pp. 235.
- [15] E. Wallin, U. Malm, T. Jarmar, O. Lundberg, M. Edoff and L. Stolt, « World-record Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-based thin-film sub-module with 17.4% efficiency », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 20, 2012, pp. 851. .
- [16] Y. Hagiwara, T. Nakada and A. Kunioka, « Improved J<sub>sc</sub> in CIGS thin film solar cells using a transparent conducting ZnO:Bi window layer », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 67, 2001, pp. 267.
- [17] B. Sang, K. Kushiya, D. Okumura and O. Yamase, « Performance improvement of CIGS based modules by depositing high-quality Ga-doped ZnO windows with magnetron sputtering », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 67, 2001, pp. 237.
- [18] D. Schmid, M. Ruckh, F. Grunwald and H. W. Schock, « Chalcopyrite/defect chalcopyrite heterojunctions on the basis of CuInSe<sub>2</sub> », Journal of Applied Physics, Vol. 73, 1993, pp. 2902.
- [19] Naïma TOUAFEK, Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub>, Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2015.
- [21] Y. Yan, K. M. Jones, J. Abushama, M. Young, S. Asher, M.M. Al-Jassim and R. Noufi, « Microstructure of surface layers in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin films », Applied Physics Letters, Vol. 81, 2002, pp. 1008.
- [21] A. Niemegeers, M. Burgelman, Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells, Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference Washington DC, 1996, pp. 901-904. M. Burgelman, P. Nollet, S. Degraeve, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.



**Chapitre III :**  
**Intégration des TCOs**  
**dans la Cellule**  
**Photovoltaïque**  
 **$\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$**

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une étude comparative entre différents types des couches TCO tel que  $\text{ZnO}_{1-x}\text{Al}_x$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgZnO}$ . L'influence des paramètres physiques et technologiques de TCO et couche BSF ( $\text{SnS}$ ) sur les performances de la cellule photovoltaïque en couche mince à base de TCO/i-ZnO/CdS/  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$  a été étudié. Dans cette étude on a utilisé le simulateur numérique SCAPS unidimensionnel développé par ELIS, à l'université de Gent en Belgique [1]. Nous allons tout d'abord définir la cellule solaire de référence avec un ensemble des paramètres fixés sont présentés dans le tableau (III.1), puis nous varions les paramètres géométriques ( l'épaisseur ) et physiques ( Dopage , modèle d'absorption , et température) après on a additionné une couche BSF( $\text{SnS}$ ) afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire qui sont la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ , la densité du courant de court-circuit  $J_{cc}$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$ .

### III.2. Structure simulée :

La figure III-1 représente la structure de la cellule photovoltaïque TCO/i-ZnO/CdS/  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$ /BSF étudiée. Le dépôt des couches de la cellule se fait comme suit premièrement nous avons déposé le  $\text{SnS}$  comme couche BSF afin d'améliorer l'efficacité de collecte de porteurs minoritaires ensuite la couche absorbeur  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$  où les photons seront convertis en paires électron-trou après la couche de CdS cette couche s'adapte à la largeur de bande interdite entre l'absorbeur et la couche fenêtre [2], et limite la recombinaison des porteurs à l'interface des deux couches. Elle peut également protéger la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de ZnO, qui peut engendrer des défauts à la surface du CIGS [3] finalement la couche fenêtre La couche fenêtre doit être transparente afin de laisser suffisamment de lumière au niveau de la zone de jonction et de la couche absorbante du dispositif, et doit être conductrice pour permettre au photo-courant généré d'être transmis au circuit externe sans provoquer trop de pertes nous avons utilisé double couche de ZnO le ZnO intrinsèque (i-ZnO) et ZnO dopé Al (ZnO: Al). La première couche il est utilisé pour limiter la formation de court-circuit dans les zones où le CIGS est imparfaitement recouvert par la couche tampon [4]. La deuxième couche est généralement dopée au ZnO avec de l'aluminium (ZnO : Al), le dopage de cette couche est ajusté pour combiner transparence et conductivité.

Nous avons simulé ses paramètres électriques, optiques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant un rendement électrique maximal.



**Figure III-1** : La structure de la cellule photovoltaïque TCO/i-ZnO/CdS/  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$ /BSF.

### III.3 Paramètres de la structure simulée :

Pour simuler le fonctionnement de la structure de type TCO/ CdS/CIGS, il faut préciser les paramètres d'entrée de cette structure tel que les épaisseurs, le dopage des deux régions p et n, l'énergie de gap, les densités effectives des électrons et des trous, la température ambiante (300 K), les mobilités des électrons et des trous, les vitesses thermiques des électrons et des trous, ainsi que les conditions aux limites et le spectre du soleil. Le spectre solaire utilisé pour l'éclairement est l'AM1.5G ( $100\text{Mw}/\text{cm}^2$ , 300K). Les propriétés optiques des semi-conducteurs sont prises en compte en introduisant un fichier texte data dans SCAPS. Les paramètres utilisés pour simuler la cellule à TCO/ CdS/CIGS, sont présentés dans le tableau III.1. Les contacts métalliques sont pris sur deux faces de la cellule. Nous savons que les contacts peuvent être à l'origine de pertes résistives. On considère que les contacts sont parfaits : conditions de bandes plates, pas de résistances de contacts, les deux surfaces sont entièrement couvertes par le métal. Le choix des paramètres sont reportés de la littérature [5, 6].

	<b>i-ZnO</b>	<b>Al-ZnO</b>	<b>CdS</b>	<b>CIGS</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>ZnMgO</b>
<b>Epaisseur (µm)</b>	0.08	0.2	0.5	3	0.2	0.08
<b>L'énergie de gap (ev)</b>	3.3	3.37	2.4	1.15	3.2	3.49
<b>Mobilité des trous (cm<sup>2</sup>/VS)</b>	25	25	25	25	25	25
<b>Mobilité des électrons (cm<sup>2</sup>/VS)</b>	100	150	100	100	100	100
<b>La densité des accepteurs N<sub>A</sub> (cm<sup>-3</sup>)</b>	0	0	0	2.10 <sup>16</sup>	0	0
<b>La densité des donneurs N<sub>D</sub> (cm<sup>-3</sup>)</b>	1.10 <sup>18</sup>	1.10 <sup>20</sup>	1.10 <sup>18</sup>	0	1.10 <sup>17</sup>	1.10 <sup>18</sup>
<b>Densité effective des états dans la bande de conduction N<sub>C</sub> (cm<sup>-3</sup>)</b>	2.2.10 <sup>15</sup>	1.10 <sup>21</sup>	2.2.10 <sup>18</sup>	2.2.10 <sup>15</sup>	2.2.10 <sup>18</sup>	2.2.10 <sup>18</sup>
<b>Densité effective des états dans la bande de valence N<sub>V</sub> (cm<sup>-3</sup>)</b>	1.8.10 <sup>18</sup>	1.10 <sup>20</sup>	1.8.10 <sup>19</sup>	1.8.10 <sup>19</sup>	1.8.10 <sup>19</sup>	1.8.10 <sup>19</sup>

**Tableau III.1:** Paramètres des matériaux des cellules solaires utilisés dans la simulation.

Pour les alliages Cu ( $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x$ ) Se, l'expression approximative utilisée est : [7]

$$E(x) = 1.010 + 0.626x - 0.167x(1-x) \quad \text{(III.1)}$$

La fraction molaire  $x = \text{Ga} / (\text{Ga} + \text{In})$  modifie la largeur de la bande interdite (gap).

Notant que la valeur optimale de l'énergie du gap est ~1.15 eV [8].

Le tableau III.2 représente les paramètres électriques tel que la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ , la densité du courant de court-circuit  $J_{cc}$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule photovoltaïque CIGS : Sans TCO « **CdS/CIGS** », avec la couche intrinsèque de ZnO « **i-ZnO/CdS/CIGS** » et avec la couche du ZnO dopé aluminium « **Al-ZnO/CdS/CIGS** ».

Le tableau III.2 montre que la cellule sans TCO a un rendement de 16.47 avec un  $V_{co}$  de 0.659V,  $J_{cc}$  de 36.815  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , FF de 81.040 % et puissance max de 0.016 mW, l'addition de TCO a augmenté son efficacité a 17.01 pour le i-ZnO et 19.38 pour Al-ZnO aussi cette addition a augmenté les paramètres. Pour le meilleur rendement qui a 19.38 % on a le  $V_{co}$  de 0.664,  $J_{cc}$  de 36.897, FF de 81.29 % et puissance max de 0.029 mW.

paramètres	$V_{co}$ (V)	$J_{cc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)	$V_{max}$ (V)	$J_{max}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$P_{max}$ (mW)
Sans TCO	0.659	30.815	81.040	16.47	0.573	28.713	0.016
i- ZnO/CdS/CIGS	0.660	31.849	80.830	17.01	0.573	29.671	0.017
Al- ZnO/CdS/CIGS	0.664	36.897	81.29	19.38	0.576	33.625	0.019

**Tableau III.2:** Les paramètres de sortie de la cellule obtenu par SCAPS Sans TCO « CdS/CIGS », avec la couche intrinsèque de ZnO « i-ZnO/CdS/CIGS » et avec la couche de ZnO dopé aluminium « Al-ZnO/CdS/CIGS ».

Le tableau III.3 représente les paramètres électriques tel que la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ , la densité du courant de court-circuit  $J_{cc}$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule photovoltaïque TCO /i-ZnO/CdS/CIGS pour différentes TCOs : Al-ZnO /i-ZnO/CdS/CIGS,  $\text{TiO}_2$ /i-ZnO/CdS/CIGS et  $\text{MgZnO}$ /i-ZnO/CdS/CIGS dans les mêmes conditions du dopage  $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ . On observe que le  $V_{co}$  pour les trois TCO est le même par contre  $J_{cc}$  le FF et le rendement sont différents, le TCO le plus performant pour cette cellule est le Al-ZnO car son rendement est de 20.31%, le  $J_{cc}$  est de 37.552  $\text{mA}/\text{cm}^2$  et FF de 81.301 %. Mais pour les  $\text{MgZnO}$  et le  $\text{TiO}_2$  on a un rendement plus faible que celui de Al-ZnO ( $\eta_{\text{MgZnO}} = 20.27$  et  $\eta_{\text{TiO}_2} = 20.226$ ).

Les Caractéristiques J-V des cellules Al-ZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS,  $\text{MgZnO}$ /i-ZnO /CdS/ CIGS,  $\text{TiO}_2$ /i-ZnO /CdS/ CIGS sont présentés dans la figure III.2. (a).

paramètres	V <sub>co</sub> (V)	J <sub>cc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)	V <sub>max</sub> (V)	J <sub>max</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	P <sub>max</sub> (mW)
<b>Al-ZnO /i-ZnO/CdS/CIGS</b>	0.665	37.552	81.301	20.31	0.577	35.180	0.020
<b>MgZnO/i-ZnO/CdS/CIGS</b>	0.665	37.513	81.230	20.27	0.577	35.140	0.020
<b>TiO<sub>2</sub>/i-ZnO/CdS/CIGS</b>	0.665	37.410	81.260	20.22	0.577	35.043	0.020

**Tableau III.3:** Les paramètres de sortie de la cellule obtenu par SCAPS pour différentes TCOs (Al-ZnO, TiO<sub>2</sub>, MgZnO) avec  $N_D=1 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$ .

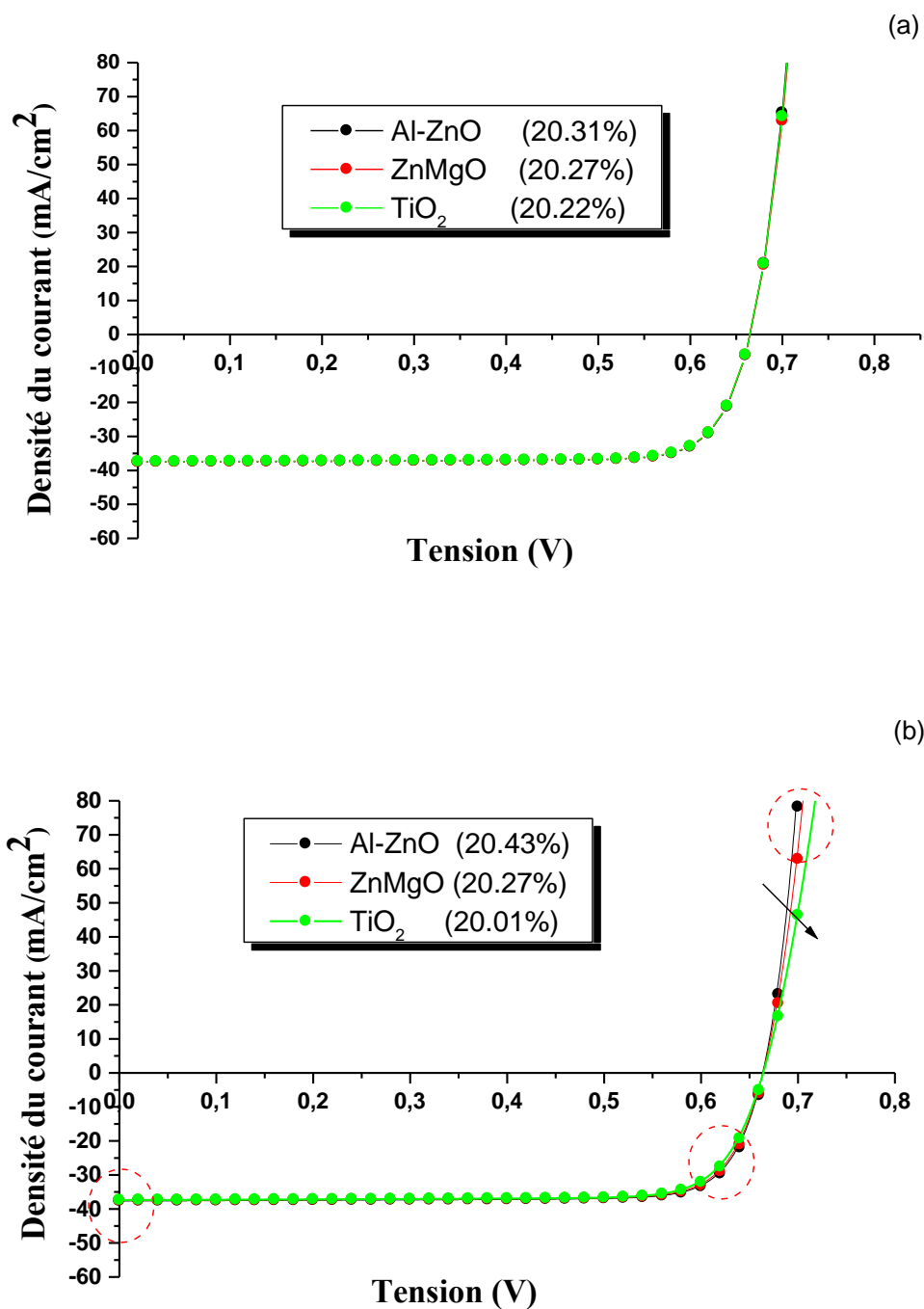
Le tableau III.4 représente les paramètres électriques tel que la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ , la densité du courant de court-circuit  $J_{cc}$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule photovoltaïque **TCO/i-ZnO/CdS/CIGS : Al-ZnO/i-ZnO /CdS/CIGS, TiO<sub>2</sub>/i-ZnO/CdS/CIGS et MgZnO/i-ZnO/CdS/CIGS** pour différents dopages :  $N_D(\text{Al-ZnO})=1 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}$ ,  $N_D(\text{TiO}_2)=1 \cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$  et :  $N_D(\text{MgZnO})=1 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$ .

Le tableau III.4 montre qu'il y a une augmentation de rendement avec l'augmentation de dopage de Al-ZnO le rendement devient 20.43 % pour un dopage de  $1 \cdot 10^{20} \text{cm}^{-3}$ , est une diminution de rendement avec la diminution de dopage de TiO<sub>2</sub> le rendement devient 20.01% pour un dopage de  $1 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$ .

Les résultats  $J$ - $V$  sont illustrés dans la figure III.2 (b).

paramètres	V <sub>co</sub> (V)	J <sub>cc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)	V <sub>max</sub> (V)	J <sub>max</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	P <sub>max</sub> (mW)
<b>Al-ZnO /i-ZnO/CdS/CIGS</b>	0.665	37.651	81.583	20.43	0.579	35.285	0.020
<b>MgZnO/i-ZnO/CdS/CIGS</b>	0.665	37.513	81.230	20.27	0.577	35.140	0.020
<b>TiO<sub>2</sub>/i-ZnO/CdS/CIGS</b>	0.665	37.385	80.474	20.01	0.572	34.988	0.020

**Tableau III.4:** Les paramètres de sortie de la cellule obtenu par SCAPS pour différentes TCOs (Al-ZnO, TiO<sub>2</sub>, MgZnO) avec ( $N_D=10^{20}\text{cm}^{-3}$   $N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$   $N_D=1 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ).



**Figure III.2:** Caractéristiques J-V sous AM1 des cellules Al-ZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS, MgZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS, TiO<sub>2</sub>/i-ZnO /CdS/ CIGS. (a) dans les mêmes conditions du dopage  $N_D = 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (b) pour différents dopages :  $N_D(\text{Al-ZnO}) = 1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D(\text{TiO}_2) = 1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$  et :  $N_D(\text{MgZnO}) = 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

La figure III-2 représente les Caractéristiques J-V sous AM1 des cellules Al-ZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS, MgZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS,  $\text{TiO}_2$ /i-ZnO /CdS/ CIGS. **(a)** dans les mêmes conditions du dopage  $N_D = 1.10^{18}\text{cm}^{-3}$  **(b)** pour différents dopages :

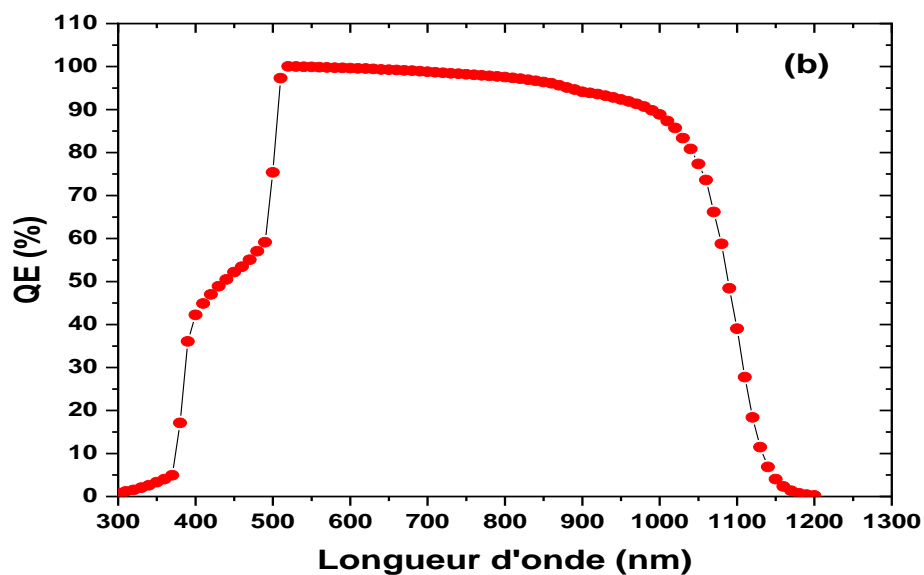
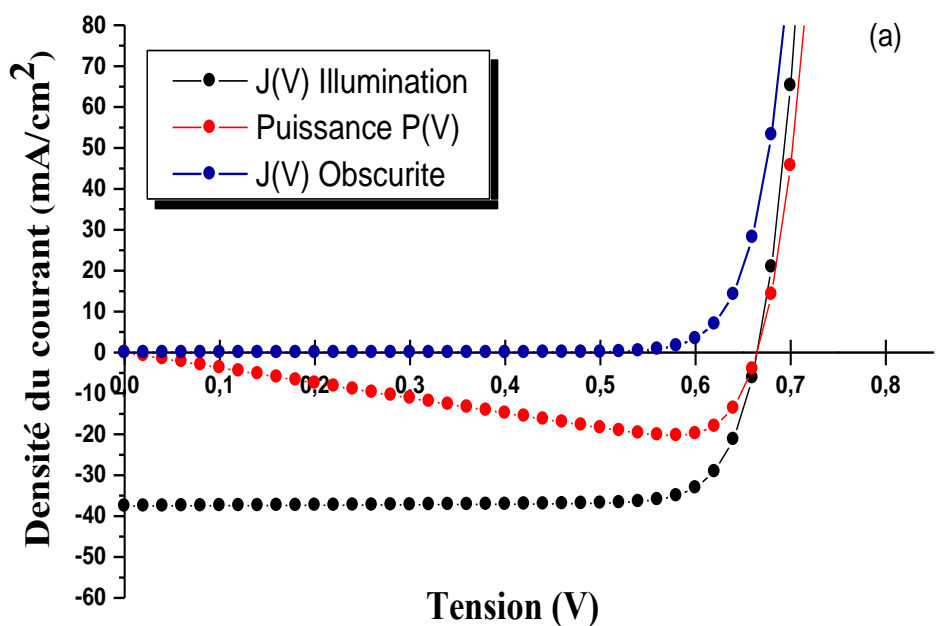
$$N_D(\text{Al-ZnO}) = 1.10^{20}\text{cm}^{-3}, : N_D(\text{TiO}_2) = 1.10^{17}\text{cm}^{-3} \text{ et } : N_D(\text{MgZnO}) = 1.10^{18}\text{cm}^{-3}.$$

D'après les résultats qu'on obtient, le meilleur rendement de la cellule CIGS obtenu par le TCO Al-ZnO est de l'ordre 20.31%.

### III.4 : Etude la structure de référence Al-ZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS :

La caractéristique électrique J(V) et la réponse spectrale de la cellule solaire CIGS en obscurité et sous illumination par la densité de puissance 100 MW/cm<sup>2</sup> est représentée sur la Figure III.3(a) et la Figure III.3 (b), respectivement. La caractéristique J (V) sous un éclaircissement de AM1 nous donne une densité du courant de court-circuit de  $J_{cc}37,55\text{mA/cm}^2$ , une tension de circuit ouvert  $V_{CO}=0.665\text{V}$ , ce qui induit un facteur de forme  $FF=81.30\%$ , un rendement photovoltaïque  $\eta=20.31\%$  et la puissance maximale de sortie 0.0202.





**Figure III.3:** (a) Caractéristiques J-V en obscurité et sous illumination avec une densité de puissance 100  $\text{MW}/\text{cm}^2$  (b) la réponse spectrale de la cellule Al-ZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS.

On remarque dans la figure III.3 (b) que la réponse spectrale de la cellule solaire CIGS augmente avec l'augmentation de la longueur d'onde et que la courbe se partage en trois parties suivant la longueur d'onde de 300- 1200 nm :

- La gamme de la longueur d'onde de 300 nm à 420 nm représente la zone de i-ZnO et Al-ZnO.
- La gamme de la longueur d'onde de 420 nm à 560 nm représente la zone de CdS.
- La gamme de la longueur d'onde de 560 nm à 1200 nm représente la zone CIGS.

➤ Les résultats que nous avons obtenus sont en très bon accord avec ceux trouvés expérimentalement et par simulation.

Paramètres externe	V <sub>co</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Rendement (%)	référence
Simulation SCAPS	0.665	37.55	81.301	20.31	Notre travail
Simulation Silvaco	0.680	36.91	80	20.1	[9]
Expérimental	0.720	36.3	76.8	20.1	[10]
Thèse	0.709	35.44	80.69	20.32	[11]

**Tableau III.5:** Comparaison de nos résultats avec les résultats donnés dans la littérature.

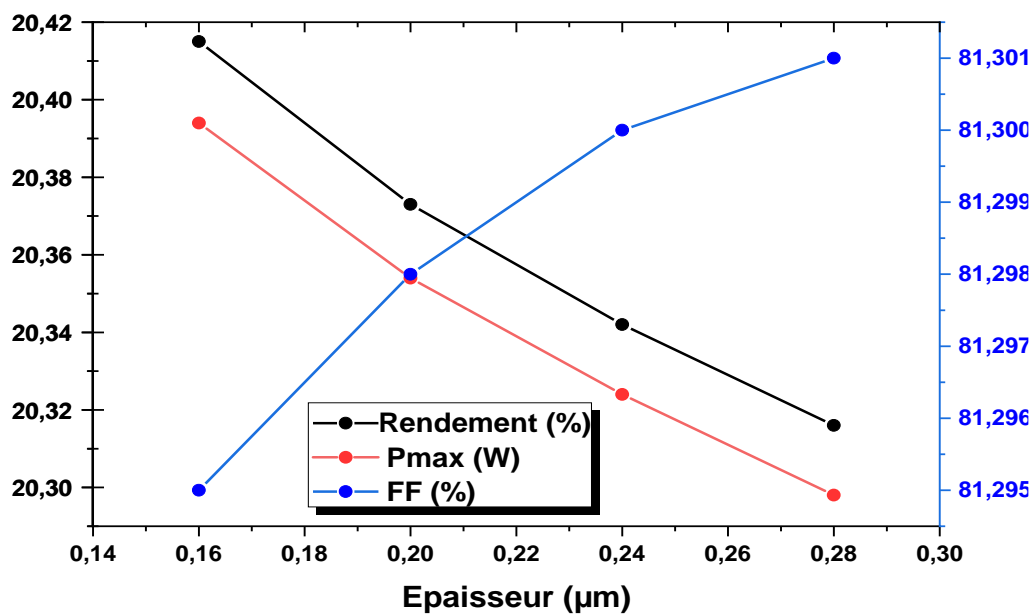
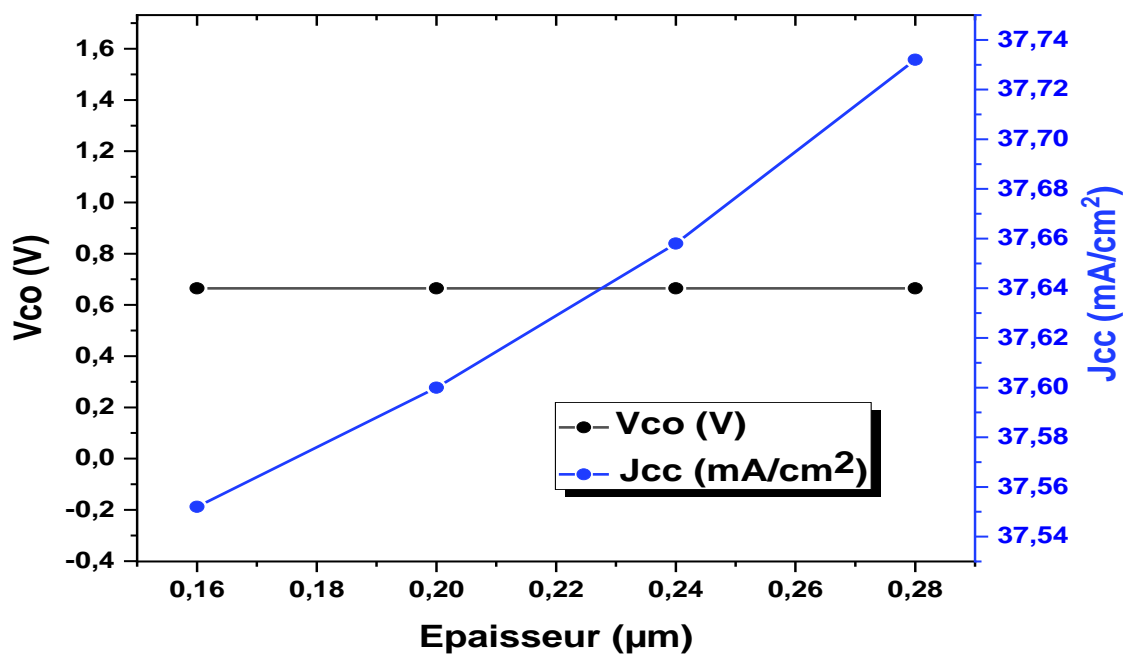
### III.4.1. Influence de l'épaisseur de la couche Al-ZnO et i-ZnO :

Nous avons fait varier l'épaisseur des couches de Al-ZnO de 0.20-0.14 $\mu\text{m}$  et de i-ZnO de 0.08-0.02 $\mu\text{m}$  pour voir son influence sur les paramètres électriques de la cellule CIGS, en fixant les valeurs  $N_D=1.10^{18}\text{cm}^{-3}$  et l'indice de réfraction  $n=1,9$ . Les résultats de simulation sont récapitulés dans le tableau III .6. D'après les résultats obtenus en variant l'épaisseur de la couche antireflet, on remarque qu'en augmentant l'épaisseur des couches de Al-ZnO et de i-ZnO la densité de courant de court-circuit diminue de 37.732 à 37.552 mA/cm<sup>2</sup>. Cela peut être expliqué

par le fait que l'augmentation de l'épaisseur de ZnO le processus de transport de charge vers la couche active devient de plus en plus lente. Ainsi l'absorption du matériau devient importante en s'éloignant du spectre visible. On remarque aussi qu'en diminuant l'épaisseur des couches d'Al-ZnO et de i-ZnO le rendement et la puissance maximale augmentent de 20.316% à 20.415%. Le meilleur rendement est obtenu pour une épaisseur de 0.14 $\mu\text{m}$  pour la couche Al-ZnO et 0.02  $\mu\text{m}$  pour la couche i-ZnO. Le premier contact entre les photons et la cellule solaire, est la couche fenêtre Al-ZnO/i-ZnO. L'augmentation de celle-ci influe sur la création des paires électron-trou, d'où la diminution du rendement.

Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )		Vco (v)	Jcc(mA/c m <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)	Vmax (V)	Jmax (mA/cm <sup>2</sup> )	Pmax (mW)
i-ZnO	Al-ZnO							
<b>0.08</b>	<b>0.20</b>	0.665	37.552	81.301	20.31	0.577	35.180	0.020
<b>0.06</b>	<b>0.18</b>	0.665	37.600	81.300	20.34	0.577	35.224	0.020
<b>0.04</b>	<b>0.16</b>	0.665	37.658	81.298	20.37	0.577	35.277	0.020
<b>0.02</b>	<b>0.14</b>	0.665	37.732	81.295	20.41	0.577	35.345	0.020

**Tableau III.6:** Effet de l'épaisseur des couches de Al-ZnO et de i-ZnO sur les paramètres électriques  $J_{cc}$  ;  $V_{co}$  ; FF ; Pmax ; Jmax ;  $\eta$ .



**Figure III.4:** Effet de l'épaisseur de la couche Al-ZnO/i-ZnO sur le courant de court-circuit  $J_{cc}$  ; la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  ; le facteur de forme FF ; le rendement  $\eta$  et la puissance maximum  $P_{max}$ .

**III.4.2. Influence de dopage de la couche antireflet (ZnO) :**

Le tableau III-7 montre la variation de dopage sur les paramètres de sortie en augmentant la concentration du dopage de  $1.10^{14}$  à  $1.10^{22} \text{ cm}^{-3}$  avec une épaisseur de 0.14 pour Al-ZnO et 0.02 pour i-ZnO. Les résultats de simulations de l'effet de la concentration du dopage de la couche Al-ZnO/i-ZnO sur les propriétés de la cellule montrent que le fort dopage influence positivement sur le rendement. On observe que pour une concentration du dopage de  $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$  le rendement de la cellule est de l'ordre de 20.18% tandis qu'avec une concentration du dopage de  $1.10^{21} \text{ cm}^{-3}$  le rendement est de 20.58% et cela est dû par le fait qu'en augmentant le dopage la conductivité de ZnO devient importante.

<b>Dopage (<math>\text{cm}^{-3}</math>)</b>	<b>Vco (V)</b>	<b>Jcc (<math>\text{mA}/\text{cm}^2</math>)</b>	<b>FF (%)</b>	<b><math>\eta</math> (%)</b>	<b>Vmax (V)</b>	<b>Jmax (<math>\text{mA}/\text{cm}^2</math>)</b>	<b>Pmax (mW)</b>
<b><math>1.10^{14}</math></b>	0.665	37.52	80.83	20.18	0.574	35.133	0.020
<b><math>1.10^{15}</math></b>	0.665	37.523	80.87	20.19	0.574	35.137	0.020
<b><math>1.10^{16}</math></b>	0.665	37.703	80.89	20.30	0.575	35.301	0.020
<b><math>1.10^{17}</math></b>	0.665	37.710	81.01	20.33	0.575	35.312	0.020
<b><math>1.10^{18}</math></b>	0.665	37.732	81.29	20.41	0.577	35.345	0.020
<b><math>1.10^{19}</math></b>	0.665	37.777	81.51	20.49	0.578	35.398	0.020
<b><math>1.10^{20}</math></b>	0.665	37.836	81.58	20.54	0.579	35.457	0.020
<b><math>1.10^{21}</math></b>	0.665	37.906	81.59	20.58	0.579	35.521	0.020
<b><math>1.10^{22}</math></b>	0.665	37.797	81.58	20.52	0.579	35.419	0.020

**Tableau III.7:** Effet de dopage des couches de Al-ZnO et de i-ZnO sur les paramètres électriques  $J_{cc}$  ;  $V_{co}$  ;  $FF$  ;  $\eta$ ,  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ ,  $P_{max}$ .

La figure III .5 montre l'évolution du courant de court-circuit  $J_{cc}$ , de la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  et du rendement ainsi que le facteur de forme, de coefficient d'absorption de la concentration du dopage de la couche de **Al-ZnO et i-ZnO**.

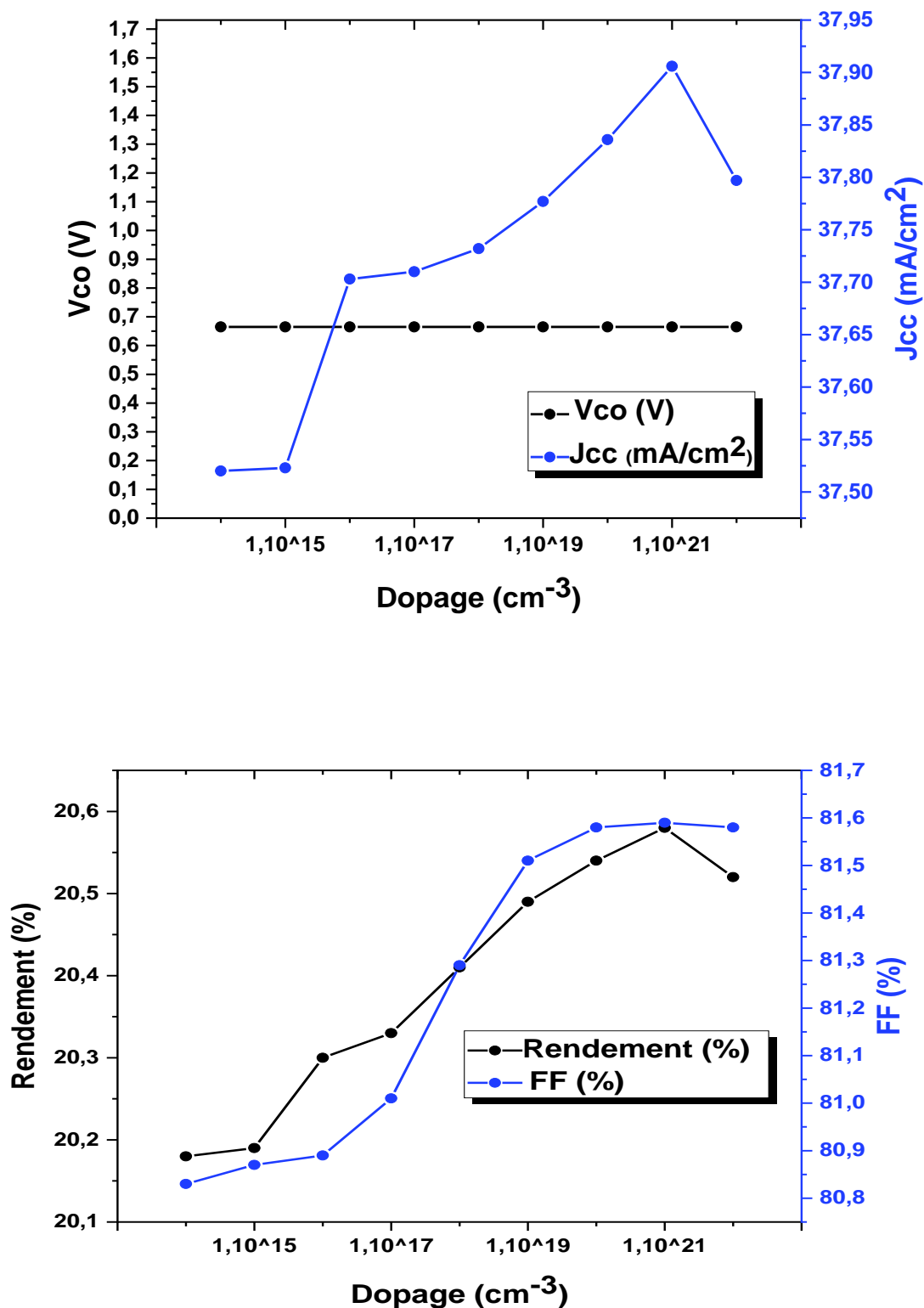


Figure III.5: Effet de dopage des couches de Al-ZnO et de i-ZnO sur les paramètres électriques  $J_{cc}$  ;  $V_{co}$  ;  $\eta$  ; FF.

**III.4.3. Influence de modèle d'absorption sur les paramètres de sortie :**

Le tableau III.8 montre les résultats de simulation de l'effet de modèle d'absorption sur le courant de court-circuit  $J_{cc}$  ; la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  ; le facteur de forme ; le rendement  $\eta$  et la puissance maximum  $P_{max}$ , avec,  $N_D=1.10^{21}\text{cm}^{-3}$  et l'épaisseur de  $0.14\mu\text{m}$  pour Al-ZnO et de  $0.02\mu\text{m}$  pour i-ZnO.

La variation de la gamme de modèle d'absorption est de  $10^{-2}$  au  $10^{+6}$  suivant le modèle mathématique de SCAPS [12] :

$$\alpha(h\nu) = (\alpha_0 + \beta_0 \frac{E_g}{h\nu}) \sqrt{\frac{h\nu}{E_g} - 1} \quad \text{(III-2)}$$

$\alpha_0$  et  $\beta_0$  : ont la dimension de la constante d'absorption qui est en relation avec le modèle traditionnel de la constante d'absorption de type A et B

Les figures III.6 montrent l'effet de modèle d'absorption sur les paramètres externes de la cellule solaire CIGS tel que  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , le facteur de forme (FF) et le rendement ( $\eta$ ). On remarque que l'augmentation du modèle d'absorption entraîne une légère décroissance du  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$  et  $\eta$  contrairement au facteur de forme qui se croit légèrement.

modèle d'absorption ( $\text{cm}^{-1}$ )	$V_{co}$ (V)	$J_{cc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)	$V_{max}$ (V)	$J_{max}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$P_{max}$ (mW)
$10^{-2}$	0,665	38,022	81,598	20,65	0,577	35,784	0.020
$3.10^4$	0.665	38,001	81,600	20,64	0,577	35,731	0.020
$2.10^5$	0,665	37,926	81,604	20,60	0,577	35,695	0.020
$10^6$	0.665	37,840	81,608	20,55	0,577	35,616	0.020

**Tableau III.8:** Effet de la variation de modèle d'absorption sur les paramètres électriques  $J_{cc}$  ;  $V_{co}$  ; FF ;  $\eta$ ,  $V_{max}$ ,  $J_{max}$ ,  $P_{max}$ .

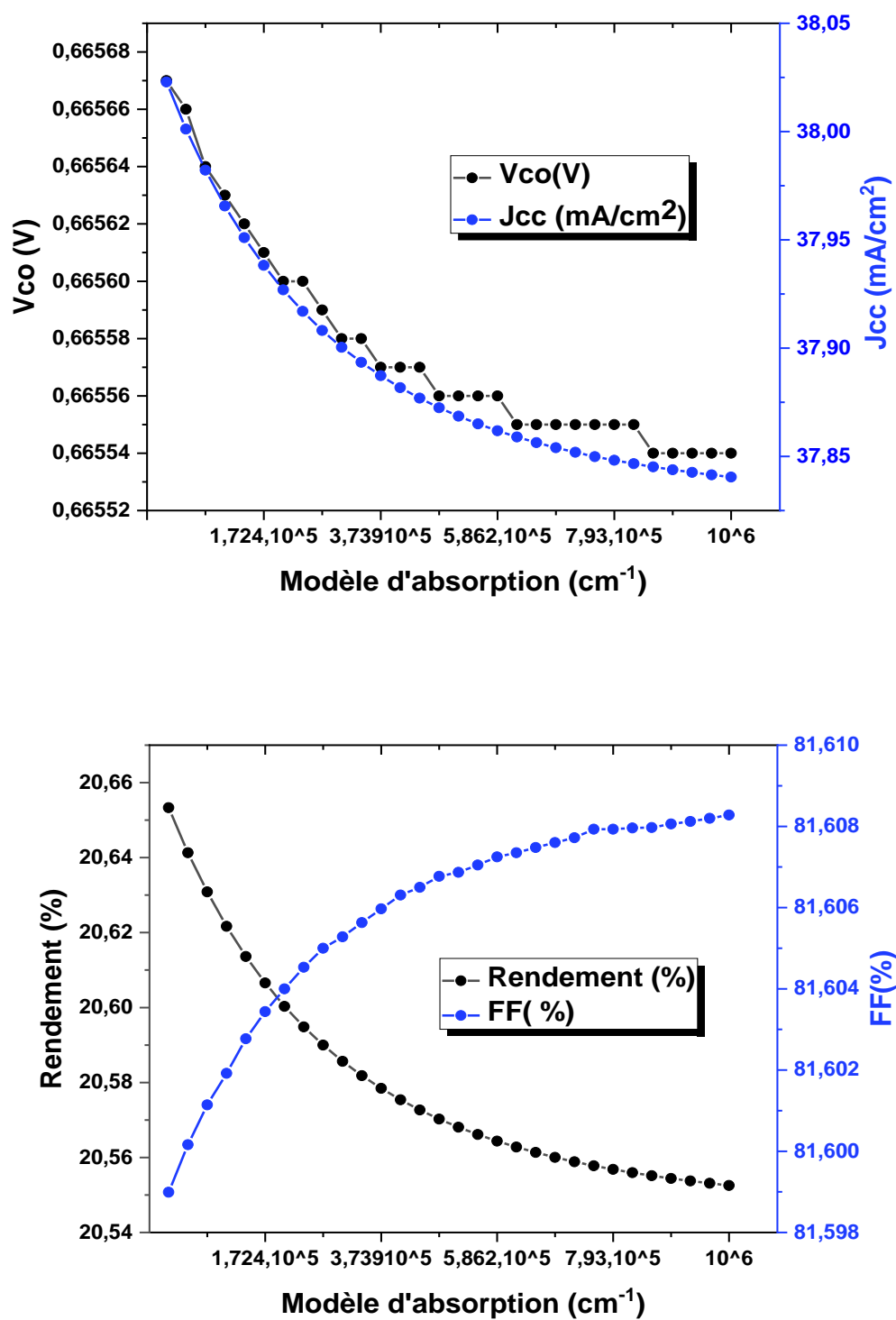


Figure III.6: Effet de modèle d'absorption sur les paramètres électriques  $J_{cc}$  ;  $V_{oc}$ ;(b) FF ;  $\eta$ .

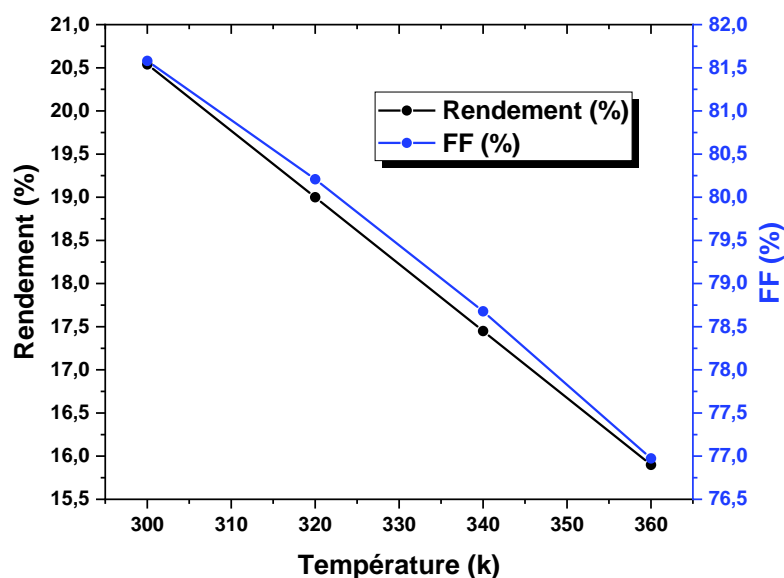


### III.4.4. Influence de la température sur les paramètres de sortie :

Le tableau III-9 représente l'influence de la température (300, 320, 340 et 360 K) sur le courant de court-circuit  $J_{cc}$  ; la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  ; le facteur de forme  $FF$  ; le rendement  $\eta$  et la puissance maximum  $P_{max}$ , avec,  $N_D = 1.10^{20} \text{cm}^{-3}$  et l'épaisseur de 0.14 pour Al-ZnO et de 0.02 pour i-ZnO. On remarque que les performances de la cellule solaire CIGS se dégradent avec l'augmentation de la température de 300-360 K.

Température (K)	$V_{co}$ (v)	$J_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)	$V_{max}$ (v)	$J_{max}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$P_{max}$ (mW)
<b>300</b>	0.665	37.836	81.580	20.54	0.573	35.457	0.020
<b>320</b>	0.625	37.864	80.208	19.00	0.573	35.088	0.018
<b>340</b>	0.585	37.891	78.678	17.45	0.576	34.305	0.017
<b>360</b>	0.545	37.921	76.974	15.90	0.577	33.543	0.015

**Tableau III.9:** Effet de la température sur les paramètres électriques  $J_{cc}$  ;  $V_{co}$  ; FF ;  $\eta$ ,  $V_{max}$ ,  $J_{max}$ .



**Figure III.7:** Effet de la température sur le rendement et le facteur de forme.

La figure III-7 montre l'influence du facteur de forme et du rendement de la cellule solaire à base de CIGS en fonction de la température. Nous remarquons une diminution progressive du facteur de forme et du rendement avec l'augmentation de la température.

**III.4.5. Influence de la couche BSF sur les paramètres de sortie :**

Les propriétés électriques de SNS comme une couche BSF dans la cellule solaire sont présenté dans le tableau III-10 :

Les paramètres	SnS
<b>Epaisseur (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	0.05
<b>affinité électronique (eV)</b>	4.20
<b>L'énergie de gap (eV)</b>	1.10
<b>permittivité diélectrique</b>	12.5
<b>Densité effective des états dans la bande de conduction <math>N_C</math> (<math>\text{cm}^{-3}</math>)</b>	$1.10^{19}$
<b>Densité effective des états dans la bande de conduction <math>N_V</math> (<math>\text{cm}^{-3}</math>)</b>	$4.130.10^{19}$
<b>Mobilité des électrons (<math>\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{S}^{-1}</math>)</b>	$2.5.10^1$
<b>Mobilité des trous (<math>\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{S}^{-1}</math>)</b>	$1.10^2$
<b>vitesse thermique des électrons (cm/s)</b>	$1.10^7$
<b>vitesse thermique des trous (cm/s)</b>	$1.10^7$
<b>La densité des accepteurs <math>N_A</math> (<math>\text{cm}^{-3}</math>)</b>	$1.10^{18}$
<b>La densité des donneurs <math>N_D</math> (<math>\text{cm}^{-3}</math>)</b>	0
<b>Coefficient d'absorption (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	$1.10^4$

**Tableau III.10:** Les paramètres électriques du BSF : SnS [13].

Afin d'augmenter le rendement de la cellule Al-ZnO/i-ZnO/CdS/CIG Son a ajouté une couche BSF sur la face arrière de la cellule solaire CIGS. Cette addition nous a parmi d'amélioré le rendement de 20.31% à 20.43 %. Les résultats de simulation de l'effet du BSF sur le courant de court -circuit  $J_{cc}$  ; la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  ; le factor de forme ; le rendement  $\eta$  et la puissance maximum  $P_{max}$ , sont présenté dans le tableau III-11 .la figure III-8 représente la caractéristique (J-V) de la cellule CIGS avec et sans couche BSF. On remarque que la cellule avec une couche BSF a un  $V_{co}$  de 0.004 V BSF et un ICC de  $0.37 \text{ mA/cm}^2$  plus élevé que celle de sans couche BSF  $\text{cm}^2$ .

	Vco (V)	Jcc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)	Vmax (V)	Jmax (mA/cm <sup>2</sup> )	Pmax (mW)
SANS SnS	0.665	37.552	81.301	20.31	0.577	35.180	0.020
SnS	0.669	37.922	80.507	20.43	0.574	35.542	0.020

Tableau III.11: Les paramètres électriques de la cellule CIGS avec et sans la couche BSF (de type SnS).

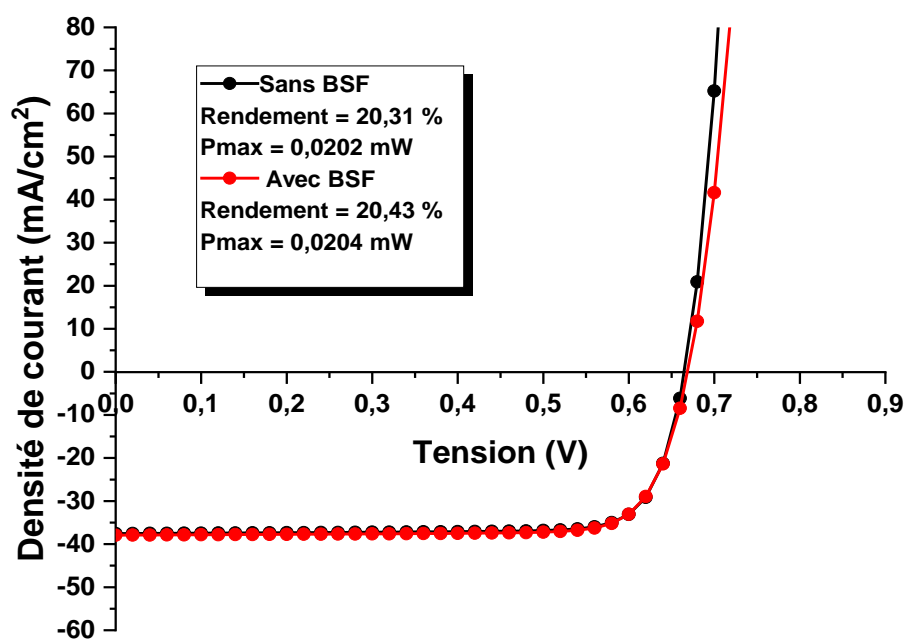


Figure III.8: La caractéristique (J-V) de la cellule CIGS avec et sans couche BSF (de type SnS).

### III.5. La structure optimale :

Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure Al-ZnO /i-ZnO/CdS/CIGS. Nous avons étudié la sensibilité des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire CIGS aux grandeurs (épaisseur et dopage) des couches Al-ZnO et i-ZnO et la

température afin d'obtenir un rendement optimal. Les résultats de simulation présentent le meilleur rendement de conversion de 20.58% correspondant à une épaisseur de 0.16  $\mu\text{m}$  et la concentration de dopage de  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . Les paramètres optimums de la structure Al-ZnO /i-ZnO/CdS/SnS/CIGS sont présentés dans le tableau III-12.

structures	Al-ZnO/i-ZnO		Vco (V)	Jcc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)	Pmax (mW)
	X ( $\mu\text{m}$ )	N <sub>D</sub> (cm <sup>-3</sup> )					
référence	0,28	$10^{18}$	0.665	37.552	81.30	20.31	0.020
Optimale	0,16	$10^{21}$	0.665	37.906	81.59	20.58	0.020

**Tableau III.12:** Les paramètres optimums de la structure Al-ZnO /i-ZnO/CdS/CIGS en fonction du dopage et l'épaisseur de la couche fenêtre Al-ZnO et la couche intrinsèque i-ZnO.

### III.5. Conclusion :

L'objet du présent travail a été de fournir un meilleur rendement d'une cellule solaire de structure TCO/ CdS/CIGS par la comparaison entre trois couche fenêtre  $\text{ZnO}_{1-x}\text{Al}_x$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnMgO}$  et l'addition d'une couche BSF.

A cet effet, nous avons simulé les paramètres de sortie des cellules solaires à base de CIGS, en essayant de trouver les meilleurs paramètres, afin de donner les meilleures caractéristiques de sortie. Nous avons alors, étudié l'effet de l'épaisseur, de dopage, de modèle d'absorption et de température sur la couche antireflet  $\text{ZnO}_{1-x}\text{Al}_x$  et i-ZnO sur la caractéristique I-V ainsi que sur le rendement.

D'après notre étude, il a été montré que les propriétés des couche fenêtre sont sensible aux l'influence l'épaisseur, le dopage, le modèle d'absorption et la température , En effet il est nécessaire de diminuer pour avoir un rendement optimale notre épaisseur est de 0.14 $\mu\text{m}$  pour  $\text{ZnO}_{1-x}\text{Al}_x$  et 0.02  $\mu\text{m}$  pour i-ZnO , De même La variation de dopage a impacte sur les paramètres des sortie car cette augmentation permet d'amélioré le collecte des porteurs dans

### **Chapitre III Intégration des TCOs dans la Cellule Photovoltaïque $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$**

---

la couche fenêtre , Aussi l'augmentation de modèle d'absorption sous une température ambiante de 300k et l'addition d'une couche BSF augmente le rendement de la cellule.

Nous pouvons dire que les paramètres de la couche antireflet jouent un rôle important dans l'amélioration de performance de la cellule solaire  $\text{Al-ZnO/i-ZnO/CdS/CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$ .

#### Reference:

- [1] A. Niemegeers, M. Burgelman, Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells, Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference Washington DC, 1996, pp.901-904. M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.
- [2] M. Buffiere, « Synthèse et caractérisation de couches minces de Zn(O,S) pour application au sein des cellules solaires à base de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  », Thèse de doctorat, université de Nantes, 2011.
- [3] N. Naghavi, D. Abou-Ras, N. Allsop, N. Barreau, S. Bücheler, A. Ennaoui, C.H. Fischer, C. Guillen, D. Hariskos, J. Herrero, R. Klenk, K. Kushiya, D. Lincot, R. Menner and T. Nakada, « Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite  $\text{Cu(In,Ga)(S,Se)}_2$  based thin film photovoltaics : present status and current developments », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol.18, 2010, pp. 411.
- [4] Y. Hagiwara, T. Nakada and A. Kunioka, « Improved  $J_{sc}$  in CIGS thin film solar cells using a transparent conducting ZnO:B window layer », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 67, 2001, pp. 267.
- [5] Puvaneswaran Chelvanathan, Mohammad Istiaque Hossain, Nowshad Amin, 2010, Performance analysis of copper–indium–gallium–diselenide (CIGS) solar cells with various buffer layers by SCAPS
- [6] Sadanand, DK Dwivedi, 2020, Modeling of CZTSSe solar photovoltaic cell for window layer optimization
- [7] A. Luque and S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 1st ed. NJ:Wiley, pp. 574, 2003.
- [8] P. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann and M. Powalla, Prog. Photovolt. Res. Appl. 19(2011)894- 897
- [9] H. Amar, S. Tobbeche, Etude des caractéristiques électriques de cellule solaire à hétérojonction CdS/CIGS (cadmium- sulfide/ cuivre- indium- gallium- sélénium), 2015.
- [10] P. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann and M. Powalla, Prog. Photovolt. Res. Appl. 19(2011)894-897.
- [11] Elbar Mourad, 2018, Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel TcadSilvaco, Université Mohamed Khider – Biskra

**[12]** Marc Burgelman, of materials in SCAPSModels for the optical absorption  $\alpha(\lambda)$  of materials in SCAPSModels, 2018.

**[13]** A. Ghobadi, M. Yousefi, M. Minbashi, A.H. AhmadkhanKordbacheh, AR. Haji Abdolvahab, N.E Gorji, Simulating the effect of adding BSF layers on  $\text{Cu}_2\text{BaSnSSe}_3$  thin film solar cells,2020.

# **Conclusion générale**



Dans ce travail nous avons étudié l'influence de TCOs et la couche BSF sur les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque en couche mince de type TCO /CdS/CIGS/BSF sous l'éclairement AM1.5G en utilisant le logiciel de simulation SCAPS afin d'obtenir un rendement de conversion électrique maximal. Nous commençons par la définition de la structure de la cellule CIGS. Après cela, vient l'étape de la simulation numérique de la cellule solaire nous a permis de calculer les paramètres photovoltaïques qui caractérisent la cellule solaire. Cette étude a permis de dégager les résultats suivants :

Nous avons étudié l'effet des trois TCOs de type Al-ZnO, MgZnO, TiO<sub>2</sub> présentant une concentration de dopage de l'ordre 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>.

Le meilleur résultat est obtenu pour le TCO de type Al-ZnO. Les paramètres photovoltaïques sont : La densité du courant de court-circuit  $J_{cc} = 37.651 \text{ mA/cm}^2$ , la tension en circuit ouvert  $V_{co} = 0.665 \text{ V}$ , le facteur de forme  $FF = 81.583 \%$  et le rendement de conversion  $\eta = 20.31$ .

Nous avons ensuite étudié la sensibilité des paramètres photovoltaïques la couche ZnO dopé Al (Al-ZnO) et le ZnO intrinsèque (i-ZnO) aux grandeurs physique (épaisseur, dopage, modèle d'absorption et température) de la cellule CIGS. Les résultats obtenus indiquent que la réduction de l'épaisseur de la couche Al-ZnO et i-ZnO améliore le rendement de la cellule jusqu'au 20.41 % pour une épaisseur de 0.14 μm pour la couche Al-ZnO et 0.02 μm pour la couche i-ZnO. La variation de dopage de 10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup> à 10<sup>21</sup> cm<sup>-3</sup> mène à une augmentation du rendement de 20.58% avec un 0.14 μm pour la couche Al-ZnO et 0.02 μm pour la couche i-ZnO.

- L'amélioration de modèle d'absorption pour une épaisseur de 0.14 μm pour la couche Al-ZnO et 0.02 μm pour la couche i-ZnO et un dopage de 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> nous a parmi d'augmenté le rendement de la cellule au 20.65 %.
- L'augmentation de la température accompagnée par la diminution de rendement la température parfaite pour cette cellule est de 300K pour un rendement de 20.54 % pour un dopage de 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> et d'épaisseur de 0.14 μm pour la couche Al-ZnO et 0.02 μm pour la couche i-ZnO.
- Après nous avons étudié l'influence de l'addition de la couche BSF sur la cellule Al-ZnO/i-ZnO /CdS/ CIGS. Cette addition a augmenté le rendement de cellule à 20.43%.

## Conclusion générale

---

En prenant une structure qui combine les paramètres optimaux (épaisseur, dopage, modèle d'absorption et température) de la couche antireflet, nous avons pu atteindre un rendement de conversion électrique de 20.65 % avec un courant de court-circuit  $J_{cc} = 38.044 \text{ mA/cm}^2$ , une tension en circuit ouvert  $V_{co} = 0.665 \text{ V}$  et un facteur de forme de 81.573%.

En conclusion, l'utilisation de couche antireflet à la surface de la cellule solaire en couche mince à base de CIGS apporte une nette amélioration des propriétés de cette dernière.

## Résumé :

Actuellement le recours aux énergies renouvelables, notamment le solaire photovoltaïque est largement majoritaires. A ce titre l'amélioration de performances des cellules à base de Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub> est devenue très important pour les recherches photovoltaïques.

L'étude menée dans ce mémoire est principalement basée sur l'étude d'augmentation de rendement de la cellule solaire utilisant logiciel SCAPS pour réaliser la simulation. Notre étude se résume en deux partie la première est d'utilisé les TCO comme couche antireflet où la structure de la cellule solaire est composée de TCO/ CdS/CIGS et la deuxième partie on a ajouté SnS comme couche BSF la structure de la cellule devient TCO /CdS/ CuIn<sub>1-x</sub>GaxSe/SnS. On a défié la caractéristique  $I = f(V)$  qui est la principale technique utilisée pour caractériser une cellule solaire, nous avons défini les paramètres photovoltaïques : la tension de circuit ouvert, le courant de court-circuit, le facteur de forme, et le rendement de conversion.

## Abstract:

Currently, the use of renewable energies, in particular solar photovoltaics, is largely in the majority. As such, improving the performance of cells based on Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> has become very important for photovoltaic research.

The study conducted in this thesis is mainly based on the study of increasing the efficiency of the solar cell using SCAPS software to perform the simulation. Our study is summarized in two parts the first is to use the TCO as anti-reflective layer where the structure of the solar cell is composed of TCO / CdS / CIGS and the second part we added SnS as BSF layer to the structure of the cell so it becomes TCO / CdS / CuIn<sub>1-x</sub>GaxSe / SnS. We challenged the characteristic  $I = f(V)$  which is the main technique used to characterize a solar cell, we defined the photovoltaic parameters: the open circuit voltage, the short circuit current, the form factor, and the efficiency conversion.

## ملخص:

في الوقت الحالي، يشكل استخدام الطاقات المتجددة، ولا سيما الطاقة الشمسية الكهروضوئية، الغالبية إلى حد كبير. على هذا النحو، أصبح تحسين أداء الخلايا على أساس Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub>، مهمًا جدًا لأبحاث الخلايا الكهروضوئية. تعتمد الدراسة التي أجريت في هذه المحاكاة بشكل أساسي على دراسة زيادة كفاءة الخلايا الشمسية باستخدام برنامج SCAPS لأداء المحاكاة. تم تلخيص دراستنا في جزأين، الأول هو استخدام TCO كطبقة مضادة للانعكاس حيث يتكون هيكل الخلية الشمسية من TCO / CdS / CIGS والجزء الثاني أضفنا SnS كطبقة BSF يصبح هيكل الخلية التكلفة الإجمالية للملكية.  $I = f(V)$  وهي التقنية الرئيسية المستخدمة لتوصيف الخلية الشمسية، وقمنا بتعريف المعلمات الكهروضوئية: جهد الدائرة المفتوحة، تيار الدائرة القصيرة، عامل الشكل، وتحويل الكفاءة.