



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Med Khider Biskra

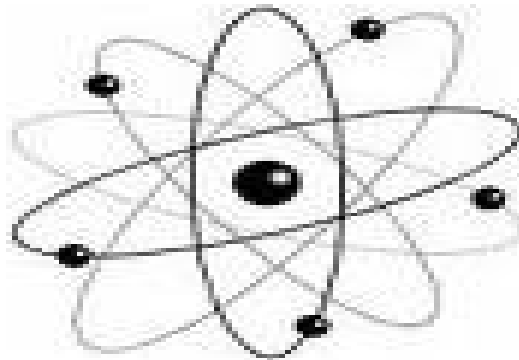
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie



Département des Sciences de la Matière    Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique des Matériaux



*Mémoire de fin d'étude en Master*

*Intitulé :*

**Effet de CdS sur les cellules solaires  
CZTS**

Présenté par:

**MELLAOUI CHAHRAZAD**

**MAHMOUDI NESRINE**

Devant le Jury Composé par :

**Mancer Mansoura**

*M.C. « B »*

*Université Med Khider- Biskra*

*Président*

**Sengouga Noureddine**

*Professeur*

*Université Med Khider- Biskra*

*Rapporteur*

**Ouahab Abdelouheb**

*Professeur*

*Université Med Khider - Biskra*

*Examineur*

Année Universitaire  
2018-2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ  
عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ

# اهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

قل عملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون

(صدق الله العظيم)

إلهي لا يطيب لي الليل إلا بشكرك ولا يطيب لي النهار إلا بطاعتك ولا تطيب لي العظام  
إلا بشكرك ولا تطيب لي الآخرة إلا بعفوك ولا تطيب لي

الجنة إلا برويتك

إلى من جرعت كأس فارغاً لتسقينني قطرة حبة إلى من كآلت

أنا لما لتقدم لنا لحظة سعادة

إلى من أرضعتني الحبه والعنان إلى رمز الحبه ولبسه الشفاء

إلى القلب الناصع

إلى والدتي (ملاوي خيرة)

إلى سندي وقوتي وملاذي بعد الله إلى من أثرونني على نفسي

إلى من علموني الحياة إلى من أظفروا لي ما هو أجل من الحياة إخوتي

(زهير. ميلود. سمير. حليلة. نبيلة. سميرة)

**MELLAOUI CHAHRAZAD**

# اهداء

”وقل اعلموا فسيري الله عملكم ورسوله والمؤمنون“

الى من بلغ الرسالة والأمانة ونصح الامة الى نبي الرحمة ونور العالمين

”محمد صلى الله عليه وسلم“

الى ملاكي في الحياة الى معنى الحب والى معنى الحنان والتفاني الى بسملة الحياة وسر الوجود  
الى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي لى اعلى الحبابب امي: خشاش دليلة

الى من كلله الله بالهيبية والوقار الى من علمني العطاء بدون انتظار الى من احمل اسمه بكل افتخار ارجوا من الله ان يمد  
في عمرك لترى ثمارا قد حان قطافها بعد طول انتظار وستبقى كلماتك نجوم اهتدي بها اليوم وفي الغد والى الابد ابي:  
عبد السلام

الى اخوتي الكرام: عبد الرحمان وزوجته فائزة، احمد نسيم، عادل ومعتز بالله والكتاكت محمد عبد السلام يحيى عبد الله  
الذين تحلو بالإخاء وتميزوا معي بالوفاء والعطاء.

:

**Mahmoudi Nesrine**

# Remerciements

Nous remercions le Dieu Tout Puissant de nous donner la volonté et le courage pour réaliser ce modeste ce travail.

Nous voulons exprimer à notre encadreur  
M. Sengouga Nouredine

Professeur à l'université de Biskra, pour sa patience et ces précieux conseils.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous les membres du jury qui ont bien accepté d'en faire partie.

Merci à nos parents pour leurs soutiens.

Nous tenons à remercier tous mes amis qui nous aident de loin dans la réalisation de ce travail.

### Listes des figures

<b>Figure (I.1):</b> schéma qui représente l'énergie du gap d'un semi-conducteur .....	04
<b>Figure (I.2):</b> Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.....	06
<b>Figure (I.3):</b> Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre.....	07
<b>Figure (I.4):</b> Spectre solaire AM1.5.....	08
<b>Figure (I.5):</b> Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	10
<b>Figure (I.6):</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	11
<b>Figure (I.7):</b> Les courbes $I = f(V)$ . .....	12
<b>Figure (I.8):</b> Différent technologie des cellules photovoltaïques.....	13
<b>Figure (I.9) :</b> Etape de fabrication des cellules.....	14
<b>Figure (I.10):</b> Cellule monocristallin et polycristalline. ....	15
<b>Figure (I.11):</b> modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%.....	17
<b>Figure (II.1) :</b> Méthodes générales de dépôt de couches minces en phase vapeur sous vide.....	23
<b>Figure (II.2) :</b> Bâti de dépôt évaporations thermiques.....	24
<b>Figure (II. 3):</b> Principe d'installation de dépôt par pulvérisation.....	27
<b>Figure (II.4):</b> Schéma synoptique d'un équipement de dépôt par spray pyrolyse.....	28
<b>Figure. (II.5) :</b> Structure Kasterite dans laquelle CZTS se cristallise. Elle est dérivée de la structure sphalérite par dupliquer la cellule unitaire.....	31
<b>Figure(II.6):</b> Spectre typique de transmittance d'une couche mince de CZTS. ....	34
<b>Figure (II.7) :</b> Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de $Cu_2ZnSnS_4$ .....	36
<b>Figure (III.1) :</b> Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.....	41
<b>Figure (III.2) :</b> Définition du problème.....	42
<b>Figure (III.3) :</b> Panneau des bandes d'énergie.....	43
<b>Figure (III. 4) :</b> Définition de la structure d'une cellule solaire.....	44

## Listes des figures

---

<b>Figure (III.5) :</b> Panneau des propriétés des contacts.....	44
<b>Figure (III.6) :</b> Propriétés de la couche ajoutée.....	46
<b>Figure (III.7) :</b> Propriétés des dopages définis.....	46
<b>Figure (III.8):</b> Modèle de l'absorption.....	46
<b>Figure (III.9) :</b> Définition des types de recombinaison présents.....	47
<b>Figure (IV-1):</b> Le schéma simplifié de l'hétéro structuré.....	49
<b>Figure (IV-2):</b> Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS sur la caractéristique I-V.....	51
<b>Figure (IV.3) :</b> Effet de l'épaisseur ( $W_{CdS}$ ) de la couche tampon CdS sur la variation relative.....	52
<b>Figure (IV.4) :</b> Influence du le dopage $N_d$ de la couche tampon CdS sur la caractéristique I-V.....	54
<b>Figure (IV.5):</b> Effet de le dopage ( $N_d$ ) de la couche CdS sur la variation relative.....	55
<b>Figure (IV-6):</b> Influence variation de l'électronique affinité ( $X_{CdS}$ ) de la Couche tampon CdS sur la caractéristique I-V.....	56
<b>Figure (IV.7):</b> Effet de l'électronique affinité( $X_{CdS}$ ) de la couche CdS sur la variation relative.....	57
<b>Figure (IV-8):</b> Influence variation de mobilité des électrons ( $U_n$ ) de la couche tampon CdS sur la caractéristique I-V.....	59
<b>Figure (IV-9):</b> Effet de mobilité des électrons ( $U_n$ )de la couche (CdS) sur la variation relative.....	60

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

<b>Tableau (II. 1) :</b> Les propriétés électriques des composes CZTSSe .....	33
<b>Tableau (II.2):</b> Les constantes de réseau et les lacunes de bande pour différentes structures.....	35
<b>Tableau (IV.1):</b> Les différentes données de simulation de la cellule.....	50



# Liste de symbole

<b>E(x):</b>	Champ Electrique Interne.
<b><math>\mu</math>c-Si:</b>	Silicium microcristallin
<b>AM 1.5:</b>	Spectre de la lumière solaire.
<b>a-Si:</b>	Silicium amorphe.
<b>a-Si:H:</b>	Silicium amorphe hydrogéné.
<b>CBD:</b>	Chemical bath deposition
<b>CBO:</b>	Bande de conduction offset.
<b>CdS:</b>	Sulfure de Cadmium.
<b>CdTe:</b>	Tellure de Cadmium.
<b>CZTS:</b>	Cuivre, Zinc, Tellure, Selenium
<b>CIS:</b>	Diséléniure d'indium de cuivre.
<b>Cu:</b>	Cuivre.
<b>CVD:</b>	Chemical Vapor Deposition.
<b>Eg:</b>	Energie de gap.
<b>EJM (MBE):</b>	Epitaxie par Jets Moléculaires.
<b>EQE:</b>	Rendement quantique extern.
<b>FF:</b>	Facteur de forme
<b>Icc:</b>	Courant de court-circuit.
<b>Im:</b>	Courant maximal.
<b>Iph:</b>	Courant photogénéré.
<b>IQE:</b>	Rendement quantique interne.
<b>LPE:</b>	en phase liquide épitaxie.
<b>Mo:</b>	Molybdénium
<b>MOCVD:</b>	Metal Organic Chemical Vapor Deposition.
<b>NA/CZTS:</b>	Dopage de l'absorbeur CZTS.
<b>nc-Si:</b>	Silicium monocristallin.

## Liste de symbole

<b>Nd/CdS:</b>	Dopage de la couche tampon CdS.
<b>Nd/ZnO:</b>	Dopage de la couche fenêtre CdS.
<b>OTC:</b>	Oxide Transparent Conducteur.
<b>PECVD:</b>	Plasma- Enhanced Chemical Vapor Deposition.
<b>Pm:</b>	Puissance maximal.
<b>Poly-Si:</b>	Silicium Polycristallin.
<b>R (<math>\lambda</math>):</b>	le coefficient de réflexion de la surface
<b>RP:</b>	Résistance parallèle.
<b>RS:</b>	Résistance série.
<b>SCR:</b>	Region de Charge d'Espace
<b>Se:</b>	Selenium.
<b>SR (<math>\lambda</math>):</b>	Réponse Spectral
<b>VBO:</b>	Bande de valence offset.
<b>VCO:</b>	Tension en circuit-ouvert.
<b>VM:</b>	Tension maximal.
<b>WCdS:</b>	Epaisseur de la couche tampon CdS.
<b>WCIGS:</b>	Epaisseur de l'absorbeur CIGS.
<b>WZnO:</b>	Epaisseur de la couche fenêtre ZnO.
<b>ZnO:</b>	Oxide de Zinc.
<b><math>\lambda</math>:</b>	la longueur d'onde
<b><math>\eta</math>:</b>	Rendement de conversion électriques
<b><math>\rho</math>:</b>	Densité de charges électriques
<b><math>\alpha</math>:</b>	Coefficient d'absorption.
<b>G(x, <math>\lambda</math>):</b>	Taux de génération des paires électron-trous.
<b>Xcds:</b>	l'affinité électronique de CdS
<b><math>U_{n/cdS}</math> :</b>	Mobilité des électrons de la couche tampon CdS

# Sommaire

Introduction Générale.....1

## Chapitre I: Généralités sur les cellules solaires

I.1.Introduction.....3

I.2.Les semi-conducteurs.....3

I.2.1.Différent types de dopage.....4

I.2.2. Semi-conducteur dopé n .....4

I.2.3. Semi-conducteur dopé p .....5

I.3. La Jonction P-N.....5

I.4. Rayonnement solaire.....6

I.4.1. Masse d'air.....7

I.4.2. Spectre de référence.....7

I.5.La cellule solaire photovoltaïque.....8

I.5.1.Historique.....8

I.5.2.Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....9

I.5.3.Cellule solaire idéale.....10

I.5.4.Cellule solaire réelle.....10

I. 5.5.Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire.....11

I.5.5.1.Courant de court circuit  $I_{sc}$  .....11

I.5.5.2.Tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .....11

I.5.5.3. Réponse spectral, SR ( $\lambda$ ) par .....12

I.5.5.4. Puissance maximale  $P_m$ .....12

I.5.5.5.Facteur de forme FF.....12

I.5.5.6.Rendement de conversion  $\eta$ .....13

I.6.Les différentes technologies des cellules photovoltaïques.....13

<b>I.6.1.Première génération: Silicium cristallin (mono et poly).....</b>	<b>13</b>
<b>I.6.1.1.Silicium monocristallin.....</b>	<b>14</b>
<b>I.6.1.2. Silicium polycristallin.....</b>	<b>15</b>
<b>I.6.2.1.CdTe / CdS.....</b>	<b>16</b>
<b>I.6.2.2. Cu (In) Se<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>.....</b>	<b>17</b>
<b>I.6.2.3.CZTS.....</b>	<b>18</b>
<b>I.6.3. Troisième génération .....</b>	<b>18</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>20</b>

## **Chapitre II: les cellules solaires Photovoltaïque à base de CZTS**

<b>II.1.Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2.Les couches minces.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2.1.Définition d'une couche mince.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2.2.propriétés des couches minces.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2.3.Application des couches minces.....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.4.technique de dépôt des couches minces.....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.4.1.Généralités.....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.4.2.Dépôt en phase vapeur physique (PVD).....</b>	<b>23</b>
<b>II.2.4.2.1.L'évaporation thermique.....</b>	<b>23</b>
<b>II.2.4.2.2.Implantations d'ions.....</b>	<b>25</b>
<b>II.2.4.2.3.Ablation laser.....</b>	<b>25</b>
<b>II.2.4.2.4.Epitaxie par jets moléculaires (MBE).....</b>	<b>25</b>
<b>II.2.4.2.5.Pulvérisation cathodique (Sputtering).....</b>	<b>26</b>
<b>II.2.4.3.Dépôt en phase vapeur chimique (CVD).....</b>	<b>27</b>
<b>II.2.4.3.1.Spray pyrolyse.....</b>	<b>28</b>
<b>II.2.4.3.2.Voie sol – gel.....</b>	<b>29</b>
<b>II.2.4.4.Méthode de préparation de couche mince Cu<sub>2</sub>-II-IV-S<sub>4</sub>.....</b>	<b>29</b>
<b>    1) Les approches à base de vide.....</b>	<b>29</b>
<b>    2) Les approches non-vides.....</b>	<b>29</b>

II.5.Hétérojonction.....	29
II.6.Les cellules solaires à base de CZTS.....	30
II.7.Les propriétés de CZTS.....	31
II.8.Les propriétés électrique.....	32
II.9.Les propriétés optique.....	33
II.10.Fabrication d'une cellule à base de $Cu_2 Zn Sn S_4$ .....	35
II.10.1.La couche absorbante.....	37
II.10.2.La couche tampon.....	37
II.10.3.La couche d'oxyde transparent conducteur (TCO).....	37
Références Bibliographiques.....	39

## **Chapitre III: le logiciel de simulation SCAPS**

III.1. Introduction .....	40
III.2. Propriétés des programmes SCAPS.....	38
III.3. Concepts de base.....	38
III.3.1 Définir le problem.....	42
III.3.2 Sélection des caractéristiques à simuler .....	42
III.3.3 Affichage des courbes simulées.....	42
III.4 Edition de la structure d'une cellule solaire.....	41
III.5 Contacts.....	44
III.6 Définition des couches.....	45
Références Bibliographiques.....	48

## **Chapitre IV: Résultats et discussion**

IV.1.Introduction.....	49
IV.2.Structure de la cellule à étudier.....	49
IV.3.Les paramètres du dispositif étudié.....	50
IV.4.Résultats et discussion.....	51

<b>IV.4.1.Effet de l'épaisseur de la couche tampon CdS (<math>W_{CdS}</math>).....</b>	<b>51</b>
<b>IV.4.2.Effet du dopage (<math>N_d</math>) de la couche tampon CdS.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.4.3.Effet de l'électronique affinité de la couche tampon CdS (<math>\chi_{CdS}</math>).....</b>	<b>56</b>
<b>IV.4.4.Effet de mobilité des électrons (<math>U_n</math>) de la couche tampon CdS.....</b>	<b>57</b>
<b>IV.4.Conclusion.....</b>	<b>61</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>62</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>63</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>65</b>

# Introduction général

# Introduction général

---

## Introduction général :

Il semble clair que la consommation d'énergie dans le monde à l'heure actuelle va croître en raison de la croissance de la population mondiale et l'explosion du développement industriel. Actuellement, la production d'énergie est principalement basée sur les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel ....) qui ne sont pas renouvelables, et qui sont des ressources de disponibilité limitée. Ainsi, il peut être la cause de nombreux problèmes environnementaux tels que la pollution par production de gaz à effet de serre .Il est donc important de développer de nouvelles sources d'énergie alternatives qui peuvent répondre à la demande croissante, et d'assurer le développement durable et la préservation de l'environnement. L'énergie solaire est l'une des candidats les plus promoteurs en tant que source d'énergie d'avenir. Cette énergie est une source inépuisable et propre. Elle est de plus en plus considérée comme source énergétique qui peut couvrir les besoins mondiaux en électricité. En effet, le rayonnement solaire peut être converti en électricité grâce à des dispositifs appelés cellules solaires photovoltaïques.

Les cellules solaires photovoltaïques (PV) présentent beaucoup d'avantages. Elles sont élégantes, non polluants, silencieux et sans pièces rotatives. La production de l'électricité photovoltaïque répond actuellement à moins de 0,1% de la demande mondiale d'électricité [1]. Ceci est dû principalement à la différence du coût entre les technologies solaires et les technologies les plus conventionnels à base de carbone. Plus de 85% de l'industrie photovoltaïque (PV) est actuellement dominée par la technologie à base de silicium monocristallin et poly cristallin (multi cristallin) dite de première génération [1], vu la stabilité et le rendement record de cellules solaires PV à base de ces deux matériaux semi-conducteurs ; elles sont de l'ordre 25,0% et 20,4% respectivement [2]. On note, aussi, le haut développement de la physique et la technologie du silicium notamment en microélectronique. Cependant, cette technologie repose sur un matériau absorbant à bande interdite indirecte, nécessitant ainsi une couche épaisse pour absorber une fraction importante du rayonnement solaire incident (entre 100  $\mu\text{m}$  et 300  $\mu\text{m}$  en supposant qu'il n'y a pas de piégeage de la lumière incorporée dans la conception de la cellule).

De nombreuses cellules photovoltaïques ont vu le jour pour exploiter au mieux la lumière du Soleil au travers de panneaux solaires. Afin de produire de l'électricité, silicium, terres rares ou plastiques sont employés, mais chaque technologie a des atouts et des faiblesses dans ce domaine prometteur.



# Introduction général

---

Le cuivre, le zinc, l'étain, le soufre et le sélénium forment ensemble un matériau semi-conducteur de choix, puisqu'il est fait d'éléments courants, non toxiques et sont sans danger pour l'environnement [3]. Dommage que le rendement affiché par les cellules CZTS ne soit pas plus élevé... Il devrait augmenter dans les années à venir, ce qui en fait un matériau absorbant prometteur pour les technologies photovoltaïques en couches minces [4,5]. Le CIGS et le CdTe auront-ils bientôt un remplaçant de premier ordre ? Les cellules CZTS possède des propriétés optiques et électroniques similaires à celle au CIGS, tout en ayant l'avantage d'être composée d'éléments abondants (à l'inverse du tellure ou de l'indium) et non toxiques pour la santé ou l'environnement (le cadmium peut être banni). Par ailleurs, ses constituants de base seraient cinq fois moins coûteux que ceux de la filière CIGS.

Afin d'améliorer les performances d'une cellule solaire photovoltaïque, il est nécessaire de l'optimiser par simulation. L'optimisation par simulation, vu qu'elle suit un modèle mathématique du système réel, elle a l'avantage d'être facile, ne coûtant pas chère et nous pouvons prédire les paramètres optimales qui contribuent à la fabrication d'une cellule ayant les meilleurs performances.

L'objectif de ce présent mémoire est de faire une modélisation de l'effet des épaisseurs sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de CZTS en vue d'optimiser par simulation en utilisant le logiciel SCAPS 1D pour simuler les caractéristiques physiques (densité de courant de court-circuit, tension de circuit ouvert VCO, Facteur de forme FF, Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée ( $\eta$ )).

La présentation de cette étude a été répartie sur quatre chapitres avec au début une présentation générale et se termine à la fin par une conclusion.

- ❖ Le premier chapitre: on fait appel aux notions générales sur l'énergie photovoltaïque
- ❖ Le second chapitre : est une recherche bibliographique sur les couches minces CZTS; leur méthode de dépôt et leur différentes propriétés.
- ❖ Le troisième chapitre : nous présenterons le logiciel de simulation SCAPS.
- ❖ Et enfin, Dans le dernier chapitre nous présenterons et discuterons les résultats obtenus

# Bibliographie

---

- [1] 2010 Solar Technologies Market Report, US Département of Energy, NREL, 1-136 (2011).
- [2] Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W. and Dunlop E.D, Solar cell efficiency tables (version 44); Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 22, 701–710 (2014).
- [3] 2010 Solar Technologies Market Report, US Department of Energy, NREL, 1-136 (2011)
- [4] Katagiri H.; Développement of CZTS-based thin film solar cells; Thin Solid Films, 517, 2455– 2460 (2009).
- [5] Mitzi D. B., Gunawan O., Todorov T. K., Wang K. and Guha S.; Solar Energy Materials and Solar Cells, 95, 1421–1436 (2011).

# **Chapitre I:**

## **Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques**

## I.1.Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons rappeler les notions fondamentales à comprendre dans le domaine de cellules solaires photovoltaïques pour entamer le sujet de recherché

## I.2.Les semi-conducteurs:

Les semiconducteurs sont des éléments naturels. Sensibles à la lumière visible et invisible (rayon ultraviolet, infrarouge...).

On appelle semiconducteur un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité ( $\sigma$ ) des isolants sont comprises entre  $1 \times 10^{-11}$  et  $1 \times 10^{-19}$  S/cm et celles des conducteurs entre  $6 \times 10^7$  et  $1 \times 10^4$  S/cm. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre  $1 \times 10^3$  et  $1 \times 10^{-6}$  S/cm, on les appelle des semi-conducteurs. On sait qu'au sein des structures cristallines de la matière, les électrons ont des énergies distinctes qui appartiennent à certains ensembles de valeurs appelées bandes d'énergies.

Les bandes de faible énergie correspondent à des électrons participant au maintien de la structure cristalline, ce sont les électrons dits de valence. Les bandes de hautes énergies correspondent à des électrons quasi "libres" de se détacher de la structure et qui par conséquent peuvent participer à une conduction électrique. On distingue isolants et conducteurs par la différence d'énergie qu'il existe entre ces bandes, appelée le "gap".

Dans les isolants, la bande de conduction est habituellement vide, le fait d'apporter assez d'énergie pour y faire passer des porteurs en masse s'appelle le "claquage" et c'est un phénomène généralement destructif.

Dans les conducteurs, la conductivité diminue avec la température puisque l'agitation thermique pénalise le mouvement organisé des porteurs libres.

Dans les semi-conducteurs, le gap assez faible permet à des porteurs de passer dans la bande de conduction simplement grâce à leur énergie d'agitation thermique, ainsi le semiconducteur "intrinsèque" en tant que mauvais conducteur ou mauvais isolant a lui une conductivité qui augmente avec la température.

Les matériaux semi-conducteurs naturels, dits "intrinsèques", sont: le Silicium (Si) et le Germanium (Ge). [1]

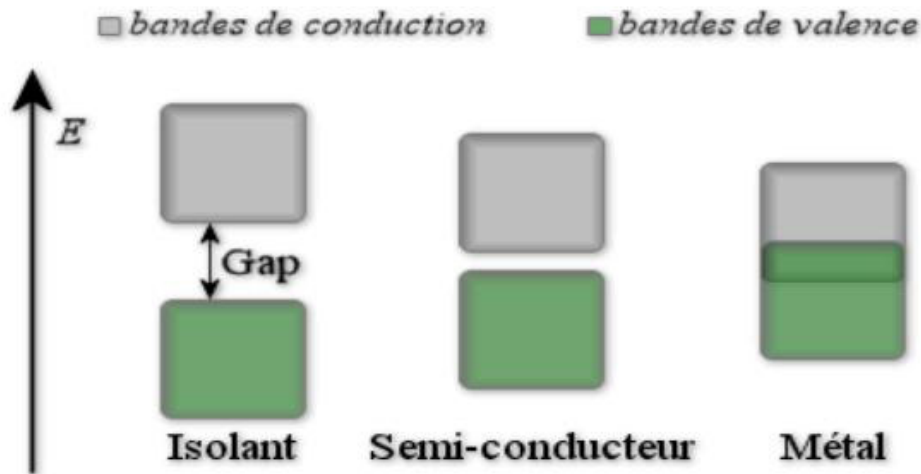


Figure (I.1): schéma qui représente l'énergie du gap d'un semi-conducteur [1]

### I.2.1. Différent types de dopage :

Les semiconducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels; Ils servent de base aux semiconducteurs dopés: on y rajoute des impuretés pour modifier leur comportement. Il existe deux types de semiconducteurs extrinsèques [1]

### I.2.2. Semi-conducteur dopé n:

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

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

$$n = n_0 + N_D \quad (I.1)$$

où  $n_0$  est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

### I.2.3. Semi-conducteur dopé p:

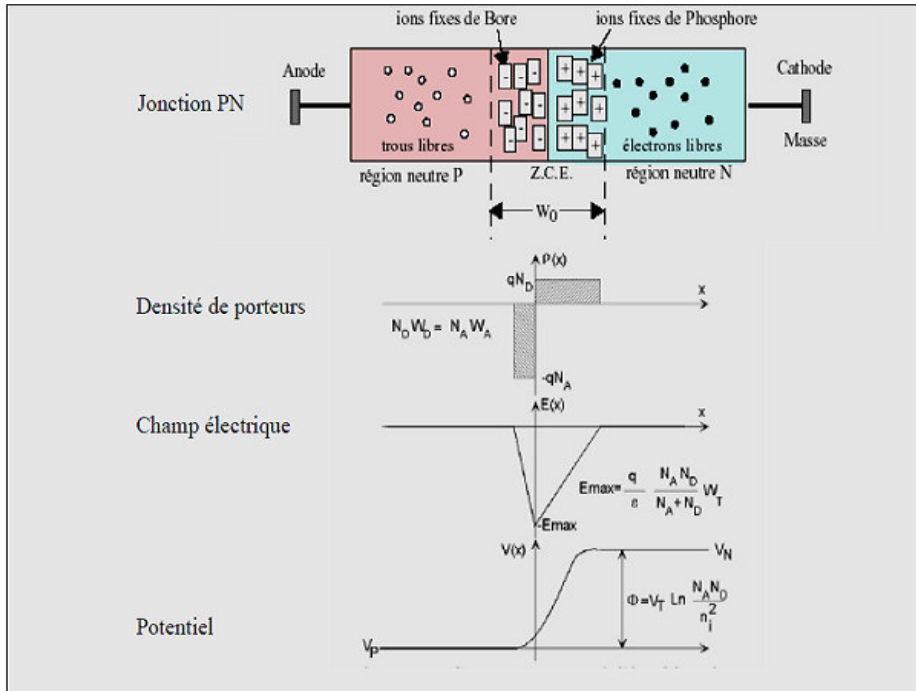
Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électrons. La concentration d'accepteurs sera donc supérieure à la concentration de donneur ( $N_A - N_D$ ). De la même façon que pour le semi-conducteur dopé p, la concentration en trous du semiconducteur sera :

$$p = p_0 + N_A \quad (I.2)$$

où  $p_0$  est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

### I.3. La Jonction P-N:

Une jonction P-N est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte (figure I.2), c'est-à-dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique  $E$  qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [2]



**Figure (I.2):** Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique. [2]

Où:  $\rho$ : la densité volumique de charge.

E: la courbe de champ électrique.

V: potentiel d'une jonction PN.

## I.4. Rayonnement solaire:

Sans le system solaire le soleil donne de façon contenue une énorme quantité d'énergie radiante et la terre reçoit une petite partie de cette énergie en moyenne, 1367 watts atteignent chaque mètre carré de la couche atmosphérique externe.

En effet, en traversant les différentes couches de l'atmosphère, une partie de l'énergie solaire s'atténue: certaines longueurs d'onde du spectre solaire sont absorbées par des composants comme la couche d'ozone (absorption des rayons de l'UV jusqu'au visible) ou comme la vapeur d'eau qui possède plusieurs raies dans le visible et dans l'infrarouge [2].

### I.4.1.Masse d'air:

Pour tenir compte de la longueur effective parcourue à Travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct, on introduit la notion de masse d'air (AMx) (Figure I.3). Elle correspond à la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. La masse d'air est exprimée comme un multiple du parcours traversé en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb [2].

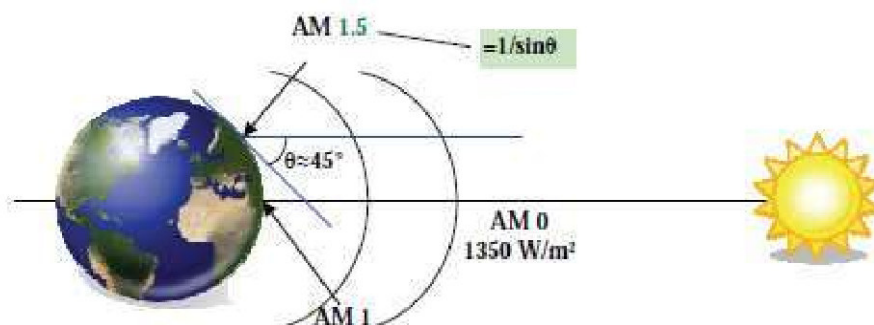


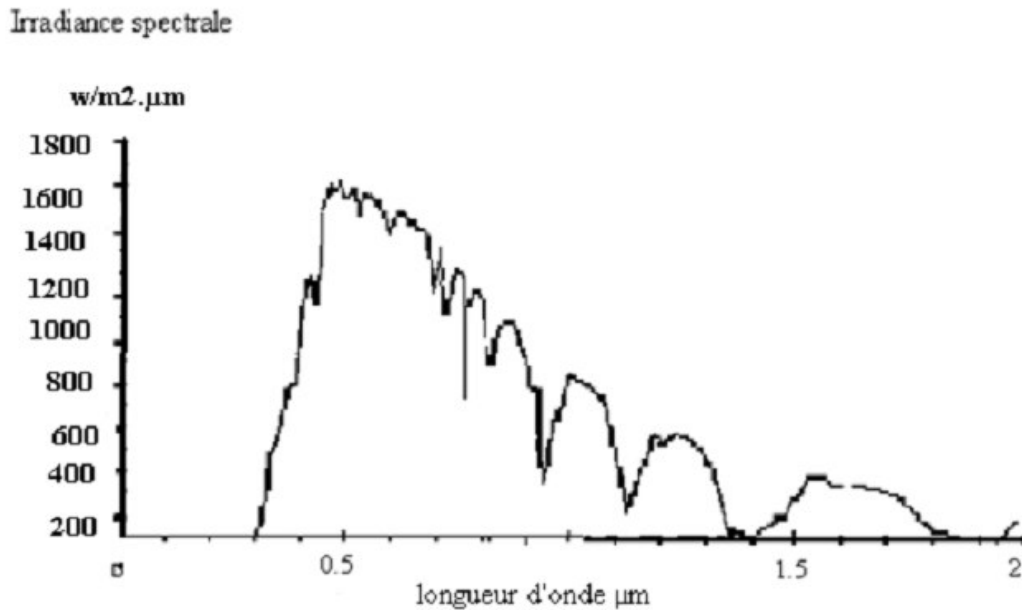
Figure (I.3): Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre [2]

### I.4.2.Spectre de référence :

Hors atmosphère, l'amplitude et la distribution du spectre du rayonnement solaire sont parfaitement définies. Il n'en est pas de même au niveau du sol ou en raison de multiple paramètres atmosphériques, cette amplitude et cette distribution spectrale peuvent varier. Il est donc nécessaire de définir un spectre de référence, qui puisse être adopté au niveau international pour que des mesures comparatives soient possibles [2].

Le spectre représenté sur la figure (I-4) donne en fonction de la longueur d'onde l'irradiance spectral, c'est-à-dire la puissance associée au rayonnement par tranche de longueur d'onde et par unité de surface. Ce spectre de référence correspond, à la traversée par le rayonnement d'une couche atmosphérique de référence specter AM1, 5.





*Figure (I.4): Spectre solaire AM1.5*

### I.5. La cellule solaire photovoltaïque:

#### I.5.1. Historique:

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque:

En 1839: Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1875: Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

## Chapitre I:Généralités sur les cellules solaires

---

En 1954: Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

En 1958: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

En 1973: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

En 1983: La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

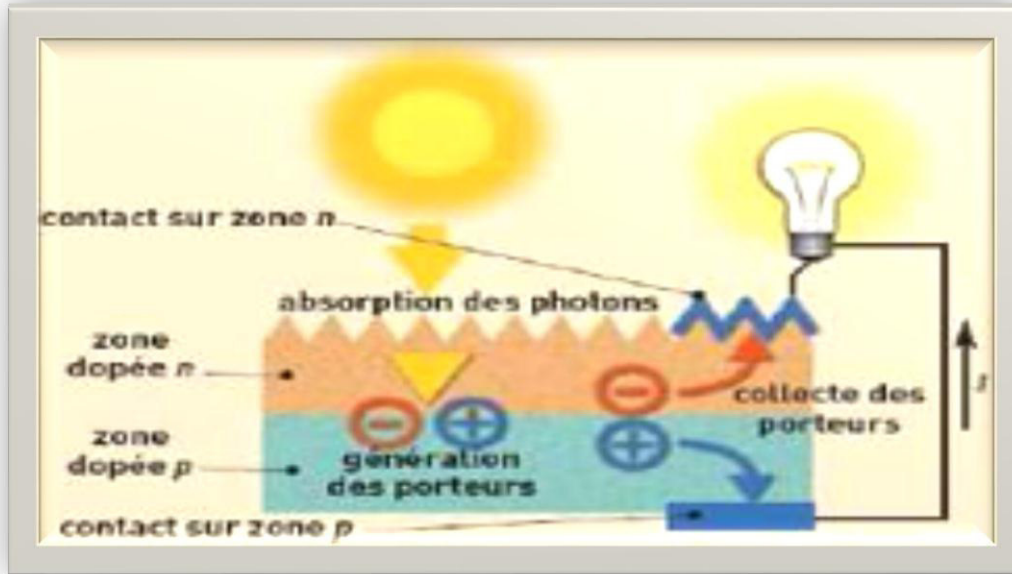
En 1995: Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés".

### **I.5.2.Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:**

Le principe de son fonctionnement photovoltaïque est le suivant (Figure I.5):

1. Les "grains de lumière"- les photons - heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couche mince
2. Ils transfèrent leur énergie aux porteurs de charge présents dans la matière, qui se mettent alors en mouvement dans une direction particulière.
3. Le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante:



*Figure (I.5): Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [3]*

### I.5.3. Cellule solaire idéale :

Si la caractéristique de la jonction est de la forme:  $I = I_s (e^{\frac{q \cdot v}{nkt}} - 1)$ , on peut admettre qu'en présence de lumière il y a apparition d'un photocourant supplémentaire,  $I_{ph}$  dont le sens est opposé au courant direct. En branchant un circuit extérieur sur la cellule claire, on recueille ce courant. Le courant sous lumière vaut [4]:

$$I = I_{ph} - I_s (e^{\frac{q \cdot v}{nkt}} - 1) \quad (I.3)$$

et la tension  $V$  est donnée par:

$$V = \frac{nkt}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1 \right) \quad (I.4)$$

$n$ : est le facteur d'idéalité de la diode ( $1 < n < 2$ ).

### I.5.4. Cellule solaire réelle :

La figure (I-6) présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle, où deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles vont influencer la caractéristique IV de la cellule. La première est la résistance série  $R_s$ , cette résistance est liée de l'impédance des électrodes et

## Chapitre I: Généralités sur les cellules solaires

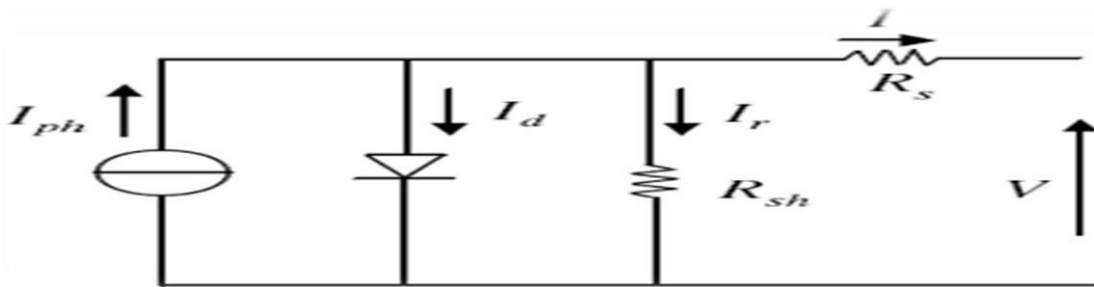
de la base, il en résulte que la tension  $V$  aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction.

La deuxième est la résistance shunt  $R_{sh}$  qui correspondre aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant  $I_{ph}$  sera drivée par cette résistance et il ne pourra être délivré à la charge.

L'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  s'écrit donc [3]:

$$I(V) = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.5)$$

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(v+R_s)}{nkt}} - 1 \right) - \frac{v+R_s}{R_{sh}} \quad (I.6)$$



*Figure (I.6): Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. [3]*

### I.5.5. Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire :

#### I.5.5.1. Courant de court circuit $I_{sc}$ :

Le courant de court circuit est le courant débuté par la cellule sous éclairnement en court circuitant la sortie. C'est-à-dire que:  $I_{sc} = I(V=0)$  Pour une cellule solaire idéale le courant de court circuit est égal au courant photovoltaïque  $I_{ph}$ .

#### I.5.5.2. Tension de circuit ouvert $V_{co}$ :

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

$$V_{co} = \frac{kt}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \approx V_{co} = \frac{kt}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (I.7)$$

### I.5.5.3. Réponse spectrale, SR ( $\lambda$ ) par:

La réponse spectrale est donnée par:

$$SR(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{qF(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad (I.8)$$

### I.5.5.4. Puissance maximale $P_m$ :

Si  $V_m$  et  $I_m$  sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de côté  $V_m$  et  $I_m$  qu'on peut inscrire sous la courbe I(V) (Fig. I-7).

$$P_m = I_m V_m \quad (I.9)$$

### I.5.5.5. Facteur de forme FF :

Le facteur de forme permet de qualifier la qualité de la cellule PV. Le facteur de forme se calcule à partir de la formule (I.10). C'est le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule sur le produit de  $I_{sc}$   $V_{co}$

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} V_{co}} \quad (I.10)$$

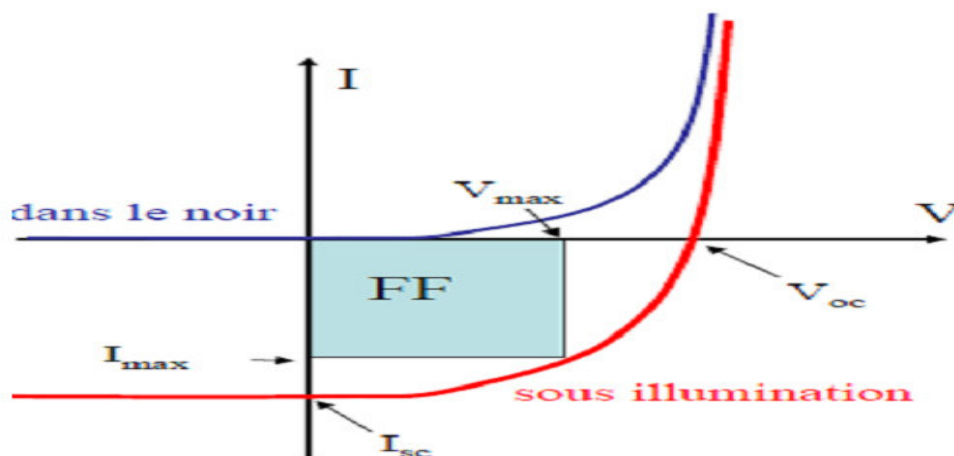


Figure (I.7): Les courbes  $I = f(V)$ .

### I.5.5.6. Rendement de conversion $\eta$ :

A partir de ces paramètres ( $I_{sc}$ ,  $V_{co}$  et FF) il est possible de déterminer le rendement de la cellule. C'est le paramètre le plus important puisqu'il permet d'évaluer les performances de la cellule PV. C'est le rapport entre la puissance générée par la cellule sur le produit de ( $P_{cell}$ ) et la puissance incidente ( $P_{in}$ ) du rayonnement lumineux éclairant la cellule. Il se calcule selon la formule suivante:

$$\eta = \frac{P_{cell}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{co} FF}{P_{in}} \quad (I.11)$$

### I.6. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques:

La technologie de cellules photovoltaïques est basée sur le choix du matériau absorbant. Sur le plan technologie et industriel, il existe plusieurs matériaux qui peuvent entrer dans fabrication de ces cellules est le silicium (Si) sous ses diverses formes. Comme illustre sur schéma (I.8).

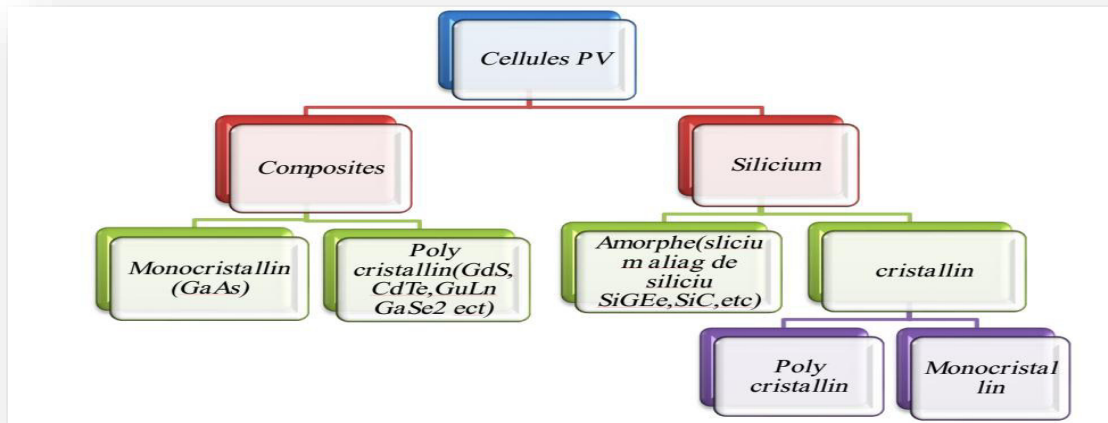
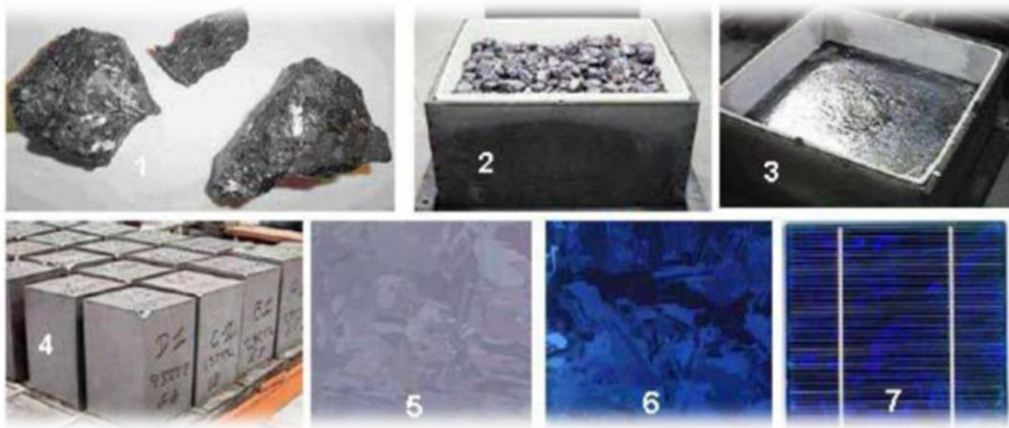


Figure (I.8): Différentes technologies des cellules photovoltaïques

#### I.6.1. Première génération : Silicium cristallin (mono et poly) :

Cette génération de cellule repose sur les wafers (fine tranches) de silicium cristallin (figure I.9). Ces wafers sont sciés dans des lingots de silicium. Ces lingots sont le résultat d'un processus de purification de manière à obtenir un matériau contenant 99.99999 de Silicium.



**Figure (I.9).** Etape de fabrication des cellules : (1) minerai de Silicium – (2) raffinage (pour augmenter la pureté) – (3) Silicium en fusion donnant des lingots (4) après solidification – (5) wafer obtenu par sciage du lingot – (6) traitement de surface par procédés physico chimiques et (7) cellule finie avec électrodes.

### I.6.1.1. Silicium monocristallin :

L'oxyde utilisé dans l'industrie photovoltaïque est le silane ( $\text{SiH}_4$ ) Son réalisation à partir des plaquettes de silicium qui sont produites à partir des lingots de silicium fabriqués selon le procédé de croissance Czochralski. [4]

Cette cellule a:

Les avantages: Semiconducteur intrinsèque, La meilleure efficacité (14-16 eV), longue durée de vie des cellules, Rendement maximal de 24.7 et rendement des cellules commerciales de (17-20 %).

Les inconvénient: gap (1.1 eV) inférieur au gap idéal (1.5 eV), nécessité d'une grande pureté du silicium, (fabrication)

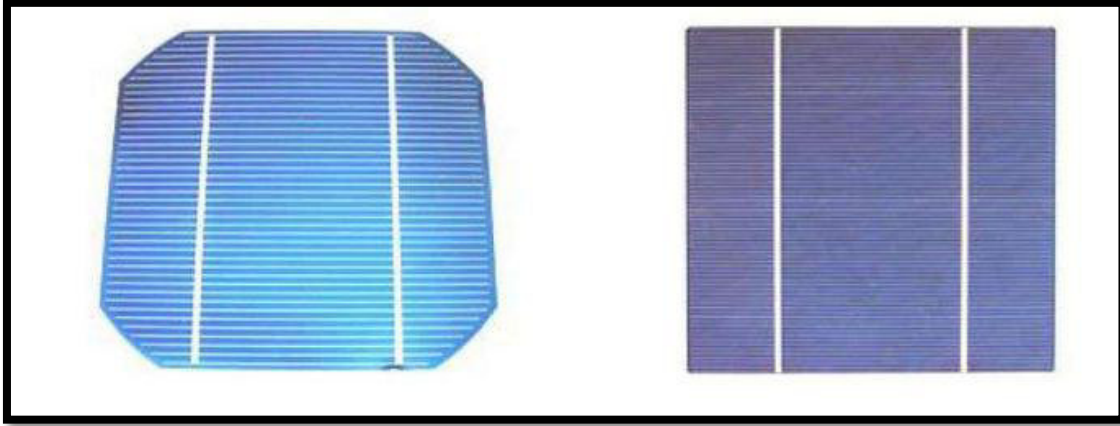
### I.6.1.2. Silicium polycristallin:

Se présente comme une alternative au Si monocristallin. Il est généralement obtenu par refonte des chutes de silicium de l'industrie de la microélectronique. Il a un rendement d'une

## Chapitre I: Généralités sur les cellules solaires

cellule: 20.3 % au laboratoire et: entre 10 et 12 % à l'industrie. Son inconvénient est le gap de 1.1eV inférieur au gap idéal (1.5eV) [5].

Une cellule en Si PC est montrée dans la figure (I.10).



*Figure (I.10): Cellule monocristallin et polycristalline*

### **I.6.2. Deuxième génération: CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin :**

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semiconducteurs en couches minces (thin film). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue: -CdTe: Cadmium Telluride (Telluride de cadmium), CIS / CIGS: Copper Indium Gallium Selenide, Silicium en couche mince: silicium amorphe  $\alpha$ -Si et microcristallin. Les points intéressants de cette filière sont [6]:

La faible quantité de matériau nécessaire à la fabrication.

Les méthodes de fabrication sont moins onéreuses et permettent d'utilisation des substrats flexibles.



### I.6.2.1. CdTe / CdS: [6]

Une cellule CdTe est constituée d'une couche de conducteur transparent sur un substrat de verre sur laquelle on dépose une couche de CdS (sulfure de cadmium) de type n, puis une couche de CdTe dopé p.

Les avantages de cette cellule sont:

- Un gap de 1.45 eV (idéal).
- Un semi-conducteur à gap direct  $\Rightarrow$  coefficient d'absorption  $> 10^4 \text{ (cm)}^{-1}$  pour la lumière visible  $\Rightarrow$  quelques  $\mu\text{m}$  suffisent à absorber plus de 90% des photons qui ont une énergie supérieure à 1.45
- La pureté et préparation facile.
- Une grande stabilité chimique et thermique.

et ses inconvénient sont:

- Les films CdTe de type p ont une résistance électrique relativement élevée, ce qui nuit aux rendements.
- Sensibilité de la cellule à la vapeur d'eau. - Cadmium est un métal lourd donc polluant.  
 $\Rightarrow$  Protection des employés durant la fabrication des cellules  $\Rightarrow$  Etude des impacts sur l'homme et l'environnement des panneaux: actuellement aucun effet néfaste n'a été rapporté.
- $\Rightarrow$  Recyclage en fin de vie.
- La quantité existante de cadmium est limitée

Un panneau constitué de cellules CdTe est montré dans la figure (I.11).



*Figure (I.11): modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%.*

### **I.6.2.2. Cu (In) Se<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>:**

Une cellule CIS (Di Séléniure de Cuivre Indium) est composée d'un monocristal CuInSe<sub>2</sub> de conductivité de type p sur lequel une couche mince de CdS de 5-10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur est déposée. Ces cellules CIS peuvent être améliorées par les cellules CIGS (Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>).

Ce type a des avantages qui caractérisent:

Ajustement du gap en adaptant le rapport Atomique In/Ga  $\Rightarrow$  optimisation de l'absorption des spectres lumineux.

Le CIS a le meilleur coefficient d'absorption dans le domaine visible 99% des photons, incidents sont absorbés dans le premier micron du matériau d'où la faible épaisseur de la couche de CIS (1,5-2)  $\mu\text{m}$ .

Rendement : 19.2% [7]

Leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couches minces : 12%

Inconvénient :

Procédé de fabrication plus coûteux parmi les couches minces à cause de l'utilisation des métaux rares comme l'indium

Le Sélénium est toxique.

### I.6.2.3. CZTS:

Le film mince à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) comme absorbeur est très prometteur. Ce film semi-conducteur peut être obtenue en remplaçant la moitié des atomes d'indium dans  $\text{CuInS}_2$  chalcopyrite par le zinc, et en remplaçant l'autre moitié avec de l'étain. [8]

Les avantages de CZTS sont:

- Un gap de 1,5 eV.
- L'indice de réfraction est de 2,07.
- Le coefficient d'absorption et de la photoconductivité et de l'ordre de  $10^4$
- Des éléments constitutifs de CIGS sont chers (In et Ga) et toxiques (Se). En revanche CZTS est un matériau semi-conducteur comprenant à base d'éléments abondants et donc à faible coût et non-toxiques.

### I.6.3. Troisième génération:

L'impact environnemental d'une cellule doit être pris en compte lors de sa fabrication. Tenter de régler le problème de l'approvisionnement en électricité propre (du point de vue émission de gaz à effet de serre) en utilisant des matériaux toxiques ou non recyclables n'est pas une option: c'est ce qui limite les cellules CdTe dans leur développement, par exemple [9].

Inconvénient majeurs des cellules CIGS provient du fait que le sélénium, l'indium et le gallium sont des matériaux dont les ressources sont limitées. Cela entraîne évidemment des coûts de fabrication plus importants car ces matériaux étant rares, ils sont chers.

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

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

## Chapitre I: Généralités sur les cellules solaires

---

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

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

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

# Bibliographie

---

- [1] H. Mathieu, «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», Dunod, Paris,
- [2] M.Melouah, S.Bakhti, «Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base du  $\text{CuZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ », Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016
- [3] Le Photovoltaïque, Module 3, Fonctionnement et Technologies Novembre 2010 page 3, 4, 5,6/10.
- [4] [http://www.bulletins-electroniques.com /rapports/smm06\\_054.htm](http://www.bulletins-electroniques.com /rapports/smm06_054.htm).
- [5] <http://www.palais de couvert.e.fr/file admin /fichiers /infos sciences /revue/complements /344,345 jan, fev 07/344,345 conversion photovoltaïque .pdf> [06]
- M. Fassi, Ramzi, « Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ », Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, (2012).
- [7] A.bouraiou, "Elaboration et Caractérisation des Couches Minces  $\text{CuInSe}_2$  par Electrodeposition", thèse de doctorat, université Constantine, (2009).
- [8] A.Belalem, W.Sandali, «Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base du  $\text{CuZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$  », Universités Kasdi Merbah Ouargla, 2017
- [9] M. Selma, «Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couche minces a base de CIS et CIGS, Mémoire de Magister, Université Abou Bakr Blekaid Telemcen, (2012).
- [10] Loïc Bailly, « Cellules Photovoltaïques Organiques Souples A Grande Surface », Thèse de doctorat à l'université Bordeaux I, (2010)
- [11] Bernard SPINNER, Edouard FABRE, Jean Claude MULLER, Une Politique De Recherche Et Développement Pour Des Energies Durables, « Les Composants photovoltaïques pour la production d'énergie » p104, 2003.

## **CHAPITRE II :**

### **Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS**

## **CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS**

### **II .1.Introduction :**

Parmi les différentes couches minces candidats de cellules solaires, le (CZTS) a été  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  identifié comme un matériau à haut potentiel en termes d'énergie photovoltaïque et bénéficiant de ressources naturelles importantes pour répondre à un accroissement de la demande mondiale en énergie.

Ce chapitre est consacré essentiellement sur les notions des couches minces, les différentes méthodes de dépôt des couches minces, et ensuite l'utilisation du matériau CZTS dans une cellule photovoltaïque.

### **II .2 .Les couche minces :**

#### **II. 2. 1. Définition d'une couche mince :**

Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat". L'une des dimensions de cette couche est son épaisseur qui a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques " nm "a quelques " $\mu\text{m}$ " (typiquement ce sont des couches de 10 ... et100 nanomètres d'épaisseur). Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne est une perturbation de la majorité des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés d'un corps massif très différentes [1].

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

#### **II. 2. 2. Propriétés des couches minces :**

Une couche dite mince est un objet dont l'une des dimensions géométriques est très faible Cela explique un rôle essentiel des interactions surfaciques dans l'établissement des propriétés physiques de ces objets. D'ailleurs, c'est la raison principale pour laquelle les propriétés

## **CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS**

physiques des couches minces diffèrent de manière significative de celles des corps massiques. L'aire totale des grains cristallins est supérieure à celle des deux faces d'une couche mince.

En général, les couches minces utilisées dans les applications pratiques sont polycristallines ; leur état est métastable, hors de l'équilibre et éloigné du minimum énergétique. D'un point de vue microscopique, elles se composent de grains cristallins enrichis par des défauts qui sont séparés par des zones enrichies par des impuretés. Les dimensions des grains cristallins sont du même ordre de grandeur que l'épaisseur de la couche mince.

La microstructure des couches minces est extrêmement sensible aux propriétés chimiques et physiques du matériau mis en jeu lors de sa croissance, ainsi que des conditions physiques de dépôt à chaque étape d'évolution de la couche mince. En particulier, les propriétés des couches minces sont très sensibles à la nature du substrat sur lequel elle est formée. Cela explique, par exemple, le fait que des couches minces d'un même matériau et d'une même épaisseur peuvent présenter des propriétés physiques différentes sur des substrats de nature différente.

L'épaisseur de percolation, au-delà de laquelle les îlots coalescent et la couche mince devient continue, varie essentiellement suivant la nature du matériau, la vitesse du dépôt, la température du substrat, l'adhérence de sa surface.

### **II. 2. 3. Applications des couches minces :**

Les couches minces sont utilisées depuis des centaines d'années. Elles sont utilisées dans des domaines d'applications aussi variés que l'optique avec les couches réfléchissantes (miroirs) et antireflets [2] ; l'électricité avec les couches conductrices métalliques, la mécanique avec les couches abrasives ou résistantes à l'usure et la chimie avec les couches protectrices. Les couches minces ont connu un essor industriel important au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle, majoritairement dans les applications optiques, puis microélectronique.

### **II .2 .4 Techniques de dépôt des couches mince :**

#### **II.2.4.1. Généralités :**

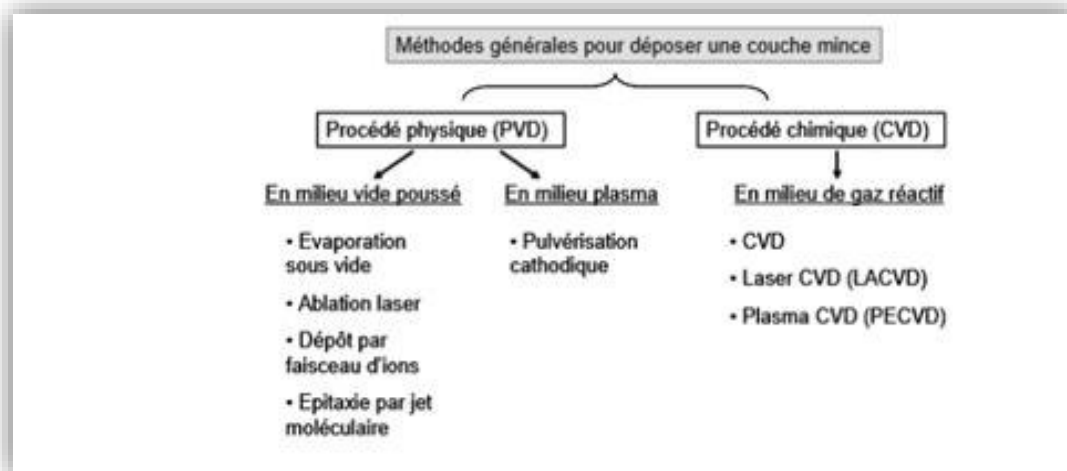
Deux grandes familles regroupent l'essentiel des techniques de dépôt en phase vapeur :



## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS

- Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD : Chemical Vapeur Déposition) : la vapeur produite résulte d'une réaction chimique ou de la décomposition d'une molécule.
- Le dépôt physique en phase vapeur (PVD : Physical Vapeur Déposition) : la vapeur provient d'un phénomène purement physique.

La classification des différentes techniques est présentée sur la Figure II.1 [3].



*Figure II.1: Méthodes générales de dépôt de couches minces en phase vapeur sous vide [3]*

### **II .2.4.2. dépôts en phase vapeur physique (PVD):**

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

Les principales techniques de PVD sont : l'évaporation sous vide, l'ablation laser, le dépôt par faisceau d'ions, l'épitaxie par jet moléculaire et la pulvérisation cathodique.

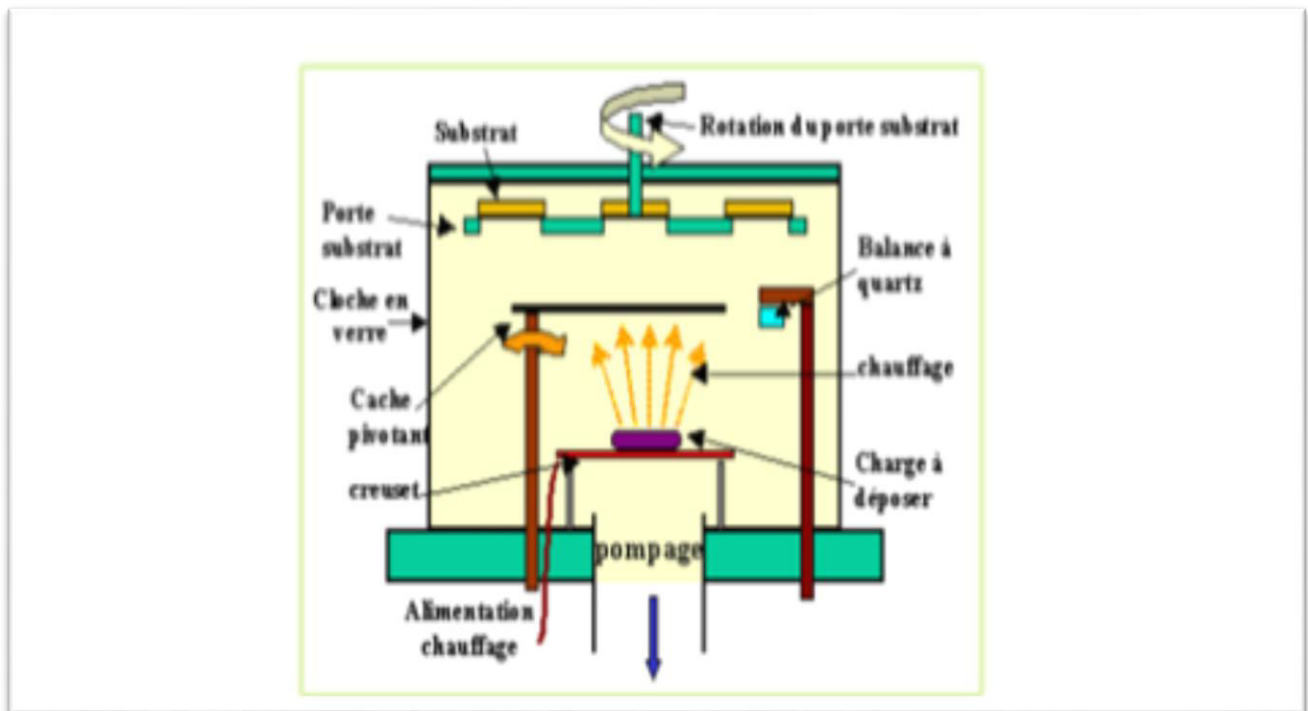
#### **II .2 .4.2.1. L'évaporation thermique :**

La technique d'évaporation thermique est très simple et consiste simplement à chauffer par effet Joule un matériau qui, vaporisé, va se déposer sur les substrats. La charge du matériau à déposer est placée dans un creuset (en tungstène). Cette technique est applicable notamment pour le dépôt d'aluminium, la température d'évaporation de ce métal étant inférieure à la température de fusion du creuset (en tungstène). La figure [II.1] montre le principe de cette

## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS

technique ; le bâti est similaire à celui de la technique de dépôt par canon à électrons. Afin d'améliorer l'homogénéité des couches déposées (très faible variations d'épaisseur), on déplace en permanence les substrats. Dans le cas du bâti ci-dessous, le porte substrat est tournant.

Afin de contrôler l'épaisseur des couches déposées, on utilise une balance à quartz. Le principe de celle-ci consiste à détecter la dérive de la fréquence d'oscillation du quartz par la modification de sa masse lors de la croissance de la couche déposée (le dépôt s'effectue aussi sur le quartz). C'est donc une mesure électrique qu'il faut bien évidemment étalonner. A chaque début d'expérience, la fréquence de référence est redéfinie. En mesurant le décalage de fréquence en fonction du temps, on peut aussi déterminer la vitesse de croissance des couches déposées.



*Figure II.2 : Bâti de dépôt évaporations thermique*

### **II.2.4. 2.2 .Implantation d'ions :**

C'est un procédé de haute énergie. Des espèces atomiques choisies sont ionisées puis accélérées dans un champ électrique à des énergies allant de 10 à 1000 Kev. La pénétration des ions dans le matériau est de 1 à 2  $\mu\text{m}$ . Les principaux avantages de cette technique sont :

- Hautes températures non requises donc absence de distorsions thermiques

## **CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS**

- Absence d'interface donc pas de problème de décohésion
- Espèces implantées finement dispersées
- Peut être suivi et contrôlé électriquement pendant tout le traitement.

### **II.2.4. 2.3. Ablation Laser :**

Il s'agit d'une évaporation sous vide, l'énergie étant apportée par l'impact d'un faisceau laser de forte intensité envoyé sur une cible constituée du matériau que l'on veut déposer sur le substrat.

Un avantage considérable est de pouvoir utiliser des cibles de très petites dimensions, l'ablation se produisant sur une surface de quelques millimètres carrés. En fait, le processus d'ablation-dépôt est plus complexe, puisqu'il se forme localement une plume de plasma et que les particules éjectées ne sont pas en équilibre thermodynamique. Cette méthode présente l'avantage de ne nécessiter aucune source thermique polluante à l'intérieur de l'enceinte, c'est un avantage très significatif pour les dépôts effectués dans un environnement ultravide.

### **II.2.4. 2.4. Epitaxie par jets moléculaires (MBE : Moléculaire beam epitaxy) :**

La technique permet de réaliser des dépôts monocristallins et des homo-épitaxies (matériau A sur support A) à basse température (400-600°C pour Si). Les basses températures d'épitaxie impliquent de travailler avec des vitesses lentes (quelques Å/s) afin de laisser le temps aux atomes arrivant à la surface de migrer par diffusion de la surface vers des sites cristallographiques. Pour obtenir des films purs, compte tenu de ces vitesses lentes, il est donc nécessaire de travailler avec des vides très poussés, appelé UHV (Ultra-High-Vacuum), plus précisément à 10<sup>-10</sup> torr. Le principe de dépôt est d'évaporer le matériau que l'on veut déposer en chauffant par effet Joule, par rayonnement (cellule Knudsen) ou par bombardement électronique (canon à électrons). En outre, sous un UHV, le libre parcours moyen parcouru par un atome est très grand, ce qui implique que les flux d'atomes évaporés sont directionnels, les atomes se déplaçant en ligne droite sans aucun choc avant de se déposer sur le substrat. C'est pour cette raison qu'on parle de jets moléculaires ou atomiques. Un tel vide impose de grosses contraintes (problème des frottements mécaniques sous UHV, dégazage, transfert des échantillons) qui rend cette technique lourde et demandant un savoir-faire important.

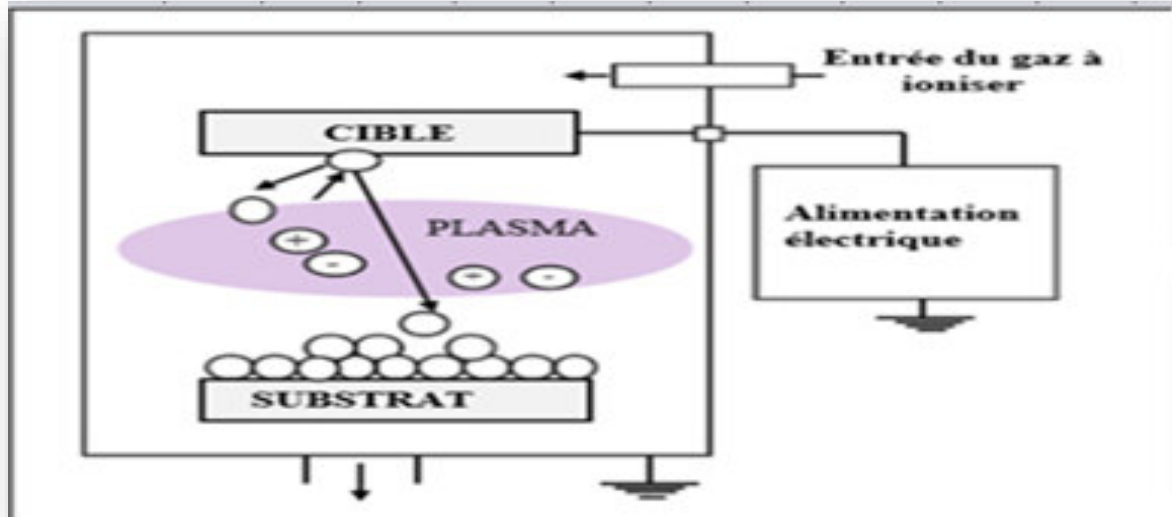
## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS

Néanmoins, cette technique permet de réaliser couramment des hétéro-épitaxies (dépôt B sur un support A différent), compte tenu des faibles températures d'épitaxie qui éliminent le mécanisme d'inter diffusion de A et B. De plus, elle présente l'avantage d'utilisation des techniques d'analyses in situ afin d'obtenir des informations sur la structure, la topographie et la composition de la couche durant la croissance.

### **II. 2. 4. 2. 5. Pulvérisation cathodique (Sputtering) :**

Le principe de base de la pulvérisation cathodique est de bombarder une cible (cathode) à l'aide d'un gaz neutre (en général l'argon) afin de pulvériser les atomes constituant la cible. Ces atomes pulvérisés vont alors se déposer sur le substrat qui joue le rôle d'anode. Une tension de quelques KV appliquée entre l'anode et la cathode entraîne une décharge électrique dans le gaz sous basse pression (10 à 500 m torr). En pulvérisation cathodique, on distingue la pulvérisation simple et la pulvérisation réactive. Dans la pulvérisation simple l'atmosphère de la décharge est chimiquement neutre c'est à dire on utilise un gaz d'argon pur pour crée le plasma. Dans le cas de la pulvérisation cathodique réactive l'atmosphère du plasma est réactive, c'est à dire on introduit un certain pourcentage de gaz actif dans l'argon (de l'oxygène O<sub>2</sub> ou de l'azote N<sub>2</sub>). Dans chacun de ces deux cas, la cible peut être constituée d'un élément simple ou bien d'un composé. Il existe différents types de systèmes de pulvérisation cathodique, suivant le mode de création du plasma ou la nature de la cible (conductrice ou isolante) : diode à courant continu, triode En pulvérisation courant continu, ou haute fréquence

## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS



*Figure II. 3: Principe d'installation de dépôt par pulvérisation*

### **II .2.4.3. Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :**

Le dépôt en phase vapeur chimique (CVD) est une méthode dans laquelle le ou les constituants d'une phase gazeuse réagissent pour former un film solide déposé sur un substrat. Les composés volatils du matériau à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur et introduit dans l'enceinte où sont placés les substrats. Le film est obtenu par réaction chimique entre la phase vapeur et le substrat chauffé. La réaction chimique peut être activée à l'aide d'un plasma. Cette méthode s'appelle CVD plasma ou (PECVD Plasma Evapore Déposition). Dans ce cas, il y a création en plus de particules énergétiques. Les avantages de ce procédé sont la facilité d'obtenir un assez grand nombre d'éléments ou de composés chimiques, et la bonne qualité des couches. Cependant, elles sont souvent contaminées par des gaz très réactifs issus de la réaction chimique. De plus, tous les matériaux ne peuvent être déposés par CVD.

Le CVD est un domaine interdisciplinaire, il comprend un processus thermodynamique et cinétique, un phénomène de transport. La réaction chimique est au centre de ces disciplines: elle détermine la nature, le type et les espèces présentes.

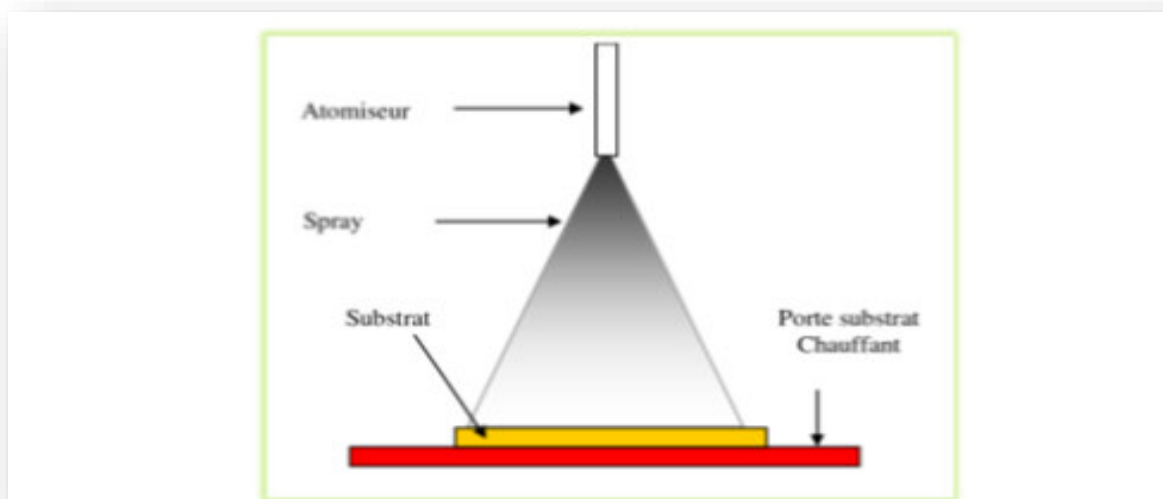
## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS

### II .2.4.3.1. Le spray pyrolyse :

Les premières tentatives pour préparer CZTS emploie est la technique de spray Pyrolyses. En 1996, Wakayama et Itou [4], ont exploré l'effet des taux de métal à l'aide des chlorures de métaux et de la thio-urée en tant que sources de métaux et du soufre, respectivement.

Le spray pyrolyse est une technique de dépôt utilisée pour préparer les films minces et épais. A la différence de beaucoup d'autres techniques de dépôt de film, le spray pyrolyse représente une méthode très simple, n'exige pas de produits chimiques de haute qualité. Cette méthode a été utilisée pour le dépôt des films denses et poreux. Même des films multicouches peuvent être facilement préparés en utilisant cette technique. L'équipement typique du spray pyrolyse se compose d'un atomiseur, une solution de précurseur, réchauffeur de substrat et un régulateur de température. Les atomiseurs ultrasoniques sont utilisés dans la technique de spray pyrolyse. Dans un atomiseur ultrasonique les fréquences ultrasoniques produisent les ondes courtes nécessaires pour l'atomisation fine [5].

Le dépôt de couches minces par la technique spray pyrolyse se traduit par la pulvérisation d'une solution d'un sel de métal sur un substrat chauffé (figure). Les gouttelettes arrivant sur le substrat conduisent à la formation d'un dépôt après décomposition et réaction chimique en surface [5].



**Figure II.4:** Schéma synoptique d'un équipement de dépôt par spray pyrolyse [5].

## **CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS**

### **II.2 .4 .3 .2 Méthode de sol gel :**

Le principe de base du procédé sol-gel (correspondant à l'abréviation de « solutiongélification ») est le suivant: Une solution à base de précurseurs en phase liquide, se transforme en un solide par un ensemble de réactions chimiques de type polymérisation à température ambiante. Le processus sol-gel comprend trois étapes :

- Préparation de la solution de déposition.
- Formation des couches minces par la méthode de trempage ou bien par la méthode de tournette
- Traitement thermique.

### **II .2. 4.4. Méthode de préparation de couche mince de Cu<sub>2</sub>-II-IV-S<sub>4</sub> :**

Divers processus de fabrication des semi-conducteurs quaternaires Cu<sub>2</sub>-II-IV-S<sub>4</sub> en couches minces ont attiré l'attention des chercheurs, nous citons les différentes méthodes suivantes :

#### **1) Les approches à base de vide :**

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

#### **2) Les approches non-vides :**

- L'électrodéposition
- Pulvérisation par pyrolyse

### **II. 5. Hétérojonction :**

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

## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS

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

- ❖ Les premières sont les hétérojonctions iso types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage.
- ❖ Les secondes sont les hétérojonctions anis types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment.

### **II .6 . Les cellules solaires à base de CZTS :**

Le cuivre, le zinc, l'étain, le soufre et le sélénium forment ensemble un matériau semi-conducteur de choix, puisqu'il est fait d'éléments courants et non toxiques. Dommage que le rendement affiché par les cellules CZTS ne soit pas plus élevé... Il devrait augmenter dans les années à venir. Le CIGS et le CdTe auront-ils bientôt un remplaçant de premier ordre ? De nouvelles cellules sont déjà en cours de développement en prévision de la pénurie probable d'indium. Cependant, remplacer les cellules au CIGS représente un véritable défi tant cet absorbant est efficace. Une alternative exploitant le principe de la jonction p-n se démarque néanmoins depuis la fin des années 2000 : la cellule CZTS

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

Depuis son utilisation comme absorbeur dans les cellules solaires en couches minces, les rendements de conversion des dispositifs dépassent 20% en laboratoire et atteignent 13% à l'échelle industrielle. Le secteur le plus dynamique du marché PV est celui des cellules en couches minces, car leur fabrication nécessite seulement de petites quantités de matière. Le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe) et de cuivre et d'indium di séléniure sont les matériaux les plus prometteurs. Les matériaux III-V, II-VI et leurs alliages à base de cuivre, indium, gallium, arséniure, sélénium, soufre. Les propriétés résultantes d'un tel matériau dépendent des paramètres expérimentaux de croissance ainsi que de l'épaisseur finale, de la couche, qui peut varier de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres [6]. Grâce à leur coût de production réduit et la flexibilité de paramètres pour ajuster les propriétés résultantes, les couches minces font concurrence aux plaquettes de Si cristallin, malgré l'efficacité supérieure de ces dernières.

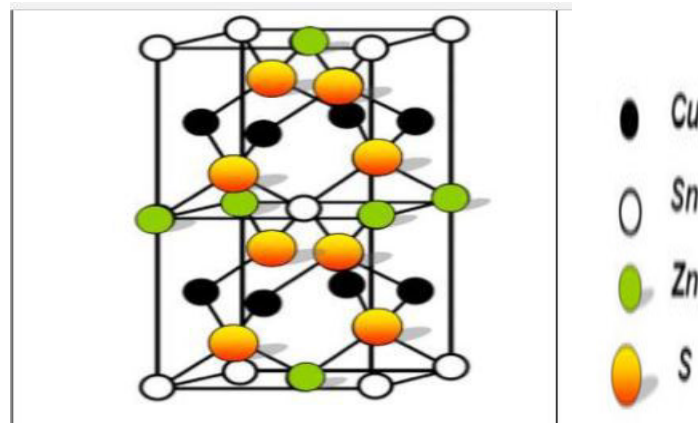


## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS

### II.7. Les propriétés de CZTS :

Ce film semi-conducteur peut être obtenue par le remplacement de la moitié des atomes d'indium dans le  $\text{CuInS}_2$  chalcopyrite avec du zinc, et par le remplacement de l'autre moitié avec de l'étain, ce qui est préférable pour la réalisation d'une cellule solaire à faible coût. Donc, quand  $\text{CdS}$  forme une hétérojonction avec CZTS, il doit être remplacé par le sulfure de zinc ( $\text{ZnS}$ ) parce que le  $\text{ZnS}$  accorde la bande interdite [8].

Le meilleur rendement est celui des cellules solaires CZTS pauvres en Cu et riches en Zn favorisant la croissance d'autres phases au cours de la formation du film. En raison de la faible proportion de Zn et la haute proportion de Cu la couche CZTS devient plus un semi-conducteur de type-p [7].



**Fig. II.5 :** Structure Kesterite dans laquelle CZTS se cristallise. Elle est dérivée de la structure sphalérite par dupliquer la cellule unitaire [9].

Le CZTS ( $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ) est très étroitement liée au CIGS, comme il est indiqué sur la figure (II.5), Pour l'essentiel, les éléments coûteux et peu abondantes d'indium et de gallium sont remplacés par un 50:50 combinaison de Zn et Sn beaucoup moins cher.

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

### II .8. Propriétés électriques :

Les principales caractéristiques électriques des matériaux semi-conducteurs résultent des déplacements des porteurs de charge sous l'effet d'un champ électrique, ou magnétique

## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS

(conductivité- électrique, effet Hall, photo conductivité,...). Néanmoins, ces déplacements sont gouvernés par les collisions des porteurs de charge avec les ions, les impuretés ou les défauts du réseau cristallin. Le libre parcours moyen, qui caractérise la distance moyenne parcouru par un électron entre deux chocs successifs, est un paramètre important spécifique de l'état structural du matériau.

Dans les matériaux photovoltaïques classiques, en particulier le silicium, on procède souvent d'une façon volontaire aux dopages n et p de ces semi-conducteurs pour former la jonction p-n, par contre le semi-conducteur CZTS est naturellement dopé p. Son dopage résiduel est intrinsèque et inhérent aux défauts cristallins du matériau. Ces défauts sont en majorité des substitutions de cations ou les atomes de cuivre prennent la place des atomes de zinc (CuZn). Ce matériau rencontre les mêmes particularités que les chalcopyrites, des écarts de composition amènent de grandes variations des propriétés électriques. Des stœchiométries non adaptées provoquent des ségrégations de phases secondaires et peuvent être représentées à l'aide d'un diagramme de phase ternaire en considérant comme constant un taux de soufre de 50% [10]. Plus précisément, un excès de zinc et d'étain ainsi qu'un faible taux de cuivre s'avèrent être favorable pour améliorer les performances électriques [11]. Au contraire, une pauvreté en zinc est favorable à une ségrégation de phases conductrices, de  $Cu_xS$  et de CTS ( $Cu_2SnS_3$ ), provoquant des courts circuits dans la cellule [12]. Il est également possible de former des phases isolantes comme ZnS ou  $SnS_2$  provenant des régions pauvres en cuivre et riches en zinc ou en étain. Ces phases sont moins préjudiciables au bon fonctionnement de la cellule car elles ne font que réduire la surface active de la cellule en isolant certaines zones et ne provoquent donc aucun court-circuit.

Le système CZTSSe a l'avantage de permettre le réglage de la bande interdite directe, en faisant varier le rapport S: Se, de près de 1 eV pour le composé : sélénure pure à environ 1.5 eV pour le matériau : sulfure pur (gamme très utile pour l'énergie solaire terrestre). D'après les calculs de structure de bande, la bande supérieure de valence dans CZTSSe se compose des orbitales antis liantes de Cu 3d et S (Se) 3p (4p), tandis que le bas de la bande de conduction se compose des orbitales antis liantes de Sn 5s et S (Se) 3p (4p).

Un apport en soufre relativement faible dans le film permettrait l'obtention de meilleures performances électriques [10]. Cependant, le soufre a surtout un effet positif lors de son utilisation comme précurseur. Le taux de cuivre souvent très élevé à la surface serait réduit par sa réaction avec le soufre. La plupart des valeurs rapportées de résistivité des couches minces de CZTS sont variées de ( $10^{-31}$  à  $10^{-1}$ ) cm.  $\Omega$ , mais il y a aussi des valeurs de résistivité plus

## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS

élevées que ( $10^4$ ) cm . $\Omega$  , ont été également rapportés .On a rapporté que la concentration des porteurs de charge varie entre ( $10^{16}$  à  $10^{21}$ ) cm<sup>-3</sup>. Les résultats de mesure de l'effet de hall ont prouvé que la mobilité dans les couches de CZTS a changé simplement de ( 0.1 à 30 ) cm<sup>2</sup>/V. s, alors que la plupart des valeurs éditées étaient dans la gamme de (1 à 10 ) cm<sup>2</sup>/V. s

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

*Tableau II. 1 : Les propriétés électriques des composés CZTSSe*

### II .9. Propriétés optiques :

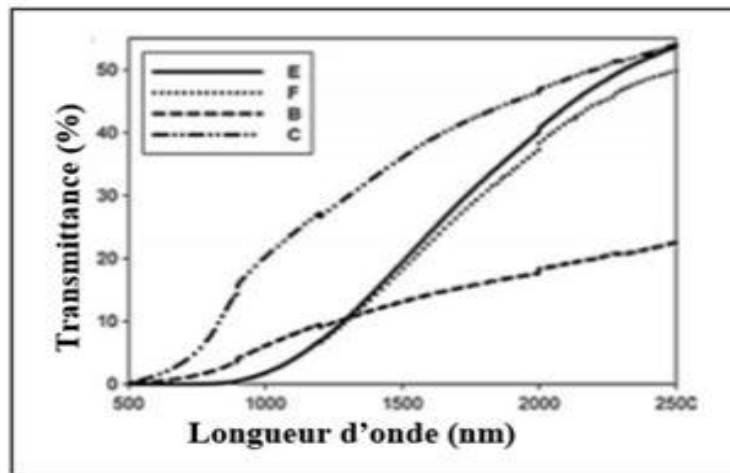
Le principe du processus d'absorption dans les semi-conducteurs dépend de l'énergie des photons incidents et de la structure de bande du composé. Un semi-conducteur pur ne peut absorber un photon d'énergie  $h\nu$  et exciter un électron d'énergie  $E_1$  de la bande de valence vers la bande de conduction que s'il existe un niveau d'énergie  $E_2$  tel que :  $E_2 - E_1 = h\nu$ . L'énergie minimale du photon apte à réaliser cette transition est le seuil d'absorption optique. Cependant, pour un semi-conducteur, on peut observer des transitions pour des énergies inférieures lorsqu'il existe des états localisés dans la bande interdite. Les électrons qui peuvent participer aux processus d'absorption sont :

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

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

## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS

faible (voir la figure II.6). Plusieurs auteurs ont fait des études sur les propriétés optiques des films minces. Dans ce cas, nous présentons ci-dessous les résultats de la littérature [14].



*Figure II.6: Spectre typique de transmittance d'une couche mince de CZTS [14].*

En théorie, le spectre d'absorption permet de découvrir toutes les transitions et d'obtenir des informations sur la structure de bande du composé. Expérimentalement, l'allure du spectre d'absorption est une caractéristique optique d'un matériau et évolue avec la composition, les défauts et son état de cristallinité. La probabilité d'absorption du photon détermine le coefficient d'absorption optique ( $\alpha h\nu$ ). L'énergie du gap est déterminée par plusieurs techniques de caractérisation, à savoir les spectres de transmission et de réflexion, l'électro réflectance et la photoluminescence. L'ensemble de ces techniques a montré que les transitions entre les bandes d'énergies peuvent être décrites par la relation suivante [15] :

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{n_x}$$

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

Le tableau (II.2) montre que la plupart des phases kieserite liées présentent une bande Interdite directe dans la plage optimale pour la conversion photovoltaïque de l'énergie

## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS

<i>Composé</i>	<i>E<sub>g</sub> (ev)</i>
CZTS	1.5
CZTS	1.49
CZTS	1.46-1.51
CZTSe	1.40-1.65

*Tableau II.2: Les constantes de réseau et les lacunes de bande pour différentes structures.*

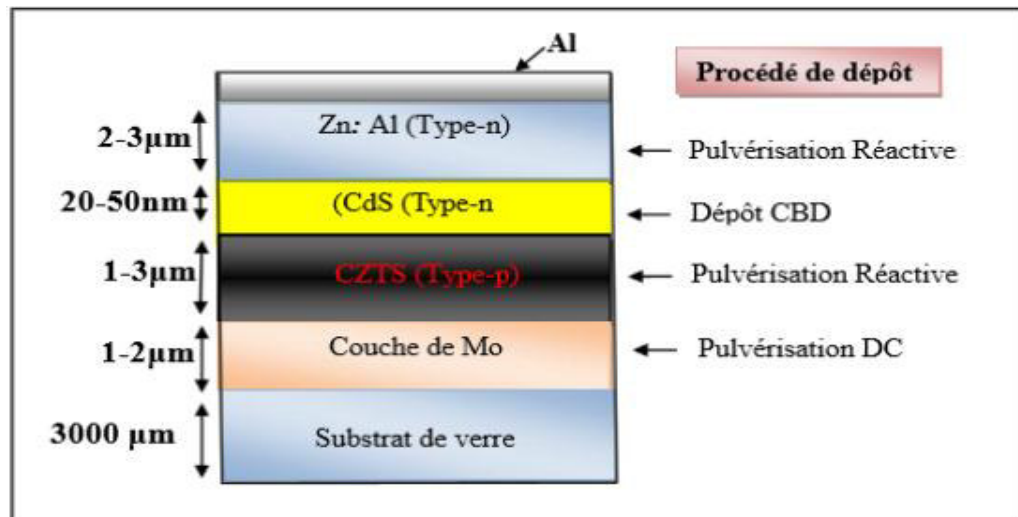
On constate que les couches minces de CZTS ont des bonnes propriétés optiques mais elles sont toujours gouvernées par les conditions de préparation. Les principaux paramètres influents sur la valeur du gap dans les structures kieserite sont:

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

### **II .10. Fabrication d'une cellule à base de Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> :**

Une cellule solaire est constituée d'un ensemble de couches minces semi-conductrices avec une épaisseur totale d'environ 5  $\mu\text{m}$  (figure II.10). Le substrat de ce composant électronique est en verre ou en ITO. La première étape de fabrication d'une cellule photovoltaïque est le dépôt d'une couche de molybdène ou d'ITO de 1 $\mu\text{m}$  d'épaisseur, généralement par la technique d'évaporation thermique ou par pulvérisation cathodique. Cette couche constitue le contact ohmique arrière de la cellule ; elle assure l'adhésion entre la couche active de la cellule (la couche absorbante) et le substrat.

## CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS



*Figure II.7 : Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de  $Cu_2ZnSnS_4$  [16].*

La couche la plus importante dans la cellule photovoltaïque est la couche absorbante, en l'occurrence  $Cu_2ZnSnS_4$  dans notre cas, car elle est responsable de l'absorption des rayonnements solaires ainsi que la génération des porteurs de charges (les électrons et les trous).

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

- ❖ **Le substrat** : généralement en verre, mais on peut utiliser des substrats flexibles ou métalliques ;
- ❖ **Le contact inférieur** : c'est un contact ohmique, dans la plupart des cas c'est du Mo ou de l'ITO ;
- ❖ **La couche absorbante**: avec une conduction type p, souvent en  $Cu_2ZnSnS_4$ ,  $Cu(In, Ga)Se_2$ , etc. ;
- ❖ **La couche tampon** : avec une conduction de type n, souvent en CdS, ZnS, etc.
- ❖ **Une couche d'oxyde transparent conducteur**: en ITO (Indium Tin Oxyde) ou ZnO dopé en Al.

### **II.10.1. La couche absorbante :**

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande

## **CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS**

interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de (1.4 à 1.6) eV. Sa conductivité doit être de type p, et de l'ordre de  $(1 \text{ à } 10^{-2}) (\Omega \text{ cm})^{-1}$  [17].

### **II.10.2. La couche tampon :**

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

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

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

- Une bande interdite intermédiaire permettant une transition souple entre celle du semi-conducteur et celle du TCO, soit une valeur comprise entre 2.4 et 3.2 eV ;
- Une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est, elle, de type p; de plus, afin d'éviter les effets de fuites de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante, soit de l'ordre de  $10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$  ;
- Morphologiquement elle doit être très homogène pour éviter tout effet de court circuit au niveau des joints de grains

### **II.10.3 : La couche d'oxyde transparent conducteur (TCO) :**

Cette couche doit être simultanément transparente et conductrice. Dans le domaine du spectre solaire, la transmission des couches doit être supérieure à 80%. La conductivité de ces mêmes couches doit être supérieure à  $10^3 (\Omega \text{ cm})^{-1}$ . De telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces de SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, de leur alliage ITO et de ZnO.

Leur transparence est liée à la valeur de leur bande interdite, tandis que leurs propriétés électriques dépendent de la composition des couches et d'un éventuel dopage. On dépose généralement une première couche non dopée de ZnO, puis une couche dopée de ZnO: Al ou d'ITO.

## **CHAPITRE II : Cellule Solaire photovoltaïque à base de CZTS**

En effet, la couche de ZnO intrinsèque, donc non-conductrice, évite toute fuite de courant entre la couche absorbante et le contact supérieur. Il a été montré que cette couche pouvait être évitée si l'on déposait une couche tampon (CdS par exemple) plus épaisse [18].



## Bibliographie

---

- [1] Mme. D Ouarda. « Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  ». Thèse de doctorat. Université Mentouri de CONSTANTINE 1.2013.
- [2] Sarah MENAKH « Contribution à l'étude des propriétés de films  $\text{ZnO}$  ». Mémoire de Magister. 2010.
- [3] A. Richard and A.M. Durand, "Généralités sur les technologies de dépôt sous vide" in *Le vide-Les couches minces-Les couches dures*, ed. In Fine, Paris (1994)
- [4] N. Nakayama and K. Ito, "Sprayed films of stannite  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ", *Appl. Surf. Sci.* 92, pp.171–175, (1996).
- [5] H. Moualkia, « Elaboration et Caractérisation de Couches Minces de Sulfure de Cadmium ( $\text{CdS}$ ) », Thèse de Doctorat, Mentouri-Constantine, 2010
- [6] A.de.Kergmmeaux, 'Synthèse de nouveaux types de nanocristaux semi-conducteurs pour application en cellules solaires', Université de Grenoble, France, (2012).
- [7] Hindawi Publishing Corporation. « A Review on Development Prospect of CZTS Based Thin Film Solar Cells ». *International Journal of Photoenergy*. Volume 2014.
- [8] Rachel Hoffman, 2009, "Materials for CZTS Photovoltaic Devices", *Chemical Engineering*, Cornell University.
- [9] Bernardini, G. P. ; Borrini, D. ; Caneschi, A. ; Benedetto, F. D. ; Gatteschi, D. ; Ristori, S. Romanelli, M.: EPR and SQUID magnetometry study of  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$  (stannite) and  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (kesterite). In: *Physics and Chemistry of Minerals* S. 453-461 (2000).
- [10] H.Flammersberger, « Expérimental study of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin films for Solar celles », *Teknikvenskaper*, Dpt.Engineering sciences, Examen sarbete (2010).
- [11] H.Katagiri, K.Jimba, S.Yamada, T.Kamimura, W.S.Maw, T.Tukano, T.Ito, T.Motohior, *Appl.Phys, Express*1(2008)041201.
- [12] R.Wagner, H.D.Wiemhofer, *J.Phys.Chem.Solids*, 44(1983)801.μ
- [13] K.Wan, O.Gunawan, T.Todorov, B.Shin, S.J.Chey, N.A.Bojarzuk, D.Mitzi, S.Guha, *pl.Phys. lett*, 97(2010)143508
- [14] T. Todorov, M. Kita, J. Carda, P. Escibano ",  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  films déposte by a softchemistry méthode", *Thin Solid Films* 517, 2541–2544, (2009).
- [15] S.M. Firoz Hasan, M.A. Subhan, Kh.M. Mannan, "The Optical and Electric al propretés of Copper indium di-selenide thin films", *Optical Matériels* 14, p. 329–336, (2000).
- [16] Vardaan Chawla, Jefferey S. King, Evan Runnerstrom, Stacey F. Bent, Bruce M.Clemens, "Investigation of inexpensive, abundant materials for Thin Film Solar Cell applications", *global climate & energy project*; Leland Stanford Junior University-USA.

## Bibliographie

---

[17] H. Katagiri, K. Jimbom, W.S. Maw, K. Oishi, M. Yamazaki, H. Araki, A. Takeuchi, “Development of CZTS-based thin film solar cells, Nagaoka National College of Technology”, 888 Nishikatakai, Nagaoka, Niigata 940-8532, Japan, pp.2455–2460, (2008).

[18] Science Université de Nantes.fr /physique/recherche/lamp/fr/photop/part 3 .PDF  
[Consulté le 15 Mai 2009].

## **Chapitre III :**

# **Le logiciel de simulation SCAPS**

### III.1. Introduction :

La simulation des cellules en couches minces est devenue de plus en plus utilisée ces dernières années, ainsi, plusieurs logiciels de calcul et de simulation ont été développés par la communauté des chercheurs dans ce domaine.

La simulation numérique désigne l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe. Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques. Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. On peut citer le logiciel AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, Silvaco etc.

### III.2. Propriétés des programmes SCAPS :

SCAPS-1D acronyme de « Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension » est un programme développé à l'université de Gent en Belgique [1]

SCAPS est un logiciel à application sur Windows. Il a été développé pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires à hétérojonction et à couches minces. Il a été extensivement, testé sur des cellules solaires à base de CdTe et Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> par M. Burgelman et al. Les résultats simulés et mesurés ont été en très bon accord [2]

Parmi les principaux avantages de SCAPS-1D :

- Les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif.
- Possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison en celle-ci.
- Introduction de résistances en série, et obtention des caractéristiques capacité-tension et capacité –fréquence.
- C'est un logiciel qui présente une grande vitesse d'exécution.

## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS

### III.3. Concepts de base:

SCAPS est un programme Windows, développé avec LabWindows / CVI de National Instruments. Nous utilisons Voici la terminologie LW / CVI d'un 'Panel' (les noms utilisés dans d'autres logiciels sont: une fenêtre, une page, une fenêtre contextuelle ...).

SCAPS s'ouvre avec le «panneau d'action».

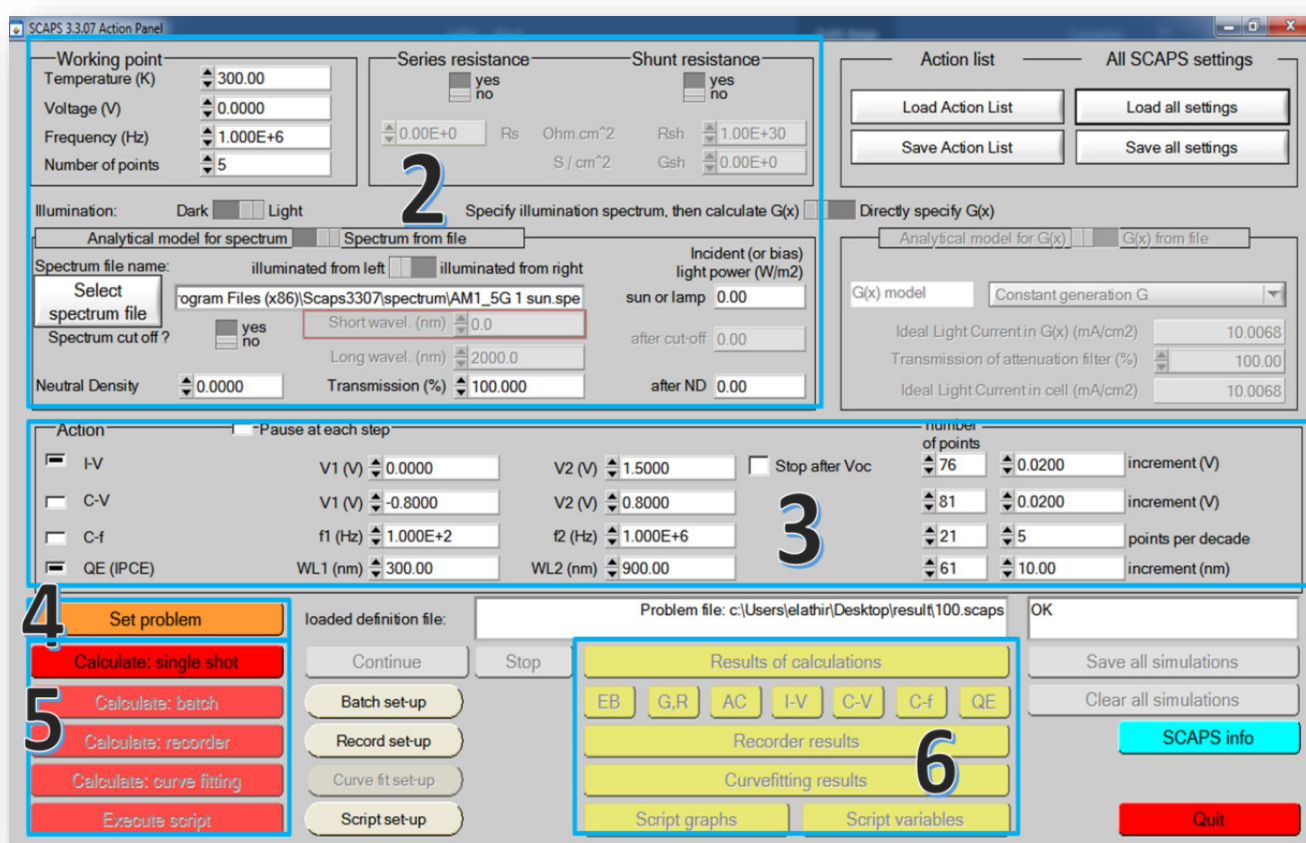


Figure III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base :

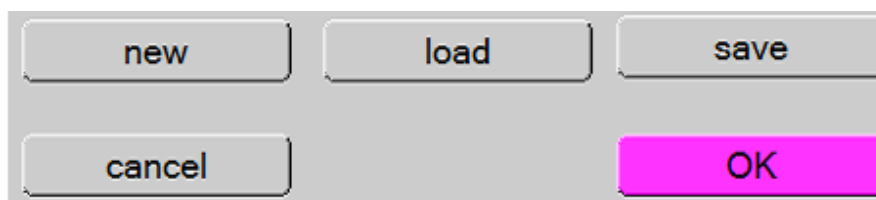
1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.

5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation (voir la section 6).

### III.3.1 Définir le problème :

Après le lancement du logiciel et l'ouverture de la fenêtre d'exécution les paramètres : la température, la résistance série et parallèle et les paramètres d'illumination.

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD, On sélectionne et on ouvre (par exemple : CdTe-base.def) Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CdTe. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action.



*Figure III.2 : Définition du problème.*

### III.3.2 Sélection des caractéristiques à simuler :

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

### III.3.3 Affichage des courbes simulées :

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure III.3. Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex.,

## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS

Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez basculer vers un de vos panneaux personnalisés (si vous avez toutefois simulé au moins une seule opération de mesure).

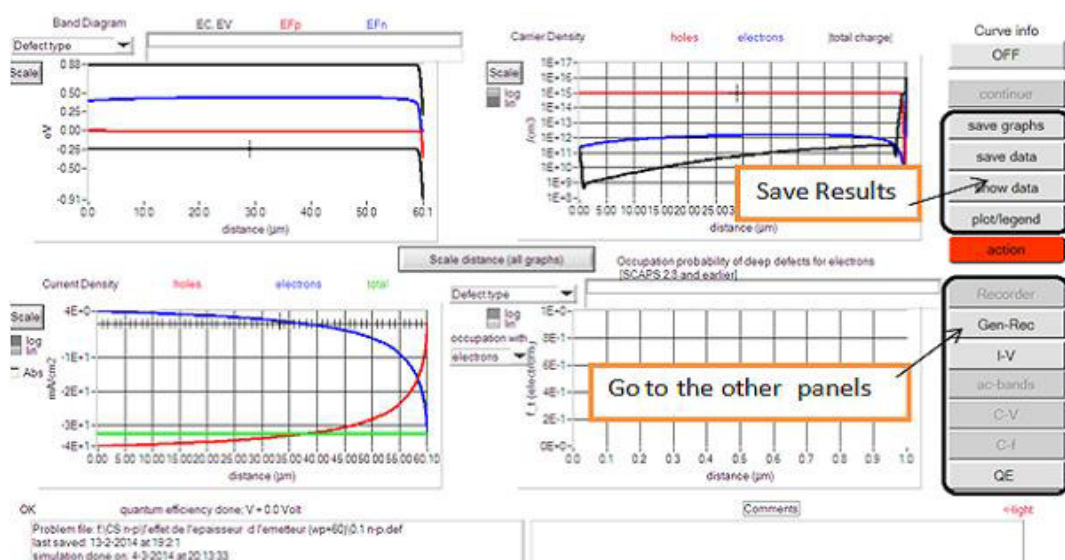


Figure III.3 : Panneau des bandes d'énergie

### III.4 Edition de la structure d'une cellule solaire:

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

Les propriétés des couches, des contacts et d'interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure III 4. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'

## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS



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

### III.5 Contacts :

Les propriétés des contacts peuvent être introduits soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact 'CONTACT PROPERTIES PANEL' s'ouvre, comme le montre la figure III.5.

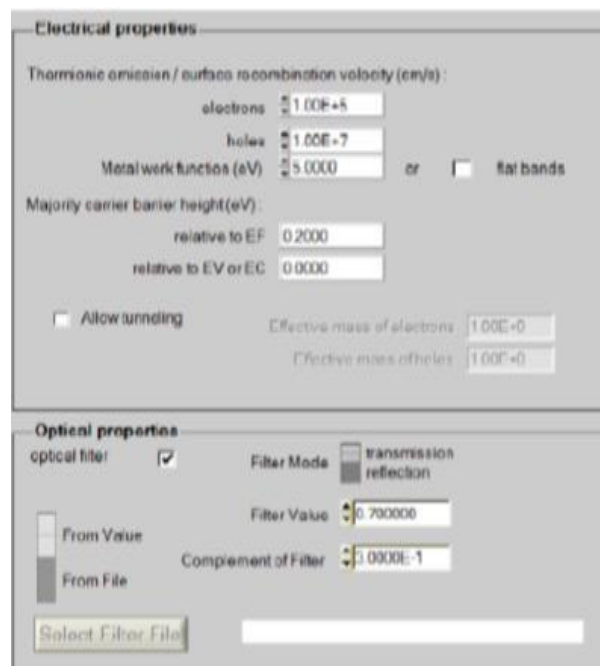


Figure III.5 : Panneau des propriétés des contacts



## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS

---

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

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

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

### III.6 Définition des couches :

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Figure III.6) s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau.

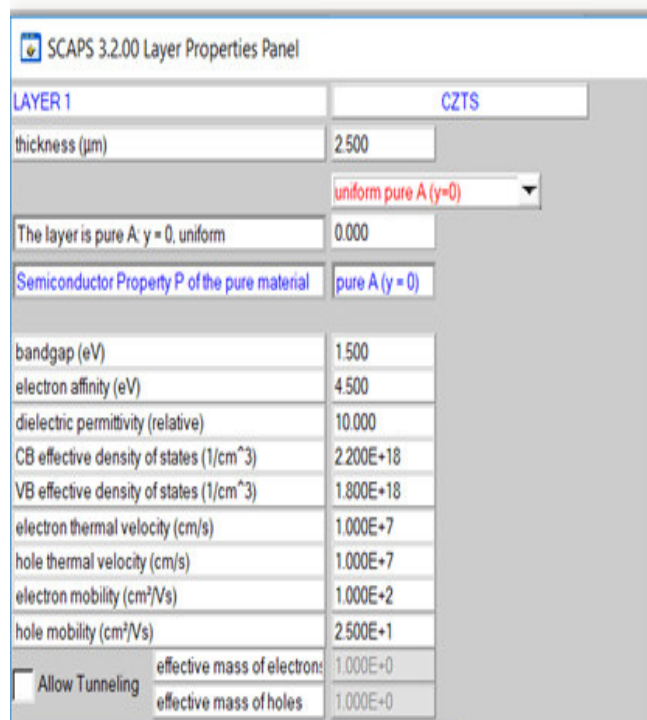
Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage). Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite.

Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profil. Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, vitesses thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres. Dans le cinquième block, figure III.7, on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques,...).

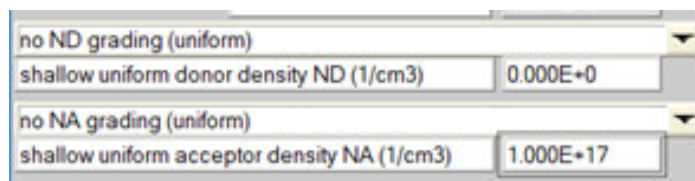
Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme le montre la figure III.8. L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de

## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS

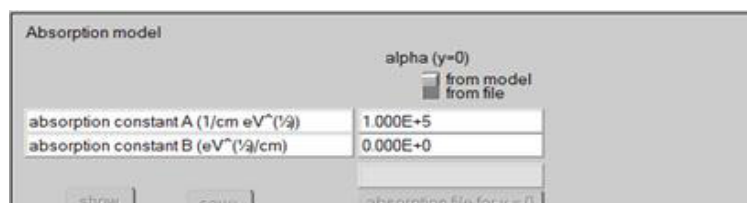
l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS



*Figure III.6 : Propriétés de la couche ajoutée*



*Figure III.7 : Propriétés des dopages définis*



*Figure III.8 : Modèle de l'absorption.*

## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche (Figure III.9). Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges.

Recombination model	
Band to band recombination	
Radiative recombination coefficient (cm <sup>3</sup> /s)	0.000E+0
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Recombination at defects: Summary	

Defect 4 of layer 1	
defecttype	Single Donor (0/+) ▼
capture cross section electrons (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
capture cross section holes (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
energetic distribution	Gauß ▼
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7) ▼
energy level with respect to Reference (eV)	0.500
characteristic energy (eV)	0.200

*Figure III.9 : Définition des types de recombinaison présents*

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

### III.1. Introduction :

La simulation des cellules en couches minces est devenue de plus en plus utilisée ces dernières années, ainsi, plusieurs logiciels de calcul et de simulation ont été développés par la communauté des chercheurs dans ce domaine.

La simulation numérique désigne l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe. Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques. Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. On peut citer le logiciel AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, Silvaco etc.

### III.2. Propriétés des programmes SCAPS :

SCAPS-1D acronyme de « Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension » est un programme développé à l'université de Gent en Belgique [1]

SCAPS est un logiciel à application sur Windows. Il a été développé pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires à hétérojonction et à couches minces. Il a été extensivement, testé sur des cellules solaires à base de CdTe et Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> par M. Burgelman et al. Les résultats simulés et mesurés ont été en très bon accord [2]

Parmi les principaux avantages de SCAPS-1D :

- Les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif.
- Possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison en celle-ci.
- Introduction de résistances en série, et obtention des caractéristiques capacité-tension et capacité –fréquence.
- C'est un logiciel qui présente une grande vitesse d'exécution.

## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS

### III.3. Concepts de base:

SCAPS est un programme Windows, développé avec LabWindows / CVI de National Instruments. Nous utilisons Voici la terminologie LW / CVI d'un 'Panel' (les noms utilisés dans d'autres logiciels sont: une fenêtre, une page, une fenêtre contextuelle ...).

SCAPS s'ouvre avec le «panneau d'action».

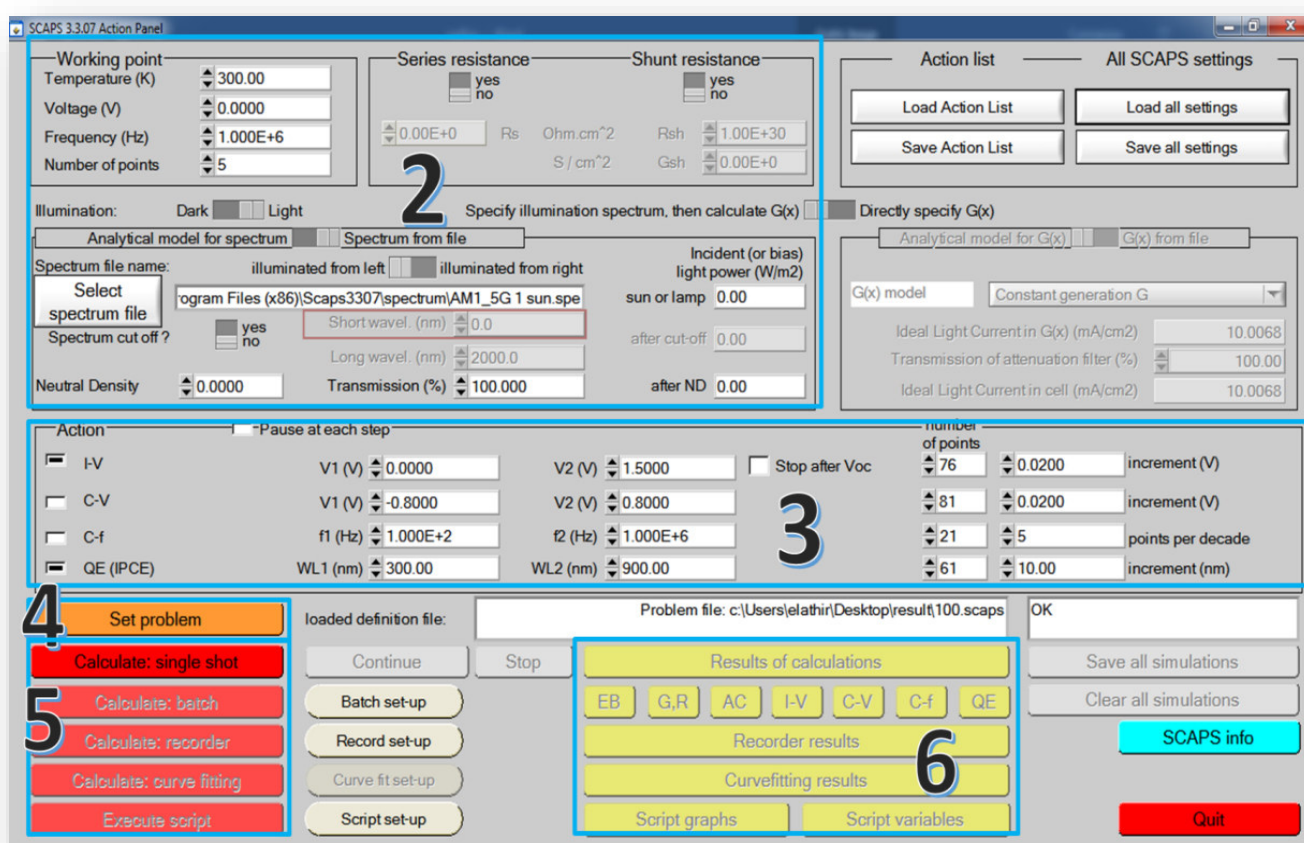


Figure III.1 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base :

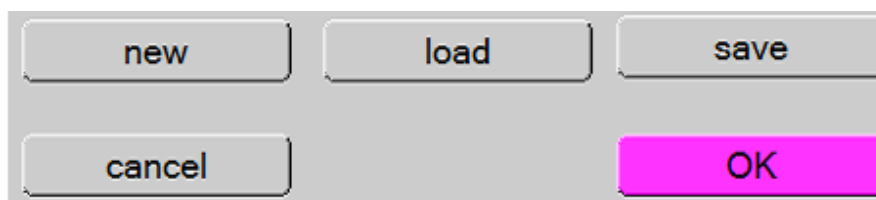
1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.

5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation (voir la section 6).

### III.3.1 Définir le problème :

Après le lancement du logiciel et l'ouverture de la fenêtre d'exécution les paramètres : la température, la résistance série et parallèle et les paramètres d'illumination.

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD, On sélectionne et on ouvre (par exemple : CdTe-base.def) Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CdTe. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action.



*Figure III.2 : Définition du problème.*

### III.3.2 Sélection des caractéristiques à simuler :

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

### III.3.3 Affichage des courbes simulées :

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure III.3. Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex.,

## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS

Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez basculer vers un de vos panneaux personnalisés (si vous avez toutefois simulé au moins une seule opération de mesure).

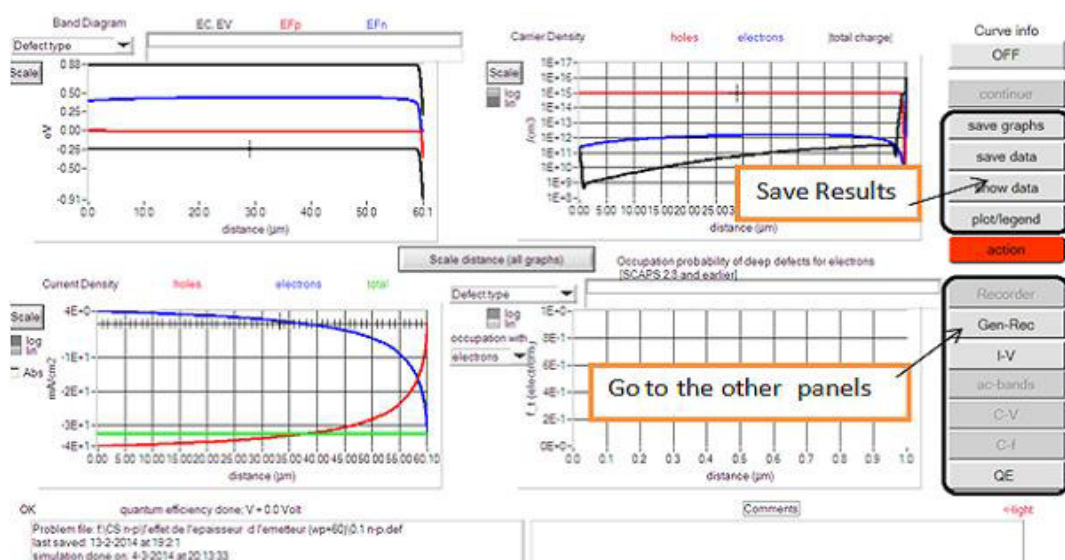


Figure III.3 : Panneau des bandes d'énergie

### III.4 Edition de la structure d'une cellule solaire:

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

Les propriétés des couches, des contacts et d'interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure III 4. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'

## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS



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

### III.5 Contacts :

Les propriétés des contacts peuvent être introduits soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact 'CONTACT PROPERTIES PANEL' s'ouvre, comme le montre la figure III.5.

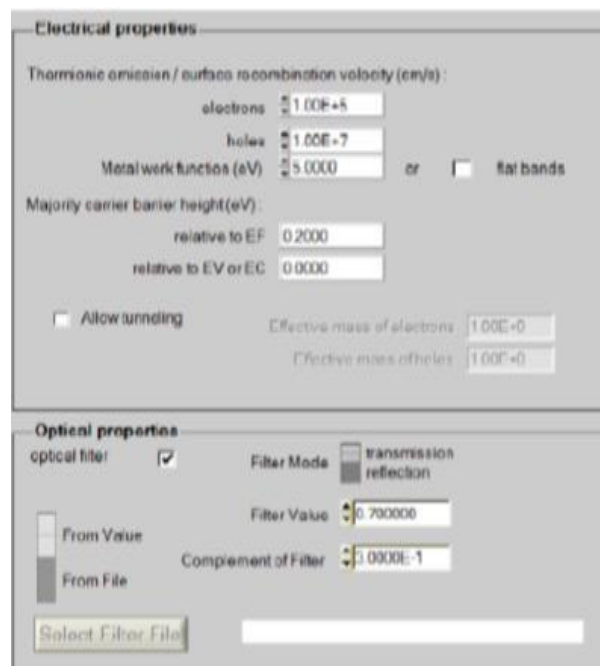


Figure III.5 : Panneau des propriétés des contacts



## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS

---

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

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

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

### III.6 Définition des couches :

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Figure III.6) s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau.

Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage). Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite.

Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile. Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, vitesses thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres. Dans le cinquième block, figure III.7, on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques,...).

Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme le montre la figure III.8. L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de

## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS

l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS

The screenshot shows the 'SCAPS 3.2.00 Layer Properties Panel' for 'LAYER 1' of material 'CZTS'. The thickness is set to 2.500  $\mu\text{m}$ . The layer is configured as 'uniform pure A (y=0)' with a value of 0.000. The semiconductor property is set to 'pure A (y = 0)'. The following table lists the material properties:

bandgap (eV)	1.500
electron affinity (eV)	4.500
dielectric permittivity (relative)	10.000
CB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )	$2.200\text{E}+18$
VB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )	$1.800\text{E}+18$
electron thermal velocity (cm/s)	$1.000\text{E}+7$
hole thermal velocity (cm/s)	$1.000\text{E}+7$
electron mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$1.000\text{E}+2$
hole mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$2.500\text{E}+1$
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	
effective mass of electrons	$1.000\text{E}+0$
effective mass of holes	$1.000\text{E}+0$

*Figure III.6 : Propriétés de la couche ajoutée*

The screenshot shows the doping properties panel. It includes two sections: 'no ND grading (uniform)' with a 'shallow uniform donor density ND ( $1/\text{cm}^3$ )' set to  $0.000\text{E}+0$ , and 'no NA grading (uniform)' with a 'shallow uniform acceptor density NA ( $1/\text{cm}^3$ )' set to  $1.000\text{E}+17$ .

*Figure III.7 : Propriétés des dopages définis*

The screenshot shows the 'Absorption model' panel. It features a dropdown for 'alpha (y=0)' with options 'from model' and 'from file'. Below are two input fields: 'absorption constant A ( $1/\text{cm eV}^{1/2}$ )' set to  $1.000\text{E}+5$  and 'absorption constant B ( $\text{eV}^{1/2}/\text{cm}$ )' set to  $0.000\text{E}+0$ . At the bottom, there are 'show' and 'save' buttons, and a text field for 'absorption file for y=0'.

*Figure III.8 : Modèle de l'absorption.*

## Chapitre III : Le logiciel de simulation SCAPS

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche (Figure III.9). Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges.

Recombination model	
Band to band recombination	
Radiative recombination coefficient (cm <sup>3</sup> /s)	0.000E+0
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Recombination at defects: Summary	

Defect 4 of layer 1	
defecttype	Single Donor (0/+) ▼
capture cross section electrons (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
capture cross section holes (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
energetic distribution	Gauß ▼
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7) ▼
energy level with respect to Reference (eV)	0.500
characteristic energy (eV)	0.200

*Figure III.9 : Définition des types de recombinaison présents*

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

## Bibliographie

---

- [1] Peijie Lin, Lingyan Lin, Jinling Y, Shuying Cheng, Peimin Lu and Qiao Zheng, Numerical Simulation of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Based Solar Cells with In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> Buffer Layers by SCAPS-1D, Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 383390 (2014)
- [2] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.

## **Chapitre IV:**

### **Résultats et discussion**

### IV.1.Introduction:

Dans le but d'optimiser une conception spécifique d'une structure d'hétérojonction ZnO/CdS/CZTS, nous devons étudier et analyser l'influence des paramètres physiques et technologiques sur les performances du dispositif.

Dans ce travail nous allons étudier l'effet de les paramatères de la couche tampon CdS ( l'épaisseur – le dopage – l'affinité électronique – la mobilité des électrons ) sur la caractéristique I-V ,et la variation relative du: densité de courant de court circuit ( $\Delta J_{sc}$ ) , la tension de circuit ouvert( $\Delta V_{oc}$ ) , le facteur de remplissage ( $\Delta FF$ ), et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\Delta \eta$ ) .

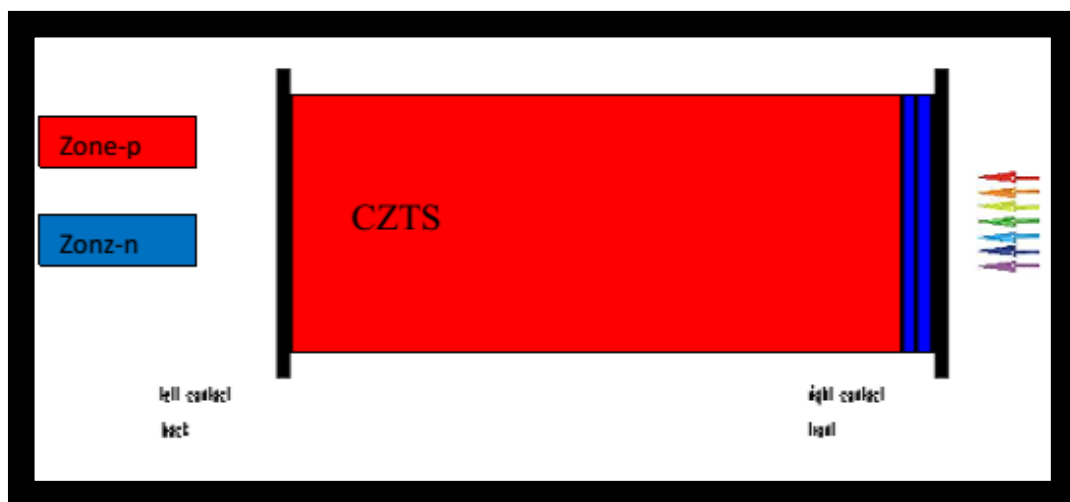
Les résultats obtenus dans cette opération sont présentés dans la section qui suit.

### IV.2.Structure de la cellule à étudier:

Notre travail consiste à modéliser une cellule solaire à base de CZTS et à simuler ces paramètres électriques, optiques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant le rendement électrique optimal.

Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire avec une couche absorbante a CZTS de la structure suivante ZnO /CdS /CZTS.

Le schéma simplifié de l'hétéro structuré est représenté sur la figure IV-1.



*Figure IV .1: Schéma simplifier d'une cellule solaire en couches minces de CZTS.*

### IV.3. Les paramètres du dispositif étudié:

• Propriétés des différentes couches:

Matériau	Couche Tampon, n-CdS	Couche Absorbeur, p-CZTS	Couche fenêtre, n-ZnO	Symbol	Units
Epaisseur de la couche	0.01	0.3	0.05	W	Um
Affinité électronique,	4.2	4.5	4.45	X	Ev
Permittivité relative,	10	13.6	9	E	Relative
Mobilité des électrons	100	100	100	$\mu_n$	$cm^2/V.s$
Mobilité des trous	25	25	25	$\mu_p$	$cm^2/V.s$
Concentration des atoms accepteurs	0	$1 \times 10^{15}$	1	NA	$cm^{-3}$
Concentration des atoms donneur	$1 \times 10^{17}$	0	$1 \times 10^{18}$	ND	$cm^{-3}$
Energie du gap	2.4	1.5	3.3	$E_g$	eV
CB densité effective d'états 'états	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.21 \times 10^{18}$	$N_c$	$cm^{-3}$
NV densité effective d'états 'états	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$N_v$	$cm^{-3}$
Vitesse thermique des électrons	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$Th_e$	(cm/s)
Vitesse thermique des trous	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$Th_p$	(cm/s)

*Tableau IV.1: Les différentes données de simulation de la cellule.[1]*

### IV.4. Résultats et discussion:

#### IV.4.1. Effet de l'épaisseur de la couche tampon CdS ( $W_{CdS}$ ):

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche tampon ( $W_{CdS}$ ) de (0.01 à 0.1)  $\mu\text{m}$  sur la caractéristique I-V, et sur et la variation relative des paramètres photovoltaïques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$ ) respectivement sur les figures (IV-2 et IV-3).

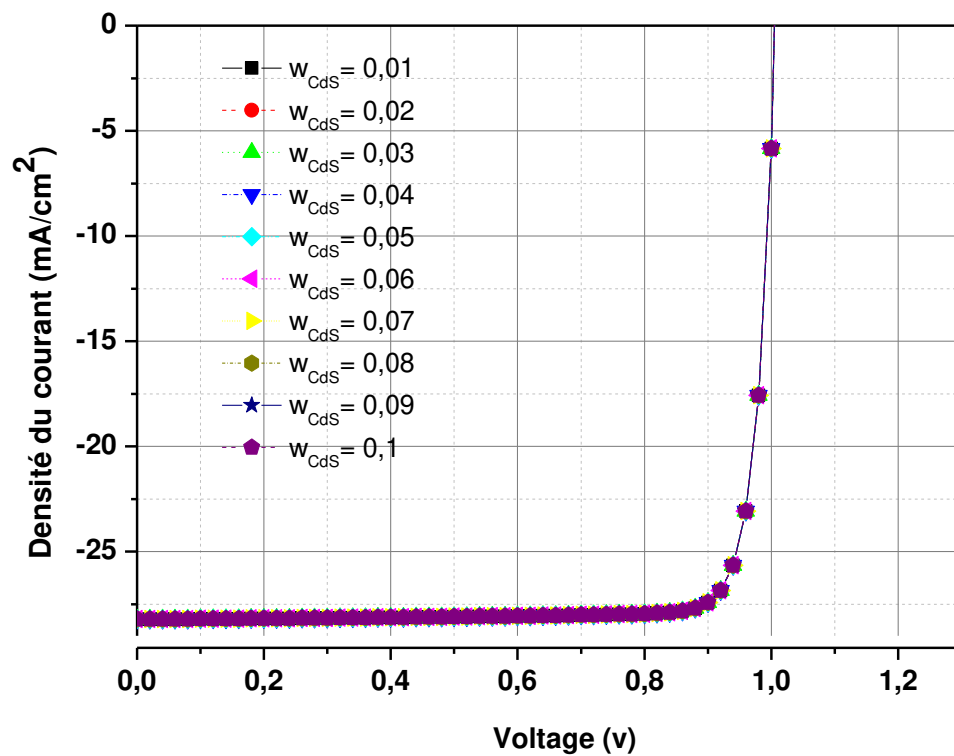
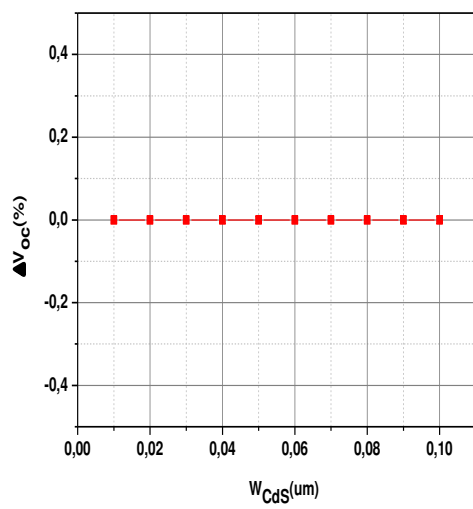


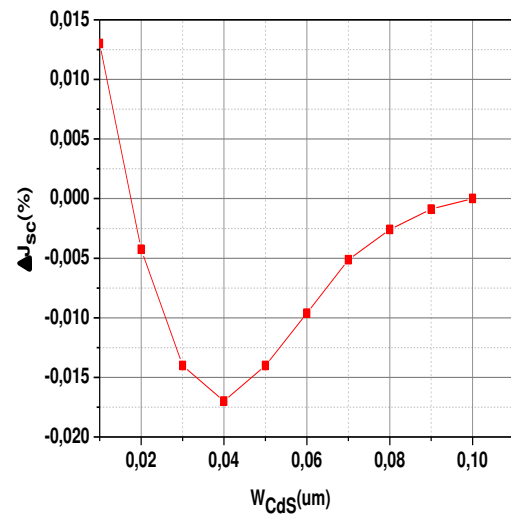
Figure IV-2: Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS sur la caractéristique I-V



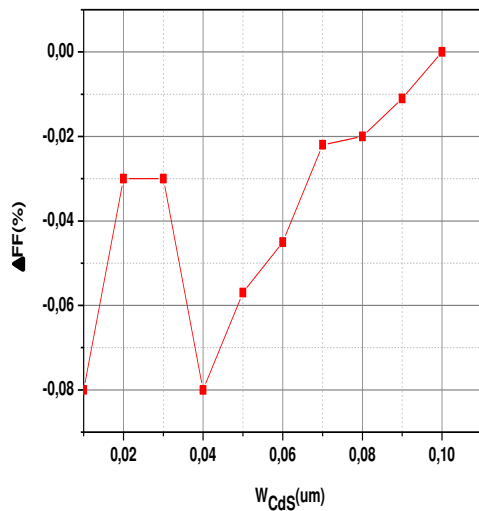
## Chapitre IV: Résultats et discussion



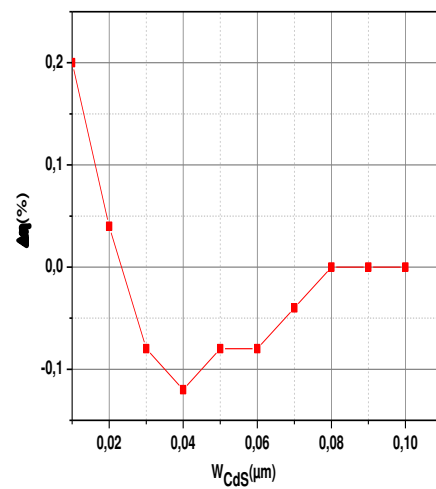
a)



b)



c)



d)

**Figure.IV.3:** Effet de l'épaisseur ( $W_{CdS}$ ) de la couche tampon CdS sur la variation relative du: a) la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ). b) le courant de court-circuit ( $\Delta J_s$ ). c) le facteur de forme ( $\Delta FF$ ). d) le rendement ( $\Delta \eta$ .)

## Chapitre IV: Résultats et discussion

---

Les caractéristiques I-V présentés dans la figure (IV-2) ont exactement la même allure malgré la variation de l'épaisseur de cette couche, la variation de l'épaisseur de cette couche ne montre aucune influence sur la caractéristique I-V.

Nous remarquons sur la figure (IV.3) qu'en augmentant l'épaisseur de la couche tampon (CdS) la variation relative du: courant de court-circuit ( $\Delta J_{sc}$ ), le facteur de forme( $\Delta FF$ ) et le rendement ( $\Delta \eta$ ) varie très peu, mais la variation relative du tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ) reste constante le long du domaine.

Ce qui signifie que l'épaisseur de la couche tampon (CdS) n'affecte pas sur les propriétés de la Cellule solaire.

Le petite changement de variation relative est dû aux erreurs de calcul lors des simulations.

### IV.4.2.Effet du dopage ( $N_d$ ) de la couche tampon CdS:

L'effet de la variation de le dopage de ( $N_{d/cds}$ ) de la couche tampon CdS de ( $10^{14}$  à  $10^{20}$ )  $\text{cm}^{-3}$  sur la caractéristique I-V, et sur les la variation relative des paramatères photovoltaïques ( $\Delta V_{oc}$ ,  $\Delta J_{sc}$ ,  $\Delta FF$  et  $\Delta \eta$ ) respectivement sur les figures (IV-4 et IV-5).

## Chapitre IV: Résultats et discussion

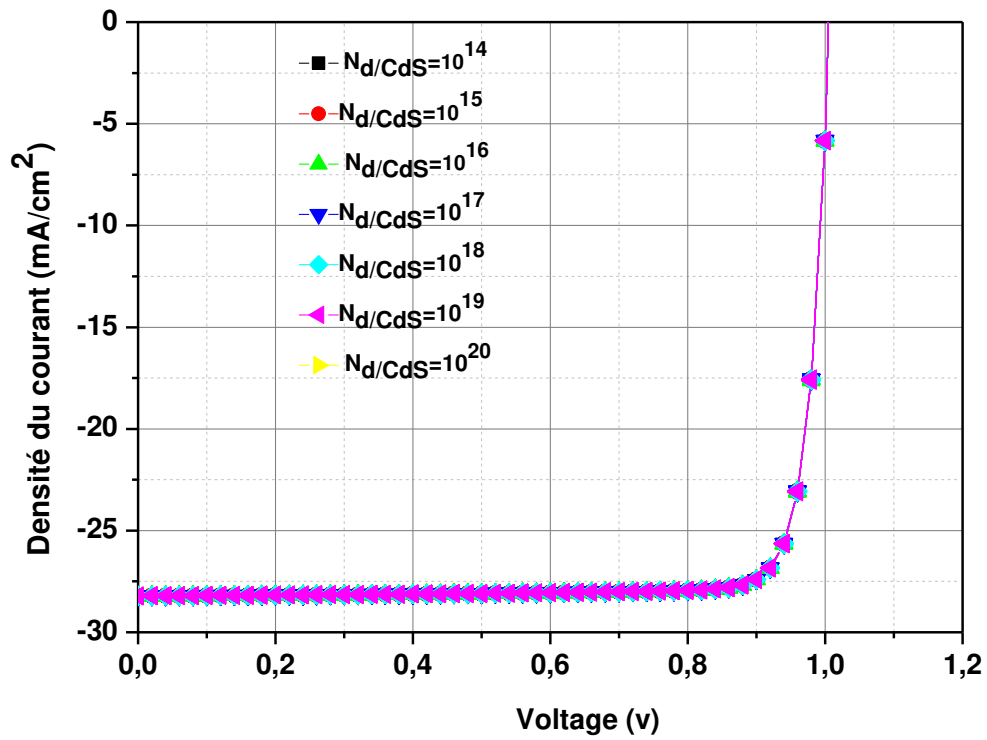
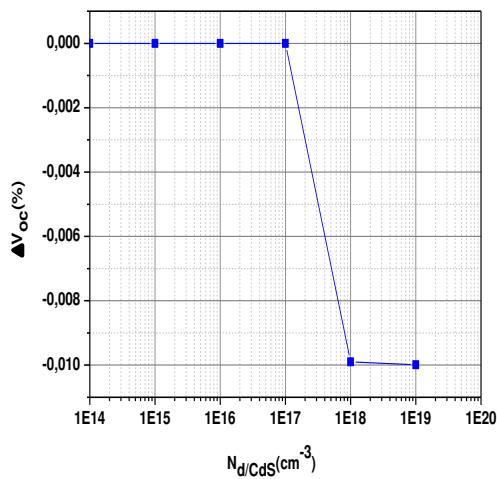
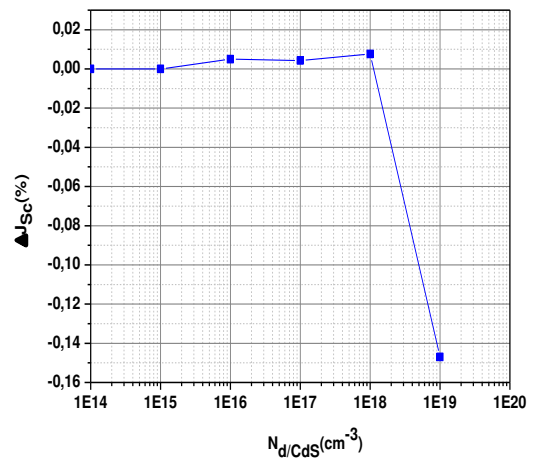


Figure.IV.4: Influence de la dopage  $N_d$  de la couche tampon CdS sur la caractéristique I-V

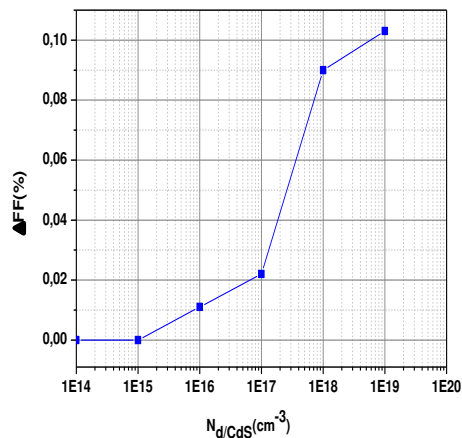


a)

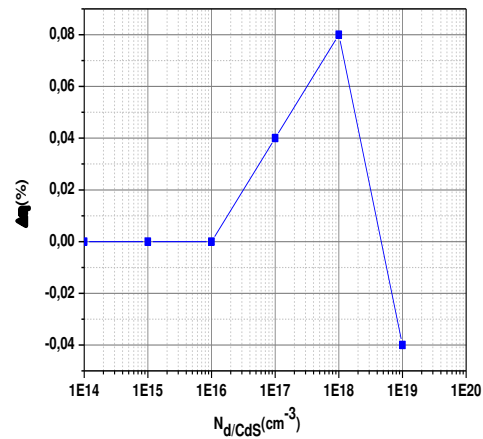


b)

## Chapitre IV: Résultats et discussion



c)



d)

**Figure.IV.5:** Effet de le dopage ( $N_d$ ) de la couche CdS sur la variation relative du: a) la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ). b) Le courant de court-circuit ( $\Delta J_{sc}$ ). c) Le facteur de forme ( $\Delta FF$ ). d) Le rendement ( $\Delta \eta$ )

D'après l'allure de différentes courbes (I-V) la figure (IV.4), nous constatons qu'elles ont parfaitement la même forme. Ceci nous permet de dire que la concentration du dopage de la couche tampon (CdS) n'influe pas de manière significative sur la caractéristique I-V de la structure.

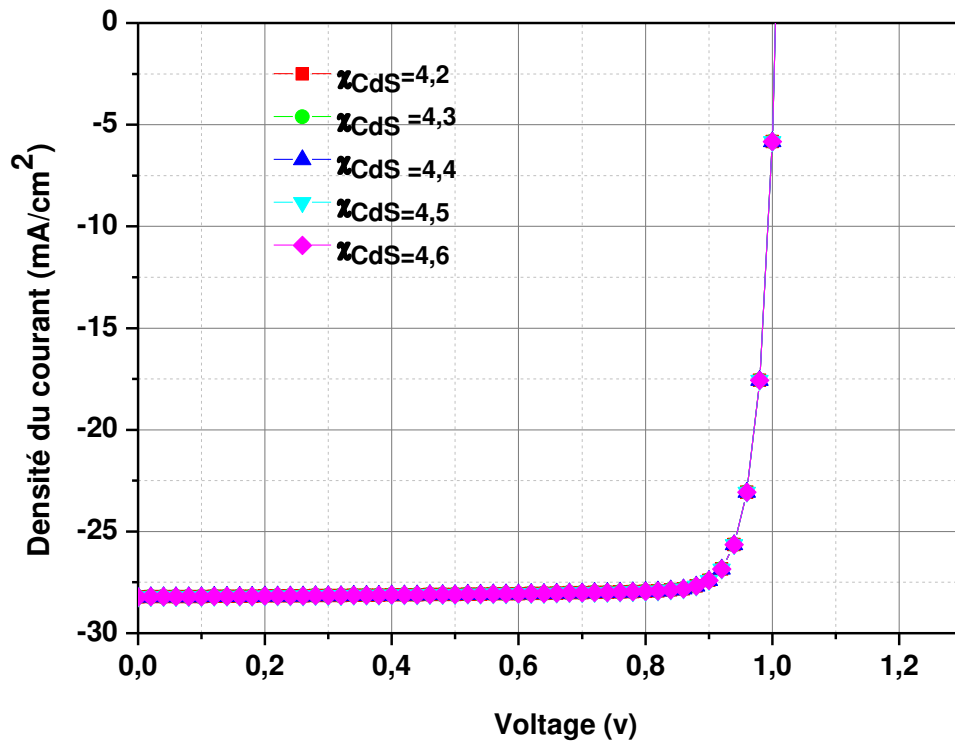
Nous remarquons sur la figure (IV.5) qu'avec le changement de dopage de ( $N_{d/cds}$ ), la variation relative du: la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $\Delta J_{sc}$ ), le facteur de forme ( $\Delta FF$ ) et le rendement ( $\Delta \eta$ ) n'a pas beaucoup changé dans le domaine allant de  $(10^{14} \text{ à } 10^{20}) \text{ cm}^{-3}$ .

Par exemple la variation relative du facteur de forme ( $\Delta FF$ ) compris entre (0 et 0,1) %, donc la valeur du changement est très faible.

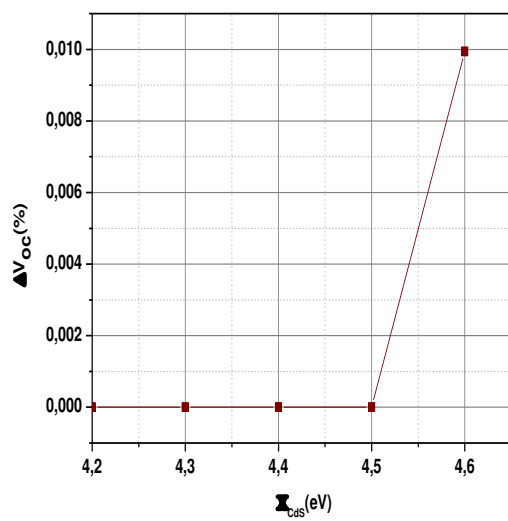
Ce qui signifie que le dopage de la couche tampon (CdS) n'affecte pas sur les propriétés de la cellule solaire.

### IV.4.3. Effet de l' électronique affinité de la couche tampon CdS ( $X_{CdS}$ ):

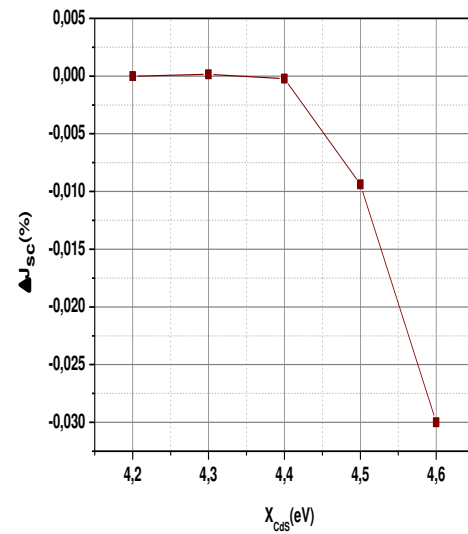
L'effet de la variation de l'électronique affinité ( $X_{CdS}$ ) de la couche tampon CdS de (4.2 à 4.6 ) eV sur la caractéristique I-V et sur la variation relative du les p aramètres photovoltaïques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$ ) respectivement sur les figures (IV-6 et IV-7) .



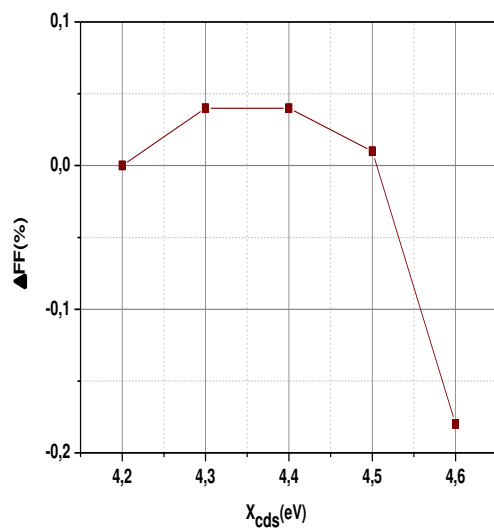
*Figure .IV-6: Influence variation de l' électronique affinité ( $X_{CdS}$ ) de la couche tampon CdS sur la caractéristique I-V*



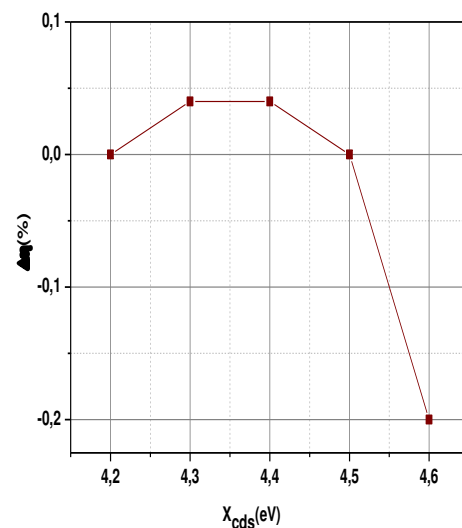
a)



b)



c)



d)

**Figure. IV.7:** Effet de l'électronique affinité ( $X_{CdS}$ ) de la couche CdS sur la variation relative du: **a)** la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ). **b)** Le courant de court-circuit ( $\Delta J_{sc}$ ). **c)** Le facteur de forme ( $\Delta FF$ ). **d)** Le rendement ( $\Delta \eta$ ).

Les caractéristiques I-V présentés dans la figure (IV-6) ont exactement la même allure malgré la variation de l'électronique affinité ( $X_{CdS}$ ), la variation de l'électronique affinité de cette couche ne montre aucune influence sur la caractéristique I-V.

L'affinité électronique (appelée aussi: Travail de sortie) du semiconducteur représente l'énergie à fournir à un électron du semiconducteur pour qu'il passe du niveau de Fermi au niveau du vide sans énergie cinétique. Cette caractéristique dépend de la nature du matériau et du dopage (position de  $E_f$ ). Dans notre cas on a varié l'affinité électronique de la couche tampon CdS. La variation se fait dans la gamme de (4.2 à 4.6) eV et les résultats sont affichés dans la figure (IV.6), on remarque qu'en augmentant l'affinité électronique ( $X_{CdS}$ ) de la couche tampon (CdS), la variation relative du: courant de court-circuit ( $\Delta J_{sc}$ ), le facteur de forme ( $\Delta FF$ ), la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ) et le rendement ( $\Delta \eta$ ) varie très légèrement le long du domaine. Nous remarquons que la variation relative de la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ) est comprise entre (0 et 0,01) %, donc la valeur du changement est très faible.

Ce qui signifie que l'épaisseur et l'affinité électronique ( $X_{CdS}$ ) de la couche tampon (CdS) n'affecte pas les propriétés de la cellule solaire.

Ce petit changement est dû à des erreurs de SCAPS lors du calcul.

#### **IV.4.4. Effet de mobilité des électrons ( $U_n$ ) de la couche tampon CdS:**

L'effet de la variation de mobilité des électrons ( $U_n$ ) de la couche tampon CdS de (10 à 100)  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  sur la caractéristique I-V et sur la variation relative des paramètres photovoltaïques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  et  $\eta$ ) respectivement sur les figures (IV-8 et IV-9).

## Chapitre IV: Résultats et discussion

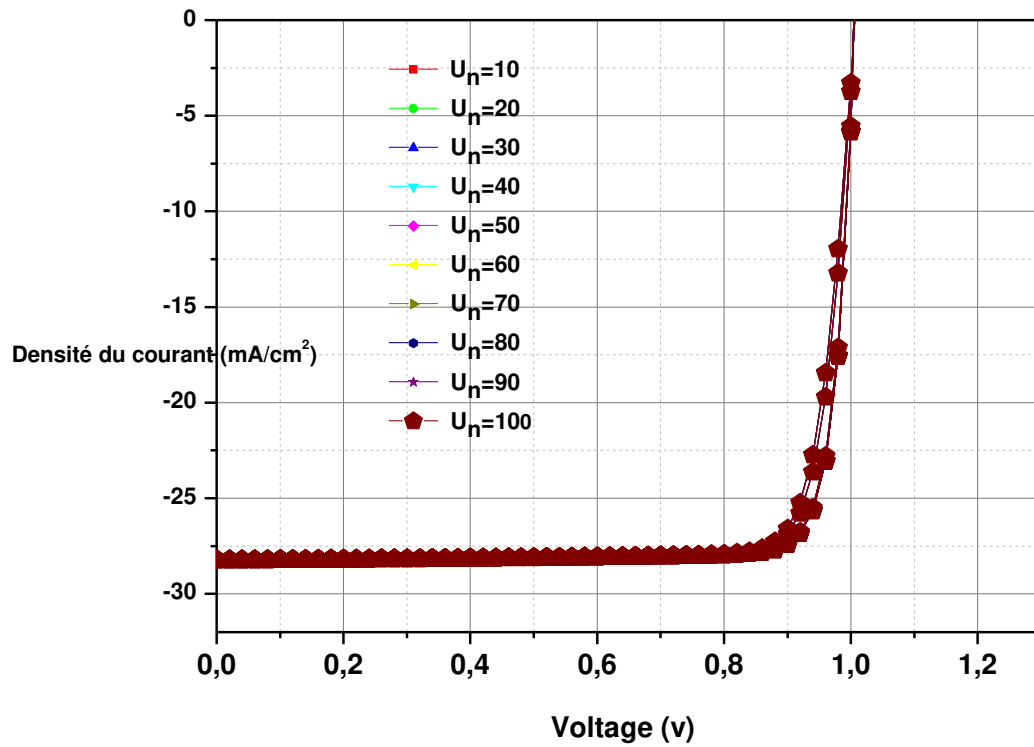
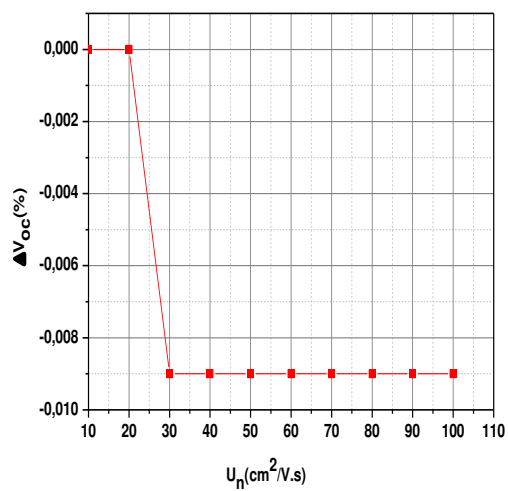
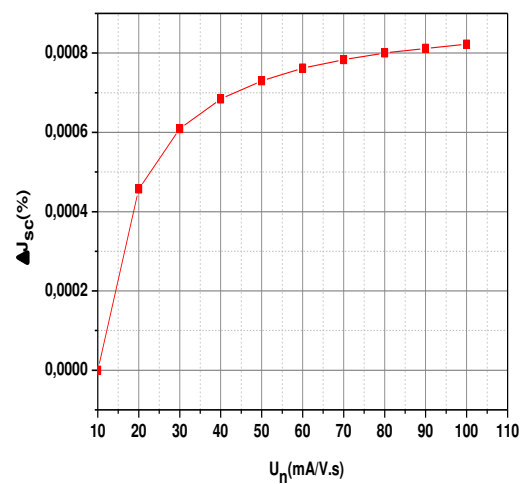


Figure .IV-8: Influence variation de mobilité des électrons ( $U_n$ ) de la couche tampon CdS sur la caractéristique I-V

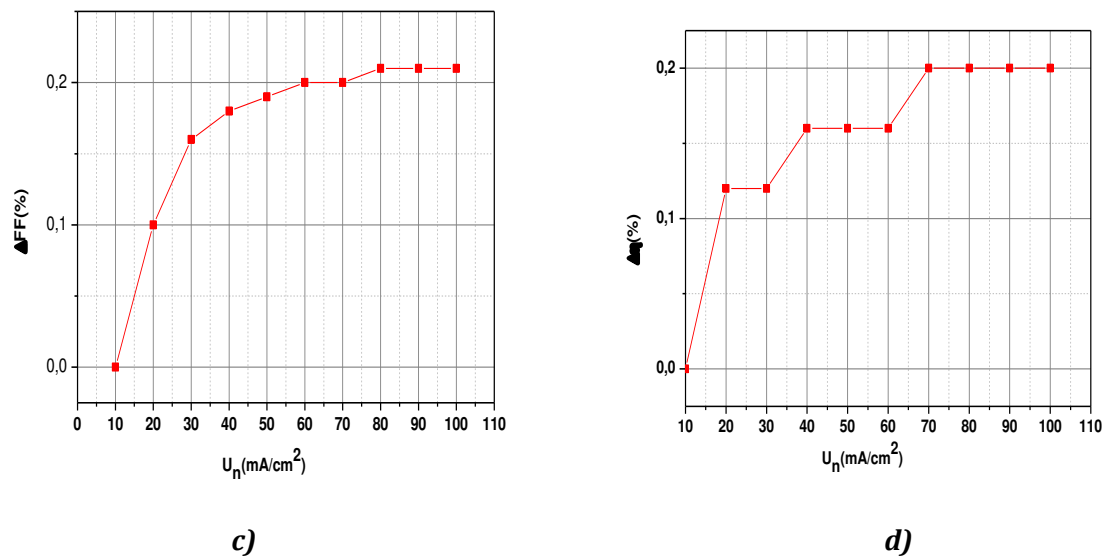


a)



b)





**Figure. IV-9:** Effet de mobilité des électrons ( $U_n$ ) de la couche (CdS) sur la variation relative du: **a)** la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ). **b)** le courant de court-circuit ( $\Delta J_{sc}$ ). **c)** le facteur de forme ( $\Delta FF$ ). **d)** le rendement ( $\Delta \eta$ ).

D'après l'allure de différentes courbes (I-V) la figure (IV.8), nous constatons qu'elles ont parfaitement la même forme. Ceci nous permet de dire que la mobilité des électrons de la couche tampon (CdS) n'influe pas de manière significative sur la caractéristique I-V de la structure.

Nous remarquons sur la figure (IV.9) qu'avec le changement de la mobilité des électrons ( $U_{n/cds}$ ) de la couche tampon CdS, la Variation relative du: la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $\Delta J_{sc}$ ), le facteur de forme ( $\Delta FF$ ) et le rendement ( $\Delta \eta$ ) n'a pas beaucoup changé sur l'intervalle (10 à 100)  $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$

Par exemple la variation relative de le rendement ( $\Delta \eta$ ) compris entre (0 et 0,2) %, donc la valeur du changement est très faible.

Ce qui signifie que la mobilité des électrons de la couche tampon (CdS) n'affecte pas sur les propriétés de la Cellule solaire.

### IV.4. Conclusion:

Dans ce travail nous avons étudié l'impact de la couche tampon CdS dans le but de concevoir une structure optimale à hétérojonction ZnO/CdS/CZTS qui donne le meilleur rendement électrique.

A cet effet, nous avons simulé les paramètres de sortie d'une cellule solaire à base de CZTS en essayant de trouver les paramètres optimaux, donnant les meilleures caractéristiques de sortie. Nous avons alors, étudié l'effet de (l'épaisseur – dopage – l'affinité électronique – mobilité des électrons) de la couche tampon CdS sur la caractéristique I-V ainsi que, la Variation relative du: la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $\Delta J_{sc}$ ), le facteur de forme ( $\Delta FF$ ) et le rendement ( $\Delta \eta$ ).

Après la simulation, nous avons trouvé que la couche CdS n'avait que très peu d'effet sur les Caractéristiques de la cellule solaire à base de CZTS, et ce léger changement est dû aux erreurs de calcul résultant des SCAPS.

## Bibliographie

---

- [1] Y.Marouf, Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant ATLAS SILVACO, Mémoire de Magister, Université Mohamed khaidr Biskra, (2015).

## **Chapitre IV:**

### **Résultats et discussion**

# Conclusion général

---

## Conclusion général :

Ce travail, nous avons fait une simulation d'une cellule solaire à base de Cuivre-Zinc Étain Sulfure/Séléniure  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ , ayant une structure  $\text{ZnO}(\text{n})/\text{CdS}(\text{n})/\text{CZTS}(\text{p})$ .

Dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, de grands espoirs reposent sur l'utilisation de cellules en couches minces pour atteindre des coûts compétitifs pour la production d'électricité.

L'objectif fixé dans ce travail est de faire une modélisation de l'effet des épaisseurs de CdS sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de CZTS en vue d'optimiser par simulation.

La modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel SCAPS, pour étudier les performances des cellules solaires à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$  (CZTS). Nous évaluons dans un premier temps, la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $\Delta J_{sc}$ ), le facteur de forme ( $\Delta FF$ ) et le rendement ( $\Delta \eta$ ). pour une structure typique de  $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CZTS}$ . Par la suite nous nous intéressons au gap et à l'épaisseur de CdS pour étudier l'influence de celles-ci sur les paramètres de sortie, surtout le rendement électrique de la structure.

La connaissance de la densité du photo-courant nous a permis de remonter aux courbes (J-V) d'une cellule solaire et ses différentes caractéristiques mais Le programme de calcul nous avons trouvé que la couche CdS n'avait que très peu d'effet sur les Caractéristiques de la cellule solaire à base de CZTS, et ce léger changement est dû aux erreurs de calcul résultant des SCAPS.

## Résumé

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de CZTS semble prometteur. En effet, le rendement de cellules a dépassé les 25% ces dernières années.

Dans ce travail nous allons étudier l'effet de les paramatères de la couche tamopn CdS (l'épaisseur – dopage – l'affinité électronique – mobilité des électrons) sur la caractéristique I-V, et la variation relative du: densité de courant de court circuit ( $\Delta J_{sc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $\Delta V_{oc}$ ), le facteur de remplissage ( $\Delta FF$ ), et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\Delta \eta$ ) d'une cellule solaire photovoltaïque en couches minces.

La simulation est effectuée à l'aide du logiciel SCAPS. Nous avons trouvé que, les performances de la cellule ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF,  $\eta$ ) Cela change légèrement le long du domaine, quelles que soient les les paramatères de la couche tamopn CdS.

**Mots Clés:** Cellule solaire ; couches minces ; CZTS ; simulation ; SCAPS.

## ملخص

في السياق العام لتتويج استخدام الموارد الطبيعية، أصبح استخدام الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الشمسية الضوئية أكثر رواجاً. وبالتالي فإن تطوير جيل جديد من الخلايا الضوئية من نوع CZTS يبدو واعداً. في الواقع لقد تجاوز مردود الخلية 25% في السنوات الأخيرة.

في هذا العمل سوف ندرس تأثير معاملات الطبقة CdS (السمك، التطعيم، الالفة الإلكترونية، حركية الإلكترونات) على الخاصية (IV) وكذلك التغير النسبي لكل من كثافة تيار الدارة القصيرة ( $\Delta J_{sc}$ )، جهد الدائرة المفتوح ( $\Delta V_{oc}$ )، عامل الشكل ( $\Delta FF$ ) وكفاءة التحويل الكهروضوئية ( $\Delta \eta$ ) للخلايا الفوفولطانية ذات الطبقات الرقيقة. تتم عملية المحاكاة باستخدام برنامج SCAPS ولقد وجدنا أن أداء الخلية ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF,  $\eta$ ) يتغير بشكل طفيف جداً على طول المجال مهما غيرنا في عوامل الطبقة CdS.

كلمات مفتاحية: الخلايا الشمسية، الطبقات الرقيقة، CZTS، محاكاة، SCAPS.