

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

N° : .....



FILIERE : Electronique

OPTION : MICROELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par:

BOUDRAA Mohamed

BENLEMKHARBECH Okba

THEME

*Etude unidimensionnel des défauts dans les cellules  
solaires CIGS*

Soutenu devant le jury composé de:

.....	Université de M'sila	Président
Dr. BOUCHAMA Idris	Université de M'sila	Rapporteur
.....	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2020 /2021

# Remerciements

*A l'issue de cette fin d'étude, nous adressons nos remerciements  
premièrement à Allah le tout puissant pour la santé et la patience .Qu'il  
nous a donnés durant toutes ces longues années d'études.*

*On tient aussi à remercier tous nos profs qui nous ont enseigné tout  
au long de ces derniers cinq années.*

***Je tiens à remercier notre encadreur***

***Dr. BOUCHAMA Idris***

***Professeur à l'université de M'sila,***

***Pour sa patience et ces précieux conseils***

*Nous voulons remercier les membres de jury d'évaluation de notre  
travail et aussi les enseignants de micro-électronique.*

*Nous voulons remercier les étudiants l'électronique et surtout l'étudiant  
de micro-électronique.*

*En fin : pour tous les personnes ayant contribuées de près ou de  
loin à la réalisation de ce mémoire.*

# *Dédicace*

*A ma chère Mère*

*A mon cher Père*

*A mes frères et sœur*

*A ma grande famille et tous mes amis*

## *Liste des figures:*

### *Chapitre 1 : Généralités sur les cellules solaires.*

<b>Figure1:</b> Distribution spectrale du spectre solaire AM1.5 incident Sur la surface de la terre.	<b>05</b>
<b>Figure 2:</b> Rayonnement solaire transmis à la terre.	<b>06</b>
<b>Figure 3:</b> Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de La convention AM.	<b>07</b>
<b>Figure 4:</b> principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	<b>09</b>
<b>Figure 5:</b> Schéma qui représente l'énergie du gap d'un semi-conducteur.	<b>10</b>
<b>Figure 6:</b> Réflexion, transmission et absorption.	<b>11</b>
<b>Figure 7 :</b> Structure de la jonction P-N.	<b>13</b>
<b>Figure 8:</b> Cellule solaire idéale.	<b>14</b>
<b>Figure 9:</b> Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.	<b>15</b>
<b>Figure 10 :</b> Caractéristique I-V de la cellule solaire à base de CIGS.	<b>17</b>
<b>Figure 11 :</b> Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque.	<b>20</b>
<b>Figure 12:</b> Les différentes technologies photovoltaïques.	<b>21</b>
<b>Figure 13:</b> Cellules solaires au silicium monocristallin.	<b>21</b>
<b>Figure 14:</b> Cellules au silicium polycristallin.	<b>22</b>
<b>Figure 15:</b> Cellules au silicium amorphe.	<b>22</b>

### *Chapitre 2 : Propriétés fondamentales des composés Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>.*

<b>Figure 1:</b> Eléments de base du composé CIGS, (a) Echantillon de cuivre, (b) Fil d'Indium, (c) Cristaux de gallium et (d) Echantillon de Sélénium.	<b>30</b>
<b>Figure2 :</b> Schéma simplifié d'une photopile en couches minces de type CIGS.	<b>31</b>
<b>Figure3 :</b> Structure des bandes d'énergies pour la structure d'une cellule solaire ZnO: Al/n-CdS/p-CuIn <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> Se <sub>2</sub> /Métal en couches minces.	<b>32</b>
<b>Figure 4 :</b> La classification périodique des éléments constituant la famille I-III-VI <sub>2</sub> .	<b>34</b>
<b>Figure 5:</b> Mailles primitives des structures (a) zinc blende et (b) chalcopyrite.	<b>35</b>

<b>Figure 6:</b> Structure chalcopyrite du matériau $\text{CuIn}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{Se}_2$ .	<b>35</b>
<b>Figure 7:</b> Diffraction des rayons X des couches minces $\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2$ Déposées sur verre par rf-magnétron sputtering à $300^\circ\text{C}$ .	<b>36</b>
<b>Figure 8:</b> Variation des paramètres de maille $2a$ et $c$ du CIGS en couche mince en fonction de la composition $x$ de Ga.	<b>37</b>
<b>Figure 9:</b> Dépendance en composition des énergies de transition dues à la première bande interdite directe dans l'alliage $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ .	<b>38</b>
<b>Figure 10:</b> Evolution du coefficient d'absorption optique de CISG en fonction de l'énergies photons $h\nu$ et des compositions $[\text{Ga}]/[\text{Ga}+\text{In}]$ .	<b>40</b>
<b>Figure 11:</b> Différent défauts ponctuels dans le réseau cristallin.	<b>42</b>
<b>Figure 12:</b> Défaut linéaire (dislocation).	<b>43</b>
<b>Figure 13:</b> Joint de grains.	<b>44</b>
<b>Figure 14:</b> Structure atomique au niveau du joint de grains dans $\text{CuInSe}_2$ .	<b>44</b>
<b>Figure 15:</b> Diagramme de bande d'énergie dans CIGS avec GB, $\Delta E_V = 0.2$ eV.	<b>45</b>
<b>Figure 16:</b> GB vertical et horizontal dans une couche CIGS.	<b>45</b>
<b>Figure 17:</b> Précipité cohérent(a), Précipité incohérent(b).	<b>46</b>

### *Chapitre 3 : Présentation du simulateur numérique SCAPS-1D .*

<b>Figure 1 :</b> Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.	<b>53</b>
<b>Figure 2 :</b> Définir le problème.	<b>54</b>
<b>Figure 3 :</b> Points de fonctionnement (point de travail).	<b>55</b>
<b>Figure 4 :</b> Panneau des bandes d'énergie.	<b>56</b>
<b>Figure 5 :</b> Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage.	<b>57</b>
<b>Figure 6 :</b> Définition de la structure d'une cellule solaire.	<b>58</b>
<b>Figure 7 :</b> Panneau des propriétés des contacts.	<b>58</b>
<b>Figure 8 :</b> Propriétés de la couche ajoutée.	<b>60</b>
<b>Figure 9 :</b> Propriétés des dopages définis.	<b>60</b>
<b>Figure 10 :</b> Modèle de l'absorption.	<b>60</b>

**Figure 11** : Définition des types de recombinaison prés. **61**

**Chapitre 4 : Résultats et discussions.**

**Figure 1** : La structure étudiée p-CIGS/ODC/n-CdS/ZnO. **65**

**Figure 2** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de CIGS. **67**

**Figure 3** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de **68**  
La concentration des accepteurs  $N_A(\text{CIGS})$ .

**Figure 4** : Rendement de conversion en fonction de l'énergie de gap  $E_g$  (CIGS). **70**

**Figure 5** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de CdS. **70**

**Figure 6** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de **71**  
La concentration des donneurs  $N_D(\text{CdS})$ .

**Figure 7** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de ZnO. **72**

**Figure 8** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de la couche **73**  
Fenêtre  $N_D(\text{ZnO})$ .

**Figure 9** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur **74**  
De la couche des défauts ODC.

**Figure 10** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de **76**  
La concentration des défauts de la couche absorbante  $N_T(\text{CIGS})$ .

**Figure 11** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de **77**  
la concentration des défauts de la couche  $N_{def}(\text{ODC})$ .

**Figure 12** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de **78**  
la concentration des défauts d'interface CdS/ODC.

## **LISTE DES SYMBOLES**

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>	<b>Unité</b>
<b><math>\alpha</math></b>	Coefficient d'absorption	<b><math>cm^{-1}</math></b>
<b>D</b>	Coefficient de diffusion	<b><math>cm^2s^{-1}</math></b>
<b><math>D_n</math></b>	Coefficient de diffusion des électrons	<b><math>cm^2s^{-1}</math></b>
<b><math>D_p</math></b>	Coefficient de diffusion des trous	<b><math>cm^2s^{-1}</math></b>
<b>E</b>	Energie	<b><math>J, eV</math></b>
<b><math>E_g</math></b>	Gap optique	<b>eV</b>
<b><math>E_C</math></b>	Bas de la bande de conduction	<b>eV</b>
<b><math>E_V</math></b>	Sommet de la bande de valence	<b>eV</b>
<b>FF</b>	Facteur de forme	
<b><math>\eta</math></b>	Rendement photovoltaïque	
<b><math>I_{cc}</math></b>	Courant de court-circuit	<b>A</b>
<b><math>I_{Ph}</math></b>	Photocourant	<b>A</b>
<b><math>J, j</math></b>	Densité de courant d'électrique	<b><math>mAcm^{-2}</math></b>
<b><math>J_{CC}</math></b>	Densité de courant de court-circuit	<b><math>mAcm^{-2}</math></b>
<b>k</b>	Vecteur d'onde	
<b><math>\lambda</math></b>	Longueur d'onde de diffraction	<b><math>\mu m</math></b>
<b><math>L_n</math></b>	Longueur de diffusion des électrons	<b><math>\mu m</math></b>
<b><math>L_p</math></b>	Longueur de diffusion des trous	<b><math>\mu m</math></b>
<b><math>\mu</math></b>	Mobilité	<b><math>cm^2v^{-1}s^{-1}</math></b>
<b><math>\nu</math></b>	Fréquence associée a la longueur d'onde du photon.	<b>Hz</b>

$N_a$	Densité des accepteurs	$cm^{-3}$
$N_d$	Densité des donneurs	$cm^{-3}$
$P$	Puissance	$w$
$R$	coefficient de Réflexion	
$\rho$	Résistivité électrique	$\Omega cm$
$QE$	Rendement quantique	
$\sigma$	Conductivité électrique	$\mu s$
$S$	Surface de la cellule	$m^2$
$T$	Température absolue	$k$
$V_{oc}$	Tension de circuit ouvert	$V$
$\omega$	Angle horaire (encore note AH)	$\bullet$
$P_m$	Puissance optimale	$w$

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b>	<b>2</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires.</b>	
<b>I. Introduction</b>	<b>5</b>
<b>II. Principe de base de la conversion photovoltaïque</b>	<b>5</b>
II.1. Rayonnement solaire	5
II.2. Conversion du rayonnement	8
<b>III. Caractéristiques des semi-conducteurs</b>	<b>9</b>
III.1. Différent types de dopage	10
a) Semi-conducteur dopé n	10
b) Semi-conducteur dopé p	11
III.2. Propriétés électro-optiques des semi-conducteurs	11
a) Absorption optique	11
b) Génération des paires électron-trous	12
c) Transport de charge	12
III.3. Jonction P-N dans les semiconducteurs	13
a) Jonction abrupte	13
b) Jonction graduelle	13
<b>0IV. Structure d'une cellule photovoltaïque</b>	<b>14</b>
IV.1. Modélisation d'une cellule solaire	14
a) Cas idéal	14
b) Cas réel	15
IV.2. Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire	16
IV.3. Différents paramètres photovoltaïques	17
IV.3.1. Courant de court-circuit $I_{cc}$	17
IV.3.2. Tension de circuit-ouvert $V_{co}$	18

IV.3.3 Facteur de Forme FF	18
IV.3.4. Rendement énergétique maximum $\eta_m$	18
IV.4. Réponse spectrale	19
IV.5. Rendement quantique	20
<b>V . Différentes technologies photovoltaïques</b>	<b>20</b>
V.1 . Les cellules solaires au silicium monocristallin	21
V .2 . Cellules solaires au silicium polycristallin (ou multicristallin)	22
V.3. Cellules solaires au silicium amorphe (encouche mince)	22
V.4. Filière des cellules solaires en couches minces	23
<b>VI. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque</b>	<b>23</b>
VI.1 Avantages	23
VI.2 Inconvénients	23
<b>VII. Conclusion</b>	<b>24</b>
<b>Chapitre II : Propriétés fondamentales des composés Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub></b>	
<b>I. Introduction</b>	<b>27</b>
<b>II. Généralités sur les éléments de base</b>	<b>28</b>
a- Cuivre	28
b- Indium	29
c- Gallium	29
d- Sélénium	29
<b>III. Différentes couches minces de la photopile à base de CIGS</b>	<b>31</b>
a) Couche absorbante	32
b) Couche tampon	32
c) Couche d'oxyde transparent conducteur (OTC)	33
<b>IV. Propriétés fondamentales des matériaux I-III-V<sub>2</sub></b>	<b>33</b>
IV.1 Structure cristallographique	34
VI.2 Propriétés optiques	39
VI.3 Propriétés électriques	41

VI.3.1 Les défauts ponctuels	41
VI.3.2 Les défauts linéaires	43
VI.3.3 Les défauts bidimensionnels	43
VI.3.4 Les défauts tridimensionnels	46
VI.3.5 Influence du sodium	46
VI.4. Propriétés électriques du CuInSe <sub>2</sub>	46
<b>V. Avantages du CuInSe<sub>2</sub> sous sa structure</b>	<b>47</b>
<b>VI. Conclusion</b>	<b>48</b>

### **Chapitre III : Présentation du simulateur numérique SCAPS-1D**

<b>I. Introduction</b>	<b>52</b>
<b>II. Notions de base</b>	<b>53</b>
II.1 Lancer SCAPS	54
II.2 Définir le problème	54
II.3 Définir le point de fonctionnement	54
II.4 Sélection des caractéristiques à simuler	55
II.5 Lancer le calcul	55
II.6 Afficher les courbes simulées	55
II.7 Les courbes I-V	56
<b>III. Définition d'une cellule solaire</b>	<b>57</b>
III.1 Edition de la structure d'une cellule solaire	57
III.2 Contacts	58
III.3 Définition des couches	59
<b>IV. Conclusion</b>	<b>61</b>

### **Chapitre IV: Résultats et discussions**

<b>I. Introduction</b>	<b>64</b>
<b>II. Présentation de la cellule solaire simulée</b>	<b>64</b>
<b>III. Paramètres de simulation</b>	<b>65</b>
<b>IV. Résultats de la simulation</b>	<b>66</b>

IV.1. Obtention de l'épaisseur optimal de l'absorbeur CIGS	66
IV.2. Obtention du dopage optimal de l'absorbeur CIGS	68
IV.3. Obtention de l'énergie de gap optimale	69
IV.4. Obtention de l'épaisseur optimal de la couche tampon CdS	70
IV.5. Obtention du dopage optimal de la couche tampon CdS	71
IV.6. Obtention de l'épaisseur optimal de la couche fenêtre ZnO	72
IV.7. Obtention du dopage optimal de la couche fenêtre ZnO	72
IV.8. Obtention de l'épaisseur optimal de la couche des défauts ODC	74
<b>V. Etude des défauts dans la structure de la cellule solaire</b>	<b>75</b>
V.1. Effet de la concentration des défauts profonds dans le volume de l'absorbeur <i>CIGS</i>	75
V.2. Effet de la concentration des défauts de la couche ODC	76
V.3. Effet de la concentration des défauts d'interface CdS/ODC	77
<b>VIII. Conclusion</b>	<b>78</b>
<b>Conclusion Générale</b>	<b>82</b>
<b>Résumé</b>	<b>84</b>

# **Introduction générale**

## *Introduction générale*

L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés. Elle est aussi le pilier de l'économie moderne et l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine.

Les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne,...etc.) reviennent au premier plan de l'actualité. Leur exploitation est très bénéfique pour l'environnement. Parmi ces énergies, l'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus prometteuse. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des cellules solaires fonctionnant à base de l'effet photovoltaïque.

L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire nécessite leur optimisation dans le but d'augmenter leur rendement afin d'augmenter la compétitivité de cette source d'énergie renouvelable par rapport aux moyens traditionnels de production d'électricité.

Les cellules solaires conventionnelles sont basées sur le silicium cristallin comme matériau absorbeur dont l'épaisseur est de l'ordre de 200  $\mu\text{m}$ , présentant un coût très élevé.

Les cellules solaires en couches minces utilisant le CIGS comme absorbeur présente une alternative très intéressante pour réduire les coûts de matière tout en permettant d'atteindre de hauts rendements de 20% en laboratoire.

En effet, le CIGS ou  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  étant un alliage à base de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium, présente un coefficient d'absorption optique plus élevé que celui du silicium, ce qui offre la possibilité d'utiliser des couches plus minces de l'ordre de 4  $\mu\text{m}$  (très inférieure à l'épaisseur d'un absorbeur à base de silicium cristallin) pour des coûts de matière moins élevés. De plus, cette technologie utilise plusieurs variétés de substrats peu coûteux comme le verre mais aussi des substrats flexibles qui présentent tant d'intérêts pour diverses applications.

Ce travail aborde l'étude des caractéristiques électriques de la cellule solaire en couches minces à base du  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (CIGS). La structure hétérojonction  $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{ODC}/\text{CIGS}$  est constituée par le composé CIGS de type p, qui représente l'absorbeur de la cellule (c'est-à-dire la zone où les paires électrons-trous sont générées sous illumination). Une jonction PN est formée entre la couche absorbante de CIGS de type p et la couche buffer de CdS de type n. Le ZnO est appelé couche fenêtre, car elle doit laisser passer le rayonnement de rentrer à la cellule. La simulation de la cellule solaire se fait par un outil puissant unidimensionnel qui s'appelle: SCAPS-1D. Nous allons calculer et étudier les paramètres photovoltaïques de la cellule tels que: la densité de courant de court-circuit ( $J_{\text{CC}}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{\text{CO}}$ ), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion. ces paramètres sont tirés directement ou

indirectement de la caractéristique densité de courant-tension (J-V) et le rendement quantique (QE). Une variation des grandeurs physiques et géométriques de la structure telles que: l'épaisseur de la couche p-CIGS, n-CdS, n-ODC, n<sup>++</sup>ZnO), la densité des défauts et de dopage dans ces régions qui font l'interface avec l'absorbeur CIGS.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres répartis comme suit :

Dans le premier chapitre, on présente principe de base de la conversion photovoltaïque, la caractéristique de semi-conducteur et la structure d'une cellule solaire.

Le deuxième chapitre aborde les propriétés fondamentales des composés CIGS, les défauts existes au volume de la couche absorbantes CIGS. On a terminé le chapitre par les avantages du CuInSe<sub>2</sub> sous sa structure.

Le troisième chapitre présente une description du logiciel de simulation numérique SCAPS-1D et son utilisation pour la simulation des cellules solaires.

Dans le dernier chapitre, nous présentons la discussion des résultats obtenues de la simulation de notre cellule solaire a hétérojonction ZnO/CdS/ODC/CIGS. Les caractéristiques obtenues sont étudiées et analysées sous la variation des grandeurs physiques et géométriques des différentes couches minces constituant notre cellule.

Enfin, une conclusion générale et des perspectives.

***Chapitre I***  
***Généralités sur les cellules***  
***Solaires***

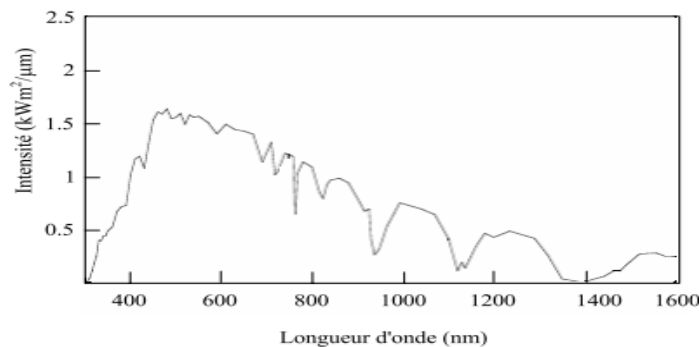
## I.Introduction

L'électricité photovoltaïque est une source incontournable pour l'avenir et des efforts considérables se font pour rendre cet apport d'énergie plus performant. Dans ce chapitre on va voir quelques bases nécessaires dans le domaine photovoltaïque. Nous allons rappeler quelques notions sur la structure générale d'une cellule solaire et de la conversion photovoltaïque. Nous décrirons ensuite les semi-conducteurs, la jonction P-N et les cellules solaires avec leur caractéristiques photovoltaïques et enfin par une brève description des différentes filières technologiques existantes. On terminera ce chapitre par les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

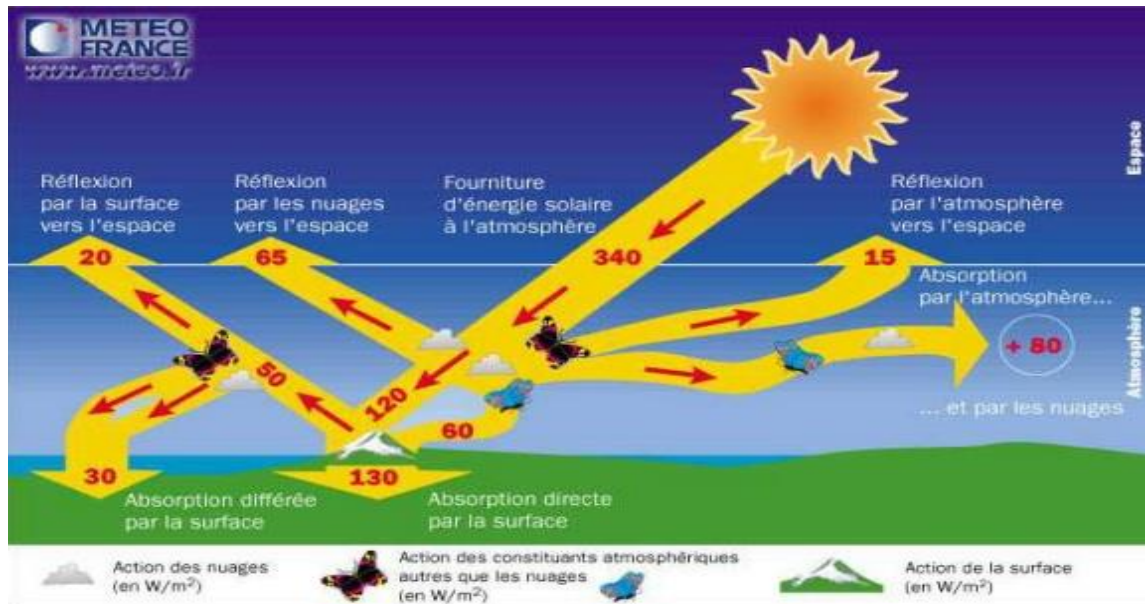
## II. Principe de base de la conversion photovoltaïque

### II.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0.4 et 0.75  $\mu\text{m}$ ) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0.75 et jusqu'à 4  $\mu\text{m}$  environ), la distribution spectrale du spectre solaire AM1.5 arrivé à la surface de la terre est représenté dans la Figure 1. L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de  $340 \text{ W.m}^{-2}$ . Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre atmosphère, environ  $100 \text{ W.m}^{-2}$  sont réfléchis vers l'espace, seul le reste est absorbé pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre voir la Figure 1.



**Figure 1** : Distribution spectrale du spectre solaire AM1.5 incident sur la surface de la terre.



**Figure 2 :** Rayonnement solaire transmis à la terre.

La Figure 2, montre que près du quart de cet éclairement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère: pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages ( $65 \text{ W.m}^{-2}$ ), le reste ( $15 \text{ W.m}^{-2}$ ) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc  $180 \text{ W.m}^{-2}$  qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers ( $120 \text{ W.m}^{-2}$ ) se font directement, le reste ( $60 \text{ W.m}^{-2}$ ) s'effectuant par diffusion vers le bas.

Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et la réflexion. Sur les ( $180 \text{ W.m}^{-2}$ ) incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ  $50 \text{ W.m}^{-2}$ . En fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard et s'ajoute partiellement aux  $180 - 50 = 130 \text{ W.m}^{-2}$  de rayonnement solaire non réfléchis à son contact.

Bien que l'absorption du rayonnement solaire soit un phénomène continu, on peut simplifier la compréhension du processus précédent en supposant que les  $50 \text{ W.m}^{-2}$  réfléchis par la surface du globe se répartissent entre  $20 \text{ W.m}^{-2}$  définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire et  $30 \text{ W.m}^{-2}$  qui reviennent à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Cette énergie s'ajoute aux  $130 \text{ W.m}^{-2}$  initialement non réfléchis pour constituer approximativement les  $160 \text{ W.m}^{-2}$  qu'absorbe la surface terrestre [1].

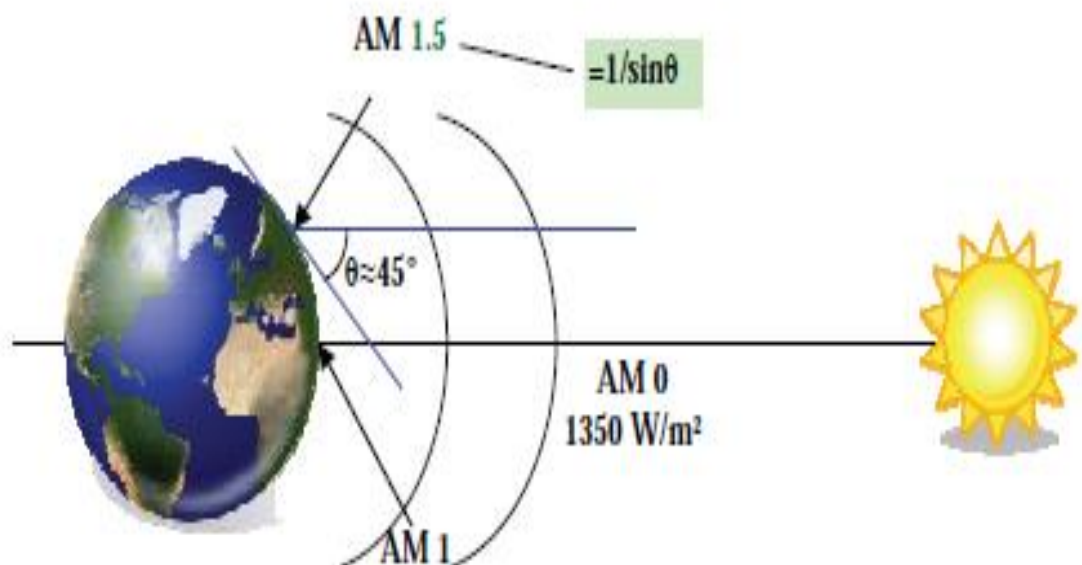
Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons lumineux, on introduit un coefficient appelé nombre de masse d'air AMX dont l'expression est:

$$X = \frac{1}{\sin \theta} \quad (1)$$

Où  $\theta$  est l'angle que fait le soleil avec son zénith (voir la Figure 3), par définition, AM0 correspond aux conditions hors atmosphère. Quand le soleil fait un angle de  $48.19^\circ$  par rapport au zénith, la lumière incidente est dit AM1.5, le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire ( $83.3 \text{ mW/cm}^2$  pour AM1.5 dont la surface est inclinée à  $37^\circ$  du soleil) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques.

Les conditions standards de caractérisation sont définis par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnique Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5 global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité  $100 \text{ mW/cm}^2$  et pour une température de cellule de  $25^\circ\text{C}$  [1,2].

Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes: une composante directe et une composant diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle: nuages, sol) formant le rayonnement global, le spectre d'émission solaire sous AM1.5 global est normalisé à  $100 \text{ mW/cm}^2$  sa valeur dépend de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux.



**Figure 3 :** Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de La convention AM.

L'intégration de l'irradiante sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance  $P$  (en  $\text{W.m}^{-2}$ ) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes [3]:

- **AM0:** hors atmosphère (application spatiale).  $P=1.36 \text{ KW.m}^{-2}$ .
- **AM1:** le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
- **AM1.5G:** spectre standard, le soleil est à  $45^\circ$ .  $P=1 \text{ KW.m}^{-2}$ .

## II.2. Conversion du rayonnement

Comme nous avons cité auparavant, l'effet photovoltaïque provient de la conversion du rayonnement du soleil en énergie électrique. Cette conversion est effectuée par l'intermédiaire des composants électroniques à base des matériaux semi-conducteurs, dit des cellules solaires ou des cellules photovoltaïques. Le groupement d'un ensemble des cellules solaires constitue le panneau solaire ou le panneau photovoltaïque. A chaque photon du spectre solaire, on associe une énergie  $E$ :

$$E = h \nu \quad (2)$$

Avec  $\nu$  est la fréquence associée à la longueur d'onde du photon, et  $h$  est la constante de Planck.

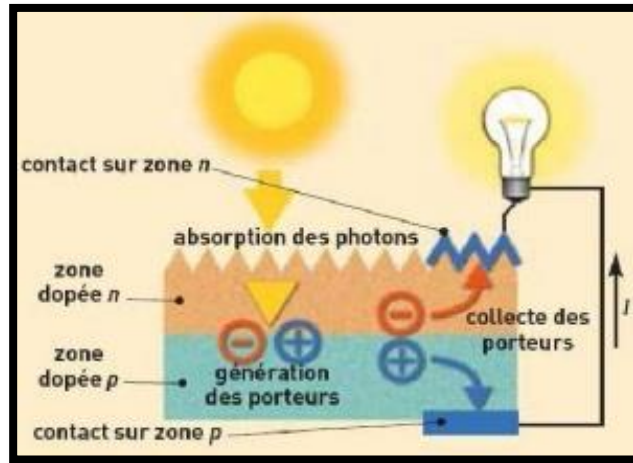
Une cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif constitué deux semi-conducteurs de conceptions différentes, type p (les trous sont les porteurs majoritaires) et type n (les électrons sont les porteurs majoritaires), il permet de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Les semi-conducteurs candidats pour qu'ils soient les bases des cellules solaires doivent présenter une stabilité physique pour assurer la fiabilité des photopiles au cours du temps et ayant des gaps adaptés pour l'absorption du spectre solaire avec un coefficient d'absorption plus élevé.

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut se résumer en deux étapes:

- ✚ Un photon d'énergie  $E = h \cdot \nu$  pénétrant dans la cellule solaire est absorbé par le matériau semi-conducteur.
- ✚ Si l'énergie du photon incident est suffisamment élevée, le photon va pouvoir faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi un pair électron-trou. Ces électrons et trous sont séparés par un champ électrique interne (à la jonction) et collectés entre une grille (face avant) et un contact ohmique réalisé (face arrière) puis débités dans la charge.

Ci-dessous on représente un schéma simplifié d'une cellule solaire (voir Figure 4).

Notons que la cellule photovoltaïque n'est sensible que dans un domaine d'ondes particulières et seul les matériaux semi-conducteurs disposent de la structure nécessaire à la génération des porteurs de charge, les paires électron-trou. En effet dans un métal, tous les niveaux supérieurs au niveau de Fermi sont autorisés et toutes les longueurs d'onde sont donc susceptibles d'être absorbées. Cependant, les paires électron-trou générées se recombinent quasi-instantanément ( $10^{-12}$  à  $10^{-13}$ s), ce qui ne laisse pas la possibilité de les exploiter.



**Figure 4 :** principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Un matériau isolant possède un gap d'au moins 8 eV. Pour interagir avec un électron, le photon incident devra donc fournir une énergie supérieure à 8 eV, ce qui correspond à des longueurs d'onde d'environ 155 nm, domaine qui ne couvre pas le rayonnement solaire.

Dans un semi-conducteur, la structure des bandes de conduction et de valence définissent un gap plus faible que dans le cas des isolants: 0.3 à 2 ou 3 eV. Si le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de celle de valence, le gap est direct, les transitions sont donc directes et radiatives.

### III. Caractéristiques des semi-conducteurs

On appelle semi-conducteur un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité ( $\sigma$ ) des isolants sont comprises entre  $11 \cdot 10^{-1}$  et  $1 \cdot 10^{-19}$  S/cm et celles des conducteurs entre  $6 \cdot 10^7$  et  $1 \cdot 10^4$  S/cm. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre  $1 \cdot 10^3$  et  $1 \cdot 10^{-6}$  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" (le fossé).

- ✚ 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 semi-conducteur "intrinsèque" en tant que mauvais conducteur ou mauvais isolant a une conductivité qui augmente avec la température.

Parmes les matériaux semi-conducteurs naturels, dits "intrinsèques", sont : le **Silicium (Si)** et le **Germanium (Ge)** [4].

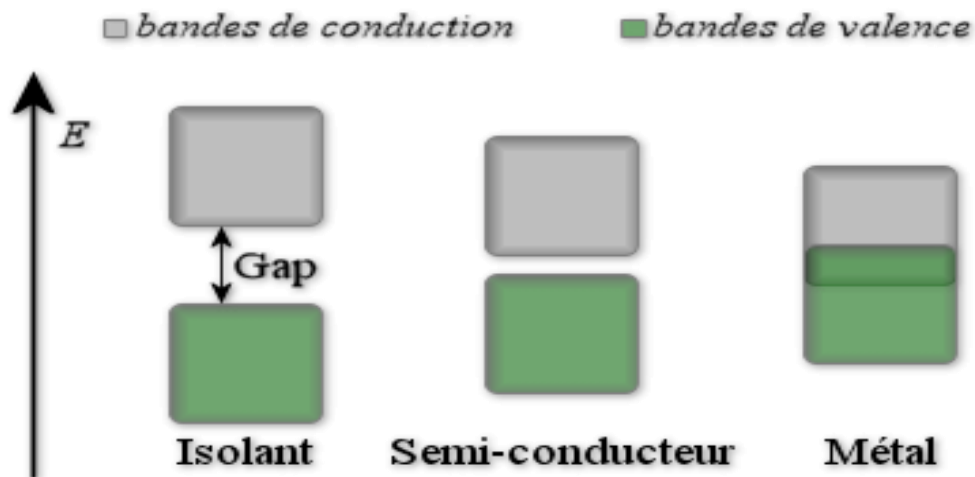


Figure 5: Schéma qui représente l'énergie du gap d'un semi-conducteur.

### III.1. Différent types de dopage

Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que composants électroniques actifs tels les diodes et les transistors; Ils servent de base aux semi conducteurs dopés: on y rajoute des impuretés pour modifier leur comportement. Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques [4].

#### a) 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 :

$$n = n_0 + N_D \quad (3)$$

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

### b) 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  $N_A$  sera donc supérieure à la concentration de donneurs: ( $N_A - N_D > 0$ ).

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé p, la concentration en trous du semi-conducteur sera :

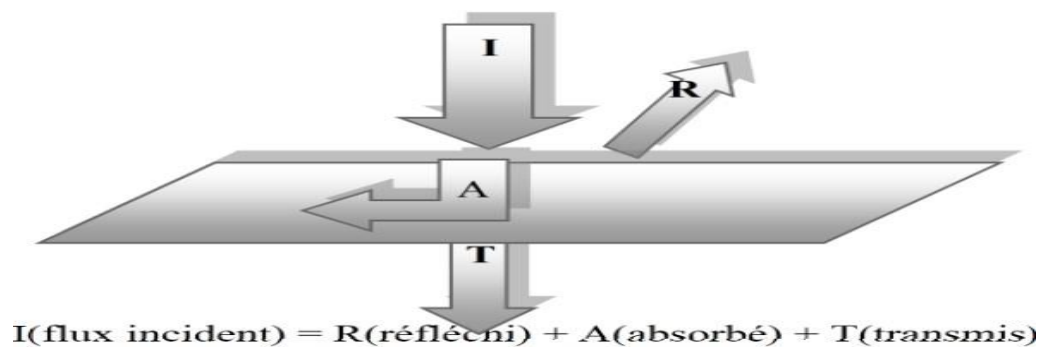
$$P = P_0 + N_A \quad (4)$$

## III.2. Propriétés électro-optiques des semi-conducteurs

### a) Absorption optique

Soit un faisceau lumineux d'énergie  $E = h\nu$  arrivant à la surface d'un semi-conducteur une partie de ce faisceau est réfléchi. Selon la longueur d'onde, le faisceau incident traverse le cristal sans ou avec atténuation. L'intensité d'une onde lumineuse,  $I$ , décroît exponentiellement suivant la loi de Bouguer Lambert [4].

$$I = I_0 \exp(-\alpha \cdot x) \quad (5)$$



**Figure 6:** Réflexion, transmission et absorption.

### ✚ Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption,  $\alpha$ , peut être exprimé sous la forme [5] :

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^\gamma \quad (6)$$

Où  $\gamma$  est une constante dépendant de la nature des transitions.

### b) Génération des paires électron-trous

Le taux de génération donc [5]:

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)F(\lambda)\mathbf{1} - R e^{-\alpha\lambda x} \quad (7)$$

Où  $F$  est le nombre des paires électron-trou photo-générés par unité de surface par seconde par unité de longueur d'onde (Flux solaire) et  $R(\lambda)$  est le coefficient de réflexion.

### c) Transport de charge

La diffusion en fonction du gradient de concentration :

$$\text{Electrons : } \vec{j}_n = qn\mu_n\vec{E} + qD_n\vec{\nabla}n. \quad (8)$$

$$\text{Trous : } \vec{j}_p = qp\mu_p\vec{E} - qD_p\vec{\nabla}p. \quad (9)$$

où  $\mu$  la mobilité ( $m^2V^{-1}s^{-1}$ ), et  $D$  c'est le coefficient de diffusion ( $cm^2/s$ ).

$q = e =$  charge élémentaire  $= 1.6 \times 10^{-19}$  C.

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \text{ (Relation d'Einstein).}$$

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (10)$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (11)$$

$$\✚ \text{ Conductivité : } \sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \text{ ( } \Omega cm \text{)}^{-1}.$$

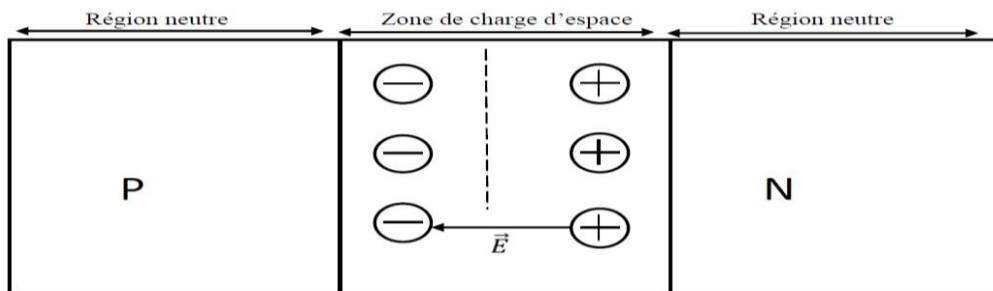
$$\✚ \text{ Résistivité : } \rho = 1/\sigma \text{ ( } \Omega cm \text{)}.$$

### III.3. Jonction P-N dans les semiconducteurs

Parmi tous les dispositifs à semi conducteur, la jonction P-N est un composant essentiel à la fois pour ses applications directes et parce que la compréhension de sa physique permet la compréhension de nombreux autres dispositifs. Une jonction P-N est constituée par un cristal semiconducteur dont la concentration en impuretés profondes varie avec  $x$  pour passer d'une région de type P à une région de type N.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée par la zone où la charge n'est pas nulle porte le nom de zone de charge d'espace (ZCE) (Figure7).

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P. La diode est obtenue par la structure de la jonction P-N [4].



**Figure 7** : Structure de la jonction P-N.

#### a) Jonction abrupte

Une jonction P-N est de type abrupt si la quantité  $N_a - N_d$  est constante et positive dans la zone P et elle constante et négative dans la zone N.

#### b) Jonction graduelle

Une jonction est dite progressive linéaire si la quantité  $N_d - N_a$  suit la loi linéaire suivante:  

$$N_d - N_a = C.x$$

Où : C est une constante positive et  $x$  est une épaisseur de zone de charge d'espace (ZCE).

#### IV. Structure d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques appelés aussi photopiles sont des composants électroniques à semi-conducteur [6], lorsqu'ils sont éclairés par les rayonnements solaires (les signaux optiques), ils développent une forces électromotrices (f.é.m.) entre ses bornes, capables de débiter un photo-courant dans des charges (transformer l'énergie solaire directement en énergie électrique) [7,8].Le photo-courant directement fourni est du continu, mais il peut être rendu alternatif grâce des dispositifs de transformation.

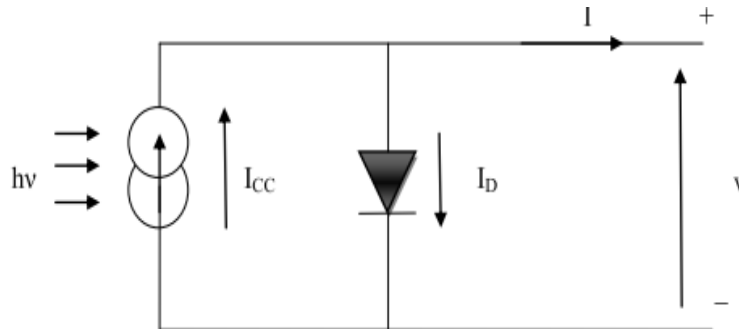
##### IV.1. Modélisation d'une cellule solaire

###### a) Cas idéal

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme [9]:

$$I = I_{cc} - I_D = I_{cc} - I_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right) \quad (12)$$

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire est:



**Figure 8 :** Cellule solaire idéale.

$I$ : Courant et tension fournis par la cellule.

$I_D$ : Courant de diode donnée par l'équation [9]:

$$I_D = I_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{qV}{AKT}\right) - 1 \right) \quad (13)$$

Avec:

- ✚  $q$ = charge élémentaire=  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ .
- ✚  $V$ = tension aux bornes de la jonction p-n.
- ✚  $k$ = constante de Boltzmann=  $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ .
- ✚  $T$ = température (K).

- +  $I_0$  = courant de saturation inverse de la jonction p-n.
- +  $A$  = coefficient d'idéalité de la jonction.

### b) Cas réel

La performance d'une cellule solaire est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances ( $R_S$  et  $R_P$ ).

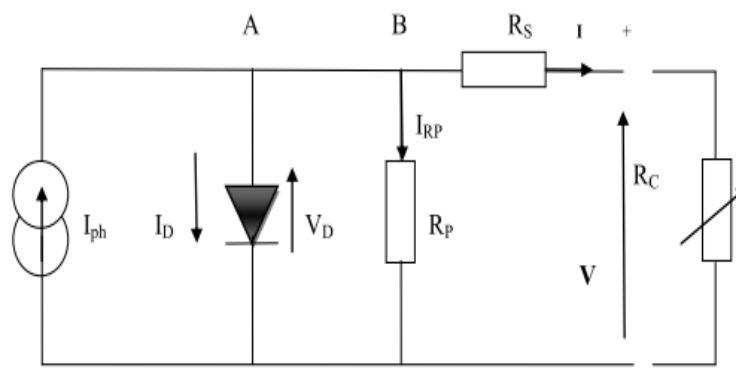
- +  $R_S$ : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts (Semi-conducteur, électrodes), elle s'exprime par la relation suivant [9]

$$R_S = \rho \frac{L}{S_g} + R_m \quad (14)$$

Avec:

- +  $\rho$ : La résistivité de la grille.
- +  $L$ : La longueur de la grille.
- +  $S_g$ : Section des grilles collectrices.
- +  $R_m$ : Résistance propre du matériau, sa valeur est faible ( $< 2\Omega$  pour les cellules au silicium).
- +  $R_P$ : Résistance parallèle, dite 'Shunt', provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la jonction.

$R_S$  et  $R_P$  modifient le courant de court-circuit de la cellule en photo-courant  $I_{ph}$ , on aura donc le montage électrique équivalent dans la page suivant:



**Figure 9:** Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.

- Appliquons la loi de Kirchhoff aux nœuds A et B:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{RP} \quad (15)$$

- Le courant  $I$  débité par la cellule, est la somme algébrique de trois courant:

$I_{ph}$ : photo courant indépendant de  $V$  (ou de  $R_s$ ), il est proportionnel au flux incident (taux de génération-recombinaison) et aux longueurs de diffusion des porteurs [9].

$$I_{ph} = qg (L_n + L_p) \quad (16)$$

$I_{RP}$ : courant traversant  $R_p$ , si  $R_p$  est très grande, il devient très faible est indépendant de la tension [12]:

$$I_{RP} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (17)$$

Car:

$$V_D = R_p \cdot I_{RP} = V + I.R_s \quad (18)$$

$I_D$ : Courant diode, il est de même ordre de grandeur que  $I_{RP}$  pour les faibles tensions et il devient très grand au voisinage de  $V_{CO}$ , il s'écrit sous la forme [9]:

$$I_D = I_0 \cdot \left( \exp \left( \frac{q}{A.K.T} V_D \right) - 1 \right) \quad (19)$$

Remplaçons dans (15) les équations (17), (18) et (19), l'équation caractéristique deviendra:

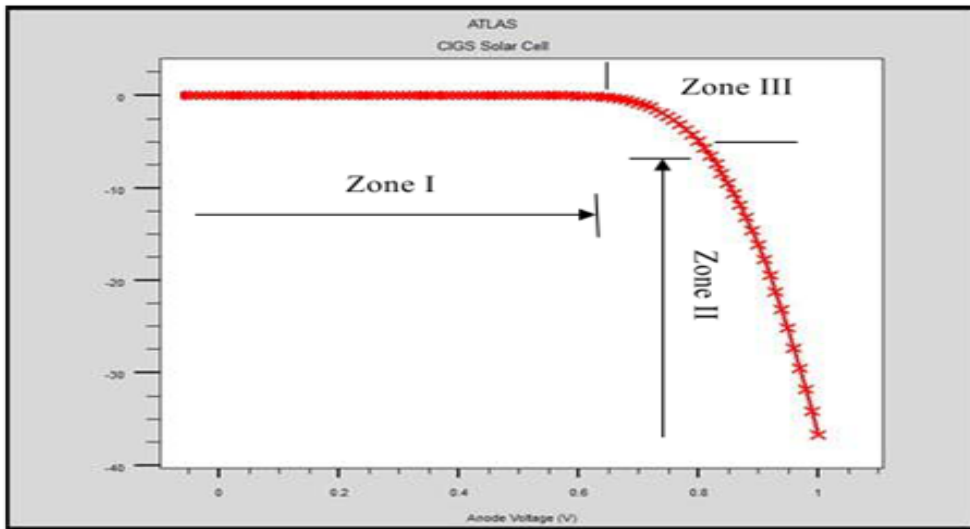
$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left( \exp \left( \frac{q}{A.K.T} (V + I.R_s) \right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (20)$$

$A$  est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace.

## IV.2. Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire

La capacité d'une cellule à produire de l'énergie est mesurée grâce à sa caractéristique courant-tension (Figure 10).

On peut facilement obtenir à partir de cette caractéristique certains paramètres qui vont nous renseigner sur les phénomènes physiques mis en jeu dans la cellule, et que la cellule fonctionne sous un éclairement fixe  $\Phi$  et une température constante  $T$ . Le fonctionnement du module est caractérisé essentiellement par trois zones:



**Figure 10:** Caractéristique I-V de la cellule solaire à base de CIGS.

**Zone I:** la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de  $I_{CC}$ ), le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.

**Zone II:** la cellule solaire se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert  $V_{CO}$ , le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.

**Zone III:** le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées des courants et des tensions acceptables (son comportement est aléatoire).

### IV.3. Différents paramètres photovoltaïques

#### IV.3.1. Courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs et est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

Il est obtenu à partir de l'équation (20):

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{qR_s I_{cc}}{K.T}\right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_p} \quad (21)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ( $R_s \rightarrow 0$  et  $R_p \rightarrow \infty$ )

$$I_{cc} = I_{ph} = qg (L_n + L_p) \quad (22)$$

Tenant compte de l'effet des résistances  $R_S$  et  $R_P$ , le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

### IV.3.2. Tension de circuit-ouvert $V_{co}$

Il s'agit du potentiel maximum que la cellule peut fournir, lorsque le courant est nul. Elle est obtenue à partir de l'équation (20):

$$0 = I_{ph} - I_0 \cdot \left( \exp \left( \frac{q V_{co}}{A K T} \right) - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_P} \quad (23)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ( $R_S \rightarrow 0$ ,  $R_P \rightarrow \infty$ ,  $I_{ph} = I_{cc}$  et  $A=1$ )

$$V_{co} = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \cdot \log \left( \frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (24)$$

$V_{co}$  augmente quand  $I_0$  diminue, elle ne dépend que de la nature du cristal et de la jonction.

### IV.3.3 Facteur de Forme FF

Il s'agit d'un rapport qui rend compte de la qualité de la forme de la caractéristique courant-tension, ou bien c'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale). Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_m}{I_{co} V_{co}} = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (25)$$

Où  $I_m$  et  $V_m$  représente le couple intensité-tension pour lequel la puissance délivrée par la cellule est maximale. Le facteur de forme théorique est compris entre 0.25 et 1.

Le facteur de forme peut aussi donner des informations sur la qualité des interfaces matériau-électrode, lorsque sa valeur descend en dessous de 25%, cela traduit généralement la présence d'un contact non-ohmique ou d'une couche oxydée et/ou isolante à l'interface matériau-électrode.

### IV.3.4. Rendement énergétique maximum $\eta_m$

Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale fournie ( $P_{max}$ ) sur la puissance du rayonnement solaire incident  $P_{in}$ :

$$\eta_m = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{\Phi(\lambda) \cdot S} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (26)$$

 S: Surface de la cellule solaire.

✚  $\Phi(\lambda)$ : Flux incident.

✚  $(I_{max} \cdot V_{max})$ : Coordonnées du point de fonctionnement.

#### IV.4. Réponse spectrale

La réponse spectrale (SR spectral response) est de manière analogue, le rapport de l'intensité  $I(\lambda)$  générée par la cellule sur la puissance incidente  $P_{in}(\lambda)$ , pour chaque longueur d'onde:

$$SR = \frac{I(\lambda)}{P_{in}} \quad (27)$$

C'est en général cette grandeur qui est mesurée et qui permet de calculer le rendement quantique, en prenant en compte l'énergie des photons:

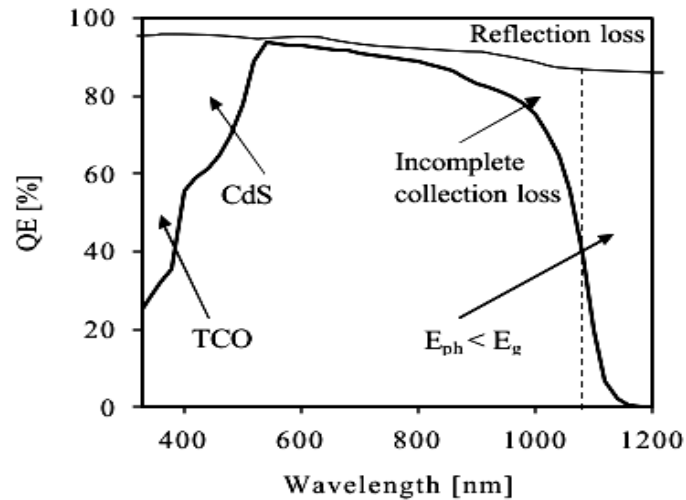
$$SR = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (28)$$

EQE est représenté le rendement quantique externe de la cellule, c'est à dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. Pour une longueur d'onde donnée, le rendement quantique externe est égal à 1 si chaque photon génère un électron, si l'on prend en compte la réflectivité de la surface de la cellule photovoltaïque, on détermine son rendement quantique interne IQE.

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque, le coefficient d'absorption, il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La Figure 11 nous donne celui du CIGS, nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau, comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes, il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction, ceci réduit la probabilité de transition.

L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau, la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

On peut alors accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule. La couche tampon Cds collecte les photons de faible longueur d'onde alors que la couche absorbante CIGS ne prend en compte que les photons de grande longueur d'onde [10].



**Figure 11:** Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque.

#### IV.5. Rendement quantique

Le rendement quantique externe est le rapport du nombre de porteurs collectés sur le nombre de photons incidents d'une énergie donnée. Si chaque photon d'une longueur d'onde précise génère un porteur de charge effectivement collecté, le rendement quantique vaut l'unité. Comme nous l'avons vu précédemment, le coefficient d'absorption du CIGS varie avec la longueur d'onde du rayonnement. Les photons de faible longueur d'onde sont absorbés près de la surface (vers la zone de CdS) alors que ceux de forte longueur d'onde le sont plus en profondeur du dispositif (au niveau de la couche CIGS). On peut donc accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule. Ainsi, ce paramètre est diminué par plusieurs facteurs par exemple, les phénomènes de recombinaison en surface et en volume y jouent une part importante. La réflexion sur la face avant et la faible longueur de diffusion des porteurs ont pour conséquence de diminuer le rendement quantique sur toute la gamme de longueurs d'ondes [11].

#### V. Différentes technologies photovoltaïques

Deux grandes familles de technologies existent actuellement: la première à base de silicium cristallin comprenant le mono et le multi cristallin, sa matière première (sable) nécessite néanmoins des procédés industriels coûteux et complexes, couvre de l'ordre de 90% de la production mondiale.

La deuxième famille, celle des couches minces, comprend les cellules au silicium amorphe, poly cristallin ou microcristallin, au tellure de cadmium, au cuivre indium sélénium,

et à l'arséniure de gallium. En outre, d'autres technologies sont en cours d'expérimentation comme les cellules organiques, polymères et les cellules Hybrides (multi-jonction ....etc.) [12, 13].

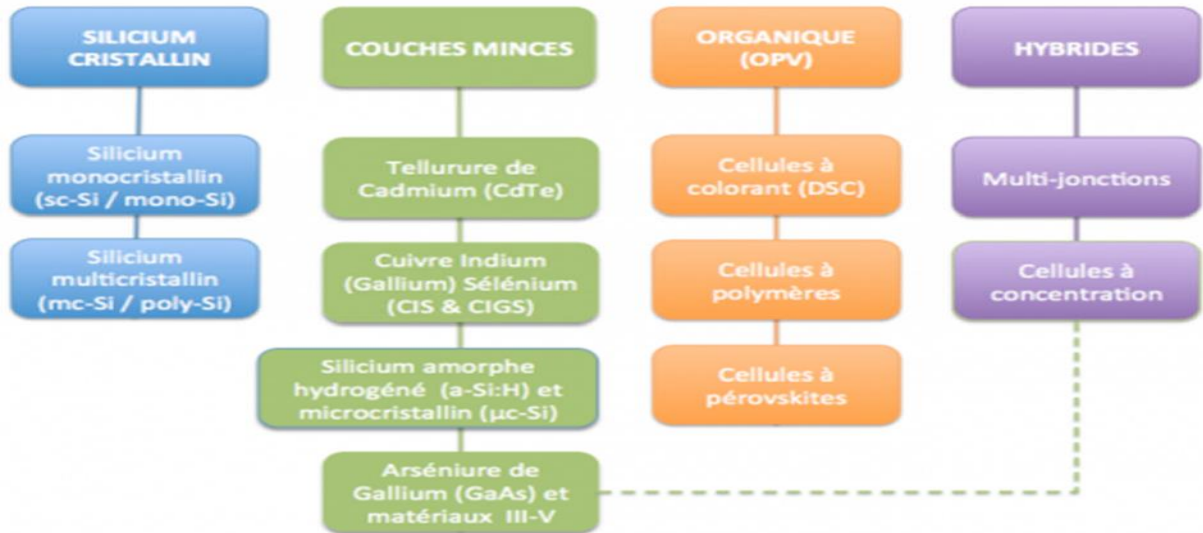


Figure 12: Les différentes technologies photovoltaïques.

### V.1 .Les cellules solaires au silicium monocristallin

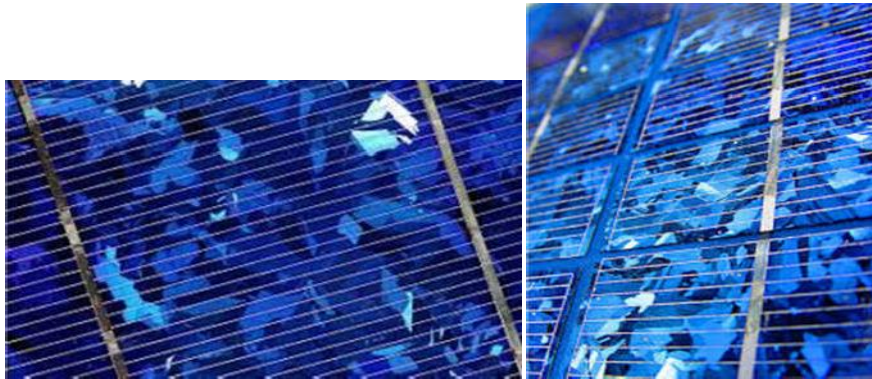
La technologie monocristalline (Figure 13) est coûteuse car elle nécessite des barres de silicium pur. Son rendement maximale est de 24.7% et le rendement des cellules commerciales est de 17-20%. Ce qui a l'avantage de réduire la taille des modules pour une même puissance, chose utile lorsqu'un gain sur la surface est nécessaire [14].



Figure 13 : Cellules solaires au silicium monocristallin [15].

## V.2 . Cellules solaires au silicium polycristallin (ou multicristallin)

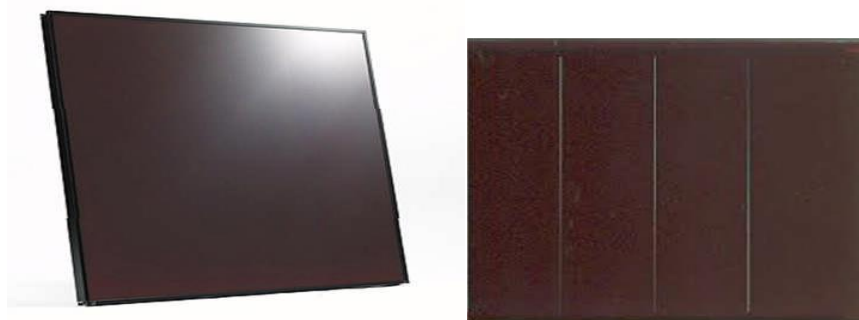
La technologie multi-cristalline (Figure 14) est obtenue par la refonte de chute de cristaux de silicium de l'industrie électronique et elle nécessite 2 à 3 fois moins d'énergie que la technologie précédente. Son rendement un peu moindre (12 à 14%) mais son coût est plus avantageux, ce qui permet à cette technologie de dominer actuellement le mar[11].



**Figure 14:** Cellules au silicium polycristallin[15].

## V.3. Cellules solaires au silicium amorphe(en couche mince)

Matériau composé de silicium hydrogéné (état non-cristallin) déposé sur un substrat de verre (Figure 15). D'un rendement moins bon que le cristallin (5-10%), le silicium amorphe est souvent appliqué à des appareils de petite puissance (calculatrices, lampes...), mais des firmes comme Solaire, Phototronic, Canon ou Forum proposent des modules de taille équivalente à celle des modules cristallins. Sanyo a mis au point une technologie de silicium amorphe sur une couche de silicium monocristallin (technologie HIT) dont les rendements sont supérieurs à celui du silicium monocristallin (rendement de l'ordre de 19%)[14].



**Figure 15:** Cellules au silicium amorphe [15].

#### V.4. Filière des cellules solaires en couches minces

Les principales filières couches des cellules solaires en minces sont le Silicium amorphe (Si-a) utilisé depuis de longues années, dans les montres et calculatrices notamment, le CdTe (hétérojonction cadmium tell uride, sulfure de cadmium CdS), le CIS (hétérojonction de di séléniure cuivre indium/ sulfure de cadmium). La fabrication se réalise en automatique, avec tunnels pour les dépôts divers de couches et connexions par laser. Elle est adaptée aux grosses productions. Ces premières technologies ouvrent actuellement d'autres voies, sans que l'on sache laquelle dominera [14].

### VI. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

#### VI.1 Avantages

- Une haute fiabilité, les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs.
- Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé. Généralement la maintenance est limitée à une ou deux visites annuelles effectuées par un professionnel.

#### VI.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

## **VII. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons vu des notions théoriques sur le photovoltaïque et ces applications sur les cellules solaires. On a commencé par une description succincte du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et ses différentes caractéristiques puis on a donné un historique sur les différentes technologies, classes et types des cellules solaires (1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération).

Dans le chapitre qui suit on va décrire la constitution des cellules solaires à base des composés CIGS de type p qui constituent la partie essentielle pour la cellule photovoltaïque (la couche absorbante).

## References bibliographiques

- [1] B.Flèche-D.Delagnes, Energiesolairephotovoltaïque.doc/juin07.
- [2] Fatima Abdo, Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour applications photovoltaïques. Thèse de doctorat, l'Institut des Nanotechnologie de Lyon (INL) à l'INSA de Lyon, 2007.
- [3] H.Mathieu.«Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», Dunod, Paris, 2009.
- [4] S.M.Sze, Physics of semiconductor Devices, second edition, copy right. C.1981 by John, Wiley and Son, Inc.
- [5] G.A. Gow, C.D. Maning , "Development of photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies", IEE Proc. Electro. Power Appl, Vol 146, N°2, 1999.
- [6] Site internet: [tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com](http://tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com)
- [7] Quentin Manguit, Future, Les cellules photovoltaïques, cœur des panneaux solaires 30/09/2013– Sciences (pp. 19-23).
- [8] By John, Wiley and Son, Inc . S.M.Sze, Physics of semiconductor Devices, second edition, Copyright.C.1981
- [9] G. Poirier, Thèse de l'université de Rennes (2003)..
- [10] Nichapour Oleskiy, « Simulation, Fabrication analyse de Cellule photovoltaïque à contact arrière inter digités », thèse doctorat, 2012.
- [12] J.Zhao;A.Wang;Campbell,P.;Green,M.A.;«A19.8%efficienthoneycombMulticrystalline silicon solar cell with improved light trapping», Electron Devices, IEEE Transaction on Volume46, Issue10, Oct.1999, pp. 1978–1983.
- [13] J. Zhao; A. Wang; Altermatt, P.P.; Wenham, S.R.; Green, M.A.; « 24% efficient silicon solar cells », Photovoltaic Energy Conversion, 1994. Conference Record of the Twenty Fourth; IEEE Photovoltaic Specialists Conference– 1994.
- [14] Francis Domain-INESE Education-Novembre 2007.
- [15] T.M.Mruton *et al.*, proceeding of the 3<sup>rd</sup> world conference on photovoltaic energy conversion, Japan, pp. 899, 902, (2003).

***Chapitre II***  
***Propriétés fondamentales***  
***des composés***  
***Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>***

## I. Introduction

La majorité des connaissances fondamentales sur les composés ternaires à base de CuInSe<sub>2</sub> a été établie avant les années 1980, tandis que les propriétés électriques, optiques et structurales de chalcopyrites ternaires semi-conducteurs Cu (Al, Ga, In)(S,Se,Te)<sub>2</sub>, ont été examinées dans les années 1960 et les années 1970. En 1974, Wagner a produit la première photopile à grand rendement (12,5%) avec un dispositif CuInSe<sub>2</sub>/CdS où le CdS (type n) était évaporé sur un cristal de CuInSe<sub>2</sub> de type p. Par la suite, un regain d'intérêt pour ces matériaux a eu lieu lors de la réalisation d'une cellule en couches minces avec un rendement de 9.4%. En employant des alliages à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> et de CuIn(S,Se<sub>2</sub>) des couches de bandes interdites plus larges ont été réalisées avec des tensions de circuit-ouvert plus importantes. Par la suite, des couches à gradient de composition ont été réalisées permettant d'obtenir des valeurs de V<sub>CO</sub> importantes tout en conservant des valeurs de J<sub>CC</sub> identiques.

Les valeurs des bandes interdites et les structures cristallographiques de ces composés ternaires et de leurs alliages ont aussi été examinées par calculs théoriques dans les années 1980. Ces études ont montré qu'un alliage continu semblable à ceux obtenus dans les composés III-V pouvait être obtenu. L'examen de la physique des défauts dans ces matériaux est toujours en cours.

Une compréhension du fonctionnement de base de la jonction p-n dans ces dispositifs photovoltaïques a commencé à être établie dans les années 1980. L'analyse a montré que le haut rendement obtenu dans ces photopiles s'était contrôlé par la recombinaison de la lumière dans le matériau actif absorbant, c'est-à-dire le CuInSe<sub>2</sub> ou ses alliages. Ceci vient du fait que le type de porteurs s'inverse dans ce matériau près de la jonction (probablement grâce à la diffusion du cadmium du CdS), ce qui élimine la recombinaison d'interface comme mécanisme de perte. La recombinaison est alors contrôlée par des états dans la bande interdite de cette région. La perte de porteurs minoritaires aux joints de grains dans la couche absorbante est aussi réduite du fait que les joints de grains sont plus fortement dopés que les grains. Le sodium est lui aussi un élément important dans la réalisation de cellules à fort rendement. Il provient soit directement du substrat de verre sodé soit d'une source extérieure, et permet une croissance et une texturation plus importante des grains, ainsi qu'une plus grande conductivité.

Dans le secteur industriel, un certain nombre de sociétés commencent le développement commercial de modules photovoltaïques à base de CuInGaSe<sub>2</sub>.

Parmi celles-ci, Siemens Solar Inc. (SSI), maintenant Shell Solar, est la plus avancée avec actuellement plusieurs modules de 12 V commercialisés (de 5 à 40 W). Les rendements moyens

des modules sont de l'ordre de 9% avec une valeur maximale de 12%. On peut aussi citer la société Würth Solar GmbH, qui développe des modules déposés sur verre avec des rendements de l'ordre de 12% et 11% pour ceux sans cadmium. La société GSE (Global Solar Energy) développe pour sa part des modules flexibles en employant du polyamide ou de l'acier inoxydable comme substrat. Des rendements de l'ordre de 10% ont été obtenus sur des modules de faibles tailles. La société Energy Photovoltaïques Inc. (EPV) développe une technologie basée sur la déposition par voie physique de CuInGaSe<sub>2</sub> et projette de construire des sites industriels avec 1 MW de capacité au New Jersey, 10 MW en Allemagne et 5 MW en Californie. International Solaire Electric Technologie (ISET) et Unisun pour leur part développent des procédés ne nécessitant pas de pompes à vides. Leurs technologies se basent sur la pulvérisation chimique et l'impression de poudres de précurseurs sur des substrats recouverts de molybdène. Les rendements sont de l'ordre de 11%.

## **II. Généralités sur les éléments de base**

C'est en 1876 que le premier composant photovoltaïque à base semi-conducteur a été réalisé en introduisant mécaniquement une couche de sélénium entre deux électrodes. Mais l'introduction de cuivre et de l'indium n'a été effectuée qu'un siècle plus tard, en 1973, par Wagner et ces collaborations qui ont obtenus des rendements de 12% à partir d'un monocristallin de CuInSe<sub>2</sub> [1]. Les premières cellules en couches minces à base CuInSe<sub>2</sub> sont été réalisées par Boeing, nous présentons quelques valeurs des paramètres physiques et chimiques des éléments Cu, In, Ga et Se, utilisés dans la synthèse des matériaux CuInSe<sub>2</sub> et CuGaSe<sub>2</sub>, en suivant nous avons présentons les éléments de base qui composé le matériau CIGS.

### **a- Cuivre**

Le cuivre est un élément chimique de symbole Cu et de numéro atomique 29. Le cuivre pourrait bien être le premier métal à avoir été utilisé par l'homme, étant donné que des objets en cuivre datant de 8700 avant J.C. ont été trouvés. Traditionnellement, on situe l'âge du cuivre au Chalcolithique, c'est-à-dire entre 2300 et 1800 av. J.C. Dans l'Antiquité le cuivre était principalement extrait dans l'île de Chypre. Le "métal de Chypre" était nommé Aes Cyprium, puis Cuprum. C'est là l'origine du mot cuivre. C'est un métal de couleur rougeâtre ou rouge lorsqu'une plaque de ce métal est bien décapée, le cuivre possède une excellente conductivité thermique et électrique [2].

**b-Indium**

L'indium est un élément chimique, de symbole In et de numéro atomique 49. L'indium est un métal gris brillant, à bas point de fusion (156°), résistant à la corrosion atmosphérique. Ce métal malléable, ressemblant chimiquement à l'aluminium et au gallium, est rare, on ne le trouve qu'en minuscule quantité dans les mines de zinc. Sa récente utilisation massive, notamment dans les écrans plats LCD ont fait passer son prix de 70\$/kg en 2001 à 1000\$/kg en 2005. L'indium, nommé d'après la ligne indigo de son spectre atomique, a été découvert par Ferdinand Reich et Hieronimus Theodor Richter en 1863 alors qu'ils testaient des minerais de zinc avec un spectrographe inventé par Robert Wilhelm Bunsen pour trouver du thallium. Richter réussit à isoler le métal en 1867 [2].

**c-Gallium**

Le gallium est un élément chimique, de symbole Ga et de numéro atomique 31. Sa température de fusion (29,76°C) lui permet de fondre dans la main. On le trouve sous forme de trace dans le minerai de bauxite et dans les minerais de zinc. Le gallium pur a un bel aspect argenté et il se brise sous forme solide de la même manière que le verre. Le volume du gallium augmente de 3.1% lorsqu'il se solidifie et pour cette raison ne doit pas être stocké dans un récipient en verre ou en métal. Le gallium corrode la plupart des autres métaux en diffusant dans le réseau métallique [2].

Le gallium est l'un des quatre métaux (avec le césium, le mercure et le rubidium) à être liquide aux environs de la température ambiante. Il peut pour cette raison être utilisé dans les thermomètres à haute température. Il est aussi connu pour avoir une faible pression de vapeur à haute température. L'essentiel du gallium est utilisé en alliage avec l'arsenic. Le matériau composite III-V obtenu, « As Ga » ou arséniure de gallium, est un semi-conducteur à gap direct extrêmement important en hyperfréquence et en optoélectronique, du fait de la grande mobilité électronique qui le caractérise. Il constitue le substrat privilégié des composants actifs hyperfréquences [2].

**d-Sélénium**

Le sélénium est un élément chimique, de la famille des calogènes, de symbole Se et de numéro atomique 34. C'est un oligoélément, mais à très faible dose. Il est toxique (voire très toxique sous certaines formes) à des concentrations à peine plus élevées que celles qui en font un oligoélément indispensable.

Le sélénium est un semi-conducteur photosensible (sa résistance électrique varie selon son exposition à la lumière). La découverte des propriétés photosensibles est due à Willoughby

Smith et à son assistant J. May, qui travaillait dans une société de télégraphie, en 1873 [2]. De nombreuses recherches ont été menées pour utiliser ces propriétés photosensibles, en particulier à la transmission d'images, sans grand succès. Elles aboutiront seulement à produire des générateurs photovoltaïques, peu performants par rapport à ceux disponibles aujourd'hui [2].

La Figure 1 représente des images réelles pour les quatre matériaux cités précédemment.



(a)



(b)



(c)



(d)

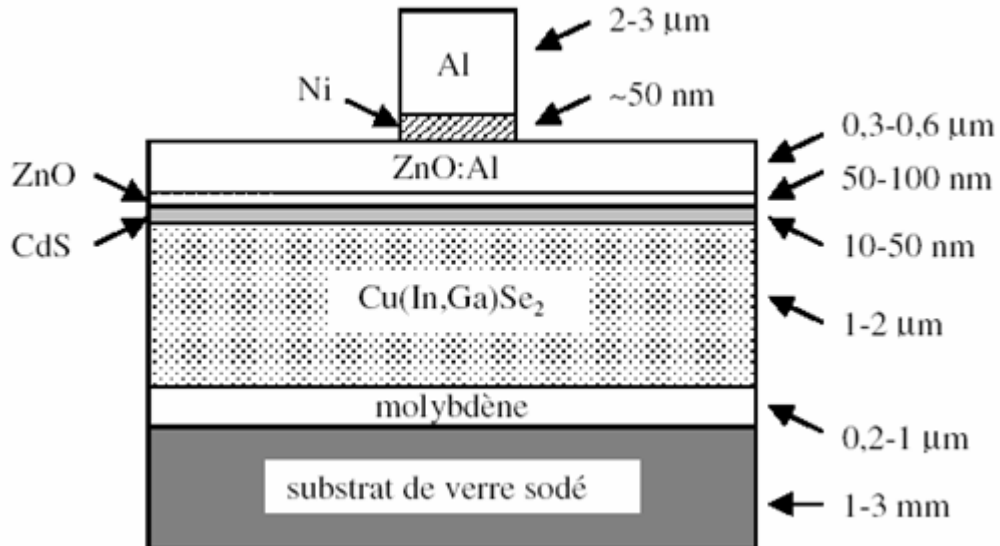
**Figure .1:** Eléments de base du composé CIGS, (a) Echantillon de cuivre, (b) Fil d'Indium, (c) Cristaux de gallium et (d) Echantillon de Sélénium.

Dans le Tableau 1, nous présentons quelques valeurs des paramètres physiques et chimiques des éléments Cu, In, Ga et Se utilisés dans la synthèse des matériaux CuInSe<sub>2</sub> et Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>.

**Tableau 1:** Quelques propriétés physiques et chimiques des éléments Cu, In, Ga et Se.

Paramètres	Cu	In	Ga	Se
Masse atomique (g/mol)	63.546	114.818	69.72	78.96
Densité à 300 K (g/cm <sup>3</sup> )	8.96	7.31	5.907	4.79
Température de fusion (°C)	1083.4	156.61	29.78	217
Température d'ébullition (°C)	2595	2080	2403	685
Conductivité électronique (10 <sup>6</sup> /cm Ω)	0.596	0.116	0.0678	10 <sup>-12</sup>
Conductivité thermiques (W/cm K)	4.01	0.816	0.406	0.0204
Potentiel d'ionisation (1 <sup>er</sup> ) (eV)	7.726	7.786	5.999	9.752
Electronégativité	1.9	1.78	1.81	2.4
Rayon atomique (pm)	127.8	155-162.6	122.1	116

### III. Différentes couches minces de la photopile à base de CIGS

**Figure.2 :** Schéma simplifié d'une photopile en couches minces de type CIGS.

Comme nous pouvons le voir sur la Figure2, il existe six éléments principaux dans la photopile en couches minces, à savoir:

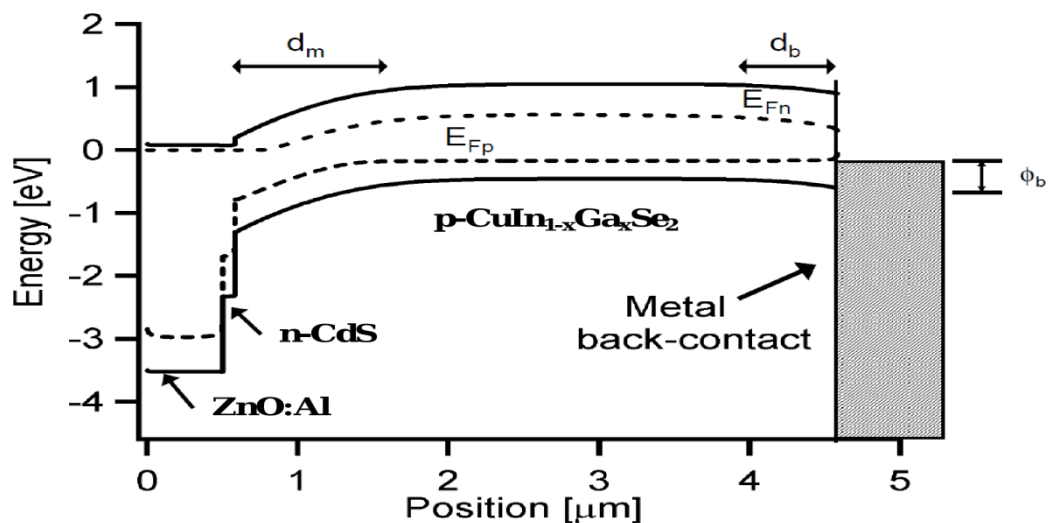
- ✚ **Le substrat :** le plus utilisé est le verre sodé ; on peut aussi utiliser des substrats flexibles (type Upolex) ou métalliques.

- ✚ Un contact ohmique inférieur : souvent le Mo.
- ✚ Une couche absorbante : dans le cas présenté, le CIGS, de type p.
- ✚ Une couche tampon : souvent le CdS ou bien le ZnS, de type n. c'est à cette interface que se situe la jonction p-n.
- ✚ Un oxyde transparent et conducteur (OTC) : ITO, ZnO.
- ✚ Un contact ohmique supérieur (grille métallique) : à base de Ni-Al.

A ceci est parfois ajoutée une couche anti-réflexion (MgF<sub>2</sub>). Ces matériaux ne sont bien évidemment pas choisis au hasard et doivent posséder des propriétés physico-chimiques bien particulières que nous allons voir maintenant.

### a) Couche absorbante

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1,1-1,7 eV. Sa conductivité doit être de l'ordre de  $1 \cdot 10^{-2}$  ( $\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ ). Sa conductivité est de type p (voir Figure 3).



**Figure.3** : Structure des bandes d'énergie pour la structure d'une cellule solaire ZnO: Al/n-CdS/p-CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub>/Métal en couches minces.

### b) Couche tampon

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

- ✚ L'inadaptation des bandes interdites grains;

- ✚ 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 de l'OTC, 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 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  $10^{-3}\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$
- ✚ Elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains.

### c) Couche d'oxyde transparent conducteur (OTC)

Celle-ci 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  $10^3(\Omega \text{ Cm})^{-1}$ . 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 de ITO. En effet, la couche de ZnO intrinsèque, donc non-conductrice, évite tout courant de fuite entre la couche absorbante et le contact supérieur. Il a été montré que cette couche pouvait être évitée si l'on déposait une couche tampon (CdS par exemple) plus épaisse [3].

## IV. Propriétés fondamentales des matériaux I-III-V<sub>2</sub>

Les qualités fondamentales des matériaux chalcopyrites I-III-VI<sub>2</sub> ont été largement étudiées dans la littérature et principalement celles du système ternaire Cu-In-Se qui est connu comme étant la base du système quaternaire Cu-In-Ga-Se. Par contre, il est nécessaire de faire le point sur l'état actuel des connaissances susceptibles d'être utilisées pour la conversion photovoltaïque. Cet état des connaissances portera donc principalement sur les résultats bien établis et pratiquement indiscutables du matériau CuInSe<sub>2</sub> et par conséquent des composés CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub>. Il faut savoir que le Ga et l'In sont chimiquement très similaires, car la substitution du Ga à la place de l'In ne change pas de façon dramatique les paramètres du matériau [4].

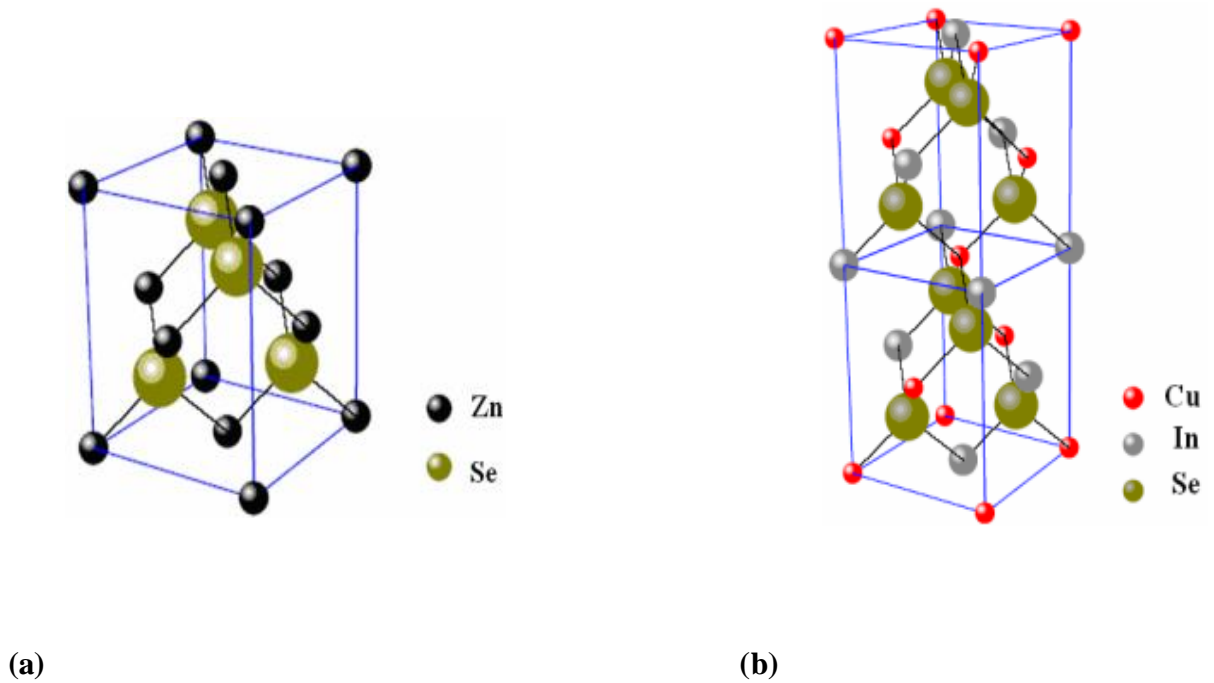
Les semi-conducteurs chalcopyrites comportent deux familles principales et les semi-conducteurs que nous utilisons dans notre étude (CIGS) appartiennent à la première famille qui est composée d'un élément de la première colonne, d'un élément de la troisième colonne et d'un élément de la sixième colonne de la classification périodique des éléments c'est-à-dire I-III-VI<sub>2</sub>[16].

		III A	IV A	V A	VI A
		5	6	7	8
		B	C	N	O
		10.811	12.011	14.007	15.999
		13	14	15	16
		Al	Si	P	S
		26.982	28.086	30.974	32.064
I B	II B				
29	30	31	32	33	34
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
63.54	65.37	69.72	72.59	74.922	78.96
47	48	49	50	51	52
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
107.870	112.40	114.82	118.69	121.75	127.60
79	80	81	82	83	84
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po
196.967	200.59	204.37	207.19	208.980	(210)

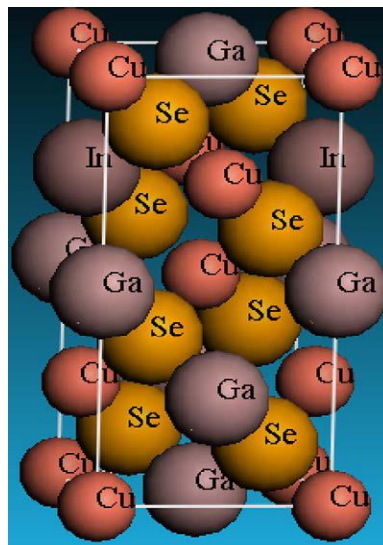
**Figure 4** :La classification périodique des éléments constituant la famille I-III-VI<sub>2</sub>.

#### IV.1 Structure cristallographique

Les matériaux I-III-VI<sub>2</sub> cristallisent sous deux formes allotropiques bien connues, la chalcopyrite et la sphalérite. Cette dernière possède une structure cubique à face centrée de type zinc-blende avec une distribution aléatoire des cations [5]. Pour la chalcopyrite, structure ordonnée et tétragonale ( $a=b \neq c$ ), chaque atome de sélénium est lié tétraédriquement à deux atomes de cuivre et deux atomes d'indium, chacun d'eux étant entourés de quatre atomes de sélénium. Il y a des plans d'atomes de cuivre et des plans d'atomes d'indium, alors que pour la sphalérite, il y a des plans de cations, avec des atomes de cuivre et des atomes d'indium distribués aléatoirement. Il a été montré expérimentalement que la structure chalcopyrite est plus intéressante pour la conversion photovoltaïque. Il est nécessaire de l'obtenir en couches minces. La structure cristallographique de cette famille de matériaux leur assure une grande stabilité, leur permettant même de résister aux rayonnements cosmiques très élevés de l'espace [6-8]. Les deux formes sont représentées sur la Figure 4 et La Figure 5 présentons la structure chalcopyrite pour l'alliage  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ , pour  $x = 0.25$  (Figure 6).



**Figure. 5:**Mailles primitives des structures (a) zinc blende et (b) chalcopyrite.

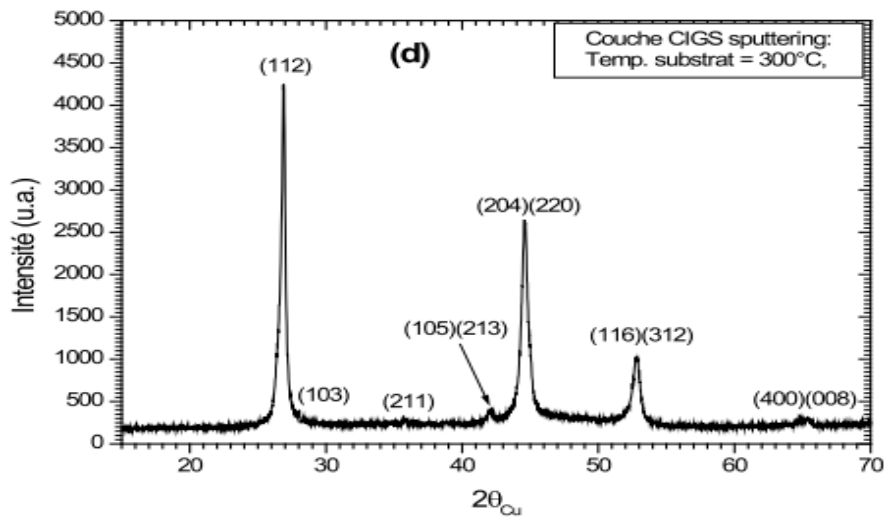


**Figure. 6:** Structure chalcopyrite du matériau CuIn<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>Se<sub>2</sub>.

Plusieurs éléments peuvent être incorporés dans le système CuInSe<sub>2</sub> en tant qu'atomes substitutionnels isolés et non-insolubles. C'est l'un des moyens de modifier les propriétés électroniques et structurales du matériau en raison des possibilités potentielles de ces éléments supplémentaires. Notamment, on peut modifier la structure électronique de bande, la concentration en porteurs, les réactions chimiques et les mécanismes de croissance. Un des éléments les plus prometteurs à incorporer avec succès au système ternaire CuInSe<sub>2</sub> est le gallium.

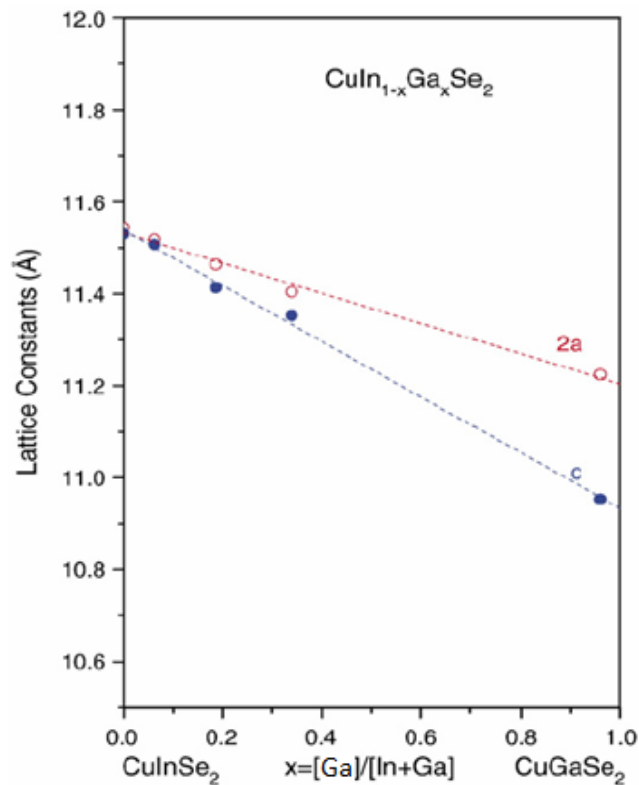
Autre définition la structure chalcopyrite du CuInSe<sub>2</sub> appartient au système tétragone elle est formée par la superposition suivant l'axe c de deux cellules cubiques. La maille élémentaire primitive de cette structure est constituée de huit atomes (deux atomes de cuivre Cu, deux atomes d'indium In et quatre atomes de sélénium Se). Dans cette structure, l'atome de sélénium a deux liaisons avec l'atome de cuivre et deux liaisons avec l'atome d'indium [4]. Par convention, la petite arête nommée **a** et la longue arête nommée **c** pour que cette structure ait une symétrie tétragone idéale, le rapport  $c/a$  doit être égale à 2.

Notons que, la transition de la structure chalcopyrite à la structure sphalérite est effectuée à 1083K, et l'identification de la structure cristallographique est déterminée à travers l'étude de la diffraction des rayons X. Jaffée et al. Le spectre de diffraction des rayons X du CuIn<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>Se<sub>2</sub> sous sa structure chalcopyrite est présentée sur la Figure 7.



**Figure. 7:** Diffraction des rayons X des couches minces CuIn<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>Se<sub>2</sub> déposées sur verre par rf-magnétron sputtering à 300°C.

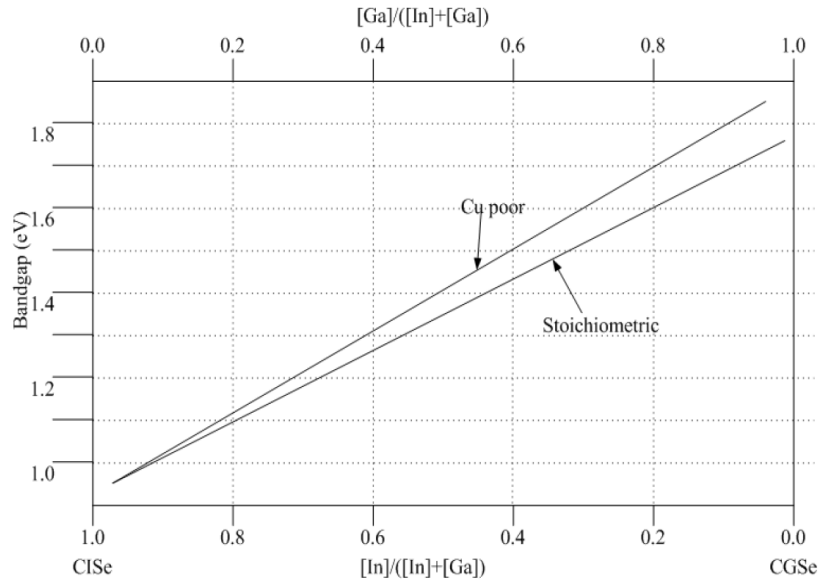
La Figure 5 montre les variations des paramètres de maille **a** et **c** des couches minces de CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> diminuant quasi-linéairement avec la composition  $x$  de Ga, suite à la substitution des atomes plus petits de Ga à la place des atomes d'In. Quand ce quasi linéarité est respectée, on dit que la loi de Vegard est vérifiée.



**Figure. 8:** Variation des paramètres de maille 2a et c du CIGS en couche mince en fonction de la composition x de Ga.

Les matériaux Cu (In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>) Se<sub>2</sub> présentent tous un gap énergétique direct, dont la valeur est modifiée par la proportion de gallium dans le composé. L'ajout de gallium a permis de surmonter le handicap de la faiblesse de l'énergie de gap du CuInSe<sub>2</sub> qui limite son absorption optique. Le schéma de la Figure 9 montre la dépendance en composition des énergies de transition dues à la première bande interdite directe dans l'alliage Cu(In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>) Se<sub>2</sub>. Cette variation est stipulée linéaire.

L'addition du gallium augmente non seulement de bande du gap mais a également d'autres effets bénéfiques. L'addition de Ga améliore l'adhérence du film au substrat de Mo. La concentration en porteur dans l'absorbeur est également rapportée à l'augmentation avec l'addition du gallium [16].



**Figure. 9:** Dépendance en composition des énergies de transition dues à la première bande interdite directe dans l'alliage Cu(In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>)Se<sub>2</sub>.

La bande interdite du CIGS est influencée par le taux de concentration [Ga]/[In] mais aussi par la teneur en Cu. Des mesures effectuées de l'énergie de la bande interdite du CuInSe<sub>2</sub> ont montré une valeur autour de 1.01 eV à la température ambiante. La largeur de la bande interdite du CuGaSe<sub>2</sub>(CGS) est approximativement de 1.65 eV [9]. Ainsi, la bande interdite du CIGS peut varier entre les valeurs de ces deux composés. D'après la Figure 6 on trouve que la loi de V égard est vérifiée.

La loi de V égard est une loi qui indique les valeurs des propriétés d'un alliage (gap d'énergie, paramètre de maille, constantes élastiques, etc.) peuvent être déterminées par une interpolation linéaire des valeurs des propriétés de ses composants [9], la dépendance de l'énergie de la bande interdite du CIGS en fonction de la concentration est donnée par [9]:

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

Soit:

$$E_g^{\text{CIGS}}(\text{eV}) = 1.01(1 - x) + 1.65x - 0.15(1 - x) \quad (2)$$

Avec  $x = [\text{Ga}]/[\text{Ga}+\text{In}]$ , représente la teneur en Gallium du CIGS.

b: paramètre de courbure dans la loi de V égard [eV] compris entre 0.15 et 0.24 eV.

$E_g^{\text{CIGS}}$  le gap d'énergie du CIGS [eV].

$E_g^{\text{CIS}}$  le gap d'énergie du CIS [eV].

$E_g^{CGS}$  Le gap d'énergie du CGS [eV].

Dans la littérature, on retrouve les valeurs des différentes énergies de gap pour les composés Cu (In, Ga) (S, Se)<sub>2</sub>, qui sont résumées au Tableau 2.

**Tableau 2:** Energies de gap des composés Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub>.

Composé	Energie de gap (eV)
CuInSe <sub>2</sub>	1.04
CuGaSe <sub>2</sub>	1.68
CuInS <sub>2</sub>	1.53
CuGaS <sub>2</sub>	2.76
CuGa <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> Se <sub>2</sub>	1.0-1.7
CuIn (S <sub>x</sub> Se <sub>1-x</sub> ) <sub>2</sub>	1.0-1.5

## VI.2 Propriétés optiques

Une absorption maximum de la lumière sur tout le spectre solaire est l'une des propriétés les plus importantes que doit posséder un absorbeur. Avec un coefficient d'absorption optique  $\alpha$  compris entre  $10^4$  et  $10^5(\text{cm}^{-1})$ , les chalcopyrites CuInSe<sub>2</sub>, CuGaSe<sub>2</sub> et leurs alliages en couches minces sont des bons absorbeurs pour les cellules solaires permettant d'obtenir des rendements importants avec une épaisseur de matière minime (1 à 2  $\mu\text{m}$ ). Ce coefficient d'absorption a été calculé à partir de l'équation suivante [10]:

$$\alpha = \left(\frac{1}{d}\right) \ln \left[ \frac{(1-R^2)}{2T} + \left[ \frac{(1-R^2)^4}{4T^2} + R^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

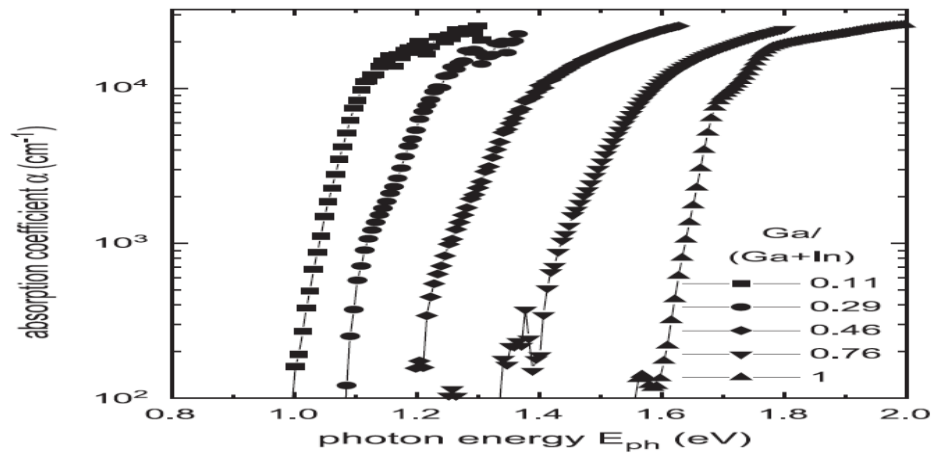
Où  $d$  est l'épaisseur la transmission et  $R$  est la réflectivité de l'échantillon. Le coefficient d'absorption est lié à l'énergie du gap et aux énergies des photons incidents, selon les relations établies par Pankove [11] qui permettent de déterminer la nature des transitions qui peuvent exister entre les bandes d'énergie, l'équation suivant est représentée la loi en puissance de la forme:

$$\alpha = \frac{A}{h\nu} (h\nu - E_g)^\beta \quad (4)$$

Où  $E_g$  est l'énergie de la bande interdite, A est une constante, h la constante de Planck et  $\beta=1/2$  dans le cas des composés ternaires et quaternaires (CIS et CIGS). La valeur du gap peut être obtenue en extrapolant la partie linéaire de l'expression :

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (5)$$

La Figure 10 présente la variation du coefficient d'absorption des couches minces CIGS en fonction de l'énergie des photons incidents  $h\nu$  pour différentes compositions [Ga]/[Ga+In] [12]. Le Tableau 3 récapitule les différentes valeurs de l'énergie du gap pour les matériaux Cu-III-VI<sub>2</sub> ainsi que les rendements de conversion affichés à ce jour.



**Figure 10:** Evolution du coefficient d'absorption optique de CIGS en fonction de l'énergie des photons  $h\nu$  et des compositions [Ga]/[Ga+In].

**Tableau 3:** Rendements théoriques et expérimentaux affichés en laboratoire, pour de petites surfaces, dans le cas des cellules solaires à base de Cu-chalcopyrite.

Matériau	E <sub>g</sub> (eV)	Rendement théorique	Rendement expérimental	Référence
CuInSe <sub>2</sub>	1.05	25	13.5	[21]
CuIn <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> Se <sub>2</sub>	1.20	27.5	20	[22]
CuGaSe <sub>2</sub>	1.68	26	8.7	[21]

### VI.3 Propriétés électriques

Les cristaux parfaits formés par la répétition périodique d'une maille élémentaire sont des cristaux idéaux. Les cristaux réels sont des structures qui diffèrent, au moins localement de cet arrangement périodique car ils sont le siège de défauts de différentes natures.

Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour pouvoir augmenter la conductivité électrique, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts diminue la possibilité de transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion [11].

La nature des défauts usuels pour certains solides est assez bien connue. Beaucoup de propriétés importantes des solides sont déterminées autant par les défauts que par la nature du cristal, qui peut n'intervenir qu'en tant que matrice pour ces défauts. La conductivité de certains semi-conducteurs peut être entièrement due aux impuretés chimiques présentes dans le cristal.

Les défauts et les impuretés sont créés à l'intérieur de la bande interdite, ils peuvent être profonds ou peu profonds. Généralement, un état de défaut est dit peu profond si son niveau d'énergie est proche du minimum de la bande de conduction ou du maximum de la bande de valence. Dans le cas contraire, il est appelé niveau profond.

Les niveaux peu profonds dopent le matériau, les niveaux profonds sont des pièges de porteurs libres, ils captent les porteurs apportés par le dopage. Il est nécessaire de connaître et contrôler les défauts et impuretés créant tous ces niveaux d'énergie, pour les introduire dans le matériau dans le cas des niveaux peu profonds, ou pour les éliminer dans le cas des niveaux profonds. Il existe quatre classes de défauts cristallins:

- ✚ Les défauts ponctuels (0D)
- ✚ Les défauts linéaires (1D)
- ✚ Les défauts bidimensionnels (2D)
- ✚ Les défauts tridimensionnels (3D)

#### VI.3.1 Les défauts ponctuels

Ce sont des défauts sans dimension qui ont une taille de l'ordre de la distance interatomique. Ils introduisent des niveaux d'énergie peu profonde. Parmi ces défauts on distingue:

### ➤ Les lacunes

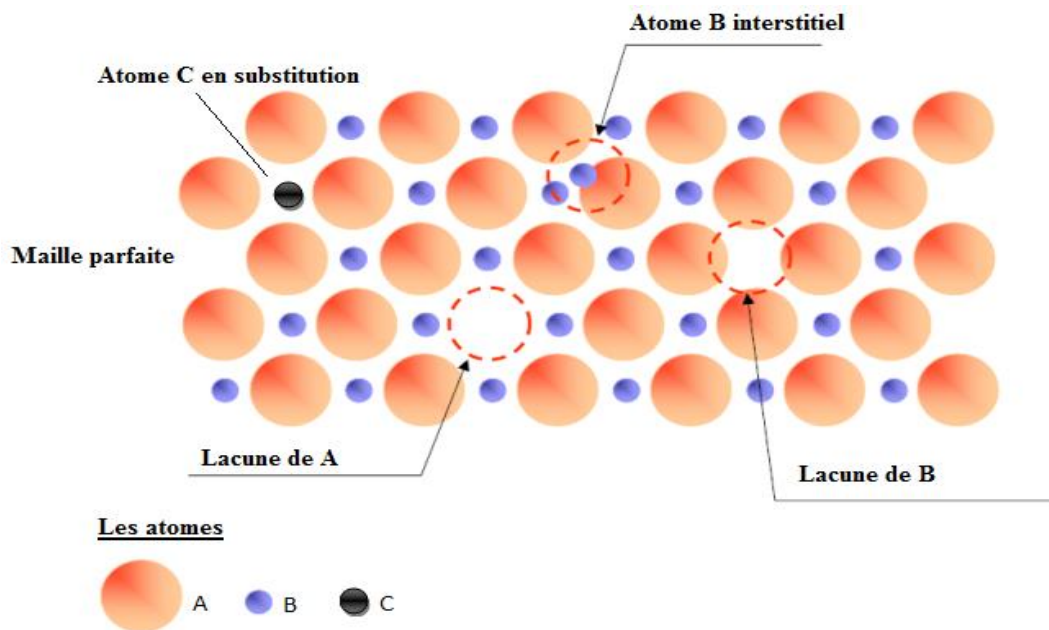
Ce défaut correspond à un site atomique inoccupé dans la structure, grâce aux déplacements des atomes, elles diffusent dans le cristal. Dans les ternaires A-B-C<sub>2</sub>, les lacunes sont présentées par les vacances V<sub>A</sub>, V<sub>B</sub> et V<sub>C</sub>.

### ➤ Les atomes interstitiels

C'est un défaut dans lequel un atome est transféré d'un site du réseau à une position normalement non occupée par un atome. Dans les ternaires, il est représenté par: A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub> ou C<sub>i</sub>.

### ➤ Les défauts substitutionnels

C'est un atome étranger par rapport deux atomes qui se placent à un nœud du réseau cristallin. Ce type de défauts joue également un rôle important dans la constitution des alliages. Dans les ternaires, ces défauts sont représentés par: A<sub>B</sub>, A<sub>B</sub>, B<sub>A</sub>, A<sub>C</sub>, C<sub>A</sub>, C<sub>B</sub>. La Figure 11 montre les différents types de défauts ponctuels que l'on peut trouver dans un réseau cristallin constitué de deux types d'atomes A et B[12].



**Figure. 11:** Différent défauts ponctuels dans le réseau cristallin.

#### VI.3.1.1 Niveaux énergétiques des défauts ponctuels

L'énergie de formation des divers défauts est directement liée à la stœchiométrie, en tenant compte des potentiels chimiques des divers éléments. D'après Zhang [12] et *al.*

l'ordre pour lequel ces défauts sont formés est le suivant:

- ✚  $V_{Cu} < Cu_{In} < V_{In} < Cu_i < In_{Cu}$  dans le cas de matériau de type n, riche en In et en Cu.
- ✚  $V_{Cu} < Cu_{In} < In_{Cu} < Cu_i < V_{In}$  pour le matériau de type p, riche en In et en Cu.
- ✚  $V_{Cu} < V_{In} < In_{Cu} < Cu_{In} < Cu_i$  dans le cas de conductivité n, riche en In et un déficit en Cu.
- ✚  $V_{Cu} < In_{Cu} < V_{In} < Cu_{In} < Cu_i$  les matériaux type p, riche en indium présentant un déficit en cuivre.
- ✚  $Cu_{In} < V_{In} < V_{Cu} < Cu_i < In_{Cu}$  pour le type n, riche en cuivre et présentant un déficit en indium.
- ✚  $Cu_{In} < V_{Cu} < V_{In} < Cu_i < In_{Cu}$  pour le cas de matériaux type p, riche en cuivre avec un déficit en indium.

### VI.3.2 Les défauts linéaires

La classification des défauts linéaires dans les propriétés mécaniques a été faite par plusieurs chercheurs. Dans les années 1930, Orowan, Polanyi et Taylor proposèrent que le cisaillement d'un cristal pouvait se produire par la propagation de défauts linéaires élémentaires appelés dislocations. Une dislocation est un défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline, à titre d'exemple en prendre une couche de CIGS et on applique une force sur chaque côté, la déformation de cristal sera à cause de la dislocation, la Figure 12 donne une présentation de ce défaut.

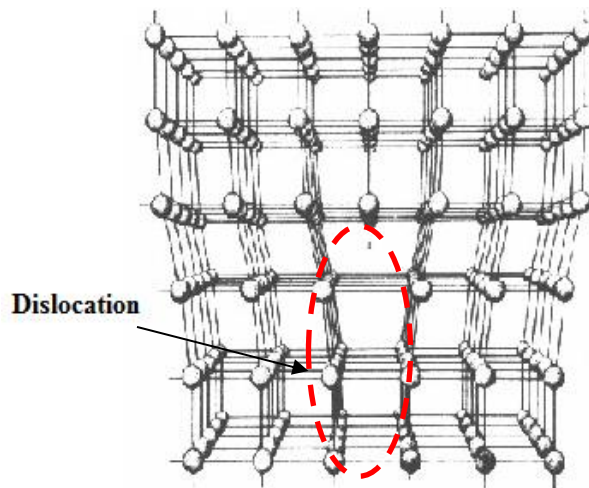


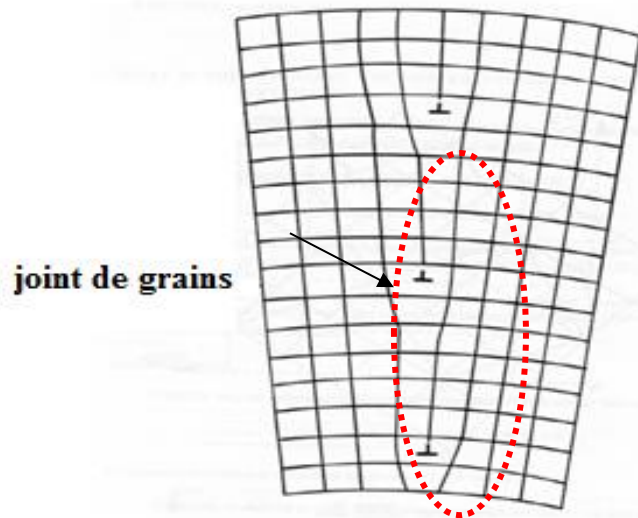
Figure 12: Défaut linéaire (dislocation).

### VI.3.3 Les défauts bidimensionnels

Les défauts bidimensionnels sont produits suivant les méthodes de fabrication des couches minces, s'appellent aussi les défauts extrinsèques, les macles et les joints de grains GB<sub>s</sub> (en anglais : Grain boundaries). Dans notre travail, on concentre notre étude sur le dernier

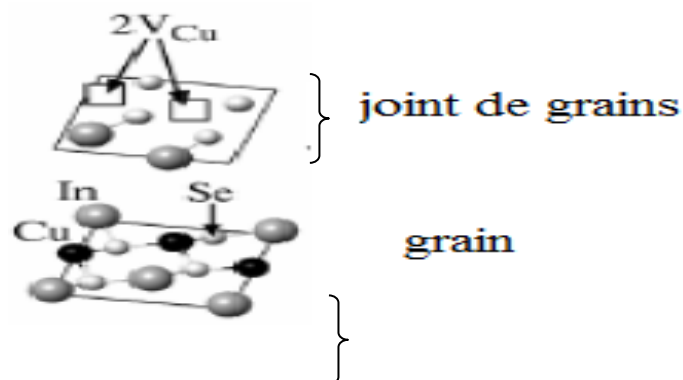
type de défaut (GBs) et leur influences sur le rendement d'une cellule solaire à base de CIGS (voir chapitre N°4).

Les joints de grains dans les matériaux cristallins sont des interfaces homophases, c'est à dire, des interfaces localisées entre deux cristaux de même structure et de même composition. Ils jouent un rôle fondamental dans la plupart des propriétés des matériaux: corrosion, plasticité, rupture, conductivité électrique ... etc.



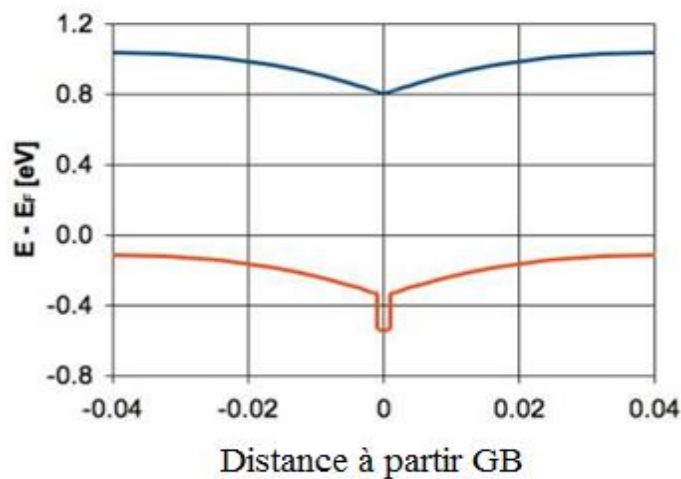
**Figure 13:**Joint de grains.

D'après la Figure 13, le réarrangement atomique au niveau du joint de grain, pour une couche mince à base du composé CuInSe<sub>2</sub>, présente des lacunes de cuivre c'est à dire  $V_{Cu}$ . Cette dernière donne le type de la conductivité électrique (type n) du GBs [13]. L'énergie d'activation des défauts  $V_{Cu}$  sont en générales proche du minimum de la bande de conduction  $E_C$  et à l'énergie de fermi  $E_F$ .



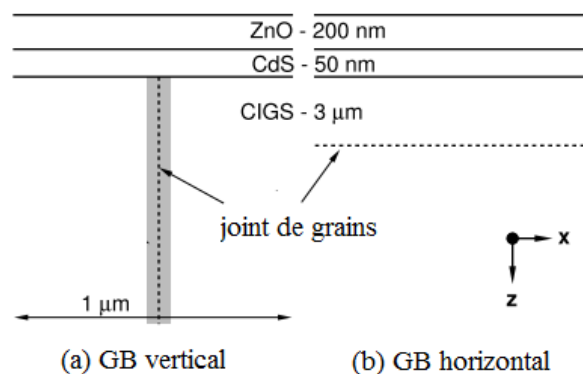
**Figure 14:**Structure atomique au niveau du joint de grains dans CuInSe<sub>2</sub>.

Le diagramme de bande d'énergie est représenté sur la Figure 15. Ce diagramme donne une information très importante sur la courbure de la bande de valence, donc il existe une diminution considérable dans la bande de valence au niveau du joint de grain sous forme d'une barrière, s'appelle bande de valence Offset  $\Delta E_V$  qui varie entre 0 à 0.4 eV. Dans la Figure 15 on a pris  $\Delta E_V = 0.2$  eV. L'augmentation de cette barrière au niveau du joint de grain conduit à une diminution de la mobilité des porteurs majoritaires (les trous), une augmentation de la résistance série et une diminution de la durée de vie des électrons causée par la recombinaison dans les pièges au niveau du joint de grain GB.



**Figure 15:** Diagramme de bande d'énergie dans CIGS avec GB,  $\Delta E_V = 0.2$  eV.

Dans le cas général, les joints de grains sont partagés en deux formes, horizontal et vertical comme l'indique la Figure 16. Les joints de grains horizontaux peuvent réduire le courant de court-circuit causé d'une diminution de la durée de vie des électrons par une augmentation de la densité des états de recombinaison. Les joints de grains verticaux peuvent réduire le courant de court-circuit et la tension en circuit-ouvert, avec une augmentation remarquable du courant de saturation inverse.



**Figure 16:** GB vertical et horizontal dans une couche CIGS.

### VI.3.4 Les défauts tridimensionnels

Le remplacement d'une partie du cristal par un volume d'un autre composé forme ce qu'on appelle un défaut tridimensionnel. La différence peut conduire à un changement de sa nature cristallographique, par exemple le défaut précipité. Les dislocations contribuent à la dégradation de la durée de vie des porteurs minoritaires. Il existe deux types:

- **Précipités cohérents:** présentent une continuité cristallographique avec les réseaux cristallins (les réseaux cristallins et du précipité sont semblables mais leur paramètres de maille peuvent être différents ce qui entraîne une distorsion élastique).
- **Précipités incohérents:** aucune relation cristallographique avec la matrice.

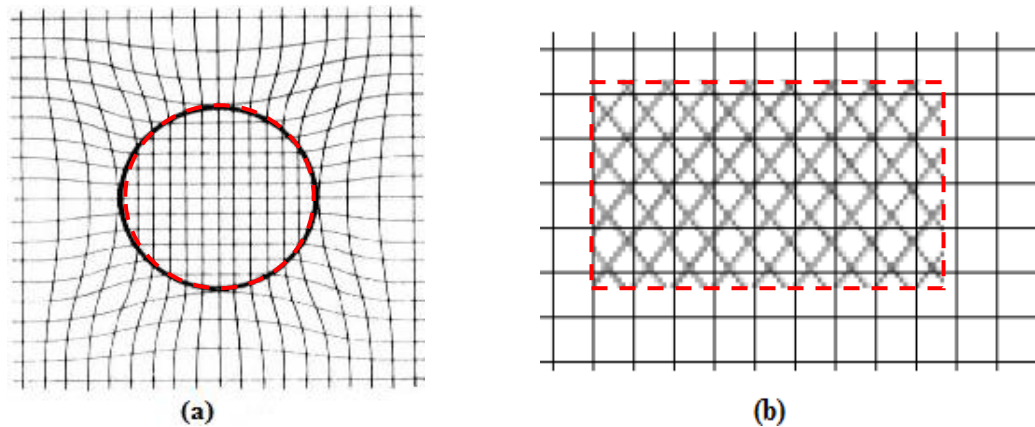


Figure 17: Précipité cohérent(a), Précipité incohérent(b).

### VI.3.5 Influence du sodium

Pour réduire les influences passives des défauts sur le rendement, on ajoute le sodium. L'importance de la présence du sodium Na dans la couche absorbante CuInSe<sub>2</sub> a été découverte en 1993 par Hedstrom et *al.*, ils ont remarqué que le sodium améliore non seulement la cristallisation du film, mais également sa conductivité, il est montré que le sodium s'incorpore aux joints de grains GB<sub>set</sub> dans les différents types de défauts de structure du dépôt [14,15].

### VI.4. Propriétés électriques du CuInSe<sub>2</sub>

Plusieurs chercheurs ont étudié les propriétés électriques du CuInSe<sub>2</sub>, notamment l'identification et la caractérisation des défauts dans ce matériau. Comme nous avons cité auparavant, on peut réaliser avec ce semi-conducteur des homojonctions et des hétérojonctions autrement dit, ce matériau peut présenter une conductivité de type n ou p et ceci par excès ou manque de sélénium. D'autre part, le CuInSe<sub>2</sub> présente une excellente stabilité électrique dans

une large bande de stœchiométrie. Des recherches ont montré qu'en agissant sur les rapports  $\left(\frac{Cu}{In}\right)$  et  $\left(\frac{Se}{Cu+In}\right)$  on peut changer le type de conduction dans le semi-conducteur CuInSe<sub>2</sub>. Le Tableau 4 rassemble les évolutions des types de conduction du semi-conducteur CuInSe<sub>2</sub> en fonction des rapports  $\left(\frac{Cu}{In}\right)$  et  $\left(\frac{Se}{Cu+In}\right)$  après dépôt.

Autres travaux ont montré que généralement les atomes de sélénium dans le CuInSe<sub>2</sub> se comportent comme des donneurs et conduisent ainsi à une conduction de type n .

Les couches CuInSe<sub>2</sub> qui présentent un excès d'indium et qui contiennent des lacunes de cuivre sont généralement de type p , voir le Tableau 4 qui est représenté les différentes types de conduction dans CuInSe<sub>2</sub> en fonction des rapports  $\left(\frac{Cu}{In}\right)$  et  $\left(\frac{Se}{Cu+In}\right)$ .

**Tableau 4:** Différents types de conduction dans CuInSe<sub>2</sub> en fonction des rapports  $\left(\frac{Cu}{In}\right)$  et  $\left(\frac{Se}{Cu+In}\right)$ .

$\frac{Se}{Cu + In} > 1$		$\frac{Se}{Cu + In} < 1$	
$\frac{Cu}{In} > 1$	$\frac{Cu}{In} < 1$	$\frac{Cu}{In} > 1$	$\frac{Cu}{In} < 1$
Type p avec résistivité faible.	Type p avec résistivité moyenne ou type n avec résistivité forte.	Type p avec une résistivité faible.	Type p avec une résistivité forte ou type n avec une résistivité faible.

## V. Avantages du CuInSe<sub>2</sub> sous sa structure

Les principaux avantages de ce matériau semi-conducteur sous sa structure sont les suivants :

- ✚ Son gap direct avec une valeur de 1.04 eV, cette énergie lui permet d'absorber une large gamme du spectre solaire;
- ✚ Son coefficient d'absorption qui est très élevé dans le domaine du visible et du proche infrarouge; une couche de CuInSe<sub>2</sub> avec une épaisseur de 1 µm permet l'absorption de 99% des photons qui arrivent à la surface de la cellule, pour atteindre ce taux d'absorption dans le cas des cellules à base de silicium il faut une épaisseur d'environ de 350 µm;

- ✚ La possibilité de changement de type de conduction (n ou p) de ce semi-conducteur et de son gap sans passer par le dopage par des atomes étrangers;
- ✚ La possibilité d'élaboration de ce semi-conducteur par plusieurs techniques et sur différents types de substrat;
- ✚ Il présente des paramètres de maille et une affinité électronique compatibles avec ceux des matériaux utilisés dans la fabrication des autres couches constituant la cellule solaire à savoir le CdS, ITO, ZnO, etc.;
- ✚ Sa stabilité électrique et thermique excellente sous les conditions d'opérations;
- ✚ Excellente résistance aux irradiations.

## **VI. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les propriétés fondamentales du matériau Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>, et leur propriétés électriques et optiques. Nous avons ensuite donné des brèves définitions des différents défauts ponctuels (lacunes, atomes interstitiels, défauts substitutionnels, impuretés, etc.) et des défauts cristallins (dislocations, les joints de grains, etc.).

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter un outil de simulation (logiciel) très puissant pour modéliser en deux dimensions les structures optoélectroniques et photoniques des cellules photovoltaïques à base des composés CIGS.

**References bibliographies**

- [1] A. Bouloufa, "Etude et Caractérisation des Semi-conducteurs Ternaires et Quaternaires CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> par Spectroscopie Photo acoustique", Thèse de doctorat en électronique, Université Ferhat-Abbas, Sétif .2007.
- [2] M. A. Green, "Solar Cells", University of New South Wales, pp. 336, 1992.
- [3] S. Degraeve, M. Burgelman, P. Nollet, "Modelling of polycrystalline thin film solar cells: new features in SCAPS version 2.3, Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion", Osaka, 2003, pp. 487-490.
- [4] P. STEPHANE, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de doctorat en Génie Electrique, L'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.
- [5] William N. et al. "Cu(InGa)Se<sub>2</sub> Solar Cells." In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, page 546. 2011.
- [6] J. Verschraegen, M. Burgelman « Numerical modeling of intraband tunneling for heterojunction solar cells in SCAPS », J. Appl. Phys pp: 6277-6278.
- [7] K. Yang, J.R. East, G.I. Haddad, Solid-State Electron, 36(1993)321.
- [8] R. Stratton, Phys. Rev. 125(1962)67.
- [9] Nabil. n, "Contribution à la modélisation d'une cellule solaire de la 3<sup>ème</sup> génération haut rendement", Mémoire de Master en Instrumentation Electronique, université de Ferhat Abbas, Sétif1, 2014.
- [10] A. Ben Youcef, "développement de surfaces à base de dioxyde de titane par PVD pour une application aux cellules solaires", Thèse de doctorat, université Abou-Bakr Belkaid, 2012.
- [11] K. YANG, JACK R. EAST and GEORGE I. HADDAD « Numerical modeling of abrupt heterojunction using a thermionic-field emission boundary condition ».
- [12] R. Bonhomme, "Les Rayonnements Solaires et le Fonctionnement du Couvert Végétal", Thiverval - Grignon, France, 1999.
- [13] H.E. Ghitani and M. Pasquinelli, S. Martinuzzi, "Influence of dislocations on photovoltaic properties of multicrystalline silicon solar cells", Journal de Physique III, 3 (1993) pp. 1941-1946.

- [14] W. Schmidt, B. Woesten, J. Kalejs, "Manufacturing technology for ribbon silicon (EFG) wafers and solar cells", *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* 10 (2002) 129-140.
- [15] J. Kalejs, B. Bathey, J. Cao, "EFG Ribbon Technology R&D for Large Scale Photovoltaic Manufacturing", in the *Proc. of NCPV and Solar Program Review Meeting Mar 24-26, 2003, (Denver, CO)*, 600-603.
- [16] R. Klent, "Characterisation and modeling of chalcopyrite solar cells", *Thin Solid Films*, 2001.387:p.135-140.

## *Chapitre III*

# **Présentation du simulateur numérique SCAPS-1D**

## I. Introduction

SCAPS est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électronique et informatique (ELIS) de l'Université de Gent, Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement: Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Alex Niemegeers, Stefan Degraeve [1-6]. Une description du logiciel, et les algorithmes qu'il utilise, se trouve dans l'alittérature.

Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté de la recherche de photovoltaïques (établissements et Instituts de recherche). Il fonctionne sur PC sous Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows7, et occupe environ 50Mo d'espace disque.

Le logiciel SCAPS-1D peut être téléchargé gratuitement. Il faut rapporter à la connaissance de Mr. Marc Burgelman le téléchargé d'une version de SCAPS (le nom et le nom et l'adresse d'institution, et le nom du promoteur pour les étudiants de doctorat).

SCAPS-1D est développé à l'origine pour des structures des cellules de  $\text{CuInSe}_2$  et de  $\text{CdTe}$ . Cependant, plusieurs versions ont été améliorés de façon à de venir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe).

Un aperçu de ses caractéristiques principales est donnée ci-dessous :

- ✚ Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- ✚ Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec variations graduées (en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule) : Par exemple,  $\chi$ ,  $\varepsilon$ ,  $N_C$ ,  $N_V$ ,  $V_{thn}$ ,  $V_{thp}$ ,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$ ,  $N_A$ ,  $N_D$ , tous les pièges (défauts)  $N_t$ .
- ✚ Mécanismes de recombinaison: bande à bande (direct), la SRH Auger.
- ✚ les niveaux de défauts: en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- ✚ Les niveaux des défauts, type de charge: pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- ✚ Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
- ✚ Les niveaux des défauts, propriété optique : Excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- ✚ Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.
- ✚ Contacts: Travail de sortie du métalourégime de bande de plate ; Propriété optique (Réflexion ou transmission) du filtre.
- ✚ Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.
- ✚ Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier  $g(x)$  fourni par l'utilisateur.
- ✚ Illumination: du côté p ou n.

- ✚ points pour les calculs de travail : la tension, la fréquence, la température.
- ✚ le logiciel calcule les bandes d'énergie, les concentrations et les courants à un point de fonctionnement donné les caractéristiques (JV), les caractéristiques du courant alternatif (C et G en fonction de V et / ou f) , la réponse spectrale(également avec polarisation lumière ou tension).
- ✚ calculs de lots possible ; présentation des résultats et les paramètres en fonction.
- ✚ chargement et la sauvegarde de tous les paramètres ; démarrage de SCAPS dans une configuration personnalisée, un langage de script compris une fonction utilisateur libre.
- ✚ interface utilisateur très intuitive.
- ✚ un centre de langage de script à exécuter SCAPS d'un« fichier descriptif toutes les variables internes peuvent être consultés et tracée par le script.
- ✚ un établissement ajustement de courbe intégré.
- ✚ un panneau pour l'interprétation des mesures d'admission.

## II. Notions de base

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sous le système Windows, développé par Lab. Windows/CVI de la national Instruments. SCAPS s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la Figure 1.

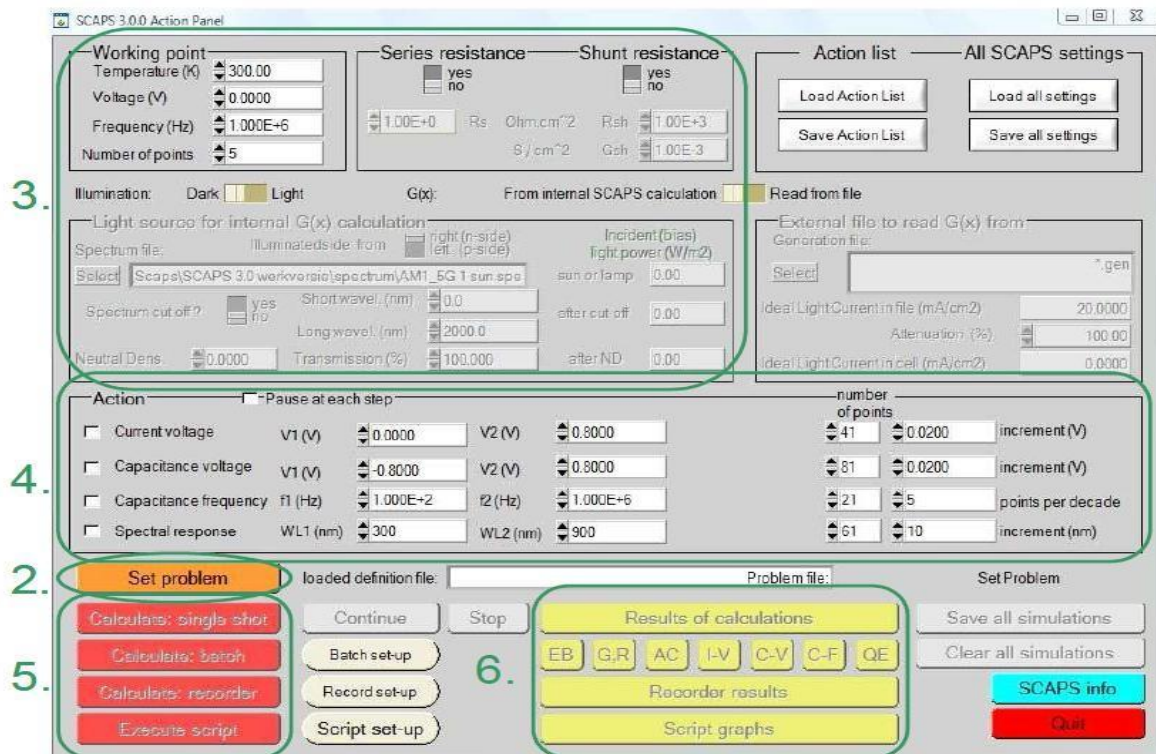


Figure 1. Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

La signification des blocs numérotés de 1 à 6 est expliquée dans le texte . Il ya des panneaux dédiés pour les actions de base:

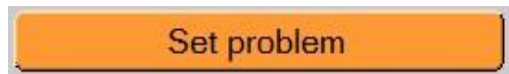
1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.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

Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit.



## II.1 Lancer SCAPS

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



## II.2 Définir le problème

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

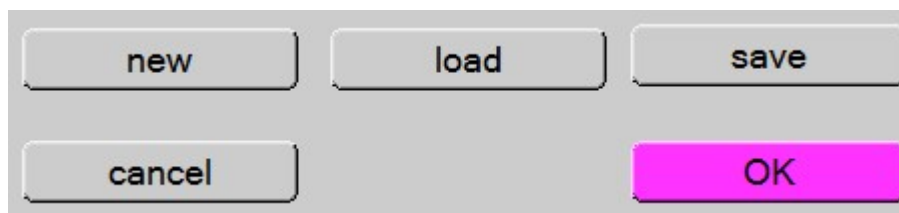
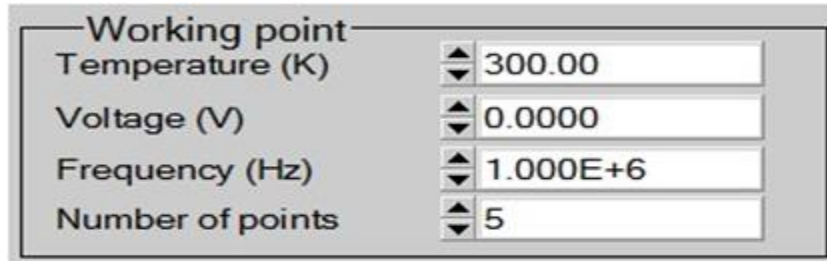


Figure 2. Définir le problème.

## II.3 Définir le point de fonctionnement

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

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



**Figure 3.** Points de fonctionnement (point de travail).

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

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

✚ **L'illumination** : elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour QE( $\lambda$ ), elle détermine les conditions de polarisation de la lumière.

Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination one Sun (= 1000 W/m<sup>2</sup>) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre.

#### II.4 Sélection des caractéristiques à simuler

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

#### II.5 Lancer le calcul

#### II.6 Afficher les courbes simulées

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la **Figure 4**. Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est

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



Figure 4. Panneau des bandes d'énergie.

## II.7 Les courbes I-V

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

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

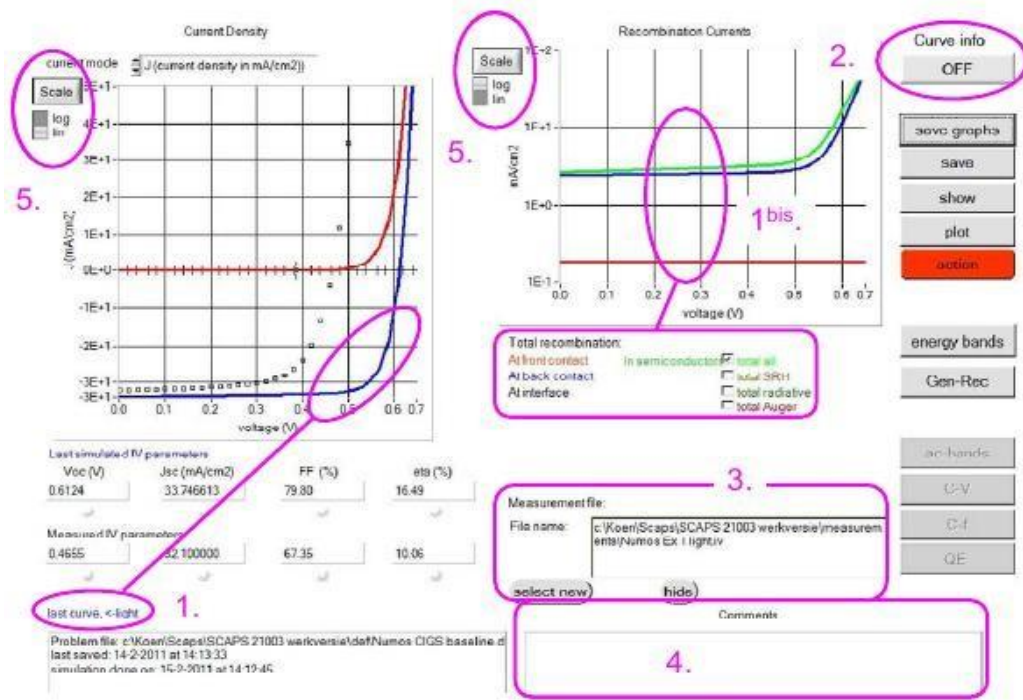


Figure 5. Panneau d’affichage des courbes I-V à l’obscurité et sous éclairciment.

Le bouton SCALE aide a changer la gamme et l’échelle des axes. Si on appuie sur le bouton CTRL et on sélectionne une aire rectangulaire dans un graphe, celui-ci fera un zoom intérieur (agrandissant) dans la zone sélectionnée. L’appui sur le bouton CTRL accompagné d’un clic droit donnera un zoom extérieur (Zoom out).

### III. Définition d’une cellule solaire

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

#### III.1 Edition de la structure d’une cellule solaire

Quand on clique sur le bouton ‘SET PROBLEM’ sur le panneau d’action, le panneau ‘SOLAR CELL DEFINITION’ s’affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d’autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Inter change) d’extension .def qui peuvent s’ouvrir avec Notepad.exe ou 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 6. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant ‘ADD LAYER’.

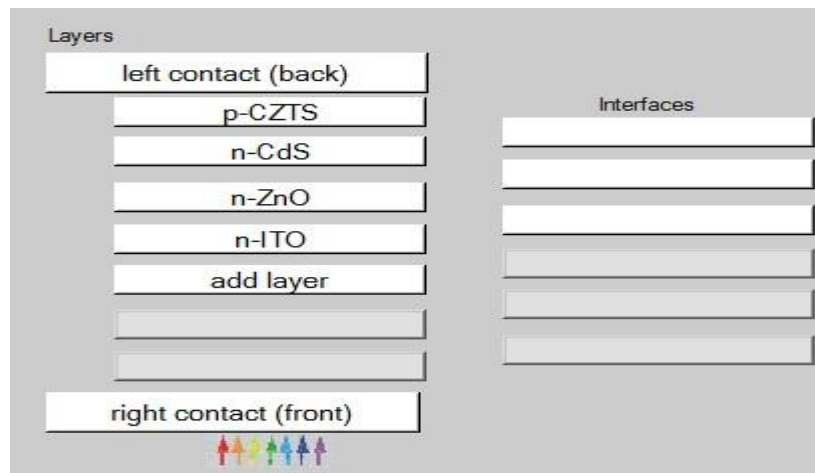


Figure 6. Définition de la structure d'une cellule solaire.

### III.2 Contacts

Les propriétés des contacts peuvent être introduites 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 7.

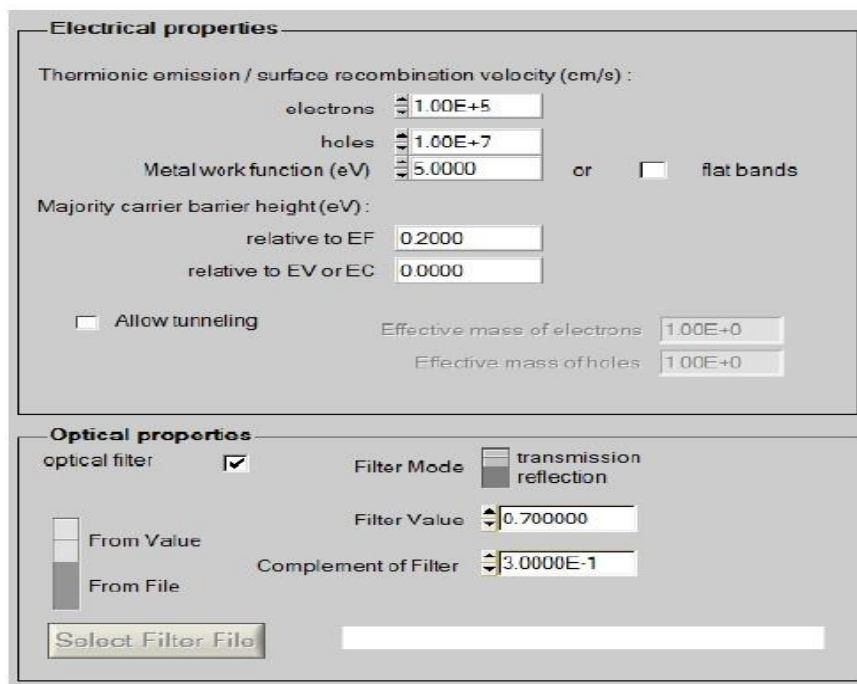


Figure 7. Panneau des propriétés des contacts.

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

- ✚ Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.
- ✚ Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).
- ✚ La barrière des porteurs majoritaires.

✚ L'effet tunnel (si on veut en tenir compte).

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

### III.3 Définition des couches

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Figure 8) 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, vitesse 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 9, 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 10.

L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs.

On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS.

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.

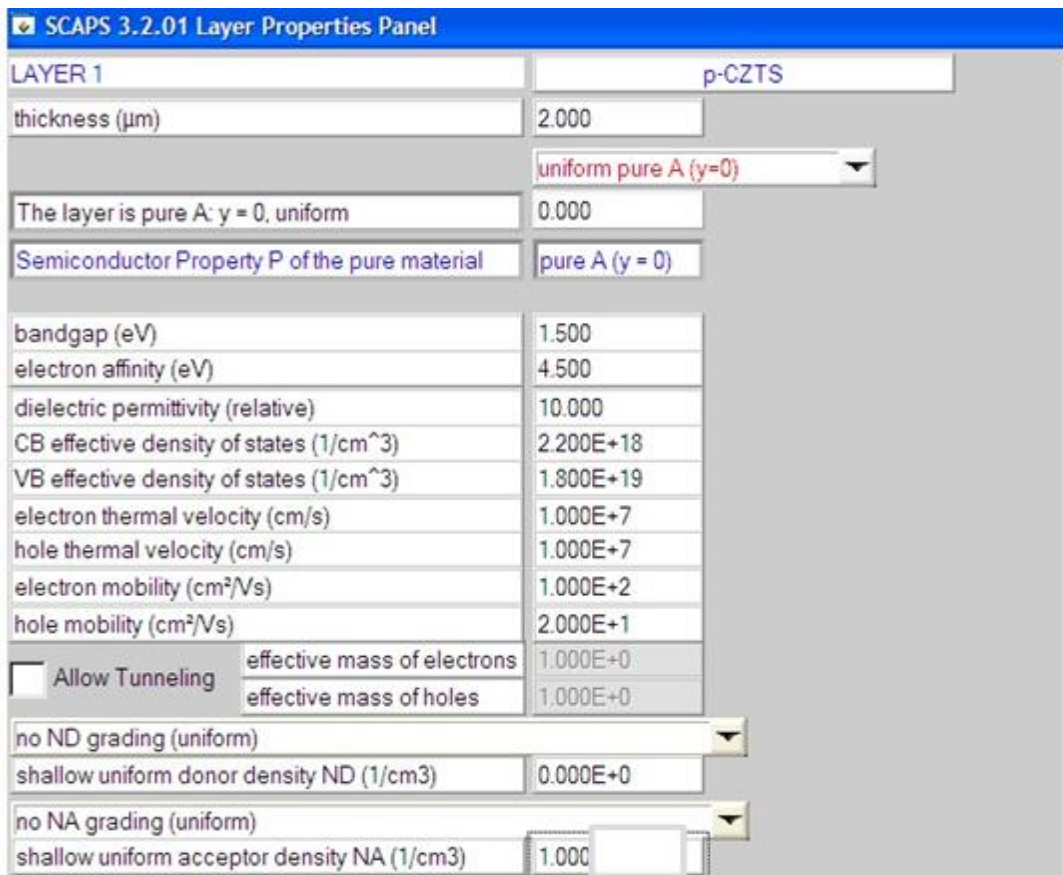


Figure 8. Propriétés de la couche ajoutée.

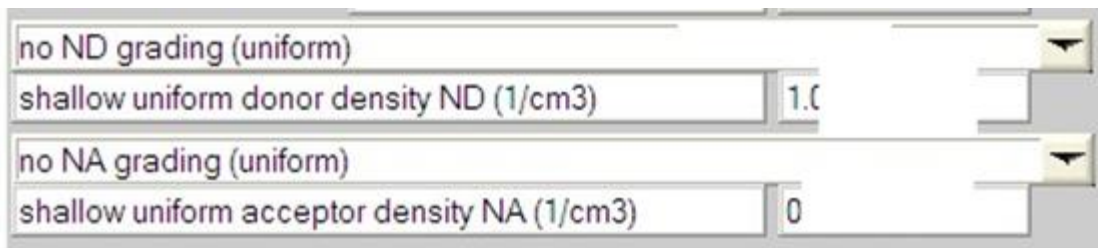


Figure 9. Propriétés des dopages définis.

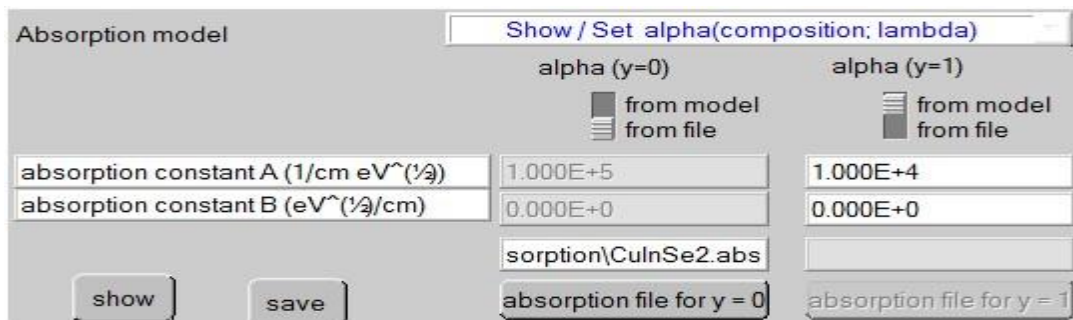


Figure 10. Modèle de l'absorption.

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche (Figure 11). Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges.

Band to band recombination			
Radiative recombination coefficient (cm <sup>3</sup> /s)	1.000E-5	1.000E-5	uniform ▼
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	1.000E-25	1.000E-25	uniform ▼
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	1.000E-25	1.000E-25	uniform ▼

Defect 4 of layer 1	
defect type	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)	0.600
characteristic energy (eV)	0.200
Nt grading dependent on position x: Nt (x) ▼ exponential ▼	
Nt total (1/cm <sup>3</sup> )	Left (x=0) 1.000E+15 Right (x=1) 1.000E+14
Nt peak (1/eV/cm <sup>3</sup> )	Left (x=0) 2.821E+15 Right (x=1) 2.821E+14

**Figure 11.**Définition des types de recombinaison présents.

#### IV. Conclusion

Le SCAPS-1D est un logiciel utilisé pour la simulation numérique en une dimension des dispositifs photovoltaïques. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de continuité des électrons et des trous et sur l'équation de poisson. Il est très facile à utiliser. Dans ce chapitre on a présenté en détail le fonctionnement de cet outil unidimensionnel de simulation, les différents modules, la partie de définition de la structure et enfin la partie d'affichage des résultats.

Dans notre travail, on va utiliser le logiciel SCAPS-1D pour simuler une structure classique d'une cellule solaire substrat à base du composé CIGS de type p. Dans le chapitre qui suit on va présenter la simulation de la structure proposée, les résultats des performances photovoltaïques obtenus et la discussion.

**REFERANCE**

- [1] A. Niemegeers, M. Burgelman, "Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells", Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference", Washington DC, 1996, pp.901-904.
- [2] D. Schemed, M. Ruck, and H. W. Schlock, Sol. énergies Mat. Sol. Celles, Vol. 281 (1996) pp. 41-42.
- [3] T. Schulmeyer, R. Hunger, A. Klein, W. Jaeger Mann, and S. Nicki, Appl. Phys. Lett. 84, 3067 (2004).
- [4] S.-H. Wei and A. Zunger, Appl. Phys. Lett. Vol. 63, 2549 (1993).
- [5] F. S'auberlich and A. Klein, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 763, 471 (2003).
- [6] S.-H. Wei and A. Zunger, Appl. Phys. Lett. 72, 2011 (1998).138.

# *Chapitre IV*

## *Résultats et discussions*

## I. Introduction

Beaucoup d'informations sont disponibles dans la littérature concernant la simple-jonction de la pile solaire  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  (CIGS). L'augmentation de la tension de circuit-ouvert ( $V_{CO}$ ) est fortement souhaitable pour améliorer la performance globale des cellules solaires CIGS, parce qu'elle réduit au maximum les pertes d'interconnexion dans la fabrication des modules photovoltaïques. En alliant le  $\text{CuInSe}_2$  (CIS) avec le Gallium Ga pour former les couches minces de CIGS, l'énergie de large bande-gap de la couche de l'absorbeur CIGS peut améliorer potentiellement la conversion dans la gamme utile du spectre solaire, aussi bien que l'augmentation de ( $V_{CO}$ ) des cellules fabriquées, peut entraîner une réduction en valeur de la densité de courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ).

Notre travail permet la modélisation des cellules solaires hétérojonctions à base des composés quaternaires  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  en couches minces sous illumination, avec  $x$  représente la concentration de l'atome de Ga dans l'alliage, elle est varié dans la gamme de 0 et 1.

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de l'étude par simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire en couches minces et à hétérojonction à base de CIGS et leurs interprétations. Nous allons simuler une structure d'une cellule solaire  $\text{ZnO}/\text{CdS}(\text{n})/\text{CIGS}(\text{p})$  en utilisant le logiciel SCAPS-1D. Au début, nous allons étudier l'effet du dopage et de l'épaisseur des couches tampons et de l'absorbeur sur les paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) dont le but est d'aboutir un rendement maximal de la cellule solaire à bas du CIGS. Ensuite, nous allons étudier l'effet des défauts profonds et les défauts d'interface sur les performances de la structure.

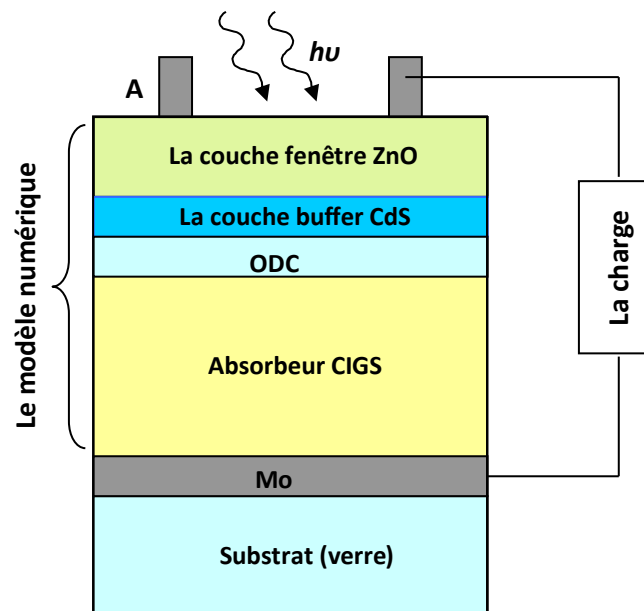
## II. Présentation de la cellule solaire simulée

Dans cette étude on va étudier une cellule solaire substrat avec une couche absorbante à base de CIGS dont la structure est la suivante :  $\text{ZnO}(\text{n})/\text{CdS}(\text{n})/\text{ODC}/\text{CIGS}(\text{p})$  (Figure I). Dans la littérature, plusieurs chercheurs ont été proposés pour interpréter la formation de la jonction p-n dans les couples Buffer/CIGS. Ils ont essayé d'expliquer la formation de la jonction p-n dans le couple buffer/CIGS à partir du diagramme de phase du système Cu-In-Se. Ils pensent que pour une concentration significative du cuivre, l'incorporation du cuivre dans la structure cristalline du buffer forme une solution solide, donnant naissance aux composés ODC (Ordered Defect Compounds). On peut citer par exemple  $\text{CuIn}_3\text{Se}_5$ ,  $\text{CuIn}_5\text{Se}_8$ ,  $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ ,  $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{Se}_9$ , etc.

La jonction p-n dans le couple buffer/CIGS est une pseudo-homojonctions créée spontanément par inter-diffusion d'atomes intrinsèques, essentiellement du cuivre et de

l'indium, provenant des deux couches minces buffer et CIGS. La formation de cette pseudo-homojonction est due à la conversion du type p au type n dans une partie de l'absorbeur p-CIGS.

Lors de ces processus de diffusion, de nombreux défauts ponctuels se créent au sein des composées CIGS. Leurs fortes concentrations, supérieures à celle des porteurs libres, contribuent d'une manière ou d'une autre au dopage des composées CIGS (de type n ou type p). Les défauts complexes  $(2V_{Cu}^- + In_{Cu}^{+2})$  ont des énergies de formation très faibles et même négatives pour  $(2V_{Cu}^- + In_{Cu}^{++})$  avec des niveaux donneurs très peu profonds. Cela est dû à une énergie électrostatique très attractive entre les défauts ponctuels  $V_{Cu}$  et  $In_{Cu}$ . Ces défauts complexes sont très stables et peuvent même être arrangés en un réseau secondaire dans la matrice CIGS. Ils entraînent la formation des composées ODC, intrinsèques, généralement stables et de conductivité de type n. Une particularité intéressante de ces défauts est l'absence des niveaux profonds et le glissement du niveau de  $In_{Cu}$  vers le minimum de la bande de conduction par une force électrostatique entre les deux composants du défaut  $(2V_{Cu}^- + In_{Cu}^{+2})$ . Un électron emprisonné sur  $In_{Cu}$  « voit » la charge négative  $V_{Cu}^-$ , par conséquent son énergie de liaison avec  $In_{Cu}$  est diminuée, comparée à son énergie de liaison avec  $V_{Cu}^-$ .



**Figure 1:** La structure étudiée p-CIGS/ODC/n-CdS/ZnO.

### III. Paramètres de simulation

Comme nous l'avons cité précédemment, nous avons utilisé la couche ZnO comme une

couche fenêtre, la couche CdS comme une couche tampon et la couche CIGS comme une couche absorbante. Les paramètres de ces couches sont représentés au Tableau I.

**Tableau I:** Paramètres de simulation.

le nom de la couche	ZnO	CdS	CIGS
<b>Epaisseur (nm)</b>	Varié	Varié	Varié
<b>Constante diélectrique</b>	10	10	10
<b>Mobilité d'électrons (cm<sup>2</sup>/VS)</b>	100	100	100
<b>Mobilité des trous (cm<sup>2</sup>/VS)</b>	25	25	25
<b>Bande gap (eV)</b>	3.3	2.45	1.2
<b>Densité d'effective N<sub>C</sub> (cm<sup>-3</sup>)</b>	$4 \times 10^{18}$	$2 \times 10^{18}$	$2 \times 10^{18}$
<b>Densité d'effective N<sub>V</sub> (cm<sup>-3</sup>)</b>	$9 \times 10^{18}$	$1.5 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{18}$
<b>L'affinité des électrons (eV)</b>	4.6	4.3	4.5
<b>Densité des porteurs N<sub>D</sub>/N<sub>A</sub> (cm<sup>-3</sup>)</b>	N <sub>D</sub> variée	N <sub>D</sub> variée	N <sub>A</sub> variée

<b>Défauts Gaussiens de l'absorbeur CIGS</b>	
<b>Défauts de densités</b>	N <sub>DG</sub> = $10^{13} \text{cm}^{-3}$
<b>La deviation standard</b>	0.1eV
<b>Cross-section des electrons</b>	$5.3 \times 10^{-13} \text{cm}^2$
<b>Cross-section des trous</b>	$5 \times 10^{-15} \text{cm}^2$

#### IV. Résultats de la simulation

Nous allons simuler la variation des paramètres physiques (L'épaisseur optimale et le dopage optimal de chaque couche) afin de concevoir une cellule solaire ayant un rendement électrique maximal.

##### IV.1. Obtention de l'épaisseur optimal de l'absorbeur CIGS

Pour obtenir l'épaisseur optimale on a varié l'épaisseur de l'absorbeur CIGS de 100 nm à 15000 nm. Les autres paramètres des couches ont resté fixes comme l'indique au Tableau I. La variation obtenue est représentée à la Figure 2. On remarque que les paramètres photovoltaïques des cellules solaires CIGS(p)/ODC/CdS(n)/ZnO sont fortement dépendants de l'épaisseur de la

couche absorbant (CIGS). Le rendement des cellules est considérablement amélioré de 13.85 % à 25.59 % lorsque l'épaisseur de l'absorbeur augmente de 0.2  $\mu\text{m}$  à 15  $\mu\text{m}$  (Figure 2). Cette amélioration peut être expliquée par une augmentation de l'absorption des photons dans la couche absorbante permettant la génération de plus de paires : électrons-trous induisant ainsi l'augmentation du courant électrique. D'après la figure 2, l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbeur a une influence positive pour tous les paramètres photovoltaïques. On voit qu'une augmentation rapide du rendement à partir de l'épaisseur 0.5  $\mu\text{m}$  à 3  $\mu\text{m}$ . L'augmentation va continuer jusqu'à la limite de la convergence. Ce qui donne l'épaisseur optimale de l'absorbeur CIGS qui est égale à 3  $\mu\text{m}$ . On va utiliser cette valeur optimale dans le reste de ce travail.

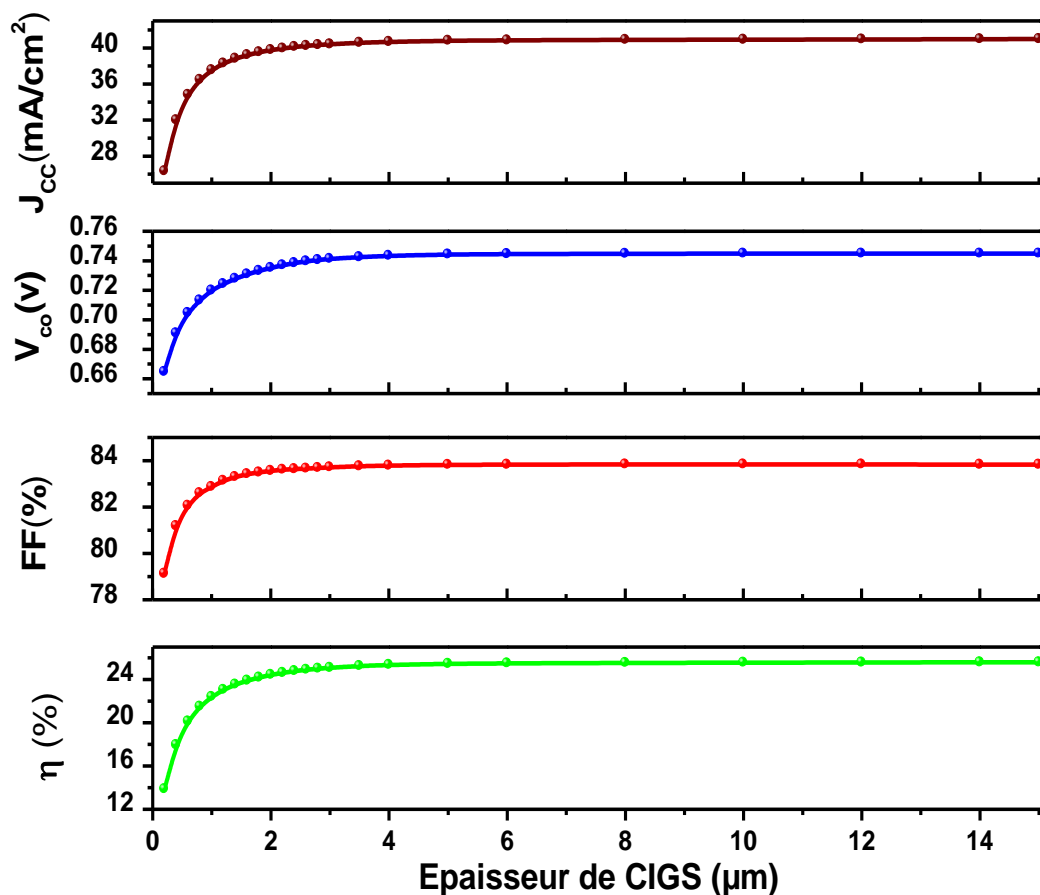
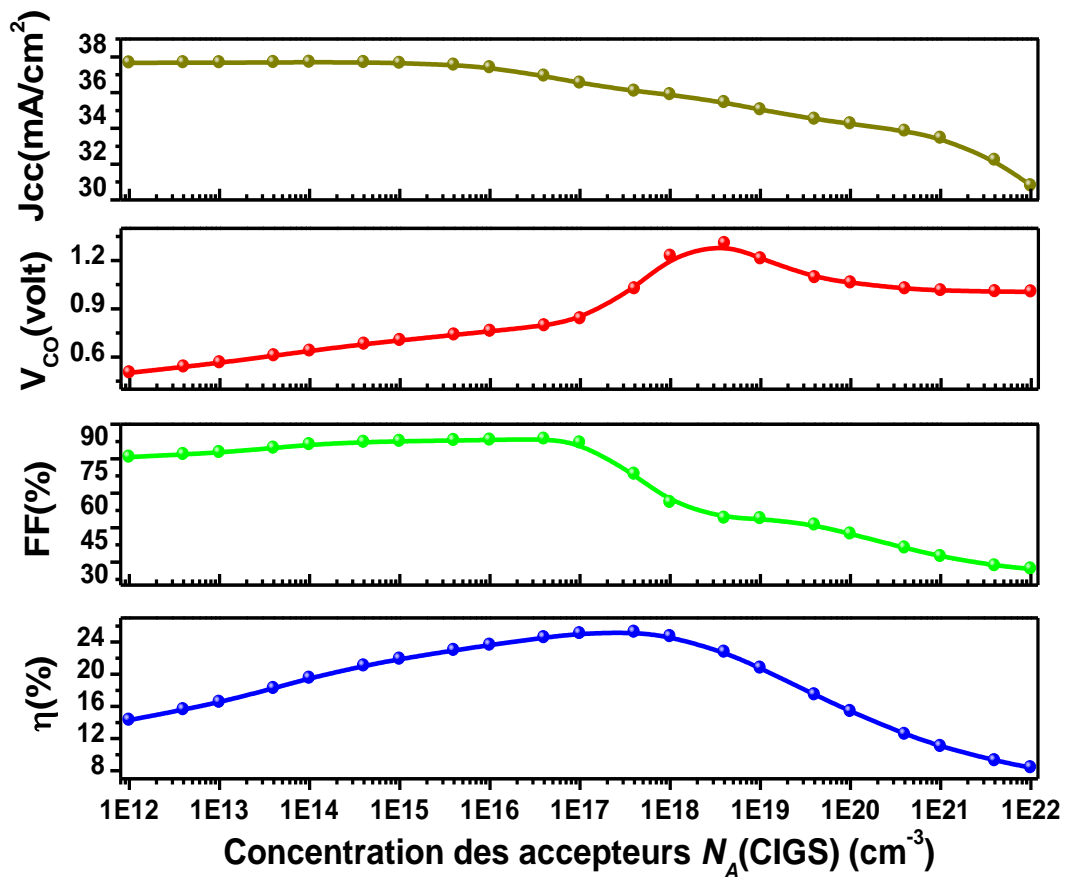


Figure 2 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de CIGS.

Le courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert terminant leur augmentation à l'épaisseur de  $3\mu\text{m}$  prenant les valeurs  $0.741\text{ volt}$ ,  $40.41\text{ mA/cm}^2$  respectivement. Cette amélioration est due quantitativement à l'augmentation des électrons photo-générés par le changement d'épaisseur et donc du volume de l'absorbeur.

#### IV.2. Obtention du dopage optimal de l'absorbeur CIGS

Dans le but de déterminer l'influence du dopage de l'absorbeur CIGS (la concentration des accepteurs), nous avons procédé à la variation de  $N_A(\text{CIGS})$  dans la gamme de  $10^{12}\text{ cm}^{-3}$  à  $10^{22}\text{ cm}^{-3}$  (voir la Figure 3).



**Figure 3 :** Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de la concentration des accepteurs  $N_A(\text{CIGS})$ .

Les performances de la cellule solaire:  $FF$ ,  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $\eta$ , sont résumés de manière très claire dans la Figure 3. Nous avons remarqué que le rendement augmente lentement pour  $N_A(\text{CIGS})$  entre les deux valeurs :  $1 \times 10^{12}$  et  $1 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ , ensuite il subit une diminution rapide

quand  $N_A(\text{CIGS})$  au-delà de  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . La valeur maximale du rendement (24.4%) est obtenue pour une concentration  $N_A(\text{CIGS}) = 1.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Cette valeur optimale de  $N_A(\text{CIGS})$  est utilisée dans le reste de notre travail.

### IV.3. Obtention de l'énergie de gap optimale

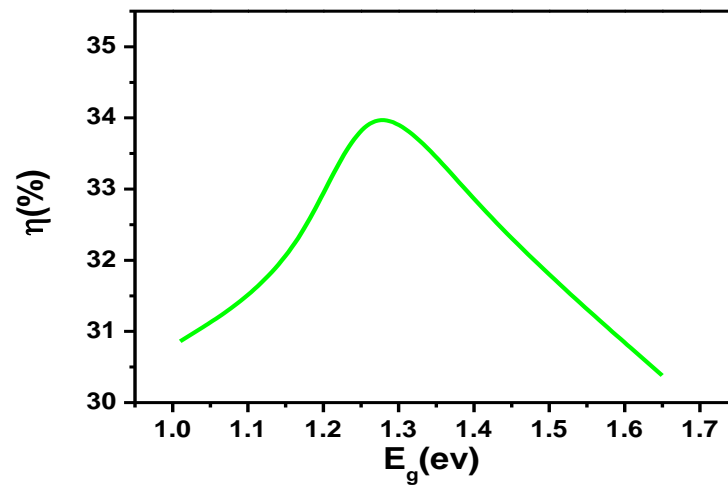
Pour graduer la bande gap de l'absorbeur il faut prendre en considération les paramètres de la couche fenêtre de ZnO d'une part et du buffer de CdS d'autre part, qui restent fixé durant notre étude. La variation se concentre sur la couche de l'absorbeur à base de CIGS. Le but est donc de faire une étude pour évaluer l'énergie du gap optimale de l'absorbeur CIGS, et leurs effets sur les performances de la cellule.

La gamme de la variation de la concentration de Ga est choisi de telle manière que la valeur de  $x$  dans l'alliage est varié entre 0 et 1. Utilisant l'équation (2) du chapitre 2 on donne quelques énergies de gap du composé CIGS au Tableau II.

**Tableaux II:** Variation de l'énergie du gap suivant la concentration de  $x$ .

Concentration de $x$	Energie de gap	$\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$
$x = 0$	$E_g = 1.01 \text{ eV}$	$\text{CuGaSe}_2$
$x = 0.31$	$E_g = 1.176 \text{ eV}$	$\text{CuIn}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{Se}_2$
$x = 0.45$	$E_g = 1.260 \text{ eV}$	$\text{CuIn}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{Se}_2$
$x = 0.66$	$E_g = 1.398 \text{ eV}$	$\text{CuIn}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{Se}_2$
$x = 1$	$E_g = 1.65 \text{ eV}$	$\text{CuInSe}_2$

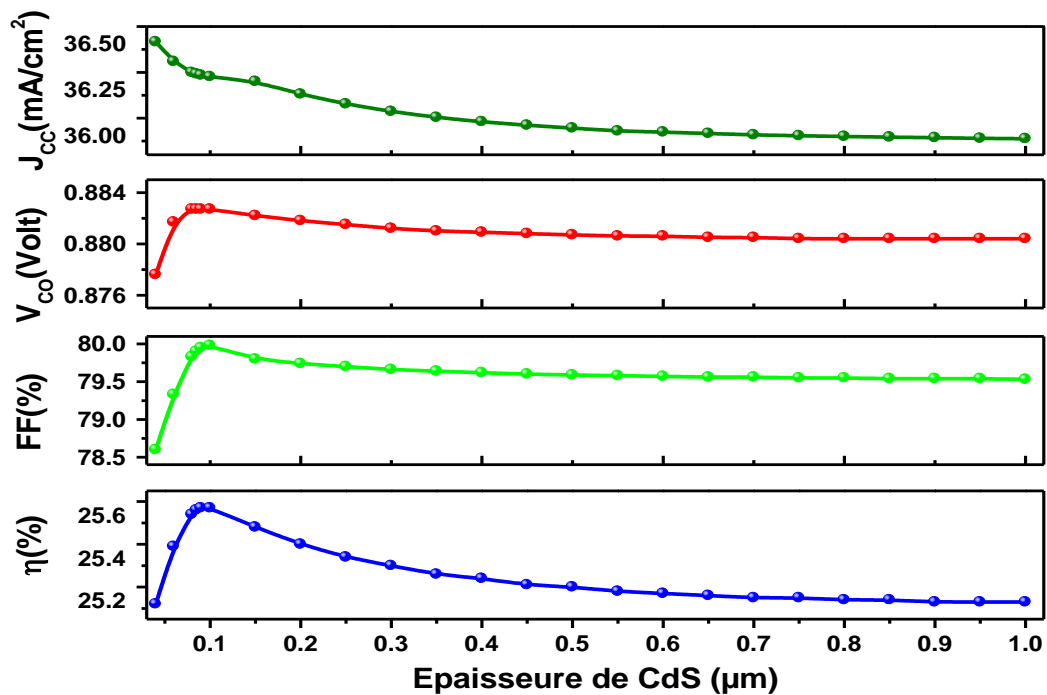
Dans cette partie, la simulation montre la dépendance de l'introduction de Ga sur les performances de la cellule, on remarque d'après les résultats de la Figure 4 que le rendement varie dans la gamme de 30.86 % à 34,76 % lorsque  $x$  varie entre 0 et 1. La concentration optimale est  $x = 0.45$ , et le rendement maximal égal à 34.76%.



**Figure 4 :** Rendement de conversion en fonction de l'énergie de gap  $E_g$ (CIGS).

#### IV.4. Obtention de l'épaisseur optimal de la couche tampon CdS

Calcul de la variation de l'épaisseur de la couche tampon  $d$ (CdS) se fait dans la gamme de 10 à 1000 nm. Les performances obtenues de la cellule solaire à base de CIGS est représentées à la Figure 5.

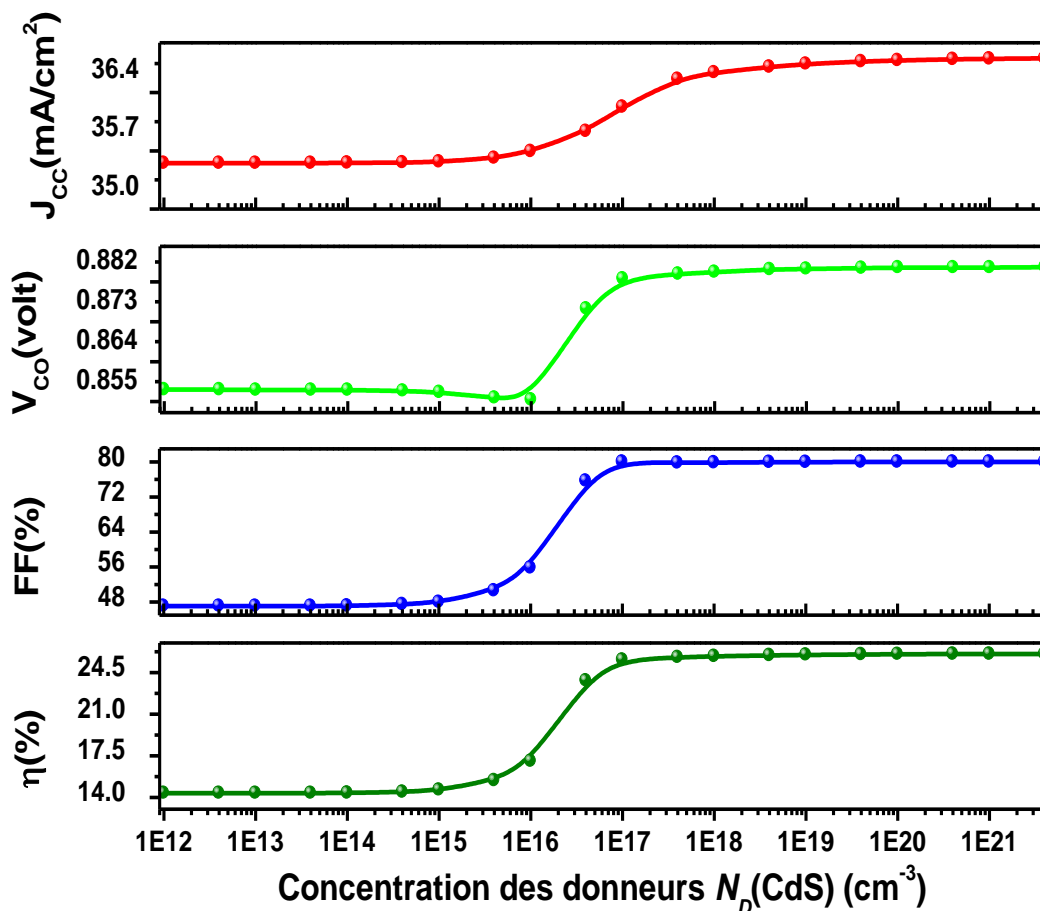


**Figure 5 :** Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de CdS.

D'après la figure 5, on constate d'une manière claire une augmentation rapide du rendement à partir de  $0.01 \mu\text{m}$  à  $0.1 \mu\text{m}$  ensuite une diminution remarquable après cette valeur. Ce qui donne l'épaisseur optimale de la couche tampon CdS qui est égale à  $0.1 \mu\text{m}$ . On va donc utiliser cette valeur dans le reste de notre étude.

#### IV.5. Obtention du dopage optimal de la couche tampon CdS

Nous avons simulé la variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en fonction du dopage de la couche en CdS dans la gamme de  $10^{12} \text{cm}^{-3}$  à  $4 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$  (voir Figure 6). Un meilleur rendement est obtenu pour une concentration de dopage supérieur à  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  de la couche CdS. On va donc utiliser cette valeur optimale dans le reste de notre travail.



**Figure 6 :** Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de la concentration des donneurs  $N_D(\text{CdS})$ .

#### IV.6. Obtention de l'épaisseur optimal de la couche fenêtre ZnO

Une petite gamme de variation de l'épaisseur de ZnO est appliquée à la structure de notre cellule solaire (entre 10 nm à 300 nm). D'après les résultats représentés dans la Figure 7, le courant de court-circuit diminue de 36.36 mA/cm<sup>2</sup> à 36.032 mA/cm<sup>2</sup> engendrant une petite diminution du rendement de 25.63% à 25.44 % lorsque l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO variée 10 nm à 300 nm. Donc comme une valeur optimale on va prendre 10 nm.

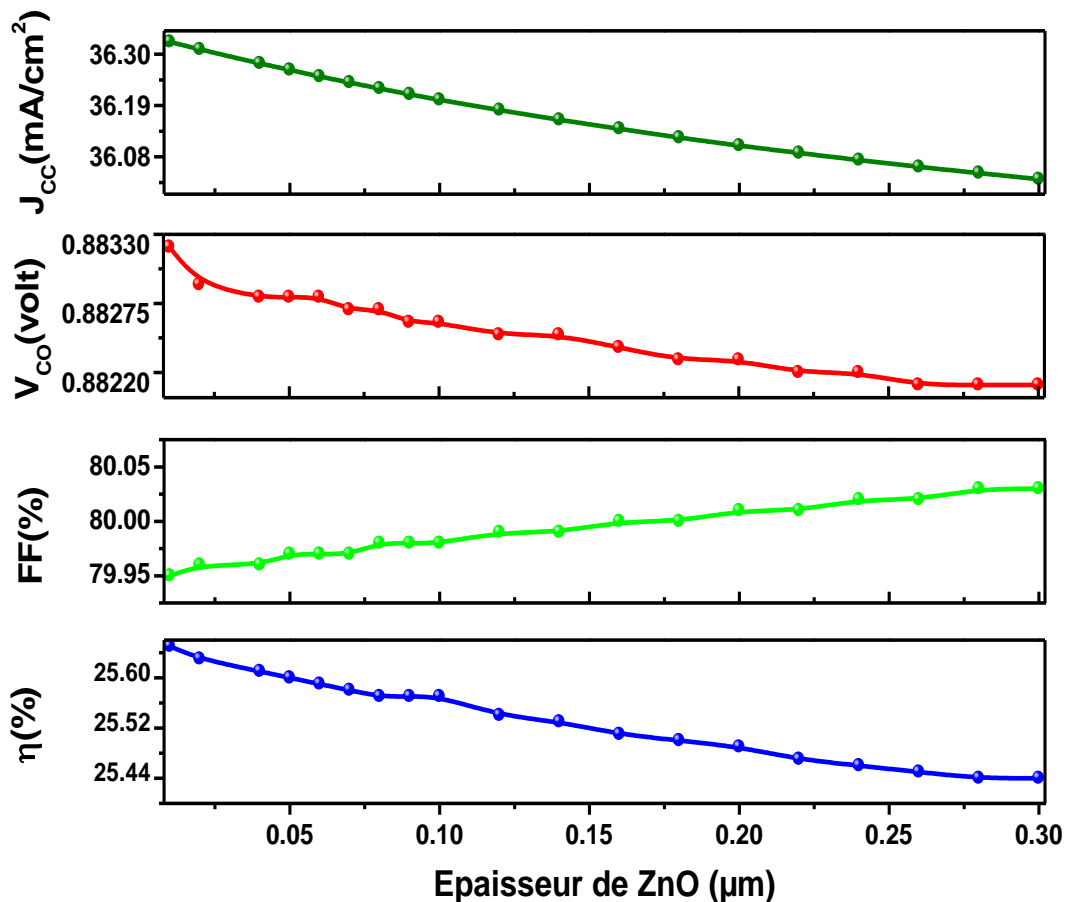


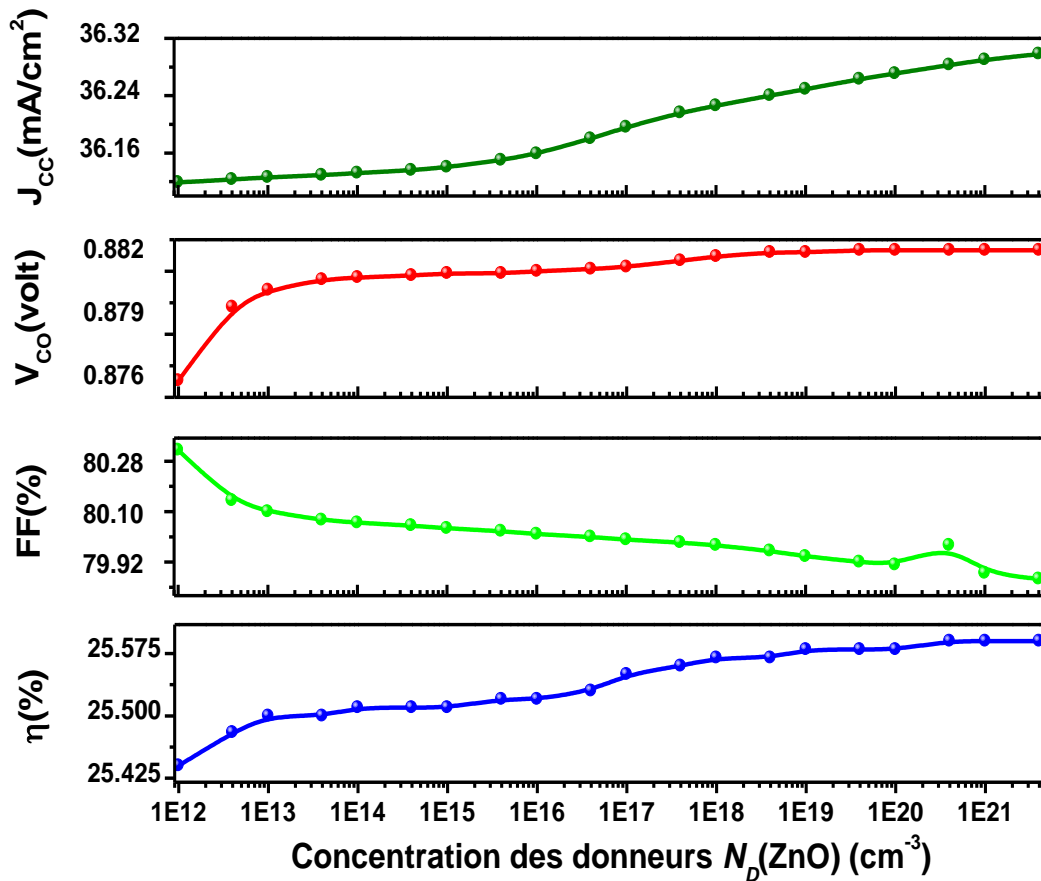
Figure 7: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de ZnO.

#### IV.7. Obtention du dopage optimal de la couche fenêtre ZnO

Le ZnO dopé n servant d'une couche fenêtre, elle doit être transparente au rayonnement solaire qui doit être absorbé dans la couche CIGS et en même temps conductrice pour améliorer la collecte des charges générées dans la cellule par les grilles métalliques.

L'augmentation du dopage de la couche ZnO induit une augmentation de sa conductivité qui

présente un effet bénéfique sur les performances de la cellule solaire CIGS. La Figure 8 montre la variation dans une large gamme du dopage de la couche ZnO. L'augmentation des performances explique la limitation des pertes résistives.

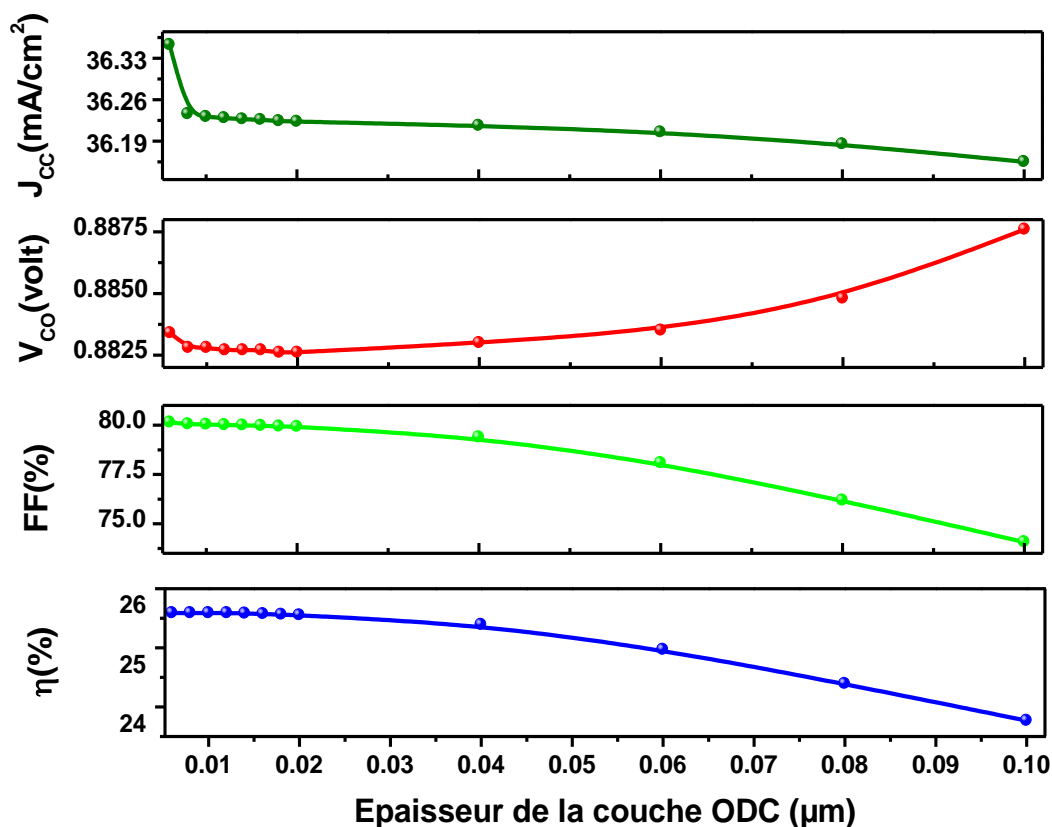


**Figure 8 :** Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de la couche fenêtre  $N_D(\text{ZnO})$ .

Nous avons remarqué que le rendement augmente lentement pour  $N_D(\text{ZnO})$  varié entre  $1 \times 10^{13}$  et  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . La valeur optimale du rendement est obtenue pour des fortes concentrations  $N_D(\text{ZnO}) > 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

#### IV.8. Obtention de l'épaisseur optimal de la couche des défauts ODC

L'existence de la couche ODC dans la structure de la cellule CIGS a un bénéfice remarquable sur les performances photovoltaïque de la cellule, comme l'indique la variation de l'épaisseur de celle-ci sur les performances de la cellule à la Figure 9.



**Figure 9** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de la couche des défauts ODC.

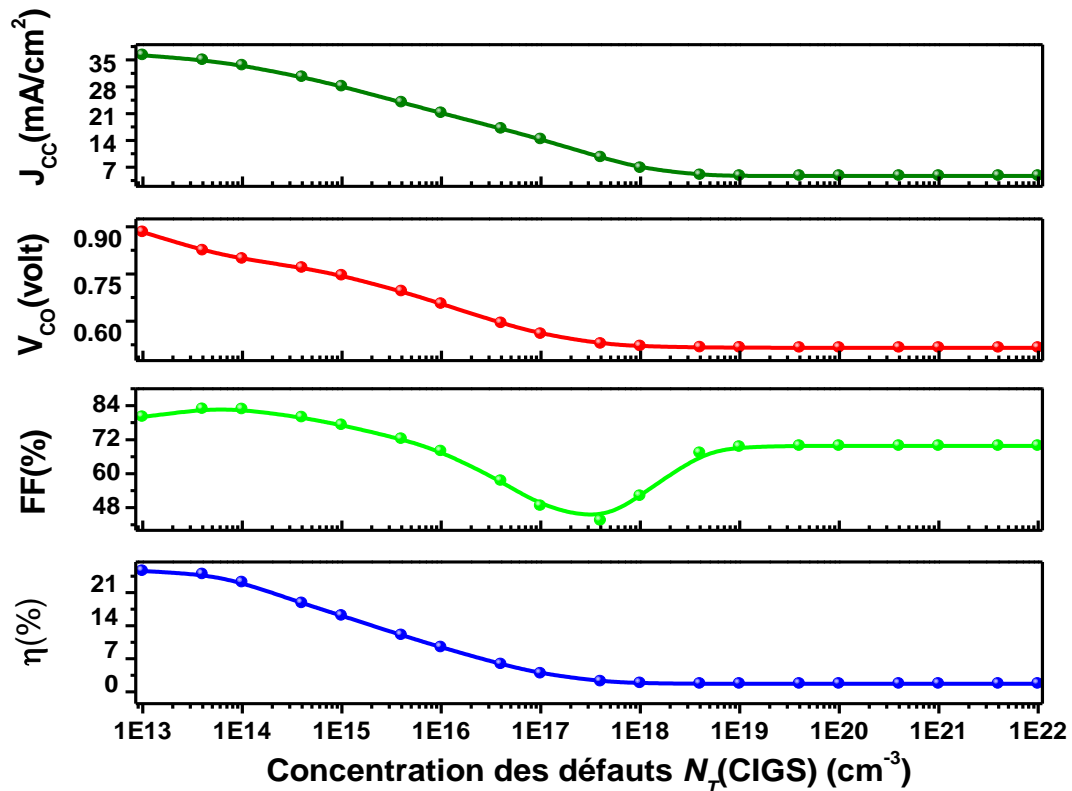
Le rendement de conversion augmente jusqu'à une valeur maximale correspond à l'épaisseur de l'ODC égale  $0.015 \mu\text{m}$ , puis le rendement diminue. Ce qui implique que l'existence d'une couche ODC avec une épaisseur de  $0.015 \mu\text{m}$  donne des meilleures performances (25.57%). De la même manière, le facteur de forme  $FF$  varie, il fait une augmentation jusqu'à une valeur maximale correspond à l'épaisseur de l'ODC égale  $0.015 \mu\text{m}$ , puis il diminue à des valeurs très petites. Concernant la densité du courant de court-circuit  $J_{cc}$ , on voit qu'il y a une diminution continue le long de la gamme de la variation de l'épaisseur de l'ODC, à cause de l'augmentation de la concentration des défauts dans la couche, cette dernière joue un rôle comme un centre de piégeage. La tension de circuit-ouvert reste inchangée.

## V. Etude des défauts dans la structure de la cellule solaire

### V.1. Effet de la concentration des défauts profonds dans le volume de l'absorbeur CIGS

Pour bien déterminer l'influence de la concentration des défauts profonds dans le volume de l'absorbeur CIGS, on a tracé à la Figure 10 les courbes des performances photovoltaïques globales de la cellule solaire en fonction de  $N_T(\text{CIGS})$  dans la gamme de  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{22} \text{ cm}^{-3}$ .

A partir de la Figure 10, on remarque que le rendement est maximum  $\eta \sim 25.1\%$  pour des faibles concentrations des défauts profonds,  $N_T(\text{CIGS}) < 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Une faible diminution de tous les paramètres photovoltaïques lorsque  $N_T(\text{CIGS}) > 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Le rendement subit une décroissance rapide vers des faibles valeurs lorsque  $N_T(\text{CIGS}) > 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Le rendement maximal optimisé est obtenu pour des concentrations des défauts  $N_T(\text{CIGS}) < 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

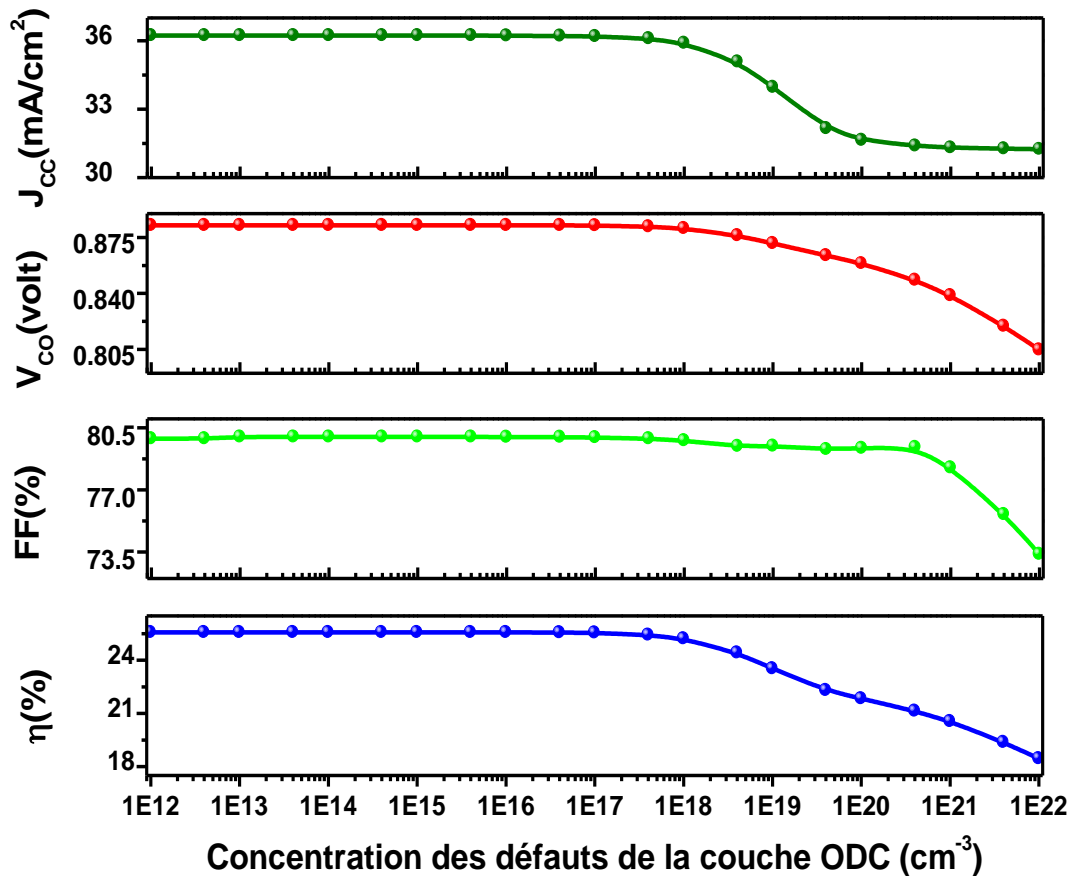


**Figure 10 :** Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de la concentration des défauts de la couche absorbante  $N_T$  (CIGS).

### V.2. Effet de la concentration des défauts de la couche ODC

Dans ce cas, on a varié la concentration des défauts dans la couche ODC pour étudier l'effet de la concentration  $N_{def}(\text{ODC})$  (voir la Figure 11).

La variation de la concentration des défauts de la couche ODC,  $N_{def}(ODC)$ , dans la gamme  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  jusque à  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  donne un maximum du rendement ( $\eta \sim 25.2\%$ ). Pour  $N_{def}(ODC) \geq 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  les paramètres photovoltaïques subissent une diminution rapide vers des faibles performances. Le rendement maximal est obtenu pour des concentrations des défauts de la couche ODC,  $N_{def}(ODC) < 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .



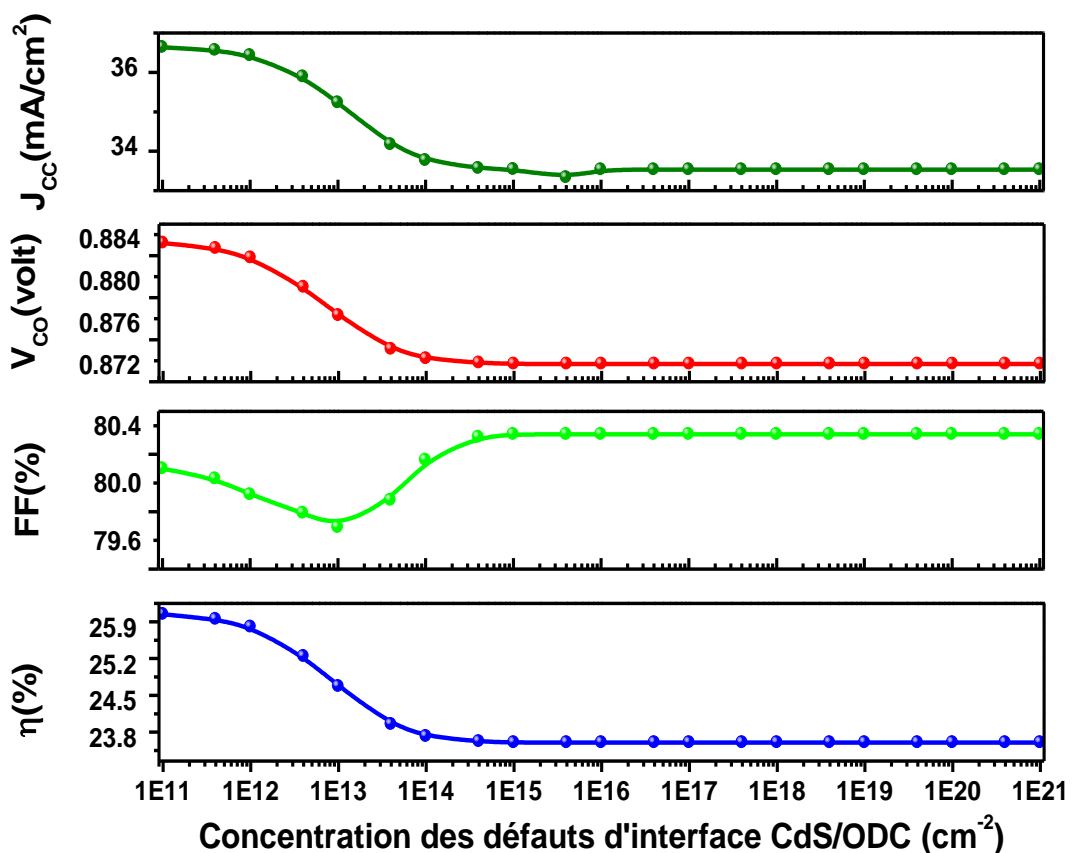
**Figure 11** : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de la concentration des défauts de la couche des défauts  $N_{def}(ODC)$ .

### V.3. Effet de la concentration des défauts d'interface CdS/ODC

Une couche extérieure inversée, appelée «Ordered vacancy compounds (OVC) », est située entre la couche CdS et la couche CIGS. Certaines littératures [1], ont démontré que la couche mince (ODC) de type N, située juste à la surface de l'absorbeur CIGS. Cependant, quelques littératures [2,3] ont employé un terme plus général : La couche des lacunes ordonnées 'Ordered Defect compounds (ODC)'. La couche extérieure inversée (ODC) est considérée

comme une couche des défauts, l'existence de l'épaisseur de cette couche améliore considérablement la performance de la cellule, parce que la bande de valence est descendu au-dessous du niveau de fermi, ce qui réduit le phénomène de recombinaison au niveau de l'interface CdS/CIGS, et donc le taux de recombinaison réduit. Cependant, les propriétés du défaut extérieur posent des problèmes, surtout avec des densités plus élevées des défauts où avec une grande résistivité, peuvent mener à détériorer la performance de la cellule.

Durant cette étude, la couche (ODC) sera considérée comme étant un défaut de surface et par la suite on ne s'intéresse pas le dessus.



**Figure 12 :** Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de la concentration des défauts d'interface CdS/ODC.

### VIII. Conclusion

Dans notre étude, nous avons simulé les paramètres de sortie d'une cellule solaire à base de CIGS à hétérojonction en essayant de trouver les paramètres optimaux, donnant les meilleures caractéristiques de sortie. Nous avons alors, étudié l'effet du dopage et de l'épaisseur

de la couche CIGS, la couche CdS, la couche des défauts ODC et la couche fenêtre ZnO. Les valeurs optimales sont obtenues afin de déterminer les performances  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF,  $\eta$  de la cellule solaire étudiée.

Nous avons constaté que les deux paramètres: le dopage et l'épaisseur, ont un impact très significatif sur le rendement de la conversion. La variation du dopage peut affecter les porteurs photogénérés. D'un autre côté, il est préférable d'augmenter la concentration du dopage, car cette augmentation permet d'améliorer la collecte des porteurs photogénérés dans la couche absorbante de CIGS. Par contre, au niveau de l'absorbeur CIGS, un dopage de l'ordre de  $1.6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  est suffisant pour améliorer le rendement.

L'amélioration du rendement de conversion est obtenue pour une couche de CdS de type n fortement dopé, est de l'ordre de  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , ainsi qu'une couche d'absorbeur CIGS dopé p de l'ordre de  $1.6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ .

En effet, Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure ZnO/CdS/ODC/CIGS. Nous pouvons dire que les paramètres de chaque couche jouent un rôle très important dans les calculs des performances du dispositif étudié et en particulier dans l'amélioration du rendement de conversion des cellules solaires à base de matériaux chalcopyrites Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS).

Après la variation de ces paramètres on a tiré quelques valeurs optimales, très importantes au laboratoire, c.-à-d. dans le cas de la fabrication de la cellule solaire, parmi ces valeurs on a noté :

- ✚ la valeur optimale de l'épaisseur de l'absorbeur p-CIGS = 3  $\mu\text{m}$ .
- ✚ la valeur optimale de la concentration des accepteurs dans le volume de l'absorbeur CIGS, qui variée entre  $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  et  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ .
- ✚ la valeur optimale de l'épaisseur de la couche tampon CdS = 0.1  $\mu\text{m}$ .
- ✚ La valeur optimale de la concentration des donneurs de la couche tampon CdS est  $N_D = 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
- ✚ la valeur optimale de l'épaisseur de la couche ODC  $\leq 0.6 \mu\text{m}$ .
- ✚ la valeur optimale de la variation de la concentration de Ga est choisi de telle manière que la valeur de  $X = 0.45$ .

**Référence :**

- [1] K. Orgassa, H. W. Schock, and J. H. Werner, “Alternative back contact materials for thin film Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> solar cells,” *Thin Solid Films*, vol. 431–432, pp. 387–391, May 2003.
- [2] K. Aryal, H. Khatri, R. W. Collins, and S. Marsillac, “In Situ and Ex Situ Studies of Molybdenum Thin Films Deposited by rf and dc Magnetron Sputtering as a Back Contact for CIGS Solar Cells,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2012, pp. 1–7, 2012.
- [3] T. J. Vink, M. A. J. Somers, J. L. C. Daams, and A. G. Dirks, “Stress, strain, and microstructure of sputter-deposited Mo thin films,” *J. Appl. Phys.*, vol. 70, no. 8, p. 4301, 1991.

# *Conclusion Générale*

## Conclusion Générale

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Dans ce travail nous avons utilisé la simulation numérique pour étudier les caractéristiques d'une cellule solaire à base de CIGS. Nous avons aussi optimisé les paramètres physiques et électriques de cette structure afin d'obtenir un rendement de conversion maximal. La modélisation ont été faites par la dernière version du logiciel SCAPS-1D, pour étudier une structure substrate en couches minces à base de CIGS.

Nous avons évalué, dans un premier temps, la densité du courant de court-circuit  $J_{SC}$ , la tension en circuit-ouvert  $V_{CO}$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$  pour une structure typique de ZnO/CdS/ODC/CIGS.

Le programme de calcul que nous avons élaboré, nous a permis d'étudier l'influence de l'épaisseurs et la concentration des porteurs des quatre régions: ZnO, CdS, ODC et CIGS. Le but de cette évaluation est de calculer les valeurs optimales des deux paramètres pour les utiliser dans la simulation. L'effet de la concentration des défauts profonds dans le volume de la couche CIGS, la concentration des défauts dans la couche ODC et les défauts à l'interface CdS/ODC sur les performances de notre structure ont été étudiés. Comme conclusion de ce travail on peut dire que :

- ✚ La valeur optimale de l'épaisseur de l'absorbeur p-CIGS = 3  $\mu\text{m}$ .
- ✚ La valeur optimale de la concentration des accepteurs dans le volume de l'absorbeur CIGS, est variée entre  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .
- ✚ La valeur optimale de l'épaisseur de la couche tompon CdS = 0.1  $\mu\text{m}$ .
- ✚ La valeur optimale de la concentration des donneurs de la couche tompon CdS est  $N_D = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .
- ✚ La valeur optimale de l'énergie du gap de la couche absorbante CIGS est choisi de telle manière que la valeur de  $x = 0.45$  ce qui donne  $E_g = 1.398 \text{ eV}$ .

Ce travail de simulation ouvre la voie à plusieurs perspectives. Nous suggérons de :

- a) Fabriquer des absorbeurs CIGS et calculer expérimentalement la concentration des défauts existes et comparer les rendements expérimentaux avec ceux obtenus par simulation.
- b) Effectuer une étude plus approfondie sur la possibilité de développer des cellules solaires double ou multi-jonctions en se basant les composés quaternaires CIGS.
- c) Etudier les défauts dans les matériaux pérovskite.

## *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 fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> semble prometteur. En effet, le rendement de ces cellules a dépassé les 20% ces dernières années avec certaine condition d'élaboration. L'étude du comportement des caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques à base de CIGS est passé par l'optimisation des paramètres primordiales tels que l'épaisseur et le dopage des couches de structure typique de ZnO(n)/CdS(n)/ODC/CIGS(p). Cette étude est effectuée par le simulateur SCAPS-1D.

Le but de ce travail, est d'étudier l'effet des défauts profonds dans l'absorbeur CIGS et dans la couche des défauts ODC ainsi que les défauts d'interface ODC/ZnSe sur les performances de la cellule ZnO(n)/CdS(n)/ODC/CIGS(p).

**Keywords:** Cellule solaire, Couche mince, Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>, Simulation numérique, SCAPS-1D.

## *ABSTRACT*

In the overall context of the diversification, the use of natural resources, renewable energy, in particular the solar photovoltaic energy is becoming stronger. As such, the development of a new generation of photovoltaic cells based on Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> looks promising. Indeed, the performance of these cells exceeded 20% in the recent years with some fabrication conditions. The study of the electrical characteristics behavior of CIGS-based photovoltaic cells through the optimization of essential parameters such as the thickness and the doping concentration of the typical thin films of ZnO(n)/CdS(n)/ODC/CIGS(p). This study is carried out by using the SCAPS-1D.

The aim of this work, is to study the deep level defects in the absorber part and in the defects layer ODC as well as the surface defects ODC/ZnSe onto the cell performance.

**Keywords:** solar cell, thin film Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>, numerical simulation, SCAPS-1D.

## ملخص

في السياق العام لتنويع استخدام الموارد الطبيعية، والطاقات المتجددة، وخاصة الطاقة الشمسية الكهروضوئية أصبحت أقوى. على هذا النحو، إن تطوير جيل جديد من الخلايا الضوئية المرتكزة على أساس الممتص  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  تبدو واعدة. في الواقع إن أداء هذه الخلايا تجاوز 20٪ في السنوات الأخيرة مع الأخذ بعين الاعتبار بعض شروط التصنيع. إن دراسة سلوك الخصائص الكهربائية للخلايا الكهروضوئية المستندة إلى CIGS يسمح بتحسين المعالم الأساسية مثل سمك وتنشيط الطبقات الهيكلية النموذجية لـ  $\text{ZnO (n)/Cds (n)/ ODC/CIGS}$ . تم إجراء هذه الدراسة بواسطة جهاز محاكاة SCAPS-1D.

في هذه المذكرة قمنا بدراسة تأثير عيوب الطبقة الممتصة CIGS وكذلك طبقة العيوب ODC لنهائي عملنا هذا بدراسة تأثير العيوب بالمساحة الفاصلة بين  $\text{ODC/ZnSe}$

**الكلمات المفتاحية :** الخلايا الشمسية، الطبقات الرقيقة،  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ، SCAPS-1D.