



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen  
Faculté des Sciences  
Département de Physique  
Unité de Recherche  
Matériaux et Energies  
Renouvelables « URMER »



Mémoire pour l'obtention du diplôme de  
Master Physique

Spécialité : Energétique et Energies Renouvelables

**Optimisation Des Paramètres Optoélectroniques De  
Matériaux Photovoltaïque De Deuxième Et Troisième  
Génération A Base De  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  (CIGS)**

Présenté par :

**CHERIFI Mohammed**

Soutenu le 24 juin 2018 devant le jury composé de :

Pr. K. RAHMOUN	Présidente	Université de Tlemcen
Pr. B. BENYOUCEF	Encadreur	Université de Tlemcen
Dr. A.BENOSMANE	Examineur	Université de Tlemcen
Dr. A.CHIALI	Examineur	Université de Tlemcen

**Année Universitaire : 2017- 2018**

## *Remerciements*

Ce travail a été réalisé à l'Université d'Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, faculté des sciences, département de physique, au sein de l'Unité de Recherche Matériaux et Energies renouvelables « URMER ».

Je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur Monsieur Boumediene BENYOUCEF, professeur à l'université de Tlemcen pour son suivi scientifique et ses conseils très enrichissants durant toute la durée de ma mémoire. Qu'il trouve ici l'assurance de ma reconnaissance pour m'avoir guidée judicieusement et pour m'avoir fait bénéficier de sa compétence scientifique.

J'adresse mes sincères remerciements à Madame K. RAHMOUN, professeur à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à Mr A.BENOSMANE et Mr A.CHIALI maitres de conférences à l'université de Tlemcen qui ont accepté d'examiner mon travail.

Ma gratitude va à tous ceux qui ont contribué à ce modeste travail de près ou de loin.

## *Dédicaces*

*Ce travail est dédié à:*

*Mes très chers ma mère et ma femme, pour leurs sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde.*

*Mes frères, ma sœur et leurs familles.*

*Tous mes amis.*

*Tous mes professeurs et collègues.*

Mohammed

## Liste des symboles

$\eta$  : rendement de la cellule.

AM : Air masse.

$\theta$  : angle diffraction.

$I_D$  : Intensité reçue à la surface de la terre.

P : puissance de la photopile.

G : taux de génération.

$\Phi_0$ :Flux des photons incident.

W : épaisseur.

$f_{abs}$  : Fraction des photons absorbés par le semi-conducteur.

$\sigma$ : faisceau Gaussien de rayon.

R : réflectivité à la longueur d'onde d'excitation.

r : la distance par rapport au centre de faisceau.

$I_{opt}$  : courant optimal.

$V_{opt}$  : tension optimale.

$I_{mpp}$  : courant au point de puissance maximale.

$V_{mpp}$  : tension au point de puissance maximale.

$P_{in}$  : Puissance incidente des photons.

$P_m$  : Puissance maximale.

I : Intensité de courant mesurée aux bornes de la cellule.

$I_{cc}$  : courant de court circuit.

$I_m$  : courant maximal.

$I_{ph}$  : Photocourant.

$I_s$  : courant de saturation.

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert.

$V_m$  : Tension maximale.

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule.

k : constante de Boltzman.

q : charge de l'électron.

FF : facteur de forme.

EQE : Rendement quantique externe.

QE : Rendement quantique.

IQE : Rendement quantique interne.

$\phi(\lambda)$  : le flux lumineux incident.

e : charge de l'électron.

E : energie du photon.

h : la constante de Planck.

c : vitesse de la lumière.

$\lambda$  : longueur d'onde.

$SR(\lambda)$  : réponse spectrale.

IPCE: Incident Photon to Current Efficiency.

$A_f$ : la superficie de la face.  
 $A_t$ : aire totale.  
 $\mu$ : Mobilité des charges.  
 $\mu_e$ : Mobilité des électrons.  
 $\mu_h$ : Mobilité des trous.  
 $E_g$ :Energie de gap.  
 $\alpha$ : Coefficient d'absorption.  
 $d$ : Epaisseur d'une couche mince.  
 $T$ : la transmittance.  
 $R$ : coefficient de réflexion.  
 $n_R$ : indice de réfraction.  
 $E_{ph}$ : Energie du photon.  
 $\omega_p$ : fréquence naturelle de résonance.  
 $\lambda_p$ : longueur d'onde de plasma.  
 $e$ : épaisseur de la couche considéré.  
 $\sigma$ : Conductivité électrique.  
 $\rho$ : résistivité électrique.  
 $\mu$ : mobilité des charges.  
 $n$ : densité de porteurs de charges.  
 $R_{Surf}$ : résistance surfacique.  
 $a_0^*$ : rayon de Bohr effectif du matériau.  
 $n_c$ : critère de Mott.  
 $R_s$ : résistance série.  
 $R_{sh}$ : résistance shunt (ou parallèle).  
 $R_p$ : résistance parallèle.  
 $k$ : constante de Boltzmann.  
 $A$ : facteur de qualité de la diode.  
 $T$ : température effective de la cellule.  
 $E$ : ensoleillement dans le plan de la cellule.  
 $N_A$ : densité des accepteurs.  
 $N_D$ : densité des donneurs.  
 $\varepsilon$ : constante diélectrique.  
 $N_c$ : densité effective des états dans la bande de conduction.  
 $N_v$ : densité effective des états dans la bande de valence.  
 $\chi$ : affinité électronique de semiconducteur.  
 $J$ : densité du courant.  
 $J_{SC}$ : Densité du courant de saturation.

## Listes des figures

### Chapitre 1

**Figure I-1 :** Spectre d'émission solaire [3].

**Figure I-2 :** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

**Figure I-3 :** a) Recombinaison SRH ; b) Recombinaison Auger, l'excès d'énergie peut être transféré à un électron (1) ou à un trou (2) ; c) Recombinaison radiative

**Figure I-4 :** Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V) [9].

**Figure I-5 :** Photo d'un substrat de silicium polycristallin (échelle :  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) [13].

**Figure I-6 :** Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin [13].

**Figure I-7 :** Schéma d'une structure tandem [15].

**Figure I-8 :** Principe de la cellule à hétérojonction [16].

**Figure I-9 :** Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque [16].

**Figure I-10 :** Composition d'une cellule photovoltaïque.

**Figure I-11 :** a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée;

b) Plaque de silicium après texturation

**Figure I-12 :** Caractéristique d'un groupement de modules PV en série [9].

**Figure I-13 :** Caractéristique d'un groupement de modules PV en parallèle [9].

**Figure I-14 :** Caractéristique d'un groupement mixte de modules PV [10].

**Figure I-15:** Influence de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V) [23].

**Figure I-16:** Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V) [23].

### Chapitre 2

**Figure II-1 :** Structures du cristal : (a) chalcopyrite et (b) zinc blende.

**Figure II-2 :** Structure chalcopyrite du matériau  $\text{CuIn}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{Se}_2$  [31].

**Figure II-3 :** Variation des paramètres de maille 2a et c du CIGS en couche mince en fonction de la composition x de Ga.

**Figure II-4 :** Structure de bandes d'un composé ternaire I-III-VI de structure chalcopyrite.

**Figure II-5 :** Dépendance en composition des énergies de transition dues à la première bande interdite directe dans l'alliage  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ .

**Figure II-6:** Diagramme de phase pseudo-binaire  $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$  du système Cu-In-Se.

**Figure II-7:** Transmissions optiques des différents absorbeurs [46].

**Figure II-8 :** Evolution du coefficient d'absorption optique de  $\text{CuInSe}_2$  en fonction de l'énergie des photons  $h\nu$  et des écarts à la stœchiométrie.

**Figure II-9 :** Evolution du coefficient d'absorption optique de CISG en fonction de l'énergie des photons  $h\nu$  et des compositions  $[\text{Ga}] / [\text{Ga}+\text{In}]$ .

**Figure II-10 :** Défauts ponctuels dans le réseau cristallin.

**Figure II-11 :** Le rendement quantique en fonction de la longueur d'onde, pour les cellules solaires CIGS en couches minces, pour différentes concentrations de Ga dans l'alliage, avec  $[\text{Ga}] / [\text{In}+\text{Ga}] =$  (a) 0.18, (b) 0.34, (c) 0.78 [37].

**Figure II-12:** Micrographie MEB d'une cellule solaire à base de  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ [50].

### Chapitre 3

**Figure III-1:** Evolution du rendement de différentes cellules solaires au cours des dernières Années (Source : NREL [62]).

**Figure III-2:** Diagramme simplifié de la structure de bandes du ZnO.

**Figure .III-3 :** Spectres de transmission, réflexion et d'absorption d'un échantillon de  $\text{SnO}_2:\text{F}$  de  $1 \mu\text{m}$  d'épaisseur [66].

**Figure III-4 :** Exemple de capteur à CO basé sur une couche mince de  $\text{SnO}_2$

### Chapitre 4

**Figure IV-1 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire. Modèle une diode [53].

**Figure IV-2 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire. Modèle deux diodes [53].

**Figure IV-3 :** schéma bloc d'une cellule PV.

**Figure IV-4 :** Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS.

**Figure IV-5 :** Panneau des bandes d'énergie.

**Figure IV-6 :** Schéma de la cellule solaire à simuler.

**Figure IV-7 :** Caractéristique J-V de la cellule CIGS /CdS/ ZnO.

**Figure IV-8 :** Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V.

**Figure IV-9 :** Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V.

**Figure IV-10 :** Influence de la température sur la caractéristique J-V.

**Figure IV-11:** Influence de la température sur le rendement.

**Figure IV-12 :** Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO sur la caractéristique J-V.

**Figure IV-13 :** Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO sur le rendement.

**Figure IV-14 :** Influence du dopage de la couche de ZnO sur la caractéristique J-V.

**Figure IV-15 :** Influence du dopage de la couche de ZnO sur le rendement.

**Figure IV-16 :** Effet de l'affinité électronique  $\chi_{\text{ZnO}}$  de la cellule inférieure sur les caractéristique J-V.

**Figure IV-17:** Effet de l'affinité électronique  $\chi_{\text{ZnO}}$  de la cellule inférieure sur le rendement.

**Figure IV-18 :** Influence de la mobilité des électrons de la couche de ZnO sur la caractéristique J-V.

**Figure IV-19 :** influence de la mobilité de la couche de ZnO sur le rendement.

**Figure IV-20:** Rendement quantique Externe de la cellule solaire CIGS /CdS/ ZnO.

**Figure IV-21 :** Les résultats de simulation montrant l'effet de l'énergie de gap sur V.

**Figure IV-22 :** Absorption optique.

### Listes des tableaux

**Tableau II-1 :** Energies de gap des composés  $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S, Se})_2$ [44].

**Tableau II-2 :** Rendements théoriques et expérimentaux affichés en laboratoire, pour de petites surfaces, dans le cas des cellules solaires à base de Cu-chalcopyrite [37].

**Tableau IV-1 :** paramètres de chaque couche de la cellule CIGS /CdS/ ZnO.

## Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : généralités sur le photovoltaïque</b>	
<b>I-1- Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I-2- Energie solaire .....</b>	<b>3</b>
<b>I-2-1-La ressource solaire.....</b>	<b>3</b>
<b>I-2-2- Spectre solaire .....</b>	<b>4</b>
<b>I-3-Cellule photovoltaïque.....</b>	<b>5</b>
<b>I-3-1-conversion photovoltaïque.....</b>	<b>5</b>
<b>I-3-2- Principe de fonctionnement.....</b>	<b>6</b>
<b>I-3-3- Absorption optique.....</b>	<b>8</b>
<b>I-3-4- génération des porteurs.....</b>	<b>8</b>
<b>I-3-5- mécanismes de recombinaison.....</b>	<b>9</b>
<b>I-3-6- Paramètres électrique d'une cellule photovoltaïques.....</b>	<b>11</b>
a- Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	11
b- Tension à circuit ouvert $V_{co}$ .....	11
c- Puissance maximale $P_m$ .....	11
d- Facteur de forme FF.....	11
e- Le rendement $\eta$ .....	11
<b>I-3-7- Types de cellules photovoltaïques... ..</b>	<b>12</b>
a- Cellules cristallines .....	12
b- Cellules à base de couches minces.....	13
c- Cellules à haut rendement... ..	14
d- Cellules organique .....	17
e- Cellules solaires sensibilisées par colorant(CSSC)... ..	17
<b>I-3-8- Architecture d'une cellule photovoltaïque... ..</b>	<b>18</b>
a- Texturisation de la surface... ..	18
b- Les contacts face avant et face arrière... ..	19
c- La couche antireflet... ..	19
d- La passivation... ..	19
e- Champ électrique dans la zone arrière(BSF)... ..	20
<b>I-3-9- Association des modules photovoltaïques .....</b>	<b>20</b>
<b>I-3-9-1- Montage en série.....</b>	<b>20</b>
<b>I-3-9-2- Montage en parallèle... ..</b>	<b>21</b>

I-3-9-3-Montage mixte.....	21
I-3-10-Influence de quelques paramètres extérieurs sur le rendement photovoltaïque.....	22
I-3-10-1- Influence de l'éclairement.....	22
I-3-10-2- Influence du température .....	23
I-3-11- Mécanismes de pertes en rendement photovoltaïque ... ..	24
I-3-11-1- Pertes physiques.....	24
I-3-11-2- Pertes technologiques.....	25
I-3-11-2-1- Pertes optiques.....	25
I-3-11-2-2- Pertes électriques.....	26
I-3-12- Générations de cellules solaires.....	27
a- Première génération.....	27
b- Deuxième génération.....	27
c-Troisième génération.....	28
d- Quatrième génération.....	28
I-4- Conclusion.....	29

## Chapitre II : Propriétés fondamentales des matériaux Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>

II.1. Introduction .....	30
II.2. Propriétés fondamentales .....	31
II.2.1. Structure cristallographique. ....	31
II.2.2. Structure de bandes d'énergie.....	33
II.2.3. Diagramme de phase .....	36
II.2.4. Propriétés optiques .....	38
II.2.5. Propriétés électriques.....	41
II-2-6- Le rendement quantique des matériaux CIGS.....	43
II-2-7- Structure d'une cellule solaire à base de .....	
Mo/Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> /CdS/ZnO:Al.....	45
II-2-7-1- Substrat de Verre.....	45
II-2-7-2- Molybdène.....	46
II-2-7-3- Couche absorbante de Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> .....	46
II-2-7-4- Couche tampon de CdS.....	46
II-2-7-5- Oxydes Transparents Conducteurs (OTC) à base de ZnO.....	47
II.3. Conclusion.....	47

## Chapitre III : Les Oxydes transparent conducteurs OTC

III-1- Introduction.....	48
III-2- Enjeu économique.....	48

III-3- Les propriétés des TCO.....	49
III-3-1- Généralités: Qu'est-ce qu'un OTC.....	49
III-3-2- Les propriétés optiques.....	52
III-3-3- Les propriétés électriques.....	53
III-3-4- Les propriétés générales.....	55
III-4- Différents types des oxydes.....	56
III-5- Différents types de défauts dans les OTC.....	56
III-6- Applications des OTC.....	57
a- Capteurs à gaz.....	57
b- Revêtement couches protectrices ou intelligentes.....	57
c- Systèmes optoélectroniques.....	58
d- Cellules solaires.....	58
III-7- Conclusion.....	58

## Chapitre IV : Résultats de Simulation et Discussions

IV-1- Introduction.....	59
IV-2- Modèle électrique d'une cellule solaire.....	60
IV-2-1- Modèle à une diode.....	60
IV-2-2- Modèle à deux diodes.....	62
IV-3- Simulation avec SCAPS-1D d'une cellule solaire à base de CIGS.....	63
IV-3-1-Présentation du logiciel SCAPS-1D.....	63
IV-3-2- Présentation de la cellule CIGS /CdS/CdTe.....	65
IV-3-2-1- Paramètres de la cellule.....	65
IV-3-2-2- Résultats et discussion.....	66
a- Caractéristique J-V.....	66
b- Influence de quelques paramètres sur la caractéristique J-V .....	68
➤ Influence de la résistance série.....	68
➤ Influence de la résistance parallèle (shunt).....	69
➤ Influence de la température.....	70
➤ Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO.....	71

➤ Influence du dopage de la couche de ZnO.....	72
➤ Influence de l'affinité électronique (bande offset) $\chi$ ZnO.....	74
➤ Influence de la mobilité électronique de la couche de ZnO.....	75
c- Rendement quantique Externe de la cellule solaire CIGS /CdS/ ZnO..	76
d- Energie de gap du CIGS.....	77
e- Absorption optique.....	79
<b>IV-4- Conclusion.....</b>	<b>80</b>
<b>Conclusion générales.....</b>	<b>81</b>
<b>Références.....</b>	<b>83</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>88</b>

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Les énergies renouvelables (ENR) sont un atout incontournable pour résoudre les problèmes écologiques et satisfaire les besoins énergétiques en constante augmentation. Parmi les différentes sources d'énergies renouvelables en progrès, l'énergie solaire photovoltaïque, considérée propre et inépuisable, est l'une des plus prometteuses comme l'énergie d'avenir pour remplacer les autres sources d'énergie fossiles et nucléaires.

La production de panneaux solaires efficaces, fiables et rentables qui peuvent être largement utilisés pour remplacer les sources d'énergie fossiles est le principal challenge qui peut encourager l'utilisation de tels dispositifs dans la production de l'électricité solaire à l'échelle industrielle. L'électricité photovoltaïque (PV) est obtenue par la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en électricité au moyen de cellules solaires conventionnelles fonctionnant à base de l'effet photovoltaïque. Malgré son coût trop élevé comparativement aux autres sources d'énergie non renouvelables, l'électricité solaire s'avère très compétitive et une solution idéale dans les sites isolés (non connectés au réseau).

La progression dans le marché photovoltaïque (PV) passe inévitablement par le développement des hautes technologies de production des cellules solaires basées sur l'optimisation du rapport « coût » au « rendement » pour une production de masse à grande échelle. Récemment, les cellules solaires au silicium multicristallin prédominent le marché et présentent près de 50% des modules PV fabriqués dans le monde en raison des faibles coûts de fabrication au niveau de la production de masse combinés à des rendements de conversion relativement élevés ainsi qu'une grande fiabilité. Cependant, le rendement de conversion de ces cellules est limité par un certain nombre de facteurs de pertes comprenant les pertes optiques par réflexions. Ainsi, la fabrication d'une couche antireflet indispensable qui devrait être incluse sur la face avant de la cellule solaire, s'avère comme l'étape la plus importante dans le processus de fabrication des dispositifs solaires au silicium.

Les matériaux candidats potentiels sont : CdTe, Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) et Si amorphe. Pour des raisons de stabilité, du respect de l'environnement et des rendements affichés, les composés CIGS sont les plus émergents et prometteurs. Les rendements atteints actuellement en laboratoire pour des cellules classiques de type ZnO:Al/iZnO/CdS/ Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> /Mo/ Verre, sont très élevés, de l'ordre de 20 %.

## Introduction générale

---

Mais seulement, leur fabrication nécessite l'utilisation d'un matériel très lourd et une couche tampon intermédiaire CdS très polluante pour l'environnement par la présence du cadmium.

Les oxydes transparents et conducteurs (Transparents Conductives Oxides : TCO) sont des matériaux remarquables dans de nombreux domaines. L'existence de leur double propriété, conductivité électrique et transparence dans le visible, fait d'eux des candidats idéaux pour des applications en photovoltaïque et en optoélectronique.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'optimisation des paramètres optoélectroniques de matériaux photovoltaïques de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération.

Ce manuscrit se présente en quatre chapitres de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous allons introduire la notion de l'énergie solaire, la conversion photovoltaïque, le fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque ses paramètres et son architecture, l'influence de quelques paramètres extérieures sur la cellule photovoltaïque, mécanismes de pertes en rendement photovoltaïque et enfin générations de cellules solaires.

Le deuxième chapitre est dédié aux propriétés structurales, optiques et électriques des composés du matériau chalcopyrite  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  (CIGS).

Le troisième chapitre est consacré à une synthèse bibliographique portant sur les propriétés électriques et optiques du TCO, le domaine de son application surtout dans les cellules solaires.

Dans le dernier chapitre, nous décrivons un aperçu sur le logiciel SCAPS, utilisé en simulation numérique. Nous présentons les résultats, avec une discussion et interprétation, de simulation de la structure tandem CIGS /CdS/ZnO.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale et de larges perspectives.

## Chapitre I : généralités sur le photovoltaïque

### I.1 Introduction

L'électricité photovoltaïque est une source incontournable pour l'avenir, et des efforts considérables se réalisent pour rendre cet apport d'énergie plus performant. Ce premier chapitre est consacré à une étude générale pour mettre en évidence la cellule solaire.

### I-2- L'énergie solaire

#### I-2- 1- La ressource solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 microns. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9% dans la bande de ultraviolets (<0.4  $\mu\text{m}$ ).
- 47% dans la bande visible (0.4 à 0.8  $\mu\text{m}$ ).
- 44% dans la bande des infrarouges (> 0.8  $\mu\text{m}$ ).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 kilowatt au mètre carré ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) à plus ou moins 3% selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci.

L'atmosphère en absorbe toute fois une partie de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement ( $1.2 \text{ kW}/\text{m}^2$ ). La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison.

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose donc un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible ; on ne peut ni l'emmagasiner ni le transporter.

Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé et au moment où cette énergie est disponible [1].

### I-2-2- Spectre solaire

Le soleil se comporte comme un corps noir dont la surface est à la température d'environ 5800 K. A la traversée de l'atmosphère, la lumière est absorbée et dispersée en particulier par les composants atmosphériques importants tels que le CO<sub>2</sub> et la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), de sorte que le spectre atteignant la surface de la terre soit atténué et changé dans la forme. Une mesure pour le spectre solaire est l'air Mass (noté AM). Elle est définie comme suit :

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

Où  $\theta$  est l'angle entre le soleil et le zénith. Le spectre standard pour la latitude tempérée est AM1.5 qui correspond à l'angle de 48 du vertical [2].

AM 1.5G donne une irradiance de 970 w/m<sup>2</sup>, mais a été arrondi à 1 kW/m<sup>2</sup>.

L'intensité  $I_D$  reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante :

$$I_D = 1.33(07^{AM})^{0.678} \quad (I.2)$$

Avec  $I_D$  en kW/m<sup>2</sup>

Il est clair, d'après ce qui précède, que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et de proche infrarouge. Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques et de l'altitude du lieu.

La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire: les ensoleillements moyens sur l'année peuvent atteindre 7kW/m<sup>2</sup>/jour dans le nord de l'Australie et au Botswana. En Europe occidentale, la puissance se situe autour de 3kW/m<sup>2</sup>/jour pour les pays comme l'Espagne, à moins de 1KW/m<sup>2</sup>/jour pour le sud de la Suède. La France est soumise à une moyenne annuelle comprise entre 1.5et 3.1kW/m<sup>2</sup>/jour selon les régions [2].

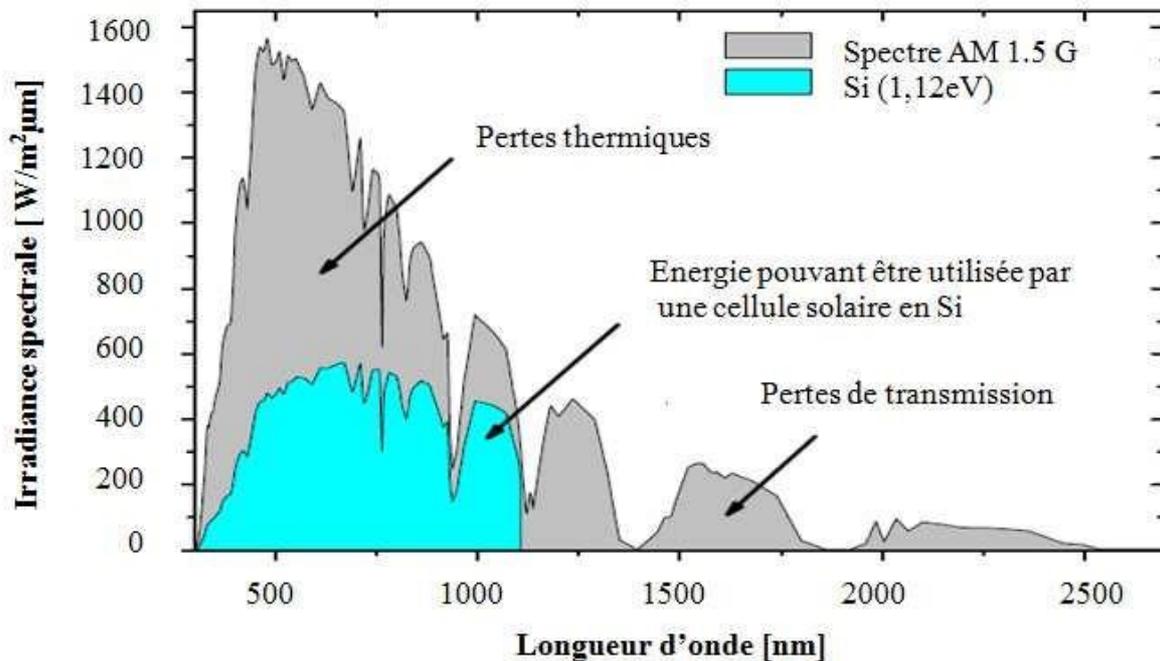


Figure I-1 : Spectre d'émission solaire [3].

### I-3- Cellule photovoltaïque

#### I-3-1- conversion photovoltaïque

La conversion d'une énergie solaire (énergie du photon) en énergie électrique est appelée l'effet photovoltaïque. Ce dernier a été découvert par Antoine Becquerel [1] en 1839 qui mit en évidence l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique, lorsque celle-ci était exposée à la lumière naturelle.

L'énergie photovoltaïque a suscité un intérêt grandissant et de nombreuses avancées technologiques ont été réalisées jusqu'à présente travers à plusieurs filières technologiques. La production d'électricité d'origine photovoltaïque est même accrue de manière exponentielle depuis 2001 et les projections sont assez optimistes pour les années à venir.

# Chapitre I : généralités sur le photovoltaïque

---

La recherche dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque est appelée à surmonter le défi suivant: améliorer le rendement de conversion des cellules solaires tout en diminuant le coût de production de l'énergie propre pour assurer une utilisation très large et la rendre accessible à tous.

Le développement de l'énergie photovoltaïque passe obligatoirement par une recherche accentuée pour résoudre cette énigme. Trois axes essentiels doivent être optimisés séparément par un choix déterminant :

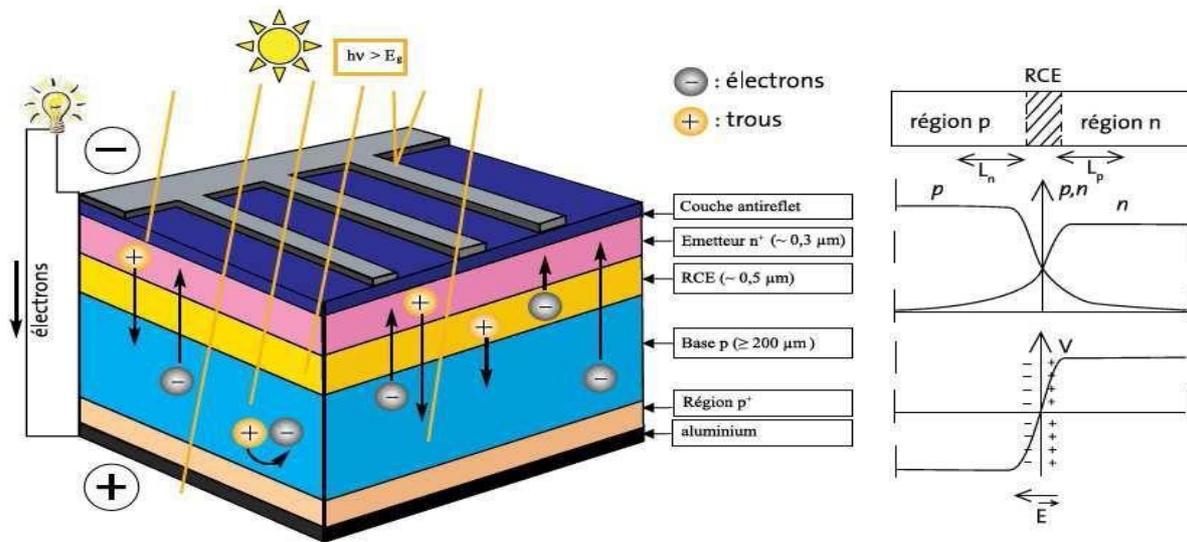
- (i) le matériau,           (ii) la technique de croissance           et (iii) la structure.

En considérant le coût de fabrication, la cellule doit être conçue au moyen de couches minces assurant un gain énorme de matière, ce qui revient à choisir la filière des matériaux photovoltaïques à grand pouvoir d'absorption.

## I-3- 2- Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [4]. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type  $n$  et dopée de type  $p$ . 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. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones  $n$  et  $p$ , une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone  $n$  rejoignent les trous de la zone  $p$  via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figureI-2).

## Chapitre I : généralités sur le photovoltaïque



**Figure I-2** : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Il convient donc de noter que la conversion de l'énergie solaire en électricité est possible si et seulement si trois phénomènes physiques de base ont lieu quasi simultanément :

- l'absorption d'un maximum de photons possible.
- La transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électriques libres.
- La collecte, sans perte, de ces derniers vers un circuit électrique extérieur.

Le premier phénomène est l'absorption optique de photons par un matériau semi-conducteur approprié dans la partie la plus intense du spectre solaire [5] (Fig. (I.1)). Si l'on prend un semi-conducteur à grand gap, l'absorption sera limitée aux petites longueurs d'onde, dans l'ultra-violet, alors que la partie la plus importante du spectre solaire se situe dans le visible et le proche infra-rouge. Pour absorber un maximum de photons, il faudrait donc un semi-conducteur possédant un petit gap. Mais alors la tension de sortie, proportionnelle au gap et donc la puissance de la photopile ( $P = I V$ ), seraient trop faibles pour exploiter cette pile. La valeur optimale du gap du matériau utilisé comme absorbeur se situe vers 1,5 eV.

Le second concerne la séparation rapide des électrons et des trous avant leur recombinaison. Le troisième porte sur l'entraînement des électrons et des trous vers les électrodes collectrices (collecte des porteurs).

## I-3-3- Absorption optique

L'absorption des photons est la première étape nécessaire au processus de conversion photovoltaïque. La plus élémentaire est celle d'un photon d'énergie  $h\nu$  qui excite un électron d'un niveau de basse énergie vers un niveau de plus haute énergie. Ainsi, l'une des propriétés d'un matériau photovoltaïque est son coefficient d'absorption ( $\alpha$ ). L'exploitation du spectre d'absorption permet de calculer toutes les transitions que peut subir un électron et ainsi accéder à la distribution des niveaux énergétiques dans le semi-conducteur. Ce coefficient est donc lié à l'énergie du gap en fonction des énergies des photons incidents, d'après les relations établies par Pankove [6] et qui permettent de déterminer la nature des transitions existantes entre les bandes d'énergies.

Le spectre solaire s'étend de l'ultra-violet à l'infrarouge lointain en passant par le domaine visible. La partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la Terre concerne le domaine du visible (390-780 nm) et du proche infrarouge (Fig. (I.1)).

## I-3-4- Génération des porteurs

Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans un semi-conducteur génèrent des paires électron-trou (on suppose implicitement la création d'un seul pair par photon).

L'expression du taux de génération  $G(\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1})$  dépend de la forme du faisceau et de la surface éclairée, mais son intégrale sur tout le volume de génération donne le nombre total des photons absorbés par seconde.

**Cas (1)** : Dans le cas de génération homogène, par un éclairage monochromatique, sur toute l'épaisseur  $W$  d'un échantillon :

$$G = \frac{\phi_0 f_{abs}}{W} \quad (\text{I.3})$$

$\phi_0$  ( $\text{photons}/\text{cm}^2/\text{s}$ ): Flux des photons incidents;

$f_{abs}$ : Fraction des photons absorbés par le semi-conducteur.

**Cas (2)** : En éclairant une surface  $S$  d'un semi-conducteur d'une façon homogène en surface mais pas en profondeur, le taux de génération à une dimension s'écrit [26] :

$$G(z) = \alpha \frac{I_0}{s} f_{abs} \exp(-\alpha z) \quad (I.4)$$

Avec:  $I_0$ (photons/s): Intensité incidente.

Dans le cas où les photons incidents ne pénétreraient pas jusqu'à la surface arrière de l'échantillon, on peut écrire :

$$f_{abs} = 1 - R \quad (I.5)$$

Où  $R$  est la réflectivité à la longueur d'onde d'excitation.

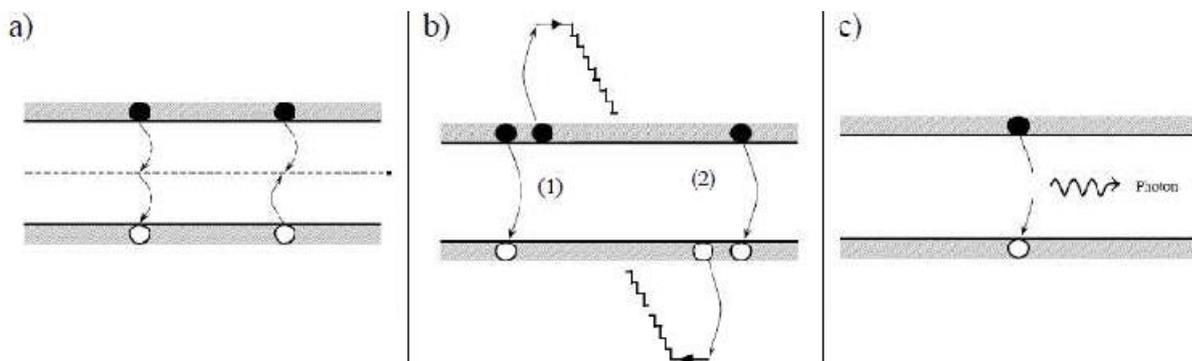
**Cas (3)** : Dans le cas d'un faisceau Gaussien de rayon  $\sigma$ , le taux de génération à trois dimensions, s'écrit sous la forme [7] :

$$G(r, z) = I_0(1 - R) \frac{\alpha}{2\pi\sigma^2} \exp(-\alpha z) \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] \quad (I.6)$$

Avec :  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  est la distance par rapport au centre de faisceau.

### I-3-5- Mécanismes de recombinaison

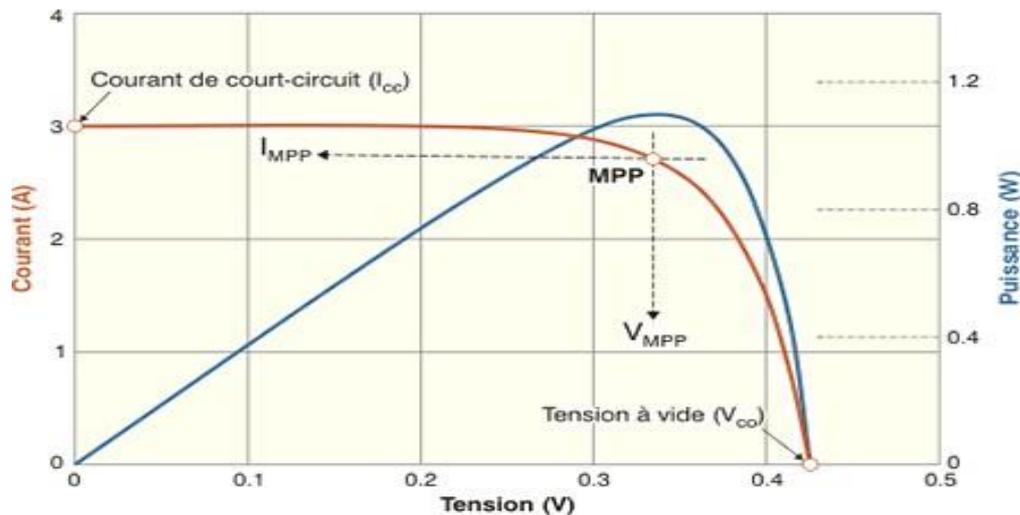
Les principaux mécanismes de recombinaison des porteurs de charge libres dans les semi-conducteurs sont soit les mécanismes de recombinaison via les centres profonds (ou recombinaison Shockley-Read-Hall, SRH) introduits par les défauts cristallins (ponctuels, linéaires, 2D et 3D) et les atomes impurétés (en insertion ou en substitution), soit les recombinaisons radiatives ou bande à bande, soit les recombinaisons Auger (figure I.3 ).[8]



**Figure I-3** : a) Recombinaison SRH ; b) Recombinaison Auger, l'excès d'énergie peut être transféré à un électron (1) ou à un trou (2) ; c) Recombinaison radiative.

## I- 3-6- Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension ( $I-V$ ) qui décrit le fonctionnement de la cellule.



**Figure I-4 :** Représentation conventionnelle de la courbe  $I(V)$  et  $P(V)$  [9].

Les trois grandeurs physiques qui définissent cette courbe sont :

$V_{CO}$  : Tension en circuit ouvert, cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

$I_{CC}$  : Courant court-circuit, cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

Son point de puissance maximal: MPP est obtenu pour une tension et un courant optimaux :  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$  (appelés aussi  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ )[9].

Les paramètres propres à la cellule photovoltaïque ( $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ , FF,  $\eta$ ), extraits de la caractéristique  $I(V)$ , permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

## Chapitre I : généralités sur le photovoltaïque

---

### a- Courant de court-circuit, $I_{cc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

### b- Tension à circuit ouvert, $V_{co}$

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

La tension  $V_{co}$  est donnée par la relation :

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

### c- La puissance maximum, $P_m$

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (I.8)$$

Avec :  $V_m$ : la tension correspondante à la puissance maximale fournie, et  $I_m$ : le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

### d- Facteur de forme, $FF$

La puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement  $P_m$  ( $I_m$  et  $V_m$ ) de la courbe courant-tension. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.9)$$

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme  $FF$  ne peut pas être supérieur à 0.89 du fait de la relation Exponentielle liant courant et tension.

### e- Le rendement $\eta$

Le rendement  $\eta$  des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance.

Il est défini comme étant le rapport entre le rapport maximal délivré par la cellule et la puissance lumineuse incidente [10].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{CC} \cdot V_{CO}}{P_{in}} \quad (I.10)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

### I-3-7- Types de cellules photovoltaïques

#### a- Cellules cristallines

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n.

On distingue deux types de cellules cristallines.

##### ▲ Cellules en silicium polycristallin

Les techniques de production du silicium polycristallin sont beaucoup plus simples que celles du silicium monocristallin, et donc bien moins chères à mettre en œuvre.

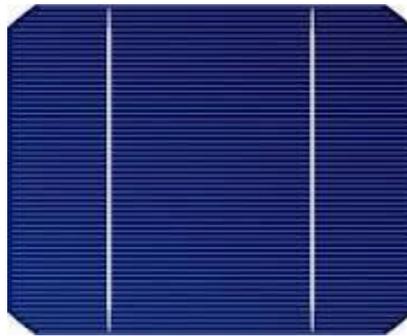
Néanmoins, la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes et un taux assez élevé des impuretés métalliques et autres. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes des grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs. En outre, ces joints de gains bloquent le flux de porteurs et ils constituent une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [13].



**Figure I-5** : Photo d'un substrat de silicium polycristallin (échelle : 10×10 cm<sup>2</sup>) [13].

### ◀ Cellules en silicium monocristallin

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m<sup>2</sup> pour obtenir 1 kilo-Watt-crête(kWc).



**Figure I-6** : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin [13].

### b- Cellules à base de couches minces

#### ◀ Cellules en silicium amorphe

Leurs atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. La désorganisation atomique a d'autres conséquences.

Les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent dénaturer les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si:H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes [14].

### ◀ Cellules CIGS

Les cellules CIGS renferment un absorbant composé de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium. Cette couche de 1 à  $2,5\mu\text{m}$  d'épaisseur étant dopée p, elle doit être recouverte d'un matériau de type n, par exemple du sulfure de cadmium (CdS). Tiens donc, du cadmium... mais sur une épaisseur de seulement 0,04 à  $0,07\mu\text{m}$ , autant dire qu'il est présent en infime quantité. Puisqu'il y a deux semi-conducteurs différents, les cellules CIGS sont elles aussi à hétérojonction.

Comme son homologue au silicium amorphe, la cellule CIGS résiste mieux à l'échauffement que les cellules au silicium cristallin, mais moins bien que les cellules au CdTe. En plus, elle capte un peu mieux la lumière en début et en fin de journée (quelques pour cent), comme toutes les couches minces [14].

### ◀ Cellules CdTe

Le faible rendement des cellules à base de silicium amorphe motive les scientifiques à chercher d'autres alternatives. Le matériau le plus prometteur est le tellure de cadmium (CdTe) qui offre la possibilité de produire des modules à des coûts plus faibles avec un rendement de 10%, et un avantage qui réside dans la forte absorption du tellure de cadmium. Cependant la toxicité du matériau freine le développement de cette technologie [14].

## c- Cellules à haut rendement

### ◀ Cellules à jonction

#### ➤ Cellules tandem

Les cellules tandem sont obtenues à partir de deux cellules simples empilées l'une sur l'autre.

A titre d'exemple nous citons le cas d'une couche mince de silicium amorphe empilée sur une couche silicium cristallin. Ce tandem est censé optimiser le rendement comparé à ce lui produit par des cellules simples seules et ce qu'elles que soient leurs caractéristiques, amorphes, cristallines ou microcristallines.

Il s'agit de l'empilement de deux cellules l'une sur l'autre. Ces deux cellules sont mises en série grâce à une couche de recombinaison des porteurs de charges.

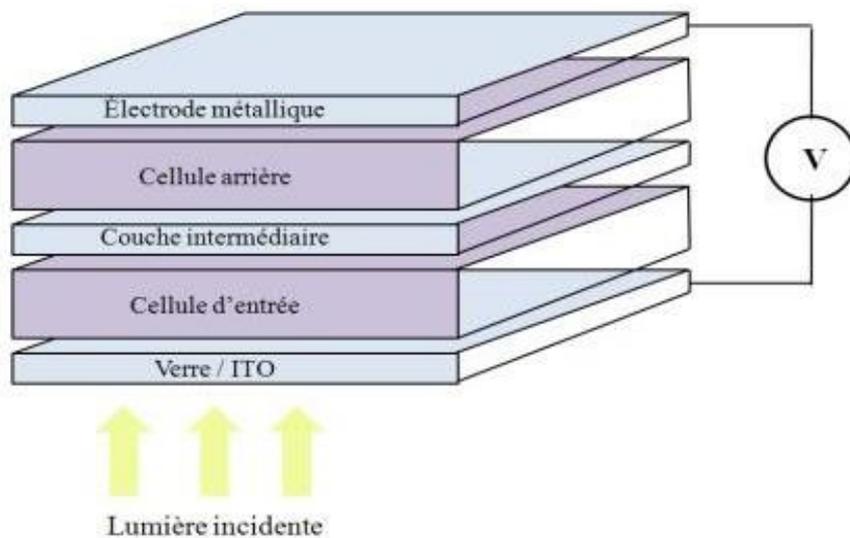
La tension de circuit ouvert du dispositif est donc la somme des tensions de circuit ouvert

## Chapitre I : généralités sur le photovoltaïque

des cellules si elles étaient prises seules, et le courant de court-circuit est le plus faible des deux cellules.

Cette structure offre l'avantage de pouvoir utiliser deux matériaux dont les bandes interdites (Spectres d'absorption) différent. Ce dispositif est capable d'absorber la somme des deux spectres d'absorption. Les couches actives peuvent être composées de mélanges polymère/fullerène ou de petites molécules. On peut par ailleurs utiliser différents types de matériaux dans les deux couches, ce qui donne une grande latitude quant à la fabrication de la cellule.

La première des cellules tandem était par exemple composée d'une couche de petites molécules évaporées pour la première cellule et d'une couche polymère déposée par voie humide pour la seconde. Par la suite, des cellules tandem utilisant différents matériaux ont été testées, jusqu'à atteindre des rendements de 6,7% grâce à l'utilisation d'une couche de recombinaison en TiOx et de deux polymères dont les bandes interdites sont différentes [15].



**Figure I-7** : Schéma d'une structure tandem [15].

### ➤ Cellules multi-jonctions

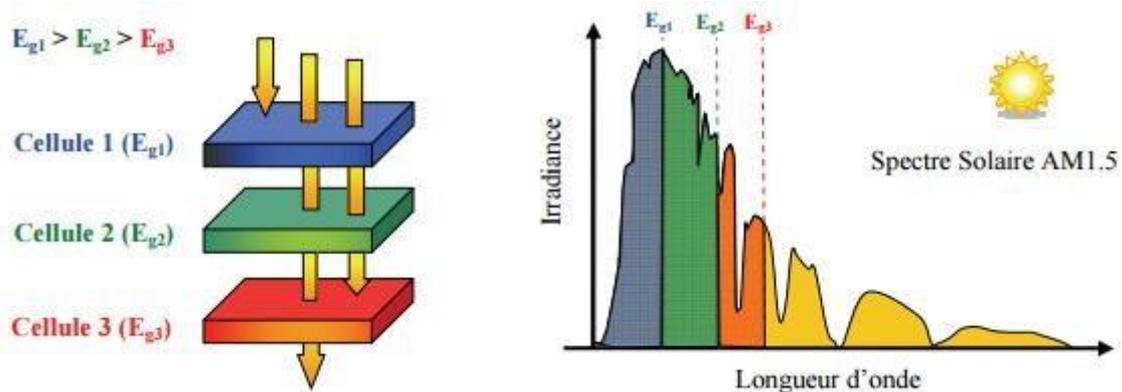
Les cellules multi-jonction sont constituées à partir de différentes couches minces, ce qui optimise le travail d'absorption des calories solaires, puisées plus largement, et ce qui

## Chapitre I : généralités sur le photovoltaïque

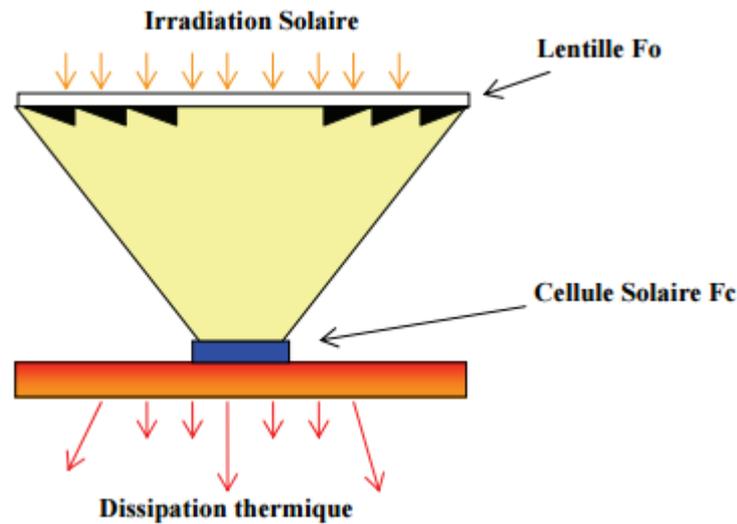
permet un meilleur rendement et une plus grande production. Ce type de cellules n'est pas vendu à des fins commerciales et reste utilisée dans le domaine spatial. Et pour cause, les techniques d'exploitations ont très complexes. On parle de jet moléculaire ou d'épitaxie.

Le fonctionnement de ces cellules réside sur le même principe que celui des cellules Tandem. Les cellules multi-jonction sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs (GaAs, Ge, GaInP<sub>2</sub>...) possédant chacun un spectre limité. En choisissant des matériaux dont les longueurs d'onde limites sont les plus proches possibles les unes des autres, l'ensemble des cellules absorbe un spectre, le plus complet possible donnant à l'ensemble un rendement très élevé pouvant atteindre 50%. Le gros défaut de ces cellules est leur coût de fabrication, car aucune production industrielle n'a encore pu être mise en place.

Ces cellules limitent les pertes d'énergie car il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Figure 8). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants[16].



En utilisant des concentrateurs solaires, certains pensent pouvoir baisser les prix (moins de surface de cellule utilisée) et prendre une place dans le marché conventionnel terrestre. Ainsi, si on compare le meilleur rendement sans concentrateur d'une triple jonction GaInP/GaAs/Ge atteignant les 32%, cette même cellule arriverait à 40.7% avec concentrateur. On peut même envisager des rendements encore plus importants avec des cellules complexes de 4 à 6 jonctions voir plus [16].



**Figure I-9** : Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque [16].

### d- Cellules organiques

Face à la technologie utilisant les matériaux inorganiques, les cellules solaires à base de composés organiques connaissent un développement considérable. L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent beaucoup d'avantages : la possibilité d'être déposée en grande surface, la facilité de fabrication et de manipulation, la possibilité de réaliser ces cellules sur des substrats flexibles, et grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. Elles possèdent en revanche à l'heure actuelle des durées de vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques, et des rendements de conversion plus faibles [17].

### e- Cellules solaires sensibilisées par colorant (CSSC)

Inspiré par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 90 des cellules solaires composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié est de 10,4% pour une cellule de 1 cm<sup>2</sup>, réalisé par la société Sharp [18].

## I-3-8- Architecture de la cellule photovoltaïque

Les premières cellules étaient constituées seulement d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Mais leur architecture a ensuite évolué. En effet, trois grandes avancées technologiques ont permis l'augmentation de leur rendement. Il s'agit de la texturation de surface, l'usage d'une couche antireflet et le champ de contact arrière.

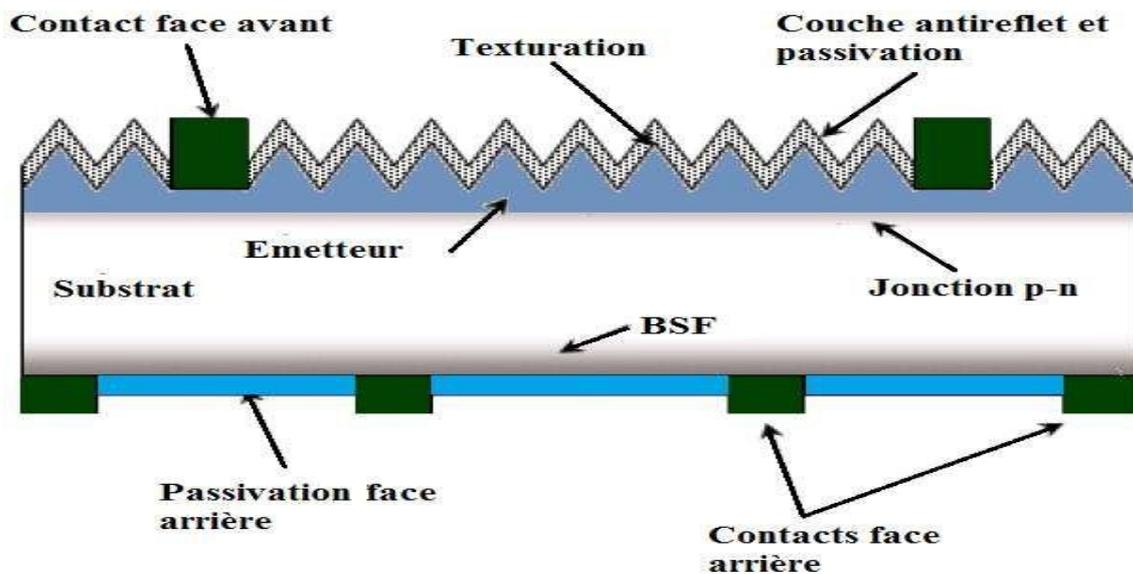
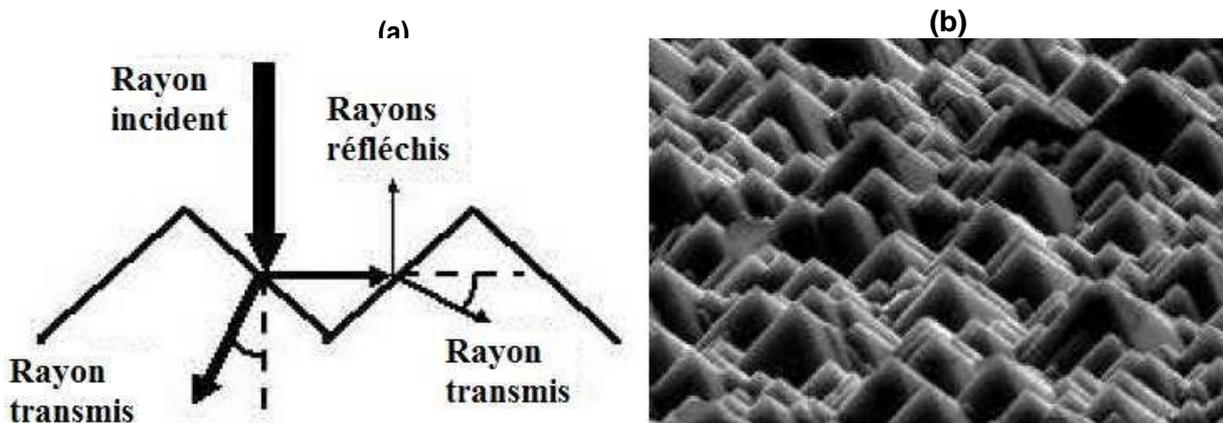


Figure I-10: Composition d'une cellule photovoltaïque.

### a- Texturation de la surface

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 40% à moins de 10% [19].



**Figure I-11 :** a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée;  
b) Plaque de silicium après texturation.

### b- Les contacts face avant et face arrière

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photogénérés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts, c'est à dire entraînant une forte résistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré.

### c- La couche antireflet

La texturisation de la surface de la cellule permet de limiter les réflexions face avant. Pour réduire encore plus la réflexion, une couche antireflet (CAR) est ajoutée.

L'indice et l'épaisseur de cette couche sont ajustés pour obtenir une lame quarte d'onde, l'objectif étant de minimiser le coefficient de réflexion de la cellule en créant des interférences destructives.

### d- La passivation

La surface des cellules est une source de recombinaison importante à cause des nombreux défauts cristallins présents liés à la discontinuité du cristal. La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume du substrat, en neutralisant les sites actifs. Des matériaux tels que le SiN, le SiO et le SiN<sub>x</sub>O<sub>y</sub> permettent de passiver une grande partie de ces défauts puisqu'il combine deux effets de passivation : Passivation par neutralisation des défauts d'interface et passivation par effet de champ dont.

### e- Champ électrique dans la zone arrière(BSF)

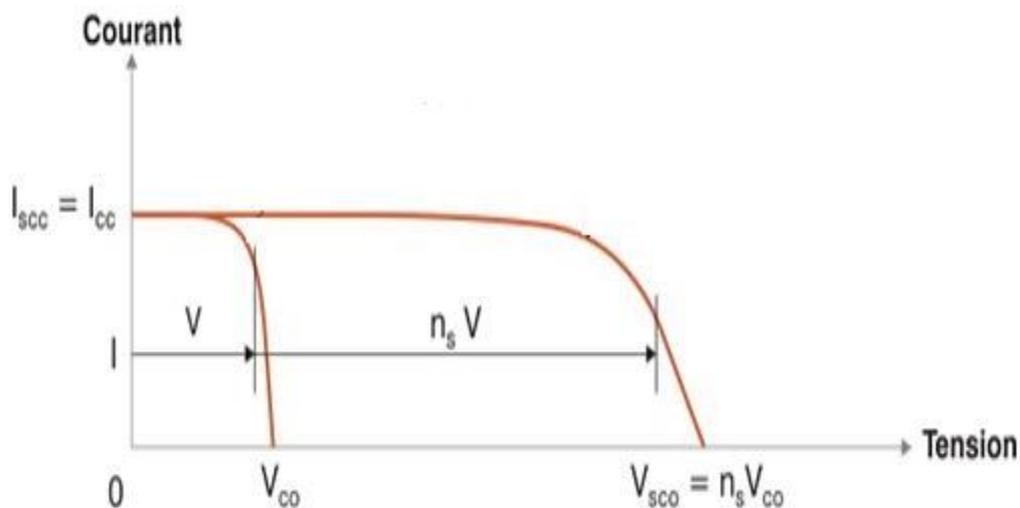
Afin de collecter les paires électron-trou créés par les radiations de grandes longueurs d'ondes du spectre solaire, on réalise un champ électrique par transition abrupte de dopage, sur la face arrière de la cellule solaire, dans la zone même du contact ohmique. Ce champ électrique arrière s'appelle BSF (Back Surface Field). Les porteurs excédentaires ainsi créés au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombiner, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent au photocourant dans la mesure où la longueur de diffusion de ses porteurs de charge est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule [20].

### I-3-9- Association des modules photovoltaïques

Dans la pratique les cellules solaires ne sont pas utilisées seules. Regroupées et liés électriquement entre elles, elles forment un module photovoltaïque. Ce module à son tour, regrouper et lié électriquement avec d'autres modules, ils forment un générateurs photovoltaïque. Ces modules peuvent être associés d'une des manières suivantes :

#### I- 3-9-1- Montage en série

Dans un montage en série les tensions s'additionnent et le courant traversant les modules reste identique. Lorsque les panneaux sont montés en série, l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau le moins performant de la série. Ainsi, si une ombre apparaît sur un des panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible.

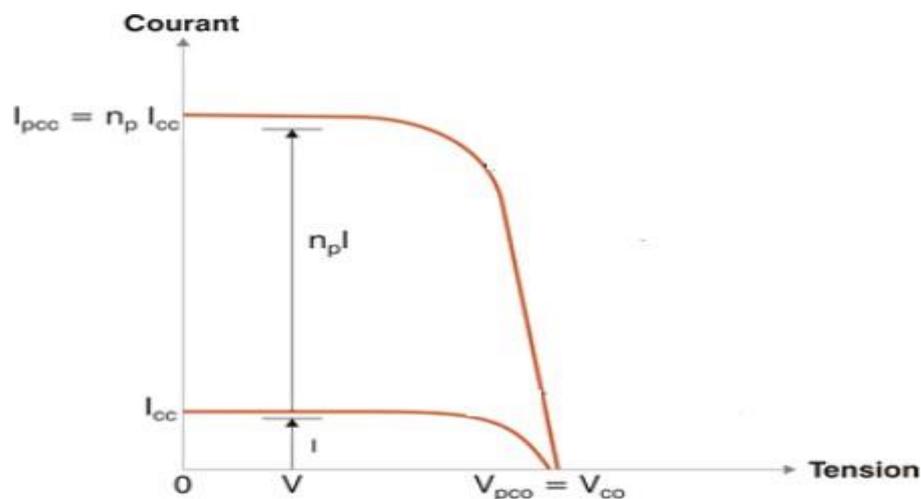


**Figure I-12 :** Caractéristique d'un groupement de modules PV en série [9].

### I-3-9-2- Montage en parallèle

Une association parallèle de  $n$  modules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur.

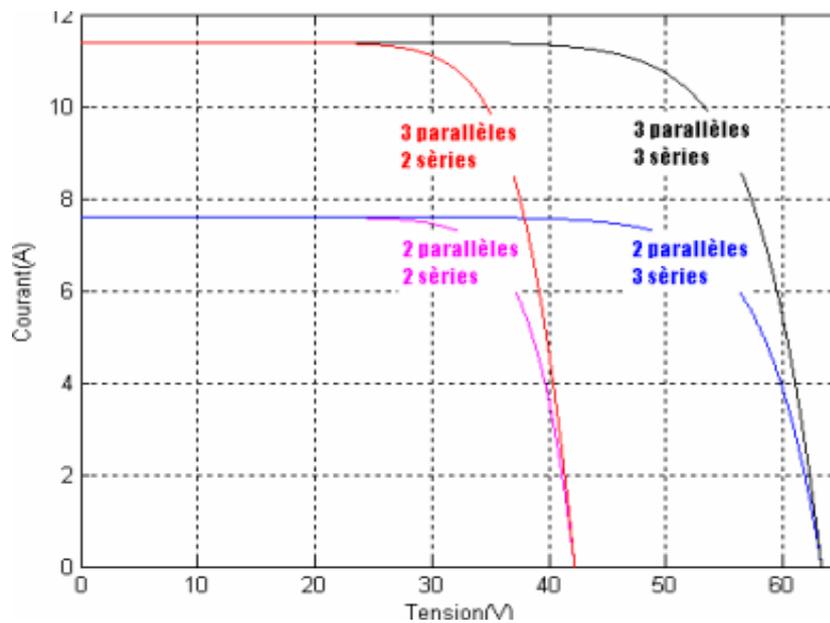
Dans un groupement de modules identiques connectés en parallèle, les modules sont soumis à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, figure I-12 résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $n$  modules [21].



**Figure I-13** : Caractéristique d'un groupement de modules PV en parallèle [9].

### I-3-9-3- Montage mixte : (série + parallèle)

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et démontrer les panneaux engrangés de panneaux série et parallèle, afin de former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [10].



**Figure I-14 :** Caractéristique d'un groupement mixte de modules PV [10].

### 3-10- Influence des paramètres externes sur la caractéristique de la cellule PV

#### I- 3-10-1- Influence de l'éclairement

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique  $I=f(V)$  suivant l'axe des courants.

L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [22].

L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I(V)$  et  $P(V)$  de la cellule solaire est représentée sur la figure (I-14), pour une température fixe  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

# Chapitre I : généralités sur le photovoltaïque

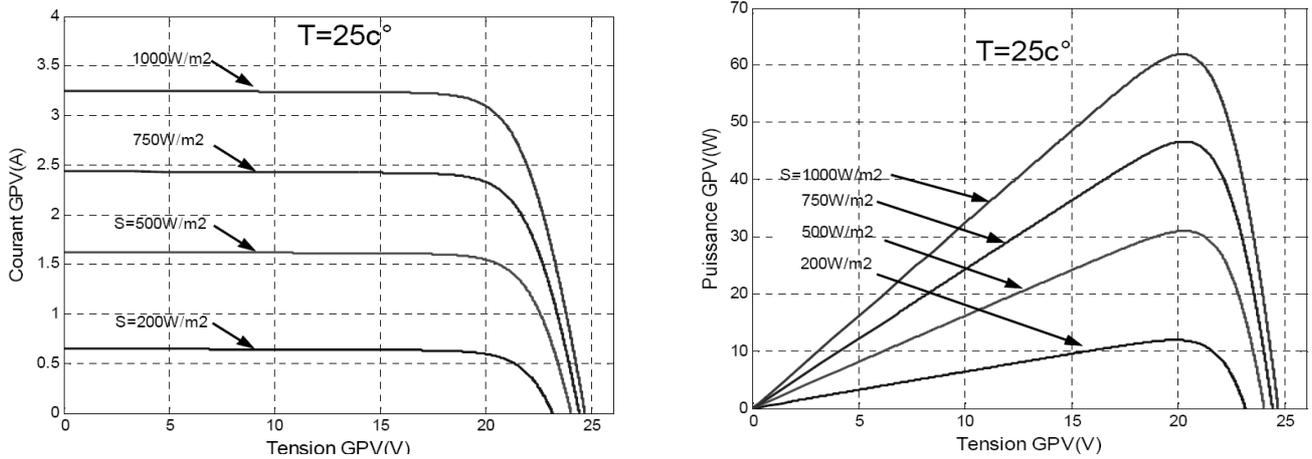


Figure I-15: Influence de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V) [23].

## I-3-10-2- Influence de la température

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant-tension d'un semi-conducteur. Pour une température qui change, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier varie très légèrement [23].

L'influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V de la cellule solaire est représentée sur la figure (I-16), pour un éclairement fixe  $E = 1000\text{W/m}^2$ .

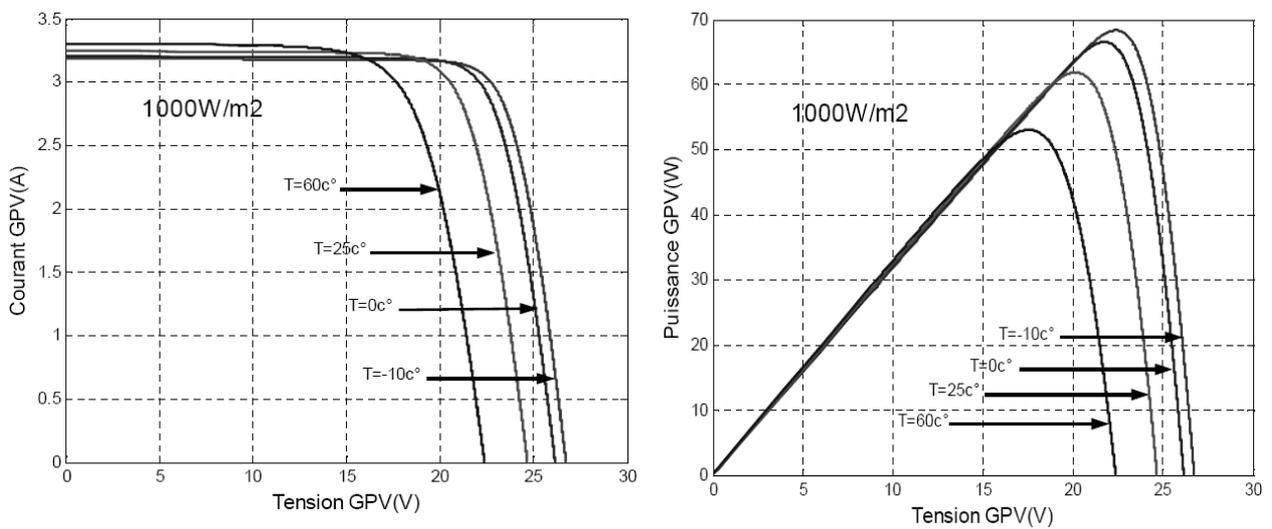


Figure I-16: Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V) [23].

## I-3-11- Mécanismes de pertes en rendement photovoltaïque

Dans le cas idéal, le rendement de conversion d'une cellule solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie  $P_m$  sur la puissance solaire incidente  $P_i$ . Cependant, ce rendement est influencé par différentes pertes qui sont soit d'ordre physique (dues à la nature du matériau), soit d'ordre technologique (dues à la technologie utilisée).

$$\eta = P_m/P_i \tag{I.11}$$

L'équation (11) peut être réécrite comme suit:

$$\eta = (J_{cc}V_{co}FF)/\int_0^\infty P(\lambda)d\lambda \tag{I.12}$$

Le rendement de conversion photovoltaïque peut être exprimé en tenant compte des facteurs de pertes par la formule suivante [24] :

$$\eta = \underbrace{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda)d\lambda}_{(1)} \cdot \underbrace{\frac{E_g}{\int_0^\infty P(\lambda)d\lambda}}_{(2)} \cdot \underbrace{\frac{qV_{co}}{E_g}}_{(3)} \cdot \underbrace{FF}_{(4)} \cdot \underbrace{(1 - R)}_{(5)} \cdot \underbrace{\frac{A_f}{A_t}}_{(6)} \cdot \underbrace{\eta_d}_{(7)} \cdot \underbrace{\eta_{col}}_{(8)} \tag{I.13}$$

Certains facteurs ont des limites fondamentales sur lesquelles on ne peut pas intervenir. D'autres facteurs sont d'ordre technologique et peuvent être optimisés.

### I-3-11-1- Pertes physiques

- **(1) Pertes par les photons de grande longueur d'onde**

Les photons possédant une énergie inférieure à  $E_g$  ne peuvent pas contribuer à la génération de paires électron/trou et sont donc perdus [14]. Sous éclairement AM 1.5, ces pertes sont estimées à 23% dans le cas du silicium[25].

- **(2) Pertes dues à l'énergie excédentaires des photons**

L'énergie excédentaire des photons absorbés est dissipée sous forme de chaleur (thermalisation), elle est donc perdue pour la conversion. Sous un éclairement AM1.5, ces pertes sont estimées à 33% de la puissance totale dans le cas du silicium [25].

- **(3) Facteur de tension ( $qV_{co}/E_g$ )**

Le facteur de tension est le rapport de la tension maximale développée par la cellule ( $V_{co}$ ) par la tension de gap ( $E_g/q$ ).

A cause des recombinaisons Auger inévitables,  $V_{co}$  ne pourra dépasser 0.65 V pour les cellules solaires au silicium massif, elle pourrait atteindre 0.72 V pour une cellule d'une épaisseur 20  $\mu\text{m}$  [26].

- **(4) Facteur de forme (FF)**

La caractéristique courant-tension I-V d'une cellule solaire ne peut avoir une forme rectangulaire puisqu'elle est représentée par les équations de Boltzmann (suivant une forme exponentielle). Le facteur de forme d'une cellule solaire idéale est estimé à 0.89 [24]. Le facteur de forme est limité dans la plupart des cas par des pertes par résistances série et parallèle.

Le rendement de conversion est donc limité par ces différentes pertes physiques à une valeur théorique maximale de 29% [27]. En pratique, cette valeur est diminuée par des pertes technologiques qui sont potentiellement évitables par l'adaptation de technologies avancées aux processus de fabrication des cellules solaires.

### **I-3-11-2- Pertes technologiques**

Les pertes technologiques les plus importantes sont occasionnées principalement par des facteurs optiques et électriques incluant les facteurs résistifs et de recombinaison [28].

#### **I-3-11-2-1-Pertes optiques**

- **(5) Pertes par réflexion**

Les pertes par réflectivité sont évaluées à 35% dans les cellules solaires au silicium [29]. Ce problème technologique peut être résolu par une texturisation adéquate de la surface avant suivie d'un dépôt de couche antireflet.

- **(6) Pertes dues à l'ombrage des métallisations de contact  $A_f/A_t$**

Les contacts métalliques de la face avant sont opaques et provoquent un ombrage proportionnel à la surface de l'électrode. Il s'agit d'une limite technologique engendrée par le taux de couverture donné par :  $1 - A_f/A_t$  où  $A_f$  étant la superficie de la face avant non couverte par le contact métallique et  $A_t$  l'aire totale [24].

## Chapitre I : généralités sur le photovoltaïque

---

Dans la cellule solaire standard, le taux de couverture est un compromis entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur par les contacts (nécessité de métallisations fines) et les pertes causées par résistance série (nécessité de métallisations larges). Dans le cas des cellules solaires à contacts arrière, les contacts métalliques sont localisés sur la face arrière, il en résulte  $A_f/A_t=1$  et donc un taux d'ombrage nul.

- **(7) Pertes dues à l'absorption incomplète des photons**

Des photons ayant l'énergie nécessaire traversent le matériau sans être absorbés à cause de l'épaisseur limitée de la cellule. L'absorption peut être augmentée par des techniques de "piégeage par réflexion" sur la face arrière de la cellule [24].

### I-3-11-2-2- Pertes électriques

Dans les cellules solaires, les pertes électriques sont provoquées essentiellement par la résistivité des contacts ohmiques et par recombinaison [30].

- **(8) Pertes par recombinaison/ rendement de collecte**

Les porteurs photogénérés ne sont pas tous collectés. Certains se recombinent dans le volume ou à la surface de la cellule avant d'atteindre la jonction. Le rendement de collecte est défini comme le rapport entre le nombre de porteurs collectés et le nombre total de porteurs photogénérés. Ces mécanismes de pertes sont notamment [30]:

- i. Pertes par recombinaison des porteurs dans l'émetteur et la base de la cellule solaire via les défauts, impuretés ou joints de grains.
- ii. Pertes par recombinaison surfacique en face avant.
- iii. Pertes par recombinaison surfacique en face arrière.
- iv. Pertes par recombinaison volumique Shockley-Read-Hall(SRH).

- **(9) Pertes résistives des contacts**

- i. Pertes par résistance série dans la grille métallique et dans le busbar.
- ii. Pertes par résistance de contact aux interfaces métal-semi-conducteur.
- iii. Pertes par résistance série dans la métallisation arrière.
- iv. Pertes résistives dues aux courts-circuits entre les électrodes positives et négatives de la cellule.

### I-3-12- Générations de cellules solaires

Les cellules solaires sont classées en trois générations à base de l'ordre de leur importance. Des recherches sont menées sur l'ensemble des trois générations en même temps pour améliorer leur efficacité, tandis que les cellules solaires de première génération constituent la plus grande part de la production commerciale à propos de 89,7% en 2007.

#### a- Première génération

Elles sont à grande surface, à haute qualité et des dispositifs formés des cellules solaires simple jonction de la première génération. La réduction des coûts de production de cette technologie est annulée en raison des coûts de main-d'œuvre élevée, et les coûts des matériaux surtout pour le silicium. Cette tendance se poursuit tant que l'industrie photovoltaïque est en expansion. Bien qu'il dispose d'une large partie d'absorption spectrale, les photons de haute énergie à la fin du bleu et violet du spectre sont gaspillés sous forme de chaleur [31].

La production de cellules solaires à haut rendement avec une efficacité énergétique de conversion élevée sont ainsi favorisées à condition de ne pas augmenter la complexité de la cellule solaire. La limite théorique de l'efficacité des cellules solaires à simples jonction de silicium est de 33%.

#### b- Deuxième génération

Pour résoudre ces problèmes de besoins énergétiques et les coûts de production des cellules solaires, nous présentons la *deuxième génération*. La technologie des piles en couche mince a été imminente. Une réduction importante des coûts des matériaux est possible dans cette technologie. Ils ont aussi l'avantage d'augmenter la taille de l'unité.

Au fil du temps, les cellules solaires de deuxième génération sont attendues pour combler le fossé entre eux et les cellules de première génération par rapport au rendement de conversion énergétique. Avec l'augmentation de la dominance de cette technologie, le coût des matériaux constitutifs augmente également pour le couvercle supérieur et d'autres encapsulations pour lui donner une plus longue durée de vie. Les matériaux généralement utilisés dans la technologie en couche mince sont principalement le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre et d'indium  $\text{CuInSe}_2$  (CIS), le diséléniure de cuivre d'indium

et de gallium Cu(InGa)Se<sub>2</sub> (CIGS). Ces matériaux réduisent la masse, et par conséquent le coût de substrat formant le support pour le verre et la céramique. Non seulement ils réduisent les coûts mais également promettent une très haute efficacité de conversion d'énergie. Ce profile fait une tendance vers le changement de la première génération vers la deuxième génération. Mais la commercialisation de cette technologie s'est avérée être difficile [32].

### **c- Troisième génération**

La recherche pour améliorer les performances des cellules solaires en améliorant son efficacité a conduit à l'élaboration de la troisième génération des cellules solaires [32]. La piètre performance électrique de la technologie en couche mince en maintenant de faibles coûts de production de cette technologie, les technologies de non semi-conducteurs (y compris les cellules à base de polymères).

Le progrès constant de l'évolution de l'industrie photovoltaïque est le résultat de l'augmentation de l'automatisation de la production de cellules solaires à couches minces avec une plus grande efficacité et des coûts réduits. La nécessité des découvertes révolutionnaires dans l'industrie photovoltaïque est parfois interrompue par des progrès dans les matériaux photovoltaïques et les technologies de fabrication pour l'amélioration de la compétitivité des coûts et de l'expansion du marché du photovoltaïque. En brisant les anciennes limites de l'efficacité et du coût en apportant les innovations par l'exploitation de nouvelles compréhensions de la physique et de la science des matériaux deviendront une révolution [33].

### **d- Quatrième génération**

Les cellules photovoltaïques organiques constituent la quatrième génération de cellules solaires, et qui repose sur l'utilisation des matériaux organiques pour leur fabrication, le principe de fonctionnement de ces cellules est différent des cellules inorganiques dont il y a une création d'exciton au lieu de paire électron-trou, leur rendement est d'environ 7 % à l'heure actuelle.

## I- 4- Conclusion

Ce présent chapitre introduit l'énergie photovoltaïque par sa source solaire ; le soleil permet de traiter les notions préliminaires nécessaires pour la compréhension de la photovoltaïque, ainsi nous étudions l'architecture de l'élément essentiel de la photovoltaïque qui est la cellule et les facteurs limitant son rendements. Enfin, nous citons les différentes générations de cellule solaire.

### CHAPITRE II : Propriétés fondamentales des matériaux Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>

#### II.1. Introduction

Les alliages ternaires des composés semi-conducteurs III-V, sont considérés comme une classe importante des matériaux et cela grâce à l'ajustement de leur paramètre du réseau, gap énergétique, indice de réfraction, constantes optiques et d'autres paramètres physiques qui peuvent être ajustés et contrôlés pour l'obtention d'un composant optoélectronique bien désiré.

Les recherches actuelles menées sur les composés Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> révèlent que le matériau Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) est le plus émergent. En couches minces polycristallines, il est pratiquement incontournable en raison des rendements élevés atteints en laboratoire et de la stabilité remarquable qu'il assure dans le temps. Les matériaux Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> se rattachent à la filière de matériaux chalcopyrites. Cette nomination "chalcopyrite" a été attribuée pour la première fois en 1725 par les chercheurs d'Or au CuFeS<sub>2</sub>.

Le premier matériau étudié de cette filière est le Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>. Il a été synthétisé pour la première fois en 1953 par Hahn [34]. Ce n'est qu'en 1974 qu'il a été proposé pour des applications photovoltaïques [35]. C'est dans ces mêmes années 70, qu'un premier examen complet sur ces composés a été donné par Shay et Wernick [28]. Plus tard, Pamplin a édité plusieurs revues au sujet de la thermodynamique des changements de phase [36]. Ces travaux étaient presque entièrement consacrés aux monocristaux. Il a été élaboré sous forme de couches minces poly-cristallines comme couche active en 1983. Les premiers rendements obtenus étaient de l'ordre de 10%, enregistrés par la société Boeing Corp, en utilisant le procédé de la co-évaporation à trois creusets. En 1987, la société *Arco Solar* a donné un rendement de 10.1%. Ce n'est qu'à partir de 1990 que la substitution du Gallium par l'Indium a été réalisée, pour former les composés quaternaires CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> (CIGS) dans le but d'améliorer les rendements de conversion photovoltaïque déjà obtenus. Il a fallu presque dix ans pour que ce résultat soit concrétisé dans la production industrielle des modules solaires.

L'année 1998 marque la date du premier module solaire industrialisé à base de Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> [37].

### II.2. Propriétés fondamentales

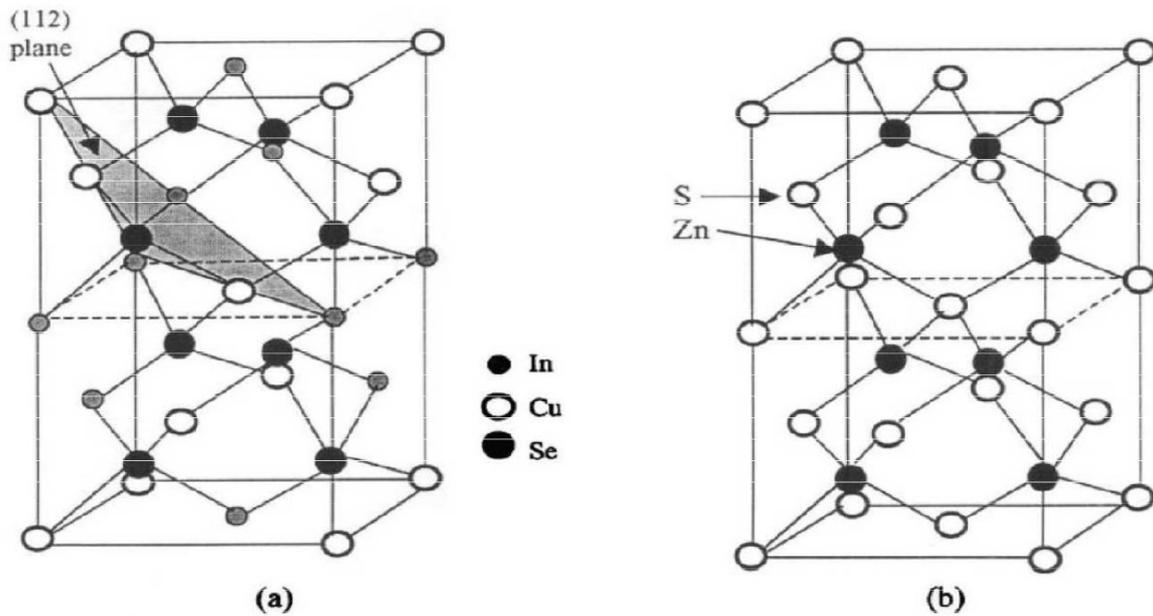
Pour étudier les matériaux Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> et par conséquent les composés Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>, il faut savoir que la substitution du Ga à la place de l'In pour former les composés quaternaires CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> ne change pas de façon dramatique les paramètres du matériau, car le Ga et l'In sont chimiquement très similaires. Cependant, il y a quelques exceptions à cette règle [38].

#### II.2.1. 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 faces centrées de type zinc-blende avec une distribution aléatoire des cations. La première structure, ordonnée et tétragonale, est caractérisée par un arrangement bien ordonné des cations. Chaque atome de sélénium est lié tétraédriquement à deux atomes de cuivre et deux atomes d'indium, chaque un d'entre eux étant entouré de quatre atomes de sélénium. Deux plans spécifiques, respectivement de cuivre et d'indium peuvent être ainsi bien identifiés. La sphalérite, à l'opposé, se caractérise par un arrangement aléatoire. Il a été montré expérimentalement que la structure chalcopyrite est plus intéressante pour la conversion photovoltaïque. 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 [37]. Les deux formes allotropiques sont représentées sur la figure (II.1). La structure du CuInSe<sub>2</sub> est obtenue à partir de la structure cubique zinc blende du matériau II-VI tel que ZnSe en remplaçant les atomes de zinc alternativement par Cu et In. La figure (II.2) présente la structure chalcopyrite pour l'alliage CuIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Se<sub>2</sub> pour  $x = 0.25$  [39].

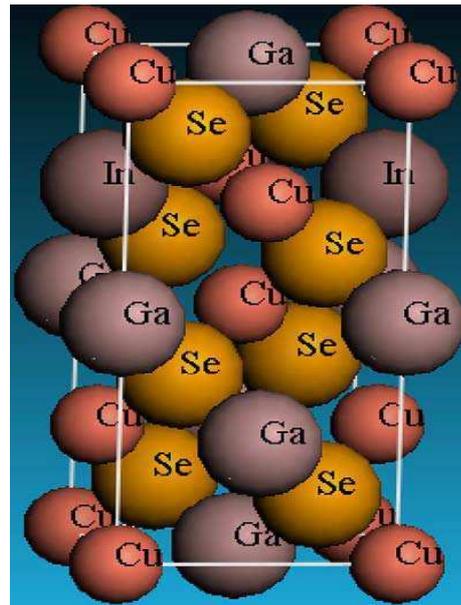
L'identification de la structure cristallographique est déterminée à travers l'étude de la diffraction des rayons X. Jaffee et al. [40] ont classifié les raies de diffraction en trois groupes:

- (i) **Groupe 1** : les raies sont caractérisées par les indices de Miller  $(h, \ell / 2)$  tous pair ou tous impairs. Cet ensemble de raies est observable pour la chalcopyrite et la sphalérite.
- (ii) **Groupe 2** : les indices de Miller correspondants sont de la forme  $(h, k)$  pairs et  $(\ell / 2)$  impair ou l'inverse.
- (iii) **Groupe 3** : spécifique de la structure chalcopyrite et d'intensité faible. De ce fait, il faut que la quantité de matière étudiée soit assez importante. Les indices de Miller de la forme  $h$  pair et  $(k, \ell)$  impairs ou  $k$  pair et  $(h, \ell)$  impairs.



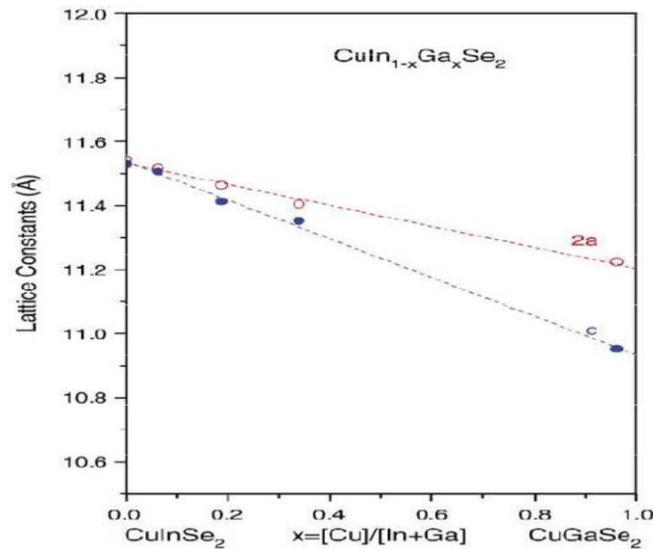
**Figure II-1** : Structures du cristal : (a) chalcopyrite et (b) zinc blende.

**Figure II-2**: Structure chalcopyrite du matériau  $\text{CuIn}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{Se}_2$  [31].



Plusieurs éléments peuvent être incorporés dans le système  $\text{CuInSe}_2$ , en tant qu'atomes substitutionnels isovalents et non-isovalents. C'est l'un des moyens pour 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  $\text{CuInSe}_2$  est le Gallium.

La figure (II.3) 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.



**Figure II-3 :** Variation des paramètres de maille  $2a$  et  $c$  du CIGS en couche mince en fonction de la composition  $x$  de Ga.

### II.2.2. Structure de bande d'énergie

La structure de bande d'énergie de CuInSe<sub>2</sub> et des composés I – III – VI<sub>2</sub> représentés par la formule ABX<sub>2</sub>, se distingue de celle de ZnSe et des analogues binaires II-VI (Formule :CX), par deux points principaux [37] :

La maille élémentaire a une structure plus complexe avec moins d'éléments de symétrie que ses homologues II-VI, avec en particulier une distorsion des tétraèdres.

L'intervention des orbitales « d » du cuivre dans les liaisons hybrides avec des états « s » et « p » du sélénium.

Les ternaires chalcopyrites sont donc obtenus en remplaçant le cation X du binaire CX de la structure zinc-blende par les cations A et B. Ceci permet d'associer à chaque ternaire un binaire bien spécifique, l'analogue de CuInSe<sub>2</sub> étant le Zn<sub>2</sub>Cd<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>.

La maille primitive dans le matériau chalcopyrite ( $c/a=2$ ) est deux fois plus grande que celle du matériau zinc-blende puisque alternativement le cuivre et l'indium vont occuper les sites cubiques à faces centrées de la structure zinc-blende.

Par conséquent, la première zone de Brillouin de la chalcopyrite est quatre fois plus petite que la première zone de Brillouin de la zinc-blende.

Dans la structure chalcopyrite, les sites des atomes n'ont pratiquement pas changé par rapport aux sites des atomes de la structure zinc-blende. Cependant, Jaffe et Zunger [40] ont calculé la structure électronique de six composés ternaire est chalcopyrites : CuInSe<sub>2</sub>, CuAlS<sub>2</sub>, CuGaSe<sub>2</sub>, CuInS<sub>2</sub>, CuGaS<sub>2</sub> et CuAlSe<sub>2</sub>, et ont montré que la structure chalcopyrite diffère de la structure zinc-blende par trois aspects :

Les deux types de cations permettent d'avoir deux types de liaisons chimiques entre les premiers proches voisins, car l'anion adopte en général une position d'équilibre plus proche d'une paire que de l'autre, d'où deux distances interatomiques différentes ( $Re_{Cu-Se} \neq Re_{Ga-Se}$ ).

La maille primitive est distordue tétraгонаlement avec un paramètre de distorsion  $\eta=c/2a$  différent de l'unité. En général on a un phénomène de compression et  $\eta < 1$ ,

Le déplacement de l'anion (Se) de sa position idéale ( $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$ ).

Ainsi, dans une structure chalcopyrite, les anions ne sont donc pas exactement situés sur les sites tétraédriques mais décalés d'une quantité  $u$ . Abrahams et Bernstein [41] ont proposé la relation suivante pour le calcul de la quantité  $u$  :

$$u = \frac{1}{2} - \frac{1}{4} (2\eta^2 - 1)^{1/2} \quad (\text{II.1})$$

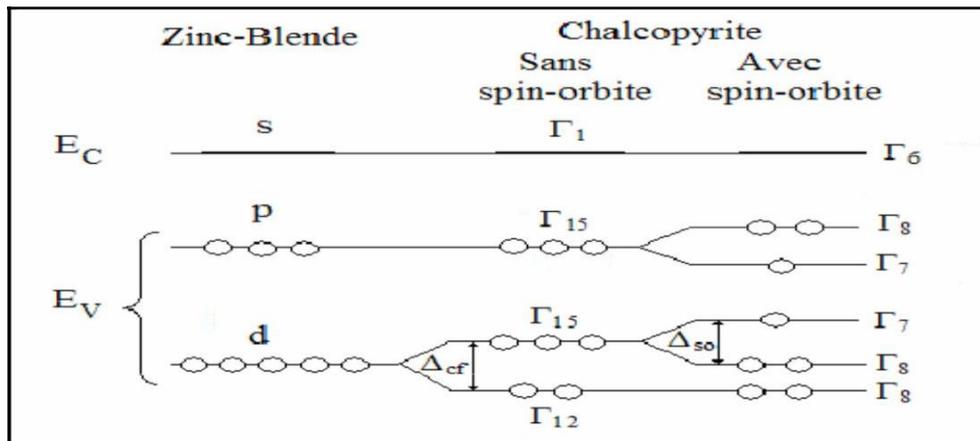
Le calcul des distances interatomiques impliquant cette quantité a été appliquée par Garbato et al. [34]. Chaque cation (A et B) possède quatre anions X comme proches voisins et chaque anion a deux cations A et B proches voisins. Ainsi, l'anion X adopte habituellement une position d'équilibre plus proche d'une paire que l'autre d'où  $R_{AX} \neq R_{BX}$  avec :

$$R_{AX} = a \left( u^2 + \frac{1 + \eta^2}{16} \right)^{1/2} \quad (\text{II.2})$$

$$R_{BX} = a \left[ \left( u - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1 + \eta^2}{16} \right]^{1/2} \quad (\text{II.3})$$

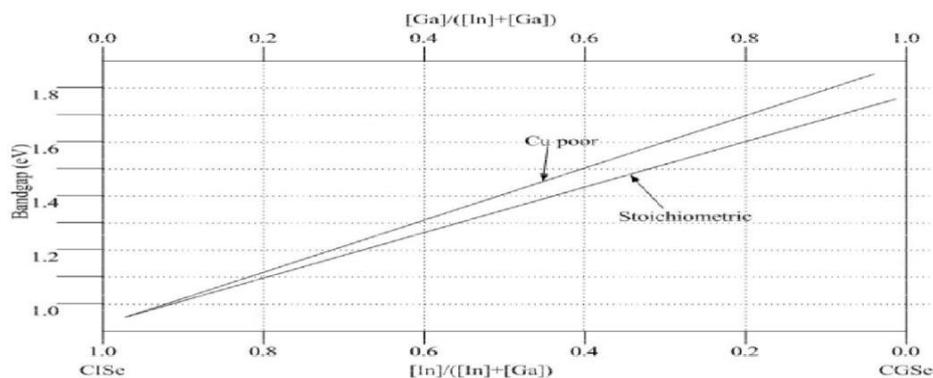
Le modèle de structure établi à partir de cette théorie prévoit trois transitions directes A, B, et C de la bande de valence vers la bande de conduction, provenant de la levée de la dégénérescence dans la bande de valence, due à l'action du champ cristallin ( $\Delta_{cf}$ ) et à l'interaction spin-orbite ( $\Delta_{so}$ ) (Fig. (II.4)).

Une étude de CuInSe faite par électroréflectance avait prévu l'existence de ces trois niveaux et certaines valeurs des énergies de transition ont été obtenues. Une première transition directe permise (A et B) correspond à  $E_g$  variant de 0,98 à 1,04 eV. Dans plusieurs articles [37], il a été fait mention de la seconde transition (C) à des énergies plus élevées, entre 1,17 et 1,22 eV. Ces valeurs correspondent à  $\Delta_{SO} = 0,233$  et  $\Delta_{cf} = 0,06$ . La valeur de  $\Delta_{cf}$  est faible, car la compression tétragonale ( $2-c/a$ ) est également faible.



**Figure II-4 :** Structure de bandes d'un composé ternaire I-III-VI de structure chalcopyrite.

Les matériaux  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  présentent tous un gap énergétique direct, dont la valeur est modifiée par la proportion de gallium dans le composé. L'ajoute de gallium a permis de surmonter l'handicap de la faiblesse de l'énergie de gap du  $\text{CuInSe}_2$  qui limite son absorption optique. Le schéma de la figure (II.5) montre la dépendance en composition des énergies de transition dues à la première bande interdite directe dans l'alliage  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  [42]. Cette variation est stipulée linéaire.



**Figure II-5 :** Dépendance en composition des énergies de transition dues à la première bande interdite directe dans l'alliage  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ .

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. Ainsi, la bande interdite du CIGS peut varier entre les valeurs de ces deux composés. La dépendance de l'énergie de la bande interdite du CIGS en fonction de la concentration est donnée par [43] :

$$E_g^{CIGS}(x) = (1-x)E_g^{CIS} + xE_g^{CGS} - b(1-x) \quad (II.4)$$

Soit :

$$E_g^{CIGS} [eV] \approx 1.01(1-x) + 1.65x - 0.15x(1-x) \quad (II.5)$$

où  $x = [Ga]/[Ga+In]$ , représente la teneur en Gallium du CIGS et  $b$  un facteur de désordre compris entre 0.15 et 0.24 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 dans le tableau (II.1).

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

**Tableau II-1** : Energies de gap des composés Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub>[44].

### II.2.3. Diagramme de phase

Les diagrammes de phases du système ternaire (Cu-In-Se) ont été étudiés par nombreux auteurs. Mais l'attention a été orientée vers le diagramme de phase des composés binaires Cu<sub>2</sub>Se et In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> développé par Stanbery [44], car il y a un intérêt particulier sur les phases

existantes à la température ambiante le long de la ligne d'attache  $\text{Cu}_2\text{Se} - \text{In}_2\text{Se}_3$ . La phase d'équilibre peut être discutée en termes de température et de composition. Le diagramme qui illustre la relation température-composition le long de la ligne pseudo-binaire  $\text{Cu}_2\text{Se} - \text{In}_2\text{Se}_3$  est représenté par la figure (II.6). Lorsque la température induit des changements de compositions, cela mène à un désordre de l'arrangement des cations, les variations de la composition causant la formation de phases secondaires. La phase chalcopyrite du matériau  $\text{CuInSe}_2$  ( $\alpha\text{-CuInSe}_2$ ) existe pour des concentrations atomiques de Cu comprises entre (24 et 24,5) % à la température ambiante (et aux températures situées au dessus de 780 °C). Ainsi, le composé stoechiométrique  $\text{CuInSe}_2$  à l'équilibre est une mixture d'une forte déficience en Cuivre des deux phases  $\alpha\text{-CIS}$  et  $\text{CuSe}_2$ . Le CIS riche en Cuivre est toujours une mixture de ces deux phases. Par contre, dans le cas du CIS déficient en cuivre, d'autres phases existent et suivant l'estimation de Stanbery [44], on retrouve les phases :  $\beta\text{-CIS}$  ( $\text{CuIn}_2\text{Se}_{3,5}$  et  $\text{CuIn}_2\text{Se}_5$ )  $\gamma\text{-CIS}$  ( $\text{CuIn}_5\text{Se}_8$ ) et enfin  $\text{In}_2\text{Se}_3$ .

La phase  $\beta\text{-CIS}$  est appelée aussi quelques fois 'Ordered Vacancy Compound'(OVC) ou 'Ordered Defect compound' (ODC).

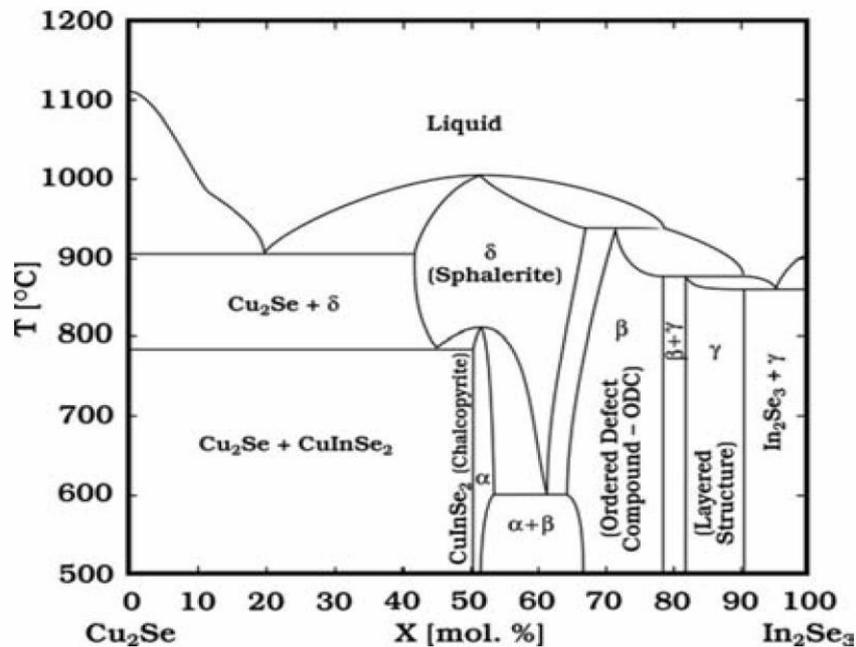


Figure II-6 : Diagramme de phase pseudo-binaire  $\text{Cu}_2\text{Se} - \text{In}_2\text{Se}_3$  du système Cu-In-Se.

### II.2.4. Propriétés optiques

Une absorption maximale 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 peuvent être utilisés comme de bons absorbeurs pour réaliser des cellules solaires et par conséquent obtenir des rendements élevés avec une épaisseur de 2 à 3  $\mu\text{m}$ . Ce coefficient d'absorption a été calculé à partir de l'équation [45] :

$$\alpha = \left(\frac{1}{d}\right) \ln \left[ \frac{(1-R^2)}{2T} + \left[ \frac{(1-R^2)^4}{4T^2} + R^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{II.6})$$

$$R = \frac{(n_R - 1)^2}{(n_R + 1)^2} \quad (\text{II.7})$$

où  $d$  est l'épaisseur,  $T$  est la transmittance,  $R$  est le coefficient de réflexion et  $n_R$  est l'indice de réfraction, il est égal à 2.8 pour la CuInSe<sub>2</sub> [37].

Le coefficient d'absorption est lié à l'énergie du gap et aux énergies des photons incidents, selon les relations établies par Pankove[46] qui permettent de déterminer

la nature des transitions qui peuvent exister entre les bandes d'énergie, suivant une loi en puissance de la forme :

$$\alpha = \frac{A}{h\nu} (h\nu - E_g)^\beta \quad (\text{II.8})$$

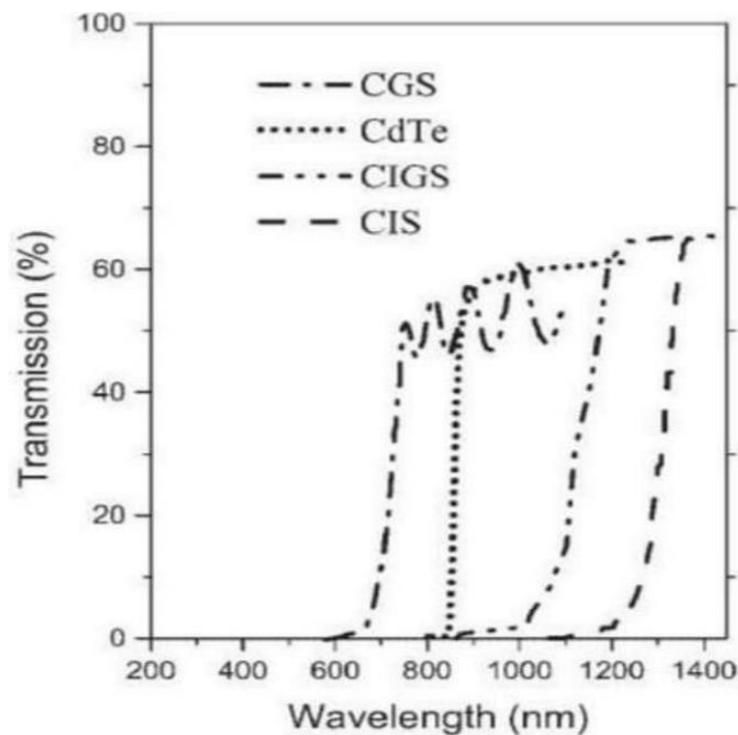
Où  $E_g$  est l'énergie de la bande interdite.  $A$  est une constante,  $h$  la constante de Planck, et  $\beta = 1/2, 3/2$  et  $2$ , respectivement pour une transition directe permise, une transition directe interdite et une transition indirecte permise. Dans le cas des composés ternaires et quaternaires (CIS et CIGS),  $\beta = 1/2$ . La valeur du gap peut être obtenue en extrapolant la partie linéaire de l'expression :

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (\text{II.9})$$

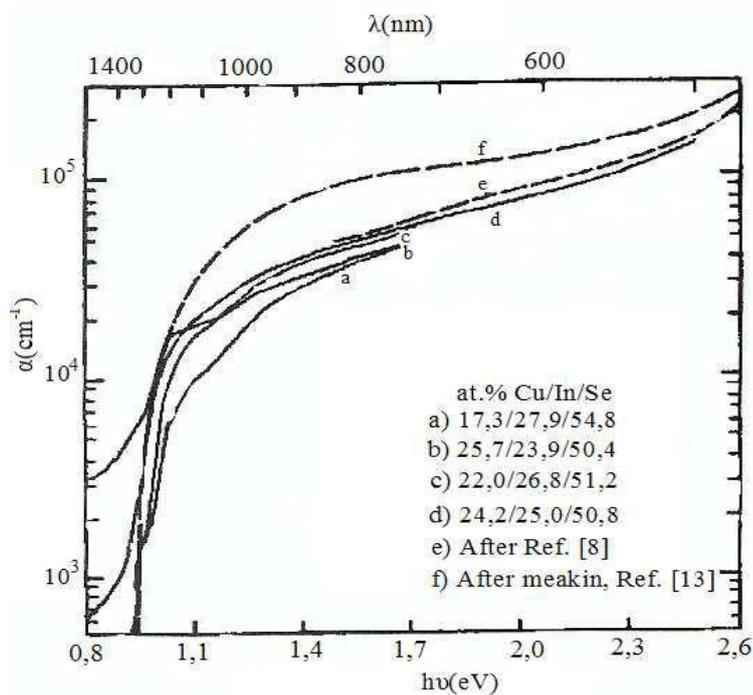
La figure (II.7) montre les transmissions optiques des différents absorbeurs Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> et CdTe.

Par ailleurs, Tuttle et al. [47] ont montré qu'à l'instar des propriétés électriques, les propriétés optiques des matériaux Cu-III-VI<sub>2</sub> sont influencées par les écarts à la stœchiométrie. La figure (II.8) montre l'évolution du coefficient d'absorption du CuInSe<sub>2</sub> en fonction des écarts à la stœchiométrie.

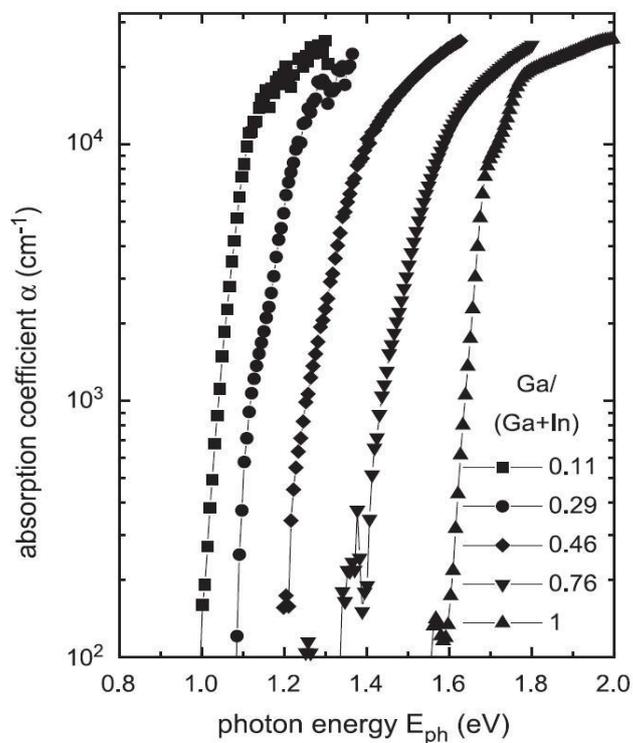
La figure (II.9) présente la variation du coefficient d'absorption des couches minces CIGS en fonction de l'énergie des photons incidents  $h\nu$  pour différentes compositions [Ga]/[Ga + In]. Le tableau (II.2) récapitule les différentes valeurs de l'énergie du gap pour les matériaux Cu-III-VI<sub>2</sub> ainsi que les rendements de conversion affichés à ce jour.



**Figure II-7 :** Transmissions optiques des différents absorbeurs [46].



**Figure II-8 :** Evolution du coefficient d'absorption optique de CuInSe<sub>2</sub> en fonction de l'énergie des photons  $h\nu$  et des écarts à la stœchiométrie



**Figure II-9 :** Evolution du coefficient d'absorption optique de CISG en fonction de l'énergie des photons  $h\nu$  et des compositions  $[\text{Ga}]/[\text{Ga}+\text{In}]$ .

Matériau	Gap (eV)	Rendement théorique $\eta$ (%)	Rendement expérimental $\eta$ (%)
CuInSe <sub>2</sub>	1,05	25	13,5
CuIn <sub>0,7</sub> Ga <sub>0,3</sub> Se <sub>2</sub>	1,20	27,5	20
CuGaSe <sub>2</sub>	1,68	26	8,7

**Tableau II-2** : Rendements théoriques et expérimentaux affichés en laboratoire pour de petites surfaces, dans le cas des cellules solaires à base de Cu-chalcopyrite [37].

### II.2.5. Propriétés électriques

Tout écart à la périodicité du réseau ou à la structure est un défaut. Les défauts ponctuels usuels sont les impuretés, les sites vacants du réseau (lacune) et les atomes en excès placés en dehors des positions normales du réseau (interstitiels).

Les propriétés des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont généralement introduits intentionnellement pour assurer une bonne conductivité électrique ou de manières non intentionnelles telles que les défauts intrinsèques et les impuretés résiduelles.

La nature des défauts usuels pour certains solides est assez bien connue. Beaucoup de propriétés importantes des solides sont déterminée sautant par les défauts que par la nature du cristal, qui ne peut intervenir qu'en tant que matrice pour ces défauts. La conductivité pour certains semi-conducteurs peut être entièrement du eaux défauts chimiques présents dans le cristal.

Les impuretés et les défauts introduisent des niveaux énergétiques permis dans la bande interdite et peuvent être soit superficiels (proche d'un extremum de l'une des bandes) ou profonds. Ces derniers sont le siège des recombinaisons et de piégeage des photo-porteurs. Ce sont des centres avec des effets néfastes sur le rendement de la cellule. Il est alors nécessaire de contrôler l'opération de dopage pour la couche active CIGS.

L'introduction de défauts dans les matériaux CIGS est possible sans avoir recours à des atomes étrangers. En effet, l'opération est purement intrinsèque. Ce sont les défauts intrinsèques

qui sont responsables du dopage du matériau. Ils peuvent être des lacunes, des substitutions, ou des défauts complexes résultant de la présence de plusieurs types de défauts en attraction électrostatique. La formation des défauts intrinsèques est fonction des conditions de croissance. Contrairement aux autres semi-conducteurs ordinaires tels que le silicium, les matériaux CIGS présentent des propriétés électriques importantes, même sous la forme poly-cristalline, ce qui explique en partie sa forte potentialité pour la réalisation de cellules solaires à bas prix. Par ailleurs, l'écart à la stœchiométrie permet un grand nombre de possibilités de défauts qui peuvent se former et leur présence ne modifie pas les propriétés électriques. C'est l'une des particularités les plus intéressantes de ce matériau. D'ailleurs, c'est à partir de cette propriété que les matériaux CIGS sont dits à « matrice douce ». En d'autres termes, les matériaux CIGS sont trop désordonnés mais de façon que la plupart des défauts intrinsèques qui se présentent n'agissent pas comme des centres de piégeage des porteurs photo-générés.

Généralement, ils sont rapidement comblés par la présence du cuivre. Vu sa grande mobilité (coefficient de diffusion, à température ambiante, est de  $10^{-13}$  -  $10^{-10}$  cm<sup>2</sup> / s [48]), l'atome de cuivre assure la passivation des divers centres de recombinaison à travers la couche CIGS. L'atome de cuivre est considéré comme élément clé dans ces matériaux.

Cette particularité offre aux matériaux CIGS une grande stabilité aux rayonnements cosmiques.

Les défauts intrinsèques sont liés aux imperfections du réseau cristallin. Ils introduisent des niveaux d'énergie peu profonds. Les principaux défauts intrinsèques qui sont généralement présents dans les ternaires CuInSe<sub>2</sub> se divisent en trois parties :

- Les lacunes : ce défaut est caractérisé par l'absence d'un atome en un site normalement occupé. Ce type de défaut est présenté dans le composé ternaire ABC<sub>2</sub> par V<sub>A</sub>, V<sub>B</sub>, V<sub>C</sub>.
- Les interstitiels : les atomes se logent dans les sites normalement interdits. Ce type de défauts est présenté par A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub>, C<sub>i</sub>.
- Les antisites (substitutionnels) : sont les atomes qui occupent les places des autres atomes. Ces défauts sont présentés par AB<sub>A</sub>C, B<sub>A</sub>BC, C<sub>A</sub>C<sub>B</sub>.

Les défauts extrinsèques ou défauts chimiques sont des impuretés pouvant s'introduire soit involontairement pendant la synthèse cristalline ou le recuit, soit occasionnellement pour effectuer des dopages. Leur présence peut induire des modifications de certaines propriétés physiques du cristal. La figure (II.10) 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.

La présence des défauts cristallins (dislocations, défauts d'empilement, les macles, etc.) n'est pas désirable dans le matériau, ils peuvent dégrader les performances des dispositifs photovoltaïques.

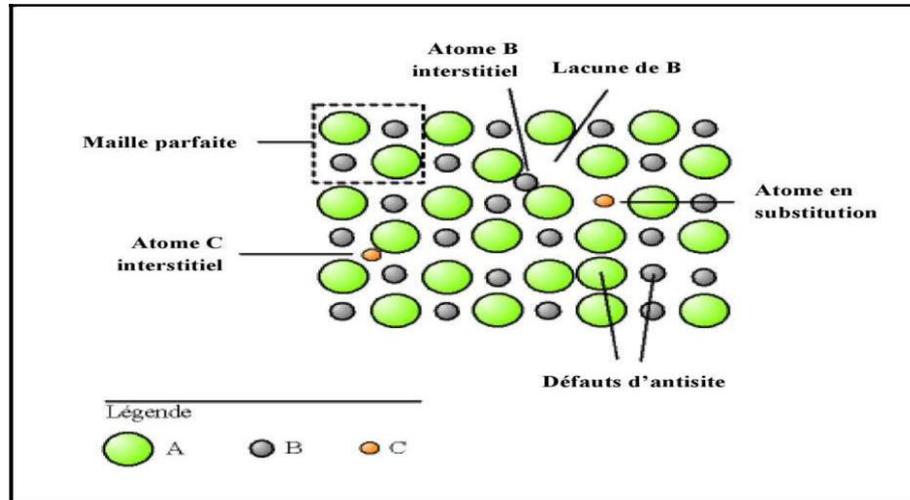


Figure II-10 : Défauts ponctuels dans le réseau cristallin.

### III-2-6- Le rendement quantique des matériaux CIGS

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons transmis (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, *IQE* (Internal Quantum Efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, *EQE* (External Quantum Efficiency) [49].

Le rendement quantique est défini comme suit :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} * \frac{E_{ph}(\lambda)}{q} \quad (II.10)$$

où  $J_{cc}$  est la densité de courant de court-circuit,  $\varphi$  le flux lumineux incident,  $q$  la charge de l'électron et  $E_{ph}$  l'énergie du photon (avec  $E_{ph} = hc/\lambda$ ,  $h$  étant la constante de Plank,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde).

Le rapport  $J_{cc}(\lambda)/\varphi(\lambda)$  est appelé "la réponse spectrale" de la cellule, elle est notée  $SR(\lambda)$ .

Cette dernière représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde.

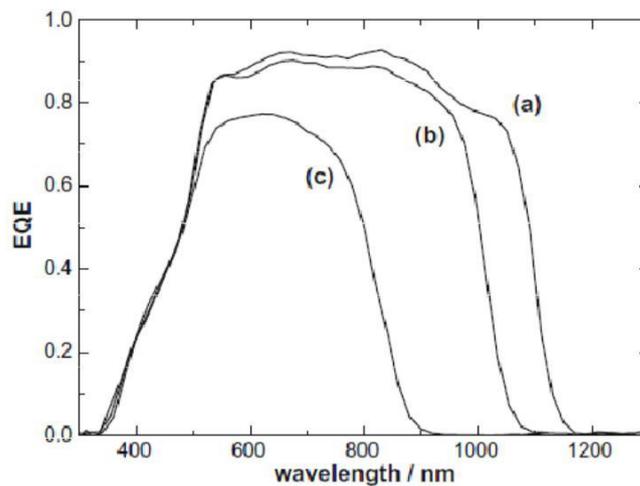
Elle est souvent utilisée dans le marché de l'électronique comme caractéristique des photodiodes.

$$\text{EQE peut s'écrire comme : } \text{EQE} = SR(\lambda) \frac{hc}{q\lambda} \quad (\text{I.11})$$

Le rendement quantique externe tient compte des pertes optiques comme la réflexion ou la transmission à travers la cellule. En corrigeant les pertes optiques, on obtient le rendement quantique interne  $IQE$  qui tient compte des caractéristiques propres de la cellule (longueur de diffusion, recombinaison en surface et en volume) :

$$IQE = \frac{\text{EQE}}{1-R} \quad (\text{I.12})$$

A titre indicatif, la figure (I.6) montre les rendements quantiques externes de photopiles élaborées à partir de CIGS.



**Figure II-11** : Le rendement quantique en fonction de la longueur d'onde, pour Les cellules solaires CIGS en couches minces, pour différentes concentrations de Ga dans l'alliage, avec  $[Ga] / [In+Ga] =$  (a) 0.18, (b) 0.34, (c) 0.78 [37].

### II- 2-7- Structure d'une cellule solaire à base de $\text{Mo}/\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2/\text{CdS}/\text{i-ZnO}/\text{ZnO}:\text{Al}$

Les dispositifs photovoltaïques à base de  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  sont constitués d'un empilement de couches minces :  $\text{Mo}/\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2/\text{CdS}/\text{i-ZnO}/\text{ZnO}:\text{Al}$  déposées le plus souvent sur un substrat de verre soudé comme décrit et illustré ci-dessous:

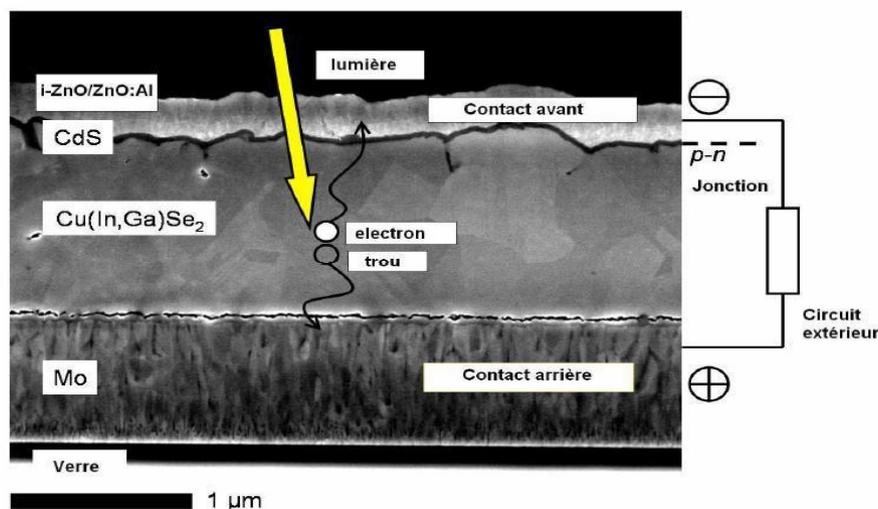


Figure II-12: Micrographie MEB d'une cellule solaire à base de  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ [50].

#### II-2-7-1- Substrat de Verre

Le substrat de verre sodocalcique (1-3 mm) a été utilisé originellement pour sa disponibilité, son coût peu onéreux, son coefficient d'expansion thermique adapté à la croissance de couches de CIGSe ainsi que pour sa bonne planéité. De plus, sa bonne tenue mécanique ainsi que sa relative neutralité chimique aux températures de synthèse sont des atouts importants. En effet, la communauté scientifique du CIGSe s'est aperçue que le sodium contenu dans le verre sous forme de  $\text{Na}_2\text{O}$  joue un rôle important tant au niveau de la croissance que des performances photovoltaïques [51, 52, 53]. Au sein de la couche de  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ , le sodium se situe principalement aux joints de grains [54]. Il aurait pour conséquence de passiver les joints de grains et d'augmenter la densité d'accepteurs au sein de la couche de CIGSe [55]. Pour contrôler l'apport du sodium au sein de l'absorbeur, l'ajout de couches barrière ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) au sodium peut être effectué entre le verre et le molybdène. Ensuite, l'adjonction de précurseurs contenant du Na (e.g.  $\text{NaF}$ ) [56, 57] peut être éventuellement effectuée.

### II-2-7-2- Molybdène

Afin d'assurer la collecte des porteurs photo-générés, une couche de molybdène (0.3- 1µm), dit contact arrière, est déposée par pulvérisation cathodique magnétron sur le substrat [76]. Le principal avantage de cette couche est sa grande stabilité à haute température sous atmosphère sélénée, ainsi que la faible résistivité de contact qu'elle forme avec le CIGSe. Le bon comportement électronique de l'interface formée entre le CIGSe et le Mo serait dû à la présence d'une fine couche de MoSe<sub>2</sub> [77,78]. De plus, la tenue en compression ou en tension de la couche de molybdène joue un rôle important au niveau de la porosité du Mo. Elle a un impact direct sur la perméabilité au Na qui diffuse plus ou moins à travers le molybdène et participe à la croissance du CIGSe.

### II-2-7-3- Couche absorbante de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>

La couche absorbante polycristalline du Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> est un semi-conducteur de type p. L'absorption des photons qui contribue à la génération de paires électron-trou.

### II-2-7-4- Couche tampon de CdS

L'amélioration des interfaces entre les électrodes et les matériaux actifs est un paramètre important pour augmenter les performances des cellules. Pour optimiser l'interface anode / donneur d'électrons on ajoute une couche mince, entre les deux couches, cette couche est appelée couche tampon. Elle évite l'inadaptation des bandes interdites, limite les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains

La couche tampon doit avoir les propriétés suivantes:

- Une structure de bande permettant une transition «souple » entre celle du semi-conducteur et celle de l'oxyde transparent conducteur.
- Morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court circuit au niveau des joints de grains.

Une couche tampon mince de sulfure de cadmium (CdS) de type n est déposée par bain chimique sur l'absorbeur afin de réaliser la jonction p-n avec le CIGSe. Cette fine couche de l'ordre de 50 nm est formée par immersion du substrat (Verre/Mo/CIGSe) dans une solution

aqueuse contenant de l'acétate de cadmium ( $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), de l'ammoniaque ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ainsi que de la Thiourée ( $\text{H}_2\text{NCSNH}_2$ ). La couche tampon doit avoir une largeur de bande interdite plus grande que celle de l'absorbeur ( $E_g(\text{CdS}) = 2,4 \text{ eV} > E_g(\text{CIGSe}) = 1,04\text{-}1,68 \text{ eV}$ ) afin que les photons incidents puissent atteindre l'absorbeur. Cependant, le faible gap du CdS perturbe la transmission de la lumière incidente aux courtes longueurs d'ondes.

### II-2-7-5- Oxydes Transparents Conducteurs (OTC) à base de ZnO

Le dépôt des différentes couches minces présentées précédemment est suivi par la pulvérisation cathodique d'une couche d'oxyde optiquement transparente composée d'oxyde de zinc non dopé (i-ZnO,  $e = 50 \text{ nm}$ ,  $E_g = 3,3 \text{ eV}$ ) ainsi que par une couche d'oxyde transparente conductrice d'oxyde de zinc dopé d'aluminium (ZnO:Al,  $e = 300 \text{ nm}$ ,  $E_g = 3,6 \text{ eV}$ ) de type dégénéré  $n^+$  dont le taux de dopage est de l'ordre de  $3 \cdot 10^{20} \text{ e}/\text{cm}^3$ . Ces couches doivent présenter une transparence maximale tout en assurant une résistivité minimale afin de permettre la transmission de la majorité de la lumière incidente utile à l'absorbeur. Afin de mesurer la performance de l'OTC, Kessler *et al.* [79] ont proposé une figure de mérite définie par la densité de courant perdue due à l'absorption optique pour une résistance carrée donnée.

### II-3- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les propriétés fondamentales du matériau Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> à savoir sa structure cristalline, son diagramme d'équilibre et ses propriétés électrique et optique. Nous avons ensuite donné les définitions, des différents défauts ponctuels (lacunes, atomes interstitiels, défauts substitutionnels, impuretés, etc.).

Grace à ces caractéristiques, le matériau CIGS est devenu un semi-conducteur promoteur pour les applications photovoltaïques, ceci permet d'utiliser ce semi-conducteur comme matériaux de base dans la fabrication des composants électroniques pour satisfaire des besoins industriels spécifiques.

Dans le chapitre suivant, nous présentons une étude générale sur les oxydes transparents conducteurs TCO.

### Chapitre III : Les Oxydes transparent conducteurs OTC

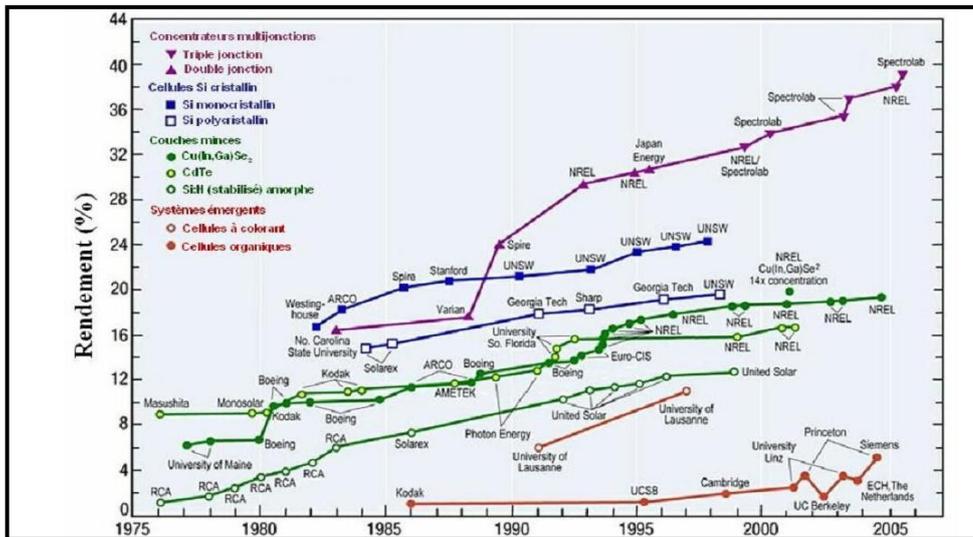
#### III-1- Introduction

Les oxydes transparents et conducteurs (Transparent Conductive Oxides : TCO) sont des matériaux prometteurs. Depuis la découverte au début du siècle de la double propriété de conductivité électrique et transparence dans le domaine du visible [58], la recherche s'est vraiment intensifiée à partir des années 80. L'avènement de nouvelles technologies avec le développement des écrans plats ou des panneaux solaires a contribué à cette émergence.

Les trois oxydes métalliques ZnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et SnO<sub>2</sub> sont les plus étudiés car ils ont démontré les meilleures propriétés. l'oxyde de zinc est le plus étudié récemment. L'explication peut venir du fait que l'oxyde de zinc est aussi utilisé dans de nombreuses applications optoélectroniques telles que les diodes électroluminescentes (LED) émettant dans les UV. Les deux autres oxydes sont principalement étudiés comme électrodes transparentes. Néanmoins, de nombreux autres oxydes métalliques existent avec des propriétés plus ou moins similaires

#### III -2- Enjeu économique

L'une des utilisations des conducteurs transparents est l'électrode transparente des cellules solaires. Avec les enjeux environnementaux actuels, la recherche dans la conversion de l'énergie solaire en électricité s'intensifie. Le graphique de la Figure III-1 montre l'évolution du rendement pour différents types de cellules depuis plusieurs décennies. Grâce à des technologies telles que la triple jonction absorbant tout le spectre solaire, des rendements de plus de 35 % peuvent être atteints [61]. Des chercheurs à l'institut Fraunhofer des systèmes à Energie solaire ont obtenu l'un des plus hauts records : un rendement de 41,1 %. Leur système associe un concentrateur solaire d'un facteur de 454 qui concentre la lumière sur une cellule multi-jonction de 5 mm<sup>2</sup> de surface. Depuis quelques décennies, l'industrie solaire est très active.



**Figure III-1: Evolution du rendement de différentes cellules solaires au cours des dernières Années (Source : NREL [62])**

Pour des cellules solaires compétitives, trois paramètres sont importants du point de vue de l'industriel, des phénomènes physiques et du consommateur :

- ↪ Le coût de fabrication.
- ↪ Le rendement.
- ↪ La longévité.

De nombreuses recherches se tournent vers la courbe en rond plein rouge, en bas à droite de la Figure III.1: les cellules solaires organiques. L'utilisation de molécules ou polymères comme couches actives en font la technologie la moins coûteuse. Cependant, des efforts doivent être fournis en ce qui concerne le rendement qui est de 5 % pour les meilleures cellules avec une longévité faible due à l'oxydation des couches par l'oxygène de l'air.

L'amélioration de conducteurs transparents est une des nombreuses voies pour améliorer les cellules solaires. Cette contribution permettra éventuellement l'accès à une énergie propre pour un coût compétitif.

### III-3- Les propriétés des TCO

Historiquement, la première coexistence d'une conductivité électrique et d'une transparence optique dans le visible a été observée en 1957 sur des couches minces d'oxydes

de cadmium CdO [12]. Depuis ces vingt dernières années les couches minces d'oxyde d'étain et l'oxyde de Zinc ont connu un intérêt croissant dans de nombreuses recherches en raison de ses multiples applications potentielles [63].

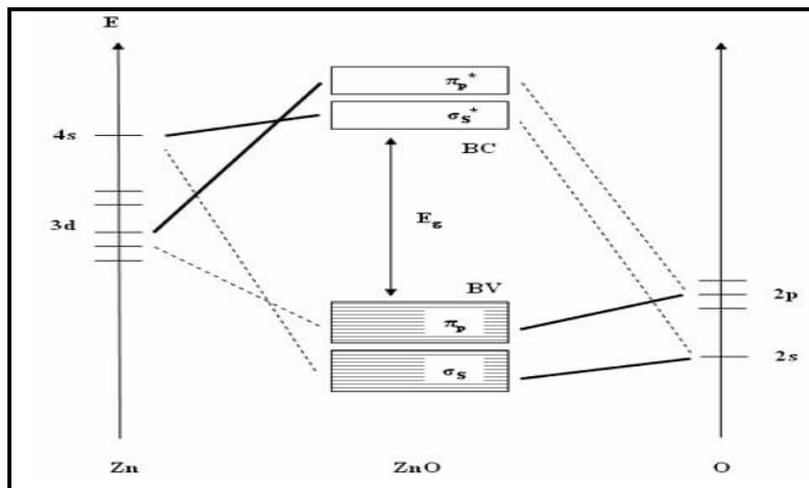
### III-3-1- Généralités: Qu'est-ce qu'un OTC

Selon la théorie des bandes d'énergie, trois états électriques sont possibles : métal, isolant et semi-conducteur. Dans le métal, la bande de conduction ( $BC$ ) et la bande de valence ( $BV$ ) se recouvrent, permettant la libre circulation des électrons. Le semi-conducteur, quant à lui, a une bande interdite qui sépare  $BV$  et  $BC$  communément appelée gap et notée  $E_g$ . Les électrons ne peuvent pas prendre les énergies situées dans cette bande. Il faut qu'ils acquièrent de l'énergie pour passer dans  $BC$ . Pour un gap supérieur, on parle d'isolant car même à température ambiante,  $BC$  est vide. Leur gap est supérieur à  $4 eV$ .

Un matériau, avec une transparence dans le visible et des propriétés de conduction, a des propriétés antinomiques d'un point de vue physique. En fait, les matériaux conducteurs tels que les métaux réfléchissent une grande partie du spectre électromagnétique dont la partie du visible grâce à leurs électrons libres. Les verres sont des matériaux communs transparents dans le visible. Un verre est un matériau amorphe, i.e.: sa structure n'est pas cristallisée. Ce matériau a une valeur de gap très élevée et ne peut conduire un courant électrique. Il est alors dit isolant. A première vue, l'association des deux propriétés est incompatible.

Cependant, les semi-conducteurs possédant une large bande interdite (au minimum supérieur à  $3,1 eV$  correspondant à une longueur d'onde de  $400 nm$ ) sont théoriquement transparents dans le domaine du visible. Le dépôt en couche mince de ce type de matériau assure une faible absorption. Grâce au dopage du matériau, soit un apport d'impuretés qui augmente le nombre d'électrons libres, la conduction est accrue pour en faire un "mauvais métal".

Les oxydes métalliques sont en général des semi-conducteurs à grande bande interdite. Ils peuvent être symbolisés par  $MO$  avec  $M$  un atome de métal et  $O$  un atome d'oxygène. La méthode CLOA (méthode de Combinaison Linéaire des Orbitales Atomiques) permet de donner une vision simple de la structure de bandes d'un tel matériau.



**Figure III-2: Diagramme simplifié de la structure de bandes du ZnO**

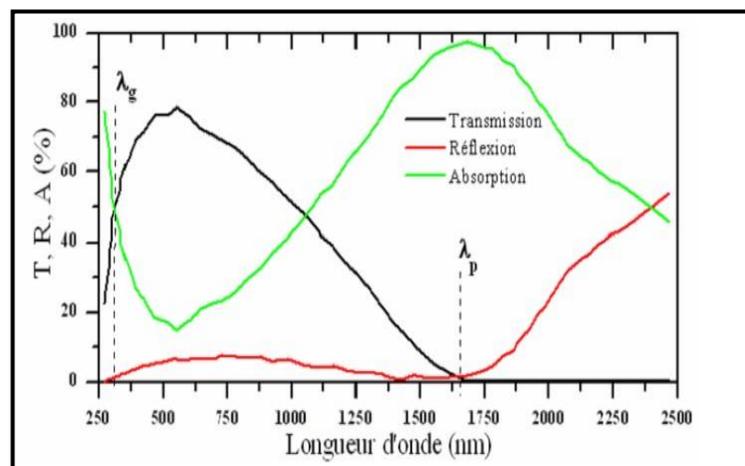
La combinaison des orbitales  $2p$  de  $O$  et  $nd$  de  $M$  ( $n$  étant le nombre quantique principal,  $n > 2$  pour avoir des couches  $d$  dans notre exemple) forment les liaisons  $\pi p$  liantes et  $\pi p^*$  anti-liantes. L'orbitale  $2p$  de  $O$  est prédominante et contribue principalement à  $\pi p$  formant le haut de la bande de valence ( $BV$ ). De même la combinaison des orbitales  $s$ , l'orbitale  $2s$  pour l'oxygène et  $ns$  pour  $M$ , forment les orbitales  $\sigma s$  liantes et  $\sigma s^*$  anti-liantes. L'orbitale  $ns$  de  $M$  sera prédominante et contribuera principalement à la formation de  $\sigma s^*$  créant le bas de la bande de conduction ( $BC$ ). Un exemple de cette application est donné dans la Figure.III.2 pour la formation de  $ZnO$  où l'écart entre  $\sigma s^*$  et  $\pi p$  forme la bande interdite  $E_g$ .

Selon le niveau des orbitales et les différentes interactions possibles, certains oxydes métalliques ne sont pas des semi-conducteurs à large bande interdite. Par exemple, pour les oxydes composés des éléments de la colonne  $IV$ , l'oxyde de silicium  $SiO_2$  est isolant comme l'oxyde de germanium  $GeO_2$ , l'oxyde d'étain  $SnO_2$  est un semi-conducteur et l'oxyde de plomb  $PbO_2$  a un comportement métallique.

Avant de décrire les propriétés optiques et électriques des OTC, des solutions alternatives à l'utilisation de ces matériaux sont possibles. Des couches de métaux extrêmement fines inférieurs à  $10\text{ nm}$ , peuvent jouer le rôle de matériaux transparents et conducteurs.

### III-3-2- Les propriétés optiques

L'existence d'une fenêtre optique couvrant tout le domaine du visible est caractéristique des OTC. La transmission optique est définie comme le rapport entre l'intensité de la lumière incidente et l'intensité de la lumière transmise à travers le matériau considéré. Un exemple de spectre de transmission d'un OTC, ici une couche de  $\text{SnO}_2:\text{F}$ , est représenté à la *Figure III.3* par une courbe noire. Le spectre d'absorption a été déduit des spectres de transmission.



**Figure III-3 : Spectres de transmission, réflexion et d'absorption d'un échantillon de  $\text{SnO}_2:\text{F}$  de  $1\ \mu\text{m}$  d'épaisseur [66]**

La fenêtre optique est centrée entre deux longueurs d'onde caractéristiques où la lumière n'est plus transmise avec pour chaque zone un phénomène différent. A faible longueur d'onde dans le domaine de l'UV proche ( $\lambda < \lambda_g$ ), l'absorption est dominée par les transitions bande à bande. Les photons incidents avec une énergie égale à celle du gap ou supérieure seront absorbés par des électrons de la bande de valence ce qui leur permettront d'aller dans la bande de conduction.

A haute longueur d'onde dans le domaine de proche l'infrarouge ( $\lambda > \lambda_p$ ), la lumière incidente est réfléchiée par le matériau.  $\lambda_p$  est appelée longueur d'onde de plasma. Ce phénomène peut être décrit par la théorie classique des électrons libres de Drude[67].

Dans le modèle des électrons libres, les électrons peuvent être vus comme un plasma où la mise en mouvement est réalisée par la composante électrique du champ

électromagnétique incident. Le plasma oscille à une fréquence naturelle de résonance  $\omega_p$ , correspondant à la longueur d'onde  $\lambda_p$  selon la relation suivante :

$$\lambda_p = \frac{2\pi \cdot c}{\omega_p} \quad (\text{III.1})$$

où  $c$  est la célérité de la lumière.

A cette longueur d'onde caractéristique, la couche mince absorbe une partie du rayonnement incident. Ce pic d'absorption dû à la présence d'électrons libres dans le matériau dépend de leur concentration et de leur mobilité [68].

La transmission des OTC peut s'exprimer :

$$T = (1 - R)e^{-\alpha \cdot e} \quad (\text{III.2})$$

où  $T$  est le coefficient de transmission,  $R$  le coefficient de réflexion,  $e$  l'épaisseur de la couche considéré et  $\alpha$  est le coefficient d'absorption dépendant de la longueur d'onde  $\lambda$ .

Ce dernier est défini suivant la relation :

$$\alpha = \frac{1}{e} \ln\left(\frac{100}{T}\right) \quad (\text{III.3})$$

### III-3-3- Les propriétés électriques

#### Conductivité

La physique des semi-conducteurs à large bande interdite décrit les propriétés électriques des OTC ; La conductivité  $\sigma$  s'exprimant en  $S \cdot cm^{-1}$  ou  $(\Omega \cdot Cm)^{-1}$  est le produit de la densité de porteurs de charges  $n$  en  $cm^{-3}$ , de la mobilité  $\mu$  de ces charges en  $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$  et de la charge électrique élémentaire de l'électron  $q$  (formule 11).

La résistivité  $\rho$ , définie comme l'inverse de la conductivité, s'exprime en  $\Omega \cdot cm$  :

$$\sigma = (qn_V \mu) = \frac{1}{\rho} \quad (\text{III.4})$$

## Chapitre III : Les Oxydes transparent conducteurs OTC

---

Une propriété électrique de surface importante dans le domaine des OTC est la résistance surfacique  $R_{Suf}$  définie comme le rapport de la résistivité par l'épaisseur de la couche suivant la relation :

$$R_{Suf} = \frac{\rho}{e} \quad (\text{III.5})$$

Les propriétés intrinsèques de certains OTC en font des conducteurs de type n.

### Dopage type n

Afin d'améliorer la conductivité des matériaux, le nombre de porteurs de charges est augmenté par le dopage. Selon le matériau ou le type de dopant, le dopage peut être de substitution, de vacances ou d'implantations interstitielles. Dépendant de la valence des dopants ou des sites d'implantations, accepteurs ou donneurs, le dopage induira une conductivité de type n ou p.

Le dopage par substitution peut se faire sur le cation (le métal) ou l'anion (l'oxygène). Des paramètres tels que la solubilité solide du dopant dans le réseau du matériau hôte ou la taille du dopant, influenceront également la possibilité d'un dopage.

il existe de nombreux travaux sur beaucoup de sortes de dopage. Des exemples d'étude sur le co-dopage se trouvent dans la littérature comme par exemple le co-dopage Al-Ti du ZnO.

Les dopages par substitution de l'anion oxygène sont plus rares. Or, le dopage au fluor est l'un des meilleurs dopants pour SnO<sub>2</sub>. Pour ZnO, des recherches ont été menées sur des dopages au fluor mais aussi au bore ou encore au lithium [69].

Tous les dopages évoqués ci-dessus renforcent le type n des TCO semi-conducteurs. En effet, un niveau de dopant est créé sous BC et l'augmentation de dopage développe une bande d'énergie chevauchant la bande de conduction. Ainsi, un grand nombre d'électrons participent à la conduction, d'où l'augmentation de la conductivité on par dopage.

### Dopage type p

Le dopage de type p reste, quant à lui, encore controversé. Comme nous l'avons vu précédemment, les TCO tels que le SnO<sub>2</sub> ou le ZnO sont intrinsèquement de type n. Un calcul théorique réalisé par Zhang et al. [70] confirme cette tendance. Néanmoins, depuis quelques

## Chapitre III : Les Oxydes transparent conducteurs OTC

années, de plus en plus de travaux expérimentaux portent sur les couches minces de TCO de type p grâce à différents dopages : ZnO:N, ZnO:Al-N, SnO<sub>2</sub>:Sb, etc. L'avènement de TCO de type p ouvrira la porte à une électronique transparente. Une des voies possibles sera peut être celle des TCO à structure de la fossile comme CuAlO<sub>2</sub>, une découverte de l'équipe d'Hosono [69].

### Mobilité

Concernant les propriétés électriques, une autre possibilité d'augmenter la conductivité est d'accroître la mobilité. Cependant, la mobilité est dépendante intrinsèquement des mécanismes de diffusion et par conséquent, ne peut être contrôlée directement. En général, ces mécanismes limitent la mobilité quand la concentration des porteurs augmente. La mobilité est donc un facteur important comme paramètre influençant la conductivité. Pour qu'un matériau soit conducteur, il a besoin d'une certaine densité de porteurs appelée concentration critique, notée  $n_c$ . En dessous de  $n_c$ , le matériau est considéré comme isolant et au-dessus comme conducteur. Le critère pour définir  $n_c$ , est appelé critère de Mott [71] défini selon la relation suivante:

$$n_c^{1/3} \cdot a_0^* \approx 0,25 \quad (\text{III.6})$$

où  $a_0^*$  est le rayon de Bohr effectif du matériau, égale à  $1,35 \text{ nm}$ .

La concentration des porteurs de charges d'un OTC performant est comprise entre  $10^{20}$  et  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ .

### III-3-4- Les propriétés générales

En plus de bonnes propriétés optiques et électriques, d'autres critères influencent les choix des matériaux et des méthodes de dépôt. La gravure des couches, le coût de production ou encore la toxicité sont importants. La dureté des couches et l'adhérence, la tenue thermique et chimique des couches sont également des paramètres essentiels.

Gordon a étudié les différentes influences de tous ces paramètres donnant des critères pour diverses applications [72].

Le contrôle des paramètres de la méthode de dépôt est d'une grande importance pour la croissance de films d'OTC de haute qualité. Les propriétés physiques des couches minces d'OTC sont fortement liées à la structure, à la morphologie et à la composition du dépôt.

Ces facteurs sont influencés par les paramètres de dépôts des différentes techniques. Pour les OTC, une grande variété de techniques de dépôt est utilisée.

Les OTC doivent posséder une haute conductivité électrique et une faible absorption dans le visible. Haacke [73] a défini un rapport entre le coefficient de transmission  $T$  et la résistance surfacique  $R_{suf}$ , notée  $\Phi_{TC}$  s'exprimant en  $\Omega^{-1}$  d'après la relation suivante. Cette relation permet une comparaison entre différents OTC.

$$\Phi_{TC} = \frac{T^{10}}{R_{suf}} \quad (\text{III.7})$$

### III-4- Différents types des oxydes

Depuis une trentaine d'années, de nombreuses études portent sur l'utilisation de couches transparentes conductrices. De nombreux matériaux OTC sont apparus citons en particulier :  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$ ,  $\text{CdSnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  (ITO),  $\text{ZnO}:\text{Al}$ ,  $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ ,  $\text{SnO}_2:\text{Cd}$ ,  $\text{SnO}_2:\text{F}$ ,  $\text{ZnO}:\text{Al}$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{F}$ ...etc.

Mais il y'a trois matériaux spécifique sont à l'honneur : l'oxyde d'indium dopé à l'étain  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ , ou encore ITO (de l'anglais indium tin oxyde), l'oxyde de zinc  $\text{ZnO}$  et l'oxyde d'étain  $\text{SnO}_2$ . Ces oxydes ont en commun trois caractéristiques principales:

- (1) La largeur de la bande interdite est importante ( $> 3\text{eV}$ ).
- (2) Le composé stœchiométrique est un-isolant.
- (3) Le matériau dégénéré possède une densité de porteurs élevée mais pas au point de créer une absorption dans le visible. En fait, les fréquences d'absorption se situent dans l'infrarouge, à la limite du visible, le matériau est transparent au visible.

### III-5- Différents types de défauts dans les OTC

Les défauts présents dans l'OTC dépendent de la méthode de croissance et des conditions d'élaboration de ce matériau. On pourra énumérer les défauts suivants :

- ↪ défauts ponctuels (interstitiels, lacunes, atomes étrangers).
- ↪ défauts linéaires (dislocations et sous joint de grains).
- ↪ défauts plans (macles, joints de grains).

Il existe d'autres types de défauts d'ordre thermique (Phonon) ou électrique (électrons, trou).

### III-6- Applications des OTC

Les propriétés des OTC démontrées précédemment permettent d'envisager leur emploi dans de nombreuses applications. Dans cette partie, nous allons présenter les principales utilisations de ces matériaux.

#### a- Capteurs à gaz

En présence de certains gaz, les propriétés électriques des OTC peuvent changer. Le gaz considéré s'adsorbe à la surface de la couche mince ou des joints de grains de celui-ci. La molécule adsorbée peut capturer un électron libre. Il en résulte donc une réduction de la conductivité électrique. Le rapport entre les résistivités avant et après la mise en présence du gaz est appelé sensibilité du capteur. Le gaz à détecter ne doit pas nécessairement être adsorbé à la surface du capteur, il peut venir perturber les espèces oxygénées déjà présentes à la surface et perturber indirectement la résistivité. Un exemple de capteur à gaz à base de  $\text{SnO}_2$  est présenté à la Figure III.4 pour la détection du monoxyde de carbone CO.

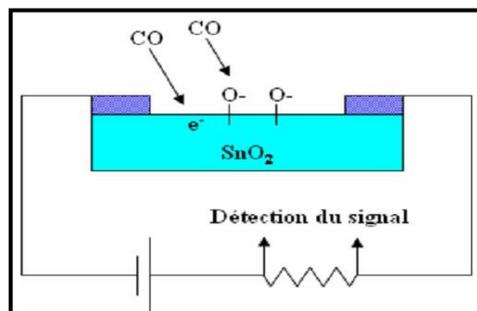


Figure III-4 : Exemple de capteur à CO basé sur une couche mince de  $\text{SnO}_2$

#### b- Revêtement couches protectrices ou intelligentes

Les OTC sont aussi utilisés en tant que revêtements de surface. La plus simple des applications est l'application directe d'une de leurs caractéristiques. En effet, les OTC réfléchissent les proches et lointains infrarouges à cause des charges libres. Cette réflexion peut être mise à profit pour réaliser des couches laissant passer la lumière visible mais réfléchissant les infrarouges. Ces matériaux sont utilisables pour réaliser des dispositifs

tels que des miroirs chauffants.

Les applications décrites ci-dessus sont des couches dites passives car elles utilisent les propriétés intrinsèques des couches minces de OTC. Les applications dites actives sont enclenchées principalement par un courant électrique. Par exemple, l'ITO est aussi utilisé dans le monde de l'automobile comme revêtement chauffant de rétroviseurs extérieurs par l'effet Joule.

### c- Systèmes optoélectroniques

Des diodes électroluminescentes sont réalisées avec, entre autres, des couches de OTC. Par exemple, des LED sont fabriquées avec la jonction n-ZnO/p-GaN [74].

Grâce à l'émergence de OTC de type p, des systèmes basés sur des jonctions PN réalisées tout en OTC ont vu le jour. Ils ne sont qu'au stade expérimental mais la porte est ouverte pour l'électronique transparente. Des jonctions PN ont été réalisées avec les OTC de type n communs tels que la jonction p-SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/n-ZnO pour construire une LED [75].

### d- Cellules solaires

Les OTC dans les cellules solaires sont employés comme électrodes transparentes (anode). Ils doivent nécessairement avoir une haute transmission optique afin de permettre un transport efficace des photons jusqu'à la couche active et également une bonne conductivité électrique qui est requise pour obtenir le moins de pertes de transport des charges photogénérées. Les OTC se trouvent dans les types des cellules solaires.

## III-7- Conclusion

Dans ce chapitre, nous effectuons une étude bibliographique générale sur les oxydes transparents et conducteurs TCO.

Nous donnons une explication sur les propriétés optiques et électriques des TCO. Puis, nous présentons les oxydes les plus utilisés dans les différents domaines d'applications, tels que : les capteurs à gaz, les cellules solaires, les couches protectrices ou intelligentes et les systèmes optoélectroniques, etc.

D'après cette étude bibliographique, nous soulignons le rôle important des oxydes transparents et conducteurs TCO dans tous les domaines d'applications.

### CHAPITRE IV : Résultats de Simulation et Discussions

#### IV-1- Introduction

Pour avoir un bon rendement d'une cellule solaire, une optimisation des paramètres est nécessaire. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, la configuration des contacts et le confinement optique.

Les valeurs des paramètres optimaux dépendent de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau du substrat (duré de vie, mobilité), de la qualité des contacts ohmiques, de la vitesse de recombinaison en surface, etc. L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

La simulation numérique est couramment utilisée pour l'optimisation des cellules solaires. En effet, elle présente les avantages suivants :

Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des paramètres différents.

Elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres).

On peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètres interdépendants (par exemple : mobilité, longueur de diffusion et durée de vie).

La simulation est largement utilisée dans le cadre de ce travail afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum. La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres influence le rendement de ce type de structure. En effet, notre cellule solaire est décrite par les paramètres suivants :

- Les dimensions géométriques des contacts et des régions diffusées.  
L'épaisseur du substrat, Les niveaux de dopage.
- Les paramètres qui interviennent dans les modèles de recombinaison (vitesse de recombinaison, durée de vie des porteurs minoritaires).
- Les paramètres optiques pour chaque couche de la cellule (les coefficients d'absorption pour chaque longueur d'onde, énergie de gap, etc.).

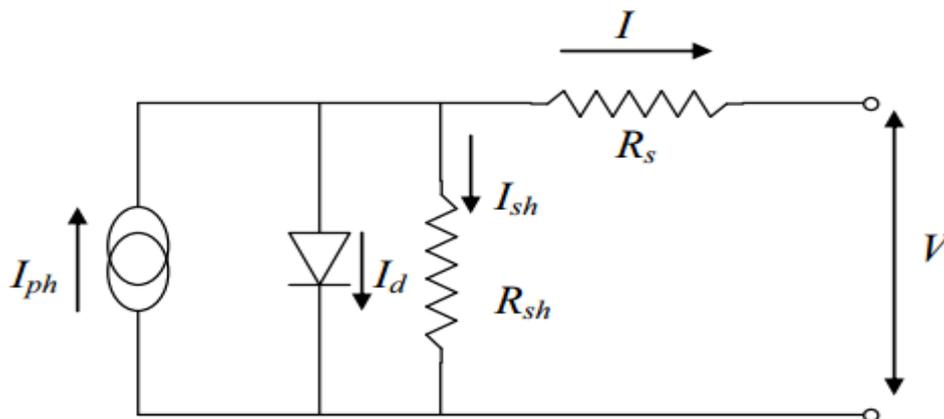
### IV-2- Modèle électrique d'une cellule solaire

Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension [80]. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations  $I-V$  à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issus de la mesure directe sur le module.

Plusieurs modèles de cellule solaire ont été étudiés en littérature montrant l'influence de la résistance en série  $R_s$ , en parallèle  $R_p$  ou  $R_{sh}$  et de la température sur la caractéristique  $I-V$ . La modélisation des cellules photovoltaïques nécessite un choix judicieux des circuits électriques équivalents, car pour développer un bon circuit équivalent pour une cellule photovoltaïque quelconque il faut comprendre la configuration physique de la cellule et les caractéristiques électriques pour chaque élément qui la constitue.

#### IV-2-1- Modèle à une diode

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant :



**Figure IV-1** : Schéma équivalent d'une cellule solaire. Modèle une diode [81].

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I$ - $V$  de la photopile:

- la résistance série est la résistance interne de la cellule; elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles,
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le courant  $I$  produit par la cellule est donné par la relation suivante :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_s \left[ \exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AkT} \right\} - 1 \right] \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

$I$  : courant fourni par la cellule [A].

$V$  : tension à la borne de la cellule [V].

$I_{ph}$  : le photo-courant [A], proportionnel à l'irradiance.

$I_s$  : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température.

$R_s$  : Résistance série [Ohm].

$R_{sh}$  : Résistance shunt (ou parallèle) [Ohm].

$q$  : Charge de l'électron =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  Coulomb.

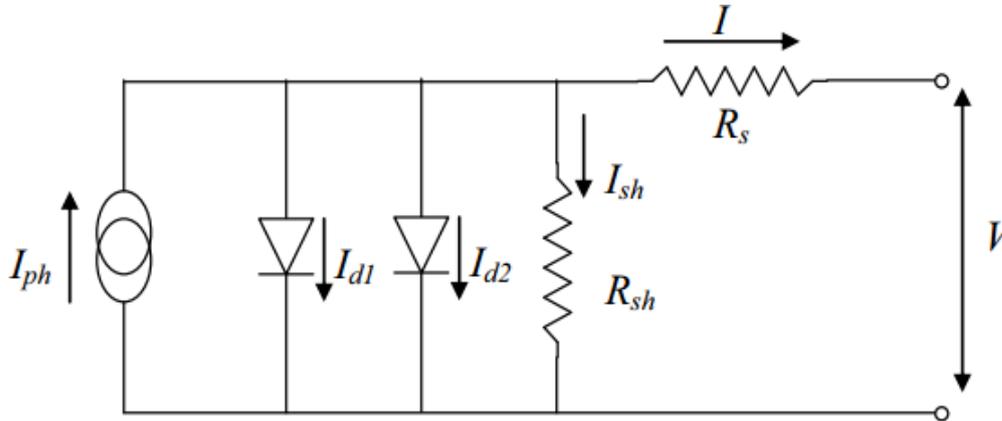
$K$  : Constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K.

$A$  : Facteur de qualité de la diode.

$T$  : Température effective de la cellule [Kelvin].

### IV-2-2- Modèle à deux diodes

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes, ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du circuit équivalent devient alors:



**Figure IV-2 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire. Modèle deux diodes [81].

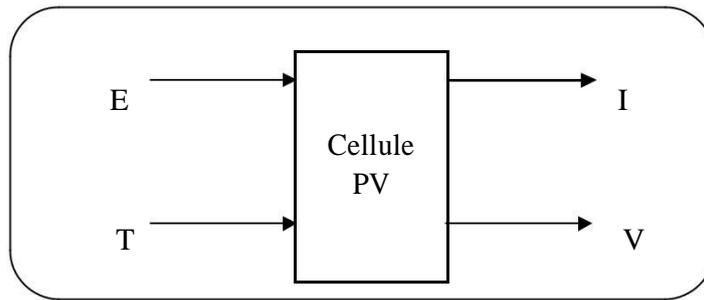
Le courant  $I$  produit par la cellule est donné par la relation suivante :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[ \exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AkT} \right\} - 1 \right] + I_{s2} \left[ \exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{2AkT} \right\} - 1 \right] \quad (IV.2)$$

L'apparition du courant de saturation résulte des phénomènes de recombinaisons [81].

Le modèle à deux diodes a un léger avantage, car il fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau. (Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur ( $I_{d1}$ ), et le courant de génération-recombinaison ( $I_{d2}$ ) dans la zone de charge d'espace de la jonction (ZCE)).

D'une façon générale on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc comportant quatre paramètres.



**Figure IV-3 : schéma bloc d'une cellule PV**

avec deux variables d'entrée :

$E$  : ensoleillement dans le plan de la cellule ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$T$  : température de la cellule ( $^{\circ}\text{C}$ ).

et deux variables de sortie :

$I$  : intensité de courant fournie par la cellule (A).

$V$  : tension aux bornes de la cellule.

### IV-3- Simulation avec SCAPS-1D d'une cellule solaire à base de CIGS

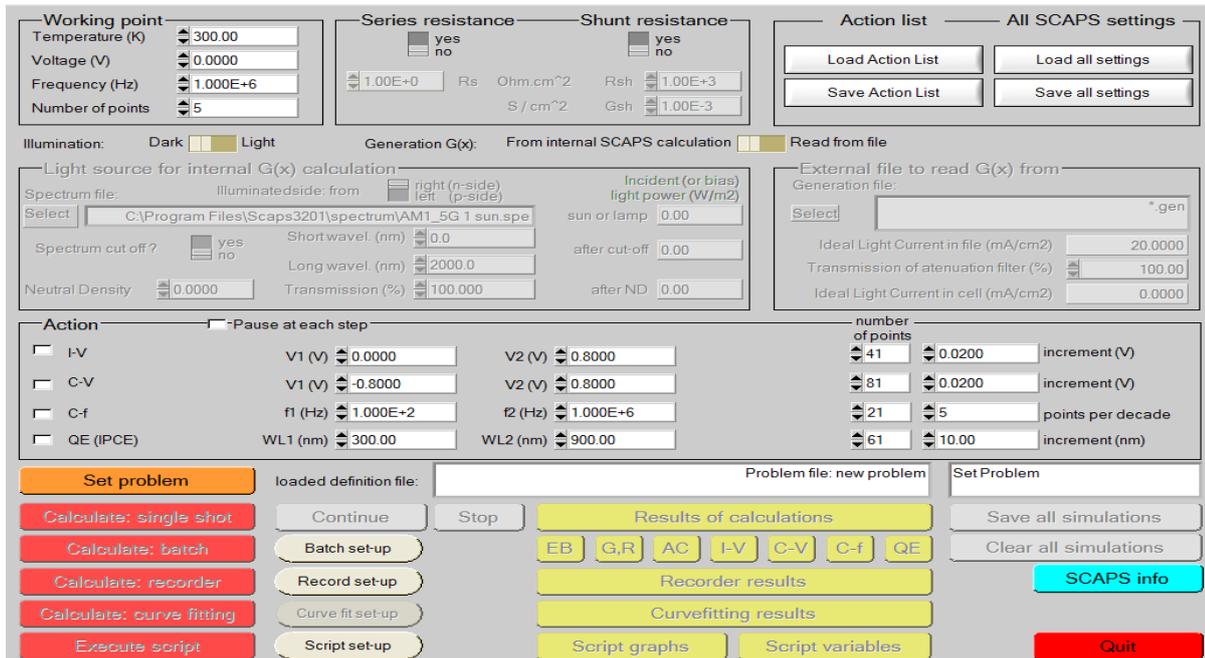
Avec le développement du secteur de recherche sur l'énergie photovoltaïque et delà, la cellule photovoltaïque, on a vu croître la nécessité de développer les moyens de recherche, parmi ces moyens les logiciels de simulation. Il existe plusieurs logiciels de simulation d'une cellule photovoltaïque à base de couches minces, on peut citer : AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, Silvaco etc. Dans ce travail nous allons utiliser le logiciel SCAPS-1D.

#### IV-3-1-Présentation du logiciel SCAPS-1D

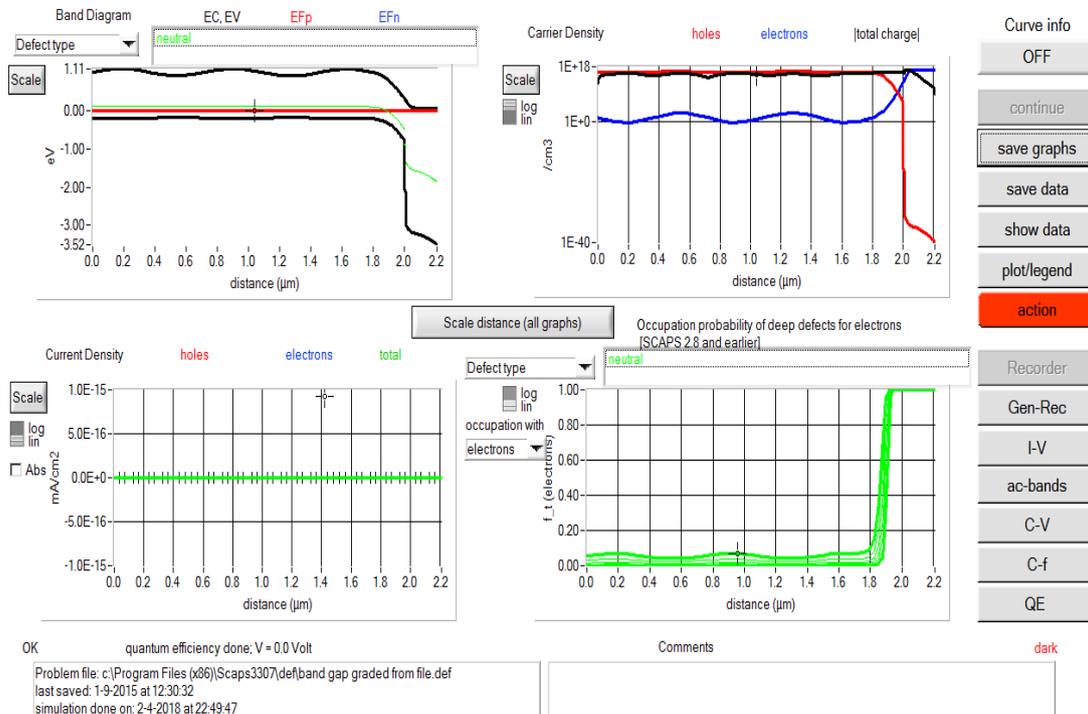
SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un programme de simulation de cellule solaire unidimensionnelle développée au département d'électronique et des systèmes d'information (ELIS) de l'Université de Gand, Belgique. [82]

SCAPS contient plusieurs panneaux (fenêtres ou pages). Le principal panneau est « le panneau de l'action ». Il permet de régler le problème, définir la liste d'actions de calculs requis, exécuter les calculs, naviguer vers d'autres panneaux et sauver les résultats de l'intrigue [82].

## Chapitre IV : Résultats de Simulation et Discussions



**Figure IV-4** : Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS.



**Figure IV-5** : Panneau des bandes d'énergie.

A partir de ce panneau on peut simuler :

- Caractéristique  $I-V$ .
- C-V (capacitance-tension).
- C-f (capacitance-fréquence).
- QE (rendement quantique).

La simulation d'une cellule solaire à l'aide du logiciel SCAPS se résume à :

- Lancer le programme, ouvrir le panneau « action » et régler les paramètres tels que la température.
- Entrer les paramètres des couches de la cellule à simuler dans le panneau de définition.
- Exécuter la simulation et noter les résultats de la simulation.

### IV-3-2- Présentation de la cellule CIGS /CdS/ ZnO

La figure IV-6 représente la structure obtenue de la cellule à l'aide du logiciel SCAPS-1D.

La cellule est composée de l'hétérojonction suivante : CIGS /CdS/ ZnO.

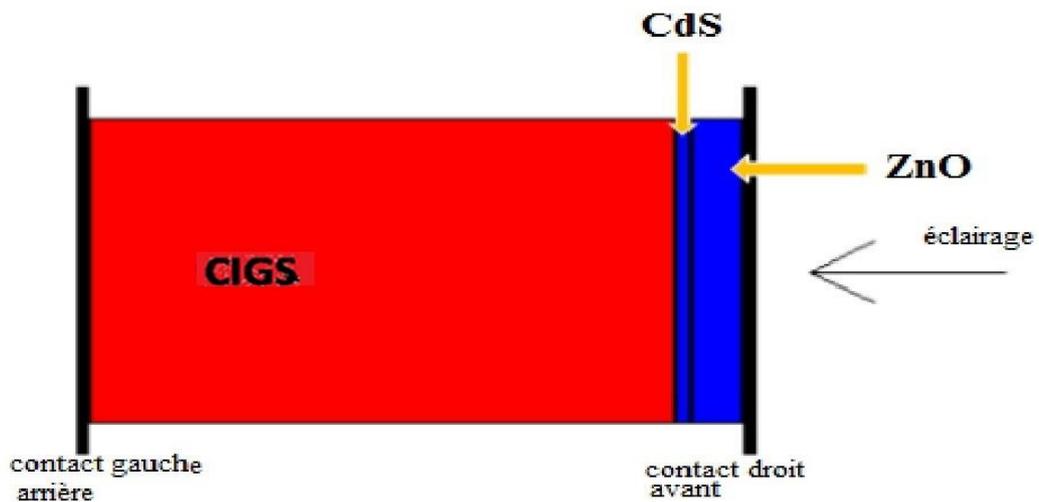


Figure IV-6 : Schéma de la cellule solaire à simuler.

#### IV-3-2-1- Paramètres de la cellule

Le tableau suivant représente les paramètres qui correspondent à chacune des couches de notre cellule.

**Tableau IV-1** : paramètres de chaque couche de la cellule CIGS /CdS/ ZnO.

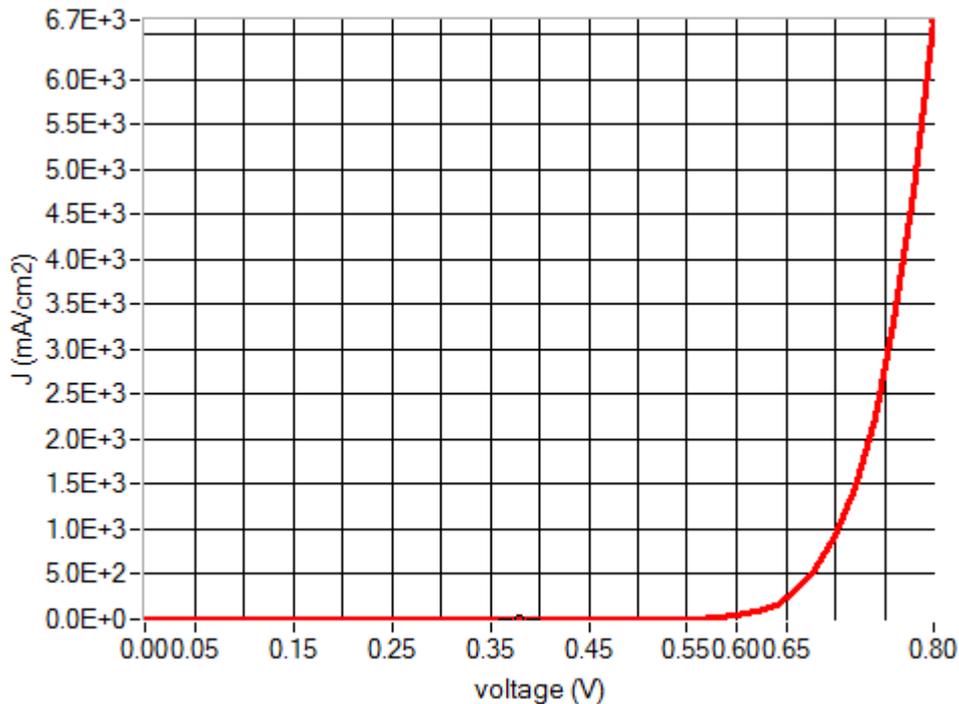
propriétés du matériau	p-CIGS	n-CdS	n-ZnO
<b>Epaisseur (<math>\mu m</math>)</b>	1.0	0.05	0.05
<b>Bande de gap (eV)</b>	1.1	2.4	3.3
<b>Affinité électronique (eV)</b>	4.45	4.2	4.450
<b>Constante diélectrique</b>	13.6	10	9
<b>Densité <math>N_c</math> (<math>1/cm^3</math>)</b>	2.200 E+18	2.200 E+18	2.200 E+18
<b>Densité <math>N_v</math> (<math>1/cm^3</math>)</b>	1.800 E+19	1.800 E+19	1.800 E+19
<b><math>\mu_e</math> (<math>cm^2/V.s</math>)</b>	1.000 E+2	1.000 E+2	1.000 E+2
<b><math>\mu_h</math> (<math>cm^2/V.s</math>)</b>	2.500 E+1	2.500 E+1	2.500 E+1
<b>Donneur <math>N_D</math> (<math>cm^{-3}</math>)</b>	1.000 E+1	1.000 E+17	1.000 E+18
<b>Accepteur <math>N_A</math> (<math>cm^{-3}</math>)</b>	2.000E+16	1.000E+0	1.000E+0

Dans la deuxième phase des travaux porte sur le traçage des courbes de rendement à l'aide du logiciel origin. C'est un outil complet d'analyse de données et de mise en forme graphique fournissant tout un éventail de fonctionnalités (analyse de pics, ajustement de courbes, statistiques...).

### IV-3-2-2- Résultats et discussions

#### a- Caractéristique J-V

Les caractéristiques courant-tension obtenues et présentées par la figure IV-7. nous attestent les bonnes performances de la cellule qui se comporte comme un redresseur. Ces performances seront améliorées à la fin de cette étude par l'optimisation de la couche antireflet.



**Figure IV-7 :** Caractéristique J-V de la cellule CIGS /CdS/ ZnO.

La caractéristique  $J(V)$  nous montre que la cellule PV est une source de courant constant pour des faibles valeurs de la tension avec un courant approximativement égal au courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ). Avec l'augmentation de la tension, le courant commence à diminuer exponentiellement jusqu'à la valeur zéro où la tension est égale à la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ). Sur la gamme entière de tension, il y a un seul point où la cellule fonctionne au rendement le plus élevé; c'est le point de puissance maximum MPP.

Le but de la conception des systèmes photovoltaïques est de faire fonctionner le système à ce point, ce qui est compliqué du fait que le point maximum de puissance change avec l'éclairement et la température.

Le facteur de base qui décrit la qualité de la courbe  $J(V)$  est le facteur de forme [FF]

$$FF = \frac{P_m}{V_{CO}I_{CC}} \quad (IV. 3)$$

$V_{oc}$  et  $I_{cc}$  la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit, respectivement. Le facteur de forme est utilisé pour évaluer la forme carrée de la courbe  $J(V)$ .

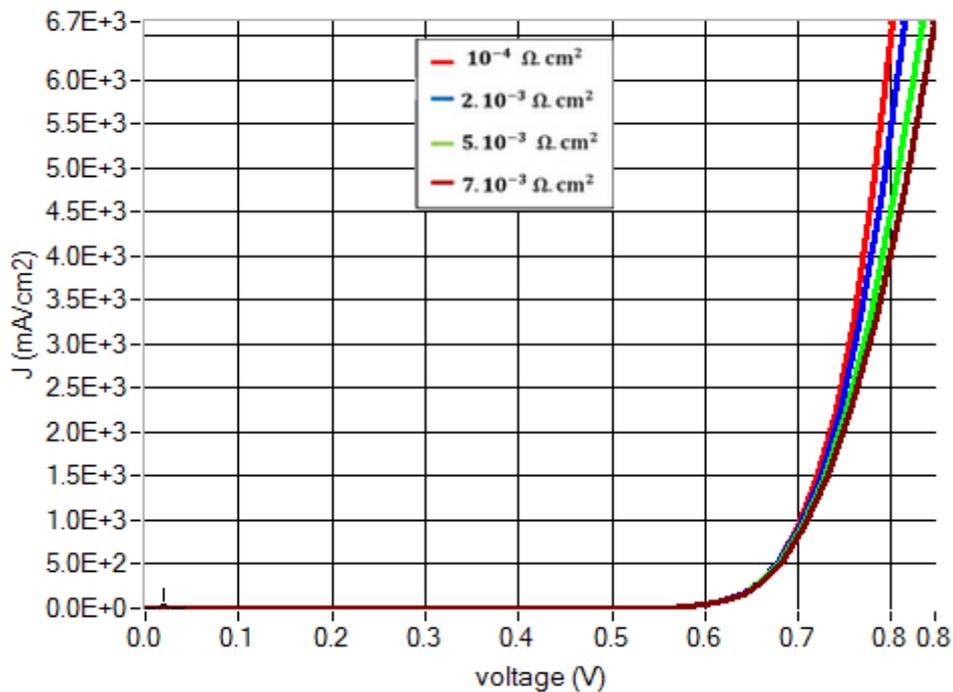
Plus le facteur de forme est grand, plus le rendement de la cellule et sa puissance maximale sont grands. Le facteur de forme est employé pour comparer les différentes cellules solaires dans les mêmes conditions de référence [83].

	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF (%)	rendement (%)
Cellule	35,87	0,68	83,80	21.05

**Tableau IV-1** : Paramètres photovoltaïques déduits de la simulation de la cellule CIGS /CdS/ ZnO.

### b- Influence de quelques paramètres sur la caractéristique J-V

#### ➤ Influence de la résistance série

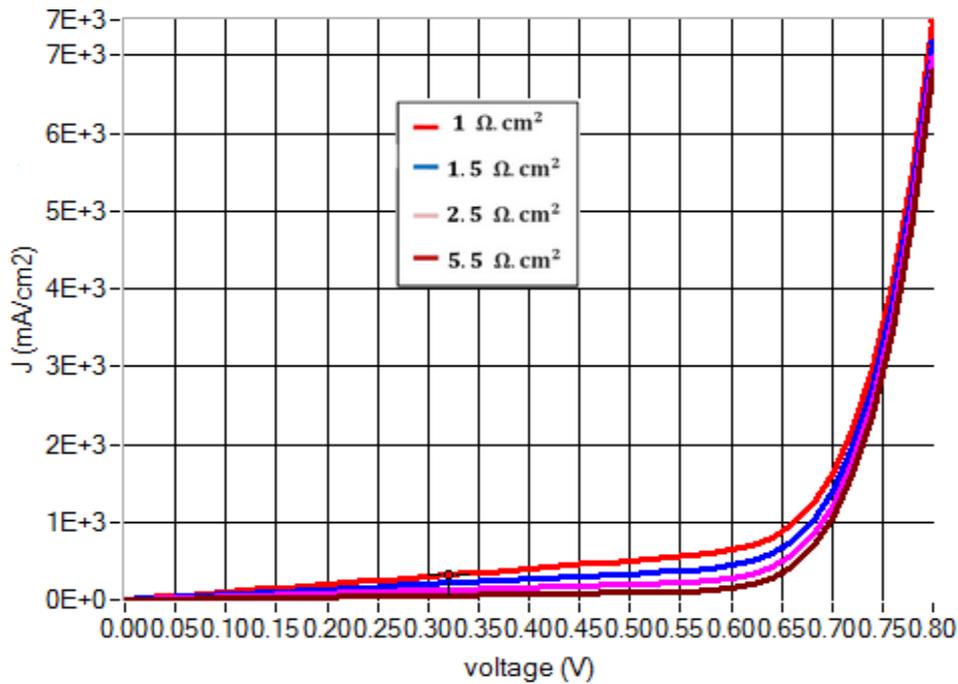


**Figure IV-8** : Influence de la résistance série sur la caractéristique J-V.

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), ce qui va limiter le rendement de conversion [84].

### ➤ Influence de la résistance parallèle (shunt)

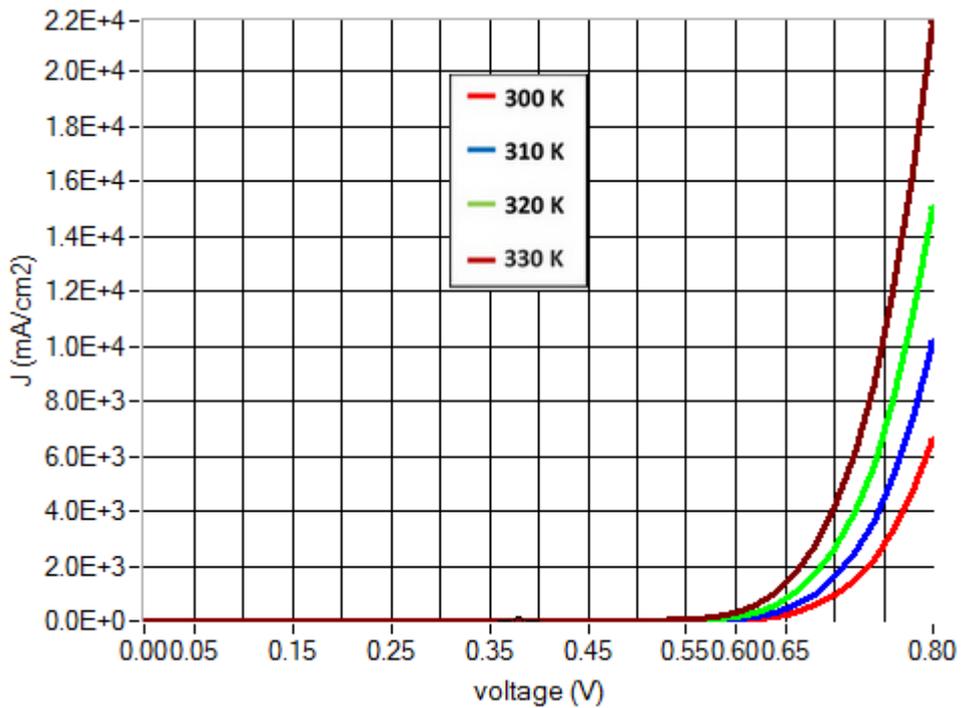
La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En général, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant.



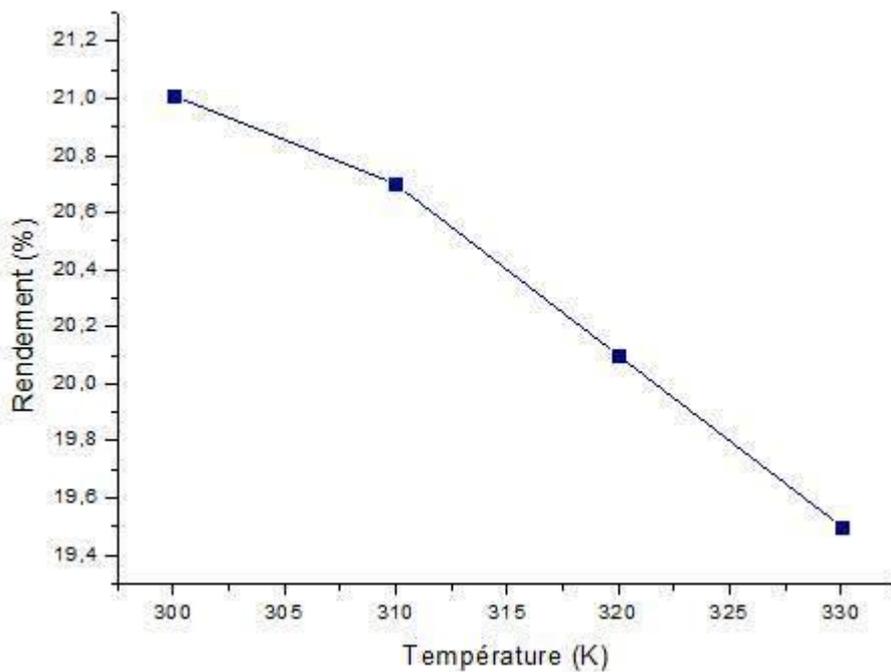
**Figure IV-9 :** Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique J-V.

La figure ci-dessus montre l'influence de la résistance en parallèle  $R_p$  sur la caractéristique  $J-V$  et de là on peut dire qu'avec l'augmentation de la résistance parallèle ( $R_p$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) marque une légère diminution. Quand le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) augmente, on note une augmentation de la pente de la courbe  $J-V$  de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant [84].

### ➤ Influence de la température



**Figure IV-10 :** Influence de la température sur la caractéristique J-V.

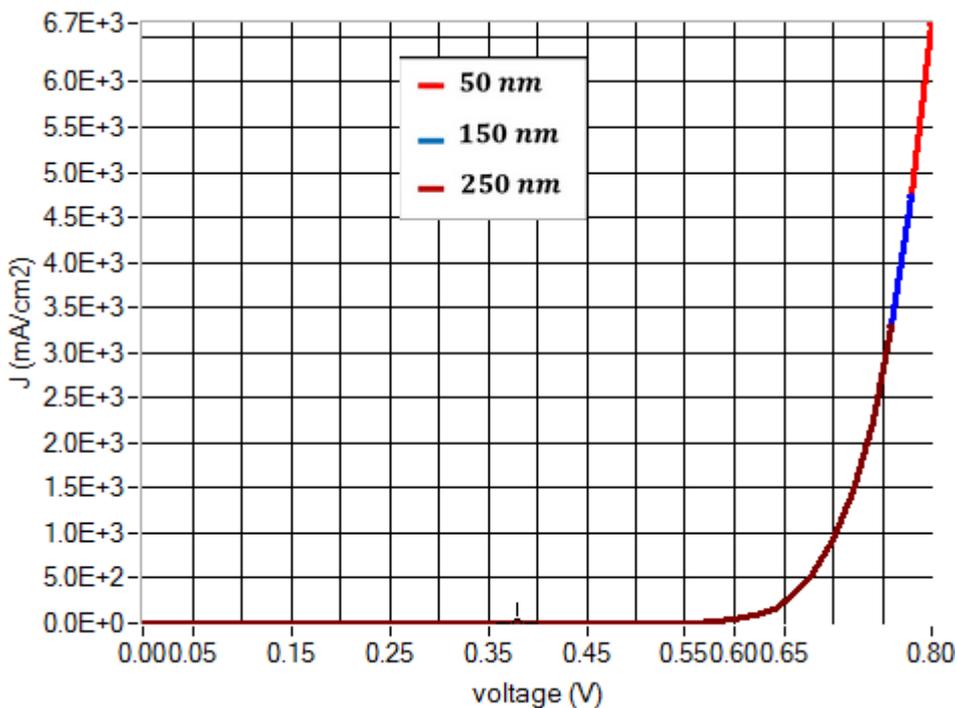


**Figure IV-11:** Influence de la température sur le rendement.

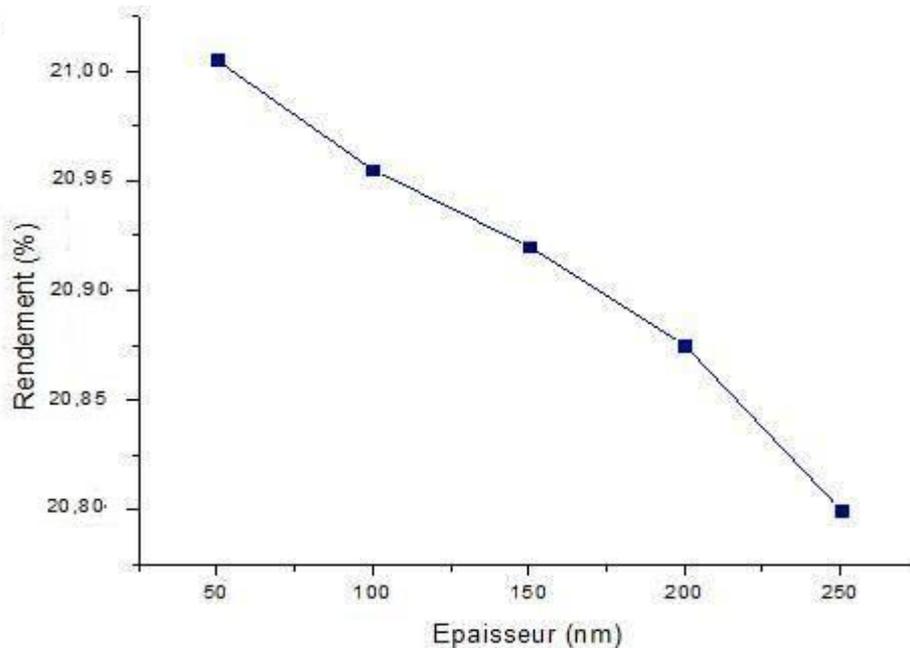
L'influence de la température sur les paramètres de la cellule est nettement visible sur la figure IV-10, on constate que la cellule photovoltaïque fonctionne bien à la température ambiante c'est-à-dire elle aura le maximum du rendement à cette température et dès que celle-ci commence à croître, les paramètres de la cellule extraits de la courbe J(V) diminuent ce qui induit la décroissance du rendement [84].

Lorsque la température augmente, le nombre des électrons excités ainsi augmente ce qui entraîne le freinage de ces derniers et par conséquent la diminution des paires électrons-trous qui doivent arriver aux contacts métalliques de la cellule, ce problème est inévitable grâce au milieu d'installation de la cellule mais nous pouvons le minimiser en réalisant celle-ci à l'aide des matériaux résistant un peu plus la température.

### ➤ Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO



**Figure IV-12** : Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO sur la caractéristique J-V.



**Figure IV-13 :** Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO sur le rendement.

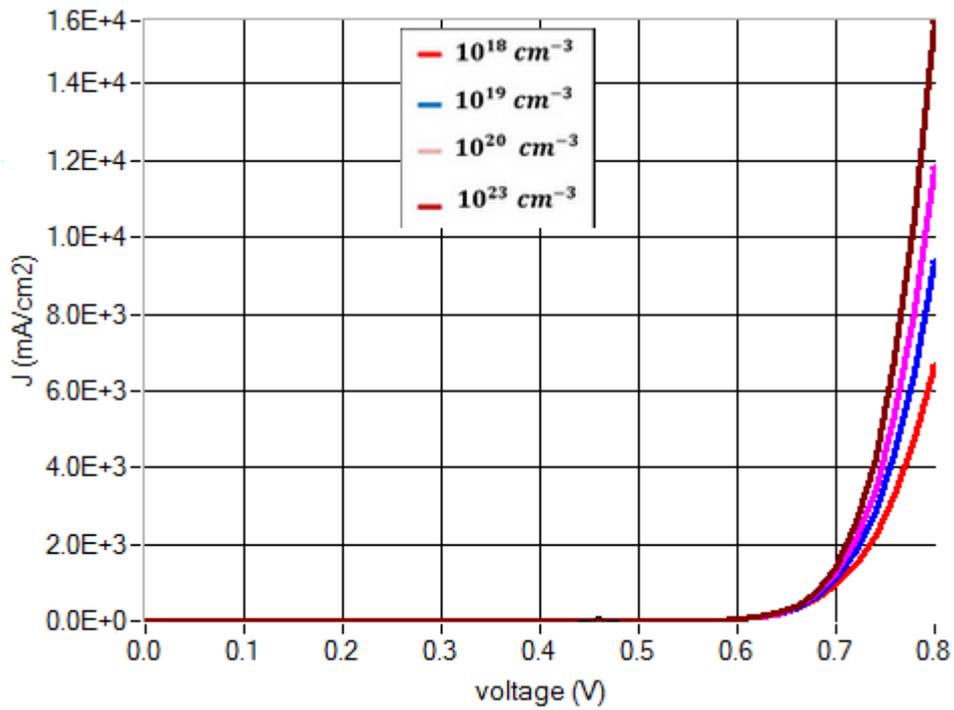
Les figures IV-12 et IV-13 montrent l'influence de l'épaisseur de la couche mince de ZnO sur la caractéristique  $J-V$  et sur le rendement. Pour les petites épaisseurs le phénomène de générations de paires électrons-trous se passe près des interfaces ce qui réduit le nombre de paires électrons-trous. En d'autres termes la couche de l'émetteur doit être la plus mince possible pour qu'elle puisse faire passer toute l'intensité de la lumière. Lorsque l'épaisseur de la couche antireflet augmente, la durée de vie des porteurs ne leur permet pas de traverser la jonction, ils se recombinent. Par rapport aux porteurs minoritaires, ils ont plus la possibilité de traverser la jonction pour être collectés. Donc la couche antireflet augmente le flux transmis. On conclut que plus la couche est mince plus le rendement augmente [85].

### ➤ Influence du dopage de la couche de ZnO

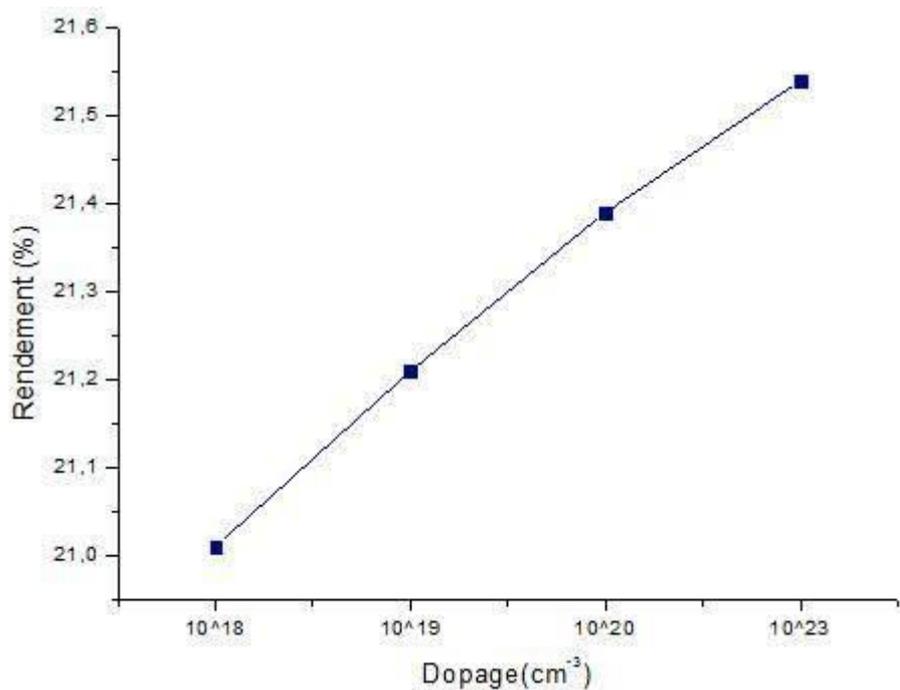
Les figures IV-14 et IV-15 illustrent respectivement l'influence du dopage sur la caractéristique  $J-V$  et le rendement, on constate l'augmentation du rendement avec l'augmentation du dopage de la couche de ZnO.

Le matériau est fortement influencé par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie. D'un autre côté, lorsque le dopage de la couche ZnO augmente, la barrière de potentiel dans l'hétérojonction CIGS /CdS/ZnO diminue, et permet une augmentation de la zone

de charge d'espace, d'où une amélioration de la collecte des porteurs photo générés et donc une augmentation du rendement de conversion [85].



**Figure IV-14 :** Influence du dopage de la couche de ZnO sur la caractéristique J-V.



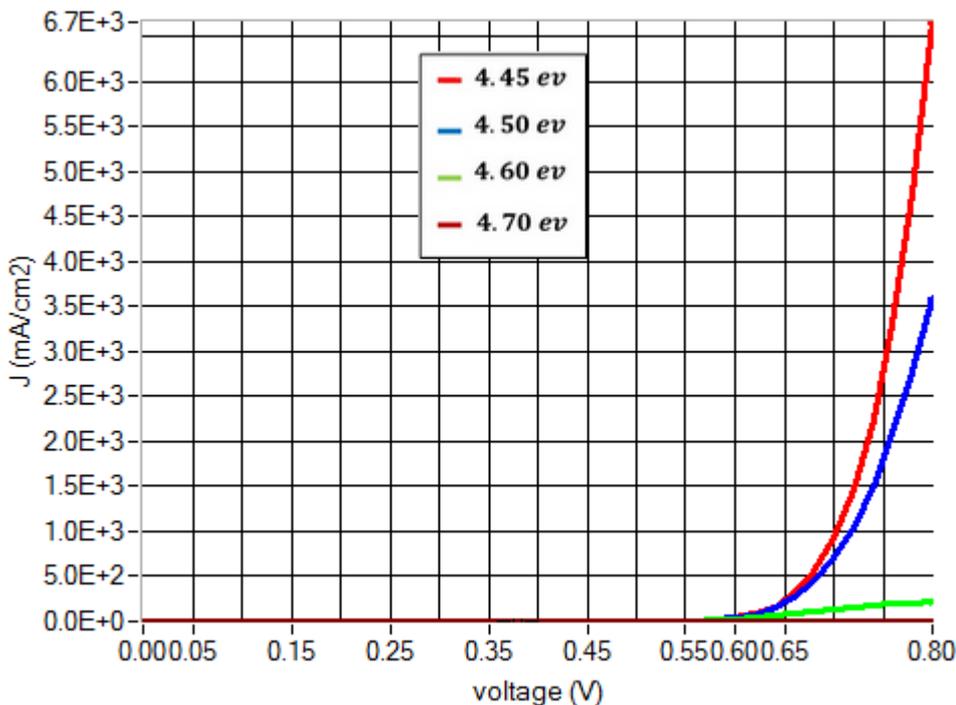
**Figure IV-15 :** Influence du dopage de la couche de ZnO sur le rendement.

### ➤ Influence de l'affinité électronique (bande offset) $\chi_{ZnO}$

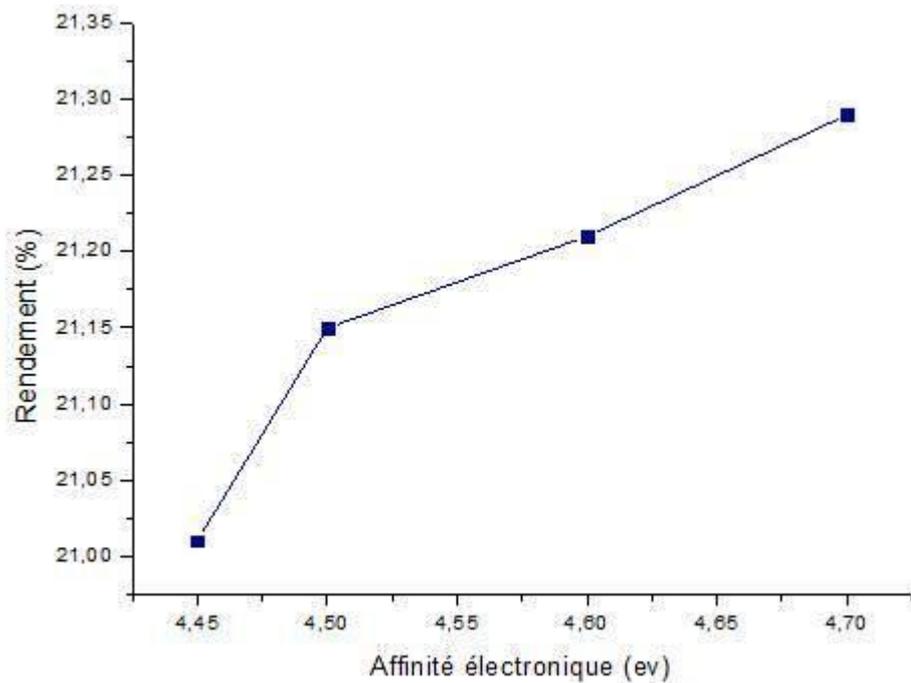
Les différences entre les valeurs des gaps et les affinités électroniques engendrent une discontinuité au niveau du raccordement des bandes de conduction et de valence ( Spike). Donc, pour examiner l'influence de l'affinité électronique de la couche ZnO ( $\chi_{ZnO}$ ) dans la cellule solaire standard, on agit sur la variation de :

$$\Delta E_{C1} = q (\chi_{CdS} - \chi_{ZnO}) \quad (IV.4)$$

Où  $q$  est la charge de l'électron  $\chi_{ZnO}$  et  $\chi_{CdS}$  sont les affinités électroniques des matériaux et  $\Delta E_{C1}$  est la différence d'énergie dans la bande de conduction. Les figures (IV.16) et (IV.17) montrent respectivement la variation de  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , et le rendement dans la cellule avec le changement de l'affinité électronique de la couche ZnO ( $\chi_{ZnO}$ ). On remarque que  $J_{sc}$  et le rendement augmentent avec l'augmentation de  $\chi_{ZnO}$  [85].

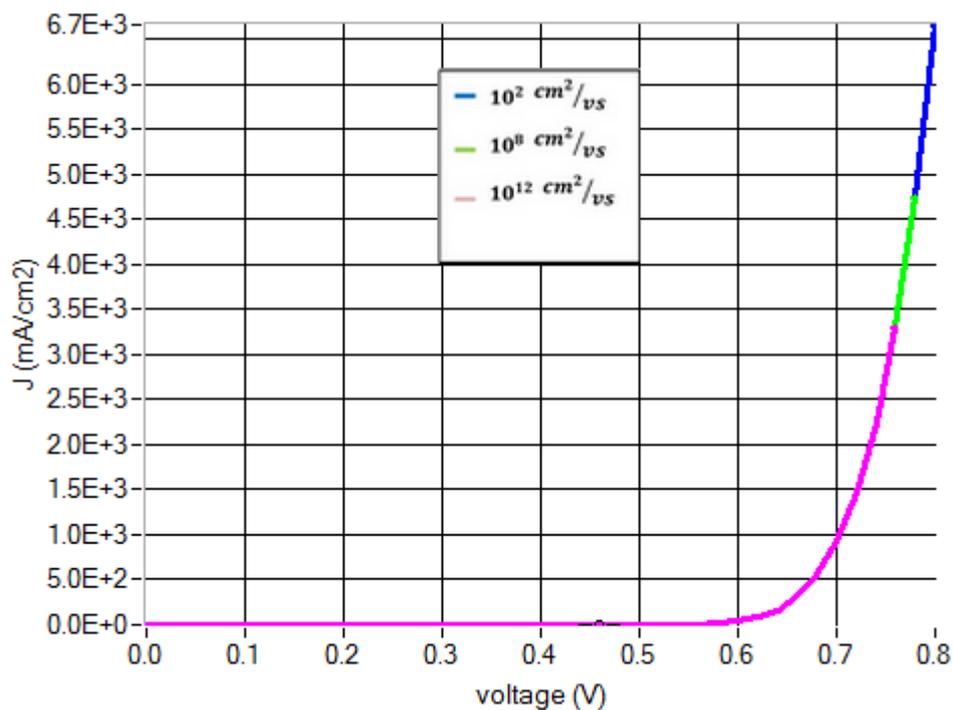


**Figure IV-16 :** Effet de l'affinité électronique  $\chi_{ZnO}$  de la cellule inférieure sur les caractéristique J-V.

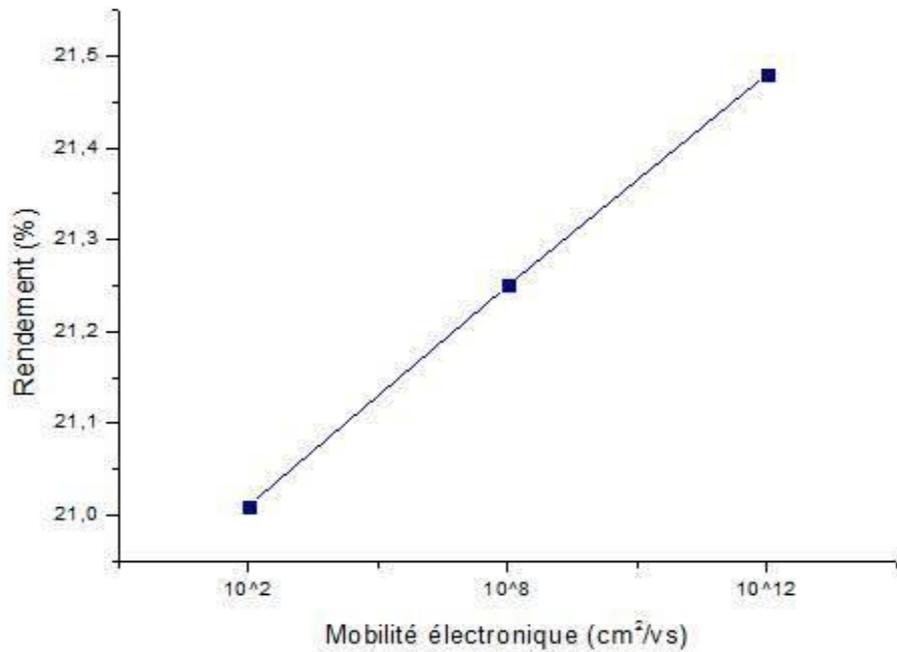


**Figure IV-17:** Effet de l'affinité électronique  $\chi_{\text{ZnO}}$  de la cellule inférieure sur le rendement.

### ➤ Influence de la mobilité électronique de la couche de ZnO



**Figure IV-18 :** Influence de la mobilité des électrons de la couche de ZnO sur la caractéristique J-V.



**Figure IV-19** : influence de la mobilité de la couche de ZnO sur le rendement.

La figure IV-18 montre l'influence de la mobilité sur la caractéristique ( $J$ - $V$ ). Des valeurs élevées de mobilité signifient des délais transitoires plus courts, ceci implique une diminution de perte d'électrons dans la cellule, donc un rendement plus élevé. Pour de faibles valeurs de mobilité des électrons, il en résulte des tensions élevées en circuit-ouvert. En revanche dans la figure IV-19 on constate que le rendement augmente en fonction de la mobilité des électrons [86].

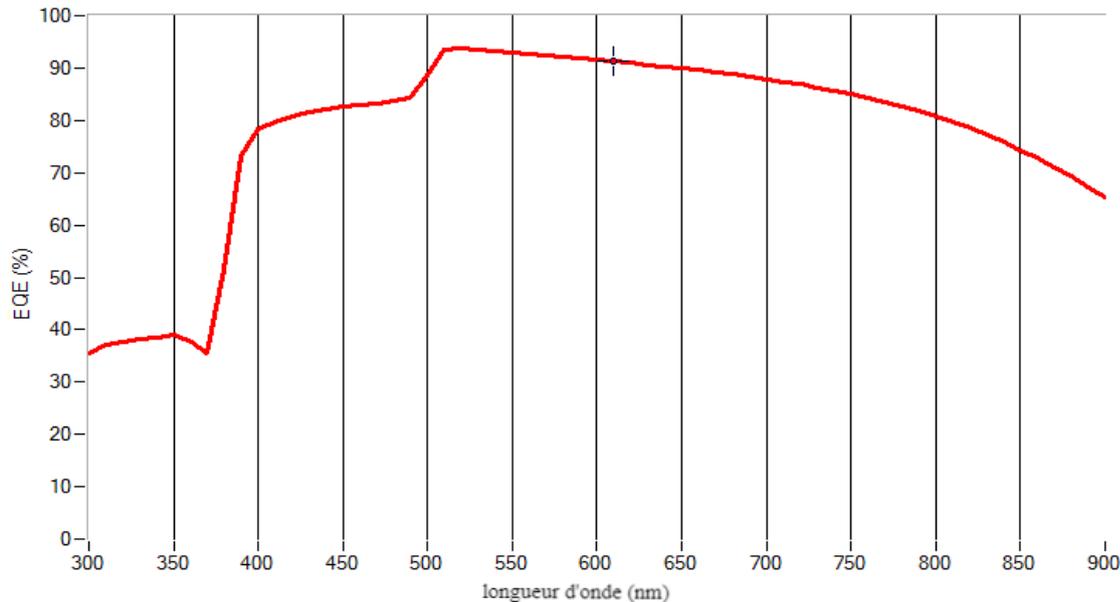
### c- Rendement quantique Externe de la cellule solaire CIGS /CdS/ ZnO

La couche CIGS engendre un champ électrique interne et joue un rôle important dans le fonctionnement des cellules solaires. En effet, elle a quatre effets sur les performances des cellules solaires :

- Repousser les électrons vers la jonction n-p et améliorer le rendement de collecte des porteurs,
- Motiver le piégeage des porteurs minoritaires,
- Diminuer les recombinaisons en surfaces arrière des porteurs minoritaires,
- Augmenter l'absorption optique d'une partie du spectre solaire incident.

Le rendement quantique externe EQE est le rapport du nombre de charges collectées sur le nombre de photons incidents. Elle donne une idée de la réponse spectrale du dispositif

suivant les différentes longueurs d'onde incidentes. Nous utilisons pour obtenir la figure IV-20, un éclairement constant de  $0.1\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , et des longueurs d'onde incidentes allant de 300 nm à 900 nm couvrant ainsi les domaines de l'Ultraviolet, du Visible et du Proche-Infrarouge [85].

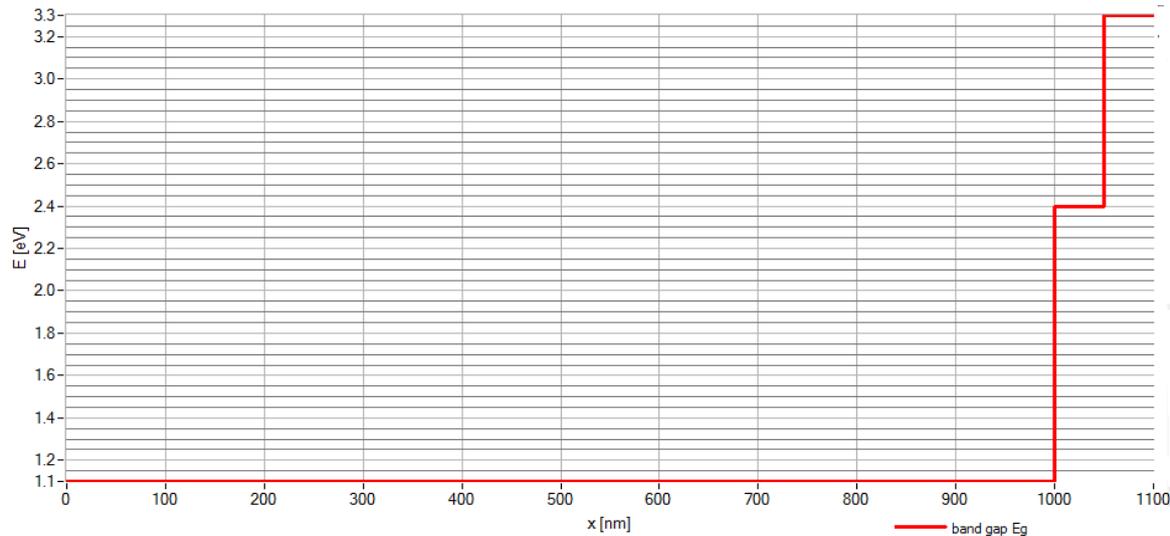


**Figure IV-20:** Rendement quantique Externe de la cellule solaire CIGS /CdS/ ZnO.

La variation du rendement quantique externe de la cellule avec une couche antireflet en ZnO d'épaisseur 50nm, montre une zone d'absorption maximale qui s'étend de part et d'autre du domaine du visible. La réponse est supérieure à 35% dans le domaine de l'ultraviolet. Elle atteint une valeur maximale de 92.28% pour une longueur d'onde incidente de 520 nm qui correspond à une énergie de 1.77eV. Cette valeur s'annule dans le domaine du proche infrarouge car les longueurs d'ondes incidentes s'accompagnent d'énergie plus faible que le gap optique de la base en  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  [85].

### c- Energie de gap

La jonction électrique est formée par le contact entre le CIGS de type p et les couches CdS/ZnO de type n. Le photocourant est généré dans le CIGS, puis traverse les couches de CdS/ZnO. L'avantage de l'hétérojonction est de limiter les pertes optiques dans la zone n d'une homojonction classique.



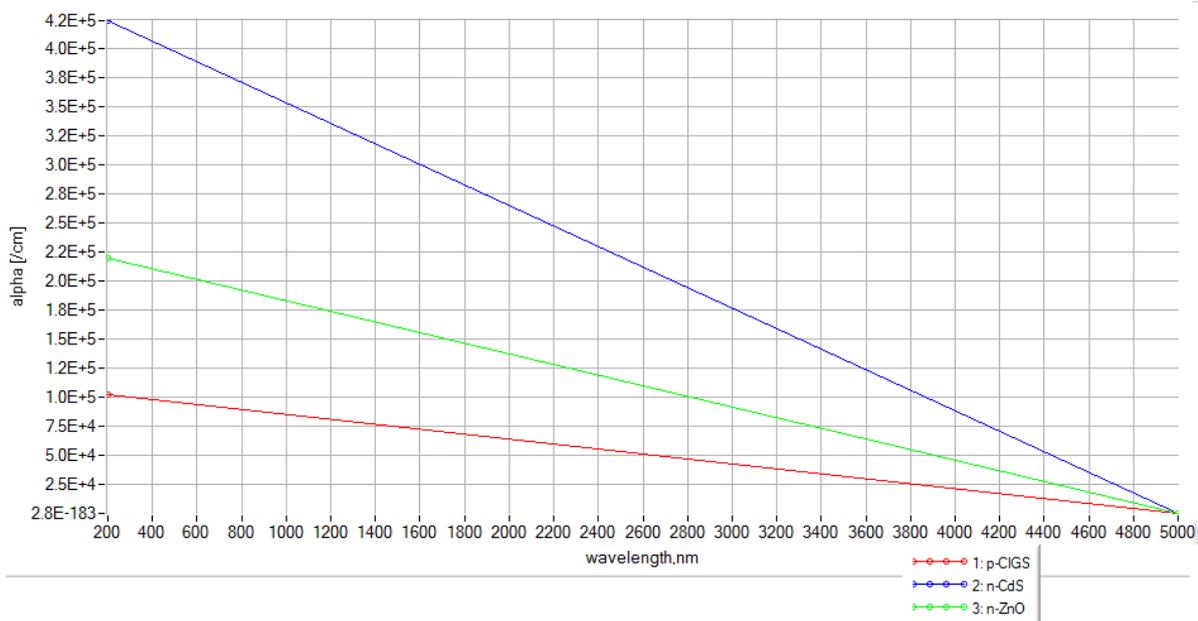
**Figure IV-21** : Energie de gap en fonction de la distance de gradient  $X$ .

La Figure montre IV-21 le diagramme de bandes associé aux cellules CIGS. Au voisinage de l'interface CIGS/CdS, les bandes d'énergie sont courbées par la variation du potentiel électrostatique à travers la jonction p-n. L'interface entre CIGS et couche tampon présente une discontinuité d'énergie positive (appelée spike) au niveau de la bande de conduction du CIGS. Cette discontinuité doit posséder une hauteur optimale pour les performances des dispositifs : trop haute, elle s'oppose au passage des électrons photogénérés, réduisant le photocourant ; trop basse, voire négative, elle augmente le courant d'obscurité et les pertes par recombinaison. La couche de ZnO intrinsèque complète la couche tampon sur le plan électrique. Du fait de largeurs de bande interdite élevées, les couches de ZnO et tampon laissent passer le rayonnement visible (d'où leur nom de couches fenêtre), qui est ensuite absorbé dans la couche de CIGS.

Une rupture majeure pourrait venir de la constatation que la largeur de bande interdite des cellules actuelles de CIS d'environ 1,1 eV, n'est pas optimale pour la conversion photovoltaïque, la valeur théorique optimale se situant autour de 1,5 eV. Ainsi, l'augmentation de la bande interdite des absorbeurs CIGS vers 1,5 eV par ajout de gallium (Ga), pourrait être la clé d'un nouveau saut de rendement.

En ajoutant la couche tampon CdS, l'espace de bande résultant s'étend à 1.5 à 2.4. On assiste donc progressivement au remplacement des couches à base de ZnO, dont la bande interdite est beaucoup plus grande (jusqu'à 3,6 eV au lieu de 2,4 eV), et qui permet aussi de se passer de l'utilisation du cadmium dans la filière CIS [87].

### d- Absorption optique



**Figure IV-22** : coefficient d'absorption en fonction de longueur d'onde  $\lambda$ .

Nous proposons différentes solutions permettant de maximiser l'absorption dans une couche de CIGS amincie. Des simulations optiques de l'absorption de la lumière dans un empilement de matériaux correspondant à une cellule CIGS avec un absorbeur de 500 nm sont réalisées.

La mesure du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente permet la détermination de la valeur de la bande interdite d'un semi-conducteur. Puisque les couches de CdS sont généralement utilisées comme fenêtre optique dans les cellules solaires à base de CIGS, leurs propriétés optiques en l'occurrence la transmittance dans le visible est une propriété importante.

Un domaine caractérisé par une forte absorption et une faible transmission du rayonnement lumineux par la couche, et qui correspond à l'absorption fondamentale pour  $\lambda < 500$  nm pour ces films.

En effet, la couche tampon épaisse se traduira par une plus grande perte de photons dans la cellule. Lorsque la couche tampon est plus épaisse, une plus grande quantité d'énergie est absorbée par cette couche engendrée par le transport des photons.

Par conséquent, elle conduirait à une diminution des photons qui ont atteint la couche absorbante. Une diminution du nombre de photons dans la couche d'absorbeur diminuerait le rendement quantique de la cellule solaire [88].

### IV-4- Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons tout d'abord deux modèles électriques caractérisant les cellules photovoltaïques, on s'est intéressé au modèle à une diode. Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que  $R_s$  est grande ou que  $R_{sh}$  est faible.

Nous voyons ensuite par le concept de la simulation l'influence de différents paramètres sur la caractéristique  $J-V$  de la cellule CIGS/CdS/ZnO et sur sa structure de bande d'énergie. Nous essayons d'optimiser le rendement de la cellule solaire et nous trouvons que la meilleure structure doit avoir une couche antireflet en OTC pour minimiser les pertes et cela dans le but d'améliorer et de développer les dispositifs photovoltaïque.

### Conclusion générales et perspectives

En raison de l'épuisement des énergies fossile et de la pollution qui en découle, la filière photovoltaïque a pris, ces dernières années, une ampleur considérable et son développement est devenu une nécessité pour toute l'humanité.

Hormis les cellules solaires classiques à base de silicium, une nouvelle technologie a vu le jour, dites «couches minces ». Elle repose sur l'utilisation de matériaux avec une épaisseur de l'ordre de quelques microns qui est suffisante pour la conversion photovoltaïque étant données que leurs coefficients d'absorption des photons est très supérieurs à celui du silicium cristallin. Ces matériaux sont donc déposés en couche très mince sur un substrat (verre, céramique, polymères). Le coût de fabrication de ce type de cellule est faible par rapport aux cellules classiques.

Notre travail a concerné optimisation des paramètres optoélectroniques de matériaux photovoltaïque.

Le choix du matériau est une étape très importante et qui doit être étudiée avant de commencer de travailler sur n'importe quelle structure, nous avons choisi le matériau (Cu(InGa)Se<sub>2</sub> (CIGS)) parce qu'il a presque les même paramètres de maille, une grande discontinuité au niveau de bandes énergétiques et une vitesse de recombinaison très faible en surface donc réduction des pertes optiques et de la résistance série.

Parmi les étapes citées dans un cahier de charge de réalisation d'une cellule solaire, le procédé de fabrication est l'élément de base pour avoir un bon rendement et ce procédé se diffère d'une filière photovoltaïque à une autre. Quelque soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Nous avons étudié l'effet des couches conductrices et transparentes TCO (ZnO) sur les performances des cellules solaires CIGS. Nous avons utilisé un logiciel d'analyse numérique unidimensionnelle, analyse microélectronique et photonique des structures (SCAPS) pour déterminer les meilleurs paramètres. Habituellement, les paramètres à optimiser sont la température, résistance série, parallèle, l'affinité électronique, le dopage, la mobilité des électrons et l'épaisseur des couche ZnO sur les paramètres : le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de la cellule CIGS/CdS/ZnO. Nous constatons que les cellules solaires sont beaucoup plus performantes avec des températures basse, une résistance série faible et une parallèle qui tend vers l'infini, une couche mince de ZnO avec les caractéristiques suivantes: la plus faible épaisseur possible, un grand dopage et enfin une forte mobilité électronique.

## Conclusion générales et perspectives

---

Les paramètres optimaux dépendent de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau du substrat, de la qualité des contacts ohmiques, de la vitesse de recombinaison en faces avant et arrière, etc....

L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

La modélisation d'une cellule solaire est l'outil performant qui nous permettra par simulation, de lier les caractéristiques photovoltaïques de cette cellule avec les propriétés internes du matériau et la technologie de fabrication en vue d'améliorer les performances de la cellule.

### Références

1. J. Royer, T. Djiako, E. Schiler, B. Sadasy, “Le pompage photovoltaïque”, Université d'Ottawa,1998.
2. N. Oleksiy, “ Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigués”, thèse de doctorat, Institutue nationale des sciences appliquées, Lyon,2005.
3. M. Ouddah, “Etude du silicium poreux destine aux cellules solaires”, Thèse de magister, Université Mentouri, Constantine, 2009.
4. Kirchartz T, Taretto K, Rau U. Efficiency limits of organic bulk heterojunction solar cells. *The J PhysChemC*2009;113:17958–66.
5. A. Ricaud – Photopiles solaires « De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés ». Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne (1997).
6. J. I. Pankove, Prentice-Hall Inc. Englewood N.J. (1971) 36.
7. J. Marek, “Light-beam-induced current characterization of grain boundaries”, *J. Appl. Phys*, vol 55, 1984, p.318.
8. Y. Sayad, “Interaction Laser-Semiconducteur : Contribution à l’étude de la technique LBIC-application au silicium photovoltaïque”, Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine,2009.
9. <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>.
- 10.M. LASLAD, simulation numérique des cellules solaires troisième génération pour des applications spatiales, thèse de magister, université de Sétif,2014.
11. Roshanak Radbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges,2008.
12. R.Sridhar et al « Modeling of PV Array and Performance Enhancement by MPPT Algorithm ». *International Journal of Computer Applications*, Volume 7– No.5, 0975 – 8887 September2010.
13. N. BANDADLA, optimisation des émetteurs sélectifs et passivables des cellules solaires coventionnelles à base de mc\_si, mémoire de magister, université de Tlemcen, 2012.
14. K. AMARA, Contribution à l’étude d’une conception d’une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distributionélectrique moyenne tension, thèse de magister, université de Tizi- Ouzzou,2015
15. M. C. ABDELLI, Etude des cellules photovoltaïques organiques, mémoire de master, université de Tlemcen,2013.

## REFERENCES

---

16. S. PETIBON, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.
17. M. BELARBI, Modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire sensibilisée par colorant, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013.
18. F. NEMMAR BELHOCINE, Etude et réalisation de cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organiques, thèse de doctorat, université de Tizi- Ouzzou.
19. N. Ott, M. Nerdling, G. Muller, R. Brendel, and H. P. Strunk, "Evolution of the microstructure during annealing of porous silicon multilayers", *Journal of Applied Physics*, vol 95, 2004, p.497.
20. R. G. Lemus, F. B. Hander, C. H. Rodríguez, J.M. Martinez, "Optical and compositional characterisation of stain-etched porous silicon subjected to anodic oxidation and thermal treatments", *Mater. Sci. Eng. B*, vol 101, 2003, p.249.
21. M. MISSOUM, Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie, thèse de magister, université de Chelf, 2011
22. Z. Bendjellouli, "Contribution a la modélisation d'une cellule solaire", Mémoire de magister, Université de Bechar, 2009.
23. S. M. Ait-Cheikh, "Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques", Thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique (ENP), Alger, 2007.
24. J.M. Marshall and D. Dimova-Malinovska, "Photovoltaic and Photoactive Materials Properties, Technology and Applications", vol. 80, p. 117. London, 2002. ISBN 1-4020-0823-6
25. A. Ricaud, Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 1997, p. 332.
26. M.A. Green, *IEEE Trans Electron Devices* (1984) 671-678.
27. M. Swanson, *Proceeding of the 20<sup>th</sup> European Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, June 2005, pp. 584-589.
28. Youngkuk Kim, Sungwook Jung, Minkyu Ju et al, *Solar Energy* 85 (2011) 1085-1090.
29. B.S. Richards, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Australia, 2002.
30. Jaakko Harkonen, *Processing of high efficiency silicon solar cells*, Ph.D thesis, Helsinki University of Technology Reports in Electron Physics 2001/28 Espoo, October 2001
31. G. Gourdin, "Solar cell technology (current state of the art)", 2007.
32. H.M. Yates, P. Evans, D.W. Sheel, Z. Remes, M. Vanecek, *Thin Solid Films* 519 (2010) 1334-1340.
33. C. Honsberg, S. Bowden, *Photovoltaic: Devices, Systems and Applications*, Sydney, Australia, University of New South Wales, 1998.
34. H. Hahn, G. Frank, W. Klingler, A. D. Meyer and G. Storger, *Z. Anorg. Allg. Chem.* 271 (1953) 153.
35. S. Wagner, J. L. Shay, P. Migliorato, and H. M. Kasper, *Appl. Phys. Lett.* 25 (1974) 434.
36. B. R. Pamplin, *Progress in Crystal Growth Charact.* 1 (1979) 331.
37. I. Bouchama, "Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ", Thèse de doctorat, Université de Sétif (2012).
38. D. Rudmann, Thèse de PhD, Suisse Federal Institute of Technology Zurich, Suisse (2004).

## REFERENCES

---

39. M. Chandramohan, S. Velumani, T. Venkatachalam, *Materials Science and Engineering B* 174 (2010) 205.
40. J. E. Jaffe and A. Zunger, *Phys. Rev. B* 28 (1983) 5822.
41. C. Abrahams and J. L. Bernstein, *J. Chem. Phys.* 59 (1973) 5415.
42. W. S. Chen, J. W. Stewart, W. E. Devany, R. A. Mickelson and B. J. Stanberg, *Proc. Of the 23rd Photo. Spec. Conf.* (1993) 577.
43. M. V. Yakushev, A. V. Mudryib, V. F. Gremenokb, E. P. Zaretskayab, V. B. Zalesskib, Y. Feofanova and R. W. Martina, *Thin Solid Films* 451 – 452 (2004) 133.
44. B. J. Stanbery, *Crist. Rev. Solid State*, 27 (2002) 73.
45. H. Neumann, W. Horig, E. Reccius, W. Moller and G. Kuhn; *Solid State Comm.* 27 (1978) 449.
46. J. I. Pankove, Prentice-Hall Inc. Englewood N.J. (1971) 36.
47. J. R. Tuttle, D. Albin, R. J. Matson and R. Noufi, *J. Appl. Phys.* 66 (1989) 4408.
48. I. Lubomirski, K. Gartsman, D. Cahen, *J. Appl. Phys.* 83 (1997) 4678.
49. Oukachmih, *Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse* (2003) 19.
50. D.Abou-Ras, *Helmholtz Center Berlin for Materials and Energy, Allemagne.*
51. U.Rau, M.Schmitt, F.Engelhardt, O.Seifert, J.Parisi, W.Riedl, J.Rimmasch and F.Karg "Impact of Na and S incorporation on the electronic transport mechanisms of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells"*Sol. State Comm.* 107 (1998) 59.
52. L.Kronik, D.Cahen, and H.W.Schock, "Effect of Na on CuInSe<sub>2</sub> and its solar cell performance"*Adv. Mater.* 10 (1998) 31.
53. S.H.Wei, S.B.Zhang, and A.Zunger, "Effects of Na on the electrical and structural properties of CuInSe<sub>2</sub> thin films" *J. Appl. Phys.* 85 (1999) 7214.
54. M.Bodegård, L.Stolt, and J.Hedström, The influence of Na on the grain structure of CIS films for photovoltaic applications, *Proc. 12th EUPVSEC, Amsterdam* (1994) 1743.
55. M.Ruckh, D.Schmid, M.Kaiser, R.Schäffler, T.Walter, and H.W.Schock "Influence of substrates on the electrical properties of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin films" *Sol.Energy Mat. Sol.Cells* 41 (1996) 335
56. V.Lyahovitskaya, Y.Feldman, K.Gartsman, H.Cohen, C.Cytermann, and D.Cahen, "Na effect on CuInSe<sub>2</sub>: distinguishing bulk from surface phenomena" *J. Appl. Phys.* 91(2002) 4205.
57. D.Rudmann, G.Bilger, M.Kaslin, F. J.Haug, and H.Zogg, "Effects of NaF coevaporation on structural properties of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin films" *Thin Solid Films* 431(2003)37.
58. K. Badeker, "Electrical Conductivity and Thermo-Electromotive Force of Some Metallic Compounds", *Ann. Phys.* 22 (1907) 749.
59. [www.scopus.com](http://www.scopus.com).
60. [www.nanomarkets.net](http://www.nanomarkets.net).
61. J. Garnier ; *Thèse de Doctorat "Elaboration de Couches Minces d'oxydes Transparents et Conducteurs Par Spray CVD Assisté Par Radiation Infrarouge Pour Applications Photovoltaïques"*, Université d'Angers(2009).

## REFERENCES

---

62. www.nrel.gov.
63. D. J. Goyal, C. Agashe, M. G. Takwale, B. R. Marathe, V. G. Bhide;  
J. Mater. Sci. 27 (1992) 4705.
64. D. S. Ghosh, et al., "Widely transparent electrodes based on ultrathin metals",  
Optics Letters 34(3) (2009) 325-327.
65. S. I. Na, S. S. Kim, J. Jang, D. Y. Kim, "Efficient and flexible ITO-free organic solar cells using  
highly conductive polymer anodes",  
Advanced Materials, 20(21) (2008) 4061-4067.
66. E. Elangovan, K. Ramamurthi, "A study on low cost-high conducting fluorine and antimony-doped  
tin oxide thin films", Applied Surface Science, 249 (2005) 183-196.
67. P. Drude, Ann. Phys. 3, (1900) 369.
68. T. J. Coutts, D. L. Young, et X. Li, "Characterization of transparent conducting oxides", MRS  
Bulletin, 25(8) (2000) 58-65.
69. F. Ynineb, "Contribution à l'élaboration de couches minces d'oxydes transparents conducteurs  
(TCO)", Thèse de magister, Université de Constantine (2010).
70. S.B. Zhang, S.H. Wei, and A. Zunger, Physical Review B - Condensed Matter and Materials  
Physics, 63(7), p. 0752051-0752057 (2001).
71. N. F. Mott, "On the transition to metallic conduction in semiconductors", Can. J. Phys., 34  
(1956) 1356.
72. R. G. Gordon, "Criteria for Choosing Transparent Conductors", MRS Bulletin (2000).
73. G. Haacke, "New figure of merit for transparent conductors", Journal of Applied Physics, Vol. 47,  
N° 9, September 1976.
74. J. Y. Lee, J. H. Lee, H. Seung Kim, C. H. Lee, H. S. Ahn, H. K. Cho, Y. Y. Kim, B. H. Kong, et H.  
S. Lee, "A study on the origin of emission of the annealed n-ZnO/p-GaN heterostructure LED",  
Thin Solid Films, 517(17) (2009) 5157-5160.
75. H. Ohta, K. I. Kawamura, M. Orita, M. Hirano, N. Sarukura, et H. Hosono, "Current injection  
emission from a transparent p-n junction composed of p-SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/n-ZnO",  
Applied Physics Letters, 77(4) (2000) 475-477.
76. J.H. Scofield, A. Duda, D. Albin, B.L. Ballard, and P. Predecki, "Sputtered molybdenum bilayer back  
contact for copper indium diselenide-based polycrystalline thin-film solar cells" Thin Solid Films  
260 (1995) 26.
77. M. Nishiwaki, N. Kohara, T. Negami, and T. Wada, "MoSe<sub>2</sub> layer formation at  
Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>/Mo Interfaces in High Efficiency Cu(In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>)Se<sub>2</sub> Solar Cells" Jpn. J. Appl. Phys.  
37 (1998) L71.
78. L. Assmann, J.C. Bernede, A. Drici, C. Amory, E. Halgand and M. Morsli, "Study of the Mo thin  
films and Mo/CIGS interface properties" Appl. Surface Science 246 (2005) 159.

## REFERENCES

---

79. J.Kessler, J.Norling, O.Lundberg, J.Wennerberg, and L.Stolt, "Optimization of RF-sputtered ZnO/ZnO:Al for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> based devices", 16th EPVSEC (2000), Glasgow.
80. A. Zerga, B. Benyoucef and J.P. Charles, Insufficiencies of the Single Exponential Model and Efficiency of the Double Exponential Model in the Optimization of Solar Cells Efficiency, *Active and Passive Electronic Components*, Vol. 21, pp. 265 - 278, 1998.
81. Z. BENDJELOULI, Contribution à la modélisation d'une cellule solaire, thèse de magistère, université de Bechar, 2009.
82. <http://scaps.elis.ugent.be/>.
83. F. Abdelmadjid, Etude par Simulation et Modélisation Electriques des Cellules Photovoltaïques en Couche Mince à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>(CIGS), mémoire de doctorat, université de Tlemcen, 2016.
84. M. Belarbi, A. Benyoucef, B. Benyoucef, Study of the equivalent circuit of a Dye-Sensitized Solar Cells, *Advanced Energy: An International Journal (AEIJ)*, Vol. 1, No. 2, April 2014.
85. Published Online 2017 - <http://publication.lecames.org/>
86. M.BELARBI, B.BENYOUCEF, A.BENYOUCEF, T.BENOUAZ, S.GOUMRI-SAID, Enhanced electrical model for dye-sensitized solar cell characterization, *Solar Energy*, Volume 122, Pages 700–711, December 2015.
87. Cellules solaires en couches minces à base de CuInSe<sub>2</sub>.  
Daniel Lincot et Jean-François Guillemoles. Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque (IRDEP, UMR 7174 CNRS-EDF-ENSCP).
88. Naima TOUAFEK, Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub>. Thèse de doctorat. Université Des Frères Mentouri – Constantine.

## Annexe

scaps3307.exe. version 27-01-2018.

Le programme SCAPS simule les caractéristiques électriques en courant continu et en courant alternatif des cellules solaires à hétérojonction à couche mince.

Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement: Alex Niemegeers, Marc.Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degrave.

Il a été spécialement développé pour les cellules solaires Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> et CdTe. Il a été testé et utilisé pour une variété d'autres types de cellules.

Référence de base :

M. Burgelman, P. Nollet et S. Degrave, "Modélisation des cellules solaires à semi-conducteurs polycristallins", Thin Solid Films 361-362 (2000), pp. 527-532

A propos des défauts métastables :

K. Decock, P. Zabierowski et M. Burgelman, «Modélisation des métastabilités dans les cellules solaires à couches minces à base de chalopyrite», Journal of Applied Physics, vol. 111 (2012) 043703

Contact :

Université de Gand

(Département de l'électronique et des systèmes d'information (ELIS  
Pietersnieuwstraat 41, B-9000 Gent, Belgique).

## Résumé

Conscients de l'importance de la capture de la lumière incidente sur les performances d'une cellule solaire, nous avons étudié l'optimisation des paramètres optoélectroniques des cellules solaires. On étudier l'effet des couches conductrices et transparentes TCO (ZnO) sur les performances des cellules solaires Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>.

Nous avons aussi présenté l'étude du circuit équivalent d'une cellule solaire. Ensuite, à l'aide du logiciel SCAPS-1D, nous avons simulé la cellule solaire CIGS/CdS/ZnO afin d'analyser l'influence de certain paramètres de la couche ZnO et étudier l'évolution du rendement de la cellule solaire en fonction de chacun de ses paramètres. Puis, on donne la courbe de rendement quantique, énergie de gap et absorption optique.

**Mots clés :** couche tandem, Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS), Oxyde transparent et conducteur OTC, SCAPS-1D.

## Abstract

Conscious of the importance of the capture of the incidental light on the performances of a solar cell, we studied the optimization of the optoelectronic parameters of the solar cells. One to study the effect of the conducting and transparent layers TCO (ZnO) on the performances of the solar cells Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>.

We also presented the study of the equivalent circuit of a solar cell. Then, using software SCAPS-1D, we simulated the solar cell CIGS/CdS/ZnO in order to analyze the influence of certain parameters of the ZnO layer and to study the evolution of the output of the solar cell according to each one of its parameters. Then, one gives the curve of quantum yield, Energy of gap and optical absorption.

**Key words:** Layer tandem, Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS), transparent conductive oxide TCO, SCAPS-1D.

## ملخص

إدراكا لأهمية النقاط الضوء الساقط على أداء الخلية الشمسية، درسنا تحسين المعلمات البصرية الإلكترونية للخلايا الشمسية. تأثير طبقات TCO (ZnO) الموصلة والشفافة على أداء الخلايا الشمسية Cu (In , Ga) Se<sub>2</sub> . قدمنا أيضًا بدراسة الدارة المكافئة لخلية شمسية. ثم باستخدام برنامج SCAPS-1D ، قمنا بمحاكاة الخلية الشمسية CIGS /CdS / ZnO من أجل تحليل تأثير معلمات معينة من طبقة ZnO ودراسة تطور كفاءة الخلايا الشمسية وفقًا لكل من تلك المعلمات . ثم النظر إلى منحني المردود الكمي ، طاقة الفجوة والامتصاص البصري.

**كلمات البحث:** طبقة متعددة الوصلات ، Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) ، أكسيد موصل وشفاف OTC ، SCAPS-1D.