



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département de génie électrique

# MEMOIRE DE MASTER

Science technologie  
Filière : électronique  
Spécialité : système embarqué

Réf. :

---

Présenté par :  
Guessouri Wafa

## *Etude et simulation d'une cellule solaire à base de CIGS par SCAPS*

---

Hezabra Adel  
Terghini Ouarda  
Boukerdine Salah Eddine

MAA  
MCB  
MAA

Université de Biskra président  
Université de Biskra Encadreur  
Université de Biskra Examineur

# Dédicace

*Je dédie ce travail aux personnes les plus  
méritantes ... qui étaient*

*La raison de ma présence ici aujourd'hui*

*Mon défunt père*

*Et ma chère mère*

*À mon cher mari, mon compagnon*

*Ghoudjemis Mohamed*

*Qui été à mes cotes durant toute mes  
études*

*A mes chères et sœurs*

*Warda*

*Sabrina et sa fille*

*A tous mes frères*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment*

*Je dédie ce travail*

# Remerciements

*Après avoir rendu grâce à dieu le tout puissant et le  
miséricordieux qui m'a fourni l'aide et la patience d'achever  
ce travail*

*Un grand merci à mon encadreur « Mme. Terghini Ouarda »  
pour sa disponibilité, sa rigueur, le soutien qu'elle n'a cessé de  
me prodiguer et ses encouragements dans les moments clés,  
dès les premiers stades de la préparation de ce mémoire, et  
pour les précieuses remarques qu'elle*

*M'a apporté lors des différents suivis, qui m'ont permis de  
Présenter mon travail dans sa forme finale.*

*Ainsi qu'aux membres du juré*

# **Sommaire**

# Sommaire

---

INTRODUCTION GENERALE .....	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE I .....	3
Concept théorique et généralité .....	3
Sur les cellules solaires .....	3
I.1. Introduction .....	4
I.2. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs [04]: .....	4
I.2.1. Equation de Poisson .....	4
I.2.2. Equations de continuité .....	4
I.2.3. Equations de transport .....	5
I.2.4. Diffusion .....	5
I.2.5. Dérive (migration) .....	6
I.3. Génération optique .....	6
I.4. Mécanismes de recombinaison [05] : .....	7
I.4.1. Recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall) .....	7
I.4.2. Recombinaison Auger .....	7
I.4.3. Recombinaison Radiative .....	7
I.4.4. Recombinaison en surface .....	8
I.5. Généralités sur les cellules solaires .....	8
I.5.1. spectre solaire [06]: .....	8
I.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [07]: .....	9
I.5.3. Schéma équivalent d'une cellule solaire [08]: .....	10
I.5.4. Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire [03]: .....	11
I.5.4.1. Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	11
I.5.4.3. Puissance maximale $P_m$ .....	11
I.5.4.4. Facteur de forme FF .....	11
I.5.4.5. Rendement d'une cellule solaire : .....	12
I.5.4.6. Rendement quantique [09]: .....	12
I.6. La structure de la cellule solaire et la technologie pour la réduction des pertes optiques [10]: ..	13
I.6.1. Texturisation .....	14
I.6.2. Les contacts face avant et face arrière : .....	14
I.6.3. La passivation .....	15
I.6.4. Emetteur et base .....	15
I.6.5. BSF .....	15
I.6.6. Couche antireflet .....	15
I.7. l'état de l'art sur les photovoltaïques (Les différentes technologies) [03] : .....	16

# Sommaire

---

I.7.1. Première génération : Silicium cristallin (mono et poly) .....	16
I.7.1.1. Silicium monocristallin .....	17
I.7.1.2. Silicium poly cristallin .....	17
I.7.2. Deuxième génération : CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin .....	17
I.7.2.1. Cu(In)Se <sub>2</sub> /Cu <sub>2</sub> ZnSnS <sub>4</sub> .....	18
I.7.2.2. CZTS .....	18
I.7.3. Troisième génération Technologies photo-électro-chimiques (DyeSensitised Cell et Organic PV) .....	19
I.8. les cellules solaires a base de CIGS [11] : .....	19
I.8.1. Le substrat : .....	20
I.8.2. Le contact métallique arrière : .....	21
I.8.3. L'absorbeur : .....	21
I.8.4. La couche tampon : .....	22
I.8.5. La couche fenêtre : .....	22
CHAPITRE II .....	24
II.1. Introduction : .....	25
II.2 Notions de base :[12] .....	26
II.2.1 Lancer SCAPS :[13] .....	28
II.2.2 Définir le problème : [13] .....	28
II.2.3 Définir le point de fonctionnement : [13] .....	28
II.2.4 Sélection des caractéristiques à simuler : [13] .....	29
II.2.5 Lancer le calcul : .....	29
II.2.6 Afficher les courbes simulées : [15] .....	29
II.2.7 Les courbes I-V : [13] .....	30
II.3 Définition d'une cellule solaire : [14] .....	31
II.3.1 Edition de la structure d'une cellule solaire : [13] .....	32
II.3.2.Right and left contact: [14] .....	33
II.3.3 Définition des couches :[14] .....	34
II.4. conclusion : .....	36
III.1. Introduction .....	38
III.2. Méthodologie de simulation numérique : .....	38
III.2.1. Structure de la cellule étudiée .....	38
III.2. 2.Les paramètre de simulation .....	39
III.3. Résultats et discussion : .....	40
III.3.1. Structure de la cellule à simuler sous SCAPS .....	40
III.3.2. L'effet du dopage et de l'épaisseur de la couche fenêtre (ZnO; Al) .....	43
III.3.2.1. L'effet du dopage .....	43

# Sommaire

---

III.3.2.2. L'effet de l'épaisseur.....	44
III.3.3. L'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque (i-ZnO) .....	45
III.3.4. L'effet du dopage et de l'épaisseur de la couche tampon (CdS) .....	47
III.3.4.1. L'effet du dopage.....	47
III.3.4.2. L'effet de l'épaisseur.....	47
III.3.5. L'effet du dopage et de l'épaisseur de la couche absorbante (CIGS) .....	49
III.3.5.1. L'effet du dopage.....	49
III.3.5.2. L'effet de l'épaisseur.....	50
III.4. La Cellule optimisée : .....	52
III.5. Conclusion : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Conclusion générale.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Références bibliographiques.....	58

# Sommaire

---

## Liste des figures

Figure I.01 : Schéma des principaux processus de recombinaisons dans les semi-conducteurs

Les directions des flèches indiquent la transition des électrons

Figure I.02 : Spectre solaire

Figure I.03 : Structure et diagramme de bande d'une cellule PV sous éclairement

Figure I.04 : Circuit équivalent de la cellule solaire sous éclairement. a) idéal : b) réel.

Figure I.05 : Les courbes  $I = f(V)$

Figure I.06 : Structure d'une cellule photovoltaïque.

Figure I.07 : Différent technologie des cellules photovoltaïques

Figure I.08 : Etape de fabrication des cellules : (1) minerai de Silicium – (2) raffinage pour augmenter la pureté – (3) Silicium en fusion donnant des lingots – (4) après solidification – (5) wafer obtenu par sciage des lingots – (6) traitement de surface par procédés physicochimiques et (7) cellule finie avec électrodes.

Figure I.09 : Cellule mono cristalline et poly cristalline

Figure I.10 : Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. a) Schéma de l'empilement des différents couches – b) Image MEB de la tranche d'une cellule

Figure I.11 : Diagramme de bande d'énergie pour une cellule solaire à hétérojonction : le cas de ZnO/Cds/CIGS

Figure II.01 : panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal

Figure II.02 : Définir le problème

Figure II.03 : Le pont de fonctionnement

Figure II.04 : Résistance série et parallèle.

Figure II.05 : L'illumination

Figure II.06 : Panneau des bandes d'énergie

Figure II.07 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairement

Figure II.08 : Panneau de définition d'une cellule solaire.

Figure II.09 : Définition de la structure d'une cellule solaire

Figure II.10 : Panneau des propriétés des contacts.

Figure II.11 : Propriétés de la couche ajoutée.

Figure II.12 : Propriétés des dopages définis

Figure II.13 : Modèle de l'absorption



# Sommaire

---

- Figure II.14 : Définition des types de recombinaison présents
- Figure III.01 : Schéma de principe de la structure photovoltaïque CIGS.
- Figure III.02 : Structure de la cellule à simuler sous SCAPS. CIGS.
- Figure III.03 : Diagramme des bandes d'énergie à l'équilibre.
- Figure III.04 Caractéristiques I(V) simulées d'une cellule solaire en CIGS.
- Figure III.05 : Le rendement quantique externe sous AM1.5G de la cellule n-p en CIGS.
- Figure III.06 : Variation de la concentration de dopage de la couche fenêtre sur le rendement
- Figure III.07 : Le rendement en fonction de l'épaisseur de ZnO: Al
- Figure III.08 : Le rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur de ZnO: Al
- Figure III.09 : Le rendement en fonction de l'épaisseur de i-ZnO.
- Figure III.10 : Le rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur de i- ZnO
- Figure III.11 : Variation de la concentration de dopage de la couche tampon sur le rendement
- Figure III.12 : Le rendement en fonction de l'épaisseur de CdS.
- Figure III.13 : Le rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur de CdS
- Figure III.14 : Variation de la concentration de dopage de la couche absorbante sur le rendement
- Figure III.15 : Le rendement en fonction de l'épaisseur de CIGS
- Figure III.16 : Le rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur de CIGS.
- Figure III.17 : (I-V) Courbes de la cellule solaire CIGS
- Figure III.18 : Rendement quantique externe de la cellule solaire CIGS

# Sommaire

---

## Liste des tableaux

Tableau III.1 : Paramètres de simulation la cellule solaire en CIGS

Tableau III.2 : Paramètres de sortie de la cellule.

Tableau III.3 : Paramètres d'entrée de la cellule optimisée.

## Résumé

Le travail de ce mémoire de master est une étude par simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire en couches minces et à hétérojonction à base de CdS/CIGS. En premier lieu, nous avons simulé la cellule solaire de structure : ZnO :Al (n)/i-ZnO/CdS(n)/CIGS(p)/Mo, en utilisant le logiciel SCAPS, qui a donné un rendement de 20.14%.

En deuxième lieu, nous avons optimisé la cellule solaire en ZnO :Al/i-ZnO/CdS(n)/CIGS en étudiant l'effet du dopage et de l'épaisseur de tous les couches. Le rendement optimal obtenu est de 23.73% pour des épaisseurs des couches en ZnO :Al/i-ZnO/CdS(n)et CIGS de l'ordre de 150 nm /50 nm/40 nm et 3000 nm respectivement et dopés par des concentrations de l'ordre  $10^{18}$  pour ZnO :Al ,  $2*10^{19}$  pour CdS(n) et  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup> pour CIGS.

## Abstract

The work of this master's thesis is a study by numerical simulation of the electrical characteristics of a thin film and heterojunction solar cell based on CdS / CIGS. First, we simulated the solar cell of structure: ZnO: Al (n) / i-ZnO / CdS (n) / CIGS (p) / Mo using the SCAPS software, which gave an efficiency of 20.14%. Second, we optimized the solar cell in ZnO: Al / i-ZnO / CdS (n) / CIGS by studying the effect of doping and the thickness of all the layers. The optimum yield obtained is 23.73% for thicknesses of the ZnO: Al / i-ZnO / CdS (n) and CIGS layers of the order of 150 nm / 50 nm / 40 nm and 3000 nm respectively, and doped with concentrations of the order of  $10^{18}$  for ZnO: Al,  $2 * 10^{19}$  for CdS (n) and  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup> for CIGS.

## ملخص

عمل أطروحة الماجستير هذا عبارة عن دراسة محاكاة عددية للخصائص الكهربائية لخلية شمسية ذات غشاء رقيق غير متجانسة قائمة على CIGS.

أولاً، قمنا بمحاكاة الخلية الشمسية الهيكلية / ZnO: Al (n) / i-ZnO / CdS (n) / CIGS (p) / Mo باستخدام برنامج SCAPS وتحصلنا على مردود قيمته 20.14%.

ثانياً، قمنا بتحسين الخلية الشمسية في ZnO: Al / i-ZnO / CdS (n) / CIGS من خلال دراسة تأثير المنشطات وسمك جميع الطبقات العائد الأمثل الذي تم الحصول عليه هو 23.73% لسمك طبقات ZnO: Al / i-ZnO / CdS (n) و CIGS بترتيب 150 نانومتر / 50 نانومتر / 40 نانومتر و 3000 نانومتر على التوالي ومنشط بتركيزات من أجل  $10^{18}$  ل ZnO: Al و  $2*10^{19}$  ل CdS (n) و  $10^{18}$  سم<sup>-3</sup> ل CIGS.

# **Introduction générale**

## ***INTRODUCTION GENERALE***

L'énergie est un des principaux défis du XXIème siècle. Jusqu'ici les sources d'énergie que l'on emploie le plus régulièrement nous paraissaient infinies, inépuisables, et sans conséquences. Heureusement, depuis une dizaine d'années, ces idées sont remises en cause et même révolues. Aujourd'hui, un intérêt grandissant est porté aux ressources énergétiques renouvelables. Parmi ces ressources, la lumière du soleil et sa conversion en électricité par effet photovoltaïque. C'est une des voies énergétiques les plus séduisantes pour la production de l'énergie, tant dans son principe que pour d'autres raisons telles que son immense et inépuisable disponibilité.

Le développement des énergies renouvelables apparaît comme une technologie prometteuse et répond à l'exigence d'utiliser des énergies compatibles avec l'environnement. Notamment, L'énergie solaire photovoltaïque par son abondance, son aspect inépuisable sur le globe terrestre, offre une solution véritable au problème fondamental de l'humanité qui est l'approvisionnement en énergie. Les orientations actuelles des recherches et développements dans le domaine du photovoltaïque sont basées sur deux axes :

-Le premier consiste à développer de nouveaux procédés moins coûteux, d'élaboration des matériaux utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques, de réduire les épaisseurs et d'améliorer les dispositifs,

-Le second axe est orienté vers l'utilisation en couches minces de nouveaux semiconducteurs.

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 %, mais malheureusement, leurs 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.[01]

Les cellules solaires qui utilisent le Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) représentent l'approche la plus prometteuse au plan de réduction des coûts de production. L'avantage de ce matériau est son élaboration facile d'une part et son haut rendement d'autre part.

Notre étude a porté sur l'optimisation des grandeurs photovoltaïques tels que le courant de court-circuit ICC, le rendement de conversion  $\eta$ , la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  et le facteur de forme FF ainsi que le rendement quantique d'une cellule solaire à base de CdS/CIGS

moyennant le logiciel SCAPS-1D.

L'optimisation des paramètres physiques (dopage et épaisseur) des différentes couches mises en jeu dans la réalisation des de la cellule permettra d'aboutir au meilleur rendement qui pourra être délivré par les cellules à base de couche mince de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ . [02]

L'objectif de ce présent mémoire est l'étude par simulation numérique de la cellule solaire à base de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  pour couches tampon en CdS . Nous allons aussi simuler l'effet de l'épaisseur et le dopage des couches en  $\text{ZnO :Al/i-ZnO/CdS}$  et CIGS en vue d'optimiser la cellule solaire en CIGS.

Pour ce faire, notre travail est divisé en trois chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre nous présenterons des généralités des semi-conducteurs et quelques notions sur le rayonnement solaire, le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales en général et les cellules solaires en CIGS en particulier
- Le deuxième chapitre présente le logiciel SCAPS utilisé pour la simulation de la cellule solaire.
- Et enfin, Dans le dernier chapitre nous présenterons et discuterons les résultats

obtenus.



# **CHAPITRE I**

**Concept théorique et généralité**

**Sur les cellules solaires**



## **I.1. Introduction**

Dans ce chapitre on va citer quelques bases nécessaires dans le domaine photovoltaïque. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie photovoltaïque.

Nous allons décrire par la suite les semi-conducteurs, la jonction P-N et les cellules solaires et ses caractéristiques photovoltaïques et on terminer par une description courte des différentes filières technologiques existantes. [03]

## **I.2. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs [04]:**

Les équations de base décrivent le comportement des porteurs de charge dans des semi-conducteurs sous l'influence d'un champ électrique et / ou de la lumière sont :

Equation de Poisson, équations de continuité, et équations de transport.

### **I.2.1. Equation de Poisson**

L'équation de Poisson relie le potentiel électrostatique à la densité locale de charge. Elle est donnée par l'équation suivante:

$$\Delta(\varepsilon\Delta\varphi) = -\rho \quad (I.1)$$

$\varphi$  est le potentiel électrostatique,  $\varepsilon$  est la permittivité locale, et  $\rho$  est la densité locale de charge. Cette densité est la somme de contributions de toutes les charges fixes et mobiles, contenant les électrons, les trous, et les impuretés ionisés.

$$\rho = -q[n - p + N_A^- - N_D^+ + \sum N_t] \quad (I.2)$$

Avec :

$q=1.6 \cdot 10^{-19}$ Cb : La charge élémentaire.

$p, n$  : Densités d'électrons et de trous libres.

$N_{D^+}, N_{A^-}$  : Densités d'atomes donneurs et accepteurs ionisés.

$\sum N_t$ : La somme de pièges dans un centre profond ; elle est généralement négligeable.

### **I.2.2. Equations de continuité**

Les équations de continuité donnent la variation des concentrations des porteurs à chaque instant. Cette variation des concentrations des trous ou des électrons est due à la création de paires électron-trou, les générations-recombinaisons internes, et à la présence des courants de

conduction ou diffusion.

Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont décrites comme suit:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} j_n + G_n - R_n \quad (\text{I.3})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} j_p + G_p - R_p \quad (\text{I.4})$$

Ou  $n$  et  $p$  sont la concentration des électrons et des trous respectivement,  $J_n$  et  $J_p$  sont les densités du courant des électrons et des trous,  $G_n$  et  $G_p$  sont les taux de génération pour les électrons et les trous,  $R_n$  et  $R_p$  sont les taux de recombinaison pour les électrons et trous, et  $q$  est la charge électrique d'électron.

### **I.2.3. Equations de transport**

Généralement, dans les équations de la physique des semi-conducteurs, le champ magnétique extérieur est nul et la température est uniforme dans toute la structure. Un courant électrique est apparu grâce au champ électrique et est appelé courant du champ ou courant de drift qui est déterminé grâce au gradient des concentrations des porteurs de charge (courant de diffusion).

La densité de courant de dérive des électrons dans la bande de conduction est donnée par :

$$J_n = -q\mu_n n \nabla \Phi_n \quad (\text{I.5})$$

$$J_p = -q\mu_p p \nabla \Phi_p \quad (\text{I.6})$$

Ou  $\mu_n$  et  $\mu_p$  sont les mobilités des électrons et des trous;  $\Phi_n$  et  $\Phi_p$  sont les niveaux de quasi-Fermi des électrons et des trous.

### **I.2.4. Diffusion**

La concentration non uniforme des électrons ou des trous dans le semi-conducteur est la cause de création des courants de diffusion. Une charge électrique se déplace d'une zone de concentration élevée vers une zone d'une concentration moins élevée. La densité de courant de diffusion est décrite selon la loi de Fick.

Donc, les équations de dérive-diffusion qui sont la somme du courant de dérive des électrons et du courant de diffusion des électrons et celui qui présente la somme du courant de dérive des trous et du courant de diffusion des trous :

$$J_{n.diff} = -qF_n = qD_n \nabla n \quad (\text{I.7})$$

$$J_{p.diff} = -qF_p = qD_p \nabla p \quad (\text{I.8})$$

$D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous respectivement.

$$D_n = (KT/q) \quad (I.9)$$

$$D_p = (KT/q) \quad (I.10)$$

### **I.2.5. Dérive (migration)**

Dérive est défini comme étant le mouvement des charges grâce à un champ électrique appliqué. La force, qui résulte quand un champ électrique est appliqué à un semi-conducteur, accélère les particules chargées positivement (les trous  $q+$ ) dans la direction du champ électrique et les particules chargées négativement (les électrons  $q-$ ) dans la direction opposée au champ électrique.

La mobilité des électrons  $\mu_n$  et celle des trous  $\mu_p$  sont toujours pris positives. La direction et la vitesse de migration des porteurs sont données par les relations :

Pour les électrons :

$$V_n = -\mu_n E \quad (I.11)$$

Pour les trous :

$$V_p = \mu_p E \quad (I.12)$$

Donc le courant de dérive associé aux électrons et aux trous est donné par :

$$J_{n.drift} = -qnvn \quad (I.13)$$

$$J_{p.drift} = qnvp \quad (I.14)$$

### **I.3. Génération optique**

La génération est défini comme un processus par lequel les électrons et les trous sont créés. La génération des électrons et des trous comme indiquée par les équations de continuité est faite grâce au rayon lumineux. Cette dernière est connue comme une génération optique. Quand la lumière frappe un semi-conducteur, elle excite et génère les porteurs de charge par des transitions de la bande de valence à la bande de conduction (transition directe) dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque ou par des transitions indirects dans le cas d'un semi-conducteur extrinsèque. Le déplacement des porteurs permet de créer des paires électrons-trous. Cette recombinaison évite la création du courant électrique. Il faut, donc séparer ces charges en réalisant la jonction p-n. [04]

**I.4. Mécanismes de recombinaison [05] :**

La recombinaison des porteurs de charge influe sur le fonctionnement de la cellule et limite ses performances. En effet les électrons libres dans le semi-conducteur en tendance à se recombiner avec les trous, et lorsque ce phénomène ce produit, l'électron perd de l'énergie et cesse d'être un porteur libre. La recombinaison dans un semi-conducteur se manifeste selon plusieurs mécanismes.

**I.4.1. Recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall)**

La recombinaison Shockley-Read-Hall est universellement utilisée pour décrire les processus de recombinaison dans la bande interdite des matériaux semi-conducteurs.

Les défauts présents dans le réseau cristallin peuvent jouer le rôle de centres recombinants pour les charges libres. Ces centres recombinants ont une énergie  $E_t$  située vers le milieu de la bande interdite.

**I.4.2. Recombinaison Auger**

La recombinaison Auger est décrite par un mécanisme faisant intervenir trois entités. Lors de la recombinaison d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence, l'énergie excédentaire est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre porteur libre (électron ou trou). Ce porteur perd alors progressivement son énergie par thermalisation.

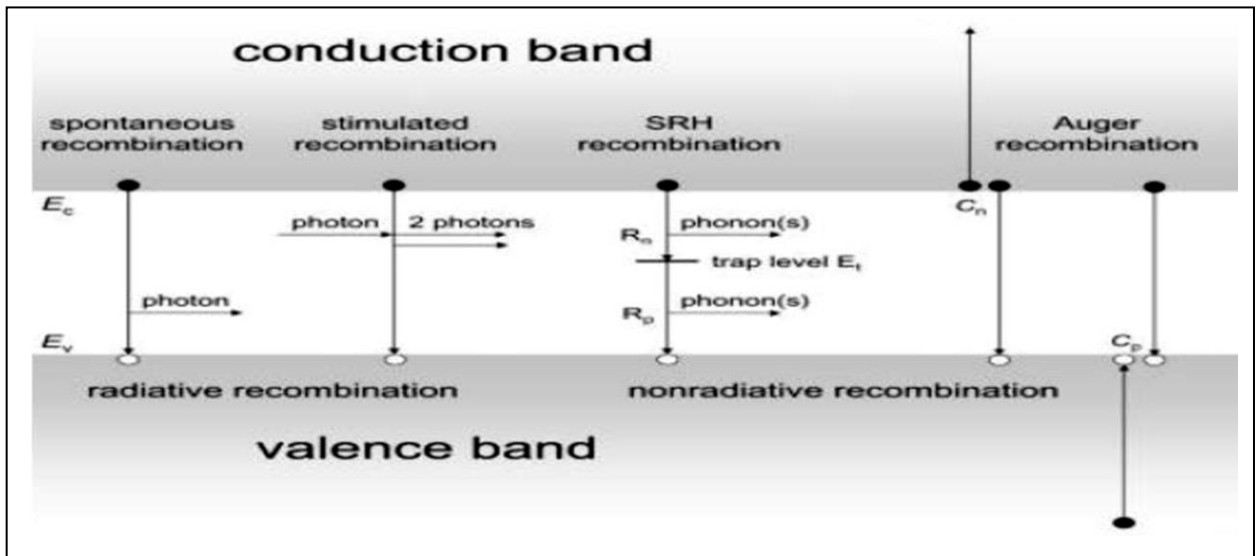


Figure I.1 : Schéma des principaux processus de recombinaisons dans les semi-conducteurs  
Les directions des flèches indiquent la transition des électrons

**I.4.3. Recombinaison Radiative**

Le processus de la recombinaison radiative ou inter-bandes est défini comme l'inverse du processus de la photo-génération. Ce processus est faible pour les matériaux à gaps indirects comme le Silicium.

**I.4.4. Recombinaison en surface**

Les porteurs de charge (électrons ou trous) peuvent être générés ou recombinés à la surface du semi-conducteur en plus de la recombinaison de génération en masse.

En l'absence de traitement, on peut trouver à la surface du silicium cristallin des impuretés métalliques provenant de la découpe du substrat. De plus, suite à cette découpe, de nombreux atomes à proximité de la surface vont posséder des liaisons insatisfaites. Enfin, laissé à l'air libre pendant quelques heures, le substrat de silicium subit un phénomène d'oxydation qui crée de nouveaux défauts. Le traitement chimique permet d'éliminer une majorité des défauts, mais il reste cependant de nombreuses liaisons pendantes en surface responsables des recombinaisons surfaciques.

**I.5. Généralités sur les cellules solaires**

**I.5.1. spectre solaire [06]:**

Le spectre solaire est la décomposition du rayonnement solaire en longueurs d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent le rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation :

$$E = h \quad \nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{I.15}$$

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites. Sa distribution en énergie est répartie comme il est indiqué sur la figure (I.2) .

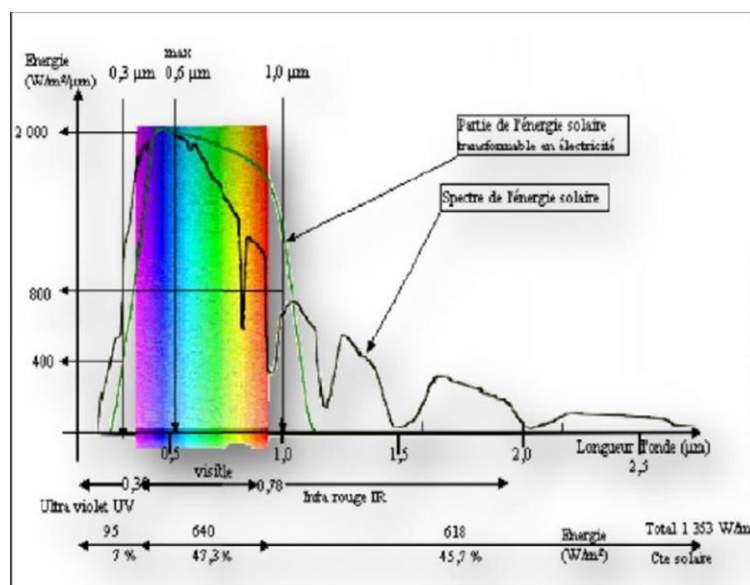


Figure I.2 : Spectre solaire

**I.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [07]:**

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. La figure I.3 montre le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque avec les principales régions (Emetteur, Zone de Charge d'Espace et Base) dans lesquelles les photons incidents peuvent créer des porteurs libres. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant la région de leur création. Dans les zones électriquement neutres (p) et (n), les porteurs minoritaires générés par les photons, diffusent ceux qui atteignent la zone de charge d'espace (ZCE) sont propulsés par le champ électrique  $E$  vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces porteurs de charges contribuent donc au courant de la cellule photovoltaïque par leurs diffusions, cette composante est appelée courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type n et le trou vers la région de type p, donnant naissance à un courant de génération.

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 électrique.
- La collecte sans perte de ces derniers vers un circuit électrique extérieur.

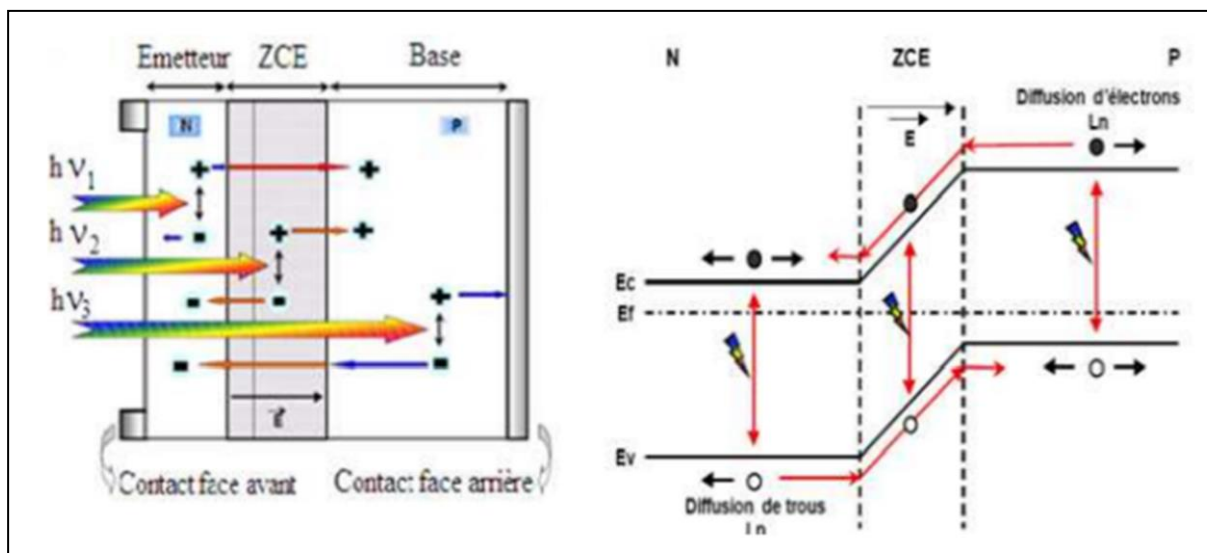


Figure I.3 : Structure et diagramme de bande d'une cellule PV sous éclairement

Le premier phénomène est l'absorption optique de photons par un matériau semi-conducteur approprié dans la plus intense du spectre solaire (figure I.2). 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

infrarouge. Pour absorber un maximum de photons, il faudrait donc un semi-conducteur possédant un petit gap. Le second, c'est la séparation rapide des électrons et des trous avant leur recombinaison. Quant au troisième, l'entraînement des électrons et des trous vers les électrodes collectrices (collecte des porteurs).

**I.5.3. Schéma équivalent d'une cellule solaire [08]:**

Le circuit équivalent d'une cellule solaire sous éclairage est représenté par la figure I.4

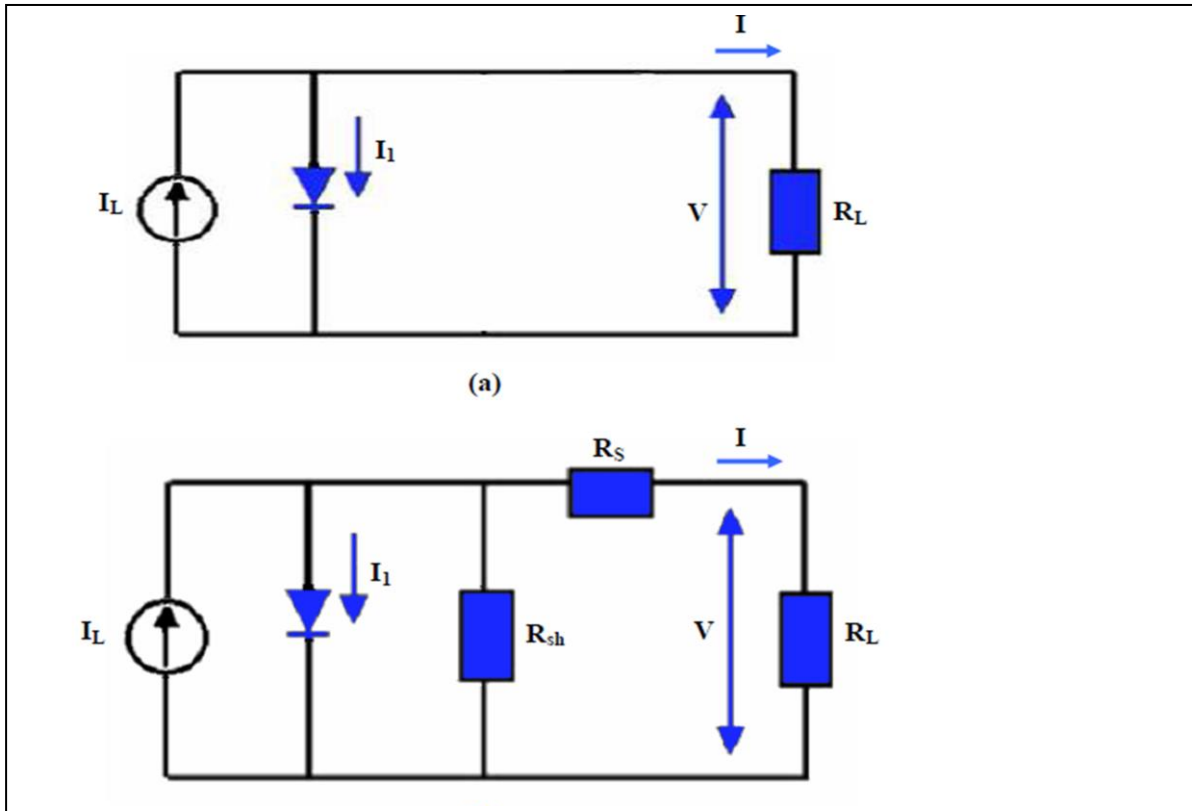


Figure I.4 : Circuit équivalent de la cellule solaire sous éclairage. a) idéal : b) réel.

Sur la figure I.4, on désigne par :

**$R_L$**  : la charge ;

**$V$**  : le potentiel mesuré entre les bornes de la charge ;

**$R_s$**  : la résistance série, qui est due à la résistance de la couche absorbante et de la résistance des contacts avant et arrière ;

**$R_{sh}$**  : la résistance shunt, qui est due aux défauts situés au niveau de la jonction ;

**$I_L$**  : le courant généré par l'éclairage (photo-courant).

Dans la pratique, la diode utilisée n'est pas idéale, dans ce cas le courant qui traverse la diode est :

$$I_1 = I_0 \left( \exp \left[ \frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right] - 1 \right) \quad (I.16)$$

**Avec:**

**k** : la constante de Boltzmann ;

**T** : la température ;

**q** : la charge d'un électron ;

**n** : la coercition du courant de la diode dans l'obscurité ;

**I<sub>0</sub>** : le courant de saturation inversé.

Sous éclairement, un terme  $I_{ph}$ , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement qui est représenté par l'équation suivante

$$I = I_{ph} - I_1 = I_{ph} - I_S \left( \exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) \quad (I.17)$$

### I.5.4. Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire [03]:

#### I.5.4.1. Courant de court-circuit $I_{cc}$

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

#### I.5.4.2. Tension a circuit ouvert $V_{co}$

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert, C'est-à-dire :  $V_{co} = V(I = 0)$  ;

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

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph} + I_S}{I_S} - 1\right) \approx V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_S}\right) \quad (I.18)$$

#### I.5.4.3. Puissance maximale $P_m$

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit  $V \cdot I$  est maximum. Si  $V_m$  et  $I_m$  sont la tension et le courant pour les quels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de coté  $V_m$  et  $I_m$  qu'on peut inscrire sous la courbe  $I(V)$  (Fig.I.5).

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (I.19)$$

#### I.5.4.4. Facteur de forme FF

Le facteur de forme indique à la qualité de cellule, il indique l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$ . Le facteur de forme est le rapport de la puissance maximale au produit  $I_{cc} V_{co}$ .



$$FF = P_m / I_{sc} V_{oc} \quad (I.20)$$

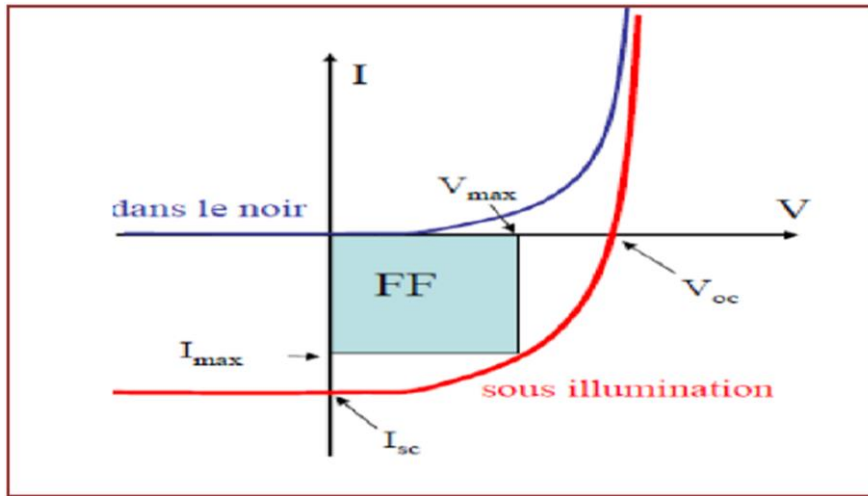


Figure I.5 : Les courbes  $I = f(V)$

#### I.5.4.5. Rendement d'une cellule solaire :

Le rendement,  $\eta$  (efficiency) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (I.21)$$

Où :  $P_i$  est la puissance incidente du rayonnement solaire au sol =  $P_{solaire} = 100 \text{ W/cm}^2$ .

#### I.5.4.6. Rendement quantique [09]:

Le rendement quantique décrit la probabilité, pour un photon incident d'une longueur d'onde donnée, de créer une paire électron-trou effectivement collectée par la cellule. Il s'exprime selon l'équation suivante :

$$QE(\lambda) = \frac{J_{ph}}{q\Phi_0(\lambda)} \quad (I.22)$$

Où  $J_{ph}(\lambda)$  est le photo courant à la longueur d'onde  $\lambda$ ,  $q$  est la charge d'un électron,  $\Phi_0(\lambda)$  est le flux de photons incidents à la longueur d'onde  $\lambda$ . Deux types de rendement quantiques sont souvent considérés dans le cas de cellules solaires :

- Le rendement quantique externe noté EQE (External Quantum Efficiency), qui prend en compte les effets de pertes optiques, comme la lumière non absorbée ou la lumière réfléchie.
- Le rendement quantique interne ou IQE (Internal Quantum Efficiency), il ne prend pas en considération les photons transmis (absorption incomplète) et réfléchis.

Le rendement quantique interne et le rendement quantique externe sont reliés par la relation suivante :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (I.23)$$

$R(\lambda)$  : coefficient de réflexion

Le rendement quantique, obtenu en fonction de la longueur d'onde des photons ( $\lambda$ ), correspond au nombre d'électrons collectés relativement au nombre de photons incidents ayant une longueur d'onde donnée. En convoquant cette courbe avec le spectre d'illumination, on peut déterminer le courant généré dans la cellule. De plus, cette courbe est un bon outil pour essayer de cerner les couches ou les interfaces de la cellule solaire qui provoquent des pertes d'absorption.

Le rendement quantique dépend essentiellement du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, du potentiel d'ionisation, et de l'efficacité de la collecte.

### **I.6. La structure de la cellule solaire et la technologie pour la réduction des pertes optiques [10]:**

Comme nous l'avons vu précédemment le fonctionnement des cellules photovoltaïques est basé sur trois mécanismes : l'absorption des photons, la conversion de l'énergie optique en énergie électrique et la collecte de cette énergie sur un circuit extérieur. Chacun de ces mécanismes engendrent des pertes et la partie suivante présente les principaux composants utilisés à ce jour pour améliorer le rendement de conversion.

Ces composants sont utilisés dans de nombreuses structures de cellules et nous les présenterons sur la structure la plus commune, la cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces (Figure I.6).

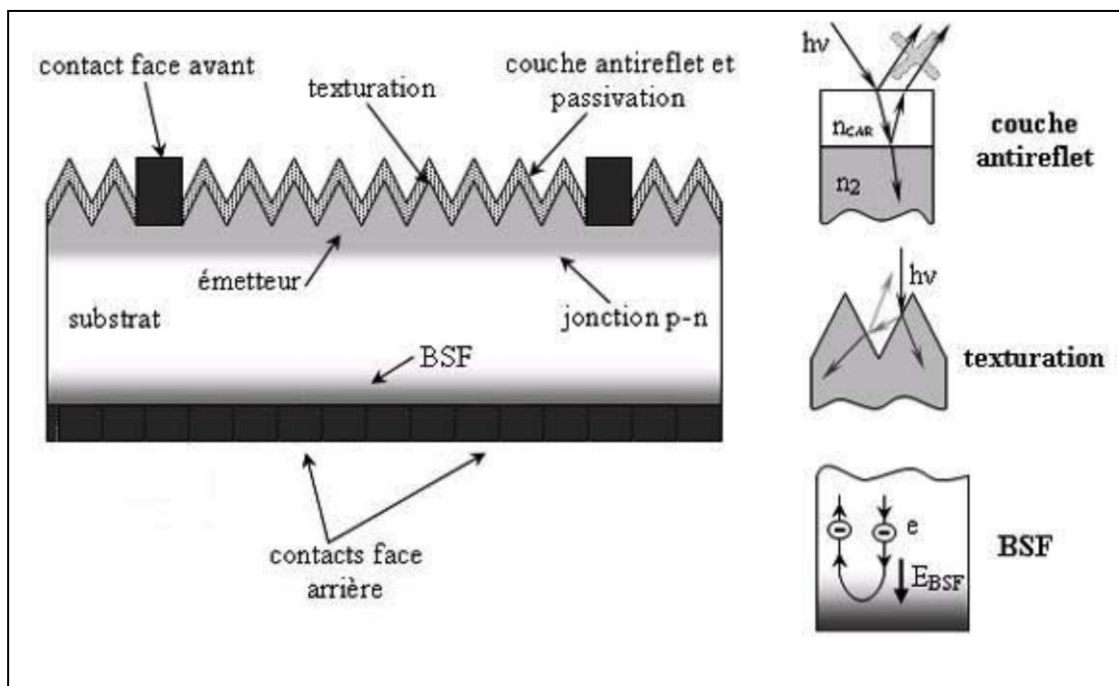


Figure I.6 : Structure d'une cellule photovoltaïque.

### I.6.1. Texturisation

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation 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 texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

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

### I.6.2. Les contacts face avant et face arrière :

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photo générés 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.

### **I.6.3. La passivation**

Sur les surfaces de la cellule, le réseau cristallin s'interrompt brutalement. Certaines liaisons électroniques du silicium sont pendantes et deviennent des centres de recombinaisons pour les porteurs de charges. A ces liaisons s'ajoutent les impuretés présentes dans le réseau cristallin et les défauts du cristal (dislocations. . .).

La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume en neutralisant les sites actifs, sources de recombinaisons.

### **I.6.4. Emetteur et base**

L'émetteur (dopage type N) est réalisé par dopage en surface d'un substrat de type P. La partie dopée P du substrat (c'est-à-dire la majeure partie de celui-ci sauf la surface) constitue la base. L'interface de ces deux zones est celle d'une jonction PN qui permet de dissocier les paires électron-trou créées. L'épaisseur totale de la cellule est actuellement proche de 200  $\mu\text{m}$ .

Les trous photo générés ayant une longueur de diffusion ( $L_p$ ) plus faible que celle des électrons ( $L_n$ ).

Le fort dopage de l'émetteur permet de limiter la résistance du contact métal-semi-conducteur (créé par la connexion entre les contacts métalliques et l'émetteur) et de créer un champ électrique suffisant au niveau de la ZCE.

### **I.6.5. BSF**

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p+-p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation.

La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée.

### **I.6.6. Couche antireflet**

La texturisation de la surface de la cellule permet de limiter les réflexions face avant. Pour réduire encore 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.

**I.7. L'état de l'art sur les photovoltaïques (Les différentes technologies) [03] :**

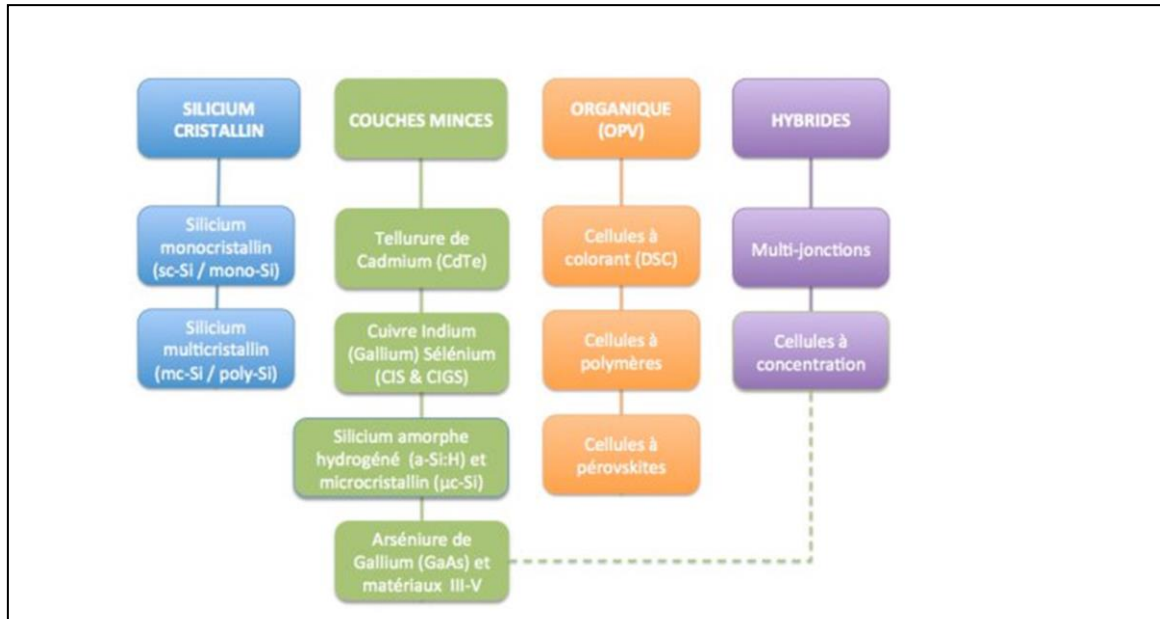


Figure I.7 : Différent technologie des cellules photovoltaïques

La technologie de cellules photovoltaïques est basée sur le choix du matériau absorbant. Sur le plan technologique et industriel, il existe plusieurs matériaux qui peuvent entrer dans fabrication de ces cellules est le silicium(Si) sous ses diverses formes. Comme illustre sur schéma (I.7).

**I.7.1. Première génération : Silicium cristallin (mono et poly)**

Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure. Ces deux types de cellules proviennent de procédé de purification et de solidification différents (processus Czochralski (Cz) et processus Siemens).

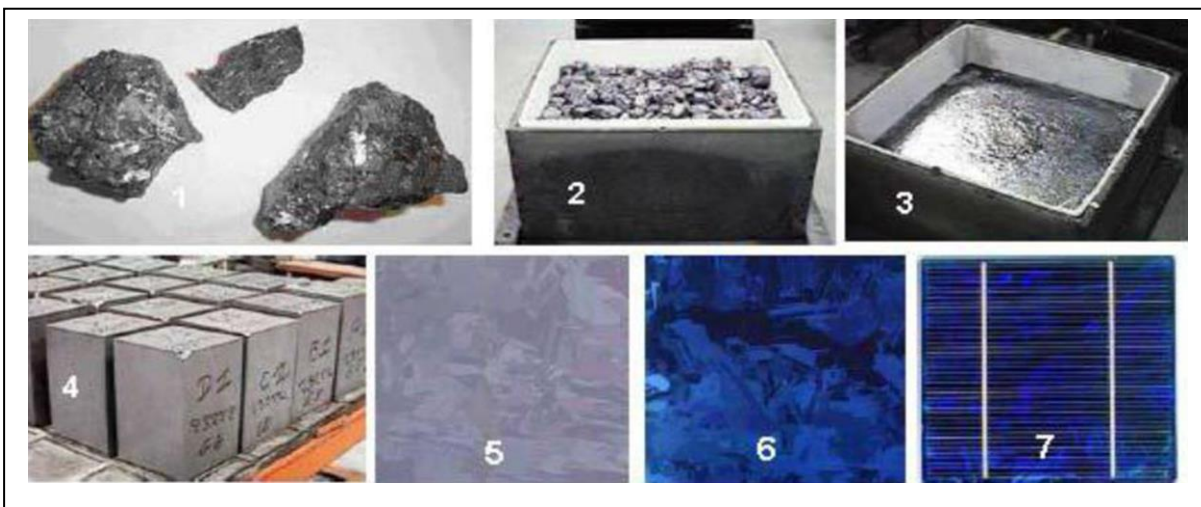


Figure I.8 : Etape de fabrication des cellules : (1) minerai de Silicium – (2) raffinage pour augmenter la pureté – (3) Silicium en fusion donnant des lingots – (4) après solidification – (5) wafer obtenu par sciage du lingots – (6) traitement de surface par procédés physicochimiques et (7) cellule finie avec électrodes.

### **I.7.1.1. Silicium monocristallin**

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

Cette cellule a :

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

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

### **I.7.1.2. Silicium poly cristallin**

Se présente comme une alternative au Si monocristallin. Il est généralement obtenu par refonte des chutes de silicium de l'industrie de la microélectronique. Il caractéristique a avantage de rendement d'une cellule: labo. 20.3%; commerciale : 10-12%.

Et inconvénients de gap: 1.1eV inférieur au gap idéal (1.5eV).

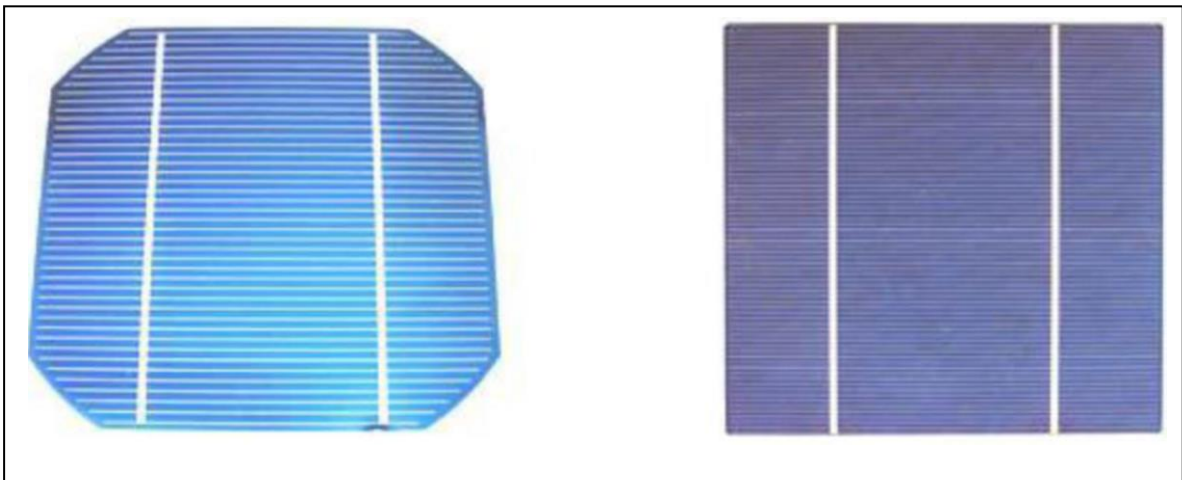


Figure I.9 : Cellule mono cristalline et poly cristalline

### **I.7.2. Deuxième génération : CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin**

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi conducteurs en couches minces (thin film). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue : -CdTe : Cadmium Telluride (Telluride de cadmium) , CIS / CIGS :

Copper Indium Gallium Selenide, Silicium en couche mince : silicium amorphe  $\alpha$ -Si et microcristallin. Les points intéressants de cette filière sont :

- La faible quantité de matériau nécessaire à la fabrication.
- Les méthodes de fabrication sont moins onéreuses et permettent d'utilisation des substrats flexibles.

### **I.7.2.1. Cu(In)Se<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>**

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

Ce type a des avantages qui caractérisent :

- ✓ ajustement du gap en adaptant le rapport Atomique In/Ga  $\Rightarrow$  optimisation de l'absorption des spectres lumineux.
- ✓ le CIS a le meilleur coefficient d'absorption dans le domaine visible 99% des photons, incidents sont absorbés dans le premier micron du matériau d'où la faible épaisseur de la couche de CIS (1,5-2  $\mu\text{m}$ ).
- ✓ rendement : 19.2% [11]
- ✓ leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couches minces : 12%.

#### **Inconvénient :**

- ✓ procédé de fabrication plus coûteux parmi les couches minces à cause de l'utilisation des métaux rares comme l'indium
- ✓ Le Sélénium est toxique.
- ✓ le recyclage de ces matériaux.

### **I.7.2.2. CZTS**

Le film mince à base de Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) comme absorbeur est très prometteur.

Ce film semi-conducteur peut être obtenue en remplaçant la moitié des atomes d'indium dans CuInS<sub>2</sub> chalcopyrite par le zinc, et en remplaçant l'autre moitié avec de l'étain.

Avantages de CZTS :

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



✓ une efficacité de conversion énergétique est de 6.77%.

### I.7.3. Troisième génération Technologies photo-électro-chimiques (DyeSensitised Cell et Organic PV)

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types :

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires.
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères.

Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semi conducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication.

### I.8. les cellules solaires a base de CIGS [11] :

Les cellules solaires en couche mince à base de CIGS sont constituées de plusieurs couches.

L'empilement le plus couramment rencontré est représenté sur la Figure I-11.

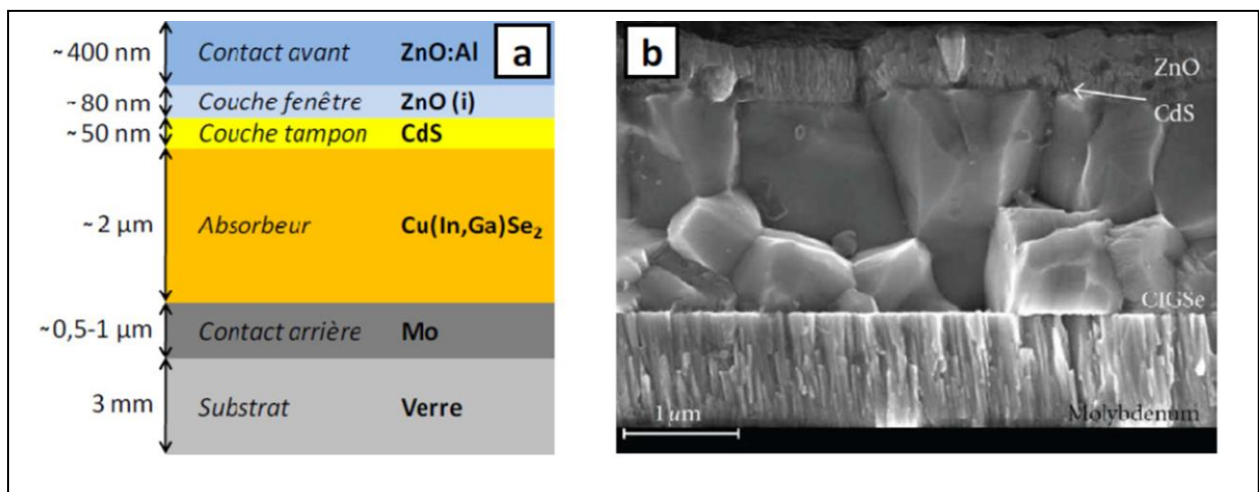


Figure I.10 : Structure d'une cellule solaire à base de CIGS. a) Schéma de l'empilement des différentes couches – b) Image MEB de la tranche d'une cellule

Le substrat est une plaque de verre d'environ 3 mm d'épaisseur, sur lequel est déposé un contact métallique en molybdène (Mo) (de quelques centaines de nm à 1 µm). Sur ce substrat est déposé une couche de 1,5 à 2,5 µm de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>. Il s'agit du semi-conducteur de type P, appelé absorbeur, dans lequel les photons vont être absorbés et vont créer des paires électrons trous. Cet absorbeur est recouvert d'un semi-conducteur de type N, une couche de 50 nm de sulfure de cadmium (CdS), qui assure la formation de l'hétérojonction. La couche fenêtre est constituée d'une couche de 80 nm d'oxyde de zinc intrinsèque (noté ZnO (i)) et d'une couche de 400 nm d'oxyde de zinc dopé à l'aluminium (noté ZnO:Al).

Le diagramme de bande de la cellule solaire ZnO / CdS / CIGS est illustré dans la figure I.12.

Les photons ayant une énergie  $E_{ph} < 3.3$  eV vont passer à travers la couche fenêtre de ZnO.



Certains photons ayant une énergie  $2.4 \text{ eV} < E_{\text{ph}} < 3.3 \text{ eV}$  seront absorbés dans la couche tampon de CdS, qui est introduite dans ces dispositifs pour des raisons technologiques, mais la plupart des photons atteignent la couche CIGS et sont fortement absorbés dans la région de charge d'espace (SCR). Le CIGS, ainsi que le CdTe, sont des semi-conducteurs à gap direct avec de très forte absorption, de telle sorte que la longueur d'absorption est très court,  $\alpha^{-1} \ll 1 \mu\text{m}$ . La mauvaise absorption de CdS est minimisée par l'amincissement de cette couche ou l'allier avec d'autres éléments afin d'augmenter son gap d'énergie.

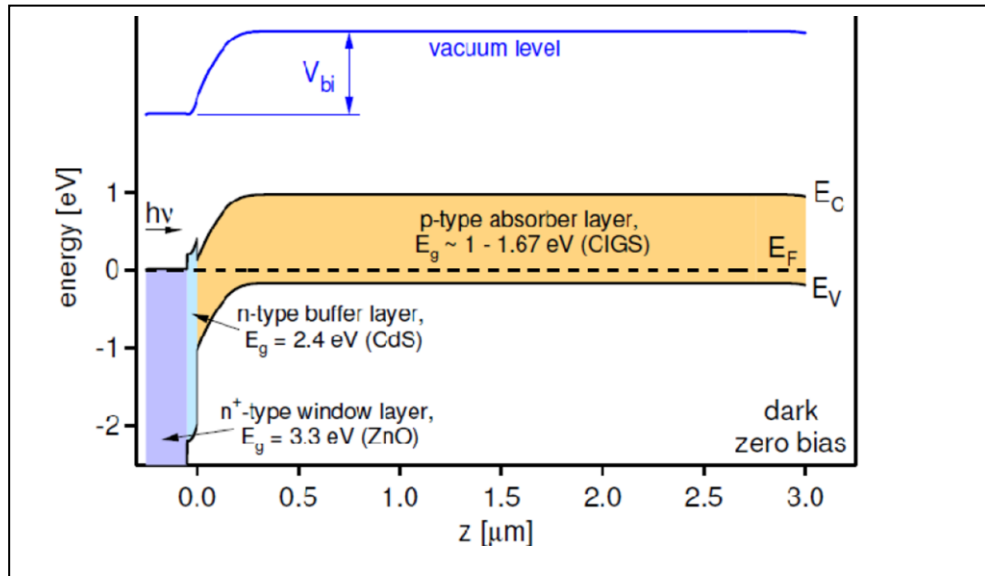


Figure I.11 : Diagramme de bande d'énergie pour une cellule solaire à hétérojonction : le cas de ZnO/Cds/CIGS

Les propriétés requises pour les différentes couches constituant la cellule solaire à base de CIGS, les alternatives existantes, et les différents moyens de dépôt sont décrits dans les paragraphes suivants.

### I.8.1. Le substrat :

Le substrat est le support permettant la tenue mécanique des différentes couches, dont l'empilement ne dépasse pas quelques micromètres d'épaisseur. Il doit répondre à différents critères chimiques et mécaniques, qui le rendent apte à suivre toutes les étapes de fabrication de la cellule, sans en détériorer la qualité, tout en ayant un coût limité. Parmi les critères retenus, on citera notamment les suivants : sa rigidité, son coefficient de dilatation (qui doit être proche de celui du CIGS), sa température maximale d'utilisation (qui doit être adaptée au procédé), son inertie chimique, son état de surface qui doit être parfaitement lisse. Il existe trois catégories de substrat : le verre, les métaux, et les polymères.

Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodo-calcique, qui présente toutes les

propriétés requises. Il contient notamment du sodium, qui diffuse vers le CIGS lors de l'étape de recuit. Son effet bénéfique sur le fonctionnement de la cellule a été démontré par de nombreux auteurs. Les inconvénients rencontrés avec ce substrat sont liés à sa fragilité et sa tenue en température limitée par sa faible température de transition vitreuse (entre 550 et 600°C), mais également son coût et son poids élevés.

L'utilisation d'un verre borosilicate permet de travailler à des températures plus élevées, mais son coefficient de dilatation plus faible est moins adapté au CIGS, et l'effet bénéfique du sodium est perdu. Celui-ci peut néanmoins être introduit par d'autres méthodes.

De nombreux substrats métalliques sont également utilisés.

Ils ont l'avantage de bien résister aux températures rencontrées lors de la synthèse du CIGS, sont plus légers que le verre, et leur caractère souple permet de les utiliser dans des procédés « roll-to-roll », durant lequel le substrat est déroulé au fur et à mesure du procédé de fabrication et les différentes étapes sont réalisées en continu.

### **I.8.2. Le contact métallique arrière :**

Le contact métallique arrière doit, comme le substrat, répondre à différents critères chimiques, mécaniques et économiques. Il doit notamment être un bon conducteur électrique, ne pas réagir avec le CIGS ou y diffuser, résister aux températures élevées rencontrées lors du procédé de fabrication du CIGS (de l'ordre de 550 à 600°C). De nombreux métaux ont été étudiés, comme le tungstène W, le molybdène Mo, le chrome Cr, le tantale Ta, le niobium Nb, le vanadium V, le manganèse Mn dans la référence, l'or Au, l'aluminium Al et l'argent Ag et le cuivre Cu dans la référence.

Dans, Ti, Mn, Cr et V réagissent très fortement avec le sélénium, tandis que Ag diffuse dans le CIGS, Al s'oxyde et ne conduit pas assez, Cu réagit partiellement avec le CIGS et ne produit pas un contact ohmique dans la référence. L'or produit un contact satisfaisant, mais n'est pas économiquement intéressant. Les piles incluant des contacts arrière en Mo, W, Ta, Nb ont donné des rendements comparables et ces métaux pourraient être utilisés comme contact arrière. Finalement, le matériau communément utilisé par les laboratoires de recherche et en industrie est le Mo. Le molybdène est déposé par pulvérisation cathodique sur le verre.

### **I.8.3. L'absorbeur :**

L'absorbeur est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous. Dans le cas présent, il s'agit d'un semi-conducteur de type P de la famille I-III-VI, dont les différentes variantes déjà étudiées conduisent à la formule générale suivante :

$(\text{Cu,Ag})(\text{In,Ga,Al})(\text{Se,S,Te})_2$ .

La substitution du Cu par de l'argent, de l'indium par du gallium ou de l'aluminium, du

sélénium par du soufre ou du tellure, permet de modifier les propriétés du matériau comme sa largeur de bande interdite. Les composés les plus développés en recherche et en industrie sont le  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  et le  $\text{Cu(In,Ga)(Se,S)}_2$ .

### **I.8.4. La couche tampon :**

La couche tampon est un semi-conducteur de type N, dont le gap doit être supérieur à celui de l'absorbeur. Son épaisseur avoisine les 50 nm. Deux rôles lui sont majoritairement attribués : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice.

Du point de vue électrique, la couche tampon permet entre autre d'optimiser l'alignement des bandes entre le CIGS et la couche fenêtre et de limiter les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches.

Elle permet également de protéger la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de ZnO, qui peut engendrer la formation de défauts à la surface du CIGS. Plusieurs semi-conducteurs de type N ont été utilisés comme couche tampon, mais le plus couramment utilisé est le CdS déposé par bain chimique (CBD), qui a conduit jusqu'ici aux meilleurs rendements. Néanmoins, sa faible largeur de bande interdite, égale à 2,4 eV, engendre des pertes optiques pour les longueurs d'ondes inférieures à 500 nm. Pour cette raison, et en plus des contraintes liées à son utilisation (le Cd est un métal lourd, très polluant et dont l'utilisation est très réglementée), de nombreuses études sont menées pour substituer le CdS par d'autres matériaux.

Parmi eux, on peut citer  $\text{In}_2\text{S}_3$ ,  $\text{In(OH,S)}$ ,  $\text{Zn(O,OH)}$ ,  $\text{ZnS}$ , ou  $\text{ZnSe}$ .

(Pulvérisation cathodique).

### **I.8.5. La couche fenêtre :**

La couche fenêtre doit être à la fois conductrice et transparente, de façon à collecter les électrons tout en laissant passer la lumière. Cette couche est constituée d'oxyde transparent conducteur (TCO), sur lequel une fine grille métallique (Ni-Al) est déposée, de façon à réduire la résistance série de la couche fenêtre. Le TCO généralement usité est l'oxyde de zinc (ZnO), mais l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO) peut également être rencontré.

Cette couche fenêtre est constituée de deux couches, l'une fine (50 à 100 nm) et très résistive, l'autre épaisse (100 à 1500 nm) et peu résistive. La première couche est le plus souvent constituée de ZnO intrinsèque, dont la haute résistivité permettrait de réduire les courants de court-circuit entre les deux électrodes de la cellule (le molybdène et la couche de TCO de faible résistivité).

La couche conductrice est fréquemment du ZnO dopé à l'aluminium ( $\text{ZnO:Al}$ ), mais d'autres dopants comme le bore ( $\text{ZnO:B}$ ) ou le gallium ( $\text{ZnO:Ga}$ ) existent aussi. L'épaisseur et le

dopage de cette couche sont ajustés de façon à combiner transparence et conductivité.

La pulvérisation cathodique (ou sputtering) est très courante dans l'élaboration des cellules solaires, en raison de la maîtrise et la rapidité de cette technique.

### **I.9. conclusion**

On a vu dans ce chapitre des notions théoriques sur le photovoltaïque et ses applications sur les cellules solaires. On a décrit brièvement du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et ses différentes caractéristiques puis on a parlé de l'historique des différentes technologies et les types des cellules solaires (1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération).

Le développement technologique est en réalité un long processus qui s'élabore et améliore à partir d'une suite des savoir faire, qu'à chaque génération ajoute sa contribution aux acquis développés par ses prédécesseurs.

# **CHAPITRE II**

## **Le simulateur SCAPS**

### II.1. Introduction :

La simulation des cellules en couches minces est devenue de plus utilisée ces dernières années, ainsi, plusieurs logiciels de calcul et de simulation ont été développés par la communauté des chercheurs dans ce domaine. On peut citer les logiciels AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, SILVACO ...

SCAPS (solar cell capacitance simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires en couches minces à hétérojonction. Il a été développé à l'université de Gent en Belgique avec LabWindows/ CVI de National Instruments par Marc Burgelman et al [1]. Il a été mis à disposition à l'université chercheuse dans la communauté photovoltaïque après la deuxième PV de la Conférence mondiale de Wine, 1998.[12]

L'utilisation de SCAPS est très pratique, il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...), la fenêtre du logiciel pour écrire ces paramètres est représentée sur la figure 2.1. Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent. On obtient comme résultat les courbes I-V, C-V, C-f, Q ( ), mais aussi le diagramme de bande, densité de porteur, densité de courant.[12]

SCAPS est développé à l'origine pour des structures des cellules de CuInSe<sub>2</sub> et de CdTe . Cependant, Plusieurs versions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe). Un aperçu de ses caractéristiques principales est donné ci-dessous :[13]  
Jusqu'à 7 couches semi-conducteurs.

- Jusqu'à 7 couches semi-conducteurs.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec variations graduées ( en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule ) : Par exemple ,  $\chi$  ,  $\epsilon$  , NC , NV ,  $V_{thn}$  ,  $V_{thp}$  ,  $\mu_n$  ,  $\mu_pNA$  , ND , tous les pièges ( défauts)Nt.
- Mécanismes de recombinaison : bande à bande (direct), la SRH Auger.
- les niveaux de défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous

forme de queue ou bien une combinaison.

- Les niveaux des défauts, propriété optique : Excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.
- Contacts : Travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; Propriété optique (Réflexion ou transmission) du filtre.
- Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.
- Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier  $g(x)$  fourni par l'utilisateur.

Illumination: du côté p ou n.

- points pour les calculs de travail : la tension , la fréquence , la température.
- le logiciel calcule les bandes d'énergie , les concentrations et les courants à un point de fonctionnement donné les caractéristiques (JV) , les caractéristiques du courant alternatif (C et G en fonction de V et / ou f) , la réponse spectrale (également avec polarisation lumière ou tension). calculs de lots possible ; présentation des résultats et les paramètres en fonction.
- chargement et la sauvegarde de tous les paramètres ; démarrage de SCAPS dans une configuration personnalisée , un langage de script compris une fonction utilisateur libre.
- interface utilisateur très intuitive.
- Un centre de langage de script à exécuter SCAPS d'un « fichier de script toutes les variables internes peuvent être consultés et tracée par le script .
- un établissement ajustement de courbe intégré.
- un panneau pour l'interprétation des mesures d'admission [01].

### II.2 Notions de base :[12]

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

On peut à n'importe quel moment accéder aux deux autres fenêtres, fenêtre de conception de dispositif et fenêtre des résultats comme le montre la fig. II.1.

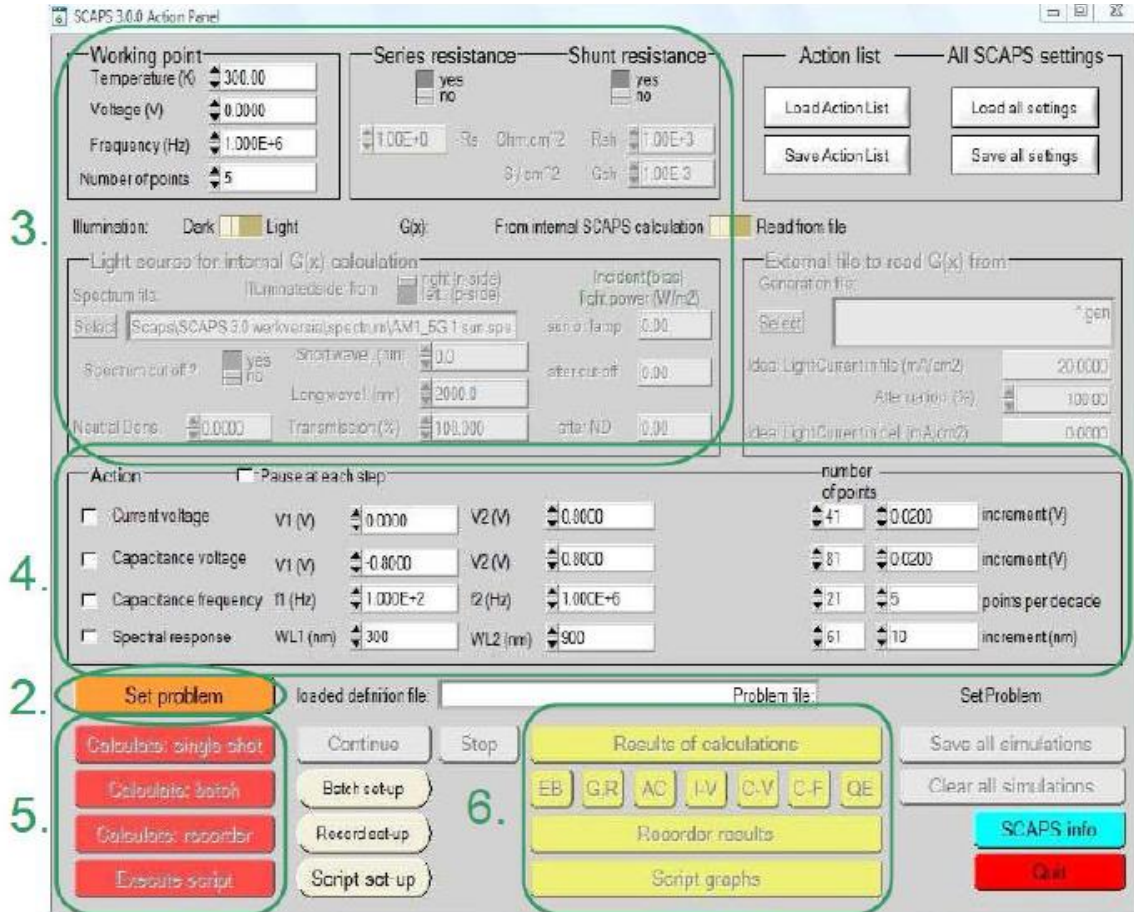


Figure II.01 : panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal

La signification des blocs numérotés de 1 à 6 est expliquée dans le texte . Il ya des panneaux dédiés pour les actions de base :[13]

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

Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit.



### II.2.1 Lancer SCAPS : [13]

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

### II.2.2 Définir le problème : [13]

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

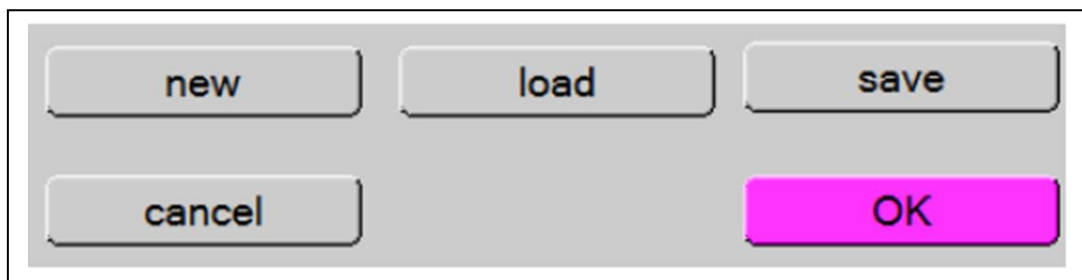


Figure II.02 : Définir le problème

### II.2.3 Définir le point de fonctionnement : [13]

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

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

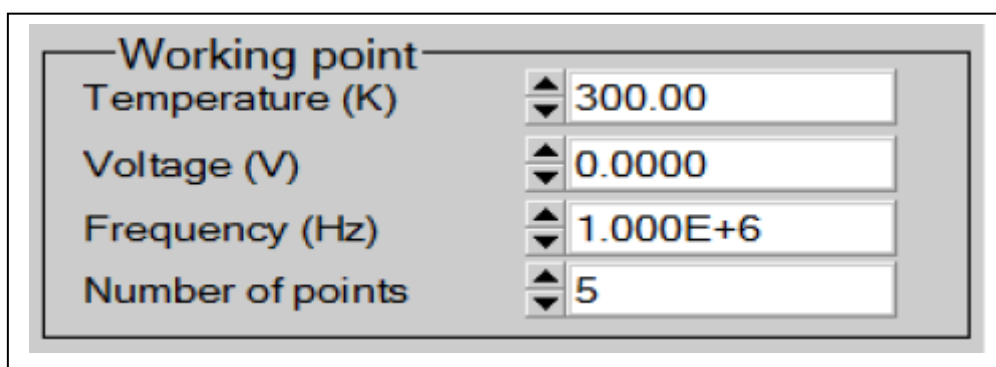


Figure II.03 : Le point de fonctionnement

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

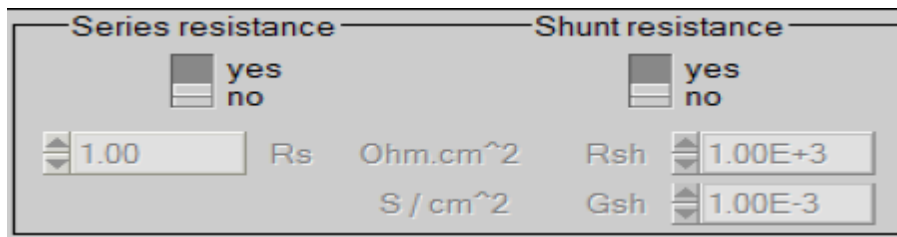
## Chapitre II : Le simulateur SCAPS

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

• **Nombre de point** : le nombre de point utilisé pour tracer les courbes.

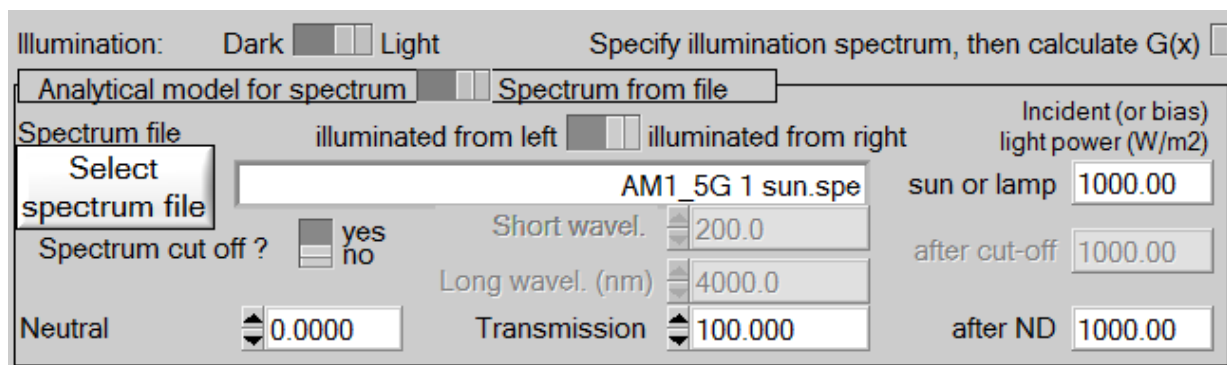
### ✓ **Résistance série et résistance shunt (parallèle) :**[14]

ces deux paramètres influencent sur la caractéristique  $I$ - $V$ , elle représente les pertes ohmiques de la cellule (voir la **Figure II.4**).



**Figure II.4** : Résistance série et parallèle.

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



**Figure II.5** : L'illumination

### **II.2.4 Sélection des caractéristiques à simuler :** [13]

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

### **II.2.5 Lancer le calcul :**

### **II.2.6 Afficher les courbes simulées :** [15]

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la **Figure II.06**.

## Chapitre II : Le simulateur SCAPS

Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper et Coller vers, par ex., Excel, origine ou sauve garder les valeurs dans un fichier de données.

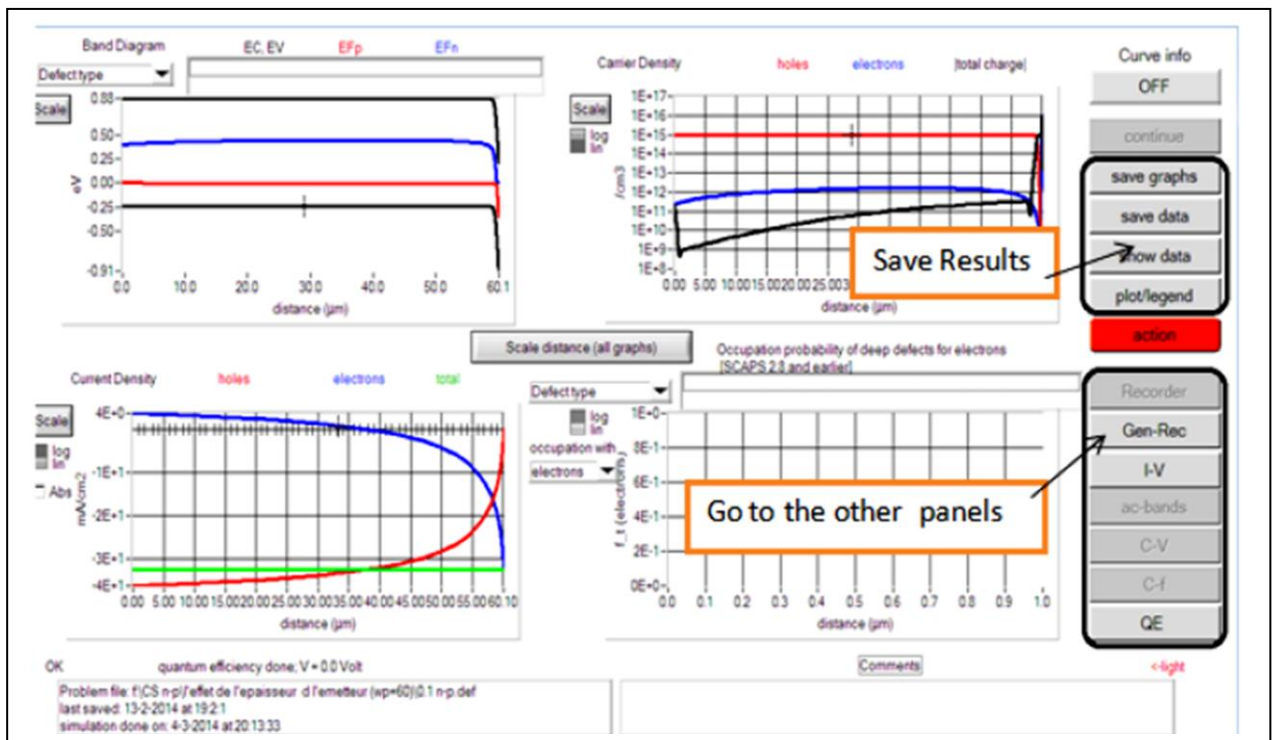


Figure II.06 : Panneau des bandes d'énergie

Les grandeurs simulées sont :

- Caractéristique I-V.
- Capacitance en fonction de la tension « C-V ».
- Capacitance en fonction de la fréquence « C-f ».
- Rendement quantique Q-E.
- Bande d'énergie « Energy band » et bande d'énergie en régime alternatif «AC Band ».

### II.2.7 Les courbes I-V : [13]

La figure II.4 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. La couleur de la dernière courbe calculée est indiquée (lorsque le graphe est trop encombré, on clique CLEAR ALL GRAPHS dans le panneau d'action). Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe.

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

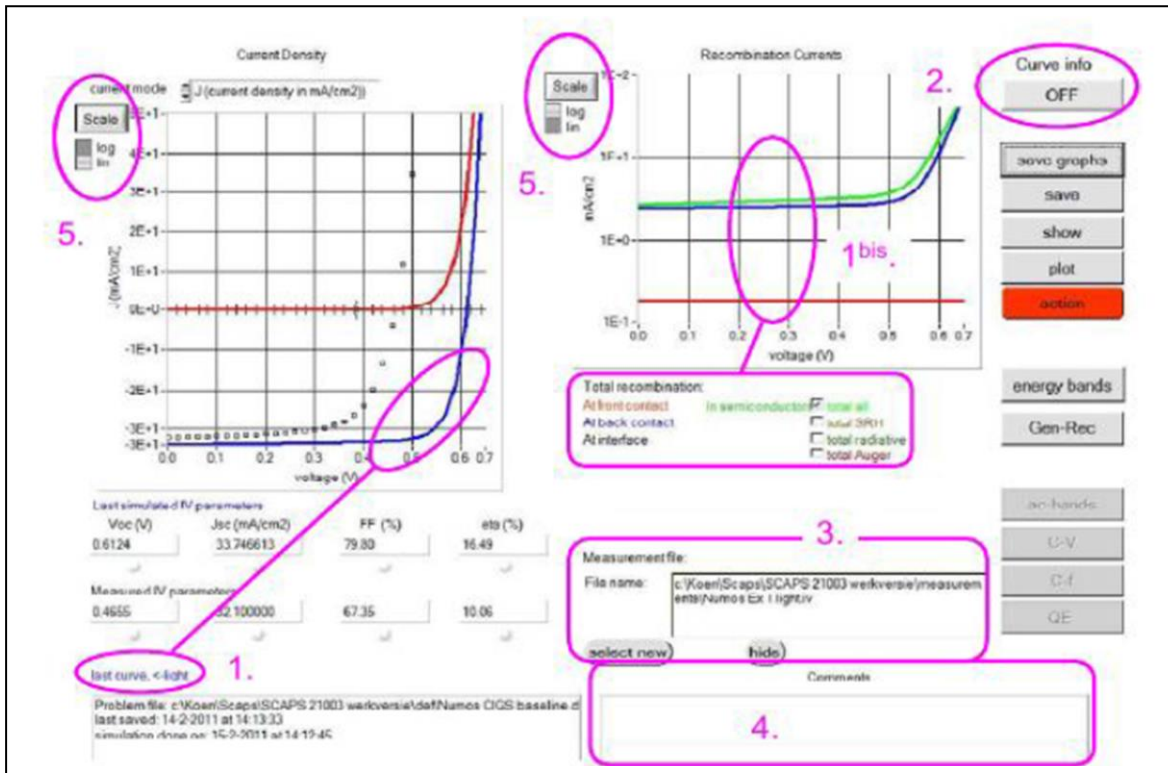
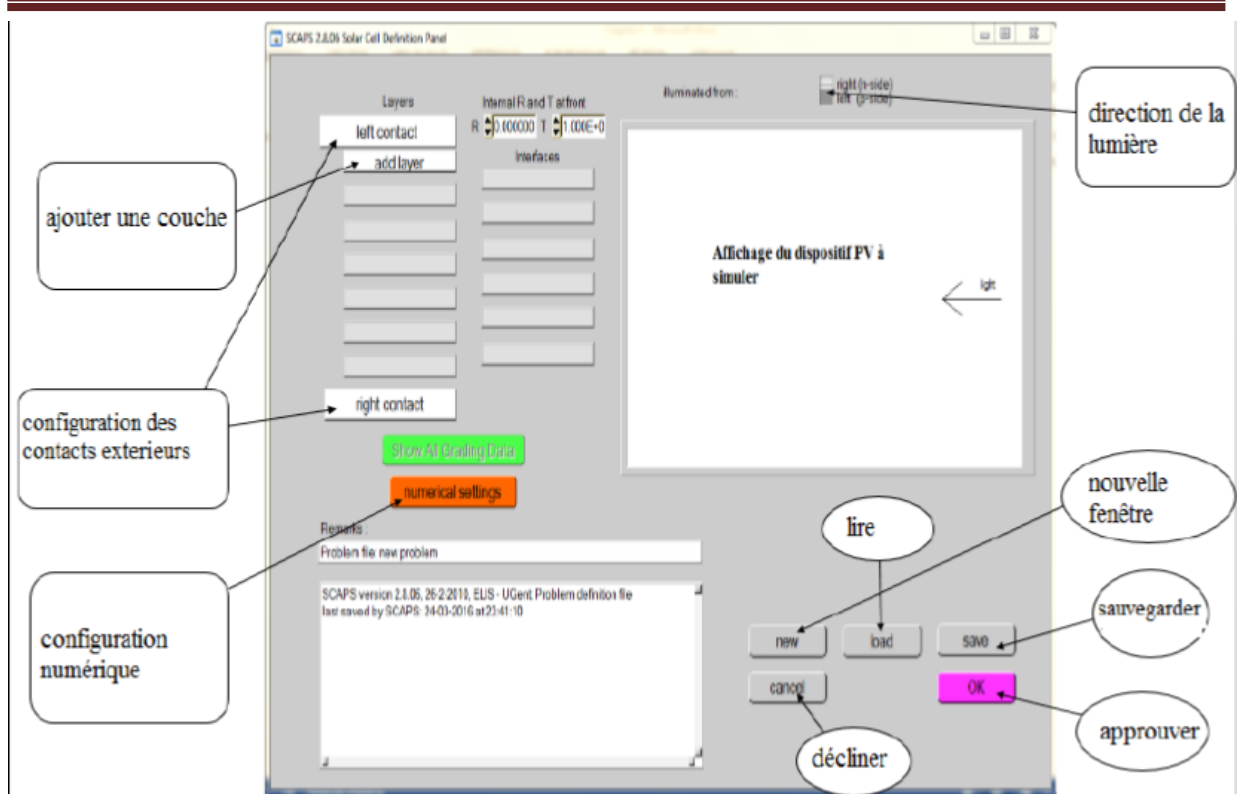


Figure II.07 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement

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

### II.3 Définition d'une cellule solaire : [14]

On appuyant sur le bouton « set problem » situé dans le panneau d'action, on obtiendra la fenêtre représentée sur la Figure II.08 : nommée panneau de définition d'une cellule solaire ou bien Solar Cell Definition Panel.



**Figure II.08** : Panneau de définition d'une cellule solaire.

### II.3.1 Edition de la structure d'une cellule solaire : [13]

Quand on clique sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Inter change) d'extension **.def** qui peuvent s'ouvrir avec Notepad.exe ou Wordbad.exe. Il est déconseillé de les modifier au risque de les rendre inutilisables par la suite. Les propriétés des couches, des contacts et d'interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure II.09. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.

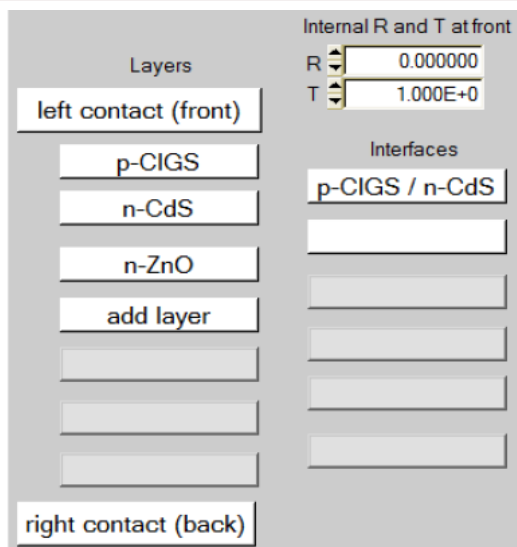


Figure II.09 : Définition de la structure d'une cellule solaire

### II.3.2.Right and left contact: [14]

Pour de modifier les paramètres des surfaces extérieurs gauche et droite de la cellule.

Comme le montre la figure II.10

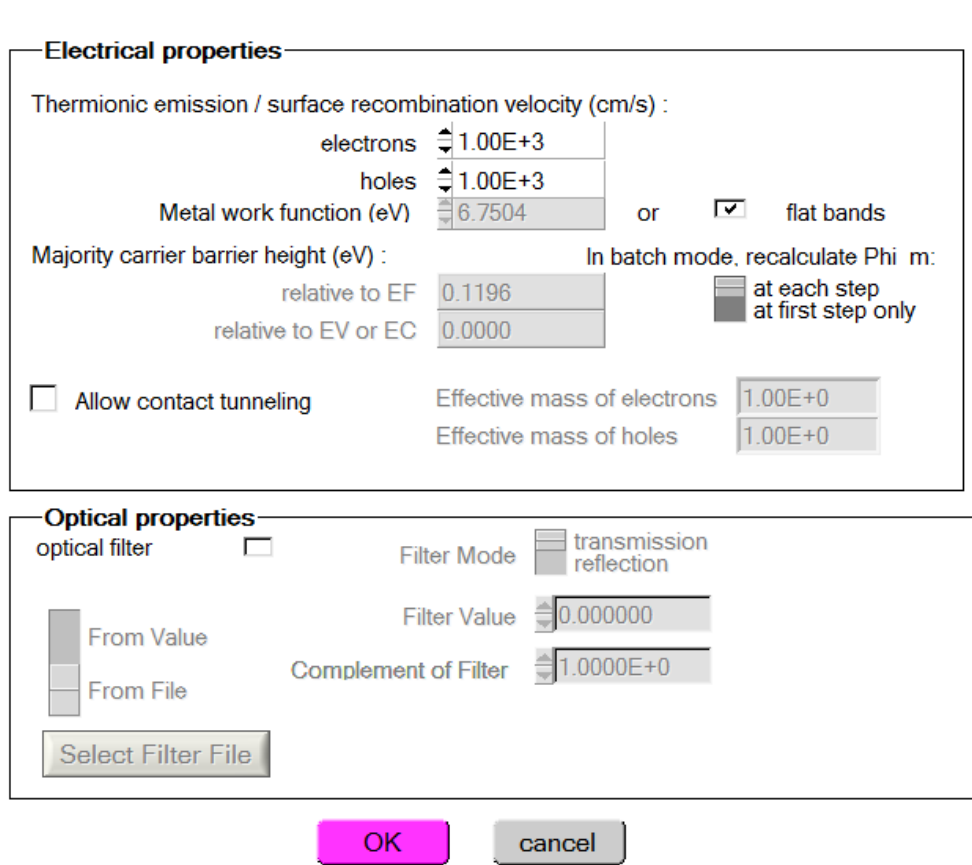


Figure II.10 : Panneau des propriétés des contacts.

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

Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.

Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).

La barrière des porteurs majoritaires.

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

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

**d. Save :** afin de sauvegarder la cellule à étudier.

**e. Load :** afin de sélectionner une cellule déjà sauvegarder.

**f. Ok :** approuver la cellule construite et revenir au panneau d'action pour finir le travail.

**g. Cancel :** décliner le panneau de définition et revenir au panneau d'action.

### II.3.3 Définition des couches :[14]

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Figure II.8) s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau.

Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage).

Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite.

Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile.

Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, vitesse thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel.

Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres.

Dans le cinquième block, figure II.8, on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques,...).

Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme le montre la figure III.13. L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut introduite sous forme de données. SCAPS fourni un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS.



**SCAPS 3.2.01 Layer Properties Panel**

LAYER 1 p-CZTS

thickness ( $\mu\text{m}$ )

uniform pure A (y=0) ▼

The layer is pure A: y = 0, uniform

Semiconductor Property P of the pure material

bandgap (eV)

electron affinity (eV)

dielectric permittivity (relative)

CB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )

VB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )

electron thermal velocity (cm/s)

hole thermal velocity (cm/s)

electron mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )

hole mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )

Allow Tunneling

effective mass of electrons

effective mass of holes

no ND grading (uniform) ▼

shallow uniform donor density ND ( $1/\text{cm}^3$ )

no NA grading (uniform) ▼

shallow uniform acceptor density NA ( $1/\text{cm}^3$ )

Figure II.11 : Propriétés de la couche ajoutée.

no ND grading (uniform) ▼

shallow uniform donor density ND ( $1/\text{cm}^3$ )

no NA grading (uniform) ▼

shallow uniform acceptor density NA ( $1/\text{cm}^3$ )

Figure II.12 : Propriétés des dopages définis

**Absorption model** Show / Set alpha(composition; lambda) ▼

alpha (y=0) alpha (y=1)

from model  from file  from model  from file

absorption constant A ( $1/\text{cm eV}^{1/2}$ )

absorption constant B ( $\text{eV}^{1/2}/\text{cm}$ )

Figure II.13 : Modèle de l'absorption

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche (Figure II.14). Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges.



Band to band recombination

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

Defect 4 of layer 1

defect type	Single Donor (0/+) ▼
capture cross section electrons (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
capture cross section holes (cm <sup>2</sup> )	1.000E-15
energetic distribution	Gauß ▼
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7) ▼
energy level with respect to Reference (eV)	0.600
characteristic energy (eV)	0.200

Nt grading dependent on position x: Nt(x) ▼ exponential ▼

Nt total (1/cm <sup>3</sup> )	Left (x=0) ▼	1.000E+15	Right (x=1) ▼	1.000E+14
Nt peak (1/eV/cm <sup>3</sup> )	Left (x=0) ▼	2.821E+15	Right (x=1) ▼	2.821E+14

**Figure II.14** : Définition des types de recombinaison présents

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

#### II.4. conclusion :

SCAPS-1D est un bon logiciel utilisé pour la simulation numérique en une dimension des dispositifs photovoltaïques. Ce modèle est basé sur la résolution des équations de continuité des électrons et des trous et sur l'équation de poisson. Il est très facile à l'utiliser. Dans ce chapitre on a présenté on détail le fonctionnement de cet outil unidimensionnel de simulation, les différents modules, la partie de définition de la structure et enfin la partie d'affichage des résultats .Pour les avantages de ce logiciel, on a choisi d'utiliser le SCAPS-1D pour simuler une structure classique d'une cellule solaire à base CIGS. Dans le chapitre qui suit on va présenter la simulation de la structure proposée, les résultats des performances photovoltaïques obtenus et la discussion. [15]

# Chapitre III

Résultats et discussion

### III.1. Introduction

La cellule solaire étudiée dans notre travail est une jonction p-n en CIGS. Les paramètres d'entrée de cette cellule sont les épaisseurs, le dopage des deux régions n et p, ainsi que le spectre du soleil.

Puisque les cellules solaires à base du CIGS sont destinées aux applications spatiales, le spectre du soleil utilisé est l'AM1.5G. Tous ces paramètres sont introduits dans l'interface de SCAPS pour simuler la caractéristique courant-tension de la cellule et son rendement quantique externe et On va étudier l'effet du dopage et de l'épaisseur des couches : la couche fenêtre (ZnO; Al), la couche intrinsèque (i-ZnO), la couche tampon (CdS) et la couche absorbante (CIGS).sur les paramètres photovoltaïques ( $J$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) de la cellule solaire dans le but d'aboutir à un rendement maximal de la cellule solaire à base du CIGS.

### III.2. Méthodologie de simulation numérique :

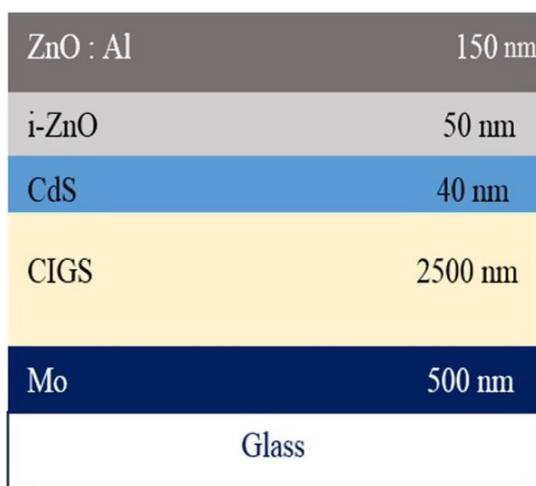
Des simulations numériques sont utilisées pour construire la structure du dispositif de cellule solaire comme représenté sur la Fig. 1. Dans ce travail, le simulateur SCAPS 1D a été utilisé pour développer les simulations numériques pour les cellules solaires « CIGS » conçus sur la base d'équations fondamentales, y compris l'équation de Poisson qui concerne les variations de potentiel électrostatique à des densités de charge locales. Les équations de continuité et de transport décrivent la façon dont les électrons et les densités du trou évoluent en tant que résultat de processus de génération, de recombinaison et de transport. Le model de recombinaison SHOCKLEY-READ-HALL (SRH) est utilisé pour calculer les taux de recombinaison qui dépendent de la densité des états.

Le taux de recombinaison dans les défauts dépend également de la section efficace de capture et de la vitesse thermique. Le point de départ pour les simulations est l'entrée des paramètres de l'appareil qui sont ceux des paramètres du matériau de chaque couche dans la structure cellulaire. Les propriétés semi-conductrices des couches de ZnO, CdS et CIGS utilisées comme paramètres d'entrée pour les simulations sont présentées au tableau 1.

Le simulateur peut générer des fichiers pour les informations de maillage, de matériau et de dopage utilisées par le solveur principal pour modéliser les paramètres de la cellule photovoltaïque. La partie suivante vise à présenter nos résultats concernant l'influence de quatre couches, à savoir : la couche fenêtre (ZnO; Al), la couche intrinsèque (i-ZnO), la couche tampon (CdS) et la couche absorbante (CIGS).

Pour cela, nous avons varié l'épaisseur et la concentration du support d'une couche et maintenu inchangées les valeurs optimales des trois autres couches restantes.

### III.2.1. Structure de la cellule étudiée



**Figure III.1** : Schéma de principe de la structure photovoltaïque CIGS.

### III.2. 2.Les paramètre de simulation

CIGS, c'est le matériau utilisé dans notre travail, est défini à partir de ses paramètres tirés de la littérature, dont les valeurs sont rassemblées dans le **Tableau III.1**.

**Tableau III.1**: Paramètres de simulation la cellule solaire en CIGS

Paramètres	ZnO :AL	i-ZnO	CdS	CIGS
<b>Epaisseur (nm)</b>	150	50	40	2500
<b>Eg (Ev)</b>	3.3	3.3	2.4	1.2
<b>Affinité (eV)</b>	4	4	4.5	3.89
<b>N<sub>C</sub>(cm<sup>-3</sup>)</b>	2.2*10 <sup>18</sup>	2.2*10 <sup>18</sup>	2.2*10 <sup>18</sup>	2.2*10 <sup>18</sup>

<b><math>N_v(\text{cm}^{-3})</math></b>	$1.8 \cdot 10^{19}$	$1.8 \cdot 10^{19}$	$1.8 \cdot 10^{19}$	$1.8 \cdot 10^{19}$
<b>Permittivité <math>\epsilon_r</math></b>	9	9	10	13.6
<b>Mobilité d'électrons (<math>\text{cm}^2/\text{V.s}</math>)</b>	50	50	10	300
<b>Mobilité des trous (<math>\text{cm}^2/\text{V.s}</math>)</b>	5	5	1	30
<b>Densité de porteur (<math>\text{cm}^{-3}</math>)</b>	$5 \cdot 10^{17}$		$2 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{17}$

### III.3. Résultats et discussion :

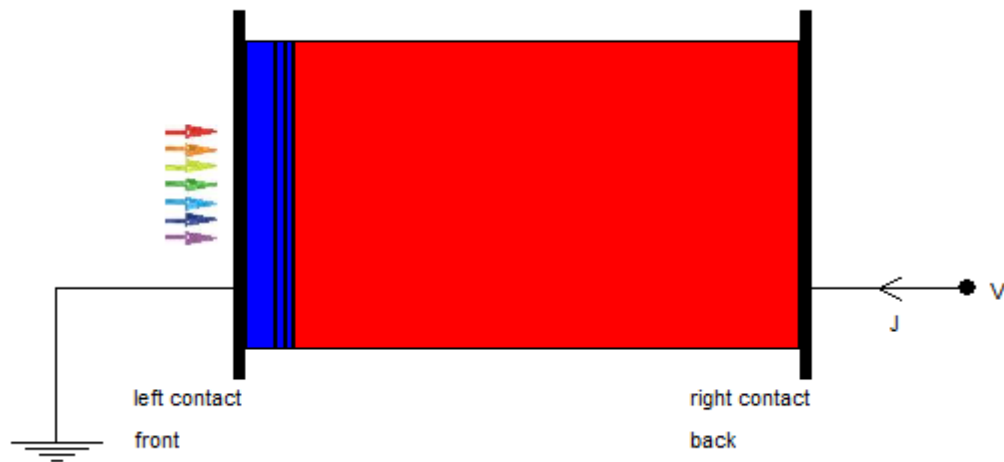
Afin d'optimiser une conception spécifiée de la structure de l'hétérojonction ZnO: Al/i-ZnO/Cds/CIGS, nous devons analyser et interpréter les résultats pour déterminer l'influence des paramètres physiques et technologiques sur les performances des appareils, tels que la concentration des supports et l'épaisseur des différentes couches d'intérêt.

Les résultats présentés dans cette section sont obtenus pour une surface de  $1 \text{ cm}^2$  avec une intensité de rayonnement de  $1000 \text{ W/m}^2$  en utilisant le spectre solaire AM.1.5. La première étape de simulation consiste à valider le modèle, en comparant les données obtenues à partir de la modélisation de simulation [16] avec les résultats expérimentaux [17].

Sur la figure 4, nous représentons notre caractéristique (I-V) simulée à partir de la cellule solaire CIGS. Le tableau 2 montre que l'accord entre simulation de la littérature [16].

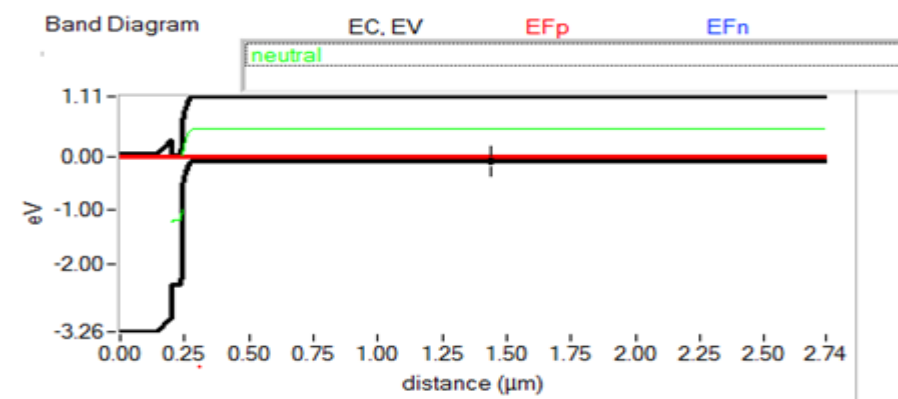
#### III.3.1. Structure de la cellule étudiée

La figure III.1 montre le schéma de la cellule **n-p**. La région n éclairée qui constitue l'émetteur est à gauche et la région p, plus épaisse, qui forme la base est à droite.



**Figure III.2 :** Structure de la cellule à simuler CdS/CIGS sous SCAPS.

La **Figure III.3**, présente le diagramme de bande d'énergie qui correspond à la condition de court-circuit ( $V = 0 V$ ) de la structure.  $F_n$  et  $F_p$  sont les quasi-niveaux de Fermi dû à la polarisation de la cellule par la lumière.



**Figure III.3 :** Diagramme des bandes d'énergie à l'équilibre.

La figure (III.4) illustre la courbe de la caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque qui représente la variation du courant qu'elle produit et en fonction de la tension aux bornes de cette cellule solaire.

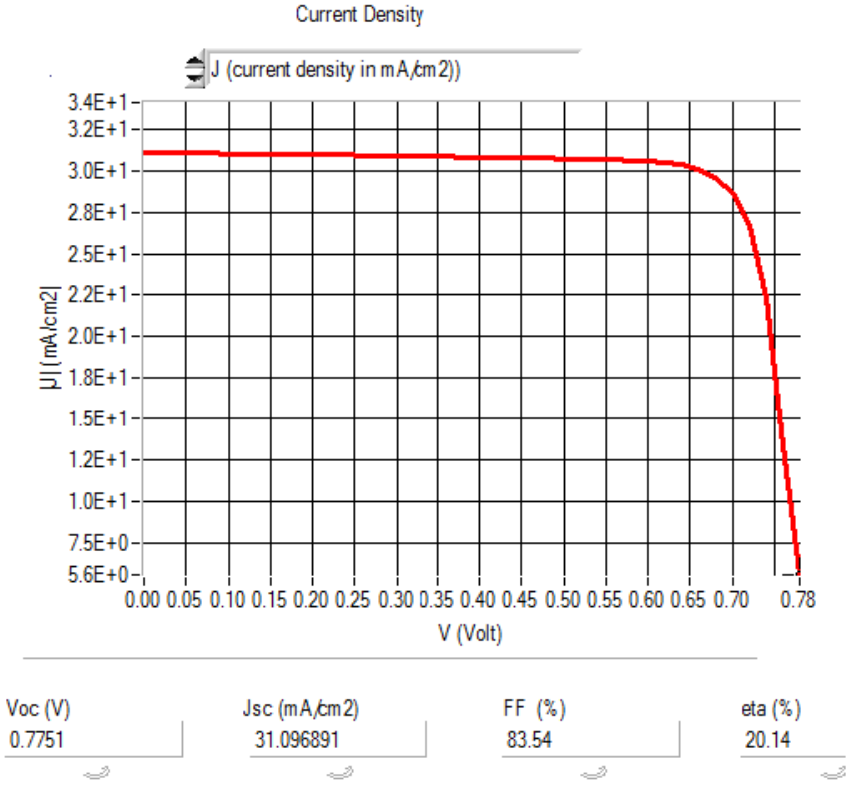


Figure III.4 Caractéristiques I(V) simulées d'une cellule solaire en CIGS.

Le rendement quantique externe (RQE) de la cellule est présenté dans les figures III.5.

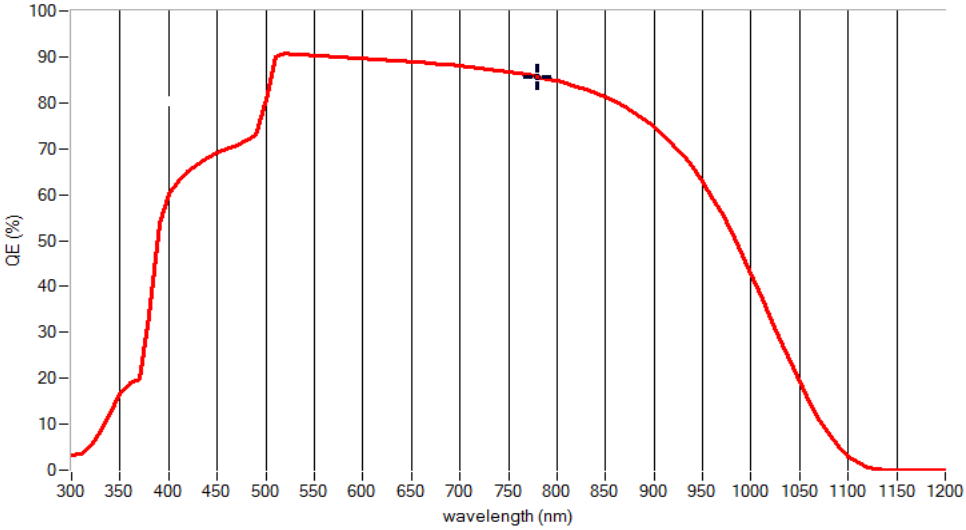


Figure III.5 : Le rendement quantique externe sous AM1.5G de la cellule n-p en CIGS.

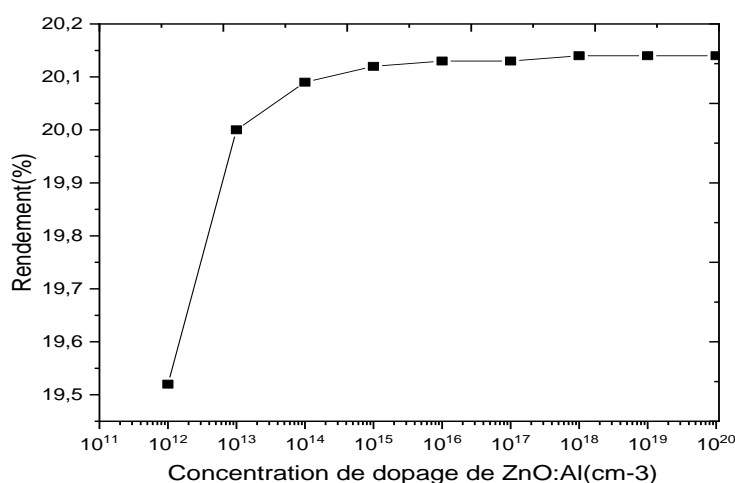
**Tableau III.2** : Paramètres de sortie de la cellule.

	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF(%)	η(%)
<b>Simulation[16]</b>	781.61	38.30	66.68	19.96
<b>Donnée experimentale[17]</b>	740	35.4	77.5	20.3
<b>Notre travail</b>	775.1	31.09	83.54	20.14

### III.3.2. L'effet du dopage et de l'épaisseur de la couche fenêtre (ZnO; Al)

#### III.3.2.1. L'effet du dopage

Nous avons d'abord présenté la variation de rendement en fonction à la concentration de dopage de la couche de fenêtre ZnO d'une épaisseur de 150 nm sur la **Figure III.06**. Comme illustré sur cette figure, lorsque la concentration de dopage de la couche de fenêtre ZnO: Al varié dans la plage de  $10^{12}$  cm<sup>-3</sup>– $10^{15}$  cm<sup>-3</sup>, le rendement augmente également et devient pratiquement constante dans la gamme [ $10^{15}$ ,  $10^{18}$ ] cm<sup>-3</sup>. Il atteint un valeur de 20,10% pour une concentration de support de  $10^{15}$  cm<sup>-3</sup>. La raison parce que l'augmentation du dopage peut améliorer la collecte de des portées photo-générées et donc une augmentation du rendement de conversion. Nous limitons le niveau de dopage optimisé dans la base à  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>.

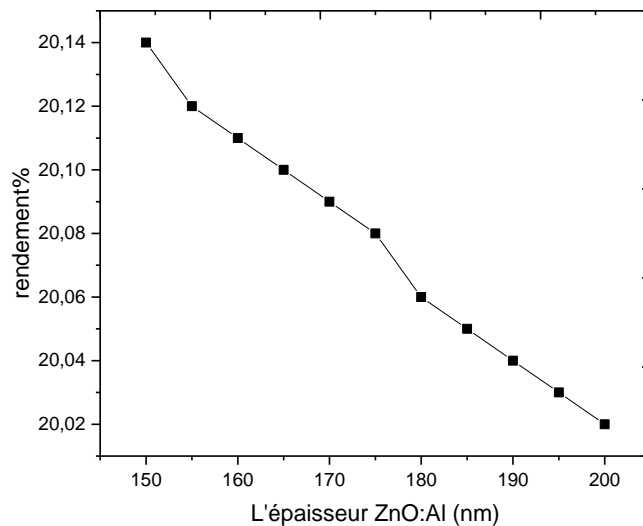


**Figure III.06** : Variation de la concentration de dopage de la couche fenêtre sur le rendement

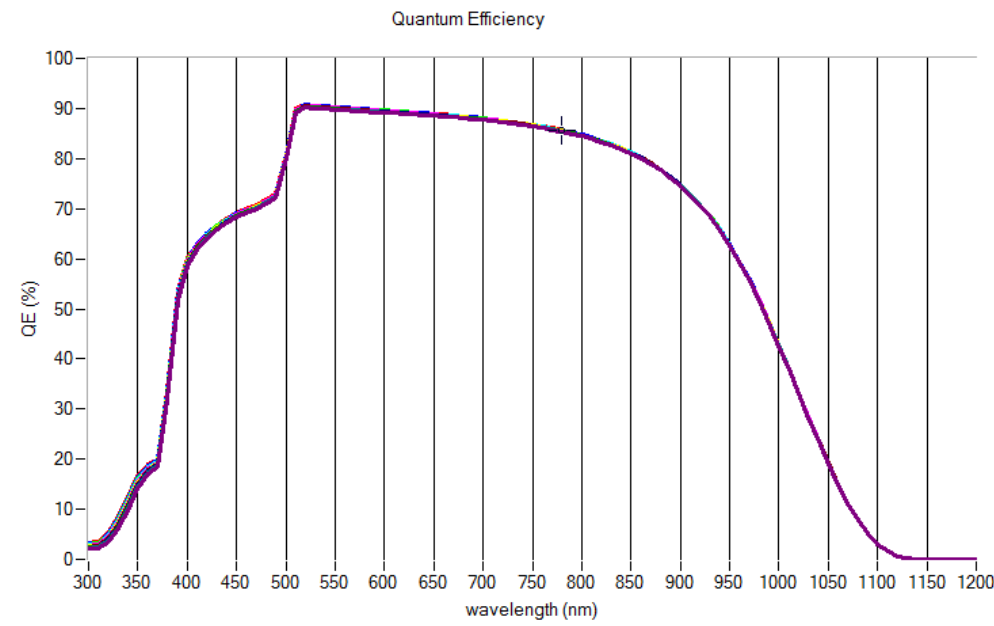


### III.3.2.2. L'effet de l'épaisseur

Nous étudions maintenant, l'effet de l'épaisseur de la couche de fenêtre sur le rendement de la cellule solaire. Sur la **Figure III.7**, le rendement est présenté en fonction de l'épaisseur de la fenêtre ZnO: Al. De cette variation, nous pouvons voir que l'effi des cellules diminue de façon monotone avec l'augmentation de l'épaisseur de ZnO. La plus haute valeur de rendement électrique pourrait être réalisé pour une couche de ZnO: Al d'épaisseur 150 nm. Comme un fait, le premier contact entre les photons et le solaire cellule est réalisée par la couche de fenêtre ZnO. Par conséquent, l'épaisseur de la couche de fenêtre affecte la création de paires électron-trou. Alors la valeur la plus élevée de le rendement correspond à l'épaisseur égal à 150 nm.



**Figure III.7:** Le rendement électrique en fonction de l'épaisseur de ZnO: Al



**Figure III.8:** Le rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur de ZnO: Al

D'après la courbe **Figure III.8** en remarque :une légère variation du rendement quantique pour les basses valeurs de  $\lambda$  parce que on a varié l'épaisseur de la couche fenêtre

### III.3.3. L'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque (i-ZnO)

Nous avons procédé à la variation de l'épaisseur de ZnO (i-ZnO) non dopé de 50 nm à 100 nm pour montrer son effet sur le rendement des cellules solaires, les résultats ont été représentés sur la **Figure III.9**. D'après cette figure, il est évident que le rendement de la cellule augmente lentement avec l'augmentation l'épaisseur d'i-ZnO de 50 nm à 75 nm. La cellule n'est pas très sensible à l'épaisseur, cela peut être dû au fait que le i-ZnO couche est conçue pour faciliter le collage de la cellule pendant la fabrication et ne contribue pas à la génération de porteurs . Mais pour l'épaisseur entre 75 nm et 85 nm, il y a une diminution du rendement de la cellule de 20,09% à 20,08% et pour les valeurs d'épaisseur supérieur à 75 nm, on observe une lente diminution de le rendement reste pratiquement constant. Comme indiqué sur la **Figure III.9**, la valeur optimale l'épaisseur est de 50 nm montrant le meilleur rendement.

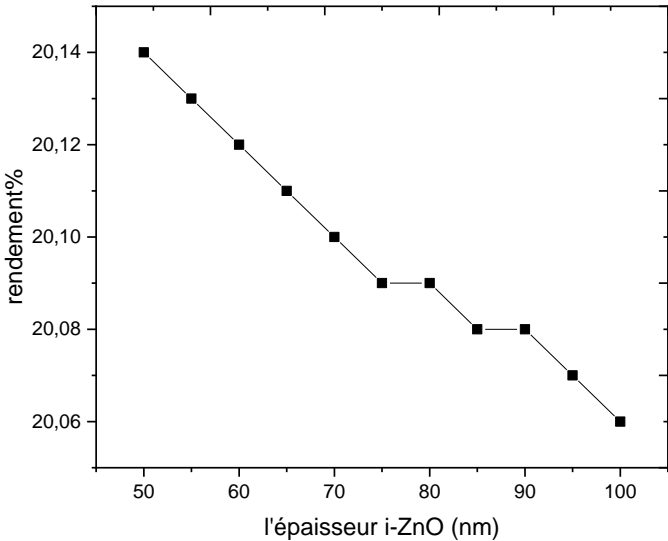


Figure III.9: Le rendement électrique en fonction de l'épaisseur de i-ZnO.

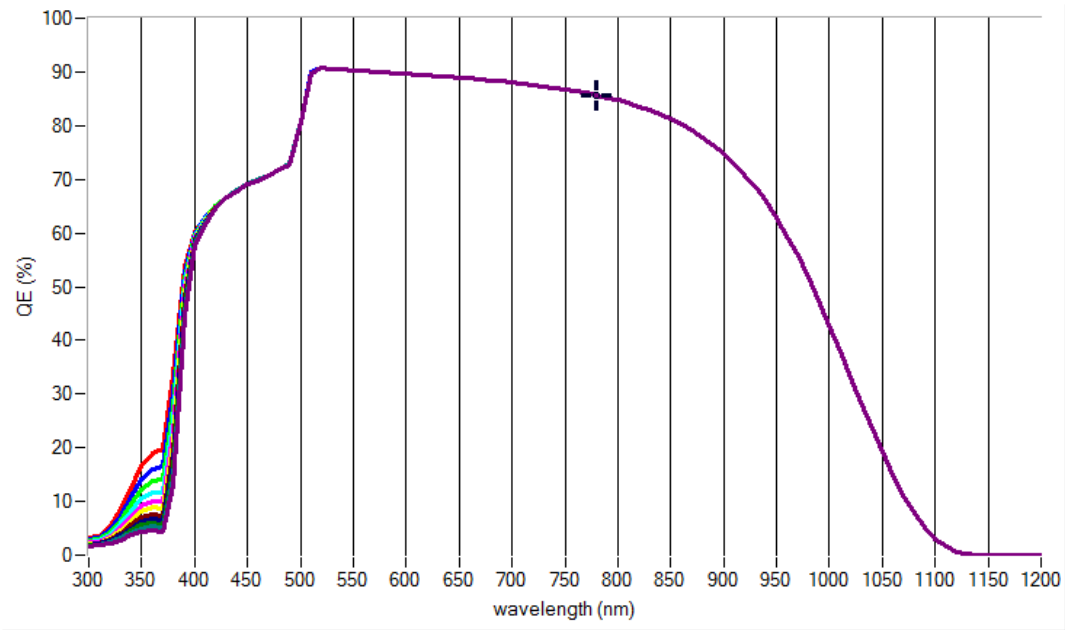


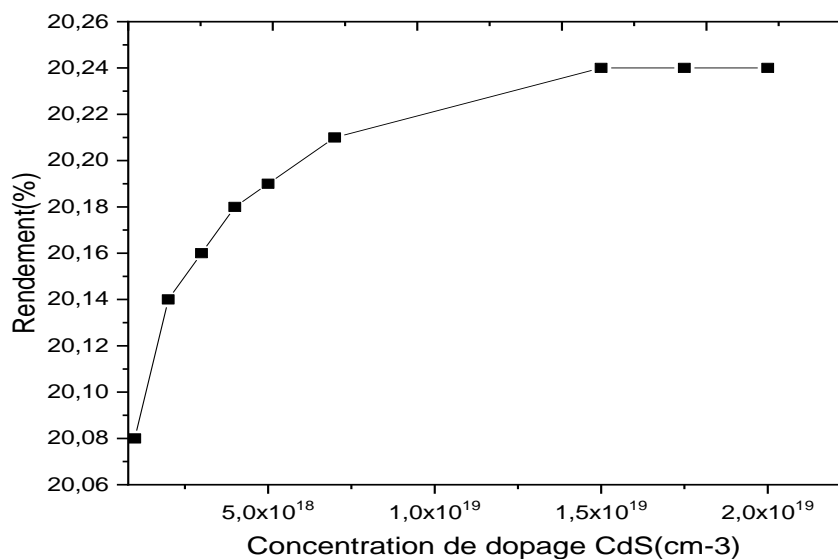
Figure III.10: Le rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur de i- ZnO

D'après la courbe **Figure III.10** en remarque une légère variation du rendement quantique pour les basses valeurs de  $\lambda$  parce que on a varié l'épaisseur de la couche intrinsèque.

### III.3.4. L'effet du dopage et de l'épaisseur de la couche tampon (CdS)

#### III.3.4.1. L'effet du dopage

Pour l'étude de le rendement en fonction de la concentration de dopage de couche tampon CdS, nous avons utilisé une épaisseur CdS de 40 nm. Nous présentons sur la **Figure III.11** le rendement solaire en fonction au transporteur CdS concentration. Comme le montre cette figure, la densité de porteurs de La couche tampon CdS influence de manière significative le rendement du solaire cellule qui augmente avec l'augmentation du dopage de porteurs de CdS de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  à  $2.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Lorsque la densité de porteuse du la couche tampon augmente la barrière de potentiel en CdS / CIGS et Les hétéro-jonctions ZnO / CdS diminuent et permettent une augmentation du zone de charge d'espace, d'où une amélioration de la collection des porteurs photo générés et donc une augmentation du rendement de conversion. Ceci est cohérent avec les études rapportées.

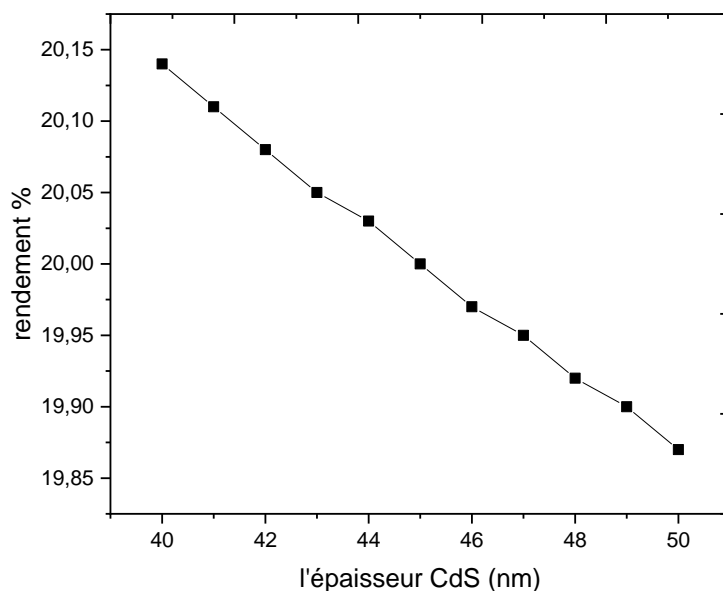


**Figure III.11 :** Variation de la concentration de dopage de la couche tampon sur le rendement

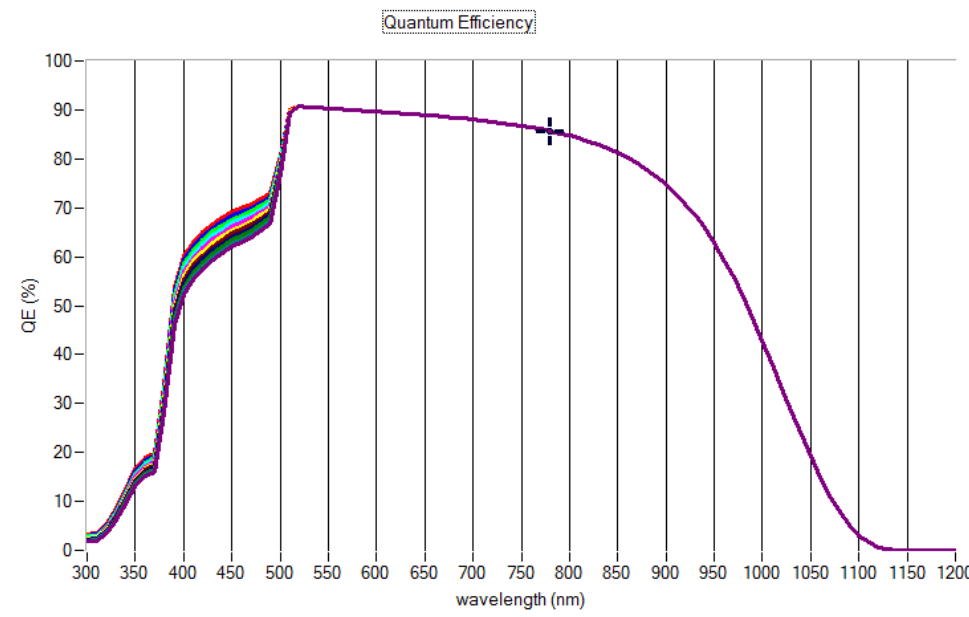
#### III.3.4.2. L'effet de l'épaisseur

Nous montrent maintenant l'influence de l'épaisseur de CdS sur l'efficacité des cellules solaires. Nous présentons la variation de rendement avec l'épaisseur de CdS allant de 40 nm à 50 nm à un niveau de dopage de  $2,10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Les résultats sont présentés sur **Figure III.12**, où les valeurs d'efficacité sont décroissantes avec l'augmentation de l'épaisseur du CdS. C'est évidemment en raison du fait qu'avec une

couche de CdS plus mince, la plupart des porteurs générés sont collectés. Lorsque l'épaisseur augmente, les photons de les courtes longueurs d'onde sont absorbés à une distance supplémentaire entre ZnO et CIGS dans la jonction. Bien que la couche CdS soit caractérisée par des états défectueux qui agissent comme des centres de recombinaison réduisent la durée de vie de porteurs et par conséquent les porteurs photogénérés créés sur la recombinaison CIGS avant d'atteindre ZnO. Par conséquent, il y a une baisse du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur du CdS. De **Figure III.12**, CdS a atteint le rendement la plus élevée à 40 nm avant le rendement a commencé à tomber.



**Figure III.12:** Le rendement électrique en fonction de l'épaisseur de CdS.

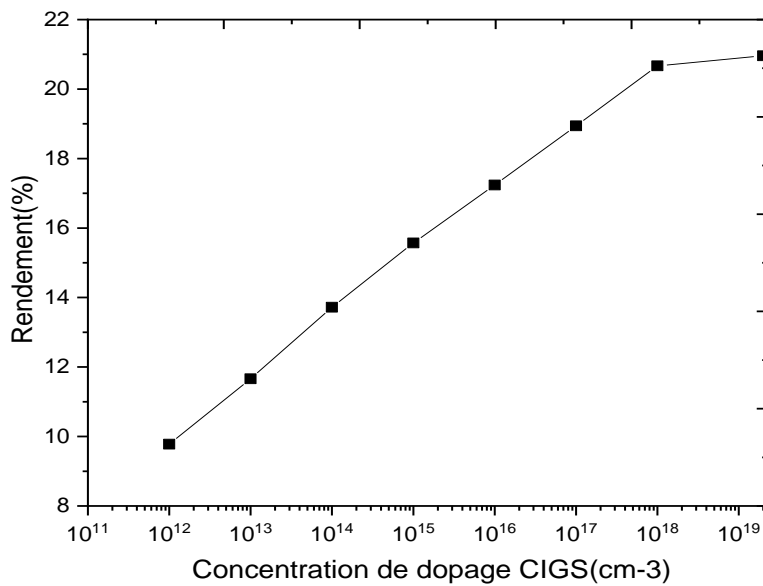


**Figure III.13 :** Le rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur de CdS

### III.3.5. L'effet du dopage et de l'épaisseur de la couche absorbante (CIGS)

#### III.3.5.1. L'effet du dopage

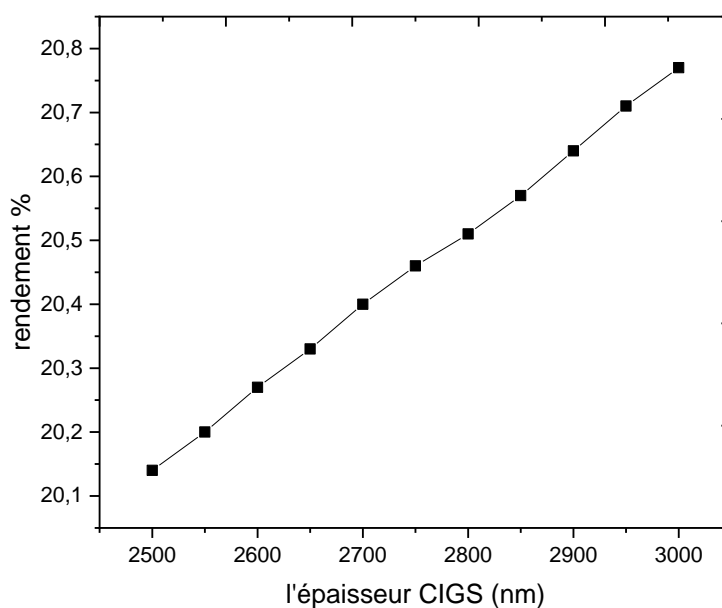
La variation de rendement en fonction de la concentration de dopage avec des films CIGS de 2500 nm est présenté sur la **Figure III.14**. On peut observer que l'augmentation de la concentration de dopage de l'absorbeur CIGS couche de  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , induit une augmentation rapide de le rendement de conversion de 9,78% à 18,94%. Au-delà  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , les valeurs de rendement sont presque en augmentation à la valeur maximale de 20,67% pour une concentration de porteurs égale à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . La concentration de support de la couche absorbante CIGS à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  seront utilisés comme paramètre de base dans cette étude.



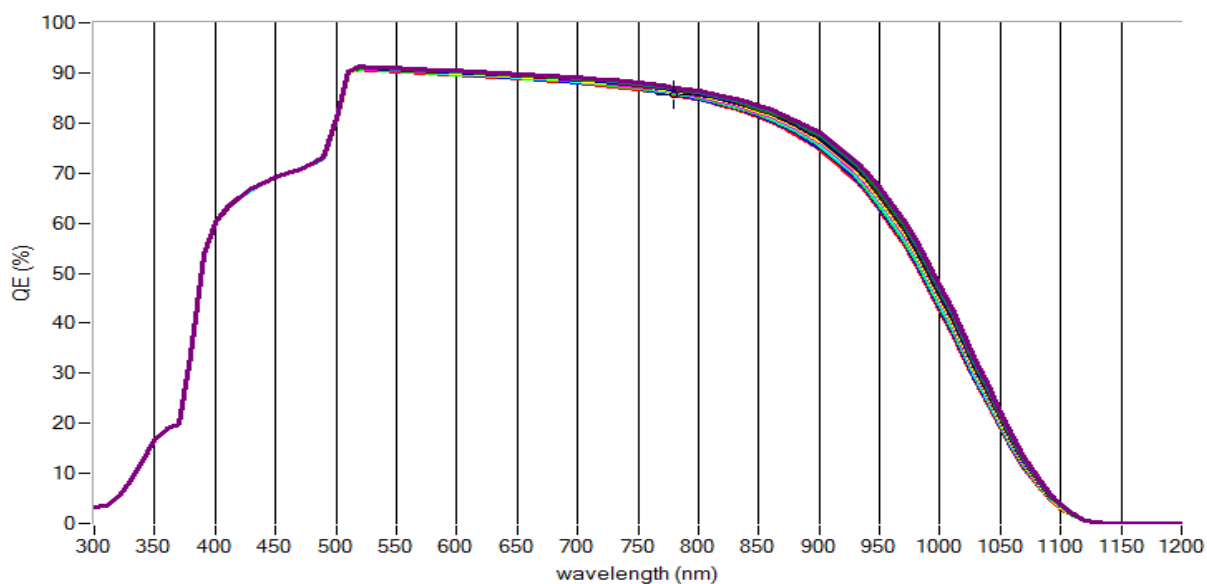
**Figure III.14** :Variation de la concentration de dopage de la couche absorbante sur le rendement

### III.3.5.2. L'effet de l'épaisseur

L'effet de l'épaisseur du CIGS avec une concentration fixe de porteurs à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  sur le rendement solaire est illustré sur la **Figure III.1**. Nous notons que lorsque l'épaisseur du CIGS augmente, le rendement augmente de manière monotone et linéaire. À mesure que l'épaisseur du CIGS augmente, plus de transporteurs sont générés. Plus de porteurs entraînent un courant plus élevé au point de puissance maximale. De plus, d'après la **Figure III.15**, l'optimum l'épaisseur de la couche absorbante est d'environ 3000 nm d'où le rendement a la valeur la plus élevée de 20,77%.



**Figure III.15:** Le rendement en fonction de l'épaisseur de CIGS



**Figure III.16:** Le rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur de CIGS.

D'après la courbe **Figure III.16** en remarque une légère variation du rendement quantique pour les hautes valeurs de  $\lambda$  parce que on a varié l'épaisseur de la couche absorbante.



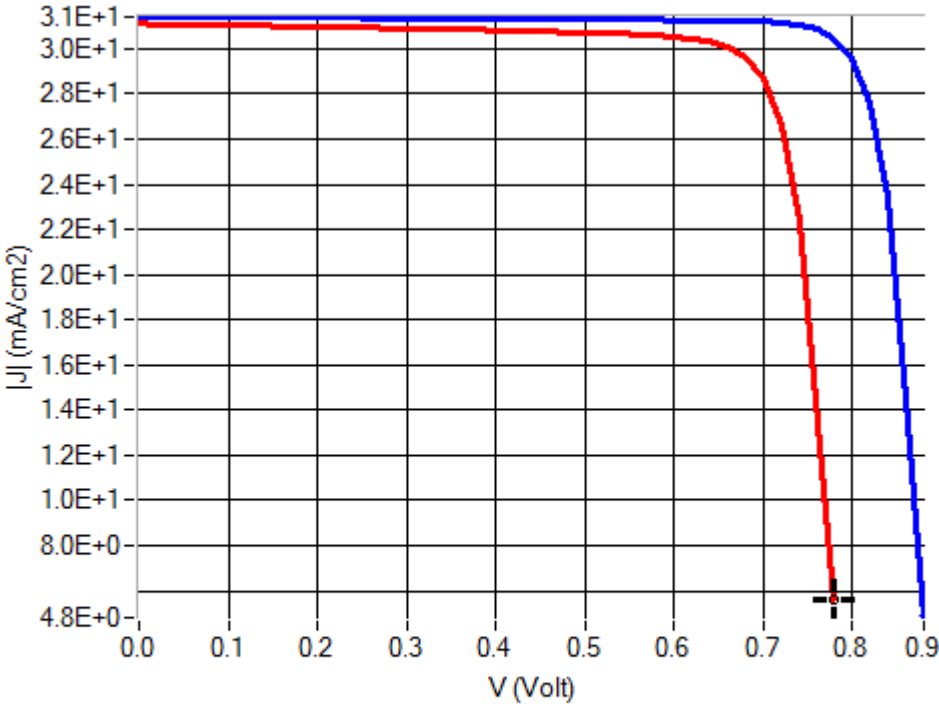
### III.4. La Cellule optimisée :

Comme discuté précédemment, les valeurs optimales de dopage et d'épaisseur de toutes les couches sont déterminées par la simulation de notre cellule qui à son tour fournit les meilleures performances. Nos résultats de simulation sont présentés dans le tableau 3 et la **Figure III.17**. En combinant les valeurs optimales obtenues paramètres illustrés dans le tableau 3, nous avons conçu la structure de la cellule solaire CIGS. La **Figure III.17** montre que notre optimisation nous a permis d'obtenir le rendement de 23,73% qui est amélioré avec 3,77%. Tous ces résultats simulés peuvent être utiles aux expérimentateurs pour améliorer les performances de leurs cellules.

Les courbes de Rendement quantique externe (EQE) en fonction de la longueur d'onde pour les deux cellule sans optimisation (ligne rouge) et la cellule optimale (ligne bleu) sont représentés sur la **Figure III.18**. Pour la cellule optimisée, on observe une augmentation de la Rendement quantique (EQE) dans la courte longueur d'onde entre 0,3 mm et 0,4 mm. Les courbes de rendement des deux références et les cellules optimales montrent le mielleur rendement plate entre 0,4 et 0,95 mm à un niveau élevé d'environ 90–95% et révélant une diminution de l'EQE dans la longue longueur d'onde entre 0,95 mm et 1,1 mm. Ceci est probablement dû à une absorption incomplète des photons à grande longueur d'onde. [16]

**Tableau III.3:** Paramètres d' entrés de la cellule optimisée.

	ZnO :Al	i-ZnO	CdS	CIGS
<b>Epaisseur (nm)</b>	150	50	40	3000
<b>Concentration de dopage (cm<sup>-3</sup>)</b>	10 <sup>18</sup>	–	2*10 <sup>19</sup>	10 <sup>18</sup>



Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	eta (%)
0.8759	31.407021	86.25	23.73

Figure III.17 : (I-V) Courbes de la cellule solaire CIGS

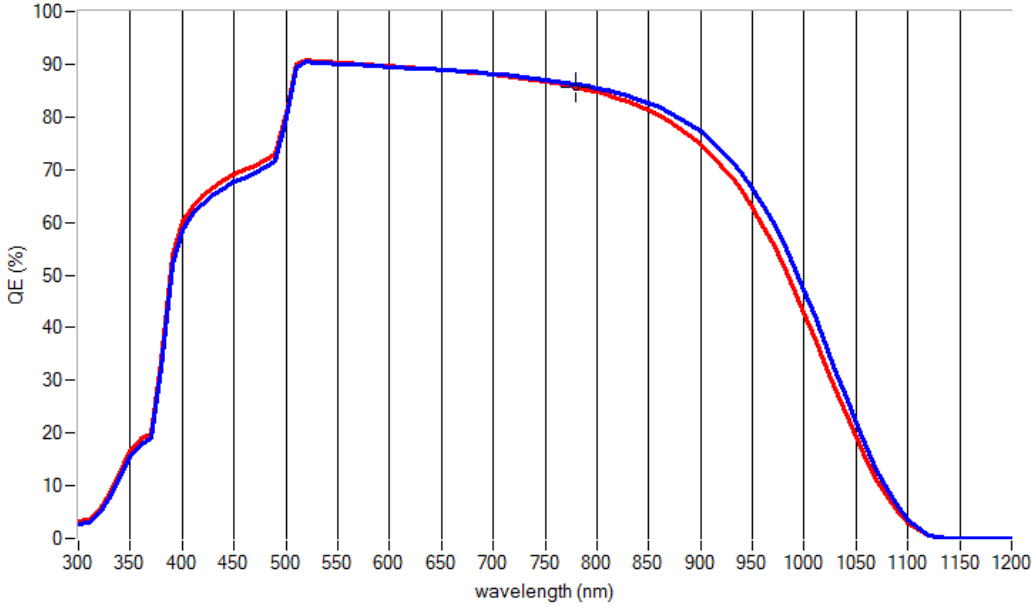


Figure III.18 : Rendement quantique externe de la cellule solaire CIGS

### III.5. CONCLUSION :

Dans cette partie, nous testons un modèle de référence pour confirmer la fiabilité et la fonctionnalité du logiciel SCAPS. Puis, nous étudions l'effet de varier l'épaisseur et la concentration du dopage de chaque couche constituant la structure étudiée sur les performances de la cellule solaire CIGS. D'un autre côté, de trouver les paramètres optimums de chacune des différentes couches constituant la structure solaire (ZnO :Al,i- ZnO, CdS et CIGS) qui donnent les meilleurs rendements pour une énergie de gap de CIGS constante.

Nous constatons que l'épaisseur et le dopage ont un impact très significatif sur l'amélioration de le rendement de la cellule solaire. Il est nécessaire de diminuer L'épaisseur de la couche fenêtre ZnO et de la couche tampon CdS afin d'augmenter L'épaisseur de l'absorbeur CIGS à 3000 nm pour avoir un rendement optimale. Il est préférable d'augmenter la concentration du dopage de ZnO et de CdS mais un dopage de l'ordre de  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  de CIGS est suffisant pour donner un meilleur rendement.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

La conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale, différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée.

Dans ce mémoire, nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction, ZnO/CdS/CIGS, de structure (n-p). Ou la couche ZnO :Al de type-n est utilisée comme une couche fenêtre, la couche CdS de type-n comme une couche tampon et la couche CIGS de type-p est la couche de l'absorbeur, nous avons utilisé la simulation numérique par le logiciel SCAPS, pour l'étude des caractéristiques de cette cellule. Nous avons aussi optimisé les paramètres de couches de la structure tels que l'épaisseur et la concentration du dopage pour obtenir un rendement de conversion électrique maximal.

En première lieu, nous avons trouvé les résultats de simulation de la cellule solaire en ZnO/CdS/CIGS : La densité du courant de court-circuit  $J_{cc} = 31.09 \text{ mA/cm}^2$ , la tension en circuit ouvert  $V_{co} = 0.775 \text{ V}$ , le facteur de forme  $FF = 83.54 \%$  et le rendement de conversion  $\eta = 20.14 \%$ . Ces valeurs sont en accord avec celles trouvées dans la littérature.

En deuxième lieu, nous avons étudié l'effet des couches ZnO :Al, i-ZnO, CdS et CIGS sur les performances de la cellule solaire ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) pour optimiser le rendement électrique. Nous sommes alors intéressés au dopage et à l'épaisseur des couches en ZnO :Al, i-ZnO, CdS et CIGS pour voir leurs influences sur le rendement électrique de la structure.

En faisant varier le dopage la couche fenêtre de  $10^{12}$  à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , le dopage la couche tampon CdS de  $10^{18}$  à  $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et le dopage la couche absorbeur CIGS de  $10^{12}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Un rendement optimal a été obtenu pour un dopage de  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  pour ZnO :Al,  $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  pour CdS et  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  pour CIGS.

Et en faisant varier l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO :Al de 150 à 200 nm et l'épaisseur de la couche intrinsèque i-ZnO de 50 à 100 nm la couche tampon CdS de 40 à 50 nm d'absorbeur CIGS de 2500 à 3000 nm, un rendement optimal a été obtenu pour une épaisseur de 150 nm pour ZnO :Al, 50 nm pour i-ZnO, 40 nm pour CdS et 3000 nm pour CIGS.

En prenant une structure qui combine les paramètres optimaux (épaisseur et dopage) de chaque couche, nous avons pu atteindre un rendement de conversion électrique de 23.73% .

# Références bibliographiques

### Références bibliographies

- [01] CHAOUA Makhoulf(2014). *Effet des couches conductrices et transparentes sur les performances des cellules solaires Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>* .Diplôme de MAGISTER UNIVERSITE de SETIF
- [02] Ben Ali Mourad Rahmouni Seddik (2018) Thème : Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub>. Diplôme de MASTER. Université Adrar.
- [03] MELOUAH Miloud et BAKHTI Safia (2016). Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Cu<sub>2</sub>ZnSn(S,Se)<sub>4</sub>. Mémoire de Master, Université de Ouargla.
- [04] DJAAFAR Fatiha. Etude et modélisation des performances des cellules photovoltaïques à multi couches à base des semi-conducteurs inorganiques. Mémoire de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf Oran.
- [05] ARRAS Aida. Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si. Mémoire de Master, Université Tlemcan.
- [06] BEGHADADI Souad. Etude des performances d'une cellule solaire de type Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>(CIGS). Mémoire de Master, Université Mohamed Tlemcen.
- [07] DELLALI Chaimaa. Optimisation du rendement de conversion photovoltaïque des cellules solaires à bases de diséléniure de cuivre, d'Indium et de Galium « CIGS ». Mémoire de Master, Université Tizi Ouzou.
- [08] KOUHLANE Yacine (2008). Etude et mise au point d'une technique d'élaboration du composé CuInGaSe<sub>2</sub> pour le déposer en couche absorbante dans la fabrication des cellules solaires. Mémoire de Magister, Université d'Annaba.
- [09] TOUAFEK Naima (2015). 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>. Mémoire de Doctorat, Université de Constantine.
- [10] KHEDIM Belhadj Abdelkrim et OULD TALEB ABDERRAHMANE Mohamed Yahia(2015). Etude de fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques. Mémoire de Master, Université de Tlemcen.
- [11] DJEMAI Mounira (2014). Effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>(CIGS). Mémoire de Master, Université de Biskra.

## Références bibliographies

---

- [12] Mme CHADEL ASMA. Optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches des cellules photovoltaïques à base de CIGS.  
Mémoire de Doctorat.
- [13] BEN ABDERRAZK Ghania (2014). Etude par simulation numérique de la cellule solaire à base de CZTS par SCAPS. Mémoire de Master, Université de Biskra.
- [14] HARCH Leila(2019) .*Etude et simulation d'une cellule solaire à base de InGaN*.  
Mémoire de Master, Université de Biskra.
- [15] Ben khaddouma Hiam (2019). Etude et Simulation d'une cellule solaire à base de GaAs  
Mémoire de Master, Université de Biskra.
- [16] Samar Dabbabi , Tarek Ben Nasr, Najoua Kamoun-Turki ,Parameters optimization of CIGS solar cell using 2D physical modelling . Université de Tunis EL Manar, Faculté des Sciences de Tunis, Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (LPMC), 2092 Tunis, Tunisia.
- [17] Jackson P, Hariskos D, Lotter E, Paetel S, Wuerz R, Menner R, Wischmann W, Powalla M. Prog Photovoltaics Res Appl 2011;19:894–7.
- [18] Kalache Salim(2017) .*Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS*.  
Université de Biskra .