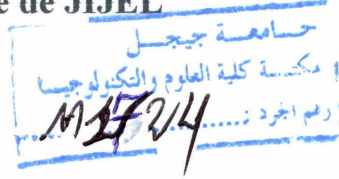


REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

Université de JIJEL



Mémoire d'Études en vue de L'Obtention du

Diplôme Master en Electronique

Spécialité : Energie Renouvelable

Présenté par :

Benoune Fadhila

Thème



*L'effet des paramètres de l'hétérojonction sur  
le photocourant dans la cellule solaire*

*CdS/CIGS*

le jury composé de :

M<sup>eme</sup>. S.Merabet

M<sup>eme</sup>. A.Merzougui

Encadré par:

M<sup>eme</sup>..Bouchekouf..Seloua

Année universitaire : 2013/2014

## Remerciement

Je remercie **ALLAH** le Tout-puissant de m'avoir donner le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué au département d'électronique, faculté des sciences et technologies, mon encadreur Madame **Bouhekouf Seloua**, Docteur à l'Université de JIJEL. Je lui exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

J'exprime mes sincères remerciements à Madame **S. Merabet**, Docteur à l'université de Jijel, d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse. Je remercie sincèrement Madame **A.Merzougui**, Docteur à l'université de Jijel, d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Je remercie tous les enseignants qui me contribuer à mon travail, surtout monsieur Adel MELLIT Professeur à l'Université de Jijel.

## **DEDICACE**

**Je dédie ce modeste travail  
A mes chers parents  
A mes frères et mes sœurs  
A tous ma famille  
A mon encadreur Madame BOUCHEKOUF SELOUA  
A tous mes collègues et mes amis partout  
A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science  
et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien  
et la prospérité de l'humanité..**

# SOMMAIRE

**SOMMAIRE**

REMERCIEMENTS.....

DEDICACES.....

LISTE DES SYMBOLES .....

LISTE DES FIGER.....

SOMMAIRE.....

INTRODUCTION GENERALE ..... 1

**CHAPITRE I La conversion photovoltaïque**

I. Introduction ..... 4

II.L'énergie solaire ..... 4

II.1.La nature de rayonnement solaire ..... 4

II.2. Spectre solaire ..... 5

III.La conversion photovoltaïque ..... 7

III.1 Interaction photon-électron (concept de base de la cellule photovoltaïque)...7

III.1.1.Les semiconducteurs ..... 8

III.2. Les propriétés électro-optiques..... 8

III.2.1. L'absorption optique..... 8

III.2.2.La génération ..... 9

## TABLE DES MATIERES

---

III.2.3 :La diffusion .....	9
III.2.4 :La recombinaison de surface .....	10
IV.Les cellules solaires.....	10
IV.1.Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	11
IV.2.Cellule solaire idéale.....	13
IV.3.Cellule solaire réelle.....	14
IV.4. Caractéristique d'une cellule solaire.....	15
IV.4.a.Le courant de court circuit, $I_{sc}$ .....	15
IV. 4.b. La tension de circuit ouvert, $V_{co}$ .....	15
IV.4.c.La réponse spectrale, $SR(\lambda)$ .....	15
IV.4.d. La puissance maximale, $P_m$ .....	16
IV.4.e.Le facteur de forme, $FF$ .....	16
IV.4.f. Le rendement de conversion $\eta$ .....	16
V.Les différentes filières photovoltaïques.....	17
V.a.Filières cellules photovoltaïques au silicium cristallin .....	18
V.a.1.Filière des cellules photovoltaïques à base de silicium monocristallin.....	18
V.a.2.Filière des cellules photovoltaïques à base de silicium polycristallin .....	19

## TABLE DES MATIERES

---

V.b.Filières cellules photovoltaïques en couches minces.....	19
V.b.1.Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe (Si H).....	20
V.b.2. Les cellules photovoltaïques à base Cu (In, Ga) Se <sub>2</sub> .....	20
VI.Conclusion.....	22
<b>Chapitre II : La cellule à hétérostructure à base du quaternaire CIGS</b>	
I Introduction.....	23
II. Description générale des cellules solaires a base du CIGS.....	24
II.1. Propriétés générales de l'oxyde de zinc (ZnO).....	24
II.1.1. Propriétés cristallographiques.....	24
II.1.2. les propriétés électriques de ZnO.....	25
II.3. Pourquoi le choix du CdS ?.....	26
III. Caractéristiques et différentes propriétés des semi-conducteurs CIS et CIGS	
.....	28
III.1.Structure cristalline de CIGS.....	28
III.2. Le CuInSe <sub>2</sub> (CIS).....	29
III.3. Propriétés optiques du CuInSe <sub>2</sub> .....	31
III.3.1. Le coefficient d'absorption.....	31

## TABLE DES MATIERES

---

III.3.2. La bande interdite $E_g$ .....	32
III.3.3. Influence du Ga.....	32
IV. Les hétérojonctions.....	33
IV.1. Définitions.....	33
IV.2. Diagramme de bande d'énergie.....	36
IV.3. Diagramme de bande de la photopile à hétérojonction CdS/Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> .....	38
V. Conclusion.....	38

### chapitre III : modélisation et organigrammes des cellules solaire

I. Introduction.....	39
II. Modèle de calcul.....	39
II.1. Eclairage, puissance incidente et flux solaire au sol.....	39
II.2. Coefficient d'absorption.....	40
II.2.1 : pour le CdS.....	40
II.2.2 : Pour le CuInGaSe <sub>2</sub> (CIGS).....	40
.III. Le champ électrique, $E$ .....	41
III.1. Dans le semi-conducteur 1 (CdS).....	41
III.2. Dans le semi-conducteur 2 (CuInGaSe <sub>2</sub> ).....	42
III.3. Calcul de la densité de photo-courant, $J_{ph}(\lambda)$ .....	43
III.3.a. La première zone neutre N (CdS).....	43
III.3.b. La deuxième zone neutre P (CuInGaSe <sub>2</sub> ).....	44



## TABLE DES MATIERES

---

III.3.c. La densité de courant dans la zone de charge d'espace pour les deux Semiconducteurs.....	45
III.3.d. Densité de photo courant totale, $J_{ph}$ .....	46
IV. Les caractéristiques des cellules solaires.....	46
IV.1. Réponse spectrale $SR(\lambda)$ .....	46
IV.2. Caractéristique courant tension.....	46
IV.2.a La densité de courant de saturation inverse.....	46
IV.2.b Caractéristique J-V idéale.....	47
V. La tension de diffusion et les épaisseurs de la ZCE pour l'hétérojonction  CdS/CIGS.....	47
V.1. Le Niveau de fermi.....	49
V.1.a. Semi conducteur type N.....	49
V.1.b Semi conducteur type P.....	49
V.2. Calcule de la largeur de la ZCE.....	50
VI. Conclusion.....	50

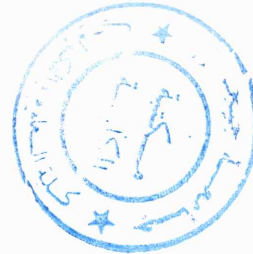
### Chapitre IV : Simulation et résultats

I. Introduction.....	51
----------------------	----

## TABLE DES MATIERES

---

IV.2 Organigrammes de simulation.....	52
IV.2.1 Organigramme de calcul du photo courant $J_p$ , $J_n$ , $J_{zce}$ et $J_{ph}$ .....	52
IV.2.2 Organigramme de la simulation de la caractéristique I(V) [Idéale].....	54
IV.2.2 Organigramme de la simulation de la caractéristique I(V) [réelle].....	55
IV.3 Simulation des caractéristiques de la cellule.....	55
IV.4 Optimisation des paramètres de l'hétérojonction.....	55
IV. 5. Présentation des caractéristiques de la cellule.....	66
IV. 6. Conclusion.....	68
Conclusion générale.....	69
Bibliographies.....	



**Liste des figures**

<b>Figure I 1.</b> Radiation spectrale pour différent air masses.....	5
<b>figureI 2 :</b> composition du spectre solaire (a) ;Exploitation de rayonnement du spectre solaire dans la nuit et le jour (b).....	6
<b>figure I.3 :</b> la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre.....	6
<b>Figure I.4 :</b> Tableux periodique des éléments.....	7
<b>Figure. I.5 :</b> les bandes des semi-conducteurs (Conduction,Interdite,Valence).....	8
<b>Figure I.6:</b> Cellule solaire éclairée.....	8
<b>Figure I.7 :</b> principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	12
<b>Figure.I.8 :</b> Jonction P-N éclairée.....	12
<b>Figure.I.9 :</b> Profil de bande d'une jonction P-N.....	13
<b>Figure.I.10 :</b> Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.....	13
<b>Figure I.11 :</b> Circuit électrique équivalent.....	14
<b>Figure I.12 :</b> I(V) et P(V).....	17
<b>Figure I.13:</b> Une cellule photovoltaïque monocristalline.....	19
<b>Figure I.14:</b> Une cellule photovoltaïque poly-cristalline.....	19
<b>Figure I 15:</b> Cellule photovoltaïque amorphe.....	20
<b>Figure I.16 :</b> Cellule photovoltaïque de type cuivre - indium - sélénium (CIS) crédit : Solar World.....	21
<b>Figure II.1 :</b> Structure en coupe d'une cellule CIGS (a), Image au microscope à balayage (MEB)(b).....	23
<b>Figure II.2 :</b> La structure cristallographique du ZnO.....	24
<b>Figure II.3 :</b> Structure des bandes d'énergie de ZnO.....	25
<b>Figure II.4 :</b> Deux formes allotropiques de la maille élémentaire des composants Cu-III-VI <sub>2</sub> : Structure sphalérite de type blende et Structure chalcopyrite.....	28

## TABLE DES MATIERES

<b>Figure II.5</b> : La forme cristallographique du Sc ternaire CIS avec les éléments chimiques susceptibles à faire des liaisons avec les constituants de ce Sc (droite).....	28
<b>Figure II 6</b> :.Diagramme de phase ternaire simplifié du système Cu-In-Se(reproduit avec corrections à partir de la référence.....	29
<b>Figure II.7</b> :Variation du coefficient d'absorption optique des matériaux absorbeurs	
<b>Figure II.8</b> : Rendement de conversion théorique pour cellule solaire.....	31
<b>Figure II.9</b> :Variation de la concentration des défauts en fonction de la bande interdite .....	31
<b>Figure II.10</b> :Divers types d'hétérojonctions définis par la position relative des bandes des semiconducteurs A et B.....	32
<b>Figure II.11</b> : Diagramme de bande d'une hétérojonction isotype, (a) avant contact, (b) après contact.....	33
<b>Figure II.12</b> : Diagramme de bande d'une hétérojonction anisotype, (a) avant contact, (b) après contact.....	34
<b>Figure II.13</b> : Structure de bandes des photopiles à hétérojonctions.....	34
<b>Figure II-14</b> : Diagramme énergétique loin de l'interface.....	34
<b>Figure II-15</b> géométrie de l'hétérojonction Cds/CIGS.....	35
<b>Figure. III.1</b> : Géométrie de l'hétérojonction CdS(n) / CIGS(p).....	36
<b>Figure.III.2</b> : Approximation de l'éclairement solaire au sol.....	37
<b>Figure III.3</b> : (a) Champ et(b) potentiel électrique à l'interface d'une hétérojonction n-p.....	38
<b>Figure III.4</b> :Diagramme énergétique de l'hétérostructure ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> /Mo	
<b>Figure. IV.1</b> . Coefficient d'absorption du CIGS. ....	39
<b>Figure IV.2</b> .Coefficient d'absorption du CdS.....	42
<b>Figure. IV.3</b> . L'éclairement en fonction de la longueur d'onde.....	47
<b>FigureVI.4</b> Variation du courant de l'émetteur en fonction de la longueur d'onde.....	56
<b>FigureVI.5</b> Variation du courant de la base CIGS en fonction de la longueur d'onde .....	56

## TABLE DES MATIERES

<b>Figure VI.6</b> Variation du courant de la ZCE en fonction de la longueur d'onde.....	57
<b>Figure VI.7</b> Variation du courant totale de la cellule en fonction de la longueur d'onde. .....	57
<b>Figure.IV.8.a.</b> La variation de $V_d$ en fonction de la concentration $N_a$ .....	58
<b>Figure IV.8.b.</b> La variation de $V_d$ en fonction de la concentration $N_d$ .....	58
<b>Figure.IV.9.</b> La variation de $V_d$ en fonction de la largeur de la bande interdite( $E_g$ ).	
<b>Figure. IV.10.a.</b> La variation de l'épaisseur de $W_1$ en fonction de $N_a$ .....	60
<b>Figure. IV.10.b.</b> La variation de l'épaisseur de $W_2$ en fonction de $N_a$ .....	60
<b>Figure. IV.11.a.</b> La variation de l'épaisseur de $W_1$ en fonction de $N_d$ .....	60
<b>Figure. IV.11.b.</b> La variation de l'épaisseur de $W_2$ en fonction de $N_d$ .....	61
<b>Figure. IV.12.a.</b> La variation de l'épaisseur de $W_1$ en fonction de $E_{g2}$ .....	61
<b>Figure. IV.12.b.</b> La variation de l'épaisseur de $W_2$ en fonction de $E_{g2}$ .....	62
<b>Figure IV.13.</b> La densité du courant de CdS (courant des trous) en fonction de longueur d'onde.....	63
<b>Figure. IV.14.</b> La densité du courant de CIGS (courant des électrons) en fonction de longueur d'onde.....	64
<b>Figure. IV.15.</b> La densité du courant de la ZCE en fonction de longueur.....	64
<b>Figure. IV.16.</b> La variation du photocourant total en fonction de longueur d'onde .....	65
<b>Figure. IV.17.</b> La caractéristique $I(V)$ .....	65
<b>Figure.IV.18.</b> La caractéristique de sortie (plus réelle) de la cellule CdS/CIGS $I(V)$ .....	66
<b>Figure.IV.19.</b> La puissance de la cellule CdS/CIGS en fonction de la tension $P(V)$ .....	66

**Liste des tableau**

**Tableau I.1** :Rendements des cellules solaires dans les 3 générations.....22

**Le tableau (II-1)** : Regroupe quelques propriétés électriques de ZnO.....26

**Tableau (II-2)** : Quelques propriétés optiques de ZnO.....26

**Tableau II 3** :.Les caractéristiques structurales, optiques et le rendement pour le système des chalcopyrites à base de cuivre Cu (In, Ga, Al) (Se, S)<sub>2</sub>.....30

**Tableau II.4**: Conductivité électrique des couches minces de (CuInSe<sub>2</sub>).....31

**Tableau (IV.1)** : Les paramètres de la cellule CdS/CIGS utilisées durant la simulation  
.....32

**Tableau IV.2**.Caractéristiques de sortie de notre simulation de la cellule PV a base du CIGS .....52

**Tableau IV.3** Résultats des caractéristiques de sortie publier par NREL(National Renewable Energy Laboratory From The USA Department Of Energy).....69

## Liste de symboles

Symbole	description
E	Energie, eV
$E(x)$	Champ électrique, $Vm^{-1}$
$E_g$	Largeur de la bande interdite (gap), eV
$\rho(x)$	Densité de charges électrique, $Vm^{-3}$
$\alpha(\lambda)$	Coefficient d'absorption, $cm^{-1}$
$G(\lambda, x)$	Taux de génération des paires électron-trou, W
$E_{cl}(\lambda)$	Eclairement solaire au sol, $Wm^{-2}\mu m^{-1}$
$F(\lambda)$	Flux solaire au sol, $cm^{-2} sm^{-1}\mu m^{-1}$
n, p	Concentration des électrons et des trous respectivement, $cm^{-3}$
$n_0, p_0$	Concentration des électrons et des trous à l'équilibre respectivement, $cm^{-3}$
$J_n, J_p$	Densité de courant des électrons et des trous respectivement, $mAcm^{-2}$
$J_s$	Densité de courant de saturation inverse, $mAcm^{-2}$
$J_{ph}$	Densité de courant de photo-génération, $mAcm^{-2}$
J	Densité de courant de sortie de la cellule, $mAcm^{-2}$
$J_{sc}$	Courant de court circuit, $mAcm^{-2}$
Na, Nd	Concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs respectivement, $cm^{-3}$
$\tau_n, \tau_p$	Durée de vie des atomes et des trous respectivement, s
$\mu_n, \mu_p$	Mobilité des électrons et des trous respectivement, $cm^{-2}Vs^{-1}$
$D_n, D_p$	Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement, $cm^2s^{-1}$
$L_n, L_p$	Longueur de diffusion des électrons et des trous respectivement, cm
$U_n, U_p$	Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement, $cm^{-3}s^{-1}$
T	Température de cellule, °K
Q	Facteur de qualité
$N_i$	Concentration intrinsèque, $cm^{-3}$
$S_n, S_p$	Vitesse de recombinaison des électrons et des trous à la surface respectivement, $cms^{-1}$
$\epsilon_0, \epsilon_r, \epsilon$	Permittivité du vide, relative et totale respectivement, $Fcm^{-1}, Fcm^{-1}$
$R(\lambda)$	Coefficient de réflexion
$\lambda_{min}$	Longueur d'onde du spectre solaire minimal, $\mu m$
$\lambda_{max}$	Longueur d'onde du spectre solaire maximal, $\mu m$
$R_s$	Résistance série, w
$R_{sh}$	Résistance parallèle, w
q	Charge d'électron, $1.602.10^{-19} \text{ } ^\circ C$
$U_t=KT/q$	Potentiel thermodynamique, $JC^{-1}$
$V_d$	Potentiel de diffusion, V

V	Tension de sortie de la cellule, V
V <sub>co</sub>	Tension de circuit ouvert, V
FF	Facteur de forme
SR	Réponse spectrale, $AW^{-1}$
P <sub>m</sub>	Puissance maximale, W
$\eta$	Rendement de conversion
W <sub>n</sub>	Epaisseur de la couche P, cm
W <sub>p</sub>	Epaisseur de la couche N, cm
W	La largeur de la zone d'espace de charge, cm
H	Epaisseur totale de la cellule, cm
W	la largeur de la zone de déplétion de la jonction
$\Delta E_{cn}$	la différence d'énergie entre les bandes de conduction des régions neutres
$\Delta E_{cv}$	la différence d'énergie des bandes de valence



# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

### *Introduction générale*

Depuis le début de la révolution industrielle, le besoin énergétique, sous ses diverses formes, a rencontré une augmentation très significative, ce qui obligé les scientifiques de trouver des nouvelles solutions pour fournir et de développer, et même de rationaliser l'exploitation de ces énergies [1].

Actuellement, le monde est caractérisé par des phénomènes humains et naturels exceptionnels sans précédent. En effet, le développement de techno-sciences s'est produit rapidement n'arrivant pas encore à trouver leurs marques. L'homme, en recherchant à s'industrialiser, n'a pas moins abusé sur l'équilibre si vertueux mais fragile de la nature et dont les signes les plus visibles sont la pollution, les maladies, le réchauffement de la planète, la disparition d'espèces animales et végétales, les perturbations climatiques, les épidémies ainsi que le stress.

Les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite « *énergie renouvelable* ». Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes puisqu'elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre, CO<sub>2</sub>....

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, qui ont comme propriété de libérer leurs porteurs de charge (électrons et trous) sous l'influence d'une excitation extérieure.

Parmi ces énergies renouvelables, on peut citer la production d'électricité d'origine solaire par l'effet photovoltaïque (cellules solaires ou photopiles). La conversion de la lumière en électricité (conversion photovoltaïque) se produit dans des matériaux semi-conducteurs. Le photovoltaïque peut jouer un rôle important dans la transition vers un système d'approvisionnement énergétique durable pour le XXI<sup>ème</sup> siècle et est susceptible de couvrir une part importante des besoins en électricité de plusieurs pays.

Dans ces dernières années, la production d'électricité à partir de la conversion photovoltaïque augmente dans le monde d'une façon remarquable. Cependant, la part de cette conversion en électricité reste faible comparativement à celle des autres énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne ou biomasse. Le principal obstacle à la pénétration du marché par le photovoltaïque est le coût de cette technologie qui rend l'électricité produite trop chère pour de nombreuses applications. En effet, la plupart des

## **Introduction générale**

---

cellules solaires (~99%) sont fabriquées à partir du silicium et malgré leur bon rendement, le coût des cellules reste élevé. L'industrie du photovoltaïque doit devenir plus concurrentielle et mettre au point des procédés de fabrication et des systèmes de conversion plus rentables. On a donc besoin de trouver d'autres matériaux moins chers et possédant de bon rendement.[2].

L'hétérojonction est la base des composants utilisés dans le domaine des Télécommunications longue distance, des lecteurs CD ou DVD, des appareils photo Numériques... En effet, les hétérojonctions permettent de créer des composants à semi-conducteurs plus performants que leurs équivalents à homojonctions.

L'objectif de ce présent mémoire est de faire une modélisation d'une cellule solaire en couche mince à hétérostructure à base de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ . On prend par considération les effets des états à l'interface entre les couches P et N de la cellule, en se focalisant surtout sur l'influence des propriétés intrinsèques des matériaux de l'hétérostructure CdS/CIGS et leurs dopages sur les paramètres de l'hétérojonction, précisément la tension de diffusion, les épaisseurs de la zone de charge d'espace. En vue d'optimiser par simulation les épaisseurs et les caractéristiques physiques des différentes couches de la cellule. On va voir l'influence de ces paramètres sur les densités des courants dans toutes les régions et par conséquent, la détermination de la densité de courant totale, dans le but d'obtenir un rendement de conversion électrique optimal.

Ce manuscrit est constitué de quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre on fait appel à la conversion photovoltaïque, nous présentons principalement les notions de base pour le convertisseur à effet photovoltaïque (la cellule solaire).
- Le deuxième chapitre est une présentation de la cellule à couches minces à hétérojonction  $\text{ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se}_2/\text{Mo}$ , nous avons étudié les différentes couches de cet empilement et ses divers propriétés. Ce pendant nous avons mis l'accent sur les hétérojonctions et le diagramme énergétique à l'interface émetteur/base qui dépend des propriétés intrinsèques des matériaux et leurs dopages.
- Le troisième chapitre est réservé au modèle de calcul, il représente le but proprement dit de notre étude qui consiste en l'obtention des caractéristiques de sortie de la cellule en basant sur la résolution des équations de continuités et des courants. La nature de ce modèle implique une méthode intégrale basée sur

## **Introduction générale**

---

le développement des calculs analytiques des équations différentielles. On prend par considération l'effet de l'hétérojonction à l'interface, et ceci nécessite de calculer la tension de diffusion et les épaisseurs de la zone de charge d'espace à l'interface émetteur/base.

- le quatrième chapitre contiendra les résultats des simulations obtenus tout en les validant par d'autres résultats expérimentaux.
- Et finalement une conclusion générale récapitulera l'essentiel de ce travail.

# CHAPITRE

## I

## *Chapitre I : La conversion photovoltaïque*

### **I. Introduction**

Dans ce chapitre nous allons discuter succinctement sur le rayonnement solaire et les notions de base de la photovoltaïque. La conversion directe de la lumière en énergie électrique s'obtient par l'intermédiaire des cellules solaires, selon un processus appelé couramment effet photovoltaïque. Pendant lequel les photons du rayonnement solaire qui sont absorbés cèdent leur énergie aux électrons de la matière. Une cellule solaire est ainsi constituée d'un matériau absorbant et d'une structure collectrice, Donc une présentation de cette cellule est imposée [3].

### **II.L'énergie solaire**

Le terme « **photovoltaïque** » a été formé par deux mots: "**photo**" qui est un mot grec signifiant **lumière** et "**volta**" qui est le nom du physicien italien **Alessandro Volta**, qui a inventé la pile électrochimique en 1800.

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés des cellules solaires ou photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie [4].

#### **II.1.La nature de rayonnement solaire**

Le rayonnement reçu par la terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m<sup>2</sup> avant d'aborder la couche atmosphérique. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre.

La couche d'ozone, par exemple, absorbe une partie du rayonnement sur une large bande de l'ultraviolet au visible, et l'oxygène présentes deux bandes étroites d'atténuation vers 690 et 760 nm. La vapeur d'eau enfin possède de nombreuses bandes d'absorption dans le visible et encore plus dans l'infrarouge.

Le flux énergétique reçu au sol se réduit alors à 1000 W/m<sup>2</sup> avec un spectre décalé vers le rouge [3].

Pour tenir compte de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire incident (Figure 1.1), on introduit un coefficient appelé nombre de masse (AM) défini par :



$$AM=1/\cos(\Theta) \quad (I.1)$$

Ou  $(\Theta)$  est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par définition, AM0 correspond aux conditions hors atmosphère. Quand le soleil fait un angle de  $48^\circ$  par rapport au zénith, la lumière incidente est dite AM1.5.

Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire ( $83.3 \text{ mW/cm}^2$  pour AM1.5) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques. Les conditions standard de caractérisation sont définies par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnique Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5 global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité  $100 \text{ mW/cm}^2$  et pour une température de cellule de  $25^\circ\text{C}$ .

Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et une composant diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global. La figure (1.1) montre le spectre d'émission solaire sous AM1.5 global normalisé à  $100 \text{ mW/cm}^2$  [3].

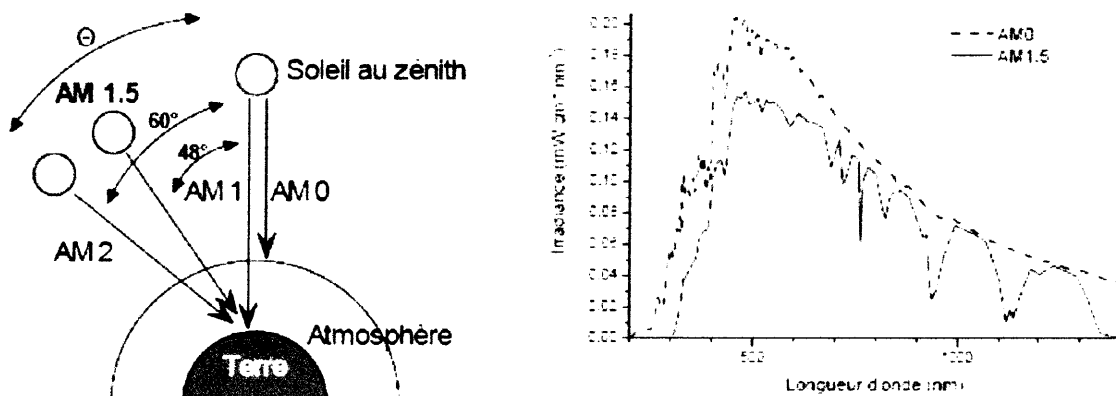


Figure. I.1: Radiation spectrale pour différent air masses [3].

## II.2. Spectre solaire

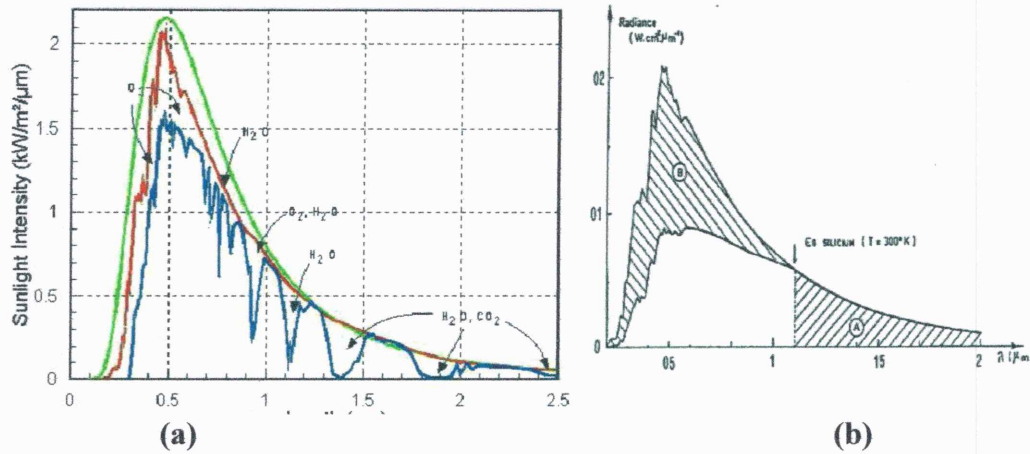


Figure I.2 : la composition du spectre solaire (a), l'exploitation du rayonnement solaire dans la nuit et le jour (b) [5].

Le spectre solaire c'est la décomposition du rayonnement solaire en longueurs d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est en effet composée de tous sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, elles sont porteuses d'une énergie qui est liée à leur longueur d'onde par le relation [3].

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{I.2}$$

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 (figure I.3)

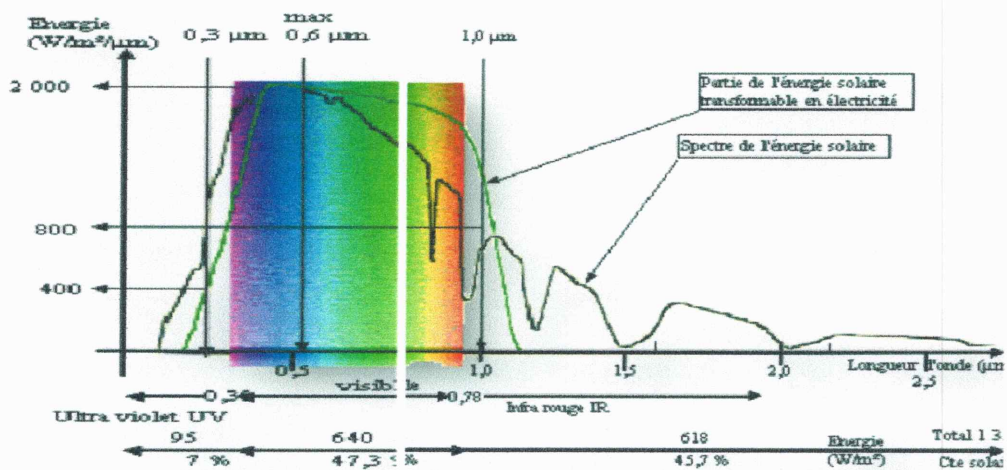


Figure I.3 : La répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre.[2].



III. La conversion photovoltaïque

III.1 Interaction photon-électron (concept de base de la cellule photovoltaïque)

La conversion photovoltaïque est une conséquence de l'effet photovoltaïque, qui est l'interaction des photons avec la matière, pendant la quelle les photons sont absorbés cédant leur énergie aux électrons de matière [1], à la condition que le niveau énergétique final de l'électron soit autorisé et libre [4].

III.1.1. Les semiconducteurs

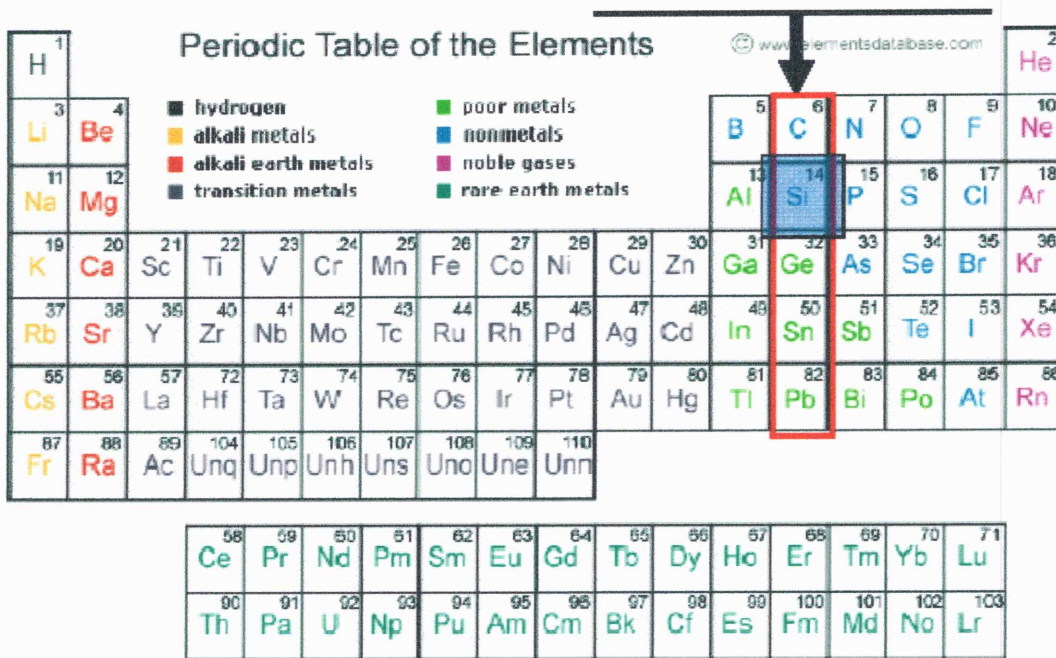


Figure I.4 : Tableau périodique des éléments.[1].

Un semi-conducteur est intermédiaire entre un métal et un isolant . A T=0k, il se comporte comme un isolant mais il conduit l'électricité dès que la Température augmente. Sa conductivité augmente avec la température contrairement aux métaux . La structure de bande est analogue à celle des isolants (Fig. I.3) avec une zone interdite séparant la bande de valence de celle de conduction, mais la largeur de celle ci est plus faible. À T=0K, la bande permise occupée la plus haute est complètement remplie : c'est la bande de valence et la bande permise vide la plus basse est la bande de conduction.

Lorsque la température augmente, l'énergie d'agitation thermique excite un certain nombre d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction . Comme celle-ci est incomplètement remplie, il y a conduction si l'on applique un

champ électrique. à cette conduction d'origine électronique, s'ajoute celle des trous qui sont les places vacantes laissées par les électrons dans la bande de valence. Pour un semi-conducteur, la conductivité est d'autant plus grande que le nombre d'électrons dans la bande de conduction est élevé.[1].

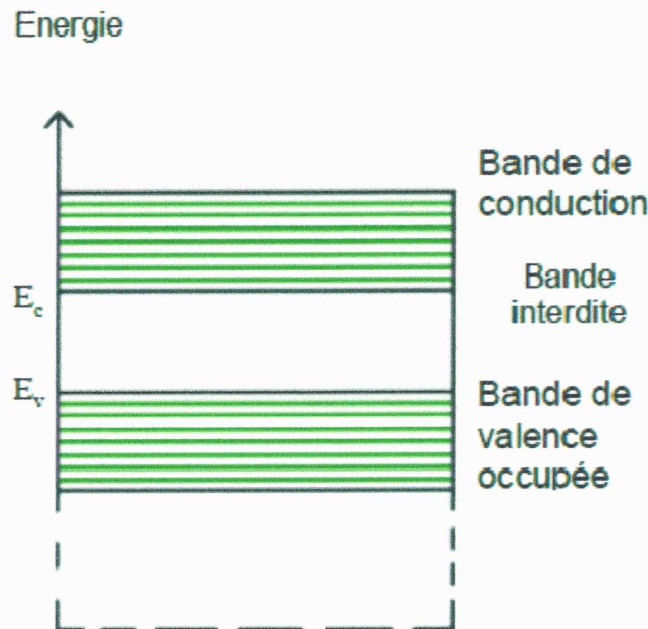


Figure. I.5 : les bandes des semi-conducteurs (Conduction,Interdite,Valence).[2].

## III.2. Les propriétés électro-optiques

### III.2.1. L'absorption optique

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

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (\text{I.3})$$

Le coefficient  $\alpha$  qui exprime la probabilité d'absorption d'un photon sur une unité de longueur s'appelle coefficient d'absorption

#### ➤ Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption,  $\alpha$ , peut être exprimé sous

$$\alpha = (h\nu - E_g)^\gamma \quad (\text{I.4})$$

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

a) transitions verticale permises entre extremums, dites transitions directes :  $\gamma = 1/2$ .

b) transitions verticales interdites :  $\gamma = 3/2$

c) transition indirectes entre extremums situé à des pois différents dans la zone de Brillouin :  $\gamma = 2$

Ces dernières transitions ne peuvent se faire qu'avec émission ou absorption des phonons. L'énergie minimale d'un photon nécessaire pour assurer une transition indirecte d'un électron est  $E = h\nu$ .

Lorsque la température augmente ou la pression diminue, la largeur de la bande interdite dans la plupart des semi-conducteurs décroît suivant une loi linéaire .

### III.2.2.La génération

Le taux de génération des électron-trou dans un matériau semi-conducteur à une profondeur  $x$  de la surface,  $G(x, \lambda)$ , dépend de l'intensité lumineuse  $I(x)$ , et du coefficient d'absorption  $\alpha(\lambda)$ . Le taux de génération donc

$$G(x, \lambda) = \alpha(\lambda) F(\lambda) (1 - R(\lambda)) \exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (I.5)$$

Où :  $F = \frac{\eta I_0}{h\nu}$  est le nombre des paires électron-trou photo générés par unité de surface par seconde par unité de longueur d'onde,  $R(\lambda)$  est le coefficient de réflexion et  $G(x, \lambda)$  s'exprime en  $(1/m^3.s)$ ,  $\eta$  (rendement quantique);  $I_0$  : l'intensité lumineuse incidente, Où :

$$I(x) = I_0(1 - R) \quad (I.6)$$

### III.2.3 :La diffusion

Dans un semi-conducteur et en absence de tout champ électrique, il existe un phénomène de diffusion des porteurs de charge du à la répartition non uniforme de ces porteurs sous l'effet de cette inhomogénéité, les porteur de charge (soient électrons ou trous) diffusent de la région de forte concentration vers celle faible concentration. Cette diffusion est régie par la première loi de Fick, reliant le flux de porteur au gradient de concentration. Les densités de courant de diffusion des électrons et des trous, sont respectivement :

$$J_n = qD_n \overrightarrow{grad}(n) \quad (I.7)$$

$$J_p = qD_p \overrightarrow{grad}(p) \quad (I.8)$$

$D_n, D_p$  Sont appelées les constantes de diffusion des électrons et des trous, respectivement, elles s'expriment en ( $cm^2 s^{-1}$ ).

### III.2.4 : La recombinaison de surface

Les propriétés des matériaux semi-conducteurs en grande part de l'état de leur surface qui constitue un dérangement évident de la régularité du réseau. Les liaisons chimiques des atomes de surface étant incomplètes. La structure énergétique qui se trouve juste à la surface se caractérise par l'existence des états quantiques localisés près de la surface dont l'énergie se situe souvent dans la bande interdite. La présence d'impuretés à la surface contribue, elle aussi, à la présence d'états de surface pouvant être des centres de recombinaison très efficaces. Le processus de recombinaison consiste en ce qu'un électron de la bande de conduction passe à un niveau de surface à la frontière du corps et ensuite dans la bande de valence en se recombinant avec un trou. La probabilité d'un tel processus est plus élevée que celle de passage direct de l'électron d'une bande à l'autre.

❖ La vitesse de recombinaison en surface (SRV)

La vitesse de recombinaison en surface,  $S$ , d'un semi-conducteur est un paramètre important dans la caractérisation des propriétés de surface des matériaux. Elle décrit directement le taux de recombinaison des porteurs en excès via les états électroniques de surface, et elle est déterminée principalement par l'imperfection et la contamination de la surface.

La continuité de la densité de courant aux surfaces limites du matériau semi conducteur.[4]

au point  $x=x_s$  (coordonnée de la surface), est donnée par:

$$-q D_p \left( \frac{\partial p_n}{\partial x} \right)_{x=x_s} = q S_p \Delta p(x_s) = q S_p (p_n(x_s) - p_{n_0}) \quad (I.9)$$

Pour un semi-conducteur de type N, est :

$$q D_n \left( \frac{\partial n_p}{\partial x} \right)_{x=x_s} = q S_n \Delta n(x_s) = q S_n (n_p(x_s) - n_{p_0}) \quad (I.10)$$

## IV. Les cellules solaires

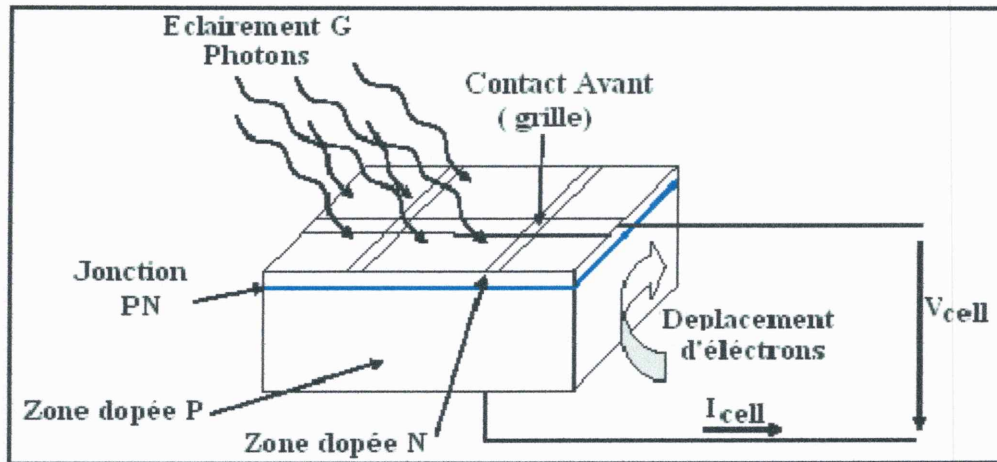


Figure I.6: Cellule solaire éclairée. [6].

La figure (I.6) représente une cellule solaire éclairée, le rayonnement arrivant sur cette cellule sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule, les photons dont l'énergie est supérieure à l'énergie du gap seront absorbés.

#### IV.1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le principe de l'effet photovoltaïque est le suivant :

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

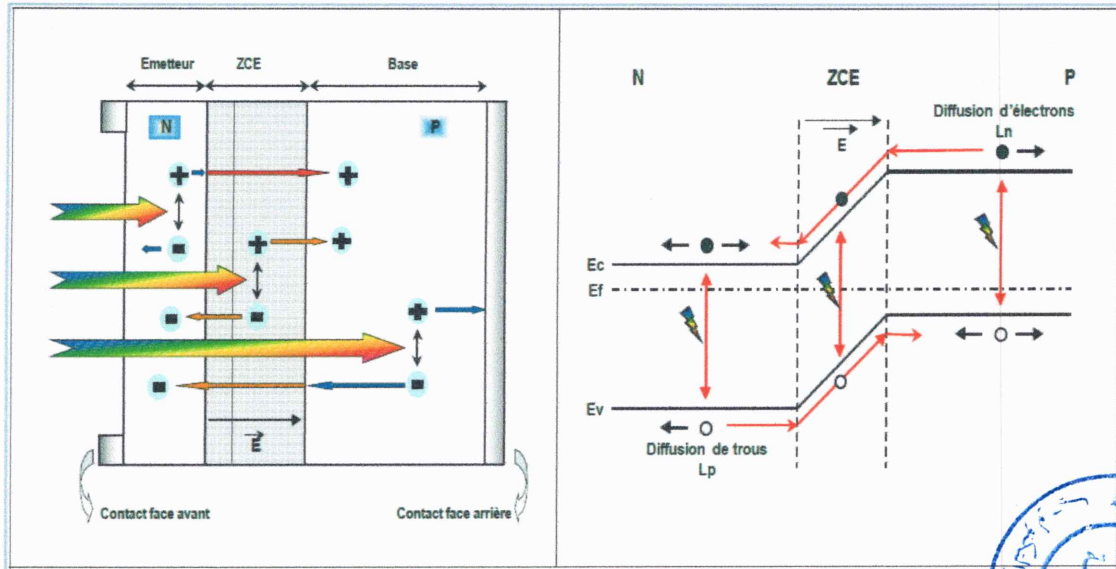


Figure I.7 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.[3].

- Considérons une jonction P-N recevant un rayonnement de fréquence( $\nu$ ) , telle que  $h\nu > E_g$  . Si les photons incidents interagissent avec les électrons de la bande de valence en leur communiquant leur énergie, ceux-ci passent dans la bande de conduction laissant des trous dans la bande de valence. Le rayonnement incident excite des paires électron-trou. Les électrons créés dans la région P et les trous engendrés dans la région N se diffusent. Seuls atteignent la zone de charge d'espace et les porteurs libérés de part et d'autres de la jonction à une distance inférieure à leur longueur de diffusion L, pris et accélérés par le champ électrique E ils traversent la zone de transition. La région N reçoit des électrons et se charge négativement, la région P accepte des trous et devient positive. Le rayonnement incident a pour effet de polariser la jonction en direct.[3]

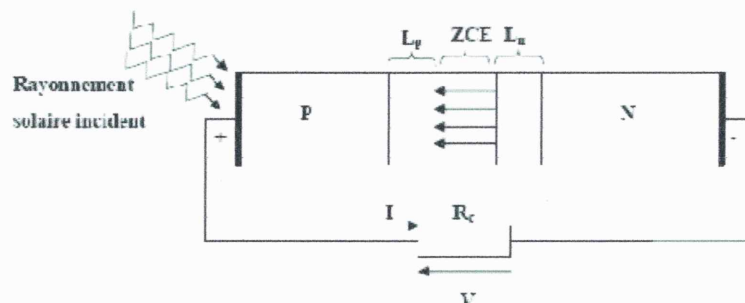


Figure.I.8 : Jonction P-N éclairée[3].

Les porteurs séparés créent un champ électrique  $E'$  qui est opposé au champ  $E$ . Le champ résultant est donc  $E-E'$ , ce qui veut dire que la différence de potentiel électrostatique entre le côté P et le côté N est réduite de  $V_d$  à  $V_d-V$  comme le montre

la figure (1.7). Ceci va conduire à une auto-polarisation dans le sens passant de la diode. La tension  $V$  est la même tension qu'il faudrait appliquer dans le sens passant de la diode non éclairée pour qu'il laisse passer un courant,  $I_d$ , égal au photo courant,  $I_{ph}$ .

Le résultat global étant la création d'une différence de potentiel  $V$ , aux bornes de la jonction. L'apparition de cette tension aux bornes d'une jonction illuminée porte le nom : 'Effet photovoltaïque'. La valeur maximum de  $V$  est  $V_d$ , lui-même inférieur à  $E_g/q$ . [2]

$$V_d = E_g/q + KT/q \log(N_a N_d / N_c N_v) \tag{I.11}$$

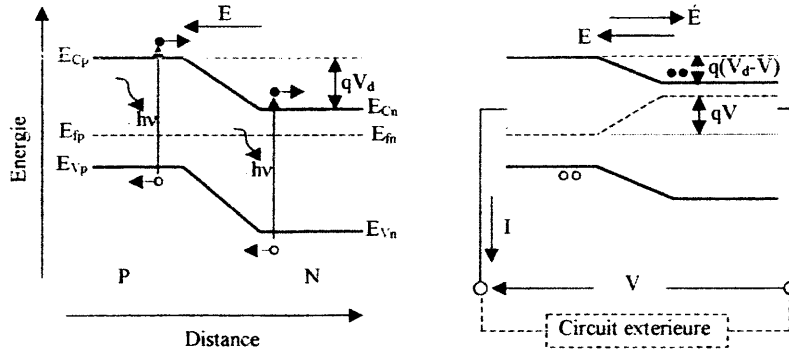


Figure.I.9 : Profil de bande d'une jonction P-N [3].

IV.2. Cellule solaire idéale

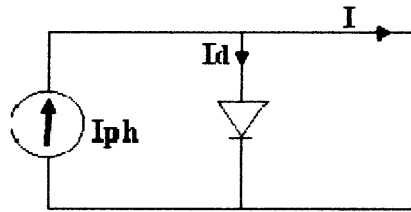


Figure.I.10 : Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.

Si la caractéristique de la jonction est de la forme :

$$I = I_s \left( e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \tag{I.12}$$

$I_s$  : courant de saturation.

On peut admettre qu'en présence de lumière il y a apparition d'un photocourant supplémentaire,  $I_{ph}$  dont le sens est opposé au courant direct. En branchant un circuit extérieur sur la cellule éclairée, on recueille ce courant.

Le courant sous lumière vaut :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qV}{QKT}} - 1 \right) \tag{I.13}$$

Et la tension  $V$  est donnée par

$$V = QU_t \ln \left( \frac{I_{ph} + I_s - I}{I_s} \right) \tag{I.14}$$

Où  $U_t = \frac{KT}{q}$ ,  $Q$  est le facteur de qualité.

### IV.3. Cellule solaire réelle

La figure (I.11) présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle, où deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles vont influencer sur la caractéristique IV de la cellule. La première est la résistance série,  $R_s$ , cette résistance est liée à l'impédance des électrodes et de la base, il en résulte que la tension  $V$  aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction.

La deuxième est la résistance shunt,  $R_{sh}$ , qui correspond aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant  $I_{ph}$  sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. L'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$  s'écrit donc :

$$I(V) = I_{ph} - I_d - I_s \tag{I.15}$$

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V + R_s I}{QU_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{I.16}$$

$I_{ph}$  : courant photogénéré .

$I_s$  : courant de saturation de la diode

$n$  : facteur d'idéalité de la diode



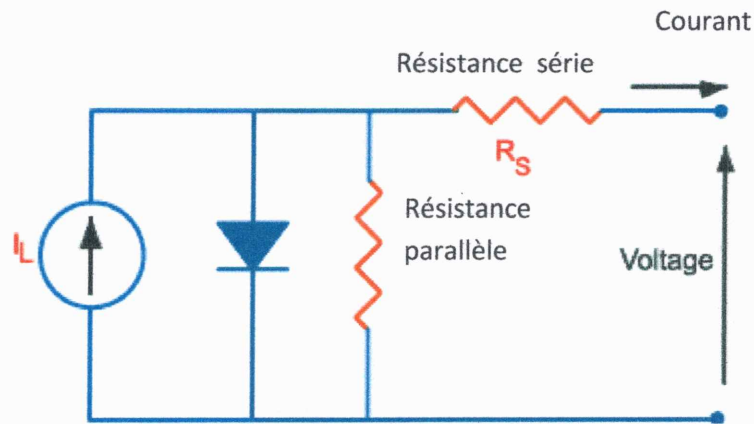


Figure I.11 : Circuit électrique équivalent [13].

#### IV.4. Caractéristique d'une cellule solaire

##### IV.4.a. Le courant de court circuit, $I_{sc}$

Le courant de court circuit est le courant débité par la cellule sous éclaircment en court circuitant la sortie. C'est à dire que  $I_{sc} = I(V=0)$ .

Pour une cellule solaire idéale le courant de court circuit est égal au courant de photogénération  $I_{ph}$ .

##### IV.4.b. La tension de 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 donnée par :

$$V_{co} = QU_t \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.17)$$

##### IV.4.c. La réponse spectrale, SR ( $\lambda$ )

La réponse spectrale d'une cellule solaire est le rapport du courant total généré par la cellule au courant qui peut être généré pour chaque longueur d'onde du spectre incident. Elle renseigne sur la réaction de la radiation incidente et permet de fixer la gamme d'utilisation de la cellule.

$$SR(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{qF(\lambda)(1 - R(\lambda))} \quad (I.18)$$

#### IV.4.d. La puissance maximale, P<sub>m</sub>

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit (V.I) est maximum. Si V<sub>m</sub> I<sub>m</sub> sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximum est la surface du plus grand rectangle de côtés V<sub>m</sub> et I<sub>m</sub> qu'on peut inscrire sous la courbe I (V) (Figure .I.11)

$$P_m = I_m V_m = (I V)_{\max} \quad (I.19)$$

#### IV.4.e .Le facteur de forme, FF

On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit I<sub>sc</sub>V<sub>co</sub>. Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites. R<sub>s</sub> et R<sub>sh</sub>.

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

#### IV.4.f. Le rendement de conversion η

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance du rayonnement incident.

**I<sub>sc</sub>** : Courant en court-circuit (V=0)

**V<sub>oc</sub>** : Tension en circuit ouvert (I=0).

**FF** : Facteur de forme. C'est le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule sur le produit : I<sub>sc</sub>V<sub>oc</sub>. (figure 4).[3]

$$\eta = P_m / P_i \quad (I.21)$$

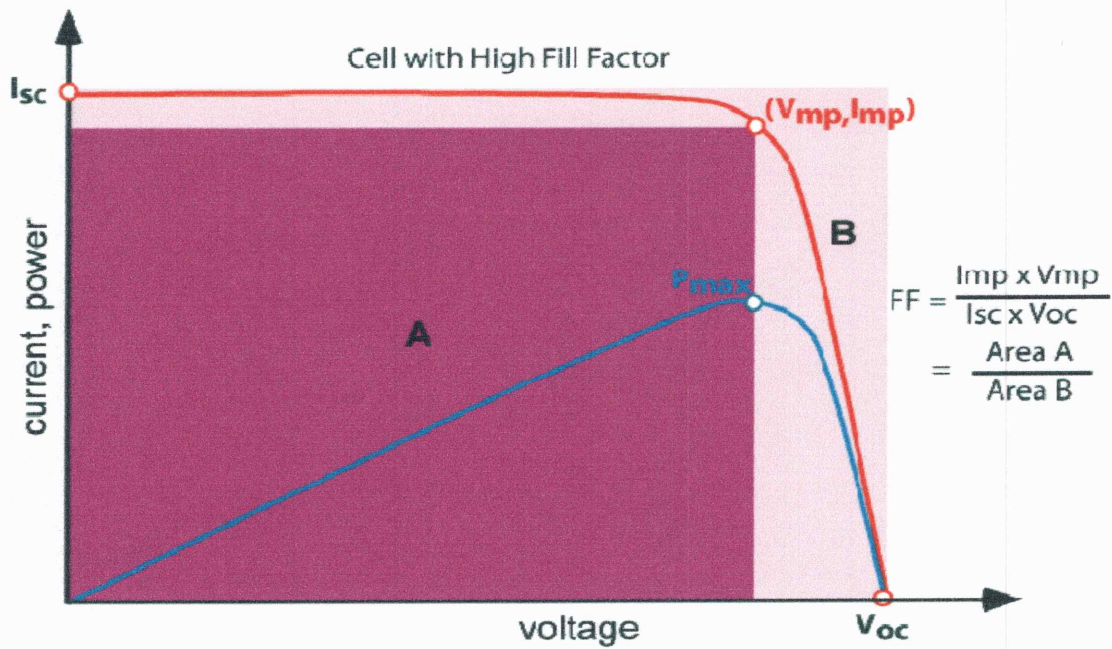
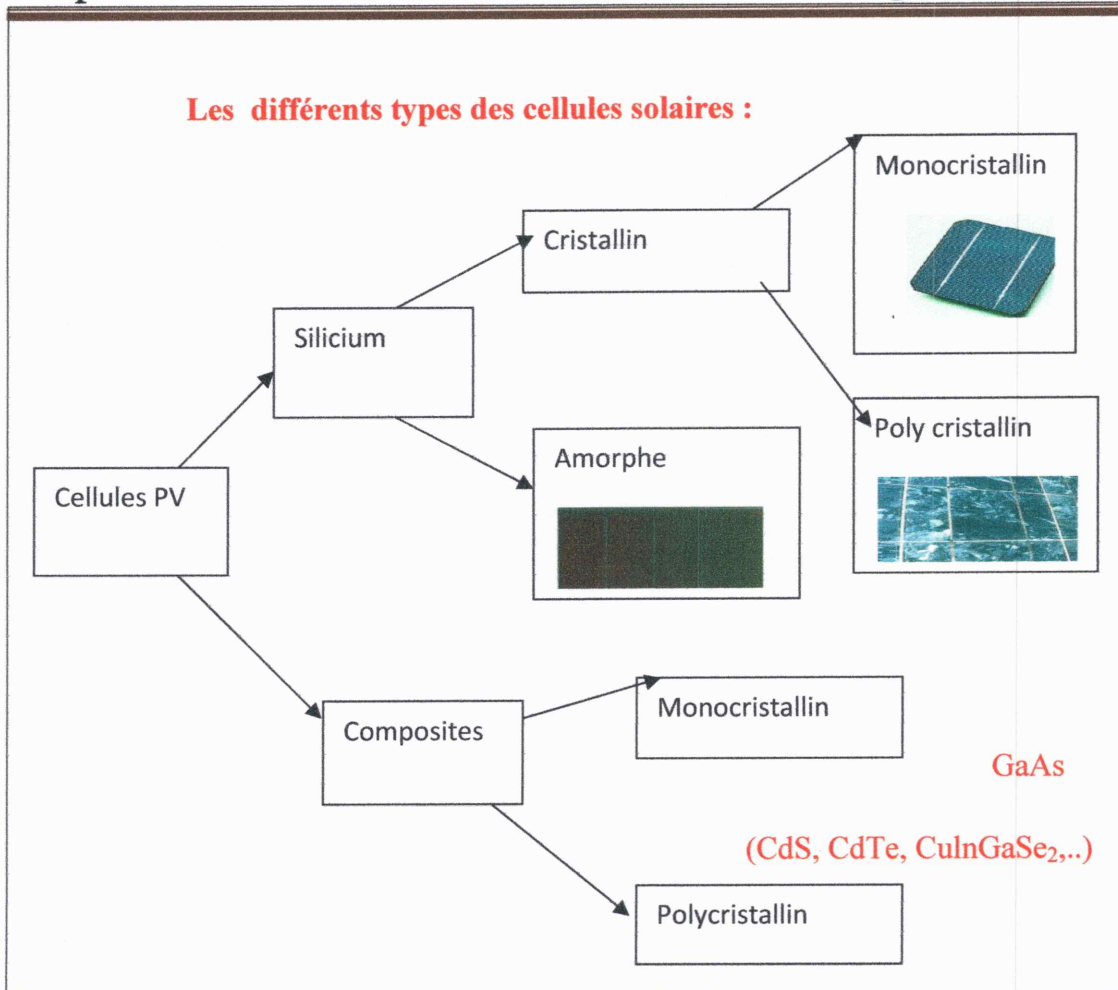


Figure I.12 :I(V) et P(V).

### V. Les différentes filières photovoltaïques

Il existe un grand nombre de technologies mettant en oeuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

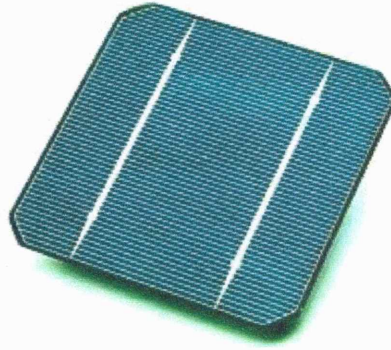


**V.a.Filière des cellules photovoltaïques au silicium cristallin**

Dans ces filières, on distingue deux types principaux des cellules solaires:

**V.a.1.Filière des cellules photovoltaïques à base de silicium monocristallin**

La filière du silicium monocristallin qui regroupe les cellules produites à partir de silicium tiré puis découpé en plaquette circulaire très fine (épaisseur de 200 à 350 µm, pour une surface allant de 10×10 cm<sup>2</sup> à 15×15cm<sup>2</sup>). Généralement elle est destinée essentiellement pour les applications spatiales et militaires ainsi pour les réseaux de télécommunication...etc., où l'on recherche le rendement et la très haute fiabilité.



**Figure I.13:** Une cellule photovoltaïque monocristalline.

#### **V.a.2. Filière des cellules photovoltaïques à base de silicium polycristallin.**

Les cellules sont réalisées à partir des déchets de l'industrie électronique sous forme de lingots carrés refroidis axialement découpés en plaquettes minces et débarrassés de leurs défauts recombinants par diffusion de phosphore au d'aluminium. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée 30 ans.



**Figure I.14:** Une cellule photovoltaïque poly-cristalline

#### **V.b. Filières cellules photovoltaïques en couches minces**

Les cellules dites "en couches minces" (Si:H, CdTe, CIS) sont potentiellement les plus prometteuses, malgré des rendements théoriques inférieurs, en raison des

perspectives de baisse de coûts qu'elles offrent par l'automatisation des procédés de production et les substrats qui sont à prix réduit.

### V.b.1. Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe (Si H)

Dans cette technologie, le semi-conducteur est économisé car il n'est pas comme les cellules au silicium cristallin. La fabrication de ces cellules devrait permettre dans l'avenir de réduire significativement les coûts de production des cellules PV. Le silicium amorphe, apparu en 1976, a une forme non cristalline. Sa structure atomique est désordonnée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin, ce qui donne à une cellule photovoltaïque en silicium amorphe une couleur grise ou marron très foncée.

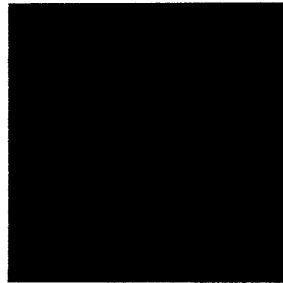
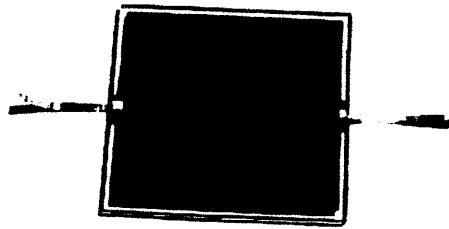


Figure I 15: Cellule photovoltaïque amorphe.

### V.b.2. Les cellules photovoltaïques à base Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>

Les alliages à base de sélénure de cuivre indium CuInSe<sub>2</sub> ont été étudiés surtout par Boeing, puis par NEREL aux États-Unis, Matsushita au Japon, Siemens Solar (ex ARCO) et ZSW à Stuttgart.

Le disélénure de cuivre et d'indium (CIS) est un matériau composé de type I-III-VI, de structure chalcopyrite, très prometteur puisque le rendement théorique de l'hétérojonction (n) CdS (p) CuInSe<sub>2</sub> se situe autour de 25 %. Les cellules à base de composés chalcopyrites quaternaires du type Cu (Ga,In)(Se,S)<sub>2</sub> ont récemment atteint des rendements de conversion record de 18,8 % [17] en laboratoire (NEREL) . Malgré les difficultés connues pour maîtriser cette filière à grande échelle, 12,8 % ont été obtenus par ZSW. Une production industrielle a été amorcée par *Siemens Solar* depuis juillet 1998 avec la sortie d'un module de 10 W.

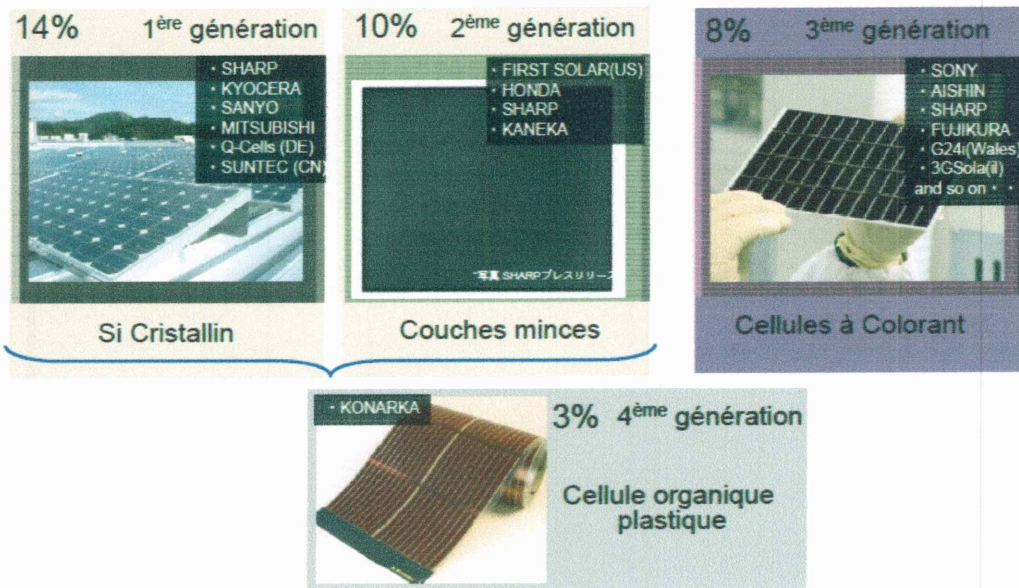


**Figure I.16** :Cellule photovoltaïque de type cuivre - indium - sélénium (CIS) crédit : Solar World [4].

**Tableau I.1** :Rendements des cellules solaires dans les 3 générations[7]

Type	Rendement cellule(en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
<b>1ère génération</b>				
Silicium monocristallin	24.70%	22.70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20.30%	16.20%	11-15%	Production industrielle
<b>2e génération</b>				
Silicium amorphe	13.40%	10.40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9.40%	7%	Production industrielle
CIS	19.30%	13.50%	9-11%	Production industrielle
CdTe	16.70%		6-9%	Prêt pour la production

3e génération				
Cellule organique	5.70%			Au stade de la recherche
Cellule de Grätzel	11%	8.40%		Au stade de la recherche



**VI. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons vu des notions théoriques sur le photovoltaïque et ces applications sur les cellules solaires. On a commencé par une description succincte de l'effet photovoltaïque, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et ses différentes caractéristiques puis on a donné un historique sur les différentes technologies, classes et types des cellules solaires (1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération). Le développement technologique est en réalité un long processus qui s'élabore à partir d'une chaîne de savoir faire, ou chaque génération ajoute sa contribution aux acquis développés par ses prédécesseurs.



# CHAPITRE

II

## Chapitre II : La cellule à hétérostructure à base du quaternaire CIGS

### I Introduction

Le diséléniure de cuivre et d'indium  $\text{CuInSe}_2$  dans sa structure chalcopyrite est un semiconducteur promoteur pour les applications photovoltaïques, ce qui dû à ses caractéristiques, notamment son coefficient d'absorption qui est très élevé dans la gamme du spectre solaire et ses propriétés électrique et optique qui sont variables en fonction des conditions de préparation et des techniques d'élaboration. Ceci permet d'utiliser ce semiconducteur comme matériau de base. En fait, l'introduction du gallium à la place de l'indium dans le composé  $\text{CuInSe}_2$  permet d'obtenir le CIGS et d'améliorer l'adaptation du gap à la conversion photovoltaïque.

Notre intérêt porte particulièrement sur l'étude de l'effet de l'hétérojonction émetteur/base sur les caractéristiques de cellule à couches minces à hétérojonction à base de CIGS. Pour cela une présentation théorique des différentes couches de cet empilement et une étude des hétérojonctions s'imposent.

### II. Description générale des cellules solaires a base du CIGS

La cellule  $\text{CdS/CIGS}$  est basée sur un empilement de plusieurs couches minces sur un substrat du verre ou flexible, ne dépassant pas quelques microns d'épaisseur au total.

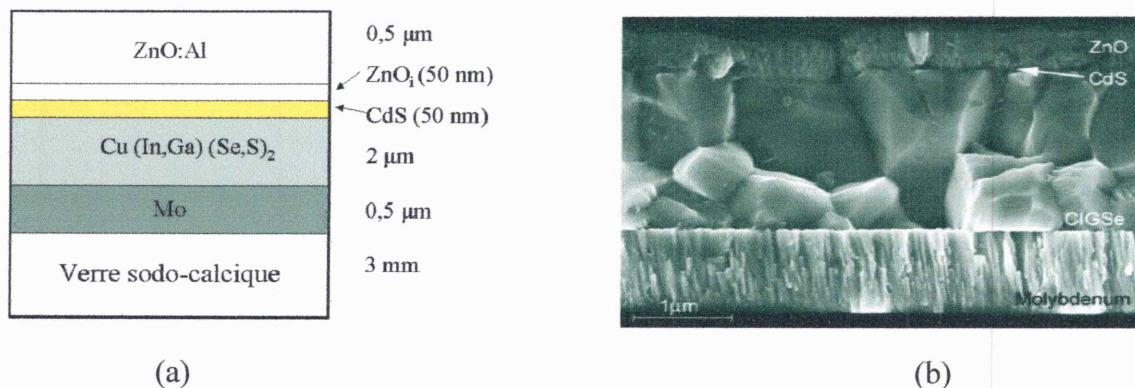
Pour les hétérojonctions on peut signaler à l'importance des paramètres suivants :

- a) le gap  $E_G$  autour de la valeur 1.35 eV.
- b) Coefficient d'absorption élevé, permettant la réalisation des photopiles à couches minces.
- c) Constante de diffusion des porteurs minoritaires.
- d) Durée de vie de porteurs minoritaires.
- e) Mobilité des porteurs minoritaires.
- f) Longueur de diffusion des porteurs minoritaires supérieur à l'épaisseur pour que les porteurs arrivent à la jonction avant d'être recombinaisonnés.

Les deux matériaux formant la jonction doivent avoir une bonne affinité électronique entre eux : les paramètres cristallins, les coefficients de dilatation doivent être proche le plus possible, pour réduire les défauts d'interface et les pertes en photocourant.



La structure d'une telle cellule solaire est présentée dans la ( figure II 1). A l'arrière de l'hétérojonction, le substrat du verre sodo-calcique et le molybdène forme le contact ohmique arrière recueillant les trous. La couche de 2  $\mu\text{m}$  de CIGS permet d'absorber la lumière. Sur cet absorbeur, une couche de 50 nm de CdS (appelée couche tampon, faiblement dopée n) réalise l'hétérojonction. Une couche de ZnO intrinsèque de 50-100 nm de haute résistivité s'intercale en général entre le CdS et le ZnO dopé. Selon Rau *et al.* [9], elle permet une limitation des pertes électriques dues aux inhomogénéités dans l'absorbeur, en empêchant les défauts du CIGS de dominer la  $V_{oc}$ . Puis une couche d'oxyde de zinc dopé aluminium, donc fortement dopée n, forme la fenêtre avant, conductrice, et transparente, pour récupérer les électrons. Un contact ohmique, comme par exemple une grille de Ni/Al, peut être ajouté pour collecter le courant de manière plus efficace.



**Figure II.1** :Structure en coupe d'une cellule CIGS (a), Image au microscope à balayage (MEB) (b) [2].

### II.1. Propriétés générales de l'oxyde de zinc (ZnO)

Dans le but d'augmenter la gamme de transparence de la fenêtre optique, des matériaux à grand gap comme le ZnO, (Cd,Zn)S ont été utilisés[39, 40]. La couche d'oxyde transparent conducteur (O.T.C) doit être simultanément transparente et conductrice. Dans le domaine du spectre solaire la transmission des couches doit être supérieure à 80%.

pour notre structure étudié en utilisant le ZnO, il est composé d'une très mince couche i-ZnO (intrinsèque) de 50-70 nm et une couche de ZnO dopé, puisque le ZnO a un gap de 3.2 eV il est transparent pour la plus grande partie du spectre et considéré comme fenêtre de la cellule [17].

#### II.1.1. Propriétés cristallographiques

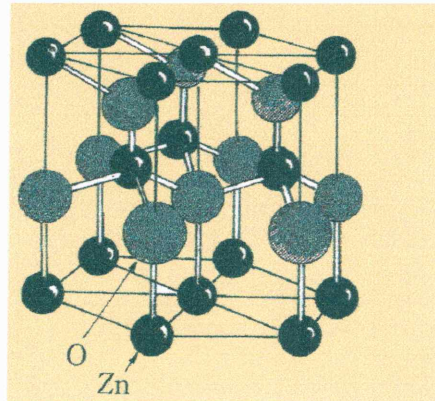
Du point de vue cristallographique, le ZnO peut exister sous trois types de structures différentes, selon les conditions d'élaboration:

(i) la structure hexagonale, stable dans les conditions normales

(ii) la structure cubique, qui est instable, et qui apparaît sous des pressions élevées [4]

(iii) la structure Rock-Salt qui apparaît sous des pressions très élevées Par conséquent le ZnO cristallise selon la structure la plus stable ; c'est à dire la structure wurtzite ; cette dernière (Figure II-2) peut être décrite en tant que deux réseaux HC qui sont insérés l'un dans l'autre. Le réseau d'oxygène est déplacé d'une fraction de 0.38 de la taille d'une cellule d'unité dans la direction c. Ce déplacement est effectué par rapport au réseau Zn. La structure wurtzite contient quatre atomes par maille dont les positions sont :  $O^{-2}$  : (0, 0,0) ; (2/3,1/3,1/3).

$Zn^{+2}$  : (0, 0,3/8) ; (2/3,1/3,7/8).



**Figure II.2** :La structure cristallographique du ZnO [9].

### II.1.2. les propriétés électriques de ZnO

L'oxyde de zinc (ZnO) est un oxyde semi- conducteur qui présente des propriétés très intéressantes. A l'état naturel, il est de couleur rouge rubis et se trouve abondamment dans les minerais, tandis que celui préparé artificiellement est incolore ou blanc. Si les propriétés de ZnO naturel sont connues depuis longtemps, les chercheurs se sont penchés ces dernières années sur l'oxyde de zinc obtenu artificiellement[9].

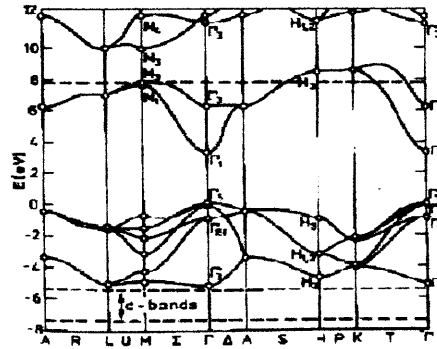


Figure II.3 : Structure des bandes d'énergie de ZnO[4].

Nature de la bande interdite	Directe
Largeur de la bande interdite à 300°K	3.4±0.02
Type de conductivité	N ou p
Masse effective des électrons	0.28 $m_0$
Masse effective des trous	0.6 $m_0$
Densité d'états dans BC	3.71 $10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Densité d'états dans BV	1.16 $10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Résistivité maximale	$10^0 \Omega \cdot \text{cm}$
Résistivité minimale	$10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$

Le tableau (II-1) : Regroupe quelques propriétés électriques de ZnO[4].

Coefficient d'absorption	$10^4 \text{ cm}^{-1}$
Indice de réfraction à 560 nm	1.8 - 1.9
Constante diélectrique	
Transmittance (visible)	80% - 90%

Tableau (II-2) : Quelques propriétés optiques de ZnO

### II.3. Pourquoi le choix du CdS ?

Si une jonction semi-conducteur absorbant/oxyde transparent conducteur est directement réalisée, son rendement sera limité par:

- le désaccord de mailles.
- l'inadaptation des bandes interdites; leur grande différence crée un effet parasite au niveau des bandes de conduction et de valence lors du passage d'une couche à l'autre.
- les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains.

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

- une bande interdite intermédiaire permettant une transition «souple » entre celle du semi-conducteur et celle de l'oxyde transparent conducteur, soit une valeur comprise entre 2,5 et 3,2 eV [21],
- une adaptation de la maille,
- une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est de type p.

Ce sont Les raisons pour le choix fréquent du CdS. En réalisant une fenêtre optique de la cellule verre/Mo/absorbeur/CdS, grâce au CdS qui a un gap de 2.4 eV et un bon accord de maille avec le CIGS tel que  $\Delta a/a \approx 1 \%$  [21]. Ainsi que les caractéristiques de CdS donne :

1) La bande interdite (gap) :

la valeur de la bande gap du CdS est 2.42 eV, ce qui correspond à une longueur d'onde de 0.52 $\mu$ m . Cela veut dire que la charge du spectre solaire est transmise tout à fait librement donc ceci le rend convenable comme une " couche fenêtre" au-dessus de l'absorbeur dans lequel la photo génération se crée où les porteurs minoritaires prennent place.

2) La résistivité :

Les CdS ont une très haute résistivité,mais quand ils sont déposés en couche mince par sublimation ou vaporisation élémentaire, un manque dans le dépôt de la couche de soufre implique l'obtention d'un semi-conducteur de type N. Aussi, on peut agir sur l'épaisseur pour avoir une résistivité d'une valeur appropriée pour la cellule solaire.En plus, il est facile d'introduire un dopant afin d'avoir une résistivité efficace.

3) Contact : C'est une matière simple pour prendre des contacts ohmiques des couches minces CdS.

### III. Caractéristiques et différentes propriétés des semi-conducteurs CIS et CIGS

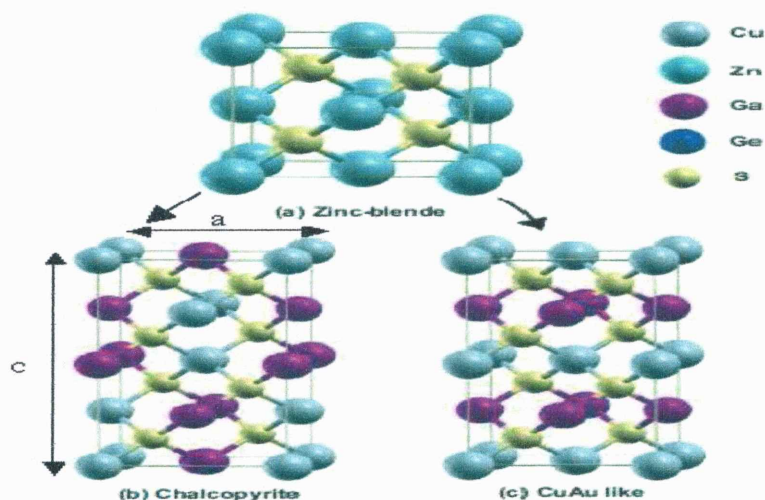
L'amélioration de la cellule est également passée par celle de la couche tampon, la couche d'oxyde transparent conducteur et spécifiquement la couche absorbante, une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à fort coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable qu'il ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1,1 à 1,7 eV. Sa conductivité doit être de l'ordre de  $1 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$  [21]. Il doit pouvoir être dopé de type n et p de façon à pouvoir réaliser des jonctions et il doit être stable dans le temps, ces propriétés sont celles du CIGS.

#### III.1. Structure cristalline de CIGS

Un semiconducteur  $A^{N-1}B^{N+1}X_2^{8-N}$  provient de la substitution, dans un binaire  $C^N X^{8-N}$  cristallisé en Zinc-blend (L'anion X est au centre d'un tétraèdre dont les quatre sommets sont occupés par les cations), des cations C de la colonne N par ceux A et B des colonnes N-1 et N+1. Dans le cas du groupe I, N-1=1 donc N=2 et N+1=3, ce groupe provient de la famille des semiconducteurs nommée II-VI

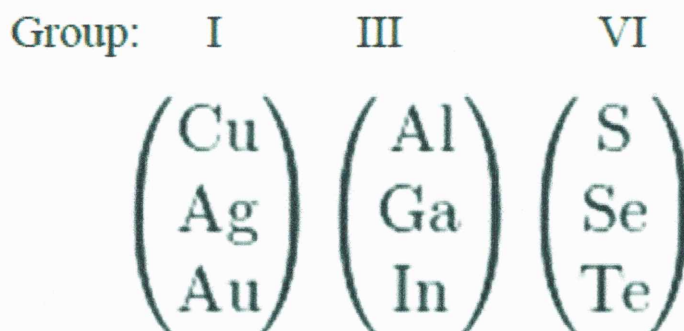
Les composants ternaires Cu-III-VI<sub>2</sub> cristallisent sous deux formes allotropiques. La première qui est du type sphalerite (zinc blende) se produit à hautes températures ( $T > 810^\circ\text{C}$ ). La deuxième qui est du type chalcopyrite (anomalie de la blende) se produit pour des températures inférieures à  $665^\circ\text{C}$ ; avec une structure ordonnée et tétragonale. Ces structures sont représentées sur la ( figure II-4).

Le CuInSe<sub>2</sub> et CuGaSe<sub>2</sub> qui sont de l'alliage Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> appartiennent du groupe I, ils sont cristallisés sous la structure chalcopyrite. Le CuInSe<sub>2</sub> comme exemple est obtenu de la structure de Zinc-blende du matériau ZnSe en remplaçant l'atome Zn par les atomes Cu et In la (Figure II.4)



**Figure II.4** :Deux formes allotropiques de la maille élémentaire des composants Cu-III-VI<sub>2</sub> : Structure sphalérite de type blende et Structure chalcopyrite.[21].

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



**Figure II.5** : La forme cristallographique du Sc ternaire CIS avec les éléments chimiques susceptibles à faire des liaisons avec les constituants de ce Sc (droite).[4].

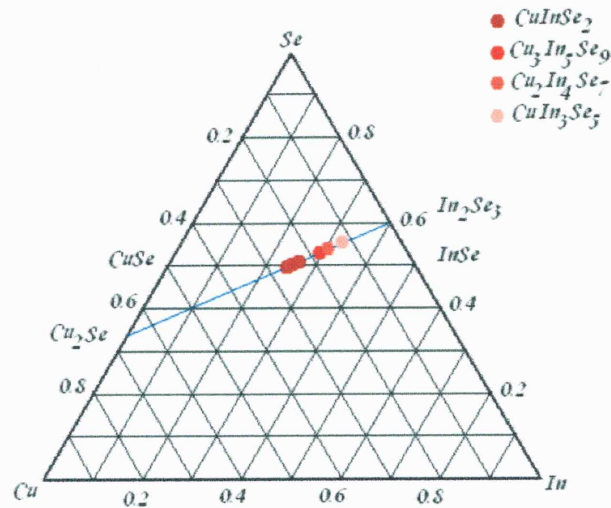
### III.2. Le CuInSe<sub>2</sub>(CIS)

Le système de chalcopyrites à base de cuivre Cu (In, Ga, Al) (Se, S)<sub>2</sub> comprend une large gamme d'énergies de bande interdite par exemple de 1,04 eV en CuInSe<sub>2</sub> jusqu'à 2,4 eV en CuGaS<sub>2</sub>, et même 2,7 eV en CuAlS<sub>2</sub>, ainsi, couvrant la plupart du spectre visible.

Tous ces composés ont une bande interdite directe les rendant aptes à absorber de matériaux en couche mince photovoltaïque.



La figure( II.6) résume les constantes de réseau et les énergies de bande interdite  $E_g$  de ce système. Tous alliages souhaités entre ces composés peuvent être formés sans aucune lacune de miscibilité qui se produit dans l'ensemble du système [5].



**Figure II 6 :** Diagramme de phase ternaire simplifié du système Cu-In-Se(reproduit avec corrections à partir de la référence[8]).

Matériau	a(nm)	c(nm)	$E_g$ (eV)	Rendement (%)
CuGaSe <sub>2</sub>	0.560	1.099	1.67	8.3
CuInS <sub>2</sub>	0.551	1.106	1.53	11.4
Cu(InAl)Se <sub>2</sub>	0.575	1.145	1.16	16.9
CuInSe <sub>2</sub>	0.577	1.155	1.02	15.4
Cu(InGa)Se <sub>2</sub>	0,572	1.143	1.12	18.8

**Tableau II 3 :** Les caractéristiques structurales, optiques et le rendement pour le système des chalcopyrites à base de cuivre Cu (In, Ga, Al) (Se, S)<sub>2</sub>. [3].

La conductivité électrique du CuInSe<sub>2</sub> comme celle de nombreux composés I-III-VI de structure chalcopyrite est contrôlée par les écrits de stoechiométrie, en particulier par le rapport Cu/In. Ainsi on peut obtenir un matériau de type P ou N, de résistivité faible ou élevée. Les propriétés électriques sont directement liées à la présence de défauts natifs.

Des mobilités d'électrons de  $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  et de trous de  $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ont été mesurées dans le monocristal.

Les niveaux accepteurs dominants dans le cristal seraient liés aux lacunes de cuivre, et les niveaux donneurs aux lacunes de sélénium. Cependant cette influence des défauts intrinsèques est loin d'être claire. On sait cependant que les films minces, riches en cuivre ( $\text{Cu}/\text{In} > 1$ ) sont toujours de type P et de faible résistivité, quelque soit le rapport Se/Métal, supérieur ou inférieur à 1, les interstitiels de Cu joueraient donc le rôle d'accepteurs dans les films minces [3].

Se/M > 1		Se/M < 1	
Cu/In > 1	Cu/In < 1	Cu/In > 1	Cu/In < 1
type p $\rho$ faible	type p $\rho$ faible ou type n $\rho$ élevée	type p $\rho$ faible	type p $\rho$ élevée ou type n $\rho$ faible
M = (Cu+In) métal			

**Tableau II.4:** Conductivité électrique des couches minces de  $(\text{CuInSe}_2)$ [3].

### III.3. Propriétés optiques du $\text{CuInSe}_2$

#### III.3.1. Le coefficient d'absorption

Le rendement des cellules solaires dépend principalement de la lumière absorbée par la couche absorbante. Du point de vue technologique, la couche absorbante doit avoir un gap optimal pour absorber la plus large gamme des longueurs d'ondes du spectre solaire avec un coefficient d'absorption élevé.

Les propriétés optiques des couches  $\text{CuInSe}_2$  ont été largement étudiées par plusieurs groupes de recherche. Le  $\text{CuInSe}_2$  se distingue des autres matériaux photovoltaïques ( $\text{CdTe}$ ,  $\text{GaAs}$ ,  $\text{CdS}$ , etc.) par un coefficient d'absorption très élevé, plus grand que  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  dans le domaine du visible et le proche infrarouge (Figure. II. 7). De plus, le  $\text{CuInSe}_2$  a une bande interdite à transition directe de l'ordre de  $1.04 \text{ eV}$ [3].

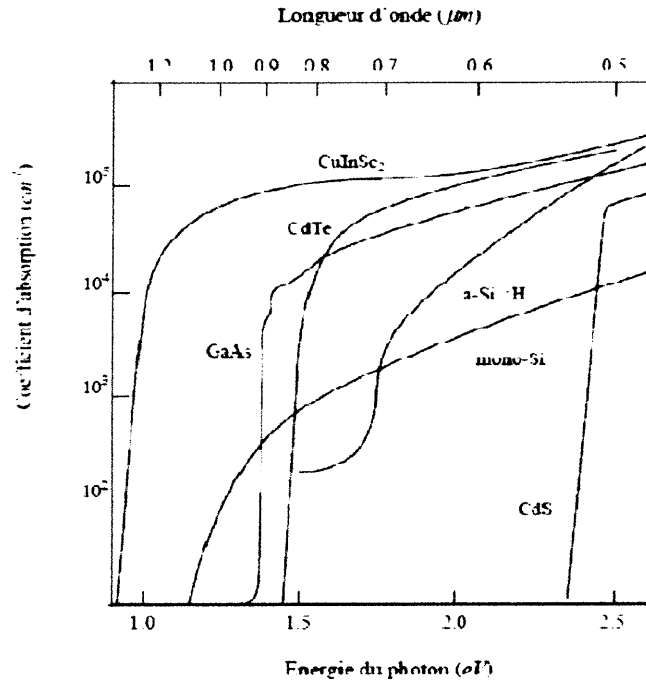


Figure II.7 :Variation du coefficient d'absorption optique des matériaux absorbeurs

III.3.2.La bande interdite  $E_g$

La largeur de la bande interdite  $E_g$  joue un rôle important dans les matériaux photovoltaïques . La figure (II.8) présente les rendements théoriques en fonction de l'énergie du gap conducteur.

On remarque que le maximum de rendement de conversion se situe au voisinage de 1.4-1.5 ev .Et pour les semi-conducteur qui possèdent une énergie du gap compris entre 1ev et1.7ev, (autour de 1.35ev) on peut obtenir un rendement supérieur à 20%.

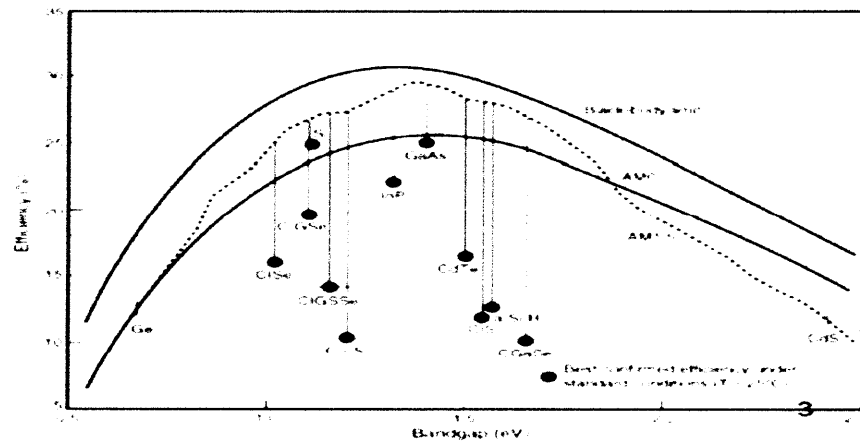


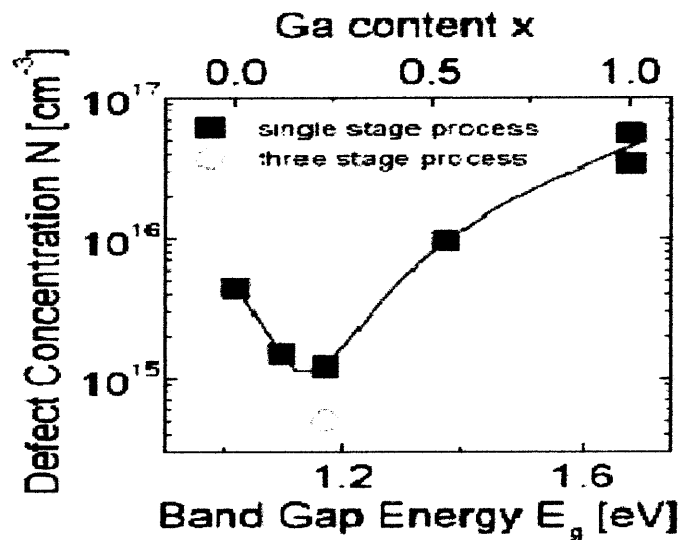
Figure II.8 : Rendement de conversion théorique pour cellule solaire [21].

III.3.3. Influence du Ga

L'insertion de Ga dans le CuInSe<sub>2</sub> permet d'obtenir un composé dont la valeur de la

bande interdite est comprise entre 1,02 et 1,7 eV. Jusqu'à présent, ce sont les matériaux  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  avec un rapport  $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$  de 25 à 35% (bande interdite de 1,1 à 1,2 eV) qui ont obtenu les meilleurs rendements. On observe une diminution de la densité de défauts pour une quantité optimale de Ga ( $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})=0,3$ ) pour un composé  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  homogène en épaisseur (Figure II.9).

La présence d'un nombre plus faible de défauts implique moins de pertes par recombinaison dans le volume de l'absorbeur.

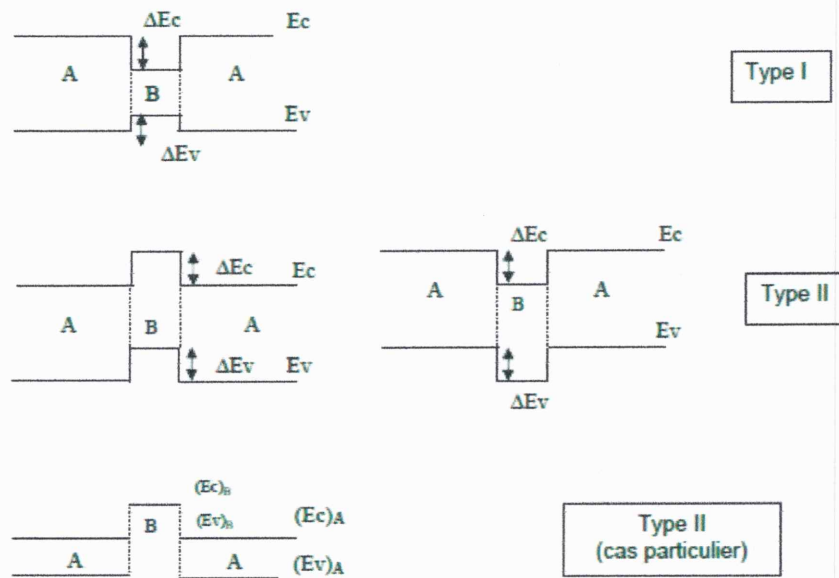


**Figure II.9 :** Variation de la concentration des défauts en fonction de la bande interdite .

#### IV. Les hétérojonctions

##### IV.1. Définitions

Les hétérojonctions sont des jonctions formées entre deux semiconducteurs avec des énergies de gap différentes, plusieurs types d'hétérojonctions sont envisageables, (Figure II.10)

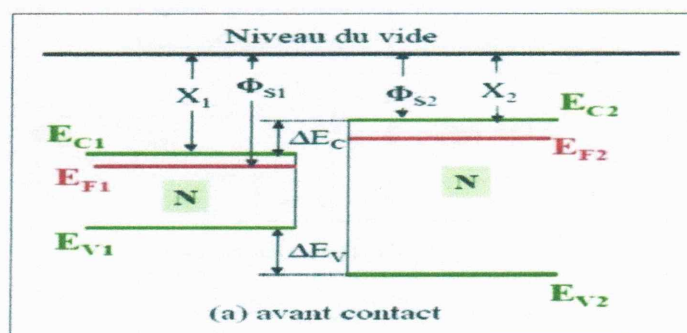


**Figure II.10** : Divers types d'hétérojonctions définis par la position relative des bandes des semiconducteurs A et B.[40].

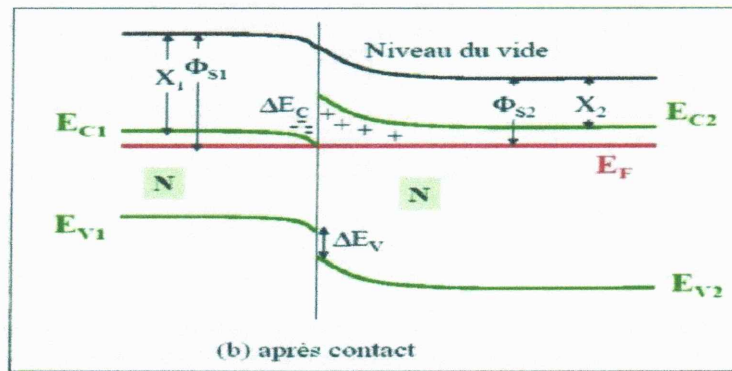
Une hétérojonction entre deux semiconducteurs peut être obtenue en faisant croître une couche épitaxiale d'un semiconducteur 2 sur un semiconducteur 1 cette croissance exige que les deux matériaux aient les mêmes symétries cristallines dans le plan interfacial, des paramètres cristallins voisins, et puisque l'épitaxie se réalise à T° élevée des coefficients de dilatation thermique voisins.

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

- Les premières sont les hétérojonctions isotypes, pour lesquelles les deux semiconducteurs sont de même type de dopage (**figure II.11**).



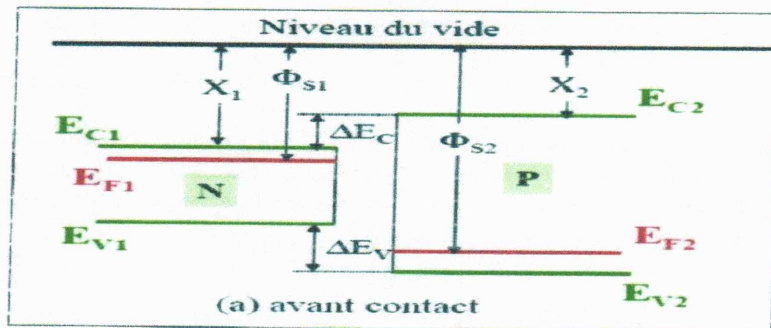
a)



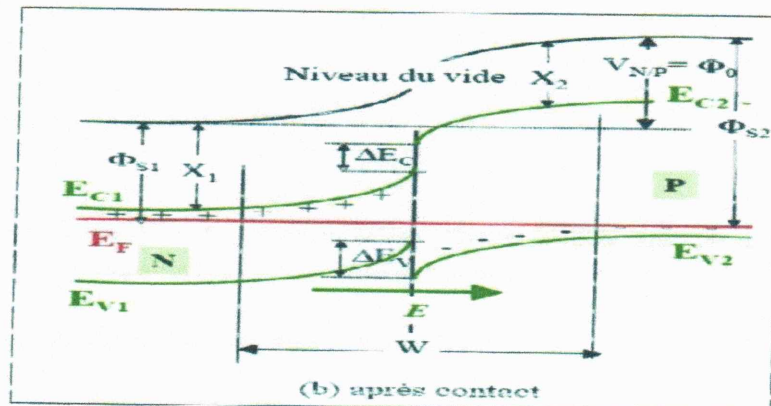
b)

Figure II.11 : Diagramme de bande d'une hétérojonction isotype, (a) avant contact, (b) après contact

➤ Les secondes sont les hétérojonctions anisotypes, pour les quelles les deux semiconducteurs sont dopés différemment (figure II.12).



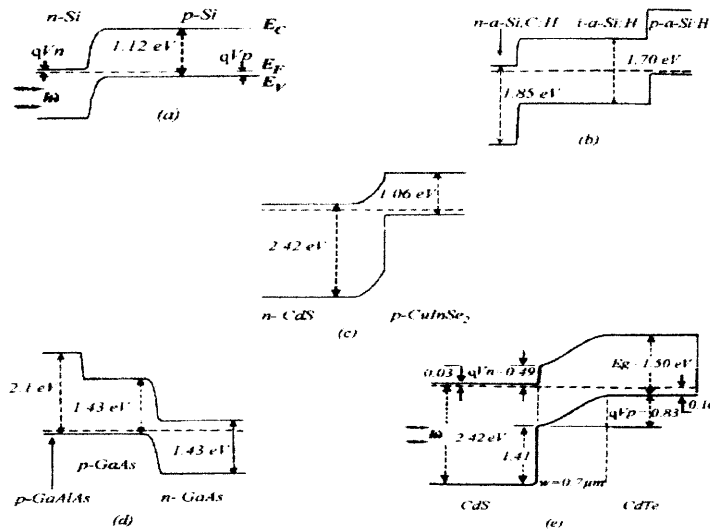
a)



b)

**Figure II.12 :** Diagramme de bande d'une hétérojonction anisotype, (a) avant contact, (b) après contact.[37].

L'hétérojonction est la seule solution pour les matériaux qui ne peuvent être dopés de type p et n, c'est le cas du CdS qui n'existe qu'à l'état n, grâce à son gap élevé (2,4 eV), il joue un rôle de fenêtre, la figure si dessous montre les diagrammes de bandes de quelques hétérojonctions n/p à l'équilibre thermique.



**Figure II.13 :** Structure de bandes des photopiles à hétérojonctions.[40].

#### IV.2. Diagramme de bande d'énergie

Lorsque les deux semi-conducteurs sont mis en contact, ils échangent des électrons de manière à aligner leurs niveaux de fermi. Cet échange se fait au voisinage de la jonction et fait apparaître, comme dans la jonction PN, une charge d'espace à laquelle est associée une barrière de potentielle (la tension de diffusion  $V_d$ ) qui arrête la diffusion des porteurs et définit l'état d'équilibre. Considérons le diagramme énergétique loin de la jonction, dans la région neutre de chacun des semi-conducteurs (figure. II-14). Nous avons choisi comme origine des énergies l'énergie potentielle de l'électron dans le vide au voisinage du semi-conducteur1, soit  $NV_1 = 0$ .

A partir de cette origine, le niveau de fermi de la structure est fixé à la distance  $e\phi_1$  au dessous,  $e\phi_1$  représente le travail de sortie du semi-conducteur1. A partir de ce niveau, on peut positionner  $E_{c1}$ ,  $E_{v1}$ ,  $E_{c2}$  et  $E_{v2}$ . Le niveau  $NV_2$  de l'électron dans le vide au voisinage du semi-conducteur2 est situé au dessus de  $E_F$  à la distance  $e\phi_2$ .

La différence d'énergie potentielle entre l'électron dans le vide au voisinage du semi-conducteur1, et l'électron dans le vide au voisinage du semi-conducteur2 est :

$$NV_2 - NV_1 = e(\phi_2 - \phi_1) \tag{II-4}$$

Il en résulte que la différence de potentielle entre les deux semi-conducteurs, c'est à dire la tension de diffusion, est donnée par

$$V_d = V_2 - V_1 = \phi_1 - \phi_2 \tag{II-5}$$

Les différences de densité d'états et de dopage des semi-conducteurs entraînent des valeurs différentes des paramètres  $e\phi_{f1}$  et  $e\phi_{f2}$ , c'est à dire des valeurs différentes des énergies des bandes de conduction des régions neutres des deux semi-conducteurs.

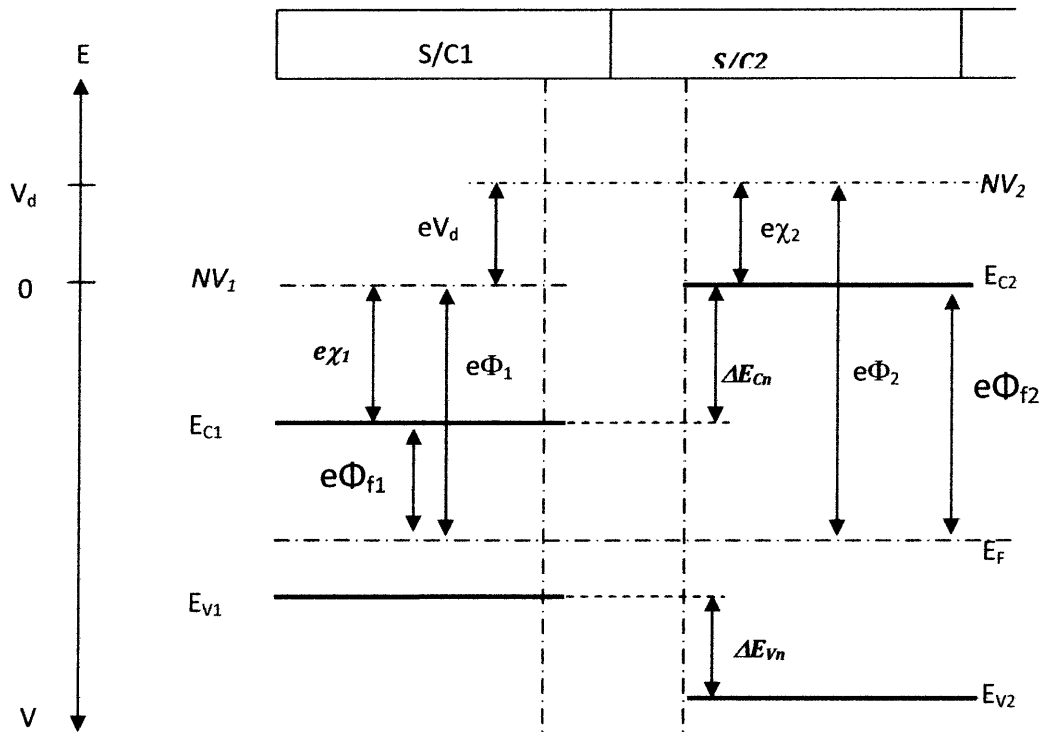


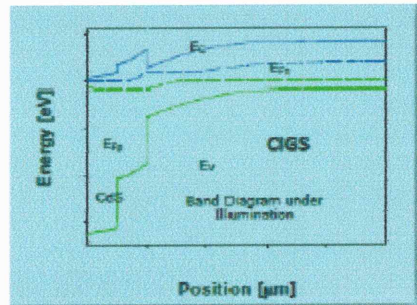
Figure II-14 : Diagramme énergétique loin de l'interface [15].

### IV.3. Diagramme de bande de la photopile à hétérojonction CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>

Le gap du Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) varie quadratiquement en fonction de x, entre celui de CuInSe<sub>2</sub> et celui de CuGaSe<sub>2</sub>, donc une première possibilité d'amélioration du rendement sera l'utilisation du CIGS, plutôt que le CIS de gap trop faible ( $\sim 1.02$  eV), ou de CGS de gap trop élevé (entre 1.66 et 1.68 eV) par rapport a la valeur théorique idéale (1.35 eV). Les plus récents records à notre connaissance sont de 18.8% et de 18.5% respectivement annoncés par le NREL au U.S.A (5 /11/ 1999) et par Matsushita au Japon [1].



Le diagramme de bande de l'hétérojonction CdS/CIGS est représenté là dessous :



**Figure II-15** géométrie de l'hétérojonction CdS/CIGS.[21].

En raison de la différence des travaux de sortie, les électrons diffusent du semiconducteur à plus faible travail de sortie vers l'autre, de semiconducteur1 (CdS) vers semiconducteur2 (CIGS) cette diffusion entraîne l'apparition d'une zone de charge d'espace.

Dans le semiconducteur2 (CIGS), la charge d'espace est négative, il est de type p, les électrons qui diffusent depuis le semiconducteur1 (CdS) se recombinent avec les trous à leur entrée dans le CIGS. Ils font apparaître une charge d'espace résultant des ions accepteurs non compensés par les trous. La charge d'espace résulte de la disparition des trous. Le semi-conducteur2 est en régime de déplétion.

Dans le semi-conducteur1 (CdS), d'où partent les électrons, la charge d'espace est au contraire positive. Le CdS est de type n il s'établit, au voisinage de l'interface un régime de déplétion avec une certaine extension spatiale de la densité de charge.

## V. Conclusion

Ce chapitre a été consacré pour l'étude de différentes couches constituant la cellule CdS/CIGS.

D'autre part l'intérêt que nous allons porter aux hétérojonctions ultérieurement nous a conduit à étudier et à analyser le diagramme énergétique à l'interface de l'hétérojonction qui dépend des propriétés intrinsèques des matériaux et leurs dopages respectifs. Pour l'objectif de montrer l'influence de ces effets sur les caractéristiques de la structure CdS/CIGS dans le prochain chapitre.

# **CHAPITRE**

## **III**

Chapitre III : Modélisation de la cellule photovoltaïque CdS/CIGS

I. Introduction

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

Notre intérêt est de montrer l'influence des propriétés intrinsèques des matériaux de l'hétérostructure CdS/CIGS et leurs dopages sur les paramètres de l'hétérojonction, précisément la tension de diffusion, les épaisseurs de la zone de charge d'espace.

II. Modèle de calcul

Pour notre calcul en admettant la géométrie suivante :

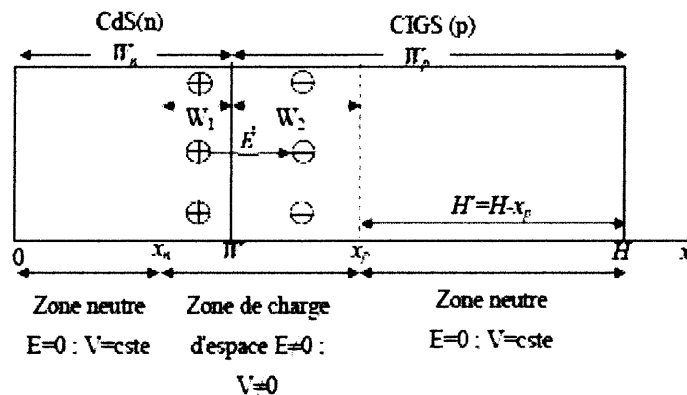


Figure. III.1. : Géométrie de l'hétérojonction CdS(n) / CIGS(p).[4].

II.1. Eclairément, puissance incidente et flux solaire au sol

D'après [9], l'éclairément solaire au sol est approximé par une fonction non linéaire donnée par :

$$E_{cl}(\lambda) = 0.06977 + 7.0625 \left| 1 - e^{-\frac{-(\lambda - 0.26053)}{0.15994}} \right| 2.28411 e^{-\frac{-(\lambda - 0.26053)}{0.22285}} \quad (III.1)$$

D'où le flux solaire au sol :

$$F(\lambda) = \frac{E_{cl}(\lambda)}{h\nu} \quad (III.2)$$

Et la puissance incidente au sol

$$P_i = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E_{cl}(\lambda) d\lambda \quad (III.3)$$

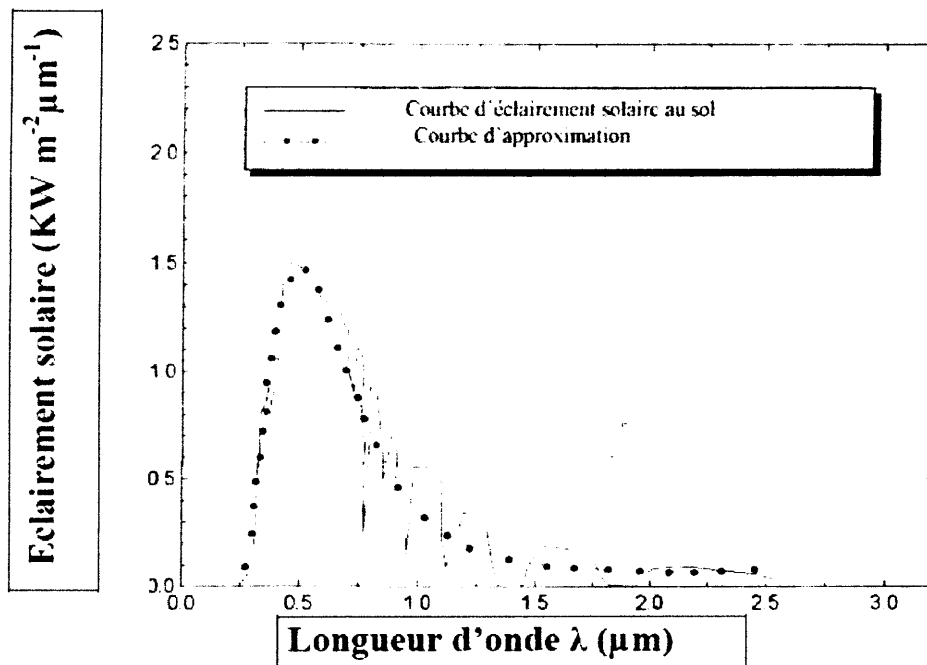


Figure.III.2. : Approximation de l'éclairement solaire au sol.[3].

### II 2. Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption se mesure par le spectrophotomètre, bien que les propriétés structurales et morphologiques soient différentes, presque semblables dans les propriétés optiques.

Les coefficients d'absorptions, ( ) pour les deux matériaux : CuInGaSe2 et CdS sont donnés par :

#### II.2.1 :pour le CdS

Le coefficient d'absorption dépend de l'énergie des photons  $h\nu$ , selon la relation suivante [18]

$$A_1 = \frac{A}{h\nu} (h\nu - E_g)^{1/2} \tag{III.4}$$

$E_g$  : énergie de gap du CdS.

$A$  : constante.

$$\alpha_1(\lambda) = \frac{A}{E} (E - E_{g1})^{1/2} ; \text{avec } A=3.224 \cdot 10^4, h\nu = \frac{hc}{\lambda}, E_{g1}=2.42eV$$

$$\text{Donc : } \begin{cases} \alpha_1(\lambda) = \frac{3.224 \cdot 10^4}{h\nu} (h\nu - E_{g1})^{1/2} & 0.3 < \lambda < 0.51 \mu m; \\ \alpha_1(\lambda) = 0 & \lambda > 0.51 \end{cases} \tag{III.5}$$

#### II.2.2 . Pour le CuInGaSe2 (CIGS)

En  $x=0$  :

$$E_{s1} = -\frac{eN_{d1}}{\epsilon_1} x_1 \quad (\text{III.11})$$

En intégrant une deuxième fois et en appelant  $V_1$  le potentiel de la région neutre du semi-conducteur 1, on obtient

$$V(x) = -\frac{eN_{d1}}{2\epsilon_1} (x - x_1)^2 + V_1 \quad (\text{III.12})$$

### III.2. Dans le semi-conducteur 2 (CuInGaSe<sub>2</sub>)

$$\rho(x) = -eN_{a2}$$

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \frac{eN_{a2}}{\epsilon_2} \quad (\text{III.13})$$

$$\frac{dV(x)}{dx} = -E(x) = -\frac{eN_{a2}}{\epsilon_2} (x - x_2) \quad (\text{III.14})$$

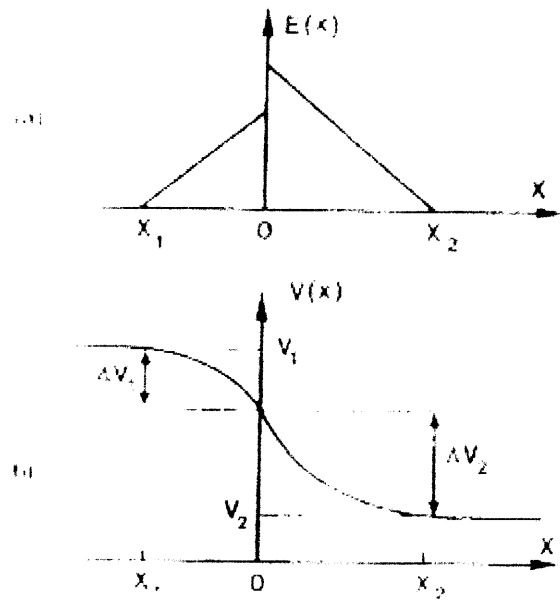
En  $x=0$  :

$$E_{s2} = -\frac{eN_{a2}}{\epsilon_2} x_2 \quad (\text{III.15})$$

$$V(x) = -\frac{eN_{a2}}{2\epsilon_2} (x - x_2)^2 + V_2 \quad (\text{III.16})$$

Le champ et le potentiel électriques sont représentés sur la figure (III.1). La continuité du vecteur de déplacement à l'interface s'écrit:  $\epsilon_1 E_{s1} = \epsilon_2 E_{s2}$

$$-eN_{d1}x_1 = eN_{a2}x_2 \quad (\text{III.17})$$



**Figure III.3 :** (a) Champ et(b) potentiel électrique à l'interface d'une hétérojonction n-p.[4].

### III.3.Calcul de la densité de photo-courant, $J_{ph}(\lambda)$

#### III.3.a. La première zone neutre N (CdS)

Les minoritaires sont des trous pour le semi-conducteur de type N.

L'équation de continuité s'écrit dans cette région comme :[18].

$$G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_n} - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = 0 \quad (\text{III.18})$$

$G_p = \alpha_1 F(1 - R)\exp(-\alpha_1 x)$  désigne le taux de génération des paires électrons/trous.

2) L'équation de densité de courant est alors :

$$J_p = -q\mu_p p_n E - qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (\text{III.19})$$

Dans cette région :  $E=0$ , donc :

$$J_p = -qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (\text{III.20})$$

On remplace  $J_p$  et  $G_p$  dans l'équation de continuité, on obtient :

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + \alpha_1 F(1 - R) \exp(-\alpha_1 x) - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0 \quad (\text{III.21})$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$p_n - p_{n0} = A_1 \operatorname{ch}\left(\frac{x}{L_p}\right) + B_1 \operatorname{sh}\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{\alpha_1 F(1-R)\tau_p}{\alpha_1^2 L_p^2 - 1} \exp(-\alpha_1 x) \quad (\text{III.22})$$

Où  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  est la longueur de diffusion des trous.

En peut trouver les deux constantes A1 et B1 à partir des conditions aux limites :

➤ A la surface, une recombinaison se produit avec une vitesse  $S_p$  la condition est

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} = S_p (p_n - p_{n0}) \quad \text{à } x=0 \quad (\text{III.23})$$

➤ A la limite de la jonction la densité des porteurs en excès réduite à zéro par le champ électrique dans la zone de déplétion, ceci est traduit par :

$$p_n - p_{n0} = 0 \quad \text{à } x = x_n \quad (\text{III.24})$$

La densité de photo courant dans cette région est :

$$J_p = -q D_p \left( \frac{dp_n}{dx} \right)_{x_j} \quad (\text{III.25})$$

Donc :

$$J_p = \left( q \frac{F(1-R)\alpha_1 L_p}{\alpha_1^2 L_p^2 - 1} \right) * \frac{\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha_1 L_p - \exp(-\alpha_1 x_j) \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \operatorname{ch}\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \operatorname{sh}\left(\frac{x_j}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \operatorname{sh}\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{x_j}{L_p}\right) - \alpha_1 L_p \exp(-\alpha_1 x_j)}$$

### III.3.b. La deuxième zone neutre P (CuInGaSe2)

Les minoritaires sont des électrons pour le semi-conducteur de type P, on peut écrire :

$$G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (\text{III.27})$$

$$G(\lambda, x) = \alpha_2(\lambda) \Phi_i (1-R) \exp(-\alpha_1(x_j + w_1)) \exp(-\alpha_2 w_2) \exp(-\alpha_2 x) \quad (\text{III.28})$$

2) L'équation de densité de courant est alors

$$J_n = -q \mu_n n_p E - q D_n \frac{dn_p}{dx} \quad (\text{III.29})$$

Dans cette région  $E=0$ , donc :

$$J_n = qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (\text{III.30})$$

On remplace  $J_p$  et  $Gp$  dans l'équation de continuité, on obtient :

$$D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + \alpha_2 F (1 - R) \exp(-\alpha_2 x) - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = 0 \quad (\text{III.31})$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$n_p - n_{p0} = A_2 \operatorname{ch}\left(\frac{x}{L_n}\right) + B_2 \operatorname{sh}\left(\frac{x}{L_n}\right) - \frac{\alpha_2 F (1 - R) \tau_n}{\alpha_2^2 L_n^2 - 1} \exp(-\alpha_2 x) \quad (\text{III.32})$$

Ou :  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  est la longueur de diffusion des trous.

En peut trouver les deux constantes  $A_1$  et  $B_1$  à partir des conditions aux limites :

A la surface, une recombinaison se produit avec une vitesse  $S_p$  la condition est

$$-D_p \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} = S_n (n_p - n_{p0}) \quad \text{à } x = H \quad (\text{III.33})$$

A la limite de la jonction la densité des porteurs en excès réduite à zéro par le champ électrique dans la zone de déplétion, ceci est traduit par :

$$n_p - n_{p0} = 0 \quad \text{à } x = x_j + W_1 + W_2 \quad (\text{III.34})$$

La densité de photo courant dans cette région est :

$$J_n = qD_n \left(\frac{dn_p}{dx}\right)_{x_j + W_1 + W_2} \quad (\text{III.35})$$

Donc :  $J_n = \left(\frac{F(1-R)\alpha_2 L_n}{\alpha_2^2 L_n^2 - 1}\right) \exp(-\alpha_1(x_j + W_1) - \alpha_2 W_2) *$

$$\left(\alpha_2 L_n - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} + \left(\operatorname{ch}\left(\frac{H}{L_n}\right) - \exp(-\alpha_2 H)\right) + \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L_n}\right) \alpha_2 L_n \exp(-\alpha_2 H)}{\frac{S_n L_n}{D_n} \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L_n}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L_n}\right)}\right) \quad (\text{III.36})$$

### III.3.c. La densité de courant dans la zone de charge d'espace pour les deux semiconducteurs

$$J_{W_1}(\lambda) = qF(1 - R)e^{-\alpha_1 x_j}(1 - e^{-\alpha_1 W_1}) \quad (\text{III.37})$$

$$J_{W_2}(\lambda) = qF_0(1 - R)e^{-\alpha_1(W_1 + x_j)}(1 - e^{-\alpha_2 W_2}) \quad (\text{III.38})$$

Donc la densité dans cette zone totale est :

$$J_{ZCE} = J_{W_1} + J_{W_2} \quad (\text{III.39})$$



$$J_{ZCE} = qF(1 - R)(e^{-\alpha_1 x_j}(1 - e^{-\alpha_1 W_1}) + e^{-\alpha_1 W_1}(1 - e^{-\alpha_2(\lambda)W_2})) \quad (\text{III.40})$$

Et par conséquent la densité du photocourant totale est donnée par :

$$J_{ph} = J_n + J_p + J_{zce} \quad (\text{III.41})$$

### III.3.d. Densité de photo courant totale, $J_{ph}$

La densité de photo courant totale,  $J_{ph}$  est obtenue en intégrant la densité de courant,  $J_{ph}(\lambda)$  Sur toute la gamme du spectre solaire utilisée.  $J_{ph}$  est donnée par :

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} J_{ph}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} J_p(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} J_n(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} J_{zce}(\lambda) d\lambda \quad (\text{III.42})$$

## IV. Les caractéristiques des cellules solaires

### IV.1. Réponse spectrale $SR(\lambda)$

La réponse spectrale est donnée par

$$SR(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{qF[1-R(\lambda)]} \quad (\text{III.43})$$

### IV.2. Caractéristique courant tension

La principale caractéristique d'une cellule solaire est celle de la variation de la densité de courant débité par la cellule en fonction de la tension à ses bornes, communément appelée caractéristique J-V. A partir de cette caractéristique l'utilisation peut déduire aisément la densité de courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, ainsi que la puissance maximale que peut débiter la cellule. [4].

#### IV.2.a La densité de courant de saturation inverse

Pour la cellule solaire à hétérojonction à base CuInGaSe<sub>2</sub> de structure N - P, la

Densité de courant de saturation inverse est donnée par

$$J_s = q \left( \frac{p_{n0} D_p}{L_p} + \frac{n_{p0} D_p}{L_n} \right) - q \left( \frac{n_{i1}^2 D_p}{N_d L_p} + \frac{n_{i2}^2 D_n}{N_a L_n} \right) \quad (\text{III.44})$$

Où :  $n_{i1}$  est la concentration intrinsèque de la couche N (CdS) et  $n_{i2}$  est celle de la Couche P.

$n_{i1} \ll n_{i2}$  : Utilisant cette inégalité dans l'équation (III.16),  $J_s$  peut être juste écrite

$$\text{comme : } J_s = q \left( \frac{n_{i2}^2 D_n}{N_a L_n} \right) \quad (\text{III.45})$$

$$n_{i2}^2 = N_{c2} N_{v2} e^{\frac{-E_{g2}}{kT}} \quad (\text{III.46})$$

#### IV.2.b Caractéristique J-V idéale

La caractéristique J-V idéale est donnée par

$$J = J_{ph} - J_s \left( e^{\frac{v}{QU_t}} - 1 \right) \quad (\text{III.47})$$

Si la cellule est en court-circuit c'est à dire ( $V=0$  et  $J=J_{sc}$ ) on obtient le courant de court-circuit donné par :

$$J_{ph} = J_{sc} \quad (\text{III.48})$$

Autrement, si la cellule est en circuit ouvert c'est-à-dire ( $V=V_{co}$  et  $J=0$ ) on Trouve la tension de circuit ouvert donnée par :  $Q=1$  ;

$$V_{co} = QU_t \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_s} \right) - 1 \quad (\text{III.49})$$

Entre le point  $(J, V) = (J_{sc}, 0)$  et le point  $(J, V) = (0, V_{co})$  on représente la Caractéristique, J-V. Parallèlement de cette représentation, on calcule la puissance Maximale, donnée par :

$$P_m = (JV)_{\max} \quad (\text{III.50})$$

Et par conséquent, on peut facilement déduire le facteur de forme et le rendement de conversion, qui sont données respectivement par

$$FF = \frac{P_m}{J_{sc} V_{CO}} \quad (\text{III.51})$$

$$= \frac{P_m}{P_i} \quad (\text{III.52})$$

#### V. La tension de diffusion et les épaisseurs de la ZCE pour l'hétérojonction CdS/CIGS

A partir du diagramme énergétique de l'hétérojonction CdS/CIGS là-dessous on va déterminer les expressions de tension  $V_d$  et les épaisseurs  $W_1$ ,  $W_2$  de la ZCE en fonctions des paramètres de l'hétérostructure.

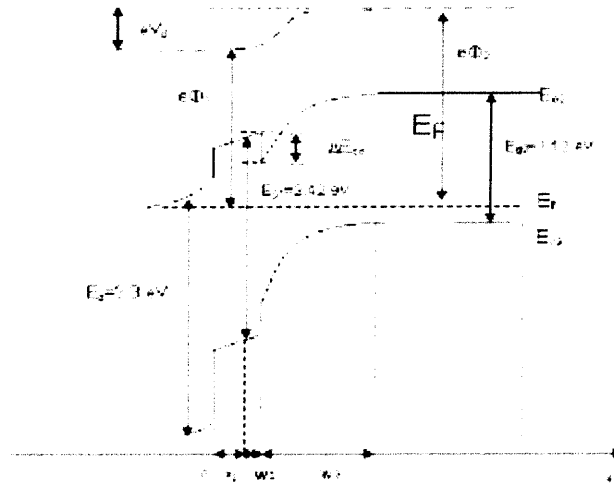


Figure III.4 Diagramme énergétique de l'hétérostructure ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se2/Mo[3].

$$E_g = e(X_1 - X_2) \quad (III.53)$$

$$NV_2 - NV_1 = e(\phi_2 - \phi_1) \quad (III.54)$$

$$V_d = V_2 - V_1 = \phi_2 - \phi_1 \quad (III.55)$$

Appelons  $\Delta E_{cn}$  la différence d'énergie entre les bandes de conduction des régions neutres.

$$\Delta E_{cn} = E_{c2} - E_{c1} = e(\phi_{F2} - \phi_{F1}) \quad (III.56)$$

$$\Delta E_g = E_{g2} - E_{g1} = (E_{c2} - E_{v2}) - (E_{c1} - E_{v1}) = (E_{c2} - E_{c1}) - (E_{v2} - E_{v1}) \quad (III.57)$$

La différence d'énergie des bandes de valence est par conséquent donnée par

$$\Delta E_{vn} = e(\phi_{F2} - \phi_{F1}) - \Delta E_g \quad (III.58)$$

$$\Delta E_{cn} = e((\phi_2 - x_2) - (\phi_1 - x_1)) \quad (III.59)$$

$$\Delta E_{cn} = e((\phi_2 - \phi_1) - (x_2 - x_1)) = eV_d - e(x_2 - x_1) \quad (III.60)$$

$$\Delta E_{vn} = -eV_d - (e(x_2 - x_1) + \Delta E_g) \quad (III.61)$$

$$eV_d = \Delta E_{cn} - \Delta E_{c0} \quad (III.62)$$

$$eV_d = -\Delta E_{c0} + \Delta E_g + \Delta E_{vn} \quad (III.63)$$

$$eV_d = -\Delta E_{c0} + E_{g2} - E_{g1} + (E_{v2} - E_{v1}) \quad (III.64)$$

$$eV_d = -\Delta E_{c0} + E_{g2} - (E_{c1} - E_F) + (E_F - E_{v2}) \quad (III.65)$$

## V.1. Le Niveau de fermi

## V.1.a. Semi conducteur type N

$$N_D = N_C \cdot e^{\frac{E_C - E_F}{KT}} \quad (\text{III.66})$$

$$\frac{N_C}{N_D} = e^{\frac{E_C - E_F}{KT}} \quad (\text{III.67})$$

$$E_{c1} - E_F = KT \cdot \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (\text{III.68})$$

## V.1.b Semi conducteur type P

$$N_A = N_V \cdot e^{\frac{E_V - E_F}{KT}} \quad (\text{III.69})$$

$$\frac{N_V}{N_A} = e^{\frac{E_F - E_{V2}}{KT}} \quad (\text{III.70})$$

$$E_F - E_{V2} = KT \cdot \ln \frac{N_V}{N_A} \quad (\text{III.71})$$

Donc on remplace les équations (III.66 et III.69) dans l'équation de  $V_d$  :

$$eV_d = -\Delta E_{c0} + E_{g2} - \left( KT \ln \left( \frac{N_C}{N_D} \right) \right) + \left( KT \ln \left( \frac{N_A}{N_V} \right) \right) \quad (\text{III.72})$$

Cette équation montre que  $V_d$  dépend des paramètres intrinsèques de l'hétérojonction ( $\Delta E_{c0}, E_{g2}$ ) et les dopages des matériaux émetteur-base .

Ce qui donne pour  $X_n, X_p$  les expressions suivantes:

$$X_n^2 = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{r1}}{eN_D} \left( \frac{1}{1 + \frac{N_D}{N_A}} \right) V_d \quad (\text{III.74})$$

$$X_p^2 = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{r2}}{eN_A} \left( \frac{1}{1 + \frac{N_A}{N_D}} \right) V_d \quad (\text{III.75})$$

On substitue  $V_d$  par son expression :

$$V_d = -\frac{\Delta E_{c0}}{e} + \frac{E_{g2}}{e} - \left( \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right) \quad (\text{III.76})$$

$$V_d = \frac{-\Delta E_{c0} + E_2}{e} - \left( \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right)$$

## V.2. Calcul de la largeur de la ZCE

$$W = X_n + X_p \quad (\text{III.78})$$

Si :  $N_D > N_A$  et  $X_p \ll X_n$

Où, en posant  $W_1 = |X_n|$  et  $W_2 = |X_p|$ , et  $|X_n| = |X_1|$  et  $|X_p| = |X_2|$

$$\text{Et : } \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r ; \quad (\text{III.79})$$

$$X_n^2 = \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}{e N_D} \right) \left( \frac{N_A}{N_A + N_D} \right) \left[ \left( \frac{-\Delta E_{c0} + E_{g2}}{e} \right) - \left( \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right) \right] \quad (\text{III.80})$$

$$W_1^2 = X_n^2 = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_A}{e^2 (N_A + N_D)} \left( \frac{-\Delta E_{c0} + E_{g2}}{N_A + N_D} \right) - \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r KT}{e^2 N_D} \left( \frac{N_A}{N_A + N_D} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right) \quad (\text{III.81})$$

$$W_1 = \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_A}{e^2 (N_A + N_D)} \left( \frac{-\Delta E_{c0} + E_{g2}}{N_A + N_D} \right) \right)^{\frac{1}{2}} - \left[ \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r KT}{e^2 N_D} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \left( \frac{N_A}{N_A + N_D} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]$$

$$X_p^2 = \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}{e N_A} \right) \left( \frac{N_D}{N_D + N_A} \right) \left[ \left( \frac{-\Delta E_{c0} + E_{g2}}{e} \right) - \left( \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right) \right] \quad (\text{III.83})$$

$$W_2^2 = X_p^2 = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D}{e^2 (N_D + N_A)} \left( \frac{-\Delta E_{c0} + E_{g2}}{N_D + N_A} \right) - \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r KT}{e^2 N_A} \left( \frac{N_D}{N_D + N_A} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right) \quad (\text{III.84})$$

$$W_2 = \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D}{e^2 (N_D + N_A)} \left( \frac{-\Delta E_{c0} + E_{g2}}{N_D + N_A} \right) \right)^{\frac{1}{2}} - \left[ \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r KT}{e^2 N_A} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \left( \frac{N_D}{N_D + N_A} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]$$

Dans les région n et p respectivement.

La largeur dans la ZCE et donnée par :

$$W = W_1 + W_2 \quad (\text{III.86})$$

$$W = \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_A}{e^2 (N_A + N_D)} \left( \frac{-\Delta E_{c0} + E_{g2}}{N_A + N_D} \right) \right)^{\frac{1}{2}} - \left[ \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r KT}{e^2 N_D} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \left( \frac{N_A}{N_A + N_D} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right] + \left[ \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_D}{e^2 (N_D + N_A)} \left( \frac{-\Delta E_{c0} + E_{g2}}{N_D + N_A} \right) \right)^{\frac{1}{2}} - \left[ \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r KT}{e^2 N_A} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \left( \frac{N_D}{N_D + N_A} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right] \right] \quad (\text{III.87})$$

## VI. Conclusion

Le présent chapitre est destiné pour la présentation du modèle mathématique pour l'étude des caractéristiques de la cellule à hétérojonction à base de CIGS (CdS/CIGS)

On prend en considération les effets des états à l'interface entre les couches P et N de la cellule. En utilisant le modèle d'Anderson pour les hétérojonctions, le calcul de la tension de diffusion  $V_d$  et la largeur totale de la zone de déplétion montre qu'ils sont dépendent des propriétés intrinsèques des matériaux et leurs dopages respectifs. On va voir l'influence de ces paramètres sur les densités des courants dans toutes les régions et par conséquent, la détermination de la densité de courant totale, pour optimiser les caractéristiques de la cellule ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$  et  $\eta$ ).

# **CHAPITRE**

## **IV**

*Chapitre IV : Simulation et résultats***I. Introduction**

Durant ces dernières années, et à cause des couts élevés de l'expérimentation (Méthodes d'élaboration et techniques de fabrication), les chercheurs se sont orientés Vers la simulation. Il existe principalement quatre types de simulateurs, nous citons à titre d'exemple, les simulateurs fonctionnels ou logiques, les simulateurs électriques ou analogiques, les simulateurs technologiques et ceux de composants ou de dispositifs, La simulation des cellules solaires à l'aide de ces différents simulateurs consiste à comprendre le comportement de ces dispositifs en fonction des paramètres tels que les épaisseurs, le gap et le dopage des régions sur les caractéristiques de la cellule solaire ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF,  $\eta$ ). Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique utilisant le logiciel MATLAB.

Donc nous sommes entrain de présenter les résultats obtenus lors de la simulation des caractéristiques de la cellule CdS/CIGS étudiée, on prend par considération les effets des paramètres  $E_g$ ,  $N_a$  et  $N_d$  sur la tension de diffusion  $V_d$  et les épaisseurs de la zone de déplétion  $W_1$ ,  $W_2$  pour optimiser ces valeurs. Ensuite la détermination des densités des courants dans toutes les régions et par conséquent la densité du courant totale, dans le but d'obtenir un rendement de conversion électrique optimal.

Ces résultats ont été obtenus à partir du diagramme énergétique de l'hétérojonction CdS/CIGS suite à la résolution des équations de continuité et des courants. En effet le calcul ce photo-courant va nous permettre de déterminer les caractéristiques électriques de sortie de la cellule photovoltaïque qu'elle est caractérisée essentiellement par sa tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , son courant de court-circuit  $I_{sc}$ , Son facteur de forme et son rendement de conversion.

Cependant la non linéarité de l'équation de sortie  $I(V)$  rend inévitable sa résolution numérique, nécessitant de ce fait un intense outil informatique provoqué par le logiciel MATLAB. Nous présenterons également des résultats qui mettent en évidence l'importance de ce type des cellules solaires. Lors de cette simulation nous allons comparer nos résultats par d'autres résultats expérimentaux obtenues par le NREL (USA National Renewable Energie laboratory).

Nous rappelons que la cellule solaire étudiée possède les paramètres récapitulant dans le tableau ci-dessous :

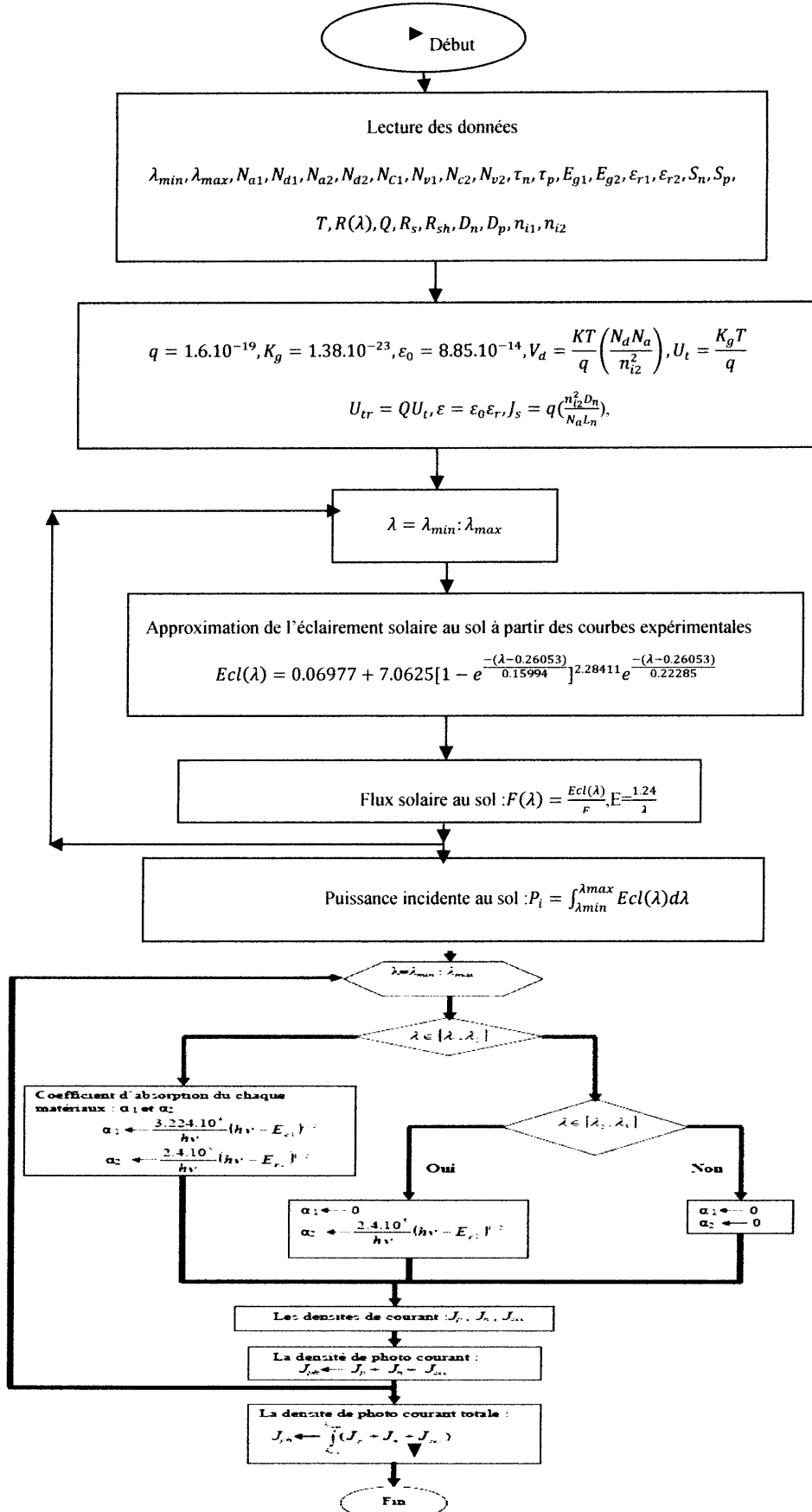


Matériau \ paramètres	CdS	CIGS
Épaisseur de la couche, $W$ (nm), paramètre de base	50	2000
Affinité électronique, $\chi$ (eV)	4.4	4.5
Permittivité relative, $\epsilon_r$	9.4	10.23
$\mu_n$ (Cm <sup>2</sup> /V.s)	50	3000
$\mu_p$ (Cm <sup>2</sup> /V.s)	25	25
Durée de vie des électrons, $\tau_n$ (s)		$22 \times 10^{-19}$
Durée de vie des trous, $\tau_p$ (s)	$10^{-13}$	
Concentration des atomes accepteurs, $N_a$ (cm <sup>-3</sup> ), paramètre de base	--	$8 \times 10^{14}$
Concentration des atomes donneurs $N_d$ (cm <sup>-3</sup> ), paramètre de base	$10^{16}$	--
Énergie du gap, $E_g$ (eV), paramètre de base	2.42	1.12
Densité effective des états dans la bande de conduction $N_c$ (cm <sup>-3</sup> ),	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$
Densité effective des états dans la bande de valence $N_v$ (cm <sup>-3</sup> ),	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$
Vitesse de recombinaison des électrons à la surface arrière $S_n$ (cm/s)	--	$10^7$
Vitesse de recombinaison des trous à la surface avant $S_p$ (cm/s)	$10^7$	---
Coefficient de réflexion, $R(\lambda)$	0.05	
Facteur de qualité, $Q$	1.14	
La température $T$ (K)	300	

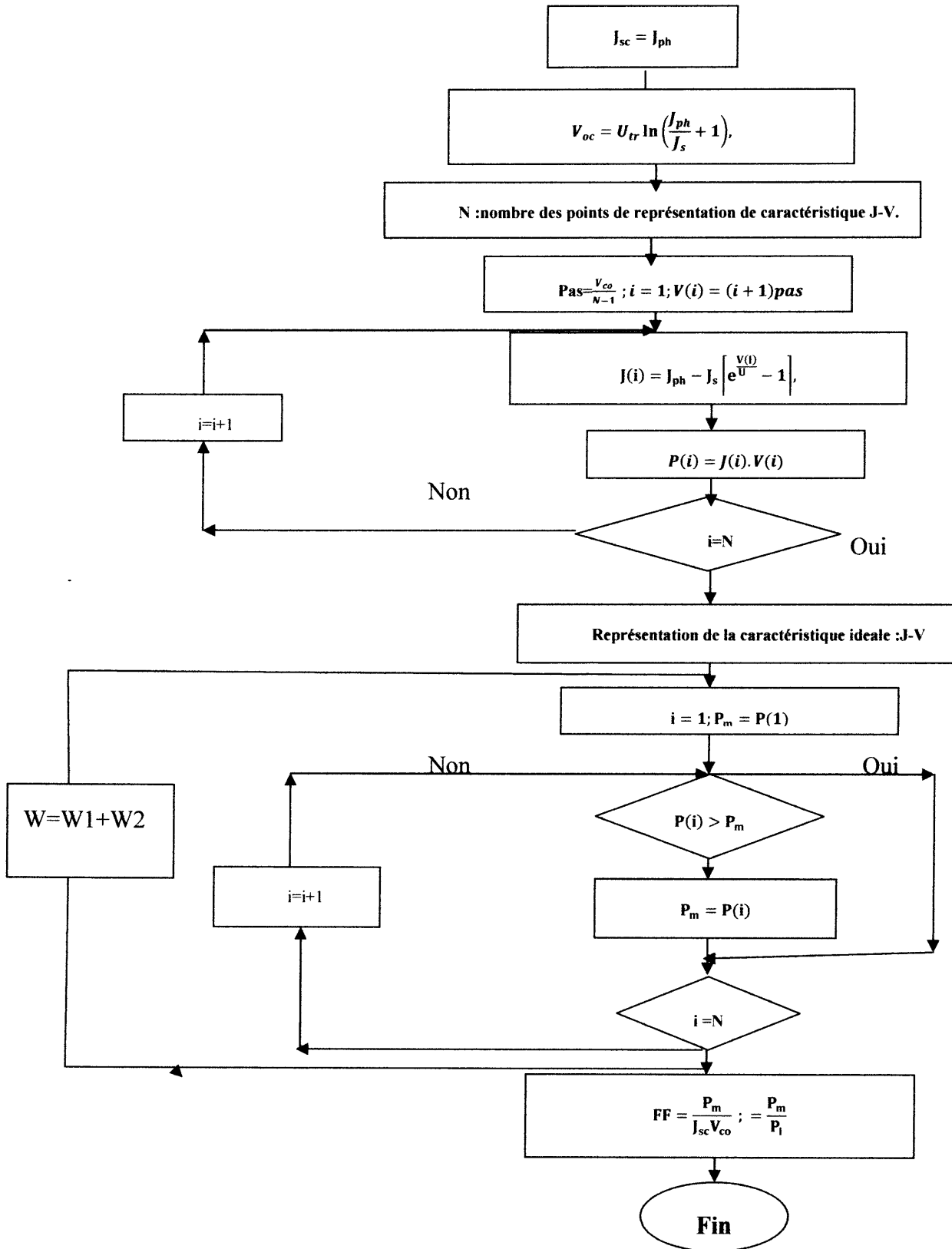
Tableau (IV.1) . Les paramètres de la cellule CdS/CIGS utilisées durant la simulation.

IV.2 Organigrammes de simulation

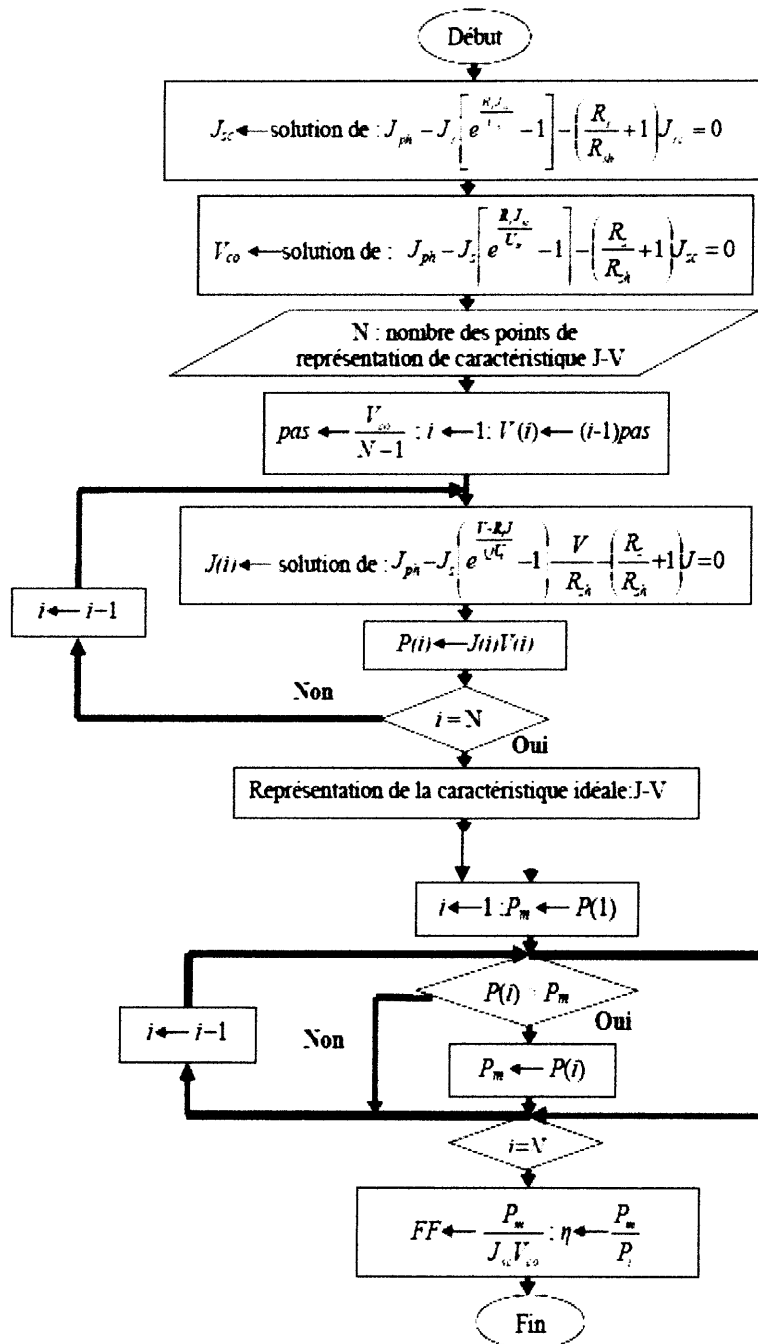
IV.2.1 Organigramme de calcul du photo courant  $J_p$ ,  $J_n$ ,  $J_{zce}$  et  $J_{ph}$



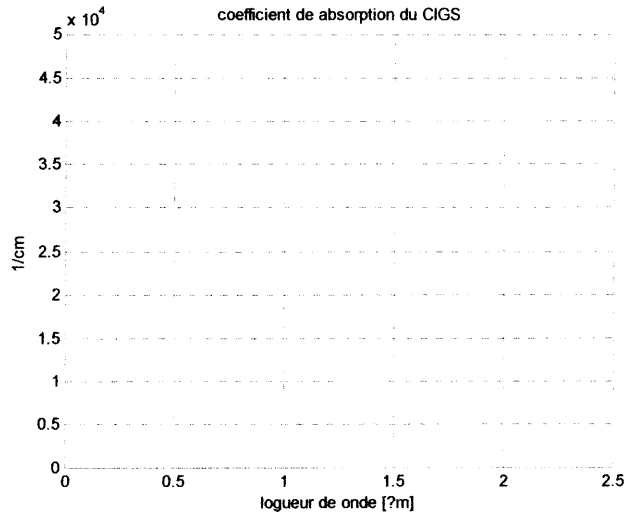
IV.2.2 Organigramme de la simulation de la caractéristique I(V) [Idéale]



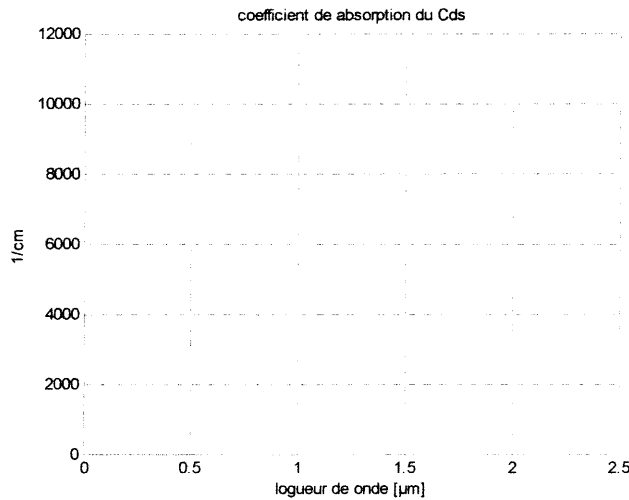
IV.2.3 Organigramme de la simulation de la caractéristique I(V) [réelle]



IV.3 Simulation des caractéristiques de la cellule

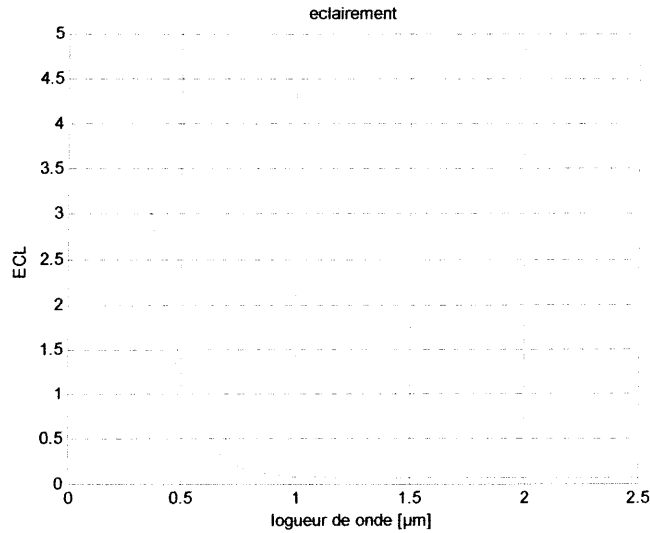


**Figure. IV.1.** Coefficient d'absorption du CIGS.



**Figure IV.2.** Coefficient d'absorption du CdS

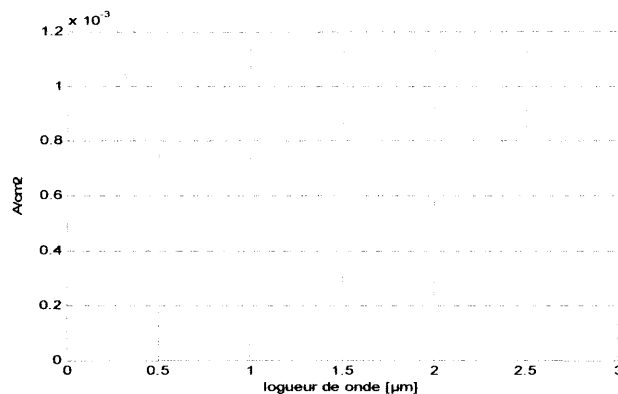
Il est clair sur les figures (IV.1) et (IV 2) qui représente le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde que, à cause de leur faible gap optique par rapport au CdS, le CIGS absorbe plus de photons que le CdS.



**Figure. IV.3.** L'éclaircement en fonction de la longueur d'onde.

Cette figure représente le flux des photons incidents, c'est le nombre des photons qui tombent sur une surface par unité de temps. On voit que le nombre des photons diminue exponentiellement, elle a la même allure de variation la distribution spectrale du rayonnement solaire. La cellule est très sensible aux photons incidents dans l'intervalle  $0.3 \mu\text{m}$  à  $0.75 \mu\text{m}$ , au-delà l'éclaircement devient faible.

Ces résultats nous permettent d'entamer la simulation de la cellule photovoltaïque à base du CIGS pour déterminer la variation du photocourant dans chaque zone de la cellule.

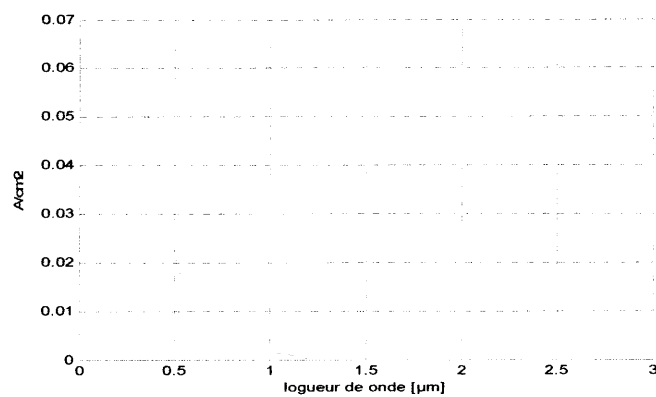


**Figure VI.4** Variation du courant de l'émetteur en fonction de la longueur d'onde.

La figure (IV.4) montre la variation de la densité du courant des trous dans l'émetteur CdS. Le photocourant de CdS munis des excitations énergétiques (le flux

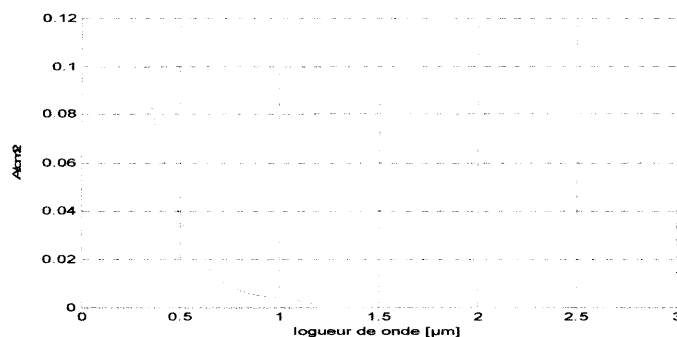
incident) varie selon l'allure de la courbe du flux des photons et de coefficient d'absorption.

Nous remarquons que les valeurs de ce courant sont très faibles par rapport aux autres couches par ce qu'il présente un courant de diffusion des trous ainsi que l'épaisseur de CdS est très fin comparant à celui de la base. La nullité de la courbe à partir de la valeur de  $\lambda=0.5 \mu\text{m}$  confirme que ce courant dépend réellement de coefficient d'absorption.



**Figure.VI.5** Variation du courant de la base CIGS en fonction de la longueur d'onde.

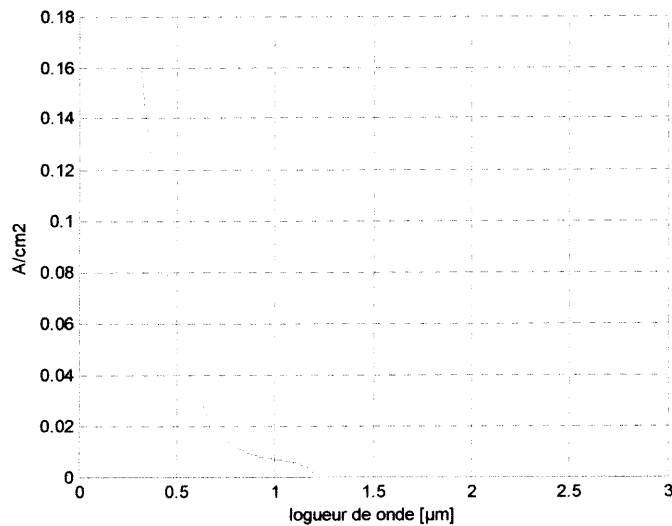
Cette figure montre clairement l'avantage que représente le semi-conducteur ternaire CIGS pour les cellules photovoltaïques à base du CIGS car si en compare la densité de courant qu'il déploie avec celle que déploie le CdS en trouve que le CIGS déploie une densité largement très grande en plus l'avantage que lui donne son large domaine d'absorption ainsi son très grand coefficient d'absorption.



**Figure VI.6** Variation du courant de la ZCE en fonction de la longueur d'onde.

La figure (IV. 6) présente le photocourant délivré dans la ZCE. Cette figure montre clairement que la photogénération dans cette zone introduit un courant important pour un épaisseur très petite comparant de la base.

L'allure de cette courbe est identique à celle de la couche CIGS, cela signifie la prédominance de la densité du photocourant de CIGS par rapport à celle de CdS.



**Figure VI.7** Variation du courant totale de la cellule en fonction de la longueur d'onde.

Cette figure (IV. 7) représente la variation du photocourant total en fonction de longueur d'onde  $\lambda$  qui est la somme des trois courants. On constate que le CIGS renforce le courant total de la cellule, le photocourant de diffusion de la base s'accumule avec le courant photogénéré dans la ZCE donnant une augmentation du courant total avec un pic de 0.18 mA.

#### IV.4 Optimisation des paramètres de l'hétérojonction:

D'après les résultats précédents on constate que la valeur du photocourant globale de la cellule dépend du courant de la couche de CIGS mais le plus de la valeur du courant de la ZCE. Selon le calcul du chapitre III les épaisseurs  $W_1$ ,  $W_2$  dépendent aux valeurs de  $E_{g2}$ ,  $N_a$  et  $N_d$ , donc une optimisation de ces paramètres nous permet une amélioration du photocourant généré, ainsi une amélioration des performances de la cellule.



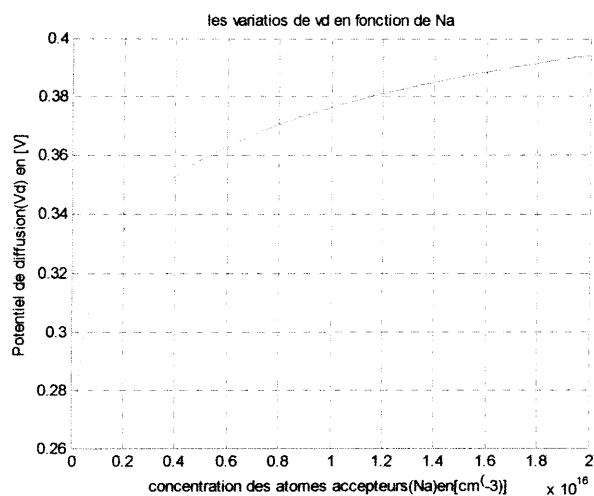


Figure.IV.8.a. La variation de Vd en fonction de la concentration Na.

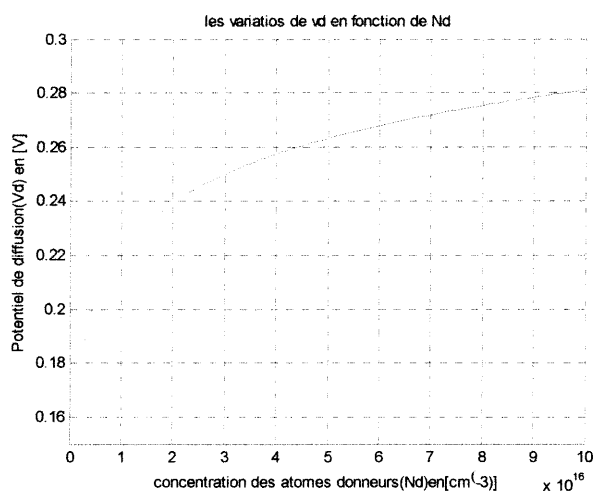


Figure IV.8.b. La variation de Vd en fonction de la concentration Nd.

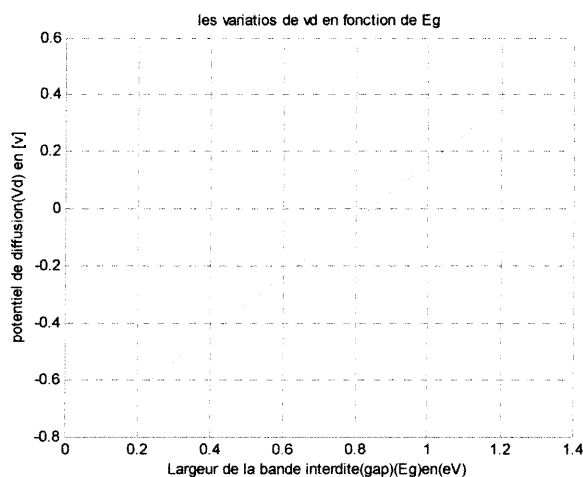


Figure.IV.9. La variation de Vd en fonction de la largeur de la bande interdite (Eg).

Les figures (IV. 8(a et b), 9) représentent respectivement, la variation du potentiel de diffusion en fonction de la concentration des atomes accepteurs et donneurs définies au chapitre III par l'équation (III.77). L'allure de ces courbes certifie ce qu'elle nous donne la théorie.

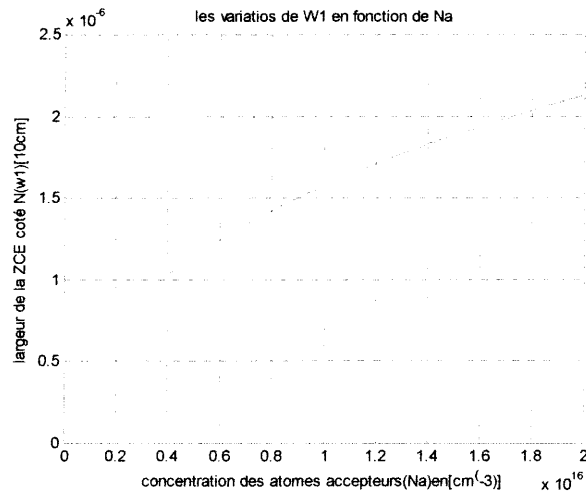


Figure. IV.10.a. La variation de l'épaisseur de W1 en fonction de Na.

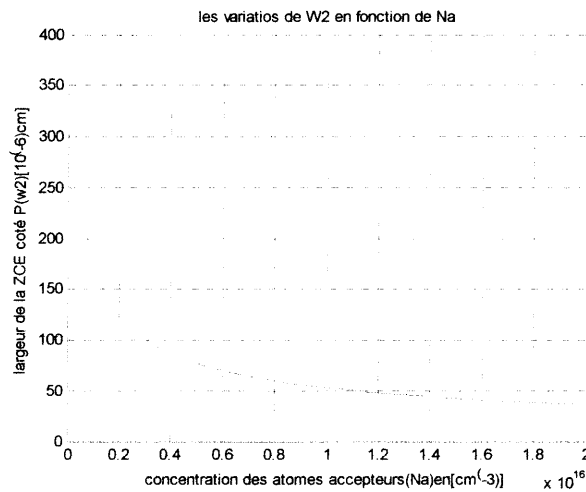
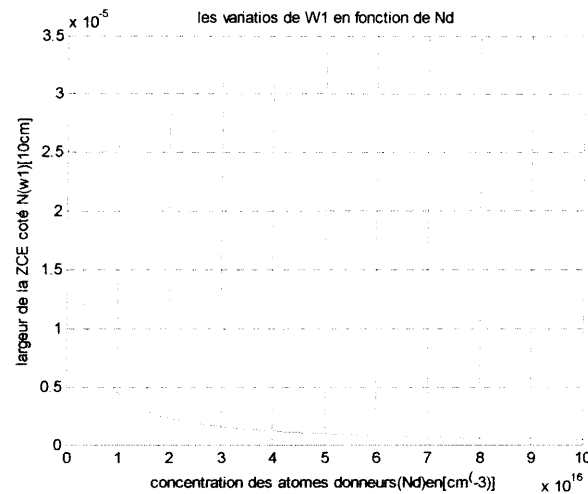
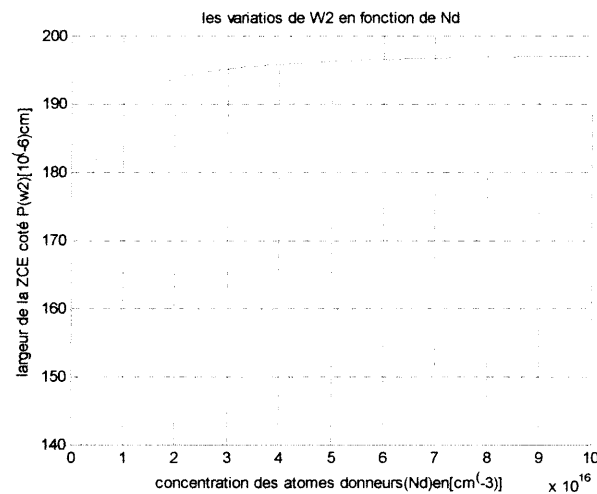


Figure. IV.10.b. La variation de l'épaisseur de W2 en fonction de Na.



**Figure. IV.11.a.** La variation de l'épaisseur de W1 en fonction de Nd.

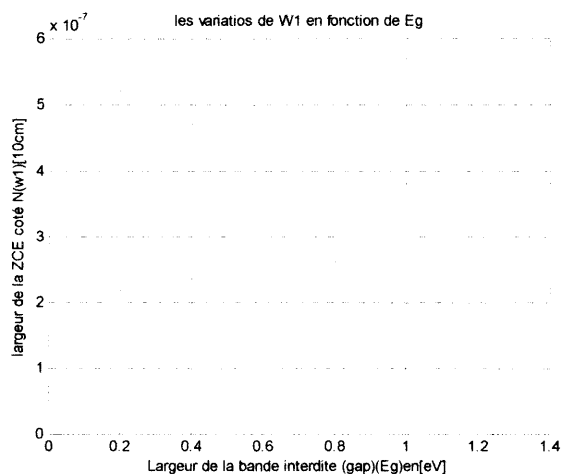


**Figure. IV.11.b.** La variation de l'épaisseur de W2 en fonction de Nd.

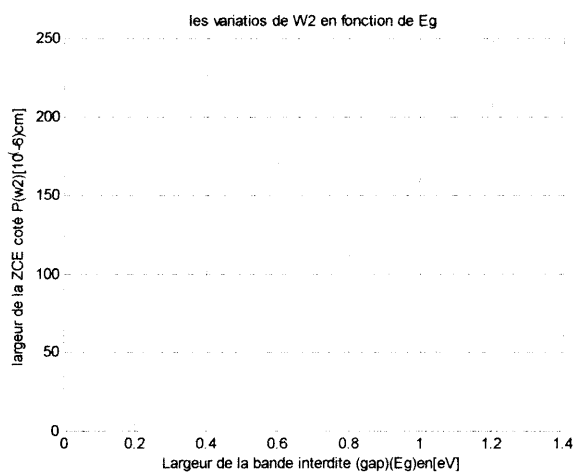
Les figures (VI. 10. a.....IV. 11.b) représentent les variations des épaisseurs des W1, W2 en fonction des concentrations Na et Nd des couches émetteur et base. On constate que la variation de W1 et W2 en fonction de Nd est plus rapide que celle en fonction de Na, cela est tout simplement expliquer par la valeur de Nd est plus grande que Na, donc l'allure de la courbe soit l'augmentation ou la diminution dépend de la valeur de cette concentration.

Ces figures montrent clairement que l'augmentation de l'épaisseur de W2 introduise une diminution notable de la concentration Na et augmentation de Nd, et comme nous avons prouvé dans des travaux précédents que l'épaisseur optimal de la couche CIGS ne dépasse pas  $2\mu\text{m}$ , car on a constaté que la majorité des photons sont

absorbées dans les premiers 1.5 $\mu$ m. De la même manière la couche de CdS soit faible pour ne pas empêcher les photons d'atteindre la base, donc la max de W1 ne dépasse pas 50 nm. La combinaison entre ces courbes permet d'accepter les valeurs de  $N_a=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_d=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  comme des valeurs optimales.



**Figure. IV.12.a.** La variation de l'épaisseur de W1 en fonction de Eg2.



**Figure. IV.12.b.** La variation de l'épaisseur de W2 en fonction de Eg2.

Les figures (IV. 12.a, IV. 12.b) représentent l'influence du gap optique de la base (CIGS) sur les épaisseurs W1, W2, cette variation du gap veut dire la variation de la concentration de Ga lors de la transition du CIS vers le CGS pour avoir une plage de variation du gap de 1.07 à 1.7ev .

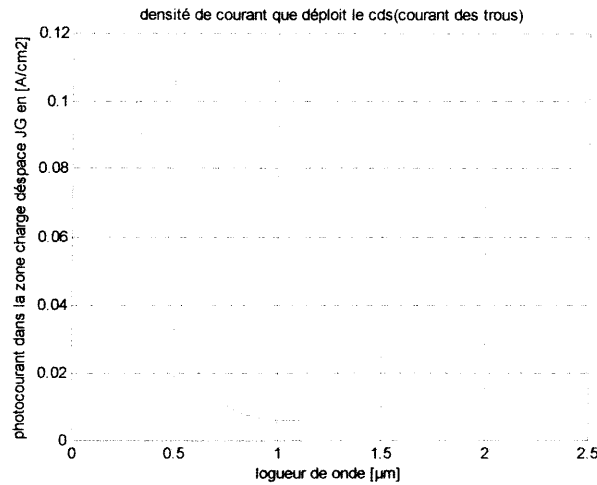


Figure. IV.15. La densité du courant de la ZCE en fonction de longueur d'onde.

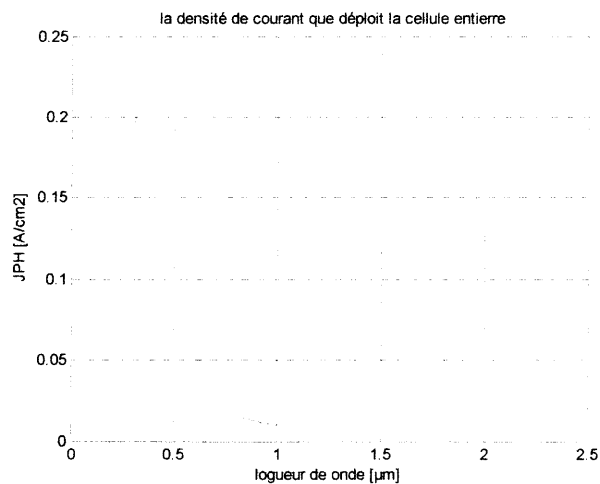


Figure. IV.16. La variation du photocourant total en fonction de longueur d'onde.

Sur les figure IV.(13....16) qui représentent la variation des différentes densités de courant en fonction de la longueur d'onde, on constate une augmentation des courants de la base et de la ZCE avec la diminution de la concentration des atomes accepteurs.

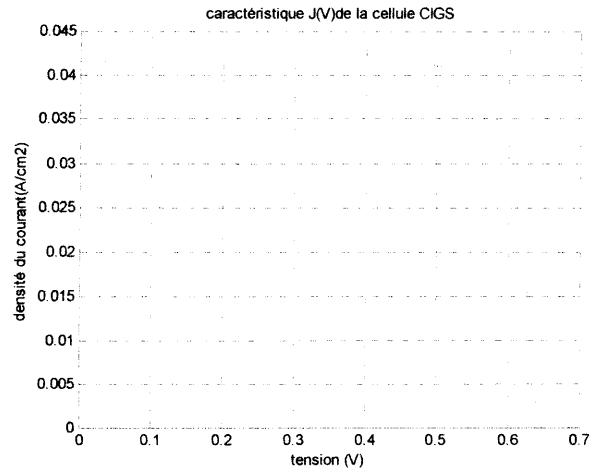


Figure. IV.17. La caractéristique I(V).

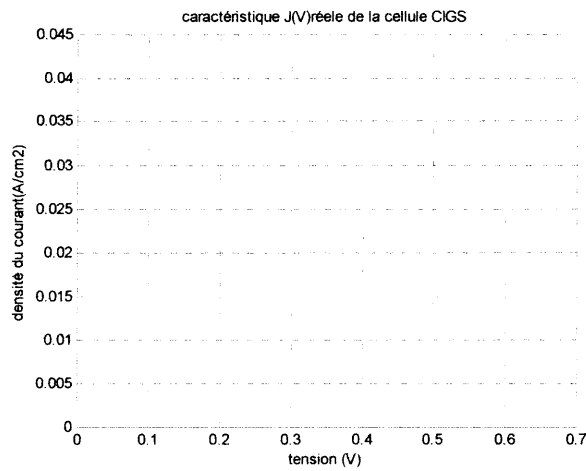


Figure.IV.18. La caractéristique de sortie (plus réelle) de la cellule CdS/CIGS I(V).

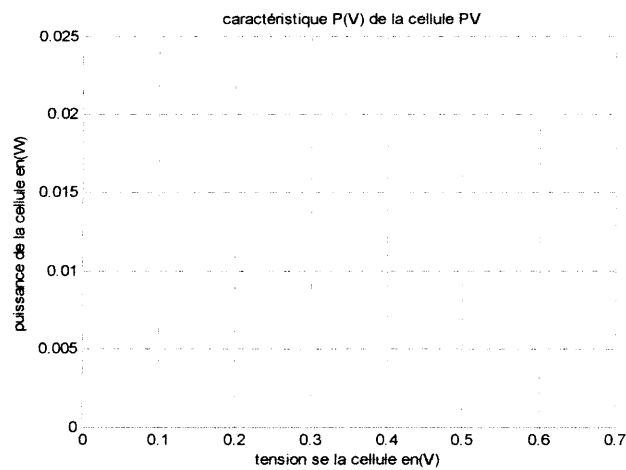


Figure.IV.19. La puissance de la cellule CdS/CIGS en fonction de la tension P(V).

Les figures (IV. 17...19) représentent la caractéristique I(V), ainsi que la caractéristique P(V), nous avons des bons résultats avec MPP (Maximum Power Point) arrive à 0.0165 W.

Pour le courant du court-circuit, la tension du circuit-ouvert, le rendement et le facteur de forme, le tableau (IV-2) résume ces résultats. Ces résultats sont comparés par des résultats expérimentaux de NREL(national renewable energy laboratory from the USA department of energy).

Pour le cas réelle ( $R_s=3, R_p=900$ )

Eg1 (CdS)	Eg2 (CIGS)	Jsc(mA/cm <sup>2</sup> )	Vco(V)	FF(%)	□(%)	MPP(W)	P(mW)
2.42	1.15	41.5	0.6413	77.2530	21.118	0.0165	781

**Tableau (IV.2).**Caractéristiques de sortie de notre simulation de la cellule PV a base du CIGS.

Dispositif Nom	Secteur (cm <sup>2</sup> )	Ç(%)	COV(système mv)	FF(%)	Jsc(mAcm <sup>2</sup> )	Fonctionnaire Measurement ?
M2992-11#5	0.419	19.9	690	81.2	35.4	Oui
C2183-12#5	0.416	19.9	697	80.0	35.7	Oui
C2219-21#7	0.417	19.8	714	79.1	35.1	Oui
M2992-11#4	0.419	19.7	690	81.2	35.1	Oui
M2992-11#6	0.419	19.7	690	81.1	35.3	Oui
C2183-12#4	0.417	19.7	695	80.0	35.5	Oui
C2200-22#1	0.420	19.6	725	80.6	33.6	Oui
C2213-22#2	0.994	19.2	716	80.4	33.4	Oui

**Tableau (IV.3)** Résultats des caractéristiques de sortie publier par NREL(National Renewable Energy Laboratory From The USA Department Of Energy).[59].

Nos résultats sont un peu différents de celles obtenus par NREL du fait que nous avons utilisé une équation d'éclairement adapté pour une densité de puissance incidente  $P_i=700 \text{ w/m}^2$  . De raison que cette valeur est la plus générale du point de vue héli-

géographique, alors qu'ils ont pris  $P_i=1000 \text{ w/m}^2$ . Notre cellule donne une meilleure rentabilité par un rendement de conversion très intéressant  $\eta=21.12\%$ . Pour la caractéristique  $P(V)$  nous avons obtenu un MPP (Maximum Power Point) qui a la valeur de  $0.0165 \text{ W}$ .

#### IV. 6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus par le biais de la simulation numérique de la cellule solaire à hétérojonction CdS/CIGS. En vu d'essayer d'optimiser leurs performances et d'extraire les caractéristiques de sortie de cette structure, avec la précaution que nous avons une hétérostructure.

Notre intérêt est de montrer l'influence des propriétés intrinsèques des matériaux de l'hétérostructure CdS/CIGS et leurs dopages sur les paramètres de l'hétérojonction, précisément la tension de diffusion, les épaisseurs de la zone de charge d'espace.

Le calcul de la tension de diffusion  $V_d$  et les épaisseurs de la zone de déplétion montre qu'ils sont dépendu des propriétés intrinsèques des matériaux et leurs dopages respectifs. On a pris l'influence de la variation du gap  $E_g$ , la concentration des accepteurs  $N_a$  et la concentration des donneurs  $N_d$  sur les épaisseurs de la zone de charge d'espace qui contrôlent les densités des courants dans toutes les régions et par conséquent, la détermination de la densité de courant totale qui est sensible au courant de la couche de CIGS mais le plus de la valeur du courant de la ZCE. Donc une optimisation de ces paramètres nous permet une amélioration du photocourant généré, ainsi une amélioration des performances de la cellule. Les principaux résultats obtenus montrent que :

- Dans la cellule; la plus forte densité du courant est déplier par la zone charge d'espace à cause du champ qui réside dans celle-ci, et par conséquent limite efficacement les différents types de recombinaisons, en revanche la région P contribue avec moins de densité du courant à cause de l'absence de ce champ mais plus que la couche N, et c'est la cause pour laquelle on a choisi le CIGS (le coefficient d'absorption, la longueur de diffusion,.....).
- Nos résultats montrent clairement que l'augmentation de l'épaisseur de  $W_2$  introduit une diminution notable de la concentration  $N_a$  et augmentation de  $N_d$ , et comme nous avons prouvé dans des travaux précédents que l'épaisseur optimal de la couche CIGS ne dépasse pas  $2\mu\text{m}$ , car on a constaté que la majorité



des photons sont absorbées dans les premiers  $1.5\mu\text{m}$ , donc cette variation des concentrations est conditionné par la valeur de  $W_2$  qui ne doit pas dépasser une limite précise.

- De la même manière la couche de CdS soit faible pour ne pas empêcher les photons d'atteindre la base, donc la max de  $W_1$  ne dépasse pas  $50\text{ nm}$ . Les résultats montrent que la diminution de  $W_1$  implique une augmentation de  $N_d$  et diminution de la concentration  $N_a$ . La combinaison entre ces résultats permet d'accepter les valeurs de  $N_a=10^{15}\text{ cm}^{-3}$ ,  $N_d=10^{17}\text{ cm}^{-3}$  comme des valeurs optimales.
- L'augmentation du gap  $E_{g2}$  du CIGS cause des variations importantes dans les caractéristiques de la cellule, d'une façon que cette augmentation diminue la densité du courant  $J_{sc}$  et augmente la tension  $V_{co}$ , mais le rapport entre ces deux changements engendre une augmentation du rendement jusqu'à un épaisseur de  $1.5\mu\text{m}$ . Pour notre structure, dès que  $W_2$  ne dépasse pas  $2\mu\text{m}$  et  $W_1$  le plus petite la valeur de  $E_{g2}=1.15\text{ eV}$ .

# CONCLUSION

### *Conclusion générale*

Nous sommes intéressés lors de ce travail à la simulation numérique des caractéristiques de la cellule solaire à hétérojonction CdS/CIGS. En vue d'optimiser leurs performances et d'extraire les caractéristiques de sortie de cette structure, L'absorbeur CIGS est basé sur le CIS qui est un semi-conducteur ternaire caractérisé par un coefficient d'absorption trop élevé, cependant l'incorporation du Ga pour avoir le CIGS dont le but est d'avoir une protection contre le court-circuit ainsi qu'une augmentation de la tension circuit-ouvert. Le dopage de ce type de semi-conducteur est due aux défauts intrinsèques : la lacune de cuivre est en général l'accepteur dominant pour le matériau de type p, alors que la lacune de sélénium est considérée comme le donneur dominant du matériau de type n.

Pour cette structure le ZnO joue le rôle d'une fenêtre optique car il a une très bonne transmissivité dans le domaine de longueur d'onde utilisé par le CIGS et le CdS qui a une transmissivité et une résistivité qui dépendent sensiblement par son épaisseur. C'est pour cela que les constructeurs utilisent une couche très fine de celui-ci mesuré de 50nm.

On a entamé cette étude par présenter le modèle mathématique qui régissent les paramètres de la cellule photovoltaïque comme le courant de saturation, la largeur de la ZCE et  $V_d$ , ces équations modélisent aussi la densité du photo-courant qui sort de chacune des trois parties de la cellule (l'émetteur CdS, la base CIGS et la ZCE) et qui est obtenus suite à la résolution des équations de continuité et des courants.

Le calcul de ce photo-courant va nous permettre de déterminer les caractéristiques électriques de sortie de la cellule photovoltaïque qu'elle est caractérisée essentiellement par sa tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , son courant court-circuit  $I_{sc}$  et Son facteur de forme. On a étudié en premier lieux le comportement des cellules solaires à base du CIGS en fonction de la longueur d'onde des photons incidents sur la cellule photovoltaïque avec une puissance de  $700W/m^2$  puis l'optimisation des différents paramètres de la cellule, avec la précaution que nous avons une hétérostructure.

Notre intérêt et de montrer l'influence des propriétés intrinsèques des matériaux de l'hétérostructure CdS/CIGS et leurs dopages sur les paramètres de l'hétérojonction, précisément la tension de diffusion, les épaisseurs de la zone de charge d'espace.

En effet nous avons développé l'expression de  $V_d$  à partir de diagramme de bande de l'hétérojonction. Le calcul de la tension de diffusion  $V_d$  et les épaisseurs de la zone de déplétion montre qu'ils sont dépend des propriétés intrinsèques des matériaux et leurs dopages respectifs. On a pris l'influence de la variation du gap  $E_{g2}$ , la concentration des

## Conclusion générale

atomes accepteurs Na et la concentration des atomes donneurs Nd sur les épaisseurs de la zone de charge d'espace qui contrôlent les densités des courants dans toutes les régions et par conséquent, la détermination de la densité de courant totale qui est sensible au courant de la couche de CIGS mais le plus de la valeur du courant de la ZCE. Donc une optimisation de ces paramètres nous permet une amélioration du photocourant généré, ainsi une amélioration des performances de la cellule. Les principaux résultats obtenus montrent que :

- Dans la cellule; la plus forte densité du courant est déplié par la zone charge d'espace à cause du champ qui réside dans celle-ci, et par conséquent limite efficacement les différents types de recombinaisons, en revanche la région P contribue avec moins de densité du courant à cause de l'absence de ce champ mais plus que la couche N, et c'est la cause pour laquelle on a choisi le CIGS (le coefficient d'absorption, la longueur de diffusion,.....).
- Nos résultats montrent clairement que l'augmentation de l'épaisseur de W2 introduise une diminution de la concentration Na et augmentation notable de Nd, et comme nous avons prouvé dans des travaux précédents que l'épaisseur optimale de la couche CIGS ne dépasse pas 2µm, car on a constaté que la majorité des photons sont absorbés dans les premiers 1.5µm, donc cette variation des concentrations est conditionnée par la valeur de W2 qui ne doit pas dépasser une limite précise.
- De la même manière la couche de CdS soit faible pour ne pas empêcher les photons d'atteindre la base, donc la max de W1 ne dépasse pas 50 nm. Les résultats montrent que la diminution de W1 implique une augmentation de Nd et diminution de la concentration Na. La combinaison entre ces résultats permet d'accepter les valeurs de  $Na=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $Nd=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  comme des valeurs optimales.
- L'augmentation du gap  $Eg_2$  du CIGS cause des variations importantes dans les caractéristiques de la cellule, d'une façon que cette augmentation diminue la densité du courant  $J_{sc}$  et augmente la tension  $V_{oc}$ , mais le rapport entre ces deux changements engendre une augmentation du rendement jusqu'à une épaisseur de 1.5µm. Pour notre structure, dès que W2 ne dépasse pas 2µm et W1 soit le plus petit, la valeur de  $Eg_2=1.15 \text{ eV}$ .
- Notre cellule donne une meilleure rentabilité par un rendement de conversion très intéressant  $\eta=21.12\%$ . Pour la caractéristique P(V) nous avons obtenu un MPP (Maximum Power Point) qui a la valeur de 0.0165 W.

*Bibliographies*

- [1] O. K. Andersen, Phys. Rev. B12, 3060 (1975).
- [2] M Saad Saoud(1), H Abbassi(1), M kermiche(1) and M Ouada, Modélisation D'un Système Photovoltaïque Autonome ; The INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS & OIL: FROM THEORY TO APPLICATIONS March 05-06, Ouargla, Algeria 2013.
- [3] Souici Fatma-Zohra, Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe<sub>2</sub>) ; Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2009.
- [4] BOUAFIA MOUNIR DEBLAOUI LAID, Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium « CIGS », Université Kasdi Merbah Ouargla, 2011/2012.
- [5] Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E., «Applied Photovoltaic», Bridge Printer, Sidney, (1994).
- [6] H. Mathieu. «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», Dunod, Paris, 2009
- [7] S. M. Sze, Physics of semiconductor Devices, second edition, Copyright. C.1981 by John, Wiley and Son, Inc.
- [8] Ed. Becquerel, C.R. Acad. Sci., 9 (1839) 561.
- [9] Chapin D.M, Fuller C.S.and Pearson G.L., «A new silicon pn junction photocell for converting solar radiation into», Electrical power J.Appl; phys, vol, 25, pp.676-677, 677, (1954).
- [10] A. Luque, Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)-2012
- [11] S. Wagner, J.L. Shay, P. Migliorato, H.M. Kasper, CuInSe<sub>2</sub>/CdS heterojunction photovoltaic detectors, Appl. Phys. Lett. 25 (1974) 434.
- [12] B. Equer, [Energie solaire photovoltaïque], Vol.1, (1993). Ellipses
- [13] AOULED ALI Mohammed ; Propriétés Optoélectroniques Du Semi-conducteur Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> Appliquée Aux Cellules Photovoltaïques ; Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran ,2010/2011.
- [14] Ariswan, « Fabrications et étude de composés quaternaires Cu(In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>)Se<sub>2</sub> et Cu(In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>)<sub>3</sub>Se<sub>5</sub> polycristallins et en couches minces obtenues par EVAPORATION-

## Bibliographies

---

FLASH pour des applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Science et techniques du Languedoc, Université de Montpellier II, 2002.

[15] : M. Contreras, B. Egaas, K. Ramanathan,, Prog. Photov. 7 (1999) 311 .

A. Jasenek, U. Rau, V. Nadenau, D. Thiess, H. W. Schock,, Thin Solid Films 361-362 (2000) 415.

[16] : M.Archer, R.Hill « Clean electricity from photovoltaics », Series on photoconversion of solar energy –Vol.1, Imperial College Press.

[17]MOSTEFA KARA Selma ; ETUDE ET SIMULATION DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A COUCHES MINCES A BASE DE CIS et CIGS ; Université Abou-BakrBlekaid Tlemcen Juin2012.

[18]Nahel Romain,Caracterisations de couches minces de  $\text{CuGaSe}_2$  Obtenues Par MOCVD ,le 16 decembre 1999.

[19]Mohamed Benaicha ;Elaboration De Couche Minces Ternaires Parvoie Electrochimique. Caractérisation Physico Chimique Et Electrique ;2010.

[20]Amari Yahya,Etudes Des Caractéristiques De La Cellule Solaire à Base Du CIGS ;2013.

[21]H. Ben Slimane Et A. Helmaoui, Etude Analytique D'une Cellule Solaire à Hétérojonction  $p^+$  (GaAs)/ $n$  ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ )/ $N$  ( $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ) ;le 30 Juin 2008.

[22]Abdelkader OUTZOURHIT, Cellules Solaires: Principes, Technologies Et Matériaux ; Ecole ECOMAT, Bouznika.

[23] : S.Duchemin, N. Romain, « Caractérisations de couches minces de  $\text{CuGaSe}_2$  obtenues par MOCVD », Thèse de doctorat, Science et techniques du Languedoc, Université de Montpellier II, 1999.

[24]Christophe BALLIF Ingénieur Physicien Diplômé EPF Originaire De Lucens (VD),, Propriétés Electriques Et Optique De Couches Minces De  $\text{WS}_2$  et  $\text{MoS}_2$  En Vue D'applications Photovoltaïques ;1998.

[25] Th. Finteis, M. Hengsberger, Th. Straub, K. Fauth, R. Claessen, P. Auer, P. Steiner, S. Hüfner, P. Blaha, M. Vögt, M. Lux-Steiner, and E. Bucher, Phys. Rev. B **55**, 10400 (1997).

## **Bibliographies**

---

- [26] M. Traving, M. Boehme, L. Kipp, M. Skibowski, F. Starrost, E.E. Krasovskii, A. Perlow, and W. Schattke, Phys. Rev. B **55**, 10392 (1997).
- [27] Sourisseau C., M. Fouassier, M. Alba, A. Ghorayeb, and O. Gorochov Mat. Sc. Eng. **B3**, 119 (1989).
- [28] Sourisseau C., F. Cruege and M. Fouassier and M. Alba, Chem. Phys. **150**, 281 (1991).
- [29] R. Fivaz and Ph. E. Schmid, pp. 344-384 de réf. [21].
- [30] V. Augelli, C. Manfredotti, R. Murri, A. Rizzo, and Vasanelli L. Il nuovo cimento **47B**, 101 (1978).
- [31] W. Kautek., J. Phys. C. **30**, 519(1982).
- [32] M.K. Argawal, P. Patel, and O. Vijayan, Phys. Stat. Sol A **79**, 103 (1983).
- [33] J. Baglio, E. Kamieniecki, N. De Cola, C. Struck, J. Marzik, K. Dwight, and A. Wold, J. Solid State Chem. **49**, 166, (1983)
- [34] Ch. Sommerhalter *Photovoltaische Eigenschaften von nanostrukturierten Schichtgitterhalbleitern* Diploma Arbeit, Universität Konstanz, Deutschland (1996).
- [35] Ch. Sommerhalter, Th. W. Matthes, J. Boneberg, M. Ch. Lux-Steiner, and P. Leiderer, J. Vac. Sci. Technol. B **15**, 1876 (1997).
- [36] Harmoun-Amine ;Chapitre2.Organisé Par l'Institut Matériaux Microélectronique Et Nanosciences De Provence, L I V R E D E S R E S U M E S ;11-13Octobre2010.
- [37] Abdelhak Maoucha ;Etude Et Identification Paramétrique D'une Cellule Photovoltaïqu Organique ;  
**Ingénieur. département d'Electronique -Université de Batna**  
2011.
- [38] Tp Caractérisation Electronique Photovoltaïque De Cellules Solaires(Mémoire).
- [39] Bouchekouf Seloua, ;Modélisation Numérique Des OPVC Dans Les Systèmes ENR
- [40] Swis Photovoltaïque Solaire \_2007\_fr.
- [41] \_Analyse de projets d'installation photovoltaïques\_, RETScreen International.
- [42] Melle DJERIOUAT Khadidja ; Optimisation Du Rendement Des Cellules Photovoltaïques à Hétérojonctions :GaInP/GaAs ;2010-2011.
- [43] LEKIKET HICHEM ; Elaboration Et Caractérisation Des Hétérojonctions à Base De Couches Minces De ZnO et ZnS ;2008.

## **Bibliographies**

---

[44] Nichiporuk Oleksiy ;Simulation ,Fabrication Et Analyse De Cellules Photovoltaïques à Contacts Arrières Interdigités ;2005.

[45]MA@moire ;www.wikipedia.org.

[46]Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, Applied Photovoltaic, Bridge Printer, Sidney (1994).

[47] S. Fidrikhove, S. Movnine, "Bases physique de la Technique électronique", Edition Mir- Mosco (1983).

[48] B. Sapoval, C. Hermann, "Physique des Semi-conducteur", Edition Ellipses (1980).

[49] N. Kesri et V.Gamourar, "La physique des semi-conducteur", 2ième Edition, OPU, (1986).

[50] Y. Yan, Apple. Phys. Lett, 71 (3) 407, (1997).

[51]A.Marty J.P.Bailbe et G. Rey ;Modèle analytique compact d'une hétérojonction isotype GaAlAs/GaAs ;25/01/1982.

[52] Solar Powerbox, 2003 : action PV Ecoles professionnelles et Swissolar. Commande : mail@tnc.ch.

•[53] Classeur Solar : RUES, Recommandations pour l'utilisation de l'énergie solaire. Editeur : Swissolar. Commande : suisse-romande@swissolar.ch.

[54]S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt et R. Corkish, \_Applied photovoltaics\_, Édition \_Earthscan\_, 2007.

[55] Y. Jannot, \_Thermique solaire\_, 2007.

[56] Clef CEA n°50/51.

[57] www.bati-depot.fr/photovoltaïque/de\_nition/photovoltaïque-782.html

[58] Z. Bouzid, \_Etude des cellules solaires PV organiques : con\_guration polymère conjugué-fullerène C60 et cellules Graetzel\_, Mémoire de Licence L3, Université de Tlemcen, 2010.

[59]characterization of 19.9%-Efficient CIGS Absorbers Conference Paper NREL/CP-520-42539 May 2008.