

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**



Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbés  
Faculté de technologie



# MÉMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

## MAGISTER EN ELECTRONIQUE

Option: Microélectronique

Par

**M<sup>R</sup> BOUANANI BOUALEM**

Sur le thème:

**Étude Technologique et Electrique Des Cellules  
Solaires en Couches Minces à Hétérojonctions  
ZnO/CdS/CIGS  
Utilisant le logiciel Atlas de Silvaco**

Soutenu le :....05/05/2015....., devant le jury:

Présidente :	M <sup>me</sup> Benamara Zineb	Pr	U.D.L (S.B.A)
Encadreur :	M <sup>r</sup> Joti abdelaziz :	MCA	U.D.L (S.B.A)
Examineurs :	M <sup>r</sup> Mansour-Mazari Halima	Pr	U.D.L (S.B.A)
	M <sup>me</sup> Bachir Bouiadjra Fatma Seghira	MCA	U.D.L (S.B.A)
	M <sup>r</sup> Mansouri Seddik :	MCA	U.D.L (S.B.A)

**ANNÉE UNIVERSITAIRE: 2014 -2015**

## REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie DIEU qui m'a aidé à réaliser ce travail.

Je remercie mon encadreur Monsieur JOTI ABDELAZIZ, Maître de conférences à l'université Djilali Laibas Sidi Bel Abbes, pour m'avoir suivi durant mon travail dans le cadre de ce mémoire, pour ses conseils précieux et la compétence de son encadrement.

Je remercie Mme BENAMARA ZINEB, Professeur à l'université Djilali Laibas Sidi Bel Abbes, pour avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie également, Mme MANSOUR HALIMA, Professeur à l'université Djilali Laibas Sidi Bel Abbes, pour avoir accepté de juger ce travail. Mes remerciements vont aussi à Mme BACHIR BOUADJRA FATMA SEGHIRA et Mr MANSOURI SEDDIK , Maîtres de conférences à l'université Djilali Laibas Sidi Bel Abbes, pour avoir accepté de participer au jury de ce mémoire.

Je remercie aussi, mes amies : B.Asmaa, B.Amina, B.Brahim, B.Chawki, Ahmed, Hamouda, aicha et Hichem, sans oublier Fatouh.



# DÉDICACES

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes parents, Pour leur amour qui m'a porté tout au*

*Long de ces années.*

*A mes frères et sœurs,*

*A mes tantes*

*A Ma très grande famille,*

*A tous mes amis .*

**Bouanani Boualem**



---

## RÉSUMÉ

Le marché mondial des cellules solaires conventionnel au Silicium demeure dominant par rapport à d'autres types de semi-conducteurs. En revanche, le coût de production des cellules solaires en couches minces se réduit de plus en plus, grâce aux progrès technologiques réalisés ces dernières années et les recherches menées dans ce domaine. De ce fait, plusieurs filiales ont été réactivées, en particulier les semi-conducteurs dits à structures chalcopyrite, grâce à leurs propriétés électriques intéressantes pour des applications photovoltaïques.

Ce travail est l'étude et la conception de cellules solaires à hétérojonctions en couches minces. La couche absorbante est un matériau chalcopyrite du type  $(Cu(In,Ga)Se_2)$  noté CIGS sur laquelle on dépose du  $CdS$  qui est un semiconducteur à large gap (fenêtre) et le  $ZnO$  est une couche transparente qui constitue le contact avant de la structure.

Après l'étude théorique du fonctionnement des cellules solaires à hétérojonctions, on doit survoler l'état de l'art de la technologie de fabrication et les différentes techniques de réalisation de telles structures, les processus de fabrication, le choix d'une technologie par rapport à l'autre ainsi que les techniques de dépôts.

Au moyen d'une modélisation technologique ainsi qu'une simulation électrique adéquate (Athena et Atlas) de Silvaco, l'étudiant doit maîtriser tous les modèles de calcul mis en jeu dans les dispositifs à semi-conducteurs, en particulier dans les hétérojonctions.

Ensuite, on doit ajuster tous les paramètres physiques afin d'optimiser les paramètres électriques du dispositif ainsi étudié, tels que le photo-courant, la tension en circuit ouvert et éventuellement le rendement photovoltaïque.

**Mots clés :** Cellule solaire, couche mince, chalcopyrite, hétérojonction, simulation, ATLAS<sup>Silvaco</sup>.

# SOMMAIRE

Remerciements.....	
Dédicaces.....	
Résumé.....	
Sommaire.....	
Liste des symboles .....	
Liste de figure.....	

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>01</b>
------------------------------	-----------

## CHAPITRE I

### **LE RAYONNEMENT SOLAIRE**

I. Introduction.....	04
II. Le Soleil.....	04
II.1. L'énergie solaire.....	05
II.1.1.Le solaire thermique.....	05
II.1.2.Le solaire photovoltaïque.....	06
II.2. Paramètres astronomiques du système soleil-terre.....	07
II.2.1. Distance terre – soleil.....	07
II.2.2. Déclinaison solaire.....	08
II.2.3. La hauteur du soleil et son azimut.....	09
III. Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	11
III.1. La masse d'air.....	12
III.2. le gisement solaire.....	14
IV. La propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère.....	15
IV.1. L'atmosphère : sa structure et sa composition.....	15
V. Le rayonnement solaire intercepté par la Terre.....	17
VI. Conclusion.....	19
Références bibliographiques.....	20

**CHAPITRE.II**

**PRINCIPE ET GENERALITES SUR LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE**

I. Introduction.....	23
II. La conversion photovoltaïque.....	23
II.1. La jonction PN: base du dispositif photovoltaïque.....	23
II.1.1. L'homo-jonction.....	25
II.1.2. L'hétérojonction .....	27
II.2. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	32
II.3. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....	33
II.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	36
II.4.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque idéale.....	36
II.4.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque réelle.....	37
II.5. Les paramètres physiques d'une cellule solaire.....	38
II.5.1. Courant de court-circuit, $I_{cc}$ .....	38
II.5.2. Tension à circuit ouvert, $V_{co}$ .....	39
II.5.3. Facteur de forme, FF.....	39
II.5.4. La puissance maximale $P_{max}$ .....	39
II.5.5. La réponse spectrale.....	40
II.5.6. Le rendement quantique.....	40
II.5.7. Le rendement électrique.....	41
III. Les pertes limitant le rendement de conversion photovoltaïque.....	42
III.1. Limites intrinsèques.....	42
III.1.1. Absorption partielle.....	42
III.1.2. Recombinaisons intrinsèques (radiatives et Auger) .....	42
III.2. Limites technologiques.....	43
III.2.1. Pertes optiques et résistives.....	43
III.2.2. La recombinaison surfacique.....	43
III.2.3. Recombinaison volumique .....	44
IV. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque.....	45
IV.1. Contacts face avant et arrière.....	46
IV.2. La couche absorbante .....	46
IV.3. La couche tampon.....	46

---

IV.4. Passivation des faces avant et arrière .....	47
IV.5. La couche antireflet.....	47
IV.6. La texturation de surface.....	48
IV.7. Le champ électrique BSF.....	48
V. Conclusion.....	49
Références bibliographiques.....	50

**CHAPITRE III**

**ÉTAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES FILIÈRES DU PHOTOVOLTAÏQUE**

I. Introduction.....	53
II. Histoire de l'énergie photovoltaïque.....	53
III. Les différentes filières photovoltaïques.....	55
III.1. La première génération.....	55
III.2. La deuxième génération.....	59
III.2.1. La filière du silicium amorphe (a-Si).....	59
III.2.2. La filière tellure de cadmium (CdTe).....	62
III.2.3. La filière chalcopyrite basée sur le Cu-III-VI.....	64
III.3. La troisième génération.....	67
III.3.1. Cellules organiques et plastiques.....	67
III.3.2. Les cellules CZTS.....	68
III.3.3. Les cellules multi-jonctions.....	69
III.3.4. Les cellules solaires à boîtes quantiques.....	70
IV. Conclusion.....	71
Références bibliographiques.....	72

**CHAPITRE.IV**

**ÉTUDE ET TECHNIQUES DE FABRICATION DE LA CELLULE SOLAIRE**

***CdS/CIGS***

I. Introduction.....	75
II. Présentation des matériaux chalcopyrites CIS et CIGS.....	75
II.1. La structure cristalline.....	76
II.2. Diagramme de phase de $\text{CuInSe}_2$ .....	78
II.3. La bande interdite.....	80
II.4. Dopage.....	82
II.5. Coefficient d'absorption.....	84
III. Structure d'une cellule photovoltaïque à couche mince à base CIGS.....	85
III.1. Les différentes composantes de la cellule photovoltaïque.....	86
III.1.1. Le substrat.....	86
III.1.2. Un Contact arrière.....	86
III.1.3. La couche absorbante.....	87
III.1.4. Une Couche tampon.....	87
III.1.5. La couche fenêtre (OTC).....	88
III.1.6. Un contact ohmique supérieur (grille métallique) Ni-Al.....	89
IV. Méthodes de dépôt.....	89
IV.1. Procédés de fabrication conventionnels.....	90
IV.1.1. Co-évaporation.....	90
IV.1.2. La pulvérisation cathodique.....	93
IV.2. Procédés de fabrication à bas coût.....	95
IV.2.1. Electrodeposition.....	95
IV.2.2. Spray-Pyrolyse.....	97
IV.3. Bilan sur les principales méthodes.....	98
V. Conclusion.....	99
Références bibliographiques.....	100

**CHAPITRE.V**

**SIMULATION ELECTRIQUE DES CELLULES SOLAIRES A BASE DE CIGS**

I. Introduction.....	103
II. Présentation du logiciel de simulation.....	103
II.1. Les outils interactifs.....	104
II.2. Les outils de simulation.....	106
II.2.1. Atlas.....	106
II.2.1.1. Entrées et sorties de simulateur Atlas.....	106
II.2.1.2. La structure d'un programme Atlas.....	107
II.3. Principe de fonctionnement d'un simulateur.....	110
III. Résultats de la simulation et interprétations.....	113
III.1. Présentation de la structure d'étude.....	113
III.2. Les paramètres de sortie de la cellule étudiée.....	114
III.2.1. Diagramme des bandes d'énergie.....	115
III.2.2. Caractéristiques Courant-Tension.....	115
III.2.3. Réponse spectrale.....	117
III.2.4. Rendement Quantique.....	118
III.3. L'optimisation des paramètres de sortie de notre cellule étudiée.....	119
III.3.1. Effet de couches CdS sur le rendement de la cellule.....	119
III.3.2. Effet de couches CIGS sur le rendement de la cellule.....	125
III.3.3. Effet Du Gap de la couche CIGS sur le rendement de la cellule.....	132
IV. Conclusion.....	135
Références bibliographiques.....	137
Conclusion générale.....	139

LISTE DES SYMBOLES

$d$	Jour de l'année
$\theta_j$	Angle journalier
$r$	Distance terre-soleil
$r_0$	Distance en moyenne annuelle
$\epsilon$	Correction relative
$\delta$	Déclinaison solaire
$J$	Numéro du jour de l'année
$a$	Angle azimut solaire
$h$	Angle de l'altitude solaire
$\theta_z$	Angle zénithal
$TSV$	Temps solaire vrai
$T_{st}$	Temps standard ou officiel
$L$	Longitude du lieu
$L_{St}$	Longitude méridienne standard
$FH_{LOC}$	Fuseau horaire du lieu considère.
$w$	Angle horaire
$\lambda$	Latitude locale.
$AM$	Air masse
$ZCE$	Zone de charge d'espace
$V_d$	Tension de diffusion
$V_n$	Potentiel dans la région N
$V_p$	Potentiel dans la région P
$K$	Constante de Boltzmann ( $k = 1.38.10^{-23}j.k^{-1}$ )
$T$	Température
$q$	Charge élémentaire ( $q= 1.6.10^{-19} c$ )
$N_a$	Concentration des accepteurs
$N_d$	Concentration des donneurs
$n_i$	Concentration intrinsèque
$\vec{E}$	Champ électrique
$\rho$	Densité de charge
$\epsilon$	Constant diélectrique
$w$	Epaisseur de la zone de charge d'espace
$q\chi$	Affinité électronique
$E_g$	Bande interdite
$q\phi$	Travail de sortie du semi-conducteur
$E_c$	Bande de conduction
$E_v$	Bande de valence
$h$	Constante de Planck
$I_{ph}$	Photo-courant résultant
$I_{obsc}$	Courant d'obscurité

---

$I_s$	Courant de saturation de la diode
$n$	Facteur d'idéalité
$R_s$	Resistance série
$R_{sh}$	Resistance parallèle (shunt)
$I_{cc}$	Courant de court-circuit,
$V_{co}$	Tension a circuit ouvert,
$FF$	Facteur de forme,
$P_{max}$	Puissance maximale
$RS$	Réponse spectrale
$J_{cc}$	Densité de courant de court-circuit
$P_{in}$	Puissance incidente
$RQE$	Rendement quantique externe
$c$	Célérité de la lumière dans le vide
$\lambda$	Longueur d'onde monochromatique
$RQI$	Rendement quantique interne
$R(\lambda)$	Réfectivité de la cellule
$T(\lambda)$	Rayonnement transmis a travers la cellule
$A(\lambda)$	Absorption dans les couches non actives
$\eta$	Rendement électrique
$\Delta V$	Laplacien du potentiel
$G$	Taux de génération
$U$	Taux de recombinaison
$n; p$	Densités des porteurs libres.
$\vec{J}_n$	Densités de courant des électrons
$\vec{J}_p$	Densités de courant des trous
$D_n; D_p$	Coefficients de diffusion

## LISTE DES FIGURES

- Fig. I.1.** Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique
- Fig. I.2.** Mouvements de rotation de la Terre
- Fig. I.3.** Variation annuelle de la déclinaison du soleil
- Fig. I.4.** Repère horizontal
- Fig. I.5.** Radiation spectrale pour différents air masse
- Fig. I.6.** Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5
- Fig. I.7.** Profil vertical de température dans l'atmosphère
- Fig. I.8.** Rayonnement solaire transmis à la terre
- Fig. I.9.** Présentation de l'absorption du rayonnement solaire
- Fig. II.1.** Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque
- Fig. II.2.** Schéma de principe d'une jonction PN à l'équilibre
- Fig. II.3.** Champ électrique de l'homo-jonction abrupte
- Fig. II.4.** Diagramme énergétique dans chacun des semi-conducteurs.
- Fig. II.5.** Diagramme énergétique loin de l'interface.
- Fig. II.6.** Diagramme énergétique d'hétérojonction PN
- Fig. II.7.** (a) Champ et (b) Potentiel électrique à l'interface d'une hétérojonction PN
- Fig. II.8.** (a) Structure et (b) Diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.
- Fig. II.9.** Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.
- Fig. II.10.** Caractéristique courant tension d'une cellule solaire éclairée
- Fig. II.11.** Les différentes zones de la caractéristique I (V)
- Fig. II.12.** Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale
- Fig. II.13.** Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle
- Fig. II.14.** Mécanisme de recombinaison en surface
- Fig. II.15.** Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH)
- Fig. II.16.** Représentation simplifié d'une cellule photovoltaïque standard
- Fig. II.17.** Couche antireflet
- Fig. II.18.** Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée.
- Fig. II.19.** Le principe du champ électrique BSF
- Fig. III.1.** Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en Silicium
- Fig. III.2.** Structure de base d'une cellule à base de silicium cristallin
- Fig. III.3.** (a) Photos de cellules monocristalline (b) multi-cristalline

- Fig. III.4.** Structure de base d'une cellule à base de silicium amorphe
- Fig. III.5.** Structure de base d'une cellule à base de Tellure de Cadmium
- Fig. III.6.** Structure de base d'une cellule à base de CIGS
- Fig. III.7.** Cellule solaire tout organique sur substrat souple
- Fig. III.8.** Structure de base d'une cellule à base de CZTS
- Fig. III.9.** Principe de la cellule à hétérojonction
- Fig. IV.1.** Structure cristalline du semi-conducteur  $\text{CuInSe}_2$
- Fig. IV.2.** Structure cristalline du semi-conducteur  $\text{CuInSe}_2$  (Structure chalcopyrite)
- Fig. IV.3.** Diagramme de phase pseudo-binaire de  $\text{Cu}_2\text{Se-In}_2\text{Se}_3$
- Fig. IV.4.** La structure d'une paire spéciale de défaut
- Fig. IV.5.** Principaux types de gradients de bande interdite dans les couches de CIGS
- Fig. IV.6.** Coefficient d'absorption des matériaux
- Fig. IV.7.** Schéma de l'empilement typique des cellules solaires à base de CIGS
- Fig. IV.8.** Processus de dépôt de couches minces
- Fig. IV.9.** Schéma d'un procédé de Co-évaporation pour la synthèse de couches minces de CIGS à partir de sources élémentaires Cu, In, Ga et Se
- Fig. IV.10.** Flux de métaux et profil de température de substrat utilisés dans un procédé en trois étapes de synthèse du CIGS par Co-évaporation
- Fig. IV.11.** Représentation schématique du système de pulvérisation cathodique
- Fig. IV.12.** Schéma synoptique de la cellule électrolytique utilisée pour le dépôt des couches minces par l'électrodéposition
- Fig. IV.13.** Schéma d'un équipement de dépôt par spray pyrolyse
- Fig. V.1.** Organigramme de la structure VWF
- Fig. V.2.** Fenêtre principale de DeckBuild
- Fig. V.3.** exemple d'une courbe IV présentée dans la Fenêtre principale de Tonyplot
- Fig. V.4.** Entrées et sorties d'Atlas
- Fig. V.5.** Structure d'étude à 2D construite par simulation Atlas  $\text{ZnO/CdS/CIGS/Mo}$
- Fig. V.6.** Diagramme des bandes d'énergie: (a) à obscurité (b) sous illumination de notre cellule solaire à base de CIGS
- Fig. V.7.** Caractéristique I-V de notre cellule solaire à base de CIGS
- Fig. V.8.** La distribution spectrale de notre structure simulée
- Fig. V.9.** Caractéristique I-V de notre cellule solaire à base de CIGS

**Fig. V.10.** L'effet de l'épaisseur de la couche CdS sur le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$

**Fig. V.11.** L'effet de l'épaisseur de la couche CdS sur Rendement

**Fig. V.12.** L'effet de dopage de la couche CdS sur le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$

**Fig. V.13.** L'effet de dopage de la couche CdS sur le rendement

**Fig. V.14.** L'effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$

**Fig. V.15.** L'effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur Rendement

**Fig. V.16.** L'effet de dopage de la couche CIGS sur le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$

**Fig. V.17.** L'effet de dopage de la couche CIGS sur le rendement

**Fig. V.18.** L'effet de Gap de CIGS sur le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$

**Fig. V.19.** L'effet de Gap de CIGS sur le rendement

**Fig. V.20.** Evolution de la caractéristique J(V) en fonction du facteur de composition

## LISTE DES TABLEAUX

**Tableau I.1.** Caractéristiques du système Terre-Soleil.

**Tableau I.2.** La variation annuelle de la distance terre-soleil.

**Tableau I.3.** L'éclairement énergétique du rayonnement solaire hors de l'atmosphère dans les divers domaines de longueur d'onde.

**Tableau 1.4.** Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique

**Tableau 1.5.** Constituants de l'atmosphère.

**Tableau III.1.** Avantages et inconvénient du silicium cristallin et des couches minces

**Tableau IV.1.** Les caractéristiques structurales, optiques et le rendement de chaque couche mince.

**Tableau IV.2.** Type de conduction dans  $\text{CuInSe}_2$  en fonction des rapports  $\text{Cu}/\text{In}$  et  $\text{Se}/(\text{Cu} + \text{In})$ .

**Tableau IV.3.** Aperçu de rendements record obtenus selon différentes méthodes de synthèse de l'absorbeur de type CIGS. Les recuit Se et S font référence au recuit sélénisant et sulfurant, respectivement, sans précision sur la nature exacte des réactifs.

**Tableau V.1.** Les valeurs des paramètres de la structure simulée.

**Tableau V.2.** Comparaison des performances de cellule solaire simulée et la cellule référence.

**Tableau V.3.** Caractéristiques de cellule solaire de CIGS en fonction d'épaisseur de la couche CdS.

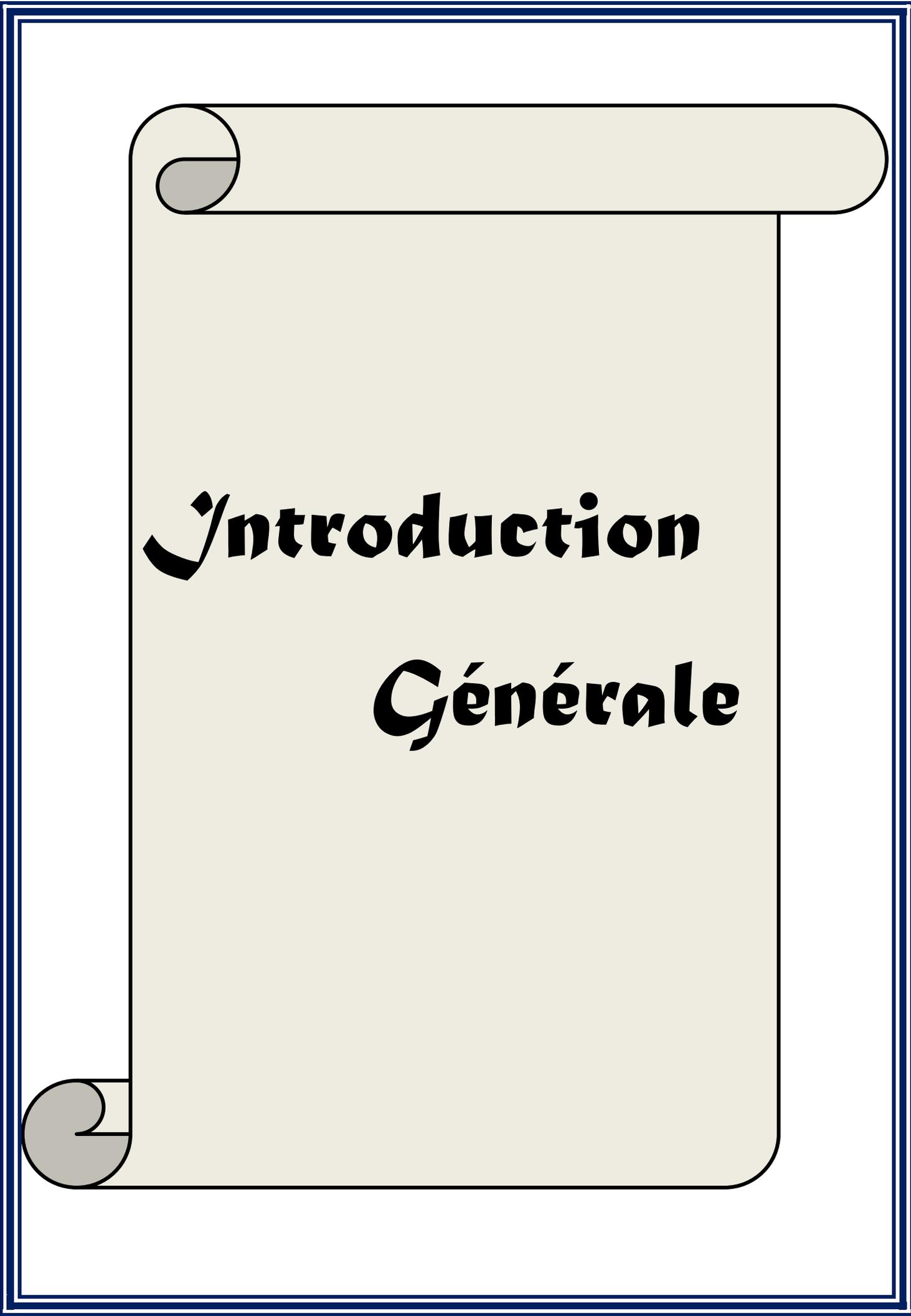
**Tableau V.4.** Caractéristiques de cellule solaire de CIGS en fonction du dopage de la couche CdS.

**Tableau V.5.** Caractéristiques de cellule solaire de CIGS en fonction d'épaisseur de la couche CIGS .

**Tableau V.6.** Caractéristiques de cellule solaire de CIGS en fonction du dopage de la couche CIGS.

**Tableau V.7.** Paramètres optimums de notre cellule solaire CdS/CGIS.

**Tableau V.8.** Caractéristiques de cellule solaire de CIGS en fonction du facteur de composition (X).



**Introduction**

**Générale**

### Introduction Générale

La forte augmentation de la consommation d'énergie au cours des dernières années a créé de grands enjeux politiques et une concurrence géostratégique féroce, qui mène souvent à des conséquences dramatiques comme les guerres, la pollution du globe, ainsi que de grands dangers qui en découlent comme les déchets nucléaires et la transmission des maladies. Une grande partie de cette énergie est produite en brûlant les combustibles fossiles, de la production du nucléaire.

Toutes ces causes, forcent l'humanité à rechercher de nouvelles alternatives en sources d'énergie. Une des solutions pour le futur de la planète, sont les énergies dites renouvelables. La plus prometteuse de ces derniers est l'énergie photovoltaïque.

La source éternelle et propre, provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Elle est assurée via l'utilisation de matériaux semi-conducteurs, qui ont comme propriétés de libérer leurs porteurs de charge (électrons et trous) sous l'influence d'une excitation extérieure.

Un des principaux obstacles pour que le photovoltaïque devient plus populaire est le coût par watt d'électricité produite par le photovoltaïque qui est dans la plupart des cas non concurrentiel à celui produit par les méthodes conventionnelles. L'un des moyens proposés pour la diminution du coût par watt, est de diminuer le coût de fabrication de la cellule photovoltaïque; autrement dit, diminuer considérablement la quantité de matériaux semi-conducteurs entrants dans la composition de chaque cellule et augmenter sa durée de vie. Afin de répondre à cette problématique, plusieurs types de semi-conducteurs ternaires et quaternaires ont été développés et proposés sous forme de couches minces.

Parmi les semi-conducteurs ternaires les plus prometteurs pour la fabrication des cellules solaires en couche minces, le Di-séléniure de Cuivre et d'Indium :  $\text{CuInSe}_2$  noté CIS sous sa forme chalcopyrite. Les cellules solaires à base de ce matériau ont atteint des rendements très élevés (autour de 20%), elles sont très stables et leur durée de vie est très élevée.

L'étude approfondie des cellules à base de CIGS à ce jour a révélé un grand nombre de leurs propriétés et caractéristiques. La plus importante est la mince épaisseur de la cellule,

ainsi qu'la possibilité de modifier l'énergie de sa bande interdite, ce qui permet l'exploitation efficace des différentes parties du spectre solaire.

Notre mémoire s'articule autour de cette étude. Nous entamons notre travail par un survol de la littérature en commençant par une partie sur le rayonnement solaire et les différentes formes de sa conversion énergétique.

La deuxième partie concerne le fonctionnement des cellules solaires à semiconducteurs, en passant par le principe de la conversion photovoltaïque, un rappel sur la jonction PN, car elle est la base d'un tel dispositif électronique. La caractéristique  $I(V)$ , la réponse spectrale et le rendement sont les principaux paramètres de sortie attendus de cette étude.

On entame ensuite la troisième partie, qui est une étude sur l'état de l'art de la technologie de fabrication des cellules solaires. Dans cette partie, nous voulons faire un bilan des différentes filières technologiques photovoltaïques afin de mieux comprendre les avancées et les perspectives à venir. Dans chaque filière, nous appuyons notre recherche bibliographique par les techniques récentes de fabrication de cellules solaires.

En quatrième partie, nous parlons sur le matériau CIGS comme une couche absorbante et ses caractéristiques prometteuses et nous insisterons sur la fabrication de cellules solaires en couches minces, en particulier celle formée dans la couche absorbante, à partir de la chalcopyrite du type CIGS et faire apparaître ses nombreux avantages.

Le dernier chapitre sera l'utilisation d'un outil de simulation (ATLAS<sup>SILVACO</sup>), qui est un logiciel très puissant pour la prédiction des propriétés et paramètres optoélectroniques des dispositifs à semiconducteurs, en particulier nous l'avons exploiter pour choisir des paramètres physiques et technologiques afin d'optimiser les paramètres électriques les plus envisageables tels que l'élargissement du spectre d'absorption solaire, en contrôlant la largeur du gap du CIGS, d'ajuster les dimensions et les dopages des couches afin de maximiser le rendement photovoltaïque.

En finira notre étude par une conclusion générale, qui sera un aboutissement aux résultats satisfaisant qui pourront promettre des dispositifs photovoltaïques à base de couches minces, beaucoup plus performants et concurrentiels par rapport à d'autres types de cellules solaires.

# **Chapitre 01 :**

***L'e***

***Rayonnement***

***Solaire***

## I. Introduction

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension de notre travail : le domaine photovoltaïque, nous aborderons en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie que représente le soleil et ses caractéristiques astronomiques dans le système soleil-terre tel que la distance terre-soleil, la déclinaison solaire et la notion de la masse d'air. Nous décrirons ensuite la propagation du rayonnement solaire à travers l'atmosphère qui subit une modification de son spectre solaire à cause des différents phénomènes (absorption et réflexion) jusqu'à son arrivée à la terre.

## II. Le Soleil

Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée (le soleil). Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre ; 150 millions de km, le soleil est principalement composé de 70 % d'hydrogène et de 28 % d'hélium. La fusion thermonucléaire dans son centre libère une énergie énorme sous forme de rayonnements. Le soleil tourne sur lui-même environ 27 jours. Sa masse est  $33 \times 10^4$  fois plus élevée que celle de la terre, et son volume plus d'un million de fois supérieur à celui de notre planète. Sa température à la surface ; la photosphère, avoisine les 6000 °C et monte à 15 millions de degrés au centre, là où se déroulent les réactions de fusion thermonucléaire et où naissent les photons. [1]

La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement électromagnétique est évaluée à  $1.8 \cdot 10^{14}$  kW. L'angle solide sous lequel le soleil est vu de la terre est d'environ  $0,68 \cdot 10^{-4}$  sr. Ainsi, notre planète intercepte environ deux milliardièmes du rayonnement émis par le soleil. [2]

Le système Terre-atmosphère réfléchit environ 30 % de l'énergie solaire interceptée et absorbe les 70 % restants qui sont presque intégralement transformés en chaleur. Pour reprendre les comparaisons faites plus haut, la puissance absorbée par le système Terre-atmosphère représente celle qui serait fournie par un peu plus de 120 millions de réacteurs nucléaires. [3]

Température de surface (soleil)	$T_s$	6 000 k
Température interne (soleil)	$T_i$	40 000 000 k
Diamètre	$D_s$	$139.14 \cdot 10^4 \text{ km} = 109.05 D_T$
Superficie	$\Sigma_s$	$6.093 \cdot 10^{12} \text{ km}^2 = 11918 \Sigma_T$
Volume	$V_s$	$1.412 \cdot 10^{18} \text{ km} = 1\,301\,000 V_T$
Masse	$M_s$	332 488 $M_T$
Densité	$\rho_s$	0.255 $\rho_T$
Distance moyenne terre-soleil	$\bar{D}_{T-S}$	$1.4953 \cdot 10^8 \text{ km}$
Diamètre apparent	$D'_s$	31'59.3''

**Tableau I.1. Caractéristiques du système Terre-Soleil [4]**

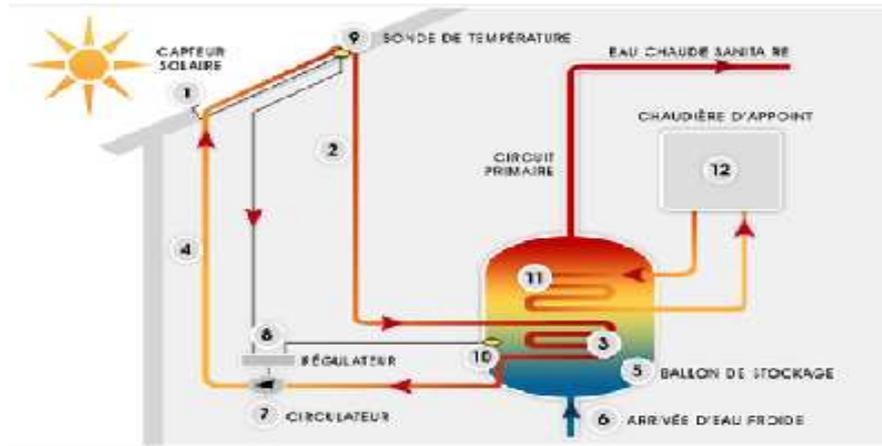
## II.1. L'énergie solaire

Semblable à un réacteur nucléaire, le soleil tire son énergie de la fusion du noyau d'hydrogène qui donne naissance à un noyau d'hélium. Cette réaction produit une énergie incommensurable. Mais cette énergie, comme nous le verrons, n'est pas facile à capter. Les hommes ont développé deux techniques pour utiliser l'énergie du soleil :

### II.1.1. Le solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil. La figure I-1 montrée le principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique. Pour commencer, le rayon solaire traverse une plaque de verre transparente; le rayon lumineux sera alors absorbé après avoir passé la plaque de verre, par une plaque de métal noir qui absorbera environ 80 à 90% des rayons solaires. Puis, la chaleur ainsi générée est transmise à un circuit d'eau qui alimente un circuit secondaire qui, à son tour, alimente une habitation en eau sanitaire ou en chauffage. [5]

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétique d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique. [5]



**Fig. I.1. Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.**

### II.1.2. Le solaire photovoltaïque

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque) [6]. L'énergie solaire spécialement semble, a priori, une solution efficace pour remplacer le pétrole. La production de baril atteint actuellement un pic et les spécialistes pensent qu'elle diminuera pendant les dix prochaines années [7].

La production d'énergie solaire devrait être l'une des plus importantes, car elle présente de nombreux avantages :

- Le soleil envoie chaque année sur la Terre plus de 40.000 fois les besoins en énergies fossiles de l'humanité. Autant dire une énergie inépuisable, gratuite et omniprésente.
- L'énergie solaire peut aussi bien produire de la chaleur (solaire thermique), et de l'électricité (solaire photovoltaïque).
- Le coût proportionnel est quasi nul : lorsque le panneau solaire est installé, l'énergie ne coûte rien, même si l'investissement et l'entretien représentent des dépenses certaines.
- Contrairement à d'autres ressources énergétiques, l'énergie solaire est décentralisée. Ce qui explique également pourquoi beaucoup d'endroits isolés en disposent déjà. [8]

## II.2. Paramètres astronomiques du système soleil-terre

La connaissance de la position du soleil dans le ciel est indispensable pour une bonne conception des systèmes solaires. Les paramètres géométriques les plus importants sont :

- La distance terre-soleil
- Déclinaison solaire
- La hauteur du soleil et son azimut

### II.2.1. Distance terre – soleil

La distance terre-soleil varie au cours de l'année. Elle vaut en moyenne annuelle 1 ua, soit  $149\,598\,10^3$  km. Elle atteint le maximum peu après le solstice d'été (1,017 ua) et le minimum au solstice d'hiver (0,983 ua). Elle dépend du numéro  $d$  du jour de l'année, qui varie de 1 (1<sup>er</sup> janvier) à 365 (31 décembre) ou 366 pour une année bissextile. [2]

Pour une année quelconque, l'angle journalier  $\theta_j$ , en radian, est défini comme suit:

$$\theta_j = \frac{d \, 2\pi}{365,2422}$$

(I.1)

La distance terre-soleil,  $r$ , est donnée par :

$$\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = 1 + \epsilon \quad (\text{I.2})$$

Où  $r_0$  est la distance en moyenne annuelle. La correction relative  $\epsilon$  peut être exprimée par:

$$\epsilon \approx 0.3344 \cos(\theta_j - 0.049) \quad (\text{I.3})$$

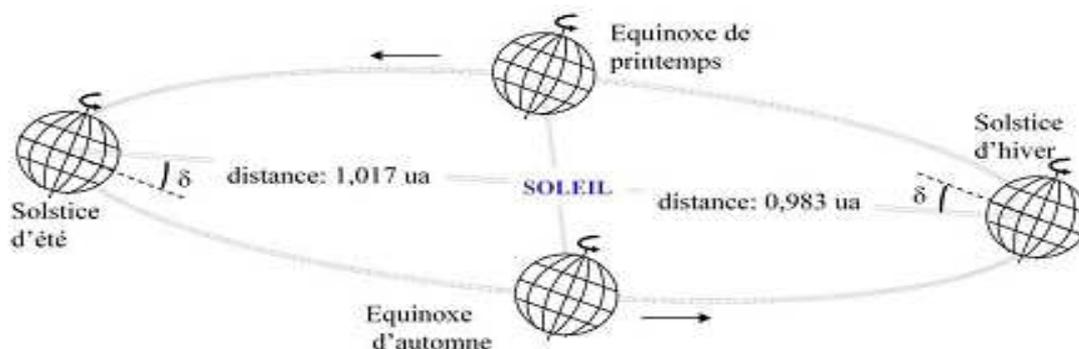


Fig. I.2. Mouvements de rotation de la Terre. [2]

La Terre tourne autour du Soleil en 365 1/4 jours sur une orbite elliptique, la distance Terre-Soleil variant de 147 millions à 152 millions de kilomètres, et l'axe des pôles restant parallèle à lui-même, tout au long du parcours.

Variation de la distance terre-soleil	
1 <sup>er</sup> janvier	147001000 km
1 <sup>er</sup> avril	149501000 km
1 <sup>er</sup> juillet	152003000 km
1 <sup>er</sup> octobre	149501000 km

**Tableau I.2. La variation annuelle de la distance terre-soleil. [4]**

### II.2.2. Déclinaison solaire

La terre tourne autour d'elle-même, l'axe de rotation à une inclinaison de 23.45° par rapport au plan orbital terre-soleil. L'angle entre la ligne terre-soleil (à partir de leurs centres) et le plan équatorial est appelé déclinaison solaire. La déclinaison varie de façon sinusoidale au cours de l'année : elle atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver (-23,45) et au solstice d'été (+23,45), et s'annule aux équinoxes. [9]

Les lois du mouvement relatif terre-soleil permettent de calculer les variations de la déclinaison au long de l'année. Pour la pratique, une formule d'approximation est suffisante, elle est donnée par l'équation suivante [10].

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(j - 80)\right) \quad (\text{I.4})$$

Ou avec plus de précision :

$$\delta = \text{Arc sin}\left(0389 \sin\left(\frac{360}{356}(j - 82) + 2 \sin\left(\frac{360}{356}(j - 2)\right)\right)\right) \quad (\text{I.5})$$

Avec:

j : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c'est à dire il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure (I-3). [11]

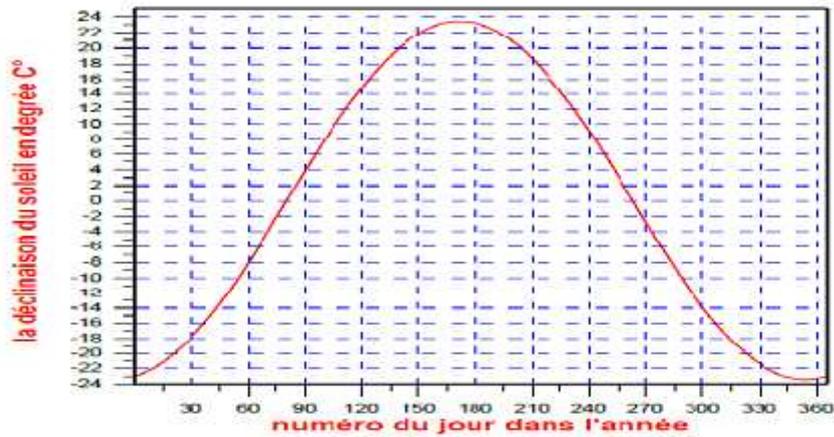


Fig. I.3. Variation annuelle de la déclinaison du soleil.

### II.2.3. La hauteur du soleil et son azimut

La position du soleil est exprimée en fonction de l'angle azimut solaire  $a$ , angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud; cet angle est mesuré positivement vers l'Ouest et l'angle de l'altitude solaire  $h$ , angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Le complément de  $h$  ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelé angle zénithal ( $\theta_z$ ). [9]

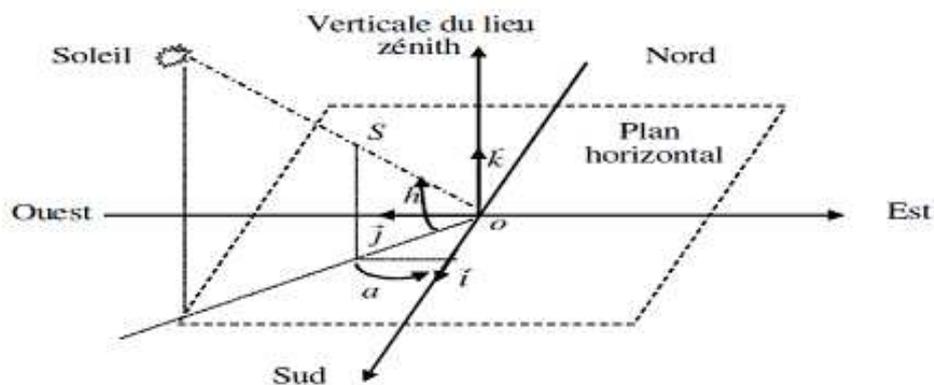


Fig. I.4. Repère horizontal.

Pour calculer la hauteur du soleil et son azimut, l'équation du temps est nécessaire, le midi solaire est le moment où le soleil est à sa hauteur maximale. A ce moment-là, il se positionne dans la direction Sud ou Nord, selon qu'on se trouve dans l'hémisphère Nord ou Sud. Le midi solaire diffère du midi local. Cette différence est appelée équation du temps, et elle varie en fonction du jour et de la longitude.

$$E = 9.87 \sin\left(720 \times \frac{N-81}{365}\right) - 7.53 \left(360 \times \frac{N-81}{365}\right) - 1.5 \sin\left(360 \times \frac{N-81}{365}\right) \quad (\text{I.9})$$

Cette expression est utilisée pour convertir le temps standard local au temps solaire vrai TSV.

$$TSV = T_{st} + \frac{1}{60} \times E + \frac{1}{15} \times (L_{st} - L) \quad (\text{I.10})$$

$T_{st}$  Représente le temps standard ou officiel, duquel on retranche une heure, si l'heure avancée d'été est en vigueur.  $L$  est la longitude du lieu.

La longitude méridienne standard  $L_{st}$  peut être calculée par l'équation suivante :

$$L_{st} = 15 FH_{LOC} \quad (\text{I.11})$$

$FH_{LOC}$  Représente le fuseau horaire du lieu considéré.

L'angle horaire est mesuré à partir du midi solaire, positif s'il est avant-midi et négatif après-midi.

$$w = 15(12 - TSV) \quad (\text{I.12})$$

Spencer donne une formule plus précise de l'équation du temps avec une erreur maximale de 0.0025 radian, soit l'équivalent de 35 secondes d'arc:

$$E = 229.18 \times (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.0032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma + 0.04089 \sin 2\Gamma) \quad (\text{I.13})$$

$$\text{Avec } \Gamma = \frac{360(n-1)}{365}$$

Les formules, pour estimer les deux grandeurs en fonction du lieu et du temps sont les suivantes:

$$\sin h = \sin \lambda \times \sin \delta + \cos \lambda \times \cos \delta \times \cos w \quad (\text{I.14})$$

$\lambda$  : est la latitude locale.

$w$  : est l'angle horaire

L'azimut est calculé par les relations suivantes:

$$a = \sin^{-1} \times \left( \frac{\cos \delta \times \sin w}{\cos h} \right) \quad \text{si } \cos h \geq \frac{\tan \delta}{\tan L} \quad (\text{I.15})$$

$$a = 180 - \sin^{-1} \times \left( \frac{\cos \delta \times \sin w}{\cos h} \right) \quad \text{si } \cos h < \frac{\tan \delta}{\tan L} \quad (\text{I.16})$$

A midi solaire,  $w = 0$  donc  $\cos h < \frac{\tan \delta}{\tan L}$  et  $a = 0$

Les équations de Spencer effectuent une erreur maximale dans la prédiction de la position du soleil de l'ordre de  $0.25^\circ$ . [9]

### III. Répartition spectrale du rayonnement solaire

Notre planète reçoit continuellement des photons provenant des sources lumineuses présentes dans l'univers. La majorité de ces photons sont générés au cours des réactions nucléaires qui ont lieu au cœur des étoiles. Le Soleil est l'émetteur principal de lumière dans les environs de la Terre. À une telle distance et avec un rayon de 6380 km, cette dernière ne reçoit en moyenne que  $4,52 \times 10^{-8} \%$  de l'énergie émise par notre étoile. Il est donc tout à fait inutile de s'intéresser aux autres sources stellaires pour les applications photovoltaïques spatiales et terrestres. Dans ce contexte, il est indispensable de bien connaître la répartition en énergie des photons en provenance du Soleil. [12]

Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement des photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2 micron) à l'infrarouge lointain (2,5 microns), avec une majorité dans le visible (0,3 micron –violet– à 0,8 micron –rouge–) autour d'un pic à 0,45 micron. [13]

### III.1. La masse d'air

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Masse (AM), elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (\text{I.17})$$

Où  $\theta$  est l'angle que fait le soleil avec son zénith

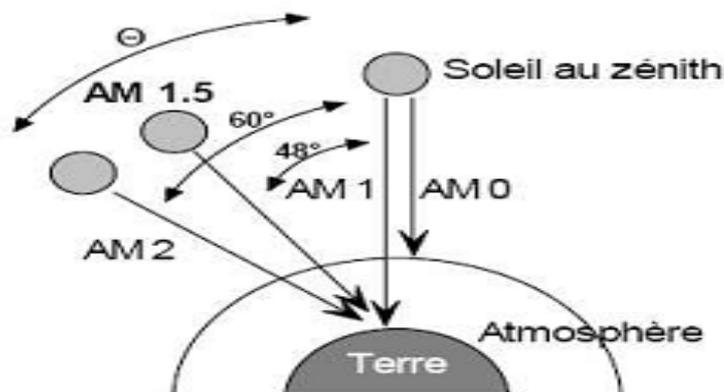


Fig. I.5. Radiation spectrale pour différents air masse.

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation,  $\theta = 0^\circ$ ,  $AM=1$  : la notation utilisée est  $AM_1$ .  $AM_0$  correspond à l'irradiance hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est  $AM1.5G$ , G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à  $AM1.5D$  qui ne tient compte que des directes.  $AM1.5G$  donne une irradiance de  $970\text{W/m}^2$ , mais a été arrondi à  $1\text{ kW/m}^2$ . [14]

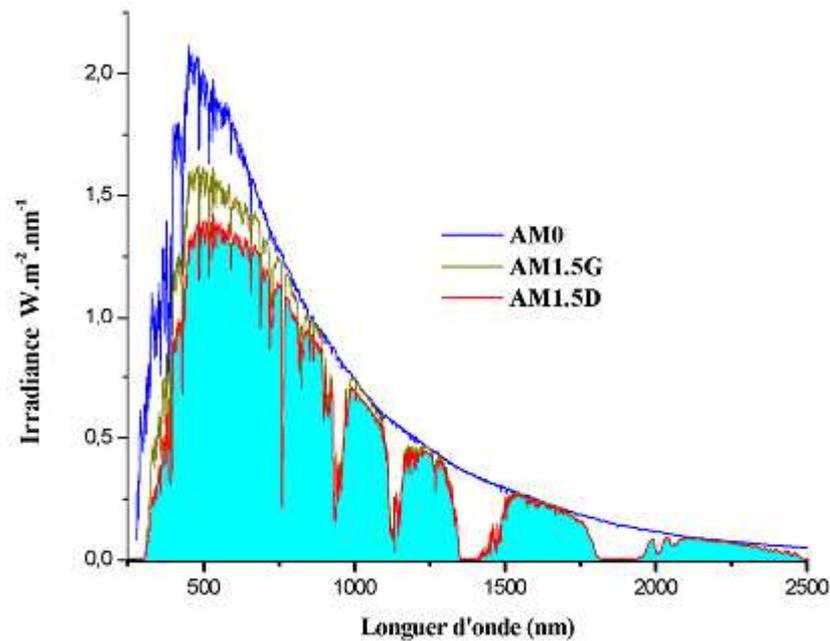


Fig. I.6. Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5.

Il apparaît que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge. La répartition de cet éclairage énergétique dans les divers domaines de longueur d'onde est résumée dans le tableau I.3. [3]

Région spectrale	Longueurs d'onde ( $\mu m$ )	Éclairage énergétique ( $W.m^{-2}$ )	Pourcentage (%)
Infrarouge	> 0,70	695	50,8
Visible	0,40 à 0,70	559	40,9
UV-A	0,32 à 0,40	86	6,3
UV-B	0,28 à 0,32	21	1,5
UV-C	< 0,28	6	0,4

Tableau I.3. L'éclairage énergétique du rayonnement solaire hors de l'atmosphère dans les divers domaines de longueur d'onde.

### III.2. le gisement solaire

La puissance lumineuse reçue par un mètre carré dans les conditions AM1.5 est égale à 1000 W, et ce sont sous ces conditions que la puissance crête d'une cellule est mesurée. Mais celles-ci ne sont réalisées que très rarement hors laboratoire, et lorsqu'il s'agit d'installer des panneaux solaires, il est plus judicieux de connaître le taux d'éclairement à leur futur emplacement. Dans ce cas, il suffit de connaître l'éclairement annuel d'une zone pour calculer facilement la puissance électrique qui y sera générée par les panneaux. Des mesures de la puissance solaire reçue annuellement (ou insolation) ont été effectuées dans différentes régions du globe, afin d'estimer le "gisement solaire". [10]

Les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande (ASA), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m<sup>2</sup>/an limités à la partie sud de l'Europe. [15]

Selon l'évaluation de la même Agence Spatiale l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit: 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, et environ de 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. [16]

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le Tableau I.4, selon l'ensoleillement reçu annuellement.

Régions	Littoral	Hautes plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau 1.4. Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique. [17]**

## IV. La propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère

Lors de leur progression dans l'atmosphère, les rayons solaires sont interceptés par un grand nombre de particules dont les dimensions varient du dixième de nanomètre à quelques centimètres. Les ondes électromagnétiques subissent alors des phénomènes de diffusion (réflexion, réfraction et diffraction), provoquant une dispersion du rayonnement dans toutes les directions. [2]

### IV.1. L'atmosphère : sa structure et sa composition

L'atmosphère peut être considérée comme une enveloppe gazeuse de la terre, environnement dans lequel la vie subsiste. Ce milieu contrôle la distribution de l'énergie à la surface du globe, et beaucoup de transformations chimiques, en particulier d'origine photochimique, surviennent à ce niveau. De plus, c'est là que s'effectuent les échanges de matière avec le reste du système solaire et l'espace en général. [18]

L'atmosphère terrestre se compose de plusieurs "couches", dont chacune possède des caractéristiques propres liées à sa composition, sa pression et sa température.

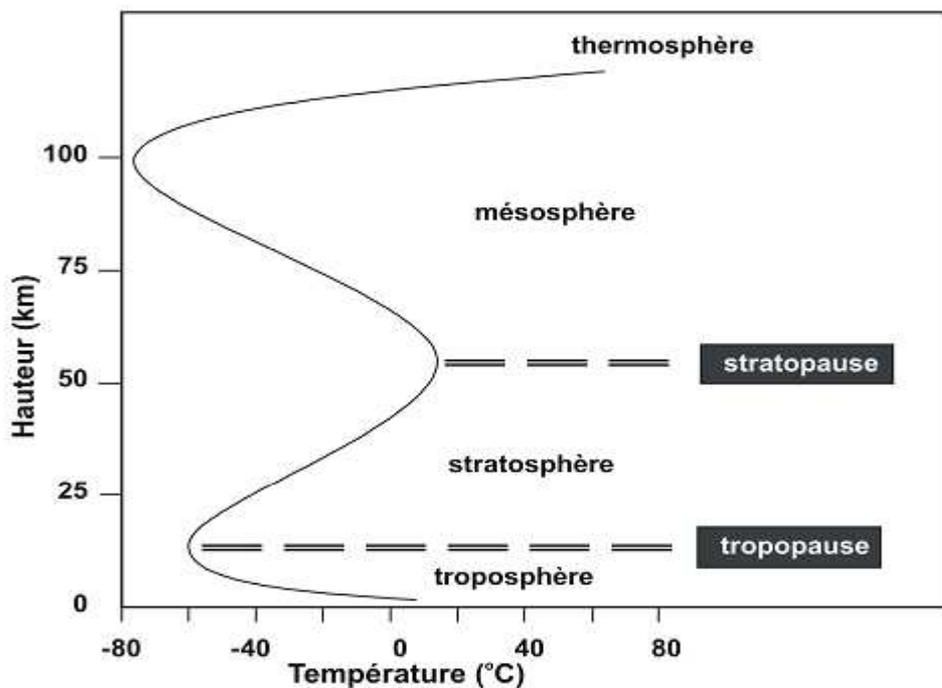


Fig. I.7. Profil vertical de température dans l'atmosphère.

---

**La Troposphère:** C'est la couche la plus basse, c'est-à-dire celle dans laquelle nous vivons. C'est aussi la plus dense. Sa température décroît de 6°C par kilomètre d'altitude. C'est à ce niveau que volent les avions de ligne et qu'interviennent les phénomènes météorologiques : vents, formation des nuages, pluie, neige... La limite supérieure de la troposphère se nomme la tropopause. [19]

**La Stratosphère:** La zone de la stratosphère comprise entre 20 et 50 km d'altitude est naturellement plus riche en Ozone que le reste de l'atmosphère : on la nomme "couche d'ozone". En absorbant les rayons ultraviolets (UV) les plus violents émis par le soleil, elle exerce une action protectrice sur les êtres vivants. [19]

**La Mésosphère :** Le terme provient du mot latin "mesos" qui signifie "au milieu". Au-delà de 50 km, la pression de l'air devient très faible, ce qui rend la transmission des sons extrêmement difficile. Les températures décroissent à nouveau avec l'altitude. [19]

**La Thermosphère :** Les gaz de la thermosphère stoppent les particules très énergétiques envoyées par le soleil. De ce fait, les températures augmentent à nouveau avec l'altitude. Lors des périodes d'activité solaire intense, c'est dans cette couche que l'on peut observer les phénomènes lumineux extraordinaires que l'on nomme "aurores boréales" au-dessus du pôle nord et "aurores australes" au-dessus du pôle sud. [19]

Les constituants majeurs de l'atmosphère sont le diazote plus simplement appelé azote (~ 78 %) et le dioxygène plus simplement appelé oxygène (~ 21 % par rapport à l'air sec). La vapeur d'eau est le troisième constituant de l'air atmosphérique (0,33 % en moyenne). Les gaz rares argon, néon, hélium, sont chimiquement inertes et n'interviennent dans aucun cycle biogéochimique, ce sont des résidus de l'atmosphère originelle. Le dioxyde de carbone joue un rôle particulier à travers le phénomène de photosynthèse qui est le moteur de la biosphère. Les autres constituants gazeux sont ce que l'on appelle les constituants mineurs [20]

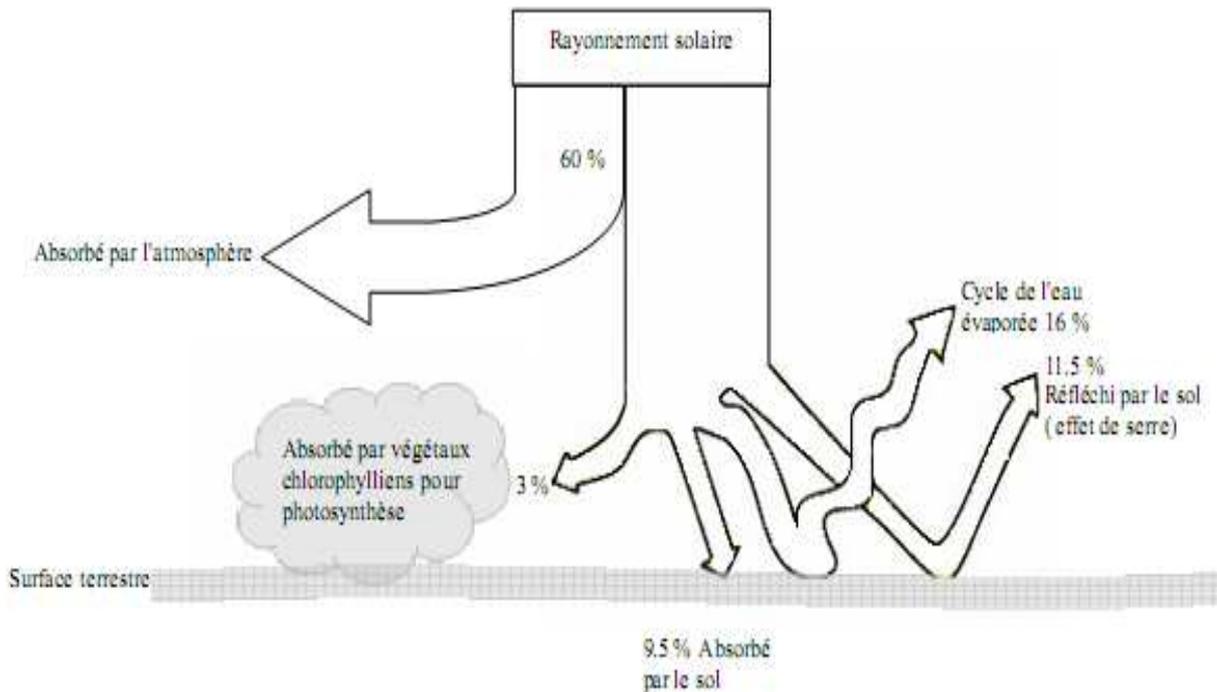
Les constituants de l'atmosphère d'après le modèle Standard Atmosphere (U.S. 1976) concentration près de la surface de la terre est présentée dans le Tableau 1.5.

Constituants permanents		Constituants variables	
Gaz	% par volume	Gaz	% par volume
Azote (N <sub>2</sub> )	78.084	Vapeur d'eau (H <sub>2</sub> O)	0 - 0.04
Oxygène (O <sub>2</sub> )	20.934	Ozone (O <sub>3</sub> )	0 – 12 10 <sup>-4</sup>
Argon (Ar)	0.033	Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> ) <sup>+</sup>	0.001 10 <sup>-4</sup>
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	18.18 10 <sup>-4</sup>	Dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> )	0.001 10 <sup>-4</sup>
Néon (Ne)	5.24 10 <sup>-4</sup>	Ammoniac (NH <sub>3</sub> ) <sup>+</sup>	0.004 10 <sup>-4</sup>
Krypton (Kr)	1.14 10 <sup>-4</sup>	Oxyde nitrique (NO) <sup>+</sup>	0.0005 10 <sup>-4</sup>
Xénon (Xe)	0.089 10 <sup>-4</sup>	Acide sulfhydrique (H <sub>2</sub> S)	0.00005 10 <sup>-4</sup>
Hydrogène (H <sub>2</sub> )	0.5 10 <sup>-4</sup>	Acide nitrique (HNO <sub>3</sub> )	traces
Méthane (CH <sub>4</sub> )	1.5 10 <sup>-4</sup>		
Oxyde nitreux (N <sub>2</sub> O) <sup>+</sup>	0.27 10 <sup>-4</sup>		
Monoxyde de carbone (CO) <sup>+</sup>	0.19 10 <sup>-4</sup>		

Tableau 1.5. Constituants de l'atmosphère.

## V. Le rayonnement solaire intercepté par la Terre

Le rayonnement solaire atteint la couche supérieure de l'atmosphère à un taux moyen de 1400 Wm<sup>-2</sup>. L'essentiel des interactions entre l'atmosphère et le rayonnement solaire se passe dans la troposphère et la stratosphère et est principalement influencé par les nuages, les aérosols et les gaz atmosphériques. La figure (I.7) schématise ces processus et leur influence relative, une fois intégrée sur l'ensemble des longueurs d'onde. Une partie du rayonnement est atténuée par les gaz, les aérosols et les nuages. En moyenne, un tiers du rayonnement est réfléchi vers l'espace par les nuages et le sol ou rétrodiffusé par les constituants de l'atmosphère. Environ la moitié du rayonnement est absorbée par la surface terrestre et océanique. [2]



**Fig. I.8. Rayonnement solaire transmis à la terre.**

A la surface de la terre, le spectre solaire n'est pas le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère ( $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,.....). Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre. Trois phénomènes sont responsables de l'affaiblissement du rayonnement solaire dans son cheminement à travers l'atmosphère terrestre:

- L'absorption par les gaz de l'atmosphère et la vapeur d'eau;
- La diffusion moléculaire par les gaz de l'atmosphère et la vapeur d'eau;
- L'absorption et la diffusion par les particules en suspension dans l'atmosphère.

Ces trois phénomènes contribuent à modifier la distribution spectrale du rayonnement solaire, de sorte qu'au sol, on observe la distribution qui apparaît au bas de la prochaine figure. [20]

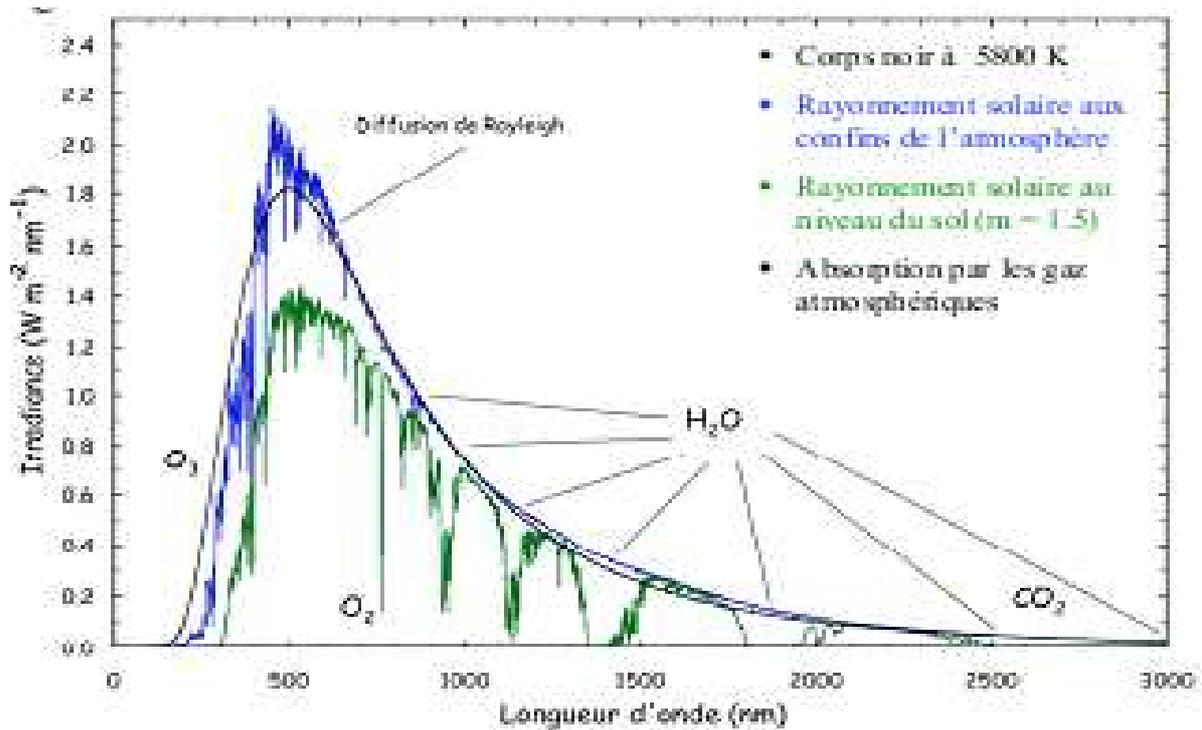


Fig. 1.9. Présentation de l'absorption du rayonnement solaire.

**VI. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions importantes sur le rayonnement solaire comme les paramètres astronomiques du système soleil-terre et quelques caractéristique tel que la masse d'air et le gisement solaire . Ensuite, nous avons présenté les différents phénomènes que subit un rayonnement solaire a traves les couches de l'atmosphère jusqu' à son arrivée sur terre.

## Références bibliographiques

- [1] Assia BOURAIOU « Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe<sub>2</sub> par Électrodéposition » Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, 2009
- [2] Armel Bertrand OUMBE NDEFFOTSING « Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire incident au sol », Thèse de doctorat, Université Mines Paris Tech, 2009
- [3] Pierre Bessemoulin et Jean Olivieri « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » La Météorologie 8 série - n° 31 - septembre 2000
- [4] Fiche.pdf « Physique de l'atmosphère : radiation le rayonnement solaire, atmosphérique et terrestre »
- [5] HELALI KAMELIA « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012
- [6] Jose miguel navarro « cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible ».thèse de doctorat. université Toulouse iii - Paul Sabatier, 2008.
- [7] Environnement doctissimo. <http://environnement.doctissimo.fr/economiser-l-energie/energies renouvelables /solaire solution-d-avenir-.html>
- [8] Energies nouvelles. [http://www.energiesnouvelles.free.fr/Sources/fossile\\_fissile/gaz\\_naturel.html](http://www.energiesnouvelles.free.fr/Sources/fossile_fissile/gaz_naturel.html)
- [9] A. M'Raoui, S. Mouhous, A. Malek et B. Benyoucef « Étude statistique du rayonnement solaire a Alger », 2011
- [10] Amina Benhammou « Optimisation d'un nouveau système de séchage solaire modulaire pour plantes aromatiques et médicinales ». Thèse de doctorat, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2010.
- [11] Benis Halouma « Contribution à la modélisation du problème de Hot Spot dans les modules solaire Photovoltaïque occultées ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [12] Wilfried FAVRE « Silicium de type n pour cellules a hétérojonctions : caractérisations et modélisations », Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11, 2011

- 
- [13] DANIEL LINCOT Directeur de recherches au CNRS « La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire »,2007 [www.martin-bucher.de,Stuttgart/Germany](http://www.martin-bucher.de,Stuttgart/Germany)
- [14] OUDDAH MOURAD « Étude du silicium poreux destine aux cellules solaires », Mémoire de magister, Université Mentouri – Constantine, 2009
- [15] D.R. di valdalbero, 'la recherche energetique europeenne: pont de cooperation sur la mediterranee', liaison energie-francophonie, n°71, energie et developpement durable en mediterranee, pp. 71 - 76, 2 eme trimestre 2006.
- [16] Document, Liaison Energie-Francophonie. 'Energie et Développement Durable en Méditerranée', N°71, p. 95, 2 èmeTrimestre 2006.
- [17] S. Bentouba, A. Slimani et M.S. Boucherit, 'Les Energies Renouvelables dans le Cadre d'un Développement Durable en Algérie, Wilayas du Grand Sud par Exemple', 8 ème Séminaire International sur la Physique Energétique, SIPE'06, Centre Universitaire de Béchar, Algérie, 11 - 12 Novembre 2006.
- [18] Fiche.pdf « L' ATMOSPHERE » Vol II\_Ch01-Frh.pdf1
- [19] Fiche.pdf « L'atmosphère Les images météorologiques » texte\_fr.pdf
- [20] Fiche.pdf « Composition de l'atmosphère »  
M1\_composition\_atmosphere\_PP\_V2\_20091007\_corRD.pdf

**Chapitre 2 :**

**Principe et**

**Généralités**

**Sur La Cellule**

**Photovoltaïque**

## I. Introduction

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. La première partie de ce chapitre est consacrée à étudier la jonction PN qui présente la base de cellules solaires, ensuite nous aborderons le principe de l'effet photovoltaïque, Les principales caractéristiques et les paramètres essentiels qui permettent de calculer le rendement d'une cellule solaire, à partir de la caractéristique courant-tension et les modèles théorique d'une cellule photovoltaïque. Elle est suivie d'une deuxième partie qui présente les principaux facteurs limitant le rendement de conversion. Ensuite, nous expliquons les différents constituants de base d'une cellule photovoltaïque conventionnelle.

## II. La conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Les cellules photovoltaïques sont des composants à semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque.

### II.1. La jonction PN: base du dispositif photovoltaïque

Comme nous avons cité auparavant, l'effet photovoltaïque provient de la conversion du rayonnement lumineux en énergie électrique. Cette conversion est effectuée par l'intermédiaire des composants électroniques dit des cellules photovoltaïques qui basée elles même sur la technologie des semi-conducteurs et la jonction PN. [1]

Alors une simple structure d'une cellule photovoltaïque comporte un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone très mince dopée N et d'épaisseur  $e$  égale à quelques millièmes de mm. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode K tandis qu'une plaque métallique a recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode a (voir la figure II.1). [2]

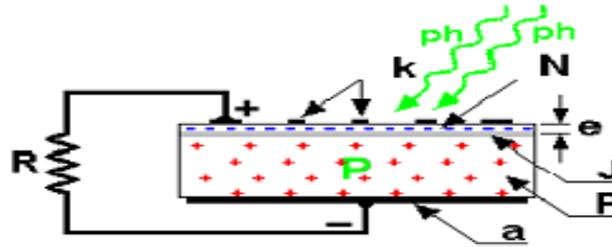


Fig. II.1. Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque.

Lorsqu'un rayon lumineux frappe le dispositif, il peut pénétrer dans le cristal à travers le front et provoque l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. Pour cela une étude théorique d'une cellule solaire nécessite une certaine connaissance théorique sur la jonction PN.

L'assemblage de deux semi-conducteurs de types différents forme la jonction PN. Quand deux semi-conducteurs de type P et de type N sont mis en contact, les trous, majoritaires dans la région de type P, diffusent vers la région de type N. Il en est de même pour les électrons, dans l'autre sens. Cet échange se fait au voisinage de la jonction et fait apparaître une zone de charge d'espace (ZCE) à laquelle est associée une barrière de potentiel (la tension de diffusion  $V_d$ ) qui arrête la diffusion des porteurs et définit l'état d'équilibre. [4]

On distingue alors, dans la jonction PN, deux zones : les zones neutres où il ne règne aucun champ électrique, et la ZCE. Au niveau de la jonction, le champ électrique intrinsèque permet de repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P et accélérer les porteurs minoritaires vers la zone où ils sont majoritaires. [5]

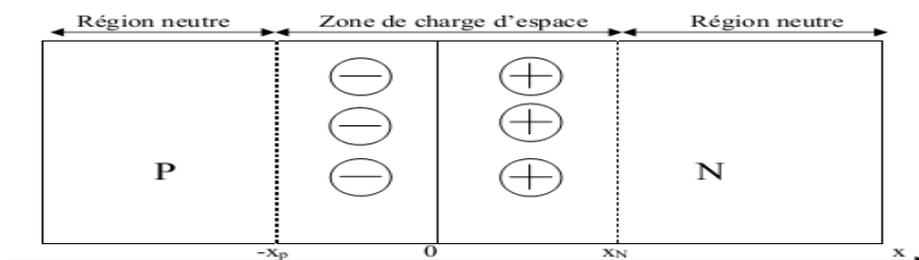


Fig. II.2. Schéma de principe d'une jonction PN à l'équilibre.

Il existe deux types de jonctions :

- Une homo-jonction est constituée par un seul substrat semi-conducteur dans lequel se trouvent deux régions dopées différemment, l'une de type N et l'autre de type P.
- Une hétérojonction est la mise en contact de deux semi-conducteurs de nature différente et de type opposés. [3]

### II.1.1. L'homo-jonction

Lorsque deux semi-conducteur de même matériau et de type différents sont au contact l'un de l'autre, La différence de potentiel entre ces deux régions constitue une barrière de potentiel que l'on appelle tension de diffusion , donnée par :

$$V_d = V_n - V_p = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (\text{II.1})$$

Où :  $V_n$  : le potentiel dans la région N ;  $V_p$  : le potentiel dans la région P ;  $K$  : constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$ ) ;  $T$  : température ( $\text{K}^\circ$ ) ;  $q$  : charge élémentaire ( $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ) ;  $N_a$  : Concentration des accepteurs ;  $N_d$  : Concentration des donneurs ;  $n_i$  : Concentration intrinsèque.

Pour obtenir le champ électrique dans la zone de charge d'espace, Il suffit d'intégrer l'équation de Poisson avec la densité de charge:

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{dE}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (\text{II.2})$$

$\varepsilon$  : Le constant diélectrique

La densité de charge  $\rho(x)$  est donnée par:

$$\rho(x) = \begin{cases} 0 & x < -x_p \text{ ou } x > x_n \\ -q N_a & -x_p \leq x \leq 0 \\ q N_d & 0 \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Après tout calcul fait et avec les conditions  $E(-x_p) = E(x_n) = 0$  on trouve:

$$E(x) \begin{cases} 0 & , x < -x_p \text{ ou } x > x_n \\ -\frac{q \cdot N_a}{\varepsilon} (x + x_p) & , -x_p \leq x \leq 0 \\ \frac{q \cdot N_d}{\varepsilon} (x + x_n) & , 0 \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

À la surface de séparation en ( $x = 0$ ) le champ électrique est continu donc :

$$E_{max} = \frac{q \cdot N_d}{\varepsilon} x_n = \frac{q \cdot N_a}{\varepsilon} x_p = N_d \cdot x_n = N_a \cdot x_p \quad (\text{II.5})$$

L'épaisseur de la zone de charge d'espace est donnée par : **[4]**

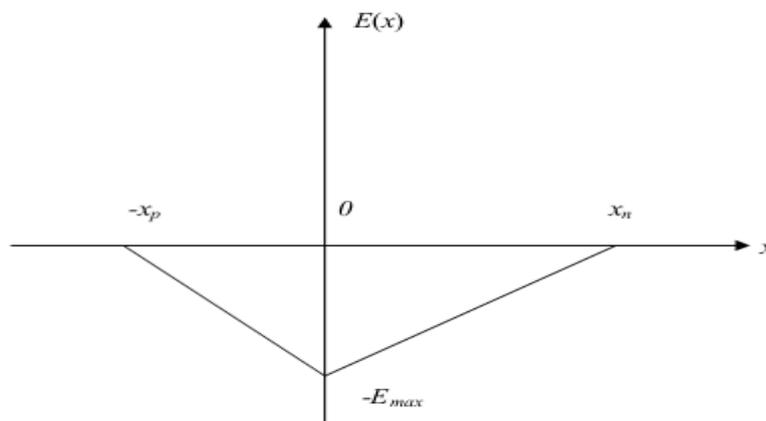
$$w = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right) \cdot V_d} \quad (\text{II.6})$$

Où :

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \left(\frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)}\right) \cdot V_d} \quad (\text{II.7})$$

Et :

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \left(\frac{N_d}{N_a(N_a + N_d)}\right) \cdot V_d} \quad (\text{II.8})$$



**Fig. II.3. Champ électrique de l'homo-jonction abrupte.**

### II.1.2. L'hétérojonction

Considérons deux semi-conducteurs différents caractérisés par les affinités électroniques  $q\chi_1$  et  $q\chi_2$ , les gaps  $E_{g_1}$  et  $E_{g_2}$  et les dopages représentés par les distances  $q\phi_{F_1}$  et  $q\phi_{F_2}$  du niveau de Fermi à la bande de conduction. En l'absence de tout contact les diagrammes énergétiques dans chacun des semi-conducteurs sont représentés sur la figure II.4. [6]

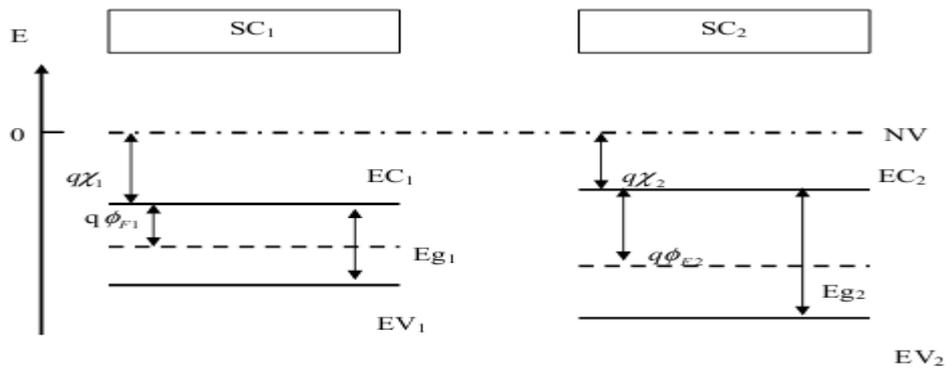


Fig. II.4. Diagramme énergétique dans chacun des semi-conducteurs.

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 une zone de charge d'espace à laquelle est associée une barrière de potentiel (la tension de diffusion  $V_d$ ) qui arrête la diffusion des porteurs et définit l'état d'équilibre. [6]

Nous avons choisi comme origine des énergies, l'énergie potentielle de l'électron dans le vide au voisinage du semi-conducteur 1, soit  $NV_1 = 0$ .

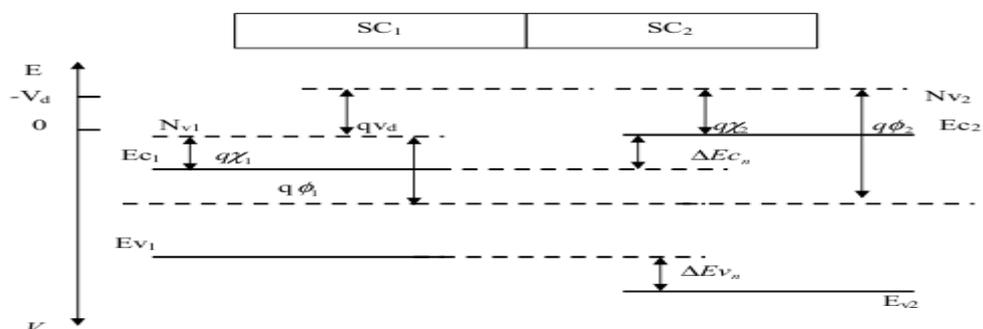


Fig. II.5. Diagramme énergétique loin de l'interface.

A partir de cette origine, le niveau de Fermi est fixé à la distance  $q\phi_1$  au-dessous,  $q\phi_1$  représente le travail de sortie du semi-conducteur 1. 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-conducteur 2 est situé au-dessus de  $E_F$  à la distance  $q\phi_2$ . [6]

La différence d'énergie potentielle entre l'électron dans le vide au voisinage du semi-conducteur 1, et l'électron dans le vide au voisinage du semi-conducteur 2 est :

$$NV_2 - NV_1 = q(\phi_2 - \phi_1) \tag{II.9}$$

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

$$V_d = V_2 - V_1 = \phi_1 - \phi_2 \tag{II.10}$$

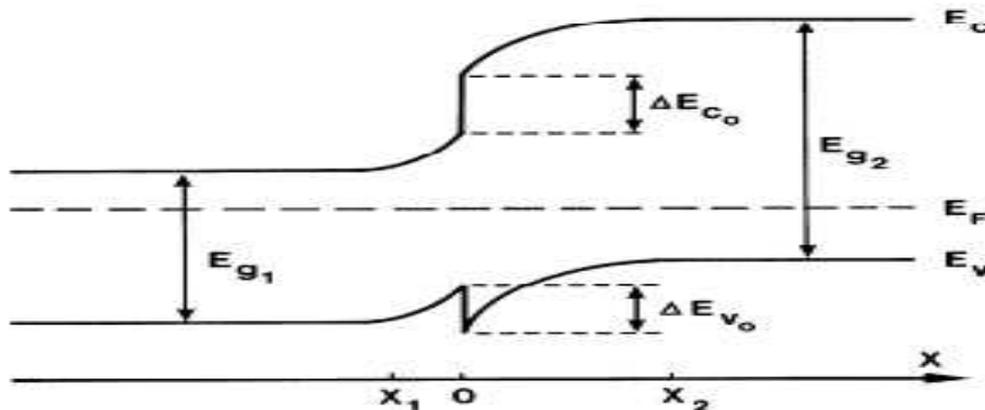


Fig. II.6. Diagramme énergétique d'hétérojonction PN.

Considérons l'hétérojonction PN représentée sur la figure III.6. Nous supposons les semi-conducteurs dopés de manière homogène. Nous appellerons  $N_{d1}$  l'excès de donneurs dans le semi-conducteur 1 telle que la densité de charge  $\rho(x) = qN_{d1}$ , et  $N_{a2}$  l'excès d'accepteurs dans le semi-conducteur 2 telle que la densité de charge  $\rho(x) = qN_{a2}$ . [6]

On considère cette hétérojonction comme jonction abrupte, L'équation de Poisson s'écrit :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{II.11})$$

Dans le semi-conducteur 1 :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -qN_{d1}/\varepsilon_1 \quad (\text{II.12})$$

En intégrant une fois avec la condition  $E = 0$  en  $x = x_1$  on obtient

$$\frac{dV(x)}{dx} = -E(x) = -qN_{d1}/\varepsilon_1 (x - x_1) \quad (\text{II.13})$$

En  $x = 0$

$$E_{s1} = -qN_{d1}/\varepsilon_1 x_1 \quad (\text{II.14})$$

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

$$V(x) = -qN_{d1}/2\varepsilon_1 (x - x_1)^2 + V_1 \quad (\text{II.15})$$

Dans le semi-conducteur 2

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -qN_{a2}/\varepsilon_2 \quad (\text{II.16})$$

En intégrant une fois avec la condition  $E = 0$  en  $x = x_2$  on obtient

$$\frac{dV(x)}{dx} = -E(x) = -qN_{a2}/\varepsilon_2 (x - x_2) \quad (\text{II.17})$$

En  $x = 0$

$$E_{s2} = -qN_{a2}/\varepsilon_2 x_2 \quad (\text{II.18})$$

En intégrant une deuxième fois et en appelant  $V_2$  le potentiel de la région neutre du semi-conducteur 2, on obtient :

$$V(x) = -qN_{a2}/2\epsilon_2 (x - x_2)^2 + V_2 \quad (\text{II.19})$$

Le champ et le potentiel électriques sont représentés sur la figure III.7. La continuité du vecteur déplacement à l'interface s'écrit :

$$\epsilon_1 E_{s1} = \epsilon_2 E_{s2} \Rightarrow -qN_{d1}x_1 = qN_{a2}x_2 \quad (\text{II.20})$$

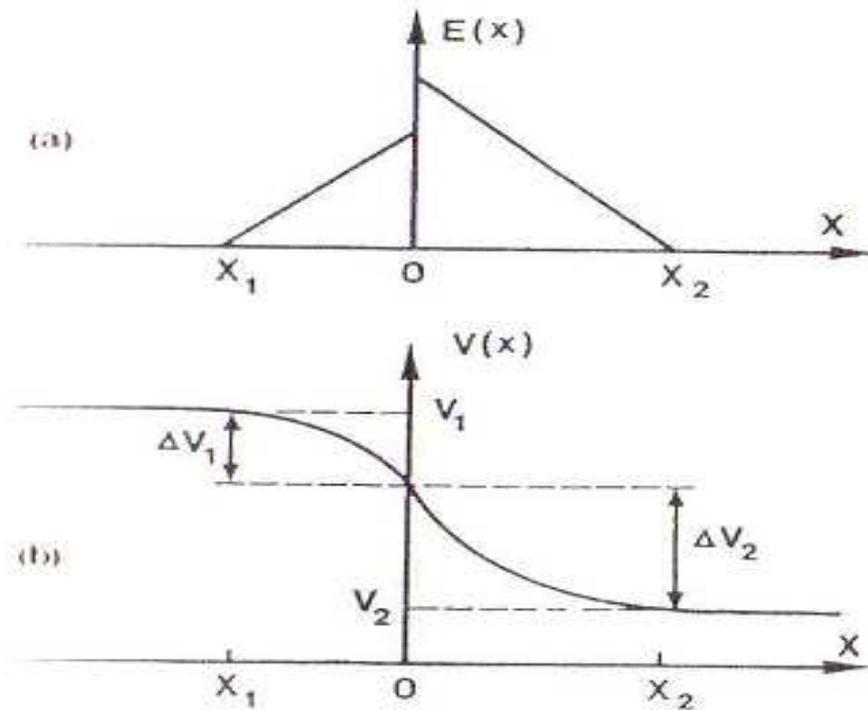


Fig. II.7. (a) Champ et (b) Potentiel électrique à l'interface d'une hétérojonction PN

Où, en posant :  $W_1 = |x_1|$  et  $W_2 = |x_2| \Rightarrow N_{d1}W_1 = N_{a2}W_2$

La continuité du potentiel en  $x=0$  s'écrit :

$$-\frac{qN_{d1}}{2\varepsilon_1}W_1^2 + V_1 = \frac{qN_{a2}}{2\varepsilon_2}W_2^2 + V_2 \Rightarrow V_1 - V_2 = \frac{qN_{d1}}{2\varepsilon_1}W_1^2 + \frac{qN_{a2}}{2\varepsilon_2}W_2^2 \quad (\text{II.21})$$

On en utilisant la relation  $\frac{d^2V}{dx^2} = -qN_{d1}/\varepsilon_1$

$$V_1 - V_2 = \frac{qN_{d1}}{2\varepsilon_1}W_1^2 \left( \frac{\varepsilon_1 N_{d1} + \varepsilon_2 N_{a2}}{\varepsilon N_{a2}} \right) + \frac{qN_{a2}}{2\varepsilon_2}W_2^2 \left( \frac{\varepsilon_1 N_{d1} + \varepsilon_2 N_{a2}}{\varepsilon N_{d1}} \right) \quad (\text{II.22})$$

D'où les expressions de la largeur de la zone de charge d'espace dans chacun des semi-conducteurs : **[6]**

$$W_1 = \left( \frac{2N_{a2}}{qN_{d1}} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 N_{d1} + \varepsilon_2 N_{a2}} \right)^{1/2} (V_1 - V_2)^{1/2} \quad (\text{II.23})$$

$$W_2 = \left( \frac{2N_{d1}}{qN_{a2}} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 N_{d1} + \varepsilon_2 N_{a2}} \right)^{1/2} (V_1 - V_2)^{1/2} \quad (\text{II.24})$$

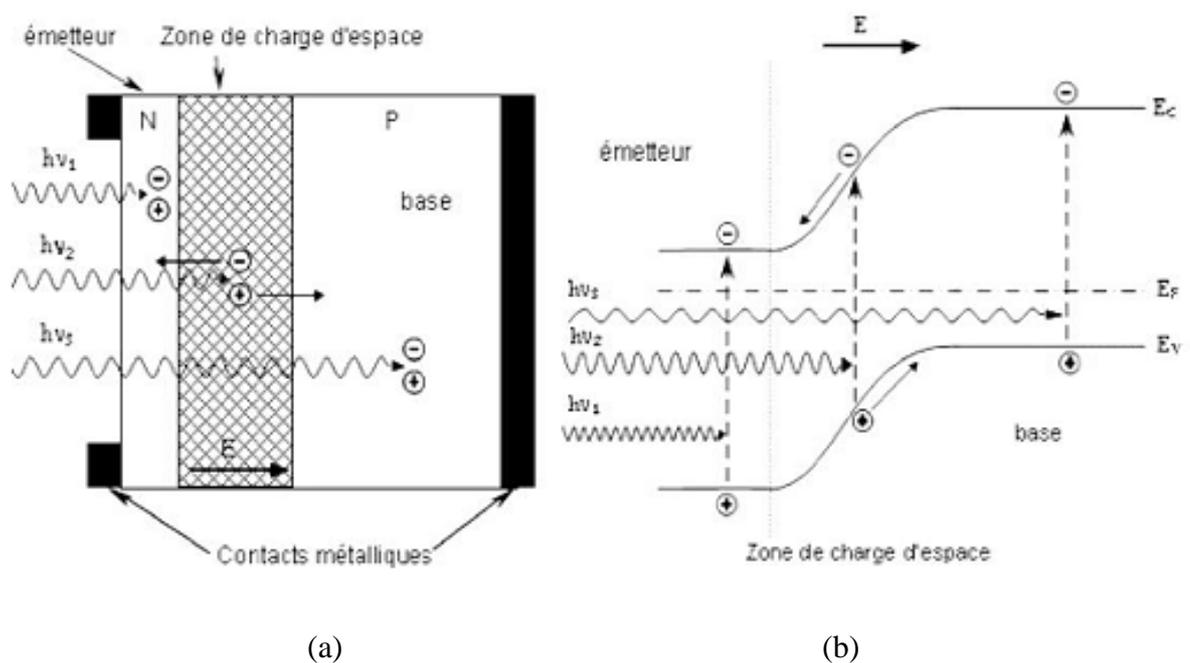
La largeur totale de la zone de déplétion est donnée par  $W=W_1+ W_2$

$$W = \left( \frac{2\varepsilon_1 \varepsilon_2 (N_{d1} + N_{a2})^2}{qN_{d1} N_{a2} (\varepsilon_1 N_{d1} + \varepsilon_2 N_{a2})} \right)^{1/2} (V_1 - V_2)^{1/2} \quad (\text{II.25})$$

Où  $V_1 - V_2 = V_d$  la différence de potentiel s'établit en partie dans chacun des semi-conducteurs.

## II.2. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Sous éclairage, une jonction PN recevant un rayonnement des photons incidents, lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce phénomène ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau ( $E_g$ ). Dans ce cas, le photon va pouvoir faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteurs. [7]



**Fig. II.8. (a) Structure et (b) Diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.**

Les particules générées dans le dispositif sont collectées entre une grille (face avant) et un contact ohmique réalisé (face arrière) acheminé à une charge externe. [8]

Généralement la ZCE est assez fine. Cependant, l'électron peut se déplacer sur une longueur de diffusion  $L_n$  pendant sa durée de vie, les électrons collectés correspondent à ceux qui ont pu diffuser jusqu'à la ZCE. Ainsi les absorbeurs des cellules solaires ont souvent une épaisseur proche ou inférieure à la longueur de diffusion de leurs porteurs. [7]

Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions P, N et ZCE. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création.

Dans les régions électriquement neutres P et N, les photo-porteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photo-courant de diffusion.

Dans la ZCE, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération. [4]

### II.3. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

Le photo-courant résultant est la somme de trois composantes, le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type P, le courant de photo-génération dans la zone de charge d'espace et le courant de diffusion des photo-trous de la région de type N. Ces différentes contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant  $I_{ph}$ , c'est un courant de porteurs minoritaires proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant s'oppose au courant de diode, appelé courant d'obscurité  $I_{obsc}$ , qui résulte de la polarisation du composant.

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad (II.26)$$

Avec

$$I_{obsc}(V) = I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (II.27)$$

V : tension aux bornes de la jonction (Volt)

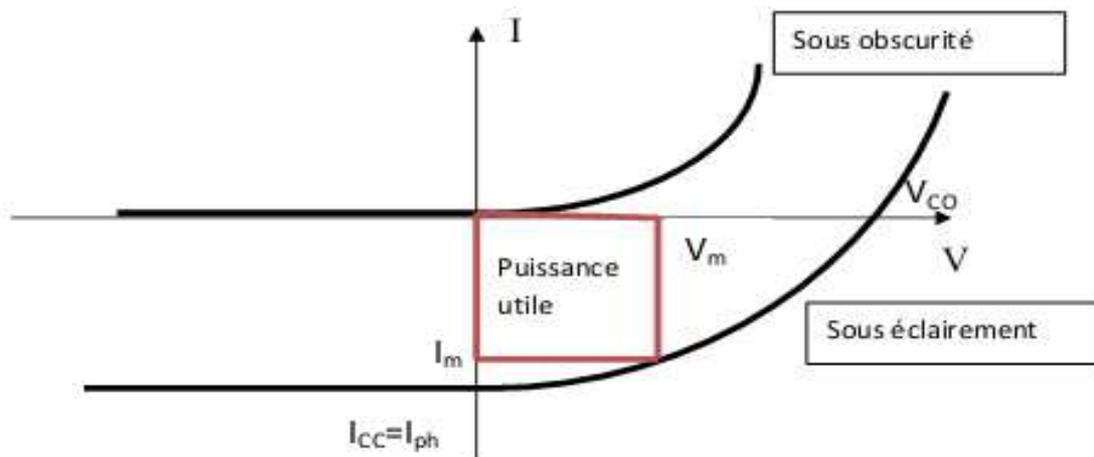
$I_s$  est le courant de saturation de la diode servant de rappel qu'une pile solaire dans l'obscurité est simplement un semi-conducteur redresseur courant, ou diode.

$n$  est le facteur d'idéalité de la diode (égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération /recombinaison). [9]

Le courant  $I$  est en général rapporté à une surface : la densité de courant  $J$  s'exprime en  $\text{mA.cm}^{-2}$ .

La cellule photovoltaïque n'est autre qu'une photodiode qui fonctionne sans polarisation extérieure et débite son photocourant dans une charge. Sous éclaircissement la caractéristique  $I(V)$  de la diode ne passe plus par l'origine des coordonnées, il existe une région dans laquelle le produit  $I \cdot V$  est négatif (II.9), la diode fournit de l'énergie. [4]

La figure II.9 représente une caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sous obscurité et sous éclaircissement.



**Fig. II.9. Caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque.**

Si on se limite à cette région active et si on compte positivement le courant inverse, la figure (II.9) se ramène à la figure (II.10).

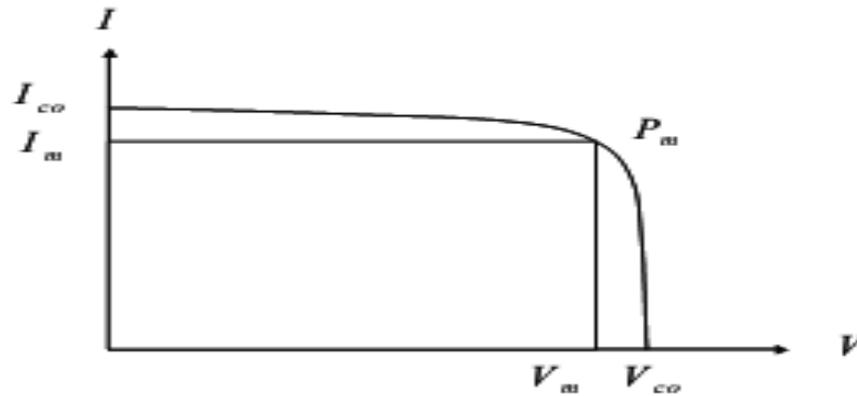


Fig. II.10. Caractéristique courant tension d'une cellule solaire éclairée.

Nous pouvons décomposer la caractéristique  $I(V)$  d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

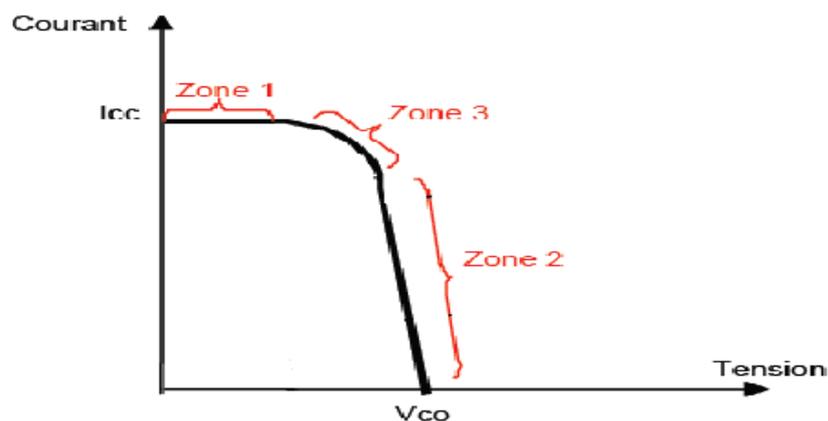


Fig. II.11. Les différentes zones de la caractéristique  $I(V)$ .

**La zone 1 :** Une zone assimilable à un générateur de courant  $I_{CC}$  proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par  $1/R_{sh}$

**La zone 2 :** Une zone assimilable à un générateur de tension  $V_{co}$  d'impédance interne équivalente à la résistance série  $R_s$ .

**La zone 3 :** Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de  $R_s$  à  $R_{sh}$ . C'est dans cette zone qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. [10]

## II.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

### II.4.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque idéale

Si l'on considère le cas simple d'une cellule idéale à une jonction soumise à un flux lumineux, celle-ci fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent (Figure II.12) est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant. 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. [11]

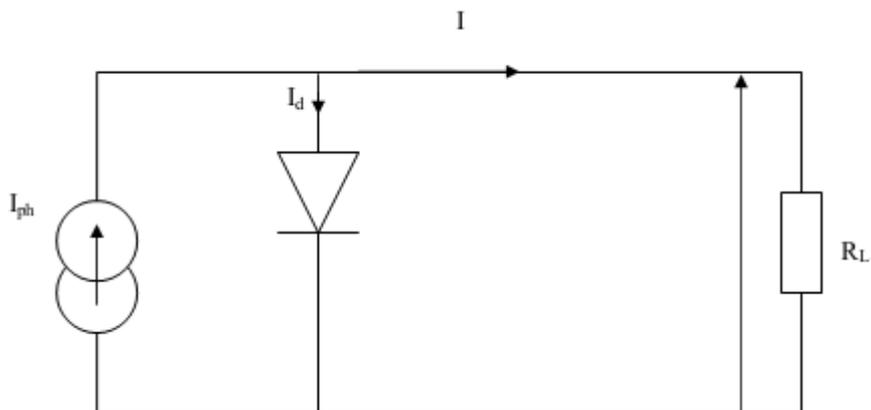


Fig. II.12. Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.

En branchant un circuit extérieur sur la cellule éclairée, on recueille ce courant sous lumière vaut :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.28})$$

Et la tension  $V$  est donnée par :

$$V = n U_t \ln \left( \frac{I_{ph} + I_s + I}{I_s} \right) \quad (\text{II.29})$$

Où  $U_t = \frac{kT}{q}$ ,  $n$  est le facteur d'idéalité. [6]

La source de courant modélise le courant photo-généré  $I_{ph}$

### II.4.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque réelle

Pour tenir compte des limitations de la cellule et calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant une source de courant, une résistance série et une résistance parallèle. Ce modèle est représenté par la figure II.13 :

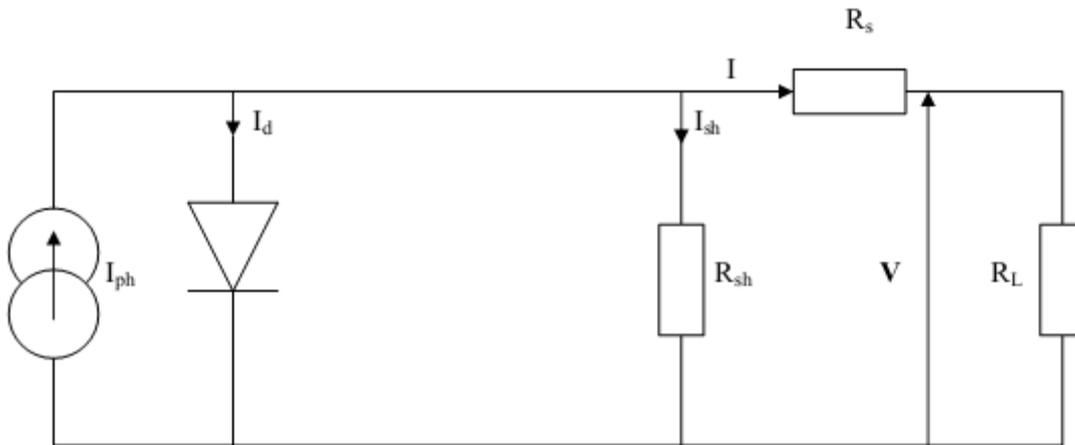


Fig. II.13. Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.

La résistance série  $R_s$  modélise les pertes résistives dans la structure, les résistances de contact aux interfaces métal/semi-conducteur et celles du métal à proprement parler, la pente de la courbe  $I(V)$  au point  $V_{oc}$  représente l'inverse de la résistance série ( $1/R_s$ ). Afin de limiter son influence sur le courant de la cellule,  $R_s$  doit être minimisée en optimisant les contacts métal/semi-conducteur et en diminuant la résistivité du matériau. Un compromis est à trouver entre cette dernière et la recombinaison des porteurs : un dopage trop élevé entraîne des recombinaisons trop importantes. Les valeurs de résistivité retenues sont comprises en général entre 0.5 et 5 $\Omega$ .cm pour le substrat initial. [9]

Le 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. La pente de la courbe  $I(V)$  au point  $I_{cc}$  représente l'inverse de la résistance shunt ( $1/R_{sh}$ )

En général, la valeur de  $R_{sh}$  est plus grande que celle de  $R_s$  d'au moins un ordre de grandeur. Pour minimiser les pertes, il faut diminuer  $R_s$  et augmenter  $R_{sh}$ . Dans le cas idéal  $R_{sh}$  tend vers l'infini et  $R_s$  égale à zéro. [11]

L'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$  s'écrit donc : [6]

$$I(V) = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.30)$$

Avec

$$I(V) = I_{ph} - \left[ I_s \left( \exp \left( \frac{V + R_s I}{q U_t} \right) - 1 \right) \right] - \left[ \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right] \quad (II.31)$$

## II.5. Les paramètres physiques d'une cellule solaire

A partir de la caractéristique I(V) de la cellule photovoltaïque représentée sur la figure II.10 on peut déterminer ses paramètres physiques à savoir: la tension en circuit ouvert, le courant du court circuit, la puissance maximale, le facteur de forme, et le rendement. Des brèves définitions de ces paramètres, ainsi que leurs déterminations de la caractéristique sont données ci-après. [1]

### II.5.1. Courant de court-circuit, $I_{cc}$

Le courant de court-circuit exprimé en mA, c'est le courant qui circule dans la cellule sous éclairement en court-circuitant la sortie ( $I_{cc} = I(V = 0)$ ). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairé, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température [12].

Pour une cellule solaire idéale le courant de court circuit est égal au courant de photo-génération  $I_{ph}$

### II.5.2. Tension à circuit ouvert, $V_{co}$

La tension de circuit ouvert exprimée en millivolts, c'est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert ( $V_{co} = V(I = 0)$ ). Elle dépend de la différence des travaux de sortie des électrodes et de la résistance Shunt. Elle décroît avec la température et varie avec l'intensité lumineuse [12].

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

$$V_{oc} = Q U_t \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II.32})$$

### II.5.3. Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule photovoltaïque: c'est le facteur de remplissage qui représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{oc}$ , Il est défini par la relation suivante : [13]

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{cc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad (\text{II.33})$$

### II.5.4. La puissance maximale $P_{max}$

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit (V.I) est maximum. Si  $V_m$  et  $I_m$  sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximum est la surface du plus grand rectangle de côtés  $V_m$  et  $I_m$  qu'on peut inscrire sous la courbe I (V) (Figure II.10)

$$P_{max} = (I * V)_{max} = I_{max} * V_{max} \quad (\text{II.34})$$

Dans le cas d'une cellule idéale, la puissance maximale correspondrait à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multipliée par le courant de court circuit  $I_{cc}$ :

$$P_{max \text{ idéal}} = V_{oc} * I_{cc} \quad (\text{II.35})$$

### II.5.5. La réponse spectrale

On appelle réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque, l'efficacité avec laquelle elle transforme l'énergie d'un rayonnement d'une certaine longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau constituant la cellule photovoltaïque, car lorsqu'une cellule solaire est soumise au rayonnement solaire, seule une partie du rayonnement solaire sera transformée en électricité.

Le rayonnement solaire est réparti sur une plage de longueurs d'onde débutant en deçà de l'ultraviolet ( $< 0.4 \mu\text{m}$ ) jusqu'à l'infrarouge ( $> 0.7 \mu\text{m}$ ). L'œil n'est sensible qu'aux longueurs d'onde comprises entre ces deux valeurs. Comme l'œil, la cellule n'est sensible qu'à une partie du rayonnement solaire (celle comprise entre  $0.35$  et  $1.1 \mu\text{m}$ ) ; une partie essentiellement visible, et une partie du rayonnement ultraviolet (de  $0.35$  à  $0.4 \mu\text{m}$ ) et du rayonnement infrarouge (de  $0.7$  à  $1.1 \mu\text{m}$ ). Cette sélection des longueurs d'onde s'explique par le fait que le photon doit avoir suffisamment d'énergie pour arracher un électron. [14]

La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque est donnée par le rapport:

$$RS(\lambda) = J_{cc}(\lambda) / P_{in}(\lambda) \quad (\text{II.36})$$

Où:  $J_{cc}$ : Densité de courant de Court-circuit ( $\text{A.cm}^{-2}$ );  $\lambda$ : Longueur d'onde (nm)  
 $P_{in}$ : Puissance incidente reçu par l'échantillon ( $\text{w.cm}^{-2}$ );

### II.5.6. Le rendement quantique

Le rendement quantique externe (RQE) est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Le rendement quantique externe est défini comme suit:

$$RQE(\lambda) = \frac{hc}{q\lambda} \cdot RS(\lambda) \quad (\text{II.37})$$

Avec : h: Constante de Planck ( $\text{kg.m}^2.\text{s}^{-1}$ ) ; c: Célérité de la lumière dans le vide ( $\text{m.s}^{-1}$ )

$\lambda$  : Longueur d'onde monochromatique (nm)

Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle le rendement quantique interne (RQE). Ce paramètre donne le pourcentage d'électrons participant au photo-courant par rapport au nombre de photons qui ont été réellement absorbés dans la cellule:

$$RQI(\lambda) = \frac{RQE(\lambda)}{1-R(\lambda).A(\lambda).T(\lambda)} \quad (\text{II.38})$$

Avec :  $R(\lambda)$ : Réflectivité de la cellule;  $T(\lambda)$ : Rayonnement transmis à travers la cellule ;  
 $A(\lambda)$ : Absorption dans les couches non actives (%) ;

Le rendement quantique dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, de l'énergie d'ionisation, de la largeur de la zone de déplétion et de l'efficacité de collecte. Il est mesuré en fonction de la longueur d'onde émise par une source monochromatique. [14]

### II.5.7. Le rendement électrique

Le rendement de conversion exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$

$$\eta = P_{max}/P_{in} = V_m I_m / P_{in} = V_{oc} I_{cc} FF / P_{in} \quad (\text{II.39})$$

Le rendement de panneaux solaires dépend du lieu géographique, la couverture nuageuse, le moment dans l'année, etc. [1]

### III. Les pertes limitant le rendement de conversion photovoltaïque

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale, différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la fois de la nature du matériau et à la technologie utilisée [15].

#### III.1. Limites intrinsèques

##### III.1.1. Absorption partielle

La première limitation correspond aux photons utiles dans la conversion. Tous les photons possédant une énergie inférieure à  $E_g$ , ils ne peuvent pas générer de porteurs libres et traversent le matériau sans être absorbés et sont donc perdus. En revanche les photons d'énergie supérieure au gap ne pourront générer qu'une seule paire électron-trou. L'excès d'énergie est perdu pour la conversion et thermalisé. Sous un éclairement de  $AM1.5$ , cette perte est évaluée à 33 % dans le cas du silicium.

##### III.1.2. Recombinaisons intrinsèques (radiatives et Auger)

Dans un semi-conducteur à gap direct le mécanisme de recombinaison radiative domine les autres phénomènes. C'est l'inverse de la création d'une paire électron-trou par un photon : un électron de la bande de conduction retourne dans la bande de valence en cédant de l'énergie sous forme lumineuse, en émettant un photon. L'énergie du photon émis étant égale ou proche de celle du gap, il pourra avec une faible probabilité être recyclé et créer une nouvelle paire électron-trou. En revanche pour un gap indirect, les recombinaisons radiatives sont peu probables. [16]

Le processus de recombinaison Auger est non radiatif et implique l'interaction de trois particules. L'énergie libérée par la recombinaison d'un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence est ici transférée à un autre porteur libre (électron ou trou). Ce porteur thermalisé, perd ensuite cette énergie en revenant à un état énergétique inférieur proche de la limite de bande. Ce mécanisme de recombinaison (en réalité plus complexe) est dominant à fort taux d'injection et pour de fortes densités de dopants. [16]

### III.2. Limites technologiques

La différence entre le rendement maximal théorique et celui obtenu expérimentalement peut être due à des pertes technologiques, c'est-à-dire qui est potentiellement évitables par l'utilisation de technologies adaptées. Les pertes les plus importantes proviennent de facteurs optiques et résistifs, mais aussi des recombinaisons volumiques et surfaciques.

#### III.2.1. Pertes optiques et résistives

Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant. Cette quantité est limitée par le coefficient de réflexion  $R$  de la surface de la cellule, qui pondère toutes les équations des courants photo-générés par un coefficient  $(1-R)$ . Afin de diminuer les réflexions, la surface de la cellule est texturée et recouverte d'une couche antireflet. [15]

De manière analogue, le taux d'ombrage tient compte de la couverture partielle de la surface de la cellule par une partie opaque correspondant à la surface des contacts métalliques de la face avant. Par contre, pour certaines structures de cellules, le taux d'ombrage est égal à zéro par exemple pour les cellules photovoltaïques à contacts arrière. [15]

En ce qui concerne les pertes résistives, les possibilités d'améliorations dépendent fortement de la structure de cellule utilisée. Des phénomènes de résistance série peuvent provenir de conductivités insuffisantes dans le semi-conducteur, dans les métallisations, ainsi qu'au contact métal-semi-conducteur. Un second type de pertes résistives provient de courts-circuits (ou shunts) entre les électrodes positives et négatives de la cellule. Ces différentes pertes résistives influencent fortement la valeur du facteur de forme des cellules PV. [16]

#### III.2.2. La recombinaison surfacique

La surface d'un matériau semi-conducteur représente une rupture brutale dans la continuité du réseau cristallographique. Ceci entraîne la présence de liaisons non saturées ou liaisons pendantes. Les atomes d'un matériau semi-conducteur auxquels il manque une liaison covalente ne sont donc pas dans une configuration électronique stable. Ces défauts structuraux

introduisent des niveaux énergétiques dans le gap du d'un matériau qui vont assister les phénomènes de recombinaison.

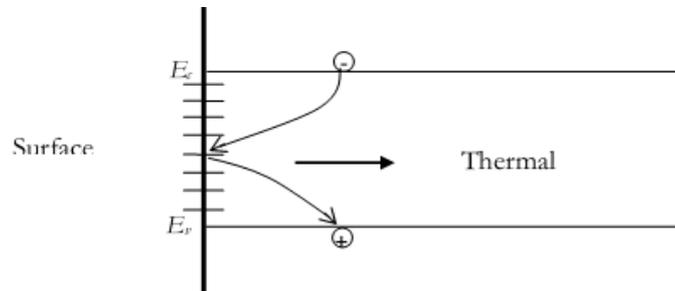


Fig. II.14. Mécanisme de recombinaison en surface.

Les liaisons pendantes peuvent être saturées par le dépôt d'une couche de matériau à la surface. On parle alors de passivation des défauts de surface, il est donc nécessaire d'apporter un traitement adapté à la surface afin de réduire son influence sur les recombinaisons. [5]

### III.2.3. Recombinaison volumique

Contrairement aux phénomènes Auger et radiatifs, le mécanisme de recombinaisons volumique (Shockley-Read-Hall SRH) n'est pas intrinsèque pour un matériau semi-conducteur. Les recombinaisons SRH sont dues aux impuretés et défauts présents dans le matériau d'un semi-conducteur. Celles-ci provoquent l'apparition de niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite. [5]

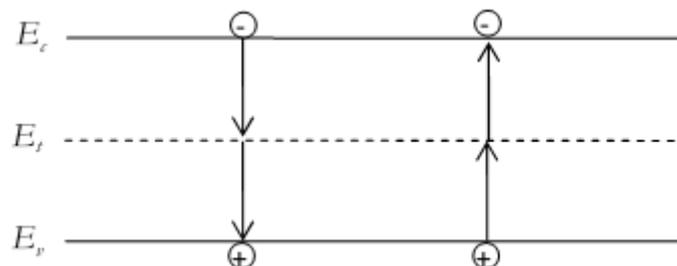


Fig. II.15. Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH).

Ce processus fait appel à des niveaux d'énergie voisins du milieu du gap (les pièges) qui facilitent la recombinaison des porteurs par un mécanisme en deux étapes. Un électron de la bande de conduction va d'abord se relaxer sur un niveau d'énergie intermédiaire lié à un défaut. Ensuite, une deuxième relaxation va lui permettre de se recombiner avec un trou de la bande de valence. L'efficacité de ce processus dépend de la densité des niveaux profonds et par suite, de la qualité du matériau utilisé et de sa technologie d'élaboration. [12]

Il faut noter que la valeur de la densité de courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) n'est plus limitée par la durée de vie volumique des porteurs, lorsque la longueur de diffusion devient très supérieure à l'épaisseur de la cellule. Elle est alors uniquement limitée par les recombinaisons de surface et les facteurs optiques évoqués précédemment. En revanche, la valeur de la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  est dans la plupart des cas strictement limitée par les phénomènes de recombinaison et ceci quelque soit leur niveau. [5]

#### IV. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ses structures est la jonction PN qui joue le rôle principal dans le dispositif solaire. Elle est le siège de la génération des porteurs et de leurs séparations. La structure d'une cellule photovoltaïque standard industrielle est présentée sur la figure II.16.

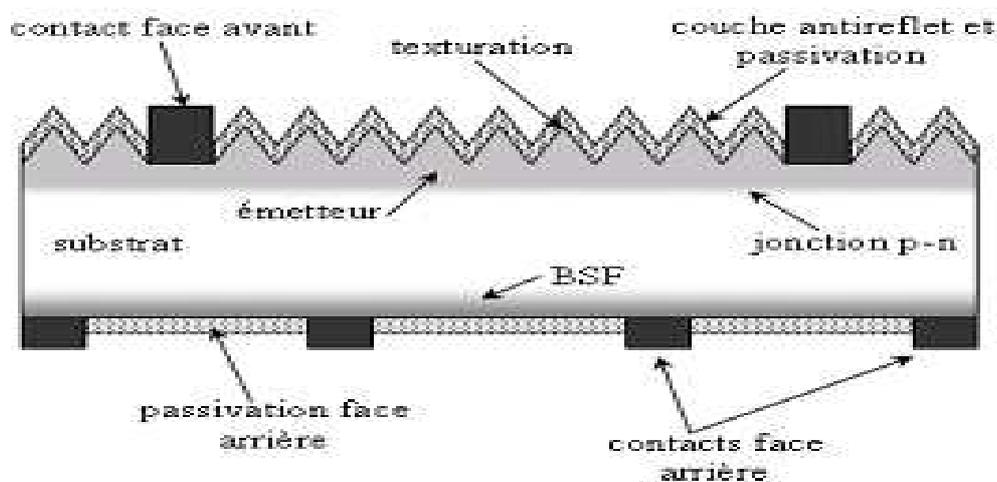


Fig. II.16. Représentation simplifié d'une cellule photovoltaïque standard.

### IV.1. Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques servent à collecter le courant de porteurs photo-générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I(V)$  du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement. [12]

### IV.2. La couche absorbante

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau de conductivité de type P à un grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1,1 à 1,7 eV. [2]

### IV.3. La couche tampon

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

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

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

- Une bande interdite intermédiaire permettant une transition souple entre celle de la couche absorbante et de l'OTC, soit une valeur comprise entre 2,4 et 3,2 eV.
- Une conductivité de type N pour former la jonction avec la couche absorbante, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante.
- Elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court circuit au niveau des joints de grains. [2]

#### IV.4. Passivation des faces avant et arrière

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et le nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{SiN}_x\text{:H}$ ). [15]

#### IV.5. La couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces.

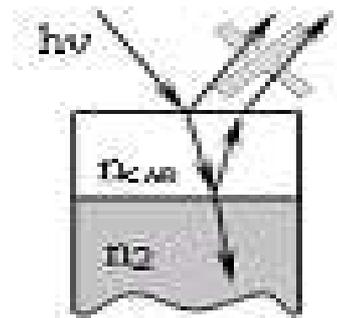


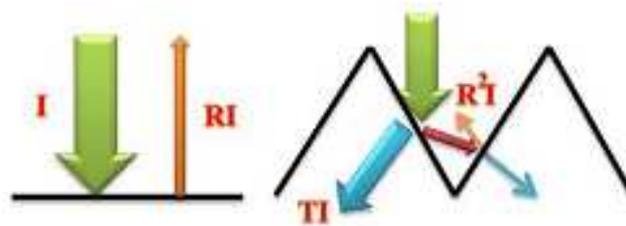
Fig. II.17. Couche antireflet.

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air-CAR et CAR-semi conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents). [15]

Différentes couches anti-réfléctives sont utilisées en photovoltaïque, elles peuvent être isolantes comme le  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{MgF}_2$  et  $\text{SiN}_x$  ou conductrice comme le  $\text{ZnO}$  ou l'ITO. [12]

#### IV.6. La texturation de surface

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation), alliée à une couche antireflet (CAR), permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident. Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface de la cellule solaire. La forme généralement pyramidale du relief multiplie les réflexions et donc les chances pour la lumière de pénétrer dans le matériau.

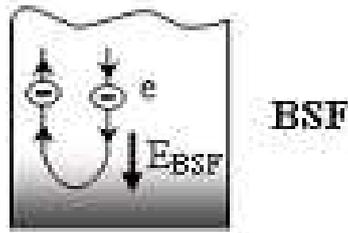


**Fig. II.18. Schéma comparatif des phénomènes de réflexion sur surfaces plane et texturée.**

Les techniques industrielles de texturation se font le plus souvent par voie chimique alcaline (KOH, NaOH, TMAH). Cependant, les voies acide et sèche font l'objet d'un intérêt croissant en particulier pour les matériaux multi-cristallins. [16]

#### IV.7. Le champ électrique BSF

Un BSF (Back Surface Field) est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, conduisant à une structure P-P<sup>+</sup>. Ce dernier consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison (voir la figure II.19).



**Fig. II.19. Le principe du champ électrique BSF.**

Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est constamment réduite afin de réaliser une économie de matière

## **V. Conclusion**

Ce chapitre partagé en deux parties, nous a permis en premier lieu de faire un survol sur la théorie des cellules photovoltaïques, nous avons vu des notions théoriques sur les cellules photovoltaïques, leur caractéristique courant-tension pour calculer ses différents paramètres électriques. En second lieu nous avons présenté les principaux facteurs limitant leur rendement de conversion, ainsi que les différents constituants de base d'une cellule photovoltaïque conventionnelle.

## Références bibliographiques

- [1] Assia BOURAIYOU «Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe<sub>2</sub> par Électrodéposition » Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, 2009
- [2] Djeriouat Khadidja «Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions: GaInP/GaAs ». Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen, 2011
- [3] LEKIKET HICHEM « Elaboration et Caractérisation des hétérojonctions à base de couches minces de ZnO et ZnS» Mémoire de magister, Université Mentouri – Constantine, 2008
- [4] Henry Mathieu-Hervé Fanet «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques » 6<sup>ème</sup> édition
- [5] MOHAMMEDI Mohammed «étude et simulation de cellules photovoltaïques a contacts arrières inter-digités sous environnement SILVACO » Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen, 2012
- [6] Souici Fatma-Zohra « Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe<sub>2</sub>). Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009
- [7] Lydie RIBEAUCOURT « Electrodepôt et sélénisation d'alliages Cu-In-Ga en vue de la synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> pour cellules solaires ». Thèse de doctorat, Université PIERRE ET MARIE CURIE, 2011
- [8] HELALI Kamelia « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012
- [9] OUDDAH MOURAD « Étude du silicium poreux destine aux cellules solaires », Mémoire de magister, Université Mentouri – Constantine, 2009
- [10] Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003
- [11] Mathieu Urien « Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible» Thèse de doctorat, Université Bordeaux, 2008
- [12] DIB Wassila «Modélisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliques ». Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen, 2010
- [13] PETIBON Stéphane «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de

- l'énergie pour les applications photovoltaïques». Thèse de doctorat, Université Toulouse, 2009
- [14]** Roshanak Radbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.
- [15]** Nichiporuk Oleksiy «Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités » Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005
- [16]** José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.

# **Chapitre 03 :**

**État De L'art**

**Des Différentes**

**Filières Du**

**Photovoltaïque**

## I. Introduction

Le Soleil fournit chaque année suffisamment d'énergie pour répondre aux besoins de la population mondiale. De nombreuses cellules photovoltaïques ont vu le jour pour exploiter au mieux le rayonnement solaire à travers de panneaux solaires. Dans ce chapitre et après avoir rappelé quelques dates sur l'histoire de l'énergie photovoltaïque qui établit la position des cellules solaires par rapport aux autres systèmes de production d'énergie électrique, on verra en détail, les principales technologies qui seront passées en revue (silicium cristallin ou amorphe, CdTe, CIGS, CZTS, etc.), leurs avantages et inconvénients, mais aussi leurs procédés de fabrication et leurs performances actuelles.

## II. Histoire de l'énergie photovoltaïque

### Quelques dates ...

Le physicien français Antoine Becquerel (1788-1878) décrit le premier effet photovoltaïque en 1839, mais cela reste une curiosité scientifique de laboratoire jusque les années 1950 du dernier siècle. Becquerel découvre que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière. [1]

L'effet fut étudié dans les solides tels que le Sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre. [1]

En 1875, le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. [2]

Seulement, le phénomène est encore considéré comme anecdotique jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale. Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. [2]

Ce n'est que 115 ans plus tard en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone, avec un rendement énergétique de 6%. [3]

Par la suite, lors des premiers lancements des satellites et les missions lunaires, les cellules solaires eut un regain d'intérêt et elles sont considérées comme une meilleure solution pour l'alimentation électrique des satellites. En 1958, une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point et les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. [4]

D'autre part, suite à la crise économique des années 1970, la flambée des prix du pétrole en 1973 et les accidents des installations nucléaires Three Mile Island (USA 1979) et Tchernobyl (URSS 1986), ce qui renforce l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables. En 1973, l'Université de Delaware installe la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques. [4]

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. La croissance de l'industrie fut spectaculaire, et notamment à travers de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tel que : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. En 1983 la première voiture, alimentée par énergie photovoltaïque, parcourt une distance de 4 000 km en Australie. [2]

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001. [5]

Jusqu'au début des années quatre-vingt dix les trois couches minces restantes ont évolué ensemble jusqu'aux environ de 15 %, puis le  $\text{CuInSe}_2$  a évolué par ajout de gallium en  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  pour devenir le leader avec 18.8 % obtenu en décembre 1999. Mais les couches minces n'ont pas rattrapé le silicium cristallin en rendement record, car celui-ci a continué son évolution pour atteindre 24 % de rendement en 1994, et 24.7 % en 1999. [4]

Bien que le prix se soit peu stabilisé, la quantité de modules Photovoltaïques expédiés chaque année ne cesse d'augmenter...

### III. Les différentes filières photovoltaïques

La conversion photovoltaïque nécessite l'utilisation d'une couche photoconductrice, dite couche absorbante, qui transforme le rayonnement lumineux en paires électron-trou. Par la suite, ces porteurs créés sont collectés en réalisant une jonction à la surface de cette couche absorbante. Cette jonction peut être soit une homo-jonction, c'est le cas de la filière classique, soit une hétérojonction ; c'est à dire une jonction avec deux semi-conducteurs différents, soit une jonction Schottky ; c'est à dire un contact métal semi-conducteur. [6]

Pour le moment, de nombreuses cellules photovoltaïques différentes existent de nos jours. Elles sont classées en trois générations :

- La 1<sup>ère</sup> génération rassemble les cellules à base de silicium monocristallin et multicristallin.
- La 2<sup>ème</sup> génération rassemble les cellules dites à couches minces.
- La 3<sup>ème</sup> génération appartient à toutes les autres technologies (les cellules organiques, cellule de Grätzel, cellule à boîtes quantiques, etc.). [7]

#### III.1. La première génération

En 2011, 87 % des installations photovoltaïques installées dans le monde comportaient du silicium monocristallin et multi-cristallin (Poly-cristallin). Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages: [8]

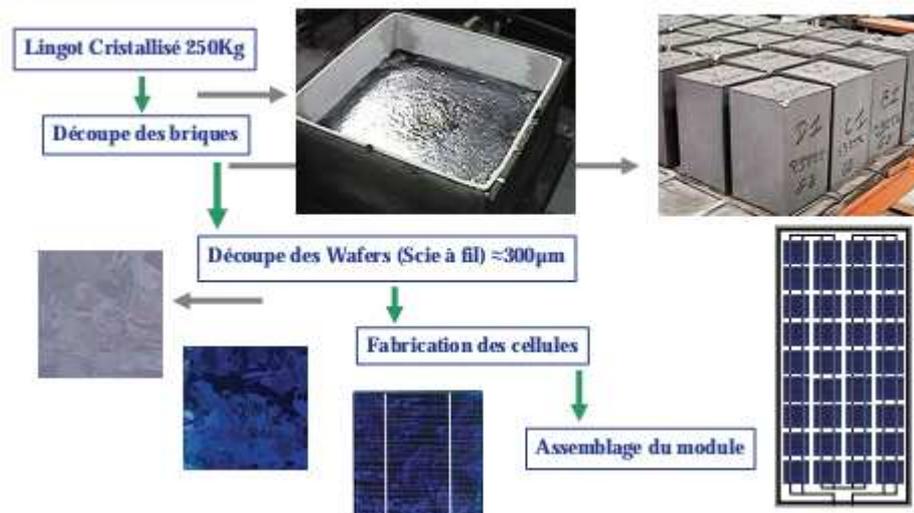
- il est abondant à la surface du globe il présente 25.7% de la croûte terrestre.
- il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V.
- il possède un oxyde naturel ( $\text{SiO}_2$ ) présentant d'excellentes propriétés électroniques.
- il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore).

Cependant, cet élément, le plus abondant sur Terre après l'oxygène, n'est pas directement exploitable puisqu'il n'est pas présent à l'état pur. Il passe par les étapes suivantes: [9]

- La fabrication des lingots de silicium (extraire, purifier, mis en forme puis dopé puis le moulage des lingots partie de la matière première silicium) par la méthode de Czochralski.
- Le découpage du lingot en tranches minces appelées plaquettes ou wafers ;

- La fabrication des cellules, par traitement des plaquettes de silicium cristallin.
- La fabrication des modules (ou panneaux), par connexion des cellules entre elles et encapsulation.

Toutes ces opérations ont un important coût énergétique.



**Fig. III.1. Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en Silicium.**

Cette filière est elle-même subdivisée en deux technologies distinctes de part la nature du silicium employé. Elles peuvent être faites à partir de plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) soit par le silicium monocristallin ou le silicium multi-cristallin, dont le gap est de 1.12 eV. [10]

Les cellules monocristallines représentaient 30 % du marché mondial du photovoltaïque en 2011. Le rendement commercial de ces modules se situe entre 13 et 21 %, mais un record de 25 % a été obtenu en laboratoire. Cette technologie est donc avantageuse, mais elle affiche un coût élevé en raison du prix des matériaux et de la quantité d'énergie requise durant leur préparation. [7]

Afin de réduire les coûts de production, le silicium multi-cristallin, moins onéreux que le silicium monocristallin, a été introduit dans l'industrie photovoltaïque à partir des années 1970. Les rendements conversion industriels qui était de l'ordre de 8% à 10 % avant 1980, sont actuellement de 16 à 17% pour des grandes plaquettes de 10\*10 ou 15\*15 cm<sup>2</sup>.

Ces progrès s'expliquent par l'amélioration constante de la qualité des matériaux et par l'accroissement des connaissances des défauts et des impuretés résiduels. [11]

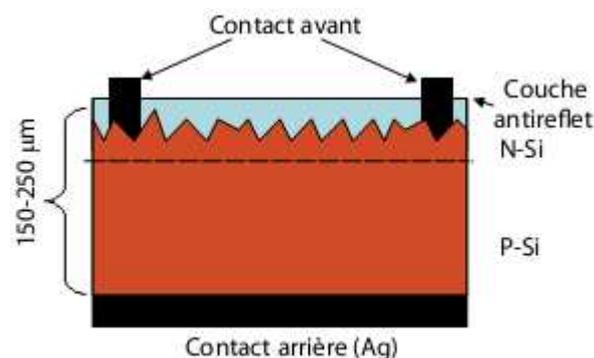
La figure III.2 montre le schéma principal d'une cellule à base de silicium. Il s'agit d'une jonction PN s'établissant entre deux couches de silicium n'ayant pas le même dopage en contact.

En général, la couche N est placée au-dessus de la couche P, elle est donc la première à être exposée à la lumière solaire. Les photons incidents sont donc absorbés sur toute la surface de la plaque. Pour cela une certaine épaisseur est nécessaire, d'autant plus faible que le coefficient d'absorption est grand. [12]

La couche N est conventionnellement recouverte d'une couche antireflet, et ce afin de minimiser la réflexion des photons.

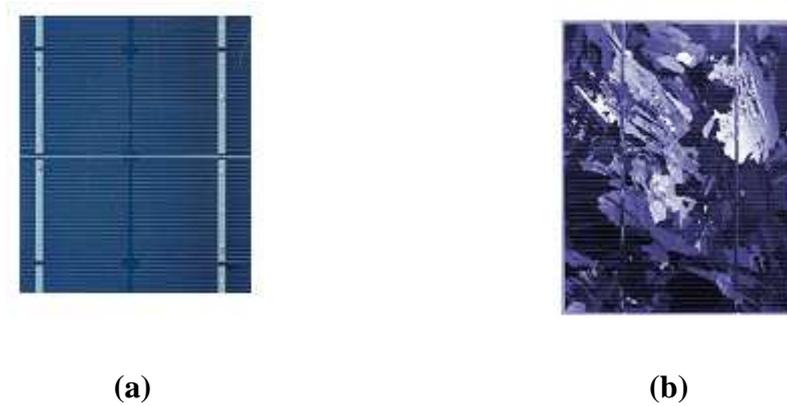
Dans l'architecture de cellule la plus classique, des collecteurs de charges sont alors ajoutés par le biais de techniques sérigraphiques, c'est-à-dire par l'ajout d'une pâte métallique qui est par la suite solidifiée durant un nouveau passage dans un four.

On dépose sur la couche P, à l'arrière, une électrode positive généralement en aluminium ou en argent, elle-même déposée sur un substrat. Cette métallisation conclut la fabrication des cellules en tant que telles. [7]



**Fig. III.2. Structure de base d'une cellule à base de silicium cristallin.**

Elles peuvent alors être assemblées en série ou en parallèle, selon les caractéristiques électriques souhaitées pour les panneaux, puis encapsulées.



**Fig. III.3. (a) Photos de cellules monocristalline (b) multi-cristalline.**

Les cellules photovoltaïques au silicium monocristallin sont d'un bleu ou d'un noir uniforme. En revanche, les structures multi-cristallines sont marquées par des motifs correspondant aux limites des cristaux. [7]

Ces entités photovoltaïques, qu'elles soient monocristallines ou multi-cristallines, possèdent de nombreux avantages, mais aussi quelques inconvénients dommageables: [12]

- Un faible rendement obtenu sous un faible éclairage.
- Un prix très élevé de production des matériaux.
- appropriées pour des applications nécessitant de bonnes performances, tels que les véhicules électro-solaires. [6]
- Son gap indirect à 1,12 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct. Pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$  pour le silicium alors qu'il suffit seulement 1  $\mu\text{m}$  de GaAs. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV) : le GaAs, avec une largeur de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés. [8]

Ceci nécessite sans cesse de nouvelles approches technologiques afin de réduire les coûts de production tout en augmentant le rendement de conversion des cellules et diminuer les pertes de matière lors de l'élaboration des plaques. [5]

### III.2. La deuxième génération

Le prix trop élevé du  $kW_c$  de la technologie photovoltaïque de la première génération était et reste encore plus cher que celui des énergies fossiles ( $3.5\$/W_c$ ) [13]. C'est pour cette raison qu'un autre axe de recherche s'est créé à partir des années 1980, avec un objectif prioritaire de réduire le coût de fabrication. Les technologies dites de couches minces reposent sur l'utilisation de matériaux pour lesquels une épaisseur de seulement quelques microns est suffisante à la conversion photovoltaïque, étant donnés leurs coefficients d'absorption des photons très supérieurs à ceux du silicium cristallin ; pour cela plusieurs semi-conducteurs de ce type sont utilisés dans l'industrie : [9]

- Le silicium amorphe ;
- Le tellure de cadmium (CdTe) ;
- Le di-séléniure de cuivre-indium (CIS).

#### III.2.1. La filière du silicium amorphe (a-Si):

Le silicium amorphe (a-Si) est produit par pulvérisation cathodique de silicium ou de décomposition du silane, il s'est fait connaître dès 1969 par Chittik et al. Le silicium intégré dans les cellules a-Si n'a pas fait l'objet d'une cristallisation, ses atomes sont donc arrangés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). [5]

Mais les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. La désorganisation atomique a d'autres conséquences, les électrons de valence des atomes de Silicium ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent dénaturer les propriétés électroniques du matériau. [7]

Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si:H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes. [7]

Il est vite devenu évident que l'hydrogène joue un rôle important dans la détermination des propriétés optoélectroniques de ces matériaux, et que la couche déposée d'a-Si est en fait un alliage de silicium et d'hydrogène ou silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H). Plus tard, beaucoup de laboratoires de recherche commencent à étudier les propriétés optoélectroniques et photovoltaïques intrinsèques d'alliages a-Si:H. [5]

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) s'est fait connaître dès 1975 par Spear et Lecomber de l'Université de Dundee, et que la capacité de doper de ce matériau à la fois de type N et de type P [5]. Le silicium amorphe hydrogéné a aussi trois avantages majeurs:

- Son fort coefficient d'absorption (10 fois que celui de (c-Si)) cela permet d'envisager la fabrication de cellules à l'aide de couches minces, de l'ordre du micron d'épaisseur.
- Sa faible consommation énergétique durant le cycle de production, et son aptitude à être déposé en grandes surfaces unitaires.
- Le temps de retour énergétique est inférieur à un an. Enfin, pouvoir traiter des surfaces de l'ordre du  $m^2$  d'un seul tenant est intrinsèquement plus économique que d'avoir à assembler des dizaines de plaquettes de 100 à 225  $cm^2$  produites séparément. [1]

Ces caractéristiques, permettant d'abaisser significativement les coûts de production d'un module photovoltaïque à la base du silicium amorphe hydrogéné. Malgré des rendements des modules plus faibles que le silicium cristallin ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères. [10]

La figure III.4 représente la structure de base d'une cellule à base de silicium amorphe, elle se compose par six couches principales :

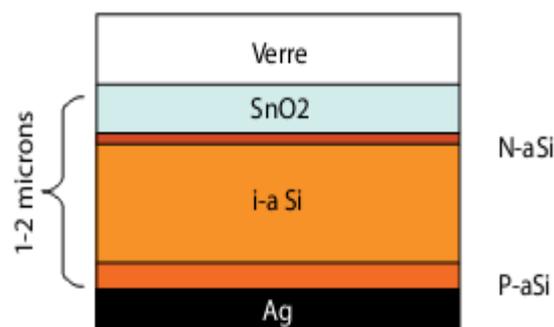


Fig. III.4. Structure de base d'une cellule à base de silicium amorphe.

La structure la plus simple d'une cellule en a-Si:H se compose d'un substrat de verre de vitre par où pénètre la lumière, où on dépose d'abord une couche d'oxyde transparent conducteur (OTC) qui récupère les charges négatives, par exemple de l'oxyde d'indium-étain (ITO), de l'oxyde de zinc (ZnO).

Une couche de a-Si de type N dopée phosphore, l'établissement d'une jonction nécessite une troisième couche de silicium de qualité intrinsèque (i, non dopé), à insérer entre les couches N et P, puis une couche de a-Si de type P dopée bore, les cellules au silicium amorphe ont donc des jonctions P-I-N. et enfin une couche métallique arrière à base d'argent (l'éclairage étant réalisé à travers le support de verre). [12]

Cette filière représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. Un rendement record de 13,4 % a été atteint en laboratoire avec des cellules solaires a-Si:H, mais les cellules commerciales affichent plutôt des valeurs comprises entre 6 et 8 %. Ces rendements sont certes moins importants que ceux des cellules cristallines, mais les entités a-Si:H ont quelques particularités qui justifient leur utilisation. Par exemple, elles réagissent bien en présence d'une faible luminosité, et peuvent donc produire un courant à l'intérieur d'une habitation. Ainsi, jusqu'en 2000, cette technologie a principalement été destinée à alimenter de petits appareils électroniques, comme des montres ou des calculatrices. [7]

Les photopiles amorphes ont, deux inconvénients suivants:

- Faible rendement en plein soleil, de 6 % à 8 %.
- Une dégradation sous lumière (instabilité dite de Staebler-Wronski), qui sont de mieux en mieux surmontés par des artifices technologiques dans les dispositifs à défaut d'explication théorique sur les mécanismes fondamentaux. Grâce en particulier à la superposition de deux ("tandems") ou trois couches actives très minces, on a réduit la dégradation sous lumière de 30 % à 15% puis 10 %. [14]

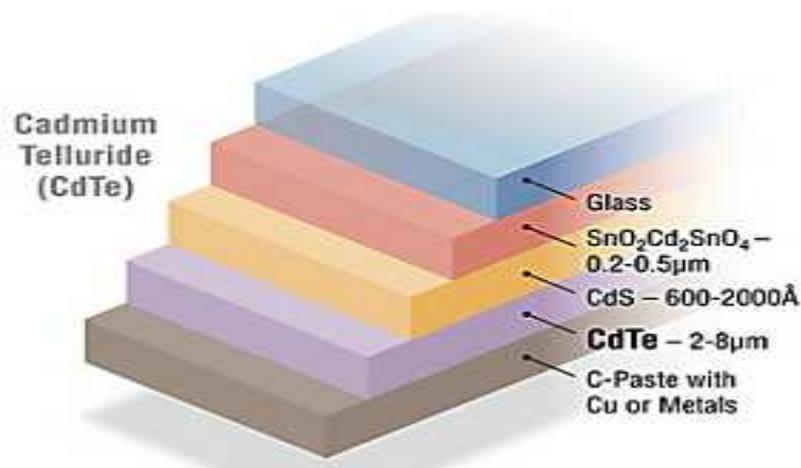
Peut-on trouver une filière qui allie les avantages du Si cristallin: haut rendement, stabilité, et ceux du silicium amorphe: économie de matière, faible consommation énergétique, et aptitude à la production de grandes surfaces unitaires ?

### III.2.2. La filière tellure de cadmium (CdTe)

La filière à base de Sulfure de Cadmium a été étudiée en 1960, il était admis que cette filière représentait l'une des approches les plus prometteuses pour le photovoltaïque terrestre. La valeur de 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de 2  $\mu\text{m}$ . [15]

Le tellure de cadmium est employé en tant que un semi-conducteur dopé P. Un autre matériau est donc requis pour réaliser la jonction PN, à savoir du sulfure de cadmium dopé N (CdS). Une telle union entre deux semi-conducteurs différents est appelée hétérojonction, les premières hétérojonctions CdTe/CdS/SnO<sub>2</sub>/Verre sont apparues en 1964 et le premier module CdS/CdTe date de 1972. [15]

La figure III.5 représente la structure d'une cellule à base de l'hétérojonction CdTe-CdS, elle se compose, de haut en bas :



**Fig. III.5. Structure de base d'une cellule à base de Tellure de Cadmium.**

- Une vitre protectrice.
- une couche conductrice transparente, par exemple faite d'oxyde d'indium-étain ou d'oxyde de zinc. Elle récolte les charges négatives sur une épaisseur de 0,2 à 0,5  $\mu\text{m}$ .
- De sulfure de cadmium CdS dopé N d'épaisseur de 0,06 à 0,2  $\mu\text{m}$ .

- De tellurure de cadmium dopé P d'épaisseur de 2 à 8  $\mu\text{m}$ .
- De la couche conductrice inférieure métallique. Elle est parfois fabriquée à partir d'une pâte de carbone enrichie en cuivre.
- Du substrat, dont la nature peut varier selon les propriétés désirées (souple ou rigide). [7]

D'un point de vue rendement énergétique, la filière CdTe, présente des rendements de cellules record de 17 % en laboratoire et des modules commerciaux à près de 11 % où les coûts de fabrication semblent être compétitifs avec la filière c-Si. Les recherches montrent que le CdTe pourrait atteindre un rendement de 15% pour un prix de 0.5€/W<sub>c</sub> à moyen terme [16].

Malgré les remarquables rendements obtenus et excédant les 15 %, des problèmes freinent encore cette filière à savoir :

- La sensibilité de cette cellule à la vapeur d'eau (problème de moisissure).
- On ne sait toujours pas bien contrôler le dopage de type P du CdTe, naturellement N, à cause des lacunes de Cd. Un traitement avec Cd Cl<sub>2</sub> est trouvé bénéfique. Tout à la fois, il passive les grains, accroît leur taille et dope. On doit ajouter une couche ZnTe de type P, ce qui complique encore les procédés, rajoutant deux interfaces à caractériser.
- Un autre problème difficile à résoudre est la formation d'un contact ohmique sur le CdTe à la fois bon et stable dans le temps. On cherche à enrichir la surface en Te pour minimiser la résistance de contact. Beaucoup utilisent une couche intermédiaire de graphite ou de carbone entre le CdTe et le métal. Il reste enfin un manque de compréhension dans la formation de la jonction PN. Il semblerait qu'on ait affaire à une jonction NP enterrée dans la couche de CdTe.
- Les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du Cadmium empoisonnent les tentatives de développement stratégique de cette filière. , L'élément Cd présente une toxicité certaine quand on s'y trouve exposé de façon chronique (dans le long terme, il peut provoquer des dysfonctionnements rénaux ou des cancers du poumon); les composés du Cd tels que CdO, CdCl<sub>2</sub>, CdSO<sub>4</sub>, sont très solubles dans l'organisme humain. Ils sont donc dangereux, surtout au cours du processus de fabrication. Les fumées de CdO en particulier peuvent être très nocives. [1]

### III.2.3. La filière chalcopyrite basée sur le Cu-III-VI

L'émergence des cellules solaires, basées sur des matériaux à structures chalcopyrites, a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$  par S. Wagner et coll de Bell Téléphone en 1974-1975 [15].

Le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) dont la conductivité est de type P, est un matériau composé de type I-III-VI, d'une structure chalcopyrite très prometteur, le rendement théorique de l'hétérojonction  $\text{CdS}/\text{CIS}$  se situe autour de 25 %. Cependant, sa faible bande interdite ( $E_g = 1,02 \text{ eV}$ ) limite la tension de circuit ouvert et donc le rendement de la photopile. Afin de dépasser ce problème, des travaux portent aujourd'hui sur l'introduction des atomes de Ga qui se substituent partiellement à l'In, de façon à élargir sensiblement la bande interdite. [6]

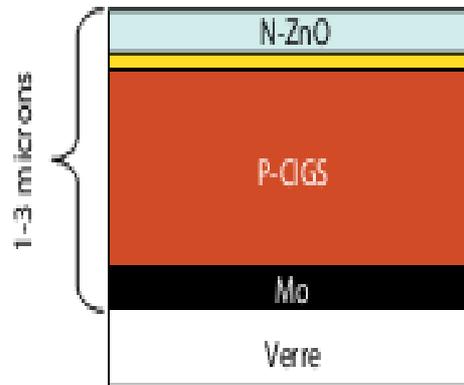
Les cellules à base de composés chalcopyrites quaternaires du type  $\text{Cu}(\text{Ga}, \text{In})(\text{Se}, \text{S})_2$  ont récemment atteint des rendements de 17 %. Les principales améliorations sont venues de l'élargissement de la bande interdite du  $\text{CuInSe}_2$  par l'utilisation d'alliages du type  $\text{CuGaSe}_2$  et  $\text{CuInS}_2$ . [1]

Le coefficient d'absorption a le même seuil que celui du c-Si mais est 100 à 1000 fois plus fort dans la gamme 1.1 à 2.6 eV. La conductivité électrique est contrôlée par les écarts à la stœchiométrie, en particulier par le rapport Cu/In. [1]

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 dominant sont liés aux lacunes de Cu et les niveaux donneurs aux lacunes de Se. L'utilisation du ZnS, en plus d'éviter le cadmium toxique, a l'avantage d'une bande interdite plus large (3.2 eV contre 2.4 eV) : ce qui permet des densités de courants plus fortes [1]

Bien que la majeure partie de la production de cellules CIGS soit faite sur des substrats de verre de silicate sodocalcique de 1 à 3 mm d'épaisseur, on voit apparaître progressivement de nouveaux substrats souples compatibles avec la filière couche mince. Ces nouveaux substrats (métal ou plastique) présentent les avantages d'être plus légers que le verre, plus faciles à mettre en œuvre et surtout moins coûteux. Ces caractéristiques font d'eux des supports de choix pour le futur. [16]

La figure III.6 représente la structure d'une cellule à base de l'hétérojonction CGIS-CdS, elle se compose, de haut en bas :



**Fig. III.6. Structure de base d'une cellule à base de CIGS.**

Les cellules CGIS sont constituées par empilement. Tout d'abord, une couche métallique de molybdène de  $0.5 \mu\text{m}$  d'épaisseur est déposée sur du verre de vitre pour réaliser le contact arrière. Puis on vient déposer une couche CIGS de type P, d'environ  $1.5 \mu\text{m}$ . Suit une couche de CdS ou de ZnS (pour Sulfure de Cadmium et Zinc Sulfuré) d'environ  $50 \text{ nm}$ , et enfin une couche conductrice transparente en oxyde de zinc (ZnO) intrinsèque de  $450 \text{ nm}$  d'épaisseur (elle est souvent précédée d'une couche de ZnO dopée à l'aluminium) de type N, servant de contact avant conducteur et transparent. Finalement, la cellule est encapsulée par couverture par une vitre comme représenter sur la figure III.6. [16]

La filière CIGS (cuivre indium gallium sélénium), utilisée sous forme d'une couche mince poly-cristalline. Les meilleurs rendements obtenus étaient de 19,9% en laboratoire et atteint 12% pour les cellules industrielles.

Divers pistes existent pour essayer de remplacer les matériaux chers comme l'InGa par l'Al. De plus il est nécessaire de trouver des solutions pour moins gaspiller la matière première active pendant la fabrication. Autre composé quaternaire envisageable : CuInAlSe<sub>2</sub> qui atteint en laboratoire un rendement de 16,9%. [17]

Les cellules CIGS sont plus minces que leurs homologues cristallins et moins dangereuses pour les ouvriers, les fabricants et l'environnement que les structures au tellure de cadmium. Elles ne sont pas pour autant dépourvues d'inconvénients :

- Une inquiétude cependant : les ressources en matières premières. Ces nouvelles techniques utilisent des métaux rares comme l'indium dont la production mondiale est de 25 tonnes par an et le prix d'avril 2007 de 1.000 dollars le kg ; le tellure dont la production mondiale est de 250 tonnes par an ; le gallium d'une production de 55 tonnes par an ; le germanium d'une production de 90 tonnes l'an. Bien que les quantités de ces matières premières nécessaires à la fabrication des cellules solaires soient infinitésimales, un développement massif mondial des panneaux solaires photovoltaïques en couches minces sans silicium ne manquerait pas de se heurter à cette disponibilité physique limitée. [14]
- Pour information, il en faut environ 5 g pour construire un panneau solaire CIGS, et 1 g pour fabriquer un écran plat de 15 pouces. Selon diverses estimations, les réserves mondiales d'indium seront épuisées d'ici une vingtaine d'années.' [7]

Le tableau ci-dessous donne le comparatif des rendements des différents types de cellules de la première génération et la deuxième génération.

		Rendement		Cout (+++ = le plus cher)	Disponibilité matière première	durabilité
		industriel	laboratoire			
<b>Silicium cristallin (1<sup>ère</sup> génération)</b>	<b>Monocristallin</b>	15 à 20 %	25 %	+++	Forte	+++
	<b>Multi-cristallin</b>	12 à 16 %	20 %	++	Forte	+++
<b>Couches minces 2<sup>ème</sup> génération)</b>	<b>Silicium amorphe</b>	7 %	13 %	+	Forte	+
	<b>CdTe</b>	11 %	17 %	+	Faible (tellure) Toxicité cadmium	++
	<b>CIGS</b>	12 %	20 %	+	Faible (indium, mais ressources mal connues et possibilité de substitution)	++

Tableau III.1. Avantages et inconvénient du silicium cristallin et des couches minces. [9]

L'impact environnemental d'une cellule doit être pris en compte lors de sa fabrication. Tenter de régler le problème de l'approvisionnement en électricité propre (du point de vue émission de gaz à effet de serre) en utilisant des matériaux toxiques ou non recyclables n'est pas une option : c'est ce qui limite les cellules CdTe dans leur développement, par exemple. La disponibilité des matériaux peut être un autre facteur limitant, l'un des inconvénients majeurs des cellules CIGS provient du fait que le sélénium, l'indium et le gallium sont des matériaux dont les ressources sont limitées. Ceci a par conséquent conduit à l'émergence d'une troisième génération de cellules solaires, encore au stade de développement mais aux perspectives prometteuses pour l'avenir proche. [5]

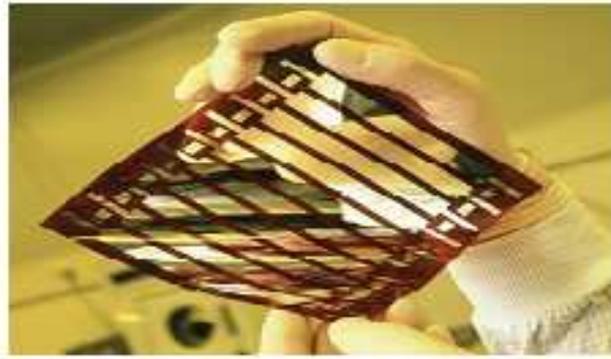
### III.3. La troisième génération

De nouvelles cellules sont en développement dans les laboratoires, les cellules organiques et les cellules de CZTS sont en phase de recherche et présentent pour l'instant des rendements relativement faibles. La production des cellules multi-jonctions est quant à elle exclusivement réservée aux applications spatiales.

#### III.3.1. Cellules organiques et plastiques

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor. Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang [18] montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion [19].

Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules humides et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures). [18]



**Fig. III.7. Cellule solaire tout organique sur substrat souple.**

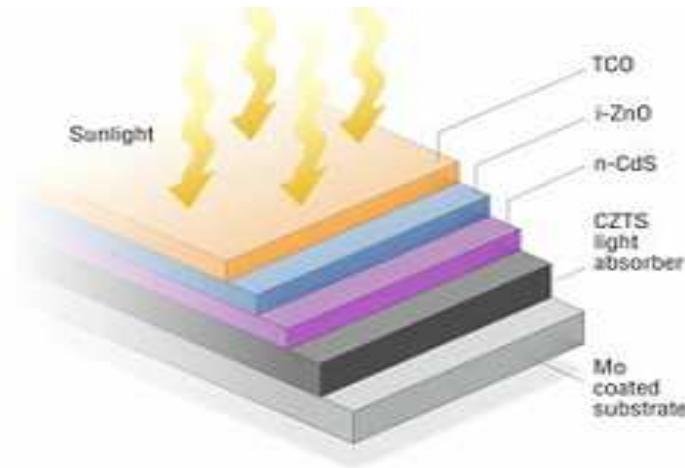
L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées en grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques. Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. [20]

### III.3.2. Les cellules CZTS

De nouvelles cellules sont déjà en cours de développement en prévision de la pénurie probable d'Indium. Cependant, remplacer les cellules au CIGS représente un véritable défi tant cet absorbant est efficace. Elle possède des propriétés optiques et électroniques similaires à celle au CIGS, tout en ayant l'avantage d'être composée d'éléments abondants (à l'inverse du tellure ou de l'indium) et non toxiques pour la santé ou l'environnement (le cadmium). Par ailleurs, ses constituants de base seraient cinq fois moins coûteux que ceux de la filière CIGS. Les cellules CZTS renferment en réalité un absorbant fait de cuivre, de zinc, d'étain, de soufre et de sélénium, de formule  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ . L'ajout d'un autre semi-conducteur dopé N est requis pour former une hétérojonction, comme pour les cellules CIGS. [21]

La structure et la fabrication des cellules CZTS et CIGS sont similaires. Seules les conditions optimales d'assemblage varient d'une filière à l'autre. Les substrats peuvent eux aussi être rigides ou souples.

La figure III.8 représente la structure d'une cellule à base de l'hétérojonction CZTS – CdS.



**Fig. III.8. Structure de base d'une cellule à base de CZTS.**

Le rendement expérimental des cellules CZTS atteint à peine 11,1 %, soit la moitié de celui des cellules CIGS. Or, le rendement des modules solaires est toujours inférieur à celui des cellules, ce qui explique que la technologie CZTS n'ait pas encore été industrialisée. Seul le faible rendement des cellules CZTS pose actuellement le problème. [7]

### III.3.3. Les cellules multi-jonctions

Dans une simple jonction PN, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée. Donc, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants. [16]

Les cellules à multi-jonction s'obtiennent en empilant plusieurs entités photovoltaïques différentes les unes sur les autres, ce qui permet de convertir une plus grande partie du spectre lumineux (ondes courtes, ondes moyennes, rayonnement infrarouge). [7]

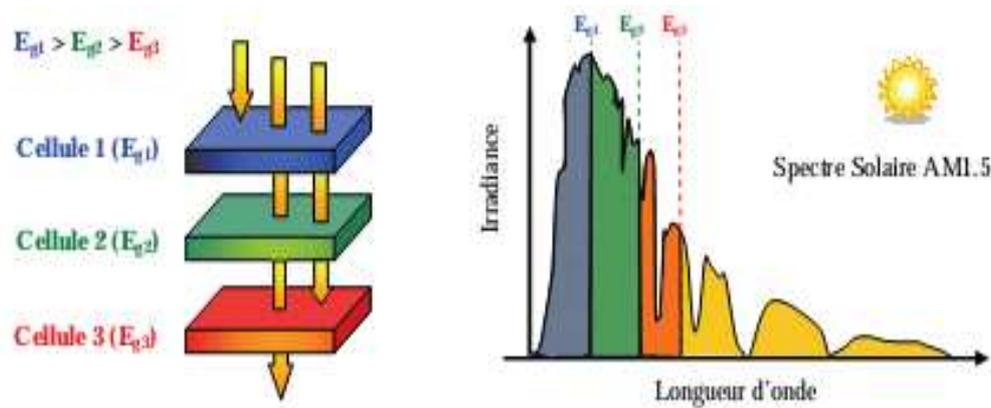


Fig. III.9. Principe de la cellule à hétérojonction.

Des cellules photovoltaïques multi-jonctions à base d'associations de matériaux semi-conducteurs I II-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, etc.) ont ainsi été mises au point depuis les années 60 présentant des rendements très élevés supérieurs parfois à 40%. Elles ne sont pas connues du grand public à cause de leur coût de fabrication. [16]

Ces types des cellules sont couramment exploités dans l'industrie spatiale, mais pas par les particuliers, tant elles sont coûteuses. Cependant, cette technologie n'est efficace qu'à une seule condition : les panneaux doivent suivre la course du Soleil. En effet, le rayon lumineux concentré doit en permanence être axé sur la cellule si l'on souhaite générer un courant. [7]

#### III.3.4. Les cellules solaires à boîtes quantiques

Le domaine des nanotechnologies n'a pas encore été abordé dans ce dossier. Il est pourtant prometteur, bien que toujours expérimental. Les boîtes quantiques sont des nanocristaux semi-conducteurs mesurant moins de 10 nm. Ces boîtes présentent deux caractéristiques importantes : elles captent la lumière à différentes longueurs d'onde, et sont faciles à produire à moindre coût. Les cellules à boîtes quantiques se composent d'une plaque de verre qui est recouverte par de l'oxyde d'étain dopé au fluor. Il sert de conducteur transparent. Un matériau semi-conducteur, comme le dioxyde de titane ou l'oxyde de zinc, est alors posé sur cette couche, avant d'être lui-même recouvert par les boîtes quantiques. Le tout est finalement fixé par un oxyde de molybdène, de l'or et de l'argent. L'épaisseur totale du dispositif est d'environ 1,5  $\mu\text{m}$  [7].

Un rendement record de 7 % est actuellement détenu par des chercheurs de l'université de Toronto, au Canada. Cependant, il serait théoriquement possible d'atteindre des valeurs de 60 à 83 % [7].

#### **IV. Conclusion**

Les perspectives ouvertes par la conversion photovoltaïque sont très importantes et variées. C'est un domaine en pleine ébullition tant au niveau industriel qu'au niveau de la recherche, tout d'abord autour de la filière principale au silicium, mais aussi dans la filière des couches minces non silicium, puis dans de nouvelles filières exploitant des concepts ou matériaux nouveaux et enfin dans l'émergence d'une recherche sur les très hauts rendements.

Dans ce chapitre, la première partie est consacrée à un bref historique sur l'énergie soleil, Elle est suivie d'une deuxième partie qui a présenté les différentes technologies des cellules photovoltaïques, leurs avantages, leurs inconvénients, mais aussi leurs performances actuelles.

## Références bibliographiques

- [1] Alain Ricaud « L'électricité photovoltaïque » Document de synthèse 2009, La Maison ZEN – Le Chef-Lieu – 73 000 MONTAGNOLE Tel:+33(0)4 79 25 31 75Fax:+33(0)4 79 25 33 09
- [2] Historique de la cellule : Historique de la cellule photovoltaïque - TPE énergie photovoltaïque.htm
- [3] Mathieu Urien « Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible » Thèse de doctorat, Université Bordeaux, 2008
- [4] Science Université de Nantes :  
<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/recherche/lamp/fr/photop/part3.pdf>
- [5] Mostefa Kara Selma « Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS ». Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkid de Tlemcen, 2012
- [6] Assia BOURAIYOU « Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe<sub>2</sub> par Électrodéposition » Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, 2009
- [7] Quentin Manguit « Les cellules photovoltaïques, cœur des panneaux solaires », 2012  
Source : <http://www.futura-tournesoleil.fr/Documentation/1688-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-c25ff0b.pdf>
- [8] Nichiporuk Oleksiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités » Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005
- [9] « Le développement de la filière photovoltaïque française », Source : Mission et étude PricewaterhouseCoopers « L'État de la filière photovoltaïque en France – 2010 ».
- [10] HELALI KAMELIA « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012
- [11] Bensmain Asmaa « analyse et optimisation des paramètres photovoltaïques dans les cellules solaires a hétérojonction Silicium Amorphe/cristallin » Mémoire de magister, Université Djillali Liabes-Sidi Bel Abbes, 2011
- [12] DANIEL LINCOT Directeur de recherches au CNRS « La conversion photovoltaïque de

---

l'énergie solaire »,2007 [www.martin-bucher.de,Stuttgart/Germany](http://www.martin-bucher.de,Stuttgart/Germany)

- [13] Abdallah Benyoucef, « Développement de Surfaces à Base de Dioxyde De Titane par PVD Pour Une Application Aux Cellules Solaires», Thèse de doctorat
- [14] Site Web : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_photovolta%C3%AFque.htm](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque.htm)
- [15] Djeriouat Khadidja «Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions: GaInP/GaAs ». Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen, 2011
- [16] PETIBON Stéphane «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques». Thèse de doctorat, Université Toulouse, 2009
- [17] DIB Wassila «Modélisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliqués ». Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen, 2010
- [18] Vighetti Stéphane « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [19] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [20] Loïc Bailly « Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [21] Bulletin de Veille Technologique N°28 du 15/09/2012 [www.industrie.com](http://www.industrie.com)

# Chapitre 04 :

## Étude Et Techniques De Fabrication De La Cellule

Solaire

CdS/CuS

## I. Introduction

Le sélénure de cuivre, d'indium et de gallium ( $\text{CuInGaSe}_2$ ) ou (CIGS) dans sa structure chalcopyrite est un semi-conducteur promoteur pour les applications photovoltaïques, ce qui est 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 le CIGS comme un matériau de base dans la fabrication des composants électroniques pour satisfaire des besoins industriels spécifiques.

Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu sur les propriétés fondamentales du CIGS, à savoir sa structure cristalline, son diagramme d'équilibre, ses propriétés électriques et optiques. Ceci sera suivi par des brèves définitions de quelques techniques et méthodes expérimentales les plus sollicitées pour le dépôt de ce matériau.

## II. Présentation des matériaux chalcopyrites CIS et CIGS

Le rendement d'une telle cellule solaire est fortement dépendant des propriétés du matériau absorbeur. Dans le cas présent on s'intéresse plus particulièrement aux composés  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CuGaSe}_2$ ,  $\text{CuInS}_2$ ,  $\text{CuGaS}_2$ , et leurs alliages, regroupés sous le terme  $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{1-y}\text{S}_y)_2$  noté CIGS, sa structure cristalline ainsi que sa composition qui peut fortement influencer ses propriétés optiques et électroniques. La bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire dans le but d'optimiser le rendement d'une cellule solaire à base de CIGS. [1]

C'est en 1876 que le premier composant photovoltaïque à base de semi-conducteur a été réalisé en élaborant mécaniquement une couche de sélénium entre deux électrodes. Mais l'introduction de cuivre et de l'indium n'a été effectuée qu'un siècle plus tard, en 1973, par Wagner et ses collaborateurs qui ont obtenus des rendements de 12% à partir d'un monocristallin de  $\text{CuInSe}_2$ . [2]

Le Cuivre Indium Gallium Sélénium (CIGS) est un semi-conducteur en solution solide. La concentration d'indium et de gallium peut varier du sélénure de cuivre et d'indium pur ( $x=1$ , CIS) à du sélénure de cuivre et de gallium pur ( $x=0$ , CGS). Ainsi, son gap varie continuellement avec  $x$ , de 1.0 eV pour CIS aux environs 1.7eV pour le CGS. [3]

Dans le tableau IV.1 nous présentons les composés ternaires chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement  $\text{CuGaSe}_2$ ,  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{Cu (In, Al) Se}_2$  et  $\text{Cu (In, Ga) Se}_2$ . [4]

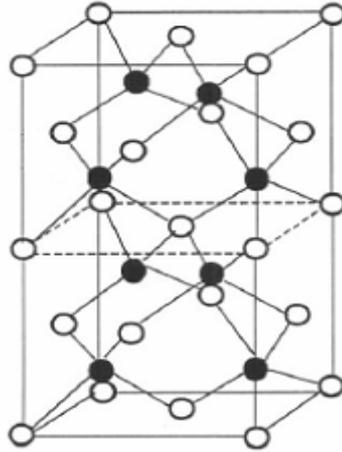
Matériau	a (nm)	c (nm)	$E_g$ (eV)	Rendement (%)
$\text{CuGaSe}_2$	0.560	1.099	1.67	8.3
$\text{CuInSe}_2$	0.577	1.155	1.02	15.4
$\text{Cu (In, Al) Se}_2$	0.575	1.145	1.16	16.9
$\text{Cu (In, Ga) Se}_2$	0.572	1.143	1.12	18.8

**Tableau IV.1. Les caractéristiques structurales, optiques et le rendement de chaque couche mince.**

## II.1. La structure cristalline

Le sélénure de cuivre et d'indium  $\text{CuInSe}_2$  (noté généralement CIS ou CISE) appartient à la famille I-III-VI<sub>2</sub> des semi-conducteurs, il se cristallise sous deux formes allotropiques ; à savoir la structure sphalérite et la structure chalcopyrite.

La structure est de type sphalérite s'il y a distribution aléatoire des sites cationiques, elle appartient au système cubique à faces centrées, là où les cations (atomes de Cu et In) sont répartis au hasard sur les sites du réseau et les anions (atomes de Se) sont aux centres des tétraèdres cationiques et forment un réseau cubique à faces centrées. La maille primitive contient donc deux différents types d'atomes, et la structure devient Zinc Blende, comme la structure de ZnS. [5]

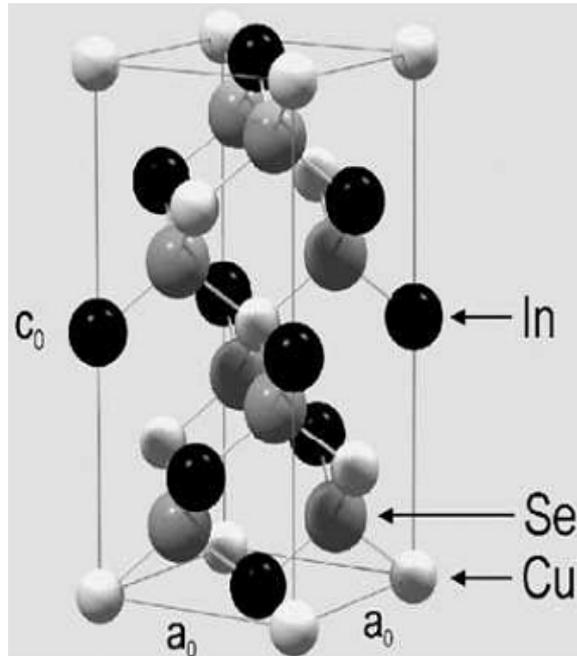


**Fig. IV.1. Structure cristalline du semi-conducteur  $\text{CuInSe}_2$  (Structure Zinc blinde de  $\text{ZnS}$ ) : ● Zn, ○ S**

La structure chalcopyrite du  $\text{CuInSe}_2$  appartient au système tétragonal, elle est formée par la superposition suivant l'axe  $c$  de deux cellules cubiques. La maille élémentaire primitive de cette structure est constituée de huit atomes (deux atomes de cuivre  $\text{Cu}$ , deux atomes d'indium  $\text{In}$  et quatre atomes de sélénium  $\text{Se}$ ). Dans cette structure, l'atome de sélénium a deux liaisons avec l'atome de cuivre et deux liaisons avec l'atome d'indium. Par convention, la petite arête nommée  $a$  et la longue arête nommée  $c$  ; et pour que cette structure ait une symétrie tétragonale idéale, le rapport ( $c/a$ ) doit être égal à 2.

Et comme les forces de liaisons entre l'atome de  $\text{Se}$  et l'atome de  $\text{Cu}$  et celles de  $\text{Se}$  et d' $\text{In}$  sont différentes, la structure tétraédrique devienne stressée et la valeur de  $c$  subi un changement relative par rapport à la valeur de  $a$ . Cette distorsion peut être estimée par le rapport ( $2 - c/a$ ). Les paramètres  $a$  et  $c$  pour le  $\text{CuInSe}_2$  sous sa structure chalcopyrite sont respectivement  $5.784 \text{ \AA}$  et  $11.614 \text{ \AA}$ . [5]

La figure suivante montre la prétendue structure chalcopyrite de ce composé, qui essentiellement, est comme une maille de diamant composé des cellules d'unité tétragonale à face centrée.



**Fig. IV.2. Structure cristalline du semi-conducteur CuInSe<sub>2</sub> (Structure chalcopyrite).**

Dans le cas du CIGS, les sites des atomes du groupe III sont donc occupés par des atomes d'In ou de Ga, dans des proportions dépendant de la composition de l'alliage. [1] En d'autres termes, le CIGS est une solution solide de CuInSe<sub>2</sub> et de CuGaSe<sub>2</sub>, où la concentration d'indium et de gallium peut varier entre du sélénure de cuivre et d'indium pur, et du sélénure de cuivre et de gallium pur. [6]

## II.2. Diagramme de phase de CuInSe<sub>2</sub>

Le diagramme de phase pseudo-binaire des composés Cu<sub>2</sub>Se-In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> est représenté sur la figure IV.3, alors que la majorité des phases obtenues lors de l'élaboration du CIS (incluant la structure chalcopyrite  $\alpha$ -CIS) sont situées autour de la ligne de jonction entre ces deux derniers composés. Sachant que le sélénium est généralement apporté en excès lors des procédés d'élaboration du CIS, mais essentiellement le rapport atomique ( $Cu/In$ ) qui détermine la position de phases formées sur cet axe.

Le composé chalcopyrite  $\alpha$ -CIS existe dans une gamme de composition restreinte comprise entre 23,8 et 24,8 % atome de Cu, ce qui correspond à un rapport  $\text{Cu}/\text{In}$  compris entre 0,9 et 0,98, entre la température ambiante et 700°C. [7]

Au delà de 700°C, une phase désordonnée de type sphalérite (S) apparaît où les sites des cations sont aléatoirement occupés par Cu ou In. [1]

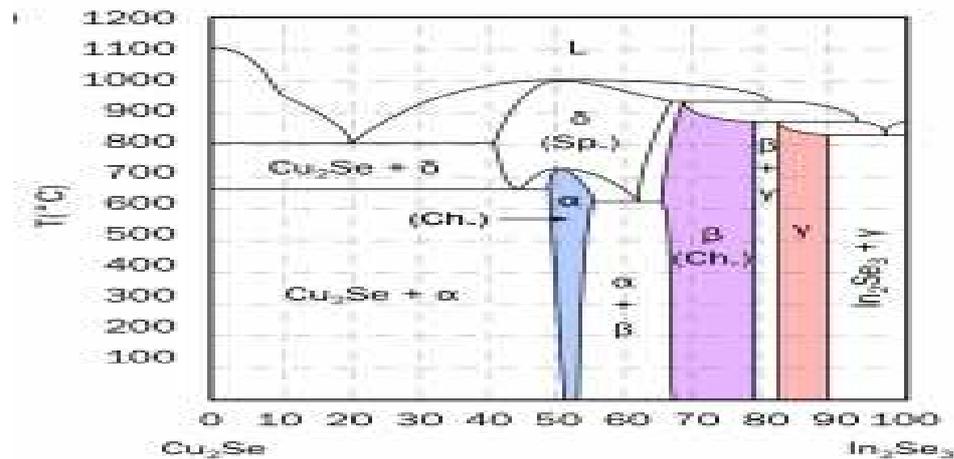


Fig. IV.3. Diagramme de phase pseudo-binaire de  $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$  (Ch.: chalcopyrite)

(Sp.: signifie sphalérite).

Dans la plupart des cas, les phases secondaires qui sont riches en Cu se manifestent comme des défauts électriquement actifs apparaissant dans le gap de couche. Cette configuration n'est pas souhaitable pour réaliser des dispositifs photovoltaïques car la présence de phases du type  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  conductrices aux joints de grain du CIS peut être la source de court-circuit. Ces phases peuvent être considérées comme des  $(2V_{\text{Cu}} + \text{In}_{\text{Cu}}^{2+})$  toutes les  $n$  mailles élémentaires de  $\alpha$ -CIS. [1]

Le domaine de phases  $\beta$  est dû à la répétition périodiques d'un défaut ordonné dans toutes les  $n$  mailles élémentaires de la structure chalcopyrite  $\alpha$ -CIS, appelées phases CCD (Composé commandé de défaut). Par exemple, le défaut du type  $2V_{\text{Cu}} + \text{In}_{\text{Cu}}^{2+}$  c'est-à-dire deux lacunes de cuivre et une substitution d'un atome de cuivre par un atome d'indium électriquement neutre, de basse énergie de formation, ne présente pas de transition dans la bande interdite et permet un excès d'indium, sans altérer les performances de la cellule [8].

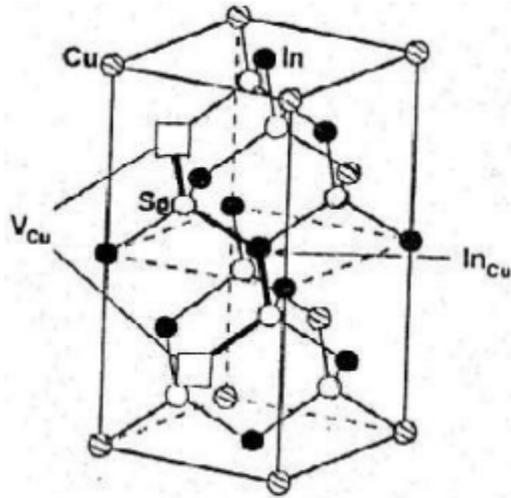


Fig. IV.4. La structure d'une paire spéciale de défaut.

Néanmoins, tous les défauts ne sont pas favorables : des défauts de substitution, tels que les anti-sites de cuivre-sur-indium ( $Cu_{In}$ ) et les anti-sites d'indium-sur-cuivre ( $In_{Cu}$ ) peuvent être présents, et agir comme centres de recombinaison. La présence d'un nombre plus faible de défauts implique moins de pertes par recombinaison dans le volume de l'absorbeur. Et afin de dépasser ce problème, des travaux portent aujourd'hui sur l'introduction une quantité optimale des atomes de Ga ( $(Ga/(In + Ga)) = 0,3$  pour diminution la densité de défauts dans un composé  $CuInSe_2$ . [8]

### II.3. La bande interdite

Le système de chalcopyrites à base de cuivre  $Cu(In,Ga)Se_2$  comprend une large gamme d'énergies de bande interdite, couvrant la plupart du spectre visible. Tous ces composés ont une bande interdite directe les rendant aptes comme un matériau absorbeur de cellule photovoltaïque en couche mince. [9]

Le  $CuInSe_2$  et le  $CuGaSe_2$  sont des matériaux semi-conducteurs possédant respectivement des gaps directs de 1.035eV et 1.68eV. Et comme nous l'avons vu précédemment, le CIGS est une solution solide de ces deux matériaux où son gap peut être ajusté en fonction du taux de gallium. [1]

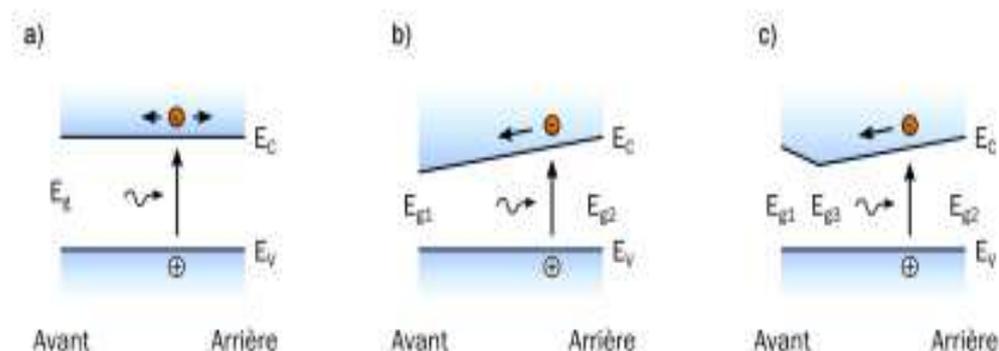
La bande interdite de CIGS dépend du taux de Ga (noté  $x$ ) de la couche et peut se calculer selon l'équation suivante :

$$E_g = 1.02 + 0.67x - Bx(1 - x) \quad (\text{IV.1})$$

Avec  $x = \left( \frac{Ga}{In + Ga} \right)$  le taux d'atomes de gallium qui remplacent les atomes d'indium dans la structure. Et  $B$  est une constante optique dont les valeurs reportées dans la littérature varient dans l'intervalle  $[0,11 ; 0,24]$ . [10]

Bien qu'il soit bénéfique d'ajouter le Ga pour améliorer les propriétés de CIS, il y a une limite à laquelle il sert favorable. Une teneur plus élevée en Ga de 40% a un effet néfaste sur la performance du dispositif, parce qu'elle effectue négativement les propriétés de transport du film d'absorbeur de CIGS. Les dispositifs courants et à haute efficacité sont préparés avec des énergies de gap dans la gamme de 1.20-1.25 eV, ceci correspond à un rapport de  $\left( \frac{Ga}{In + Ga} \right)$  entre 25 et 30%. [9]

La figure IV.5 présente les 3 types de gradients de gap principalement rencontrés dans les cellules CIGS :



**Fig. IV.5. Principaux types de gradients de bande interdite dans les couches de CIGS a) Bandes plates, b) Simple gradient, c) Double gradient avec présence d'un notch.**

- Dans le cas des bandes plates (a) où aucun gradient n'est présent, le transport des électrons n'est pas particulièrement influencé par la structure de bandes.

- Dans le cas dit d'un gradient simple (b), le gap au contact arrière ( $E_{g2}$ ) est plus grand que le gap au contact avant ( $E_{g1}$ ). La différence de potentiel induite facilite ainsi le transport des électrons vers la zone de charge d'espace. De plus, du fait de la présence d'un plus grand gap au contact arrière, les recombinaisons dans cette même zone sont réduites.
- Le troisième profil de gap est appelé double gradient (c). Il est en effet composé d'une première zone allant du contact arrière ( $E_{g2}$ ) jusqu'à une position communément appelée notch, d'un gap plus faible ( $E_{g3}$ ). Ce premier gradient présente les mêmes avantages que le profil simple (différence de potentiel et plus large gap au contact arrière). Dans la seconde partie, le gradient est inversé et remonte jusqu'à un gap  $E_{g1}$ . Ce dernier permet d'augmenter le gap effectif à l'hétérojonction et de limiter les recombinaisons à l'interface avec la couche de type N (CdS). Ainsi, dans la configuration en double gradient, la valeur du gap minimum ( $E_{g3}$ ) sera déterminante pour l'absorption des photons et donc le courant en court-circuit ( $I_{cc}$ ). De même, les valeurs des gaps maximums ( $E_{g1}$  et  $E_{g2}$ ) influenceront sur la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) [1]. De nombreuses études ont montré que les meilleurs rendements étaient obtenus par augmentation de la largeur de bande interdite au niveau des interfaces avant et arrière du CIGS (interfaces CdS/CIGS et Mo/CIGS). [7]

#### II.4. Dopage

Le CIGS est un matériau auto-dopé (intrinsèquement dopé), qui signifie que, lorsque le composé est formé, il devient automatiquement soit de type P ou de type N, en fonction de la composition. Ce dopage est dû à la présence de défauts intrinsèques. Les défauts intrinsèques primaires, qui s'appellent également les défauts naturels, comprennent les lacunes de cuivre ( $V_{Cu}$ ), les anti-sites de Cuivre sur Indium ( $Cu_{In}$ ), les anti-sites d'Indium sur cuivre ( $In_{Cu}$ ), et les lacunes de sélénium ( $V_{Se}$ ). Les deux premiers produisent les défauts de type accepteur (type P), tandis que les deux derniers provoquent les défauts de type donneur (type N). [9]

Comme nous avons cité auparavant, ce matériau peut présenter une conductivité de type N ou P et ceci par excès ou manque de Sélénium. Des recherches ont montré qu'en agissant sur les rapports  $\frac{Cu}{In}$  et  $\frac{Se}{(Cu + In)}$  on peut changer le type de conduction dans le semi-conducteur  $CuInSe_2$ . [5]

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

**Tableau IV.2. Type de conduction dans  $CuInSe_2$  en fonction des rapports  $\frac{Cu}{In}$  et  $\frac{Se}{(Cu + In)}$ .**

Selon les deux rapports (généralement désigné sous le nom du rapport en métal), Le matériau  $CuInSe_2$  peut être rendu riche en Cu (Cu-riche) ou riche en In (In-riche).

Le matériau Cu-riche est fortement conducteur, principalement en raison de la présence des espèces de cuivre de sélénure non réagies. La performance des piles solaires qui ont des couches d'absorbeur riches en Cu est habituellement diminuée. Ceci a été attribué au sélénure de cuivre mentionné ci-dessus formant entre les joints de grain, ce qui court-circuite la jonction PN. [9]

Le matériau  $CuInSe_2$  riche en In, d'autre part, ne contient pas l'espèce de Sélénure de Cuivre. Ce type de matériau peut être soit de type N ou de type P. Habituellement, les défauts donneur  $In_{Cu}$  et les défauts accepteur de  $V_{Cu}$  sont présents en ce matériel en même temps, réduisant la conductivité de la couche (le prétendu effet de compensation). [9]

## II.5. Coefficient d'absorption

Si le CIGS est utilisable dans des dispositifs photovoltaïques en couches minces, c'est parce qu'il possède un gap direct. De ce fait, l'absorption des photons ayant une énergie proche du gap ne nécessite pas l'intervention de phonons et il en résulte un coefficient d'absorption très élevé, plus grand que  $10^5 \text{cm}^{-1}$  dans le domaine du visible et le proche infrarouge. Pour une énergie de photon  $E = h\nu$  donnée, le coefficient d'absorption vaut approximativement:

$$\alpha(h\nu) = B\sqrt{h\nu - E_g} \quad (\text{IV.2})$$

Avec B, une constante de proportionnalité, qui dépend des densités des états liés à l'absorption de photon et E l'énergie d'irradiation.

La figure IV.6 compare le coefficient d'absorption optique du CIS (ce qui correspond au plus petit gap possible pour le CIGS, et donc la plage d'absorption maximale) à celles des autres des matériaux en fonction de l'énergie des photons incidents.

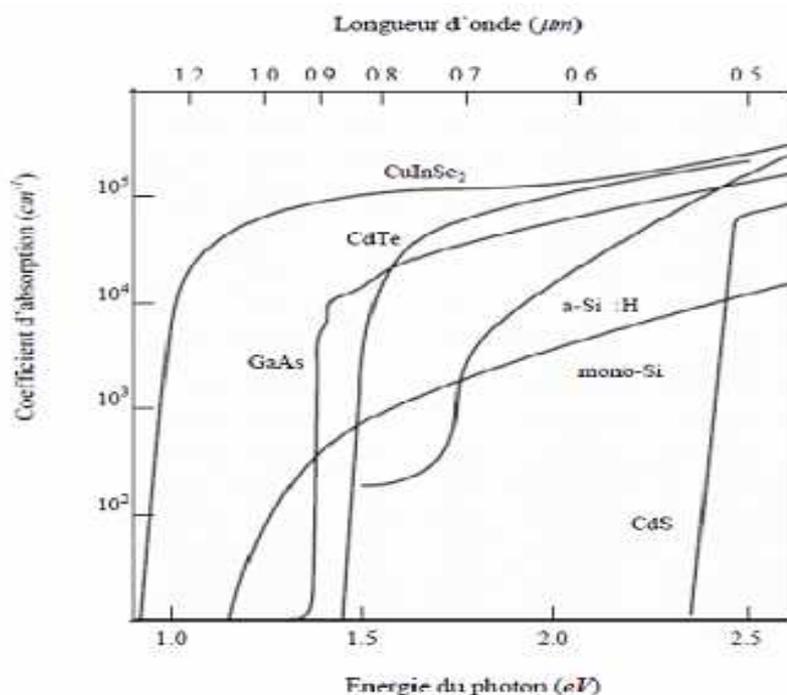


Fig. IV.6. Coefficient d'absorption des matériaux (CIS, CdTe, GaAs, a-Si: H, mono-Si et CdS).

On remarque qu'il existe un écart d'un ordre de grandeur entre les autres des matériaux et le CIS, ce qui montre l'intérêt de ce dernier pour une utilisation en couches minces. Ainsi, une couche de CIGS d'une épaisseur de  $1\mu\text{m}$  suffit à absorber 95% du spectre solaire pour les photons dont l'énergie est supérieure à  $E_g$ . [11]

### III. Structure d'une cellule photovoltaïque à couche mince à base CIGS

La structure d'une cellule solaire à couche mince à base de CIGS est représentée sur la figure IV.7.

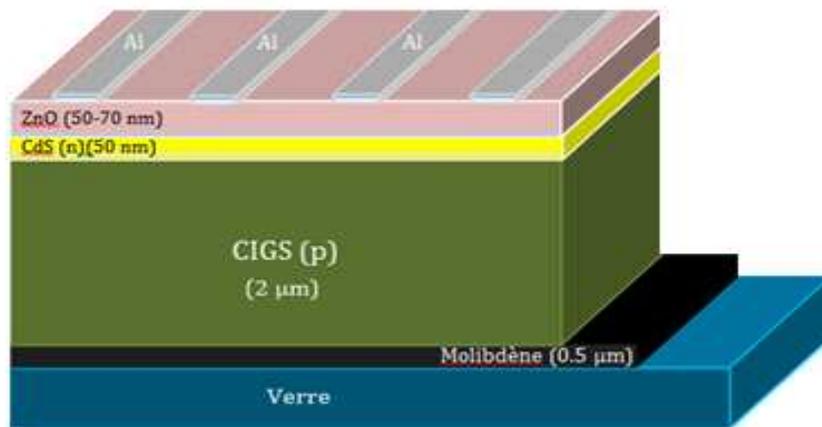


Fig. IV.7. Schéma de l'empilement typique des cellules solaires à base de CIGS.

Le substrat le plus commun est un verre sodé. Ce dernier est recouvert sur un côté de molybdène (Mo) servant de contact arrière métallique. L'hétérojonction est formée entre les semi-conducteurs CIGS et ZnO, avec une fine couche d'accord interfacique de CdS et de ZnO intrinsèque. Le CIGS a un dopage de type P, alors que le ZnO est de type N grâce à l'incorporation d'aluminium (Al). Ce dopage asymétrique est à l'origine de la région de charge d'espace qui s'étend davantage dans le CIGS que dans le ZnO. Le ZnO dopé sert également de contact face avant pour la collection de courant. Les dispositifs expérimentaux, typiquement d'une surface de  $0,5\text{ cm}^2$  présentent une grille de Ni/Al déposée sur la face avant pour contacter le ZnO ont permis d'atteindre 12,6%. [3]

### III.1. Les différentes composantes de la cellule photovoltaïque

Comme nous pouvons le voir sur la figure IV.7. Ci-dessus, il existe six éléments principaux dans la photopile en couches minces, à savoir:

#### III.1.1. Le substrat

Le substrat est le support permettant la tenue mécanique des différentes couches, dont l'empilement ne dépasse pas quelques micromètres (de 1 à 3  $\mu\text{m}$ ) d'épaisseur. Il doit répondre à différents critères chimiques et mécaniques, qui le rendent apte à suivre toutes les étapes de fabrication de la cellule, sans en détériorer la qualité, tout en ayant un coût limité. Parmi les critères retenus, on citera notamment les suivants :

- Sa rigidité,
- Son coefficient de dilatation (qui doit être proche de celui du CIGS),
- Sa température maximale d'utilisation (qui doit être adaptée au procédé),
- Son inertie chimique,
- Son état de surface qui doit être parfaitement lisse.

Il existe trois catégories de substrat : le verre, les métaux, et les polymères. Le substrat de verre sodocalcique est également approprié pour son coefficient d'expansion thermique adapté à la croissance de couches de CIGS ainsi que pour sa faible rugosité. Sa bonne tenue mécanique aux températures de synthèse élevées. [10]

#### III.1.2. Un Contact arrière

La première couche déposée sur le substrat est l'électrode de contact arrière. Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule. D'un point de vue électrique, elle constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque. Pour cela Il doit être un bon conducteur électrique, ne pas réagir avec le CIGS ou y diffuser, résister aux températures élevées rencontrées lors du procédé de fabrication du CIGS (de l'ordre de 550 à 600°C). [7] Cette couche est composée de molybdène (**Mo**) et son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. [1]

### III.1.3. La couche absorbante

Une couche absorbante est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous, elle doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de (0.95-1.05) eV, sa conductivité doit être de type P, et de l'ordre de  $1 \cdot 10^{-2} (\Omega \cdot \text{cm}^{-1})$ . [11]

Dans le cas présent, le CIGS. Il s'agit d'un semi-conducteur de type P de la famille I-III-VI, qui forme la première partie de l'hétérojonction PN. Son épaisseur est d'environ  $1 \mu\text{m}$  à  $2 \mu\text{m}$ . [4]

### III.1.4. Une Couche tampon

L'hétérojonction est formée entre la couche absorbante CIGS et l'oxyde transparent conducteur (OTC), avec une fine couche d'interface entre eux, dit couche tampon. Cette dénomination provient du fait qu'elle joue deux rôles importants : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice. Du point de vue électrique, la couche tampon permet entre autre d'optimiser l'alignement des bandes entre le CIGS et la couche fenêtre soit une valeur comprise entre 2,4 et 3,2 eV, et de limiter les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. [7]

La couche tampon de CdS qui généralement déposée par la technique de dépôt par bain chimique (CBD) permet un recouvrement optimal de la surface de la couche absorbante même pour des épaisseurs très faibles et des surfaces de CIGS à forte rugosité; ce recouvrement permet la formation de la jonction et la passivation de défauts sur toute surface libre de l'absorbeur; il permet également de protéger efficacement la surface de l'absorbeur du dépôt de la couche de ZnO par pulvérisation cathodique. [10]

Sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante, soit de l'ordre de  $10^{-3} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , en plus Elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court circuit au niveau des joints de grains. [4]

Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de sulfure de cadmium (CdS), de type N, c'est le matériau le plus utilisé, L'épaisseur

typique d'une couche tampon en CdS est d'environ 50 nm. Cependant, en raison de la toxicité du cadmium, la communauté scientifique travaille depuis déjà quelques années pour substituer la couche CdS par un film plus écologique, ne contenant plus de cadmium toxique, les matériaux les plus prometteurs étant des composés communs (Zn, Mg) (O, S)  $\text{In}_2(\text{S}, \text{Se})_3$ , etc., ou de sulfure d'indium (métal plus rare). [6]

### III.1.5. La couche fenêtre (OTC)

La couche tampon est recouverte d'une couche fenêtre. Cette couche nommée souvent l'oxyde transparent conducteur (OTC), elle doit être à la fois conductrice et transparente, de façon à collecter les électrons tout en laissant passer la lumière où sa transmission doit être supérieure à 80% dans le domaine du spectre solaire. La conductivité de ces mêmes couches doit être supérieure  $10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$ . De telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces de  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ , et les plus utilisées sont l'oxyde d'indium et d'étain et l'oxyde de zinc (ZnO). Leur transparence est liée à la valeur de leur bande interdite tandis que leurs propriétés électriques dépendent de la composition des couches et d'un éventuel dopage. [4]

La couche fenêtre permet de constituer en partie le contact avant de la cellule photovoltaïque, son épaisseur est de l'ordre de 300 nm à 500 nm. Elle est subdivisée en deux couches, l'une fine (50 à 100 nm) et très résistive, l'autre épaisse (100 à 1500 nm) et peu résistive.

La première couche est le plus souvent constituée de ZnO intrinsèque, dont la haute résistivité permettrait de réduire les courants de courts-circuits entre les deux électrodes de la cellule (le molybdène et la couche de TCO de faible résistivité).

La deuxième est fréquemment du ZnO dopé à l'aluminium (ZnO:Al), mais d'autres dopants comme le bore (ZnO:B) ou le gallium (ZnO:Ga) existent aussi. L'épaisseur et le dopage de cette couche sont ajustés de façon à combiner transparence et conductivité. [7]

### III.1.6. Un contact ohmique supérieur (grille métallique) Ni-Al

Enfin, une grille métallique est déposée sur chaque cellule afin d'améliorer l'extraction des porteurs de charge photo-générés. Ces grilles sont composées d'une superposition d'une couche de Nickel (50 nm) et d'une couche d'aluminium (2  $\mu\text{m}$ ) déposées par évaporation par canon à électron. [10] Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation d'aluminium qui forme un contact ohmique à l'avant du dispositif liée à la présence sous-jacente du TCO. A ceci est parfois ajoutée une couche anti-réflexion ( $\text{MgF}_2$ ). Ces matériaux ne sont bien évidemment pas choisis au hasard et doivent posséder des propriétés physico-chimiques bien particulières. [4]

## IV. Méthodes de dépôt

La technique d'élaboration de la couche absorbante est un paramètre clé pour l'obtention des cellules photovoltaïques avec des hautes efficacités. Pour cela une large gamme de méthodes de préparation sont développées pour cet objectif, Certaines permettent d'atteindre de très hauts rendements en laboratoire, mais le coût du procédé et sa mise en œuvre peuvent s'avérer difficiles à développer à grande échelle, tandis que d'autres sont moins efficaces, mais économiques est facilement transposables en industrie. [4]

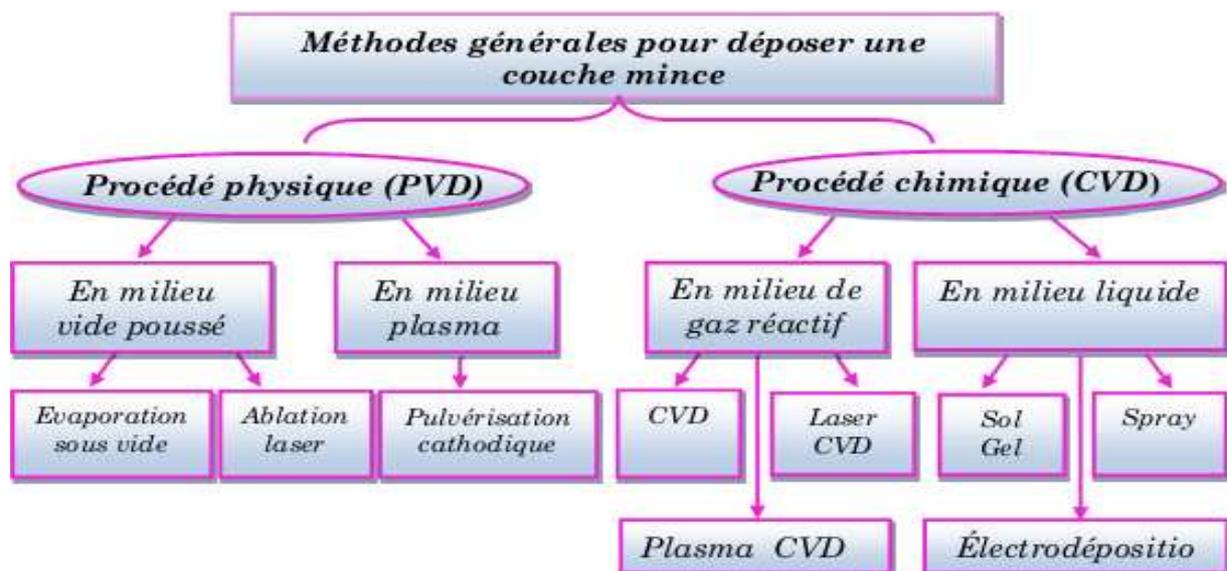


Fig. IV.8. Processus de dépôt de couches minces.

La classification des méthodes est présentée sur la figure IV.8. Pratiquement, les principales méthodes les plus connues utilisées pour élaborer les couches minces se divisent en deux techniques principales: les méthodes physiques PVD, et les méthodes chimiques CVD. Les méthodes de dépôt physiques sont en général utilisées en recherche alors que les méthodes chimiques sont également utilisées industriellement, à cause de leur meilleur rendement et la qualité des films obtenus. [15]

Dans ce qui suit, nous donnerons des brèves définitions de quelques techniques d'élaboration du CIGS. Leurs propriétés obtenues ainsi que les performances de la cellule pour chaque technique d'élaboration sont aussi citées.

## IV.1. Procédés de fabrication conventionnels

### IV.1.1. Co-évaporation

Le matériau absorbeur donnant les rendements photovoltaïques les plus élevés est le  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  avec un rapport  $\text{Ga}/(\text{Ga} + \text{In})$  de 20% à 30%, préparé par la Co-évaporation à partir des sources élémentaires [12]. La Co-évaporation est une méthode de dépôt physique qui consiste simplement à évaporer ou à sublimer (Faire passer directement de l'état solide à l'état gazeux) le matériau à déposer dans un creuset sous vide en le chauffant à haute température. Le matériau évaporé est déposé par condensation sur le substrat à recouvrir. [16]

Dès que la température de liquéfaction (le passage d'un état gazeux à l'état liquide) est dépassée, il se trouve que la pression de vapeur du matériau est sensiblement supérieure à celle résiduelle dans l'enceinte. Alors des atomes du matériau s'échappent et se propagent en ligne droite jusqu'à ce qu'ils rencontrent un obstacle. Cette rencontre peut être le fait soit d'une surface solide (substrat, paroi de l'enceinte) soit d'un atome ou d'une molécule se déplaçant dans l'espace. Dans le cas de rencontre d'une surface, il y aura séjour de l'atome sur la surface avec échange d'énergie et si la surface est sensiblement plus froide que l'atome il y a condensation définitive. La rencontre d'une molécule résiduelle se traduit généralement par une déviation de l'atome d'évaporant. Cela est réalisé dans les systèmes courants où la pression est de l'ordre de  $10^{-6}$  torr. [13]

La figure IV.9 montre une installation d'une Co-évaporation comme celle utilisée pour la préparation des cellules solaires et du mini modules à l'échelle du laboratoire.

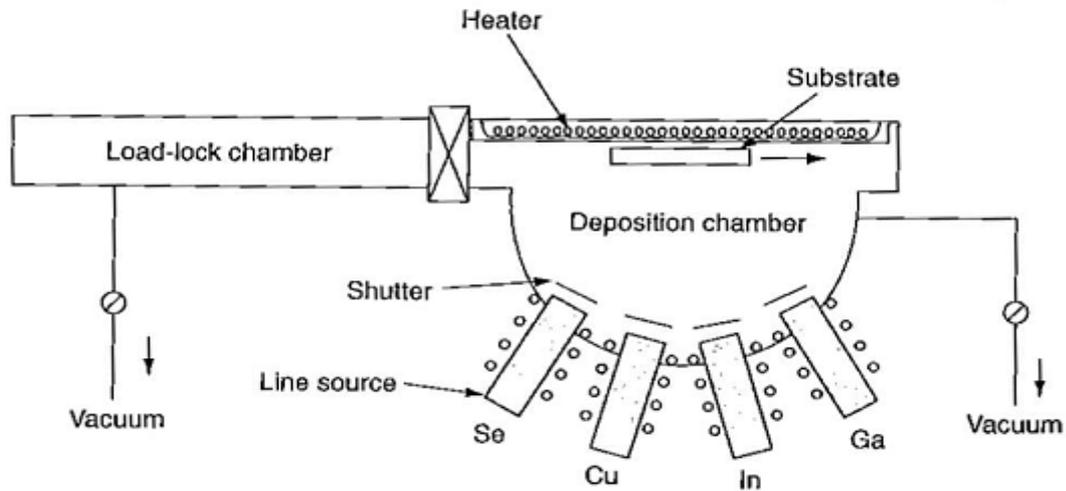


Fig. IV.9. Schéma d'un procédé de Co-évaporation pour la synthèse de couches minces de CIGS à partir de sources élémentaires Cu, In, Ga et Se.

Le procédé commence par le préchauffage pendant 20 minutes des sources et du substrat de verre/Mo préalablement nettoyé à l'ammoniaque. Le dépôt de l'absorbeur se déroule ensuite en trois étapes.

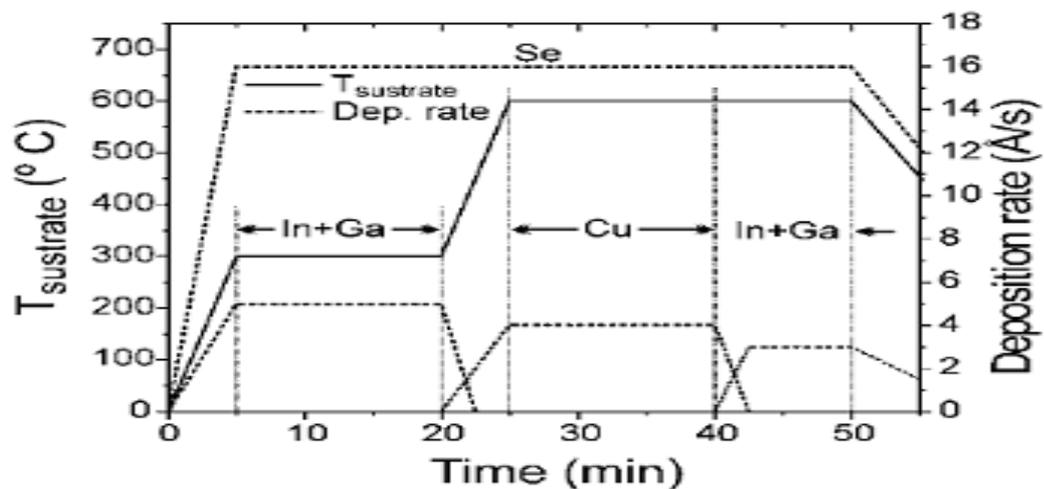


Fig. IV.10. Flux de métaux et profil de température de substrat utilisés dans un procédé en trois étapes de synthèse du CIGS par Co-évaporation.

Dans un premier temps, le dépôt débute par l'évaporation sur un substrat chauffé entre 300 et 350°C de In et Ga en présence d'un excès de Se ((In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>), de façon à obtenir une phase de type (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>. Les taux d'évaporation des sources sont contrôlée par un thermocouple de façon à obtenir une couche de 1 µm d'épaisseur et une teneur de Ga d'environ 30 % en 40 minutes de première étape.

Durant la deuxième étape la température du substrat est augmentée entre 550 et 600°C et le Cu est évaporé en présence de Se de façon à enrichir progressivement le dépôt en Cu. La présence de phases de type Cu<sub>2</sub>Se lors de cette étape favorise l'inter-diffusion des éléments et la formation de gros grains. L'évaporation du Cu est maintenue jusqu'à l'obtention d'une couche globalement riche en Cu. [10]

La dernière étape permet de réajuster la composition globale par évaporation de In et Ga en présence d'un excès de Se jusqu'à l'obtention d'une couche légèrement déficitaire en Cu, et conduit à une surface moins rugueuse qu'après l'étape riche en Cu. Ce procédé conduit à la formation d'une couche de Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> possédant un double gradient de Ga, avec une teneur en gallium plus riche vers la face arrière (proche du contact arrière en Mo) et proche de la surface (à l'interface CIGS/CdS). La largeur de bande interdite est donc plus importante vers la face arrière et en surface de l'absorbeur, ce qui est à l'origine des rendements de conversion les plus élevés pour les cellules à base de CIGS. [7]

L'avantage de cette technique est de pouvoir ajuster facilement la composition, et d'obtenir des films de haute cristallinité avec peu d'impuretés. Mais le changement d'échelle pour obtenir de grands panneaux reste difficile, et la technique est coûteuse en énergie à cause du vide poussé (de l'ordre de 10<sup>-6</sup> torr). De plus, elle ne permet qu'une utilisation partielle des matériaux utilisés dans les creusets d'évaporation puisque le matériau se dépose aussi sur les parois de l'évaporateur. [8]

### IV.1.2. La pulvérisation cathodique

Dans cette technique, le  $\text{CuInSe}_2$  à déposer appelé matériau cible est introduit dans une enceinte à vide, sous forme d'une pastille de quelques millimètres d'épaisseur (poudre) ou bien sous forme d'un lingot. Son principe consiste à arracher des atomes de Cu-In-Se par l'intermédiaire d'un plasma. Ce plasma est obtenu grâce à une décharge électrique dans un gaz à faible pression. Ce gaz est généralement de l'argon. Les ions du gaz constituant le plasma sont accélérés vers la cible par l'intermédiaire du potentiel appliqué, bombardant ainsi la cible et éjectent des atomes de cuivre, d'indium et de sélénium. Ces atomes sont éjectés dans toutes les directions de l'espace et une partie va se déposer sur un substrat placé au-dessus de la cible pour constituer une couche Cu-In-Se. La couche obtenue est soumise par la suite à des traitements thermiques adéquats qui permettent d'obtenir la phase  $\text{CuInSe}_2$ . [5]

En pulvérisation cathodique, on distingue la pulvérisation simple et la pulvérisation réactive. Dans la pulvérisation simple l'atmosphère de la décharge est chimiquement neutre c'est à dire on utilise un gaz d'argon pur pour créer le plasma. Dans le cas de la pulvérisation cathodique réactive l'atmosphère du plasma est réactive, c'est à dire on introduit un certain pourcentage de gaz actif dans l'argon (de l'oxygène  $\text{O}_2$  ou de l'azote  $\text{N}_2$ ). Dans chacun de ces deux cas, la cible peut être constituée d'un élément simple ou bien d'un composé. [16]

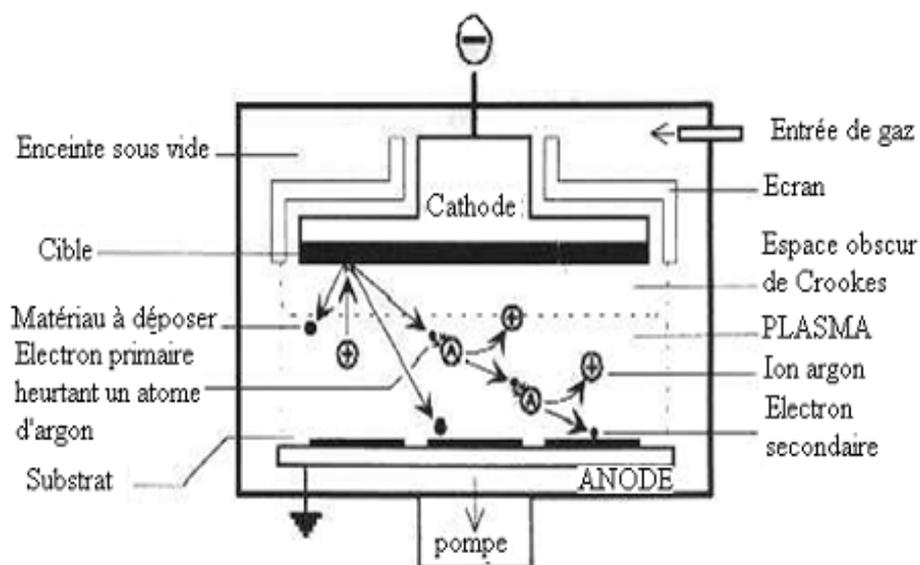


Fig. IV.11. Représentation schématique du système de pulvérisation cathodique.

Le système le plus simple de pulvérisation cathodique est décrit par le schéma de la figure IV.11. Il consiste en une enceinte métallique ou en verre sous vide dans laquelle sont disposées deux électrodes (anode et cathode) plates et refroidies à l'eau. L'enceinte est équipée d'une fenêtre à travers laquelle on peut observer la décharge [14].

Les étapes nécessaires au dépôt par pulvérisation cathodique d'une couche mince sont:

- Introduction de l'argon dans l'enceinte.
- Polarisation de la cathode (cible) par une tension.
- Une décharge électrique se produit et crée un plasma d'argon.
- Les ions positifs  $\text{Ar}^+$  sont attirés du plasma par la tension négative sur la cible.
- Ils viennent bombarder la cible.
- Les électrons se déplacent vers l'anode et entraînent le plasma.
- Un champ électrique important est créé entre l'anode et la cathode
- Les ions positifs  $\text{Ar}^+$  sont accélérés par ce champ vers la cible éjectant les atomes.
- Les atomes éjectés viennent se déposer sur le substrat.

Les ions du plasma doivent avoir une énergie suffisante afin d'éjecter des atomes de la cible. Cette énergie minimale est appelée seuil de pulvérisation. En se plaçant au-dessus de ce seuil énergétique, le supplément d'énergie est transformé en chaleur d'où la nécessité d'un système de refroidissement maintenant la cible à une température inférieure à 100 °C.

Ce système a un défaut majeur, l'accumulation des charges positives sur la cathode fait chuter l'intensité du champ électrique accélérateur en agissant comme un écran. Si la tension d'accélération n'est pas suffisante, le plasma et donc la pulvérisation s'arrêtent. [17]

Les principaux paramètres influant sur la qualité du dépôt sont : la pression du gaz utilisé dans l'enceinte, la puissance de l'alimentation qui agit sur la vitesse de dépôt et la température du substrat [18]. La pulvérisation permet de contrôler la vitesse de croissance des dépôts et a permis d'obtenir des couches minces uniformes. Malgré sa faible vitesse de dépôt, c'est une technique prometteuse pour la production de couches minces de faibles surfaces et de bonne qualité. [16]

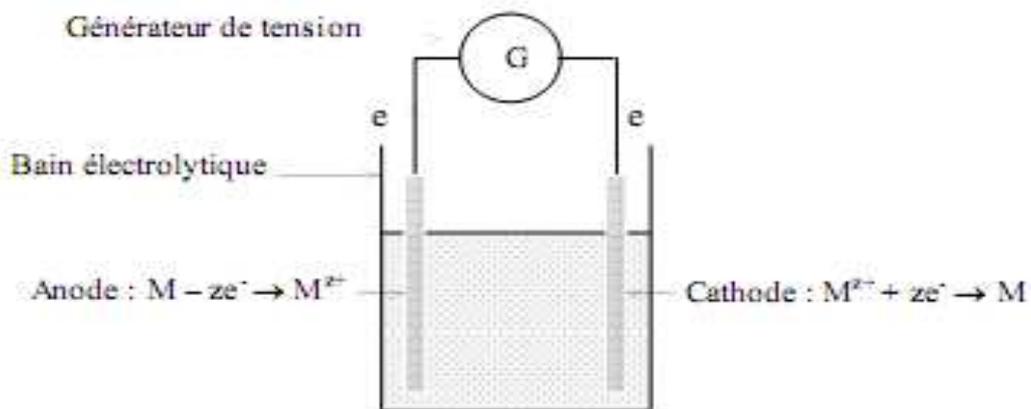
Des couches  $\text{CuInSe}_2$  déposées par cette technique présentent une taille de grains élevée et une faible densité de défauts, et les cellules photovoltaïques fabriquées à base de ces dernières couches atteignent des rendements de l'ordre de 11.3 %. [5]

## IV.2. Procédés de fabrication à bas coût

### IV.2.1. Electrodeposition

Cette méthode peu coûteuse consiste à déposer une couche sur un substrat conducteur, à partir d'un bain électrolytique contenant les éléments désirés. Le dépôt se fait électrolytiquement soit à courant imposé, soit à potentiel imposé. La possibilité de contrôle de la composition de la solution fait espérer que l'on pourra aboutir à la production de couches de bonne qualité. De plus, le dépôt se fait à basse température ce qui n'est pas le cas pour les techniques par voie sèche. Enfin, les matériaux précurseurs peuvent être purifiés par électrolyse et des couches uniformes et de grandes surfaces peuvent être obtenues. [16]

La technique d'électro-dépôt du  $\text{CuInSe}_2$  consiste à élaborer ce matériau à partir d'un bain électrolytique contenant les Cu-In-Se généralement sous la forme ( $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{InCl}_3$ ,  $\text{SeO}_2$ ). Les cations se déchargent au début de l'électrolyse sur la surface cathodique, lorsque ceux-ci sont assez nombreux, le germe peut alors croître et le cristal se développe suivant des directions privilégiées.



**Fig. IV.12. Schéma synoptique de la cellule électrolytique utilisée pour le dépôt des couches minces par l'électrodeposition.**

Pour le  $\text{CuInSe}_2$  les réactions électrochimiques de dépositions individuelles des éléments sont données par les équations de Nernst comme suit :

■ Pour le Cuivre :



$$E = E_{Cu}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{a_{Cu^{2+}}}{a_{Cu}} \right) \quad (IV.4)$$

$$E = -0.2998V_{SSE} + 0.0295 \log a_{Cu^{2+}} \quad (IV.5)$$

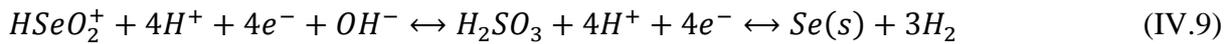
■ Pour l'Indium :



$$E = E_{In}^0 + \frac{RT}{3F} \ln \left( \frac{a_{In^{3+}}}{a_{In}} \right) \quad (IV.7)$$

$$E = -0.98V_{SSE} + 0.0197 \log a_{In^{3+}} \quad (IV.8)$$

■ Pour le Sélénium :



$$E = E_{Se}^0 + \frac{RT}{4F} \ln \left( \frac{a_{HSeO_2^+}}{a_{Se}} \right) + \frac{3RT}{4F} \ln(C_{H^+}) \quad (IV.10)$$

$$E = 0.10V_{SSE} + 0.0148 \log a_{HSeO_2^+} - 0.043p \quad (IV.11)$$

Avec  $E^0$  est le potentiel d'équilibre de l'électrode exprimé par rapport à l'électrode de saturation de sulfure (SSE, Saturated Sulphide Electrode).  $a_{Cu^{2+}}$ ,  $a_{In^{3+}}$ ,  $a_{HSeO_2^+}$  sont les activités des ions dans la solution,  $a_{Cu}$ ,  $a_{In}$ ,  $a_{Se}$  sont les activités des atomes Cu, In et Se dans l'électro-dépôt,  $C_{H^+}$  est la concentration des ions d'hydrogène, et F est la constante de Faraday. L'électro-dépôt des métaux et alliages métalliques constitué de Cu, In et Ga, suivi d'un recuit sélénisant. [5]

Peu de valeurs de rendements sont publiés sur ce type de dépôt. On peut citer un rendement de 6,2 % pour le dépôt du quaternaire seul, et 10,9 % pour un procédé légèrement modifié (par l'ajout d'une couche de Cu, puis d'In à la surface du CIGS, avant sélénisation). Dans tous les cas, le dépôt obtenu nécessite toujours une étape de recuit pour conférer au dépôt ses propriétés semi-conductrices. De nombreux problèmes liés à l'instabilité de l'électrolyte et la difficulté de bien contrôler l'électro-dépôt limitent son développement. [7]

### IV.2.2. Spray-Pyrolyse

Cette méthode est très simple, n'exige pas de produits chimiques de haute qualité, c'est une technique extrêmement facile pour la préparation de couches de toute composition. La méthode a été utilisée pour le dépôt des films denses, et la production de poudres, même des dépôts multicouches peuvent être facilement préparés en utilisant cette technique. Le spray pyrolyse a été employé pour plusieurs décennies dans l'industrie du verre et dans la production de pile solaire. La figure IV.13 donne une représentation schématique de cette technique. [19]

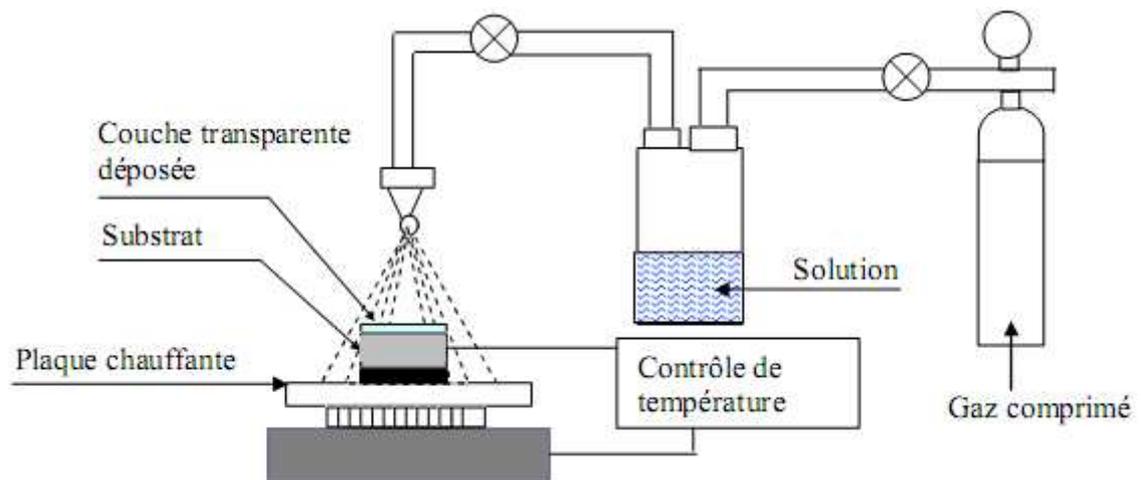


Fig. IV.13. Schéma d'un équipement de dépôt par spray pyrolyse.

Le dépôt de couches minces par la technique Spray-Pyrolyse se traduit par la pulvérisation d'une solution d'un sel de métal sur un substrat chauffé. L'impact des gouttelettes sur le substrat conduit à la formation de structure sous forme de disque qui subit une décomposition thermique. La forme et la taille du disque dépendent du volume de la gouttelette, la température de substrat.....etc. [16]

Pour la synthèse du  $\text{CuInS}_2$ , Cette technique consiste à pulvériser (projeter un liquide en fines gouttelettes) sur un substrat chauffé une solution contenant des précurseurs de Cu, In, Ga et Se. En contact du substrat, les éléments vont se décomposer et réagir ensemble sous l'effet de la chaleur. Les sources sont généralement le chlorure d'indium ( $\text{InCl}_3$ ), le chlorure cuivreux ( $\text{CuCl}$ ) et la diméthylsélénourée. [7]

Le spray pyrolyse est une technique de dépôt très utilisée pour l'élaboration des couches minces de semi-conducteurs. Elle présente un avantage important qui est le faible coût et la simplicité de sa mise en œuvre. Un rendement record de 9,5 % a été obtenu par cette méthode en 2005 par Theresa John et al. La structure de cellule utilisée par l'auteur est (ITO/CuInS<sub>2</sub>/In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/Ag), donc il est difficile de pouvoir comparer directement ce résultat à ceux obtenus par les différentes méthodes décrites ci-dessus. Bien que très adaptée aux dépôts sur de grandes surfaces, elle a l'inconvénient de conduire à des couches mal cristallisées et contenant de nombreuses impuretés. [7]

### IV.3. Bilan sur les principales méthodes

Le Tableau IV.3 présente un aperçu des meilleures cellules à base de CIGS obtenues selon les méthodes de synthèse présentées dans ce chapitre. La Co-évaporation permet le meilleur contrôle de la synthèse du CIGS et conduit aux rendements les plus élevés. Le procédé de pulvérisation cathodique montre cependant la possibilité d'obtenir des rendements supérieurs à 17 %, dans le cas de la, ce qui justifie le développement de cette technique à l'échelle industrielle. Les procédés de fabrication atmosphérique présentent des résultats prometteurs, et une amélioration des conditions de recuit devraient permettre d'atteindre des résultats semblables à ceux obtenus avec les techniques sous vide. [7]

Méthode de synthèse de l'absorbeur	Rendement maximal (%)	Surface (cm <sup>2</sup> )	laboratoire
Co-évaporation	20.3	0.5015	ZSW
Co-évaporation	17.8	0.4977	IMN
Pulvérisation cathodique + Recuit-Se, S	17.2	8.08	Solar Frontier
Electro-dépôt + Recuit-Se	14.2	11.8	Solopower

**Tableau IV.3. Aperçu de rendements record obtenus selon différentes méthodes de synthèse de l'absorbeur de type CIGS. Les recuit Se et S font référence au recuit sélénisant et sulfurant, respectivement, sans précision sur la nature exacte des réactifs.**

## V. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation du matériau CIS et ses alliages avec le Gallium ( $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$ ) sous sa forme chalcopyrite. Ceci est suivi par des brefs aperçus de quelques techniques et méthodes d'élaboration qui sont les plus utilisées pour la technologie de couches minces tels que : Co-évaporation, la pulvérisation cathodique, Electrodeposition et Spray-Pyrolyse. Le cinquième chapitre sera consacré à la simulation numérique d'une cellule solaire structurée grille/ZnO/CdS/CIGS/ Mo/verre à l'aide d'un logiciel de simulation puissant : ATLAS de Silvaco.

## Références bibliographiques

- [1] Charles Roger « Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques » Thèse de doctorat, Université de GRENOBLE, 2013
- [2] Mohammed Ouled Ali, « propriétés optoélectroniques du semi-conducteur Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> appliquée aux cellules photovoltaïques ». Mémoire de magister à l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, 2010.
- [3] ATEK Mourad « Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS ». Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de – SÉTIF, 2013
- [4] Souici Fatma-Zohra « Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe<sub>2</sub>). Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009
- [5] Assia BOURAIOU « Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe<sub>2</sub> par Électrodéposition » Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, 2009
- [6] Site web: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_CIGS](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_CIGS)
- [7] Aurélien DUCHATELET « Synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> pour cellules solaires par électrodépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium. ». Thèse de doctorat, Université LILLE 1, 2012
- [8] Lydie RIBEAUCOURT « Electrodepôt et sélénisation d'alliages Cu-In-Ga en vue de la synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> pour cellules solaires ». Thèse de doctorat, Université PIERRE ET MARIE CURIE, 2011
- [9] Mostefa Kara Selma « Étude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS ». Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkid de Tlemcen, 2012
- [10] Marie BUFFIERE « Synthèse et caractérisation de couches minces de Zn(O,S) pour application au sein des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> ». Thèse de doctorat, Université de NANTES 2011
- [11] BOUAFIA MOUNIR « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium CIGS » Diplôme de Master professionnel, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012

- 
- [12] L.Béchiri, M.Benabdslem, N.Benslim, L.Mahdjoubi, et G.Nouet, « Morphologie et Propriétés Physiques des Couches Minces (300°A) Co-évaporées de CuInSe<sub>2</sub> ». Revue : Energie Renouvelable, Valorisation (1999) 33-36.
- [13] Site web: [thttpmichel.hubin.pagesperso-orange.fr/physiquecouchechap\\_pc1.htm.html](http://thttpmichel.hubin.pagesperso-orange.fr/physiquecouchechap_pc1.htm.html)
- [14] GOUDJIL Tawous «Etude de l'oxyde de titane en couches minces en hétérojonction avec le silicium, application photovoltaïque». Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013
- [15] Fassi Ramzi « Elaboration et caractérisation de couche absorbantedes cellules solairesen couches minces à base de Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> ». Mémoire de magister, Université Mentouri – Constantine, 2012
- [16] Daranféd Ouarda «Elaboration et caractérisation de couche absorbantedes cellules solairesen couches minces à base de Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> ». Thèse de doctorat, Université de Mentouri – Constantine, 2013
- [17] Djeriouat Khadidja «Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions: GaInP/GaAs ». Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen, 2011
- [18] Chelouche Salim « Propriétés des fenêtres optiques ZnO:Al pour cellules solaires en couches minces à base de CIGS ». Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de –SÉTIF, 2012
- [19] Kenza Kamli « Elaboration et caractérisations physico-chimique des couches minces de sulfure d'étain par spray ultrasonique: Effet des sources d'étain ». Mémoire de magister, Université Mohamed Khider-Biskra, 2013

# Chapitre 05 :

**Simulation**

**Electrique Des**

**Cellules**

**Solaires à Base**

**De CIGS**

---

## I. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude du comportement électrique d'une cellule solaire à base de couches minces  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ . Cette étude se fera au moyen du logiciel Atlas- SILVACO. Dans une première partie, nous présenterons le logiciel de simulation TCAD-SILVACO, et son principe de fonctionnement.

Dans une deuxième partie, Nous faisons une étude de simulation à deux dimensions effectuées par notre logiciel sur une structure choisie dans la littérature. On va essayer de comparer nos résultats obtenus au moyen de la simulation avec l'exemple expérimental réel, afin de valider les limites de notre logiciel. Ensuite, en deuxième étape, on va chercher à optimiser le rendement obtenu en agissant sur les paramètres de notre structure. Dans notre travail, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule et le niveau de dopage, ainsi que la largeur de la bande interdite de la couche absorbante CIGS.

## II. Présentation du logiciel de simulation

Le simulateur TCAD (Technology-Computer-Aided-Design) est un ensemble complet d'outils indépendants permettant la simulation physique et technologique de dispositifs électroniques. Il permet d'associer l'aspect conception technologique à la simulation électrique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Les simulateurs existants sur le marché, nous citons à titre d'exemple; PC1D, AMPS1D, ISE, SYNOPSIS, SCAPS, SILVACO.... [1]

SILVACO (**SIL**icon **VAL**ley **CO**rporation) est une société internationale Américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD [2]. Le TCAD SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces et de nouvelles techniques de maillage, permettant ainsi d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateur est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles. [3]

Sous SILVACO l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs s'appelle **VWF** (Virtual Wafer Fabrication). Les composants de base de VWF sont :

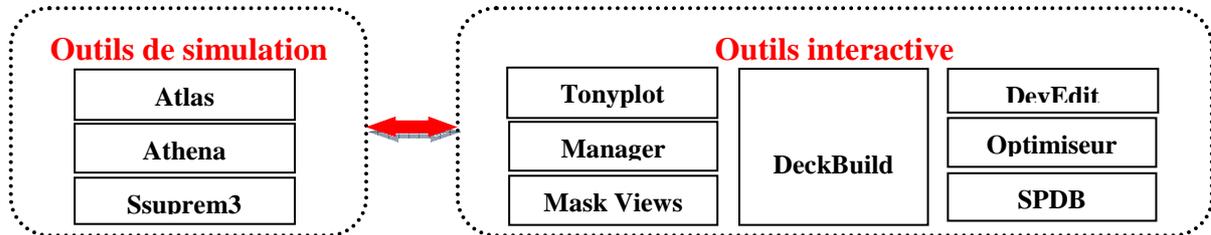


Fig. V.1. Organigramme de la structure VWF. [3]

### II.1. Les outils interactifs

- **DeckBuild** : DeckBuild est un environnement de développement et d'exécution pour tous les simulateurs SILVACO. DeckBuild offre une aide et une prise en charge qui permet d'éviter l'apprentissage d'une syntaxe de commande généralement très complexe. Il permet aussi une exécution automatique et très pratique des programmes et des sauvegardes systématiques des étapes intermédiaires d'exécution. [4]

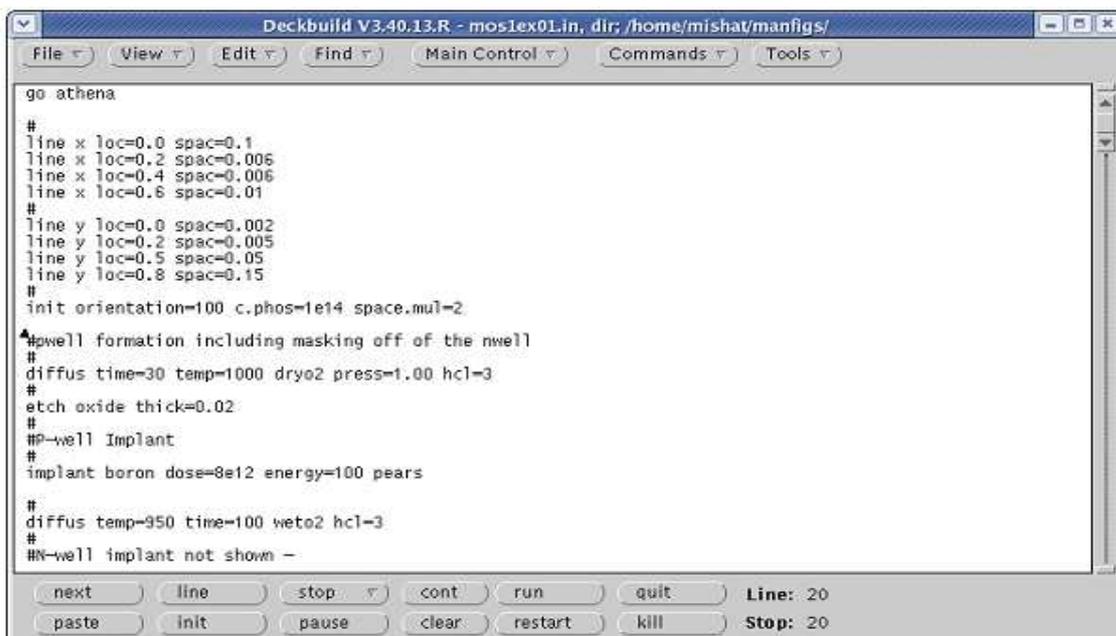


Fig. V.2. Fenêtre principale de DeckBuild.

- **Tonyplot** : Tonyplot est un environnement où sont visualisés les résultats des simulations, il peut être invoqué par tous les autres outils de SILVACO. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation, Tonyplot peut donner des caractéristiques de sortie en une dimension (1D), deux dimensions (2D), ou trois dimensions (3D). [5]

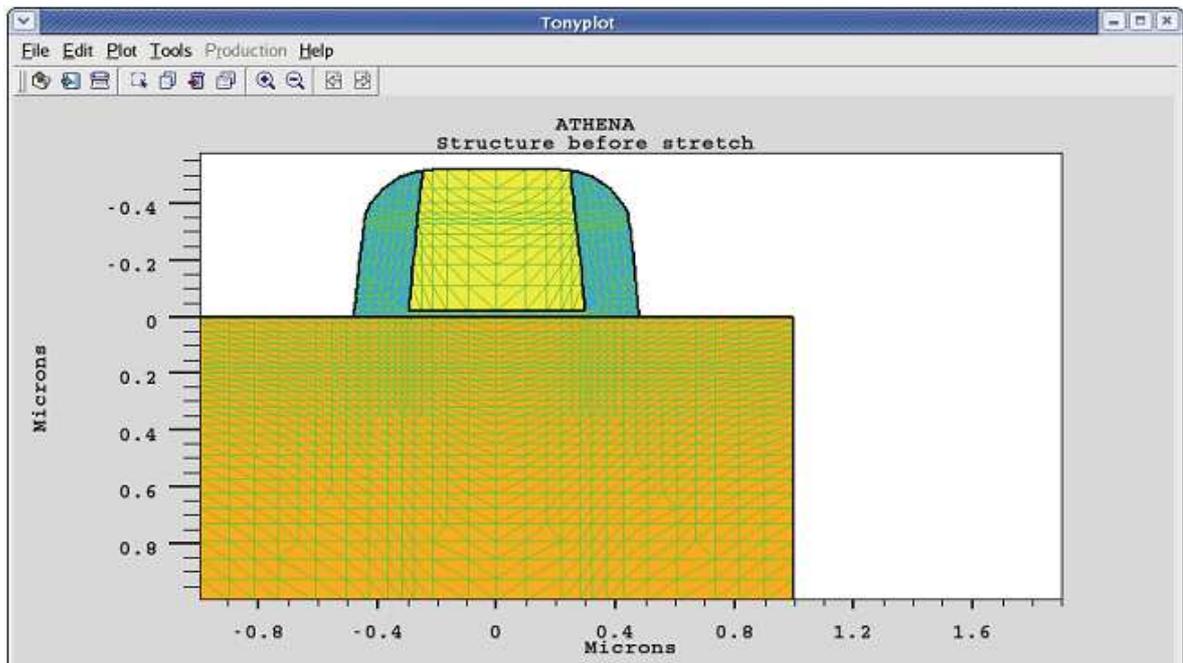


Fig. V.3. Fenêtre principale de Tonyplot.

- **DevEdit** : DevEdit est un éditeur de structure et outil de maillage permettant de générer ou de modifier la structure du dispositif à simuler. DevEdit peut être contrôlé par des lignes de commande ou par un écran graphique interactif. [4]
- **Manager** : Manager est un outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF. [3]
- **MaskViews** : MaskViews est un outil de dessin des masques. [3]
- **Optimiseur** : Optimiseur est un outil d'optimisation pour la calibration des simulateurs de processus et dispositifs. Cet outil permet un ajustage automatique des paramètres électriques ou processus en jouant sur un ou plusieurs paramètres d'entrée. [4]
- **SPDB** : c'est base de données des processus.

## II.2. Les outils de simulation

- **Athena** : Athena est un simulateur de procédés technologiques qui permet des simulations rapides et précises de toutes les étapes effectuées en Salles Blanches : diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt etc.
- **SSuprem3** : SSuprem3 est un simulateur de procédé 1D avec des prolongements simples de simulations des dispositifs

### II.2.1. Atlas

Notre travail a été basé principalement sur l'outil de simulation Atlas, c'est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs. En plus il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, etc. [6]

#### II.2.1.1. Entrées et sorties de simulateur Atlas

Atlas a été conçu de façon à pouvoir utiliser d'autres outils qui facilitent son utilisation comme montre la figure V.4 :

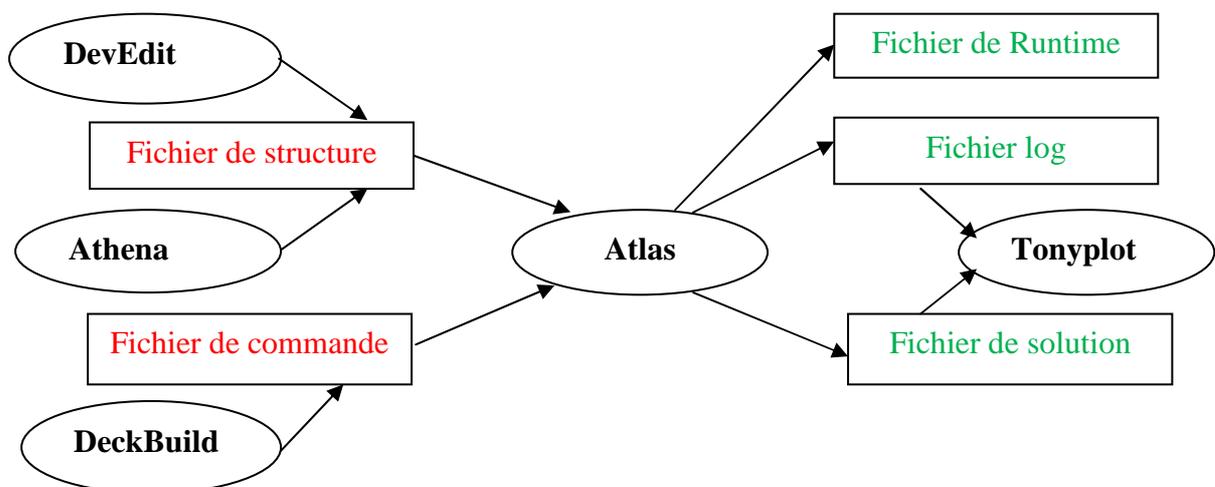


Fig. V.4. Entrées et sorties d'Atlas [7]

---

La plupart des simulations réalisées par Atlas utilisent deux fichiers d'entrée :

- **Un fichier commande (.in)** : qui définit la façon dont la simulation doit être conduite (méthodes numériques, modèles physiques, grandeurs physiques à calculer...).
- **Un fichier structure (.str)** : qui donne la structure du composant (couches constitutives, dimensions, géométrie). [8]

En sortie, le simulateur Atlas générera trois fichiers :

- **Un fichier Runtime** : c'est un fichier compte rendu du déroulement de la simulation qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation.
- **Un fichier log** : qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (caractéristiques statiques ou évolutions temporelles).
- **Un fichier de solution**, ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné. Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation Tonyplot. [8]

### II.2.1.2. La structure d'un programme Atlas

Nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation d'Atlas. Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement. Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte.

- Spécification de la structure.
- Spécification des modèles de couches.
- Sélection de la méthode numérique.
- Spécification des solutions.
- Analyse des résultats.

## ■ Spécification de la structure

Dans un programme Atlas, il est nécessaire de bien définir la structure de composant simulé. La construction de la structure consiste en quatre étapes : définition du maillage, définition des régions, définition des électrodes et définition des dopages.

**Définition du maillage (Mesh) :** Le maillage divise la structure simulée en petits éléments de maille (triangle) pour pouvoir résoudre les équations fondamentales numériquement. La précision des résultats obtenus avec les simulations est fonction du nombre et de la distribution des nœuds dans la maille. En contrepartie, le temps de calcul des solutions est d'autant plus important pour un maillage possédant un nombre important de nœuds. Le maillage doit donc être fait de façon à avoir une distribution de nœuds plus abondante dans les régions de fortes variations de profils de dopages et moins importante dans les régions où le dopage est uniforme. Ceci permet d'atteindre un compromis entre le temps de calcul et la précision de la simulation. [4]

**Définition des régions (Région):** Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions. Dans cette partie nous définissons des régions rectangulaires, par exemple la région n°1 est définie comme un matériau de type ZnO et la région n° 2 comme de CdS, etc. Ainsi que les différentes dimensions qui sont données en micromètre. [9]

**Définition des électrodes (Electrode) :** La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode. [9]

**Définition des dopages (Doping) :** Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type N ou P, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien, etc. [5]

## ■ Spécification des modèles physiques

Après la construction de la structure, il est nécessaire de préciser les modèles physiques et de définir les matériaux. La spécification de modèles et matériaux comporte trois étapes:

**Material:** associe des paramètres physiques aux matériaux dans la maille. Le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standard. [5]

---

**Models:** Ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques (recombinaison, mobilité, etc.). [9]

**Contact :** Les contacts métalliques en haut et en bas sont définis par leur travail de sortie et la vitesse de recombinaison en surface. [10]

### ■ Sélection de la méthode numérique

**Method:** Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, deux méthodes essentiellement sont utilisées dans Atlas de SILVACO:

- ❖ Méthode de Gummel
- ❖ Méthode de Newton

La méthode de Newton correspond à la résolution itérative d'un système regroupant les trois équations différentielles régissant le fonctionnement de la structure. La méthode de Gummel consiste à découpler en trois sous-systèmes le système global décrit précédemment : les trois équations sont résolues itérativement les unes après les autres jusqu'à atteindre la convergence globale des solutions. L'intérêt potentiel de cet algorithme par rapport à celui de Newton réside dans la réduction des dimensions des systèmes matriciels à résoudre, ce qui permet a priori de diminuer le temps de calcul. [9]

### ■ Spécification des solutions

Après avoir sélectionné la méthode numérique il est nécessaire de déterminer les solutions. La spécification de solution est donnée par les déclarations suivantes:

**Log :** permet d'enregistrer toutes les caractéristiques finales de simulation dans un fichier de données. N'importe quel type de données, générées par la commande SOLVE est sauvé après la commande LOG. [3]

**Solve:** La déclaration Solve fait suite à la déclaration Log. Solve effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. [9]

**Load:** charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conjectures initiales à d'autres points de polarisation. [9]

---

**Save** : sauve toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis. [9]

### ■ Analyse des résultats

Une fois la solution a été trouvée pour un problème de dispositif à semi-conducteurs, les informations peuvent être affichées graphiquement.

**Extract**: les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure. [3]

**Tonyplot** : les résultats et les informations obtenues par la simulation peuvent être affichés graphiquement avec Tonyplot. [3]

## II.3. Principe de fonctionnement d'un simulateur

La simulation des cellules solaires consiste à comprendre le comportement physique et électrique de ce composant électronique. La résolution des trois équations fondamentales qui régissent le comportement des porteurs de charges nous permet de calculer la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule solaire. A partir de cette caractéristique l'utilisateur 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. La résolution analytique étant compliquée et pratiquement impossible, nous avons recours à la résolution numérique qui nécessite un grand nombre d'itérations.

Les simulateurs existants sur le marché ont le même principe de fonctionnement. Ils résolvent les équations différentielles qui régissent le fonctionnement des dispositifs électroniques par des méthodes numériques (éléments finis, moindre carré, méthode de monté Carlo, etc.) [10]. Cette partie a pour objectif de présenter le mode de fonctionnement d'un simulateur de composants. Ces outils ont pour fonction première de résoudre les équations fondamentales des semi-conducteurs, équation de Poisson et de continuité, avec une problématique de détermination d'un grand nombre d'inconnues : la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique, le champ électrique, les densités

de courant, etc. Ces grandeurs physiques internes évoluent au sein du composant dans le temps et l'espace. Elles apparaissent sous une forme discrétisée, comme une suite d'éléments finies. Sous cette condition, les équations traitées dans ces simulateurs peuvent être résolues de façon dynamique en tout point. [8]

L'équation de Poisson établit un premier système d'équations différentielles entre le potentiel et la densité des porteurs :

$$\varepsilon \Delta V + q(p - n + N_D^+ - N_A^-) = 0 \quad (\text{V.1})$$

Où  $\varepsilon$  est le constant diélectrique,  $\Delta V$  le Laplacien du potentiel,  $q$  est la charge élémentaire d'électrons,  $N_A^-$  et  $N_D^+$  sont les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisées,  $n$ ,  $p$  sont les densités des porteurs libres. [11]

L'évolution temporelle des densités de porteurs doit obéir aux équations de continuité (conservation des charges) pour les électrons et les trous :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q} \text{div } \vec{J}_n \quad (\text{V.2.1})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p + \frac{1}{q} \text{div } \vec{J}_p \quad (\text{V.2.2})$$

Où  $G$  et  $U$  sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs,  $\vec{J}_n$  et  $\vec{J}_p$  sont les densités de courant des électrons et des trous respectivement. [11]

Le courant, pour chaque type de porteur, résulte de deux termes. Le premier correspond à l'entraînement des charges, à la vitesse moyenne  $\bar{v}$ , par le champ électrique. Le second correspond à la diffusion des porteurs. [11]

$$\vec{J}_n = -q n \mu_n \overrightarrow{\text{grad}} \Psi + q D_n \overrightarrow{\text{grad}} n \quad (\text{V.3.1})$$

$$\vec{J}_p = -q p \mu_p \overrightarrow{\text{grad}} \Psi - q D_p \overrightarrow{\text{grad}} p \quad (\text{V.3.2})$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{V.4})$$

Où  $D_n$ , et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion. Ils sont directement reliés aux mobilités des porteurs par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad (\text{V.5})$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad (\text{V.6})$$

Les expressions (3) des densités de courant peuvent être reportées dans (2). Les équations (1) et (2) constituent alors le système de base des équations différentielles couplées liant  $V$ ,  $n$  et  $p$  que le simulateur doit résoudre. [11]

La résolution des équations (1), (2) et (3) suppose que l'on explicite les relations liant les différentes grandeurs intervenant dans ces équations de base. De plus, suivant les phénomènes physiques mis en jeu lors de la simulation d'un composant, l'utilisateur est amené à choisir des modèles physiques appropriés. [11]

Les modèles physiques dans les semi-conducteurs ont été modélisés sous la forme d'expressions mathématiques reliant le potentiel électrostatique et la densité des porteurs. La modélisation physique est réalisée en tenant compte de la probabilité d'occupation des niveaux d'énergie, de la mobilité des porteurs et des différents types de recombinaison-génération. Ces grandeurs doivent être choisies d'une manière judicieuse pour se rapprocher du comportement physique réel du dispositif. [11]

### III. Résultats de la simulation et interprétations

Dans le cadre de l'étude électrique d'une cellule solaire à hétérojonction ZnO/CdS/CIGS et optimiser ses paramètres électriques, et géométriques afin de définir la cellule qui nous donne un rendement électrique optimal. Comme structure d'étude, on a choisi les mesures expérimentales d'une cellule réelle à hétérojonction, structurée ZnO/CdS/CIGS réalisée par **JONAS PETTERSSON** <sup>[12]</sup>. Suivant cette littérature, on a simulé à l'aide du logiciel Atlas de SILVACO, cette même structure avec tous les paramètres physiques et technologiques publiés dans [12]. Afin d'optimiser ces paramètres et modeler notre logiciel dans le but d'établir un code de calcul spécifique aux structures étudiées.

#### III.1. Présentation de la structure d'étude

Comme nous pouvons le voir sur la figure (V.5) ci-dessous, la structure de notre cellule solaire d'étude à 2 D construite par le simulateur Atlas de SILVACO.

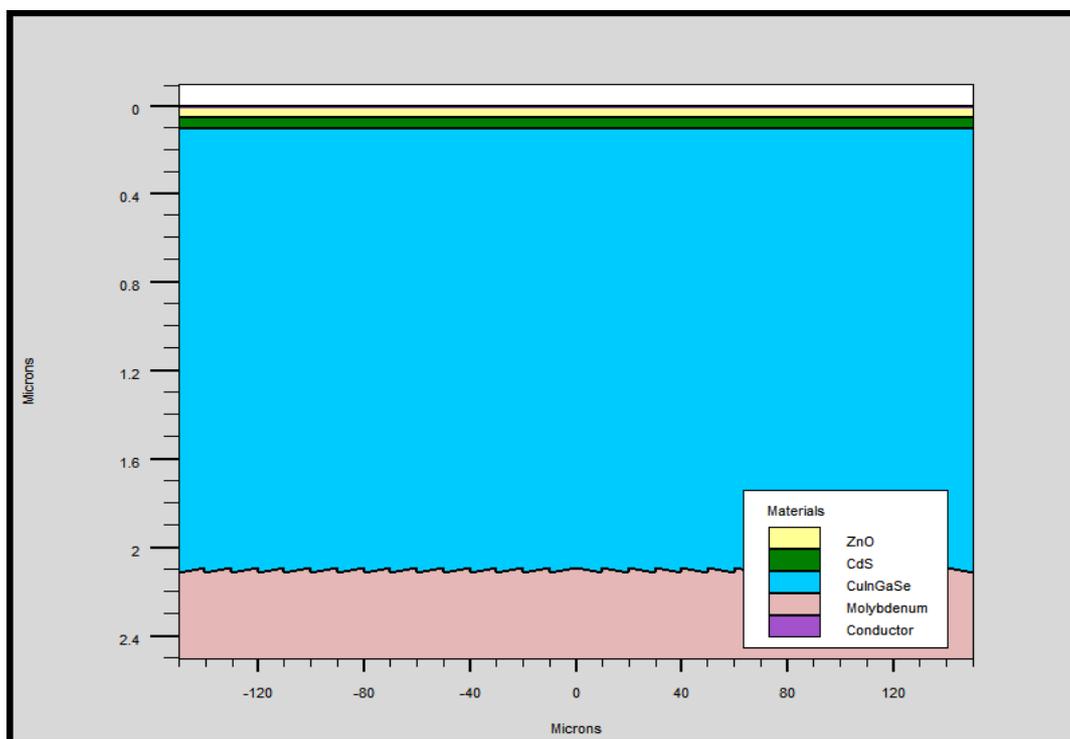


Fig. V.5. Structure d'étude à 2D construite par simulation Atlas ZnO/CdS/CIGS/Mo.

Les paramètres de notre cellule solaire de surface active de  $1 \text{ cm}^2$ , éclairée par un rayonnement correspondant au spectre solaire dans les conditions AM1.5, avec une puissance totale normalisée à  $1000 \text{ W.m}^{-2}$ , et une température de l'échantillon fixée à  $300\text{K}$  sont présentés dans le tableau V.1.

	ZnO	CdS	CIGS
Epaisseur de la couche ( $\mu\text{m}$ )	0.3	0.05	1.8
Bande de gap (eV)	3.3	2.4	1.2
Permittivité relative, $\epsilon_r$	9	8.9	13.6
Densité effective des états dans la bande de conduction, $N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$3 \cdot 10^{18}$	$1.3 \cdot 10^{18}$	$6.8 \cdot 10^{17}$
Densité effective des états dans la bande de valence, $N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.7 \cdot 10^{19}$	$9.1 \cdot 10^{18}$	$1.5 \cdot 10^{19}$
Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{19}$	$5 \cdot 10^{17}$	$10^{16}$
Vitesse de recombinaison des électrons à la surface arrière, $S_n$ (cm/s)	$3.9 \cdot 10^7$	$3.1 \cdot 10^7$	$2.4 \cdot 10^7$
Vitesse de recombinaison des trous à la surface avant, $S_p$ (cm/s)	$1.4 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^7$
Mobilité d'électron, $\mu_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	100	72	100
Mobilité du trou, $\mu_p$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	31	20	12.5
Affinité électronique, $\chi$ (eV)	4.45	4.2	4.5

**Tableau V.1. Les valeurs des paramètres de la structure simulée.**

### III.2. Les paramètres de sortie de la cellule étudiée

À l'équilibre thermodynamique, les niveaux de Fermi sont alignés, ce qui implique une courbure des bandes de conduction et de valence à travers l'hétérojonction. La figure V-6 représente le diagramme des bandes d'énergie de notre cellule solaire simulée après et avant l'éclairement.

III.2.1. Diagramme des bandes d'énergie

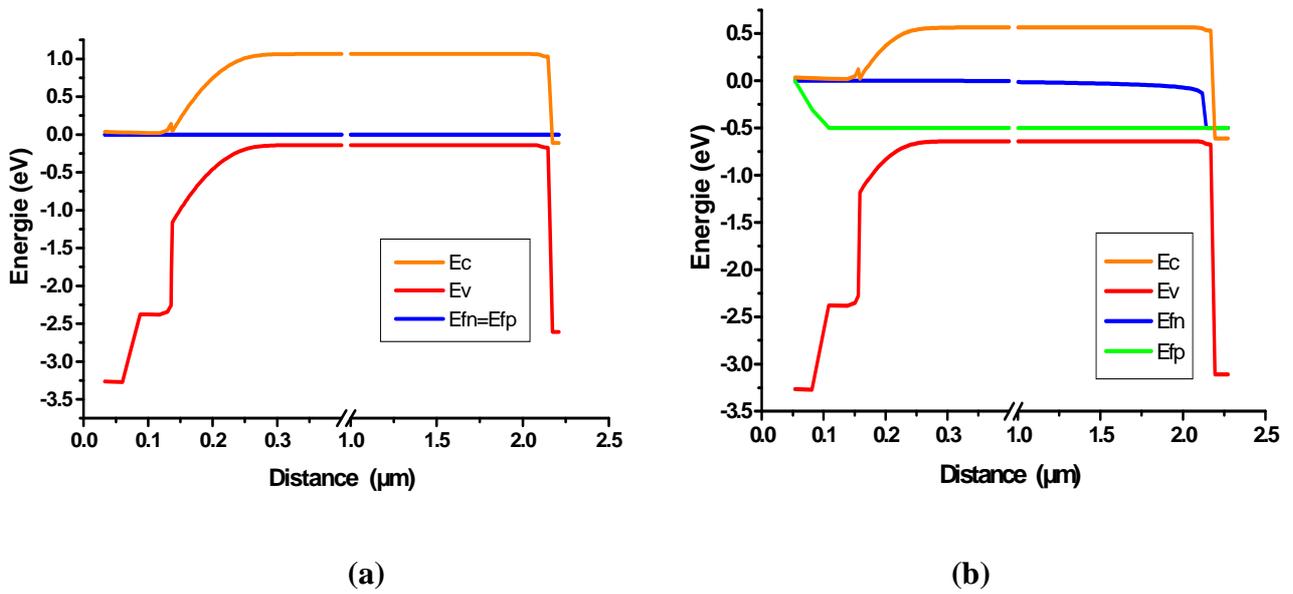


Fig. V.6. Diagramme des bandes d'énergie: (a) à obscurité (b) sous illumination.de notre cellule solaire à base de CIGS.

III.2.2. Caractéristiques Courant-Tension

Les caractéristiques courant-tension de la structure étudiée à obscurité et sous éclairage simulées par le logiciel Atlas de SILVACO sont représentées sur la figure V-7 :

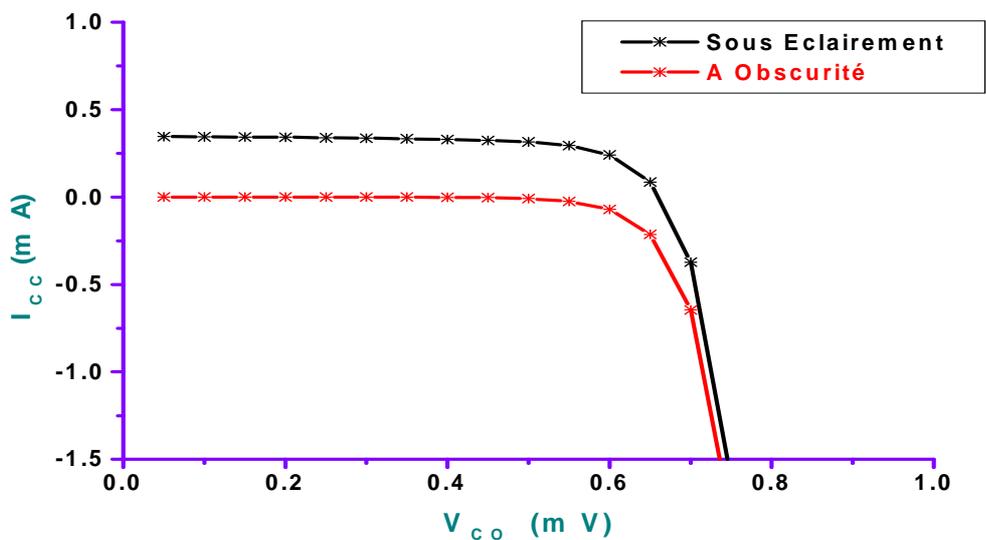


Fig. V.7. Caractéristique I-V de notre cellule solaire à base de CIGS.

La mesure de la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule solaire à l'obscurité est utile pour analyser son fonctionnement, cette caractéristique est identique à celle d'une diode. Les paramètres électriques de la même cellule telle que la densité de courant de court-circuit ( $I_{CC}$  en  $A.cm^{-2}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$  en mV), le rendement électrique et le facteur de forme sont tirés à partir de sa caractéristique  $I(V)$  sous éclairage.

Les paramètres photovoltaïques déduits de ces courbes sont résumés dans le tableau (V.2). Ce tableau a pour l'objectif de faire une comparaison entre les paramètres mesurés expérimentalement et ceux de simulation afin de valider les résultats des calculs effectués par notre logiciel Atlas de SILVACO.

	$V_{oc}$ [mV]	$I_{cc}$ [ $mA.cm^{-2}$ ]	FF [%]	$\eta$ [%]
<b>Résultat de la référence [12]</b>	646	34.00	76.10	16.70
<b>Notre simulation par Silvaco</b>	659	34.78	74.50	16.17

**Tableau V.2. Comparaison des performances de cellule solaire simulée et la cellule référence.**

En comparant nos résultats avec les résultats trouvés dans la littérature, nous remarquons que les paramètres ( $I_{CC}$ ,  $V_{CO}$ , FF et  $\eta$ ) de la simulation par notre logiciel sont légèrement différents à ceux de la référence. A cet effet, on peut dire que notre logiciel est fiable, Dans la suite de la simulation, nous allons voir l'influence de paramètres électrique (dopage) et technologique (épaisseur) de deux couches tampon (CdS) et absorbante (CIGS) sur les performances de notre cellule solaire ainsi que le gap de CIGS agissant sur le coefficient de composition de matériau, d'obtenir la structure conduisant à un rendement optimal.

III.2.3. Réponse spectrale

La réponse spectrale de la structure simulée, elle est représentée par la figure V-8.

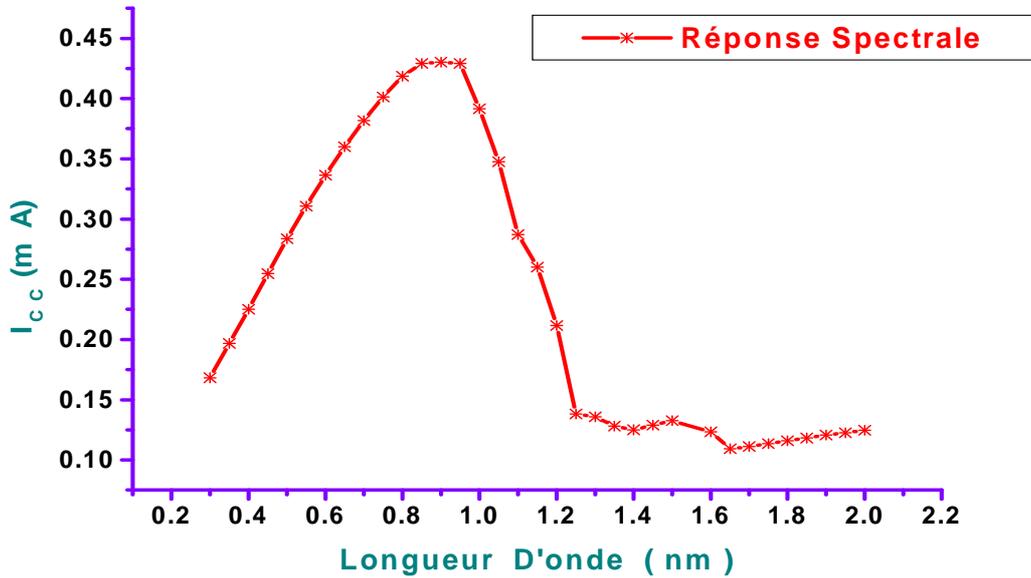


Fig. V.8. La Réponse spectrale de notre structure simulée.

La mesure du courant débité par la cellule solaire en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente nous permet de connaître sa réponse spectrale (RS en A.W<sup>-1</sup>), à pour l'objectif d'évaluer le rendement quantique externe (RQE en %) de cette cellule solaire en fonction de la longueur d'onde à l'aide de la relation suivante :

$$RQE(\lambda) = RS(\lambda) \frac{hc}{q\lambda} \tag{V.1}$$

Tel que :

$$RS(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{P(\lambda)} \tag{V.2}$$

Avec:  $h$ : Constante de Planck (kg.m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) ;  $c$ : Célérité de la lumière dans le vide (m.s<sup>-1</sup>)

$q$  : Charge élémentaire (C) ;  $\lambda$  : Longueur d'onde monochromatique (nm)

$J_{cc}(\lambda)$  : Densité du courant de Court-circuit (A.cm<sup>-2</sup>) ;  $P(\lambda)$ : Puissance incidente (w.cm<sup>-2</sup>)

III.2.4. Rendement Quantique

La figure V-9 représente les deux rendements externe et interne de structure simulée.

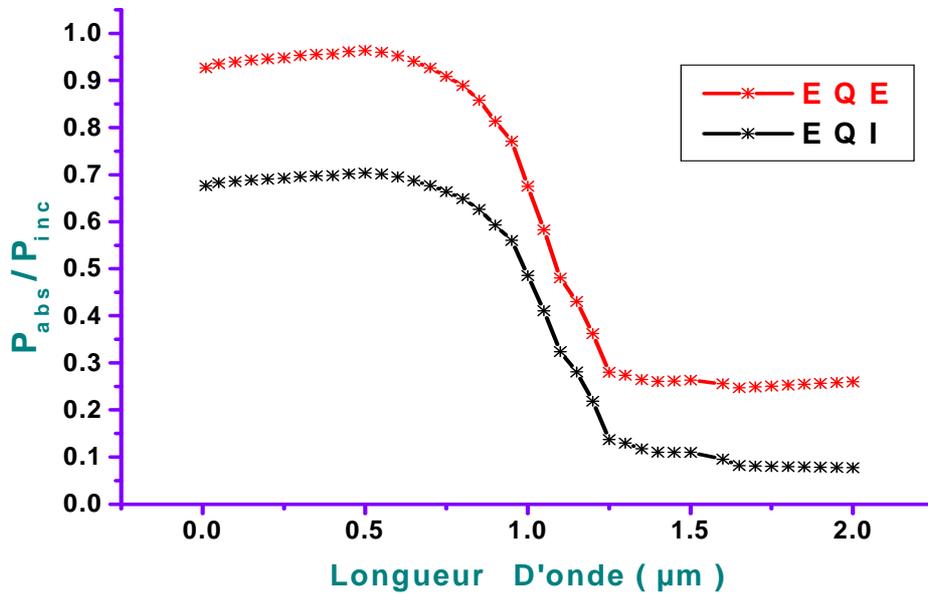


Fig. V.9. Rendement Quantique de notre cellule solaire à base de CIGS

( $P_{abs}$  : Puissance absorbée ;  $P_{inc}$  : Puissance incidente)

Pour étudier les mécanismes internes à la cellule solaire, il est nécessaire de considérer uniquement les photons absorbés dans le dispositif sans prendre en compte les photons réfléchis et transmis. Le Rendement Quantique Interne (RQI en %) donne ainsi le pourcentage d'électrons participant au photo-courant par rapport au nombre de photons qui ont été réellement absorbés dans la cellule:

$$RQI(\lambda) = \frac{RQE(\lambda)}{1 - R(\lambda).A(\lambda).T(\lambda)} \tag{V.2}$$

Avec :

$R(\lambda)$ : Réflectivité de la cellule (%) ;

$A(\lambda)$ : Absorption dans les couches non actives (%) ;

$T(\lambda)$ : Rayonnement transmis à travers la cellule (%) ;

### III.3. L'optimisation des paramètres de sortie de notre cellule étudiée :

Dans ce qui suit, on va varier trois paramètres importants : l'épaisseur et le dopage de deux couches tampon (CdS) et absorbante (CIGS), ainsi que le gap de CIGS, pour maximiser le rendement de conversion de la cellule.

#### III.3.1. Effet de couches CdS sur le rendement de la cellule.

##### ■ Effet de l'épaisseur de la couche CdS:

Le tableau V.3 résume les variations des paramètres de la structure ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$  et  $\eta$ ) en fonction de l'épaisseur de la couche CdS, qui varie de 0.01  $\mu\text{m}$  jusqu'à 0.1  $\mu\text{m}$ .

Epaisseur de CdS (nm)	$I_{cc}$ (mA)	$V_{co}$ (mV)	$\eta$ (%)
10	34.70	659	16.10
20	34.75	659	16.15
<b>30</b>	<b>34.78</b>	<b>659</b>	<b>16.17</b>
40	34.78	659	16.17
50	34.78	659	16.17
60	34.71	659	16.11
70	34.68	659	16.07
80	34.68	659	16.07
90	34.68	659	16.07
100	34.68	659	16.07

**Tableau V.3. Caractéristiques de cellule solaire de CIGS en fonction d'épaisseur de la couche CdS.**

La variation de l'épaisseur de la couche tampon CdS de 0.01 à 0.1  $\mu\text{m}$  sur la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  ainsi que sur le courant de court circuit  $I_{cc}$  sont illustrés respectivement sur les figures V.10 (a-b). La variation l'épaisseur de la couche tampon CdS sur le rendement électrique est représentée sur la figure V.11.

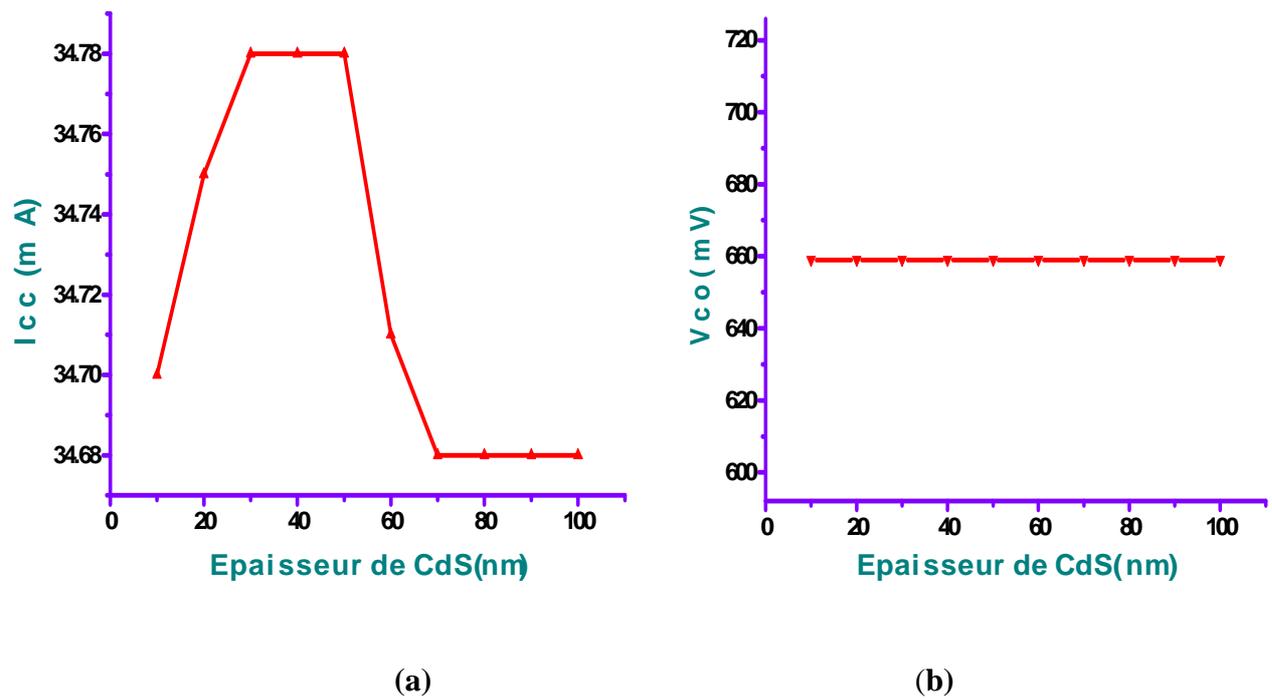


Fig. V.10. L'effet de l'épaisseur de la couche CdS sur le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$

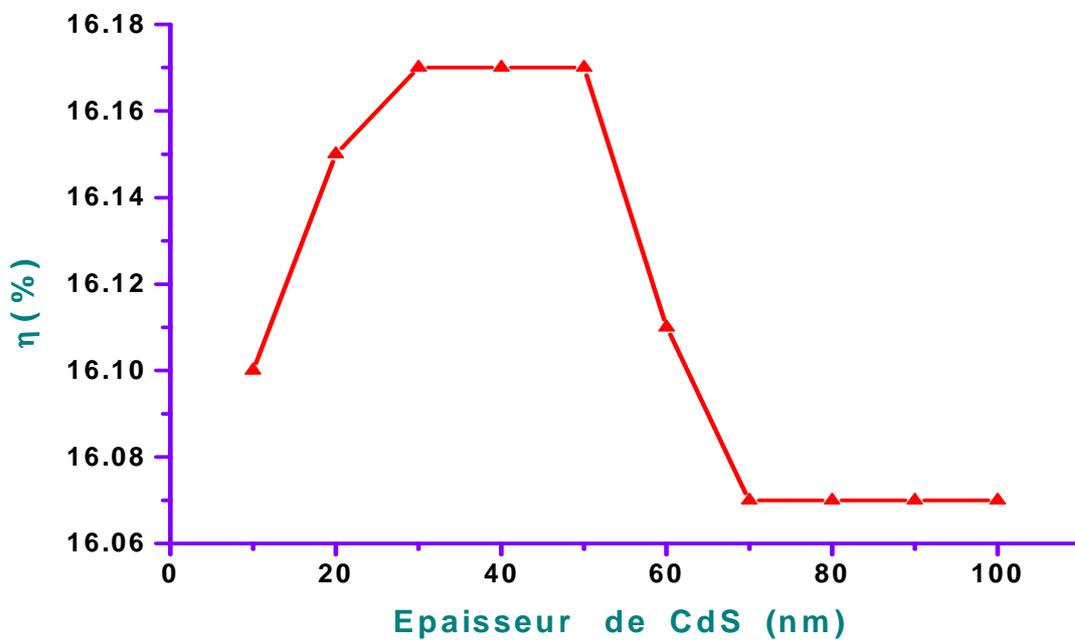


Fig. V.11. L'effet de l'épaisseur de la couche CdS sur Rendement

Nous remarquons d'après la figure V.10.a que le courant de court circuit marque une petite augmentation avec l'épaisseur de la couche tampon jusqu'à la valeur de  $0.03\mu\text{m}$  puis il reste stable dans l'intervalle  $[0.03\mu\text{m}, 0.05\mu\text{m}]$ , et après il commence à diminuer pour chaque augmentation de l'épaisseur de la couche tampon. Alors que la tension en circuit ouvert  $V_{\text{co}}$  demeure constante avec la variation l'épaisseur de la couche tampon, ceci est bien illustré dans la figure V.10.b. Pour la variation de l'épaisseur de cette couche, avec un rendement qui, représenté dans la figure V.11, évidemment a pris la même allure que la courbe de la figure V.10.a. Nous obtenons le meilleur rendement de 16.17 avec une épaisseur allant de 0.03 à  $0.05\mu\text{m}$ .

On peut conclure qu'avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CdS, un grand nombre de photons est absorbé dans la couche N avant d'être arrivés à la couche P, alors que la lumière absorbée dans la couche CdS ne contribue pas significativement dans le photocourant collecté, à cause de la faible mobilité des porteurs minoritaires de la couche N (CdS) qui sont les trous par rapport aux porteurs minoritaires de la couche P (CIGS) qui sont les électrons, ce qui diminue l'absorption dans la couche P. D'où, la diminution des performances de la cellule. En outre, la collecte des porteurs se fait par le champ plutôt que la diffusion. Comme il n'y a pas de zone de charge dans le CdS qui est fortement dopé et parce que la durée de vie des porteurs minoritaires y est très courte, la couche CdS est en fait une couche « morte » ou « fenêtre » du point de vue photovoltaïque. Il est donc préférable de minimiser son épaisseur pour réduire les pertes d'absorption optique.

L'explication de ce résultat est que la couche tampon doit faire passer toute l'intensité de la lumière qu'elle reçoit à la base ce qui empêche ce passage lorsqu'elle sera épaisse. Donc on préfère que l'épaisseur de la couche N soit la plus faible possible, ( $0.03\mu\text{m}$ ).

■ Effet de dopage de la couche CdS :

Le tableau V.4 résume les variations des valeurs de  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$  et  $\eta$  de la structure en fonction de dopage de la couche CdS, qui est varié de  $10^{15} \text{cm}^{-3}$  jusqu'à  $10^{19} \text{cm}^{-3}$ .

$N_d \text{ de CdS } (\text{cm}^{-3})$	$I_{cc} (\text{mA})$	$V_{co} (\text{mV})$	$\eta (\%)$
$10^{15}$	33.66	664	10.38
$5 \times 10^{15}$	33.93	663	12.26
$10^{16}$	34.11	662	13.59
$5 \times 10^{16}$	34.75	661	16.02
$10^{17}$	34.77	660	16.13
$5 \times 10^{17}$	34.78	659	16.17
$10^{18}$	34.90	659	16.58
$5 \times 10^{18}$	35.08	659	17.18
$10^{19}$	35.08	659	17.50
<b><math>5 \times 10^{19}</math></b>	<b>35.08</b>	<b>659</b>	<b>17.88</b>

**Tableau V.4. Caractéristiques de cellule solaire de CIGS en fonction du dopage de la couche CdS.**

L'effet de la variation du dopage de la couche tampon CdS de  $10^{15}$  à  $5.10^{19}$  sur le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert et sur le rendement est bien illustré respectivement sur les figures V.12.a, V.12.b et V.13.

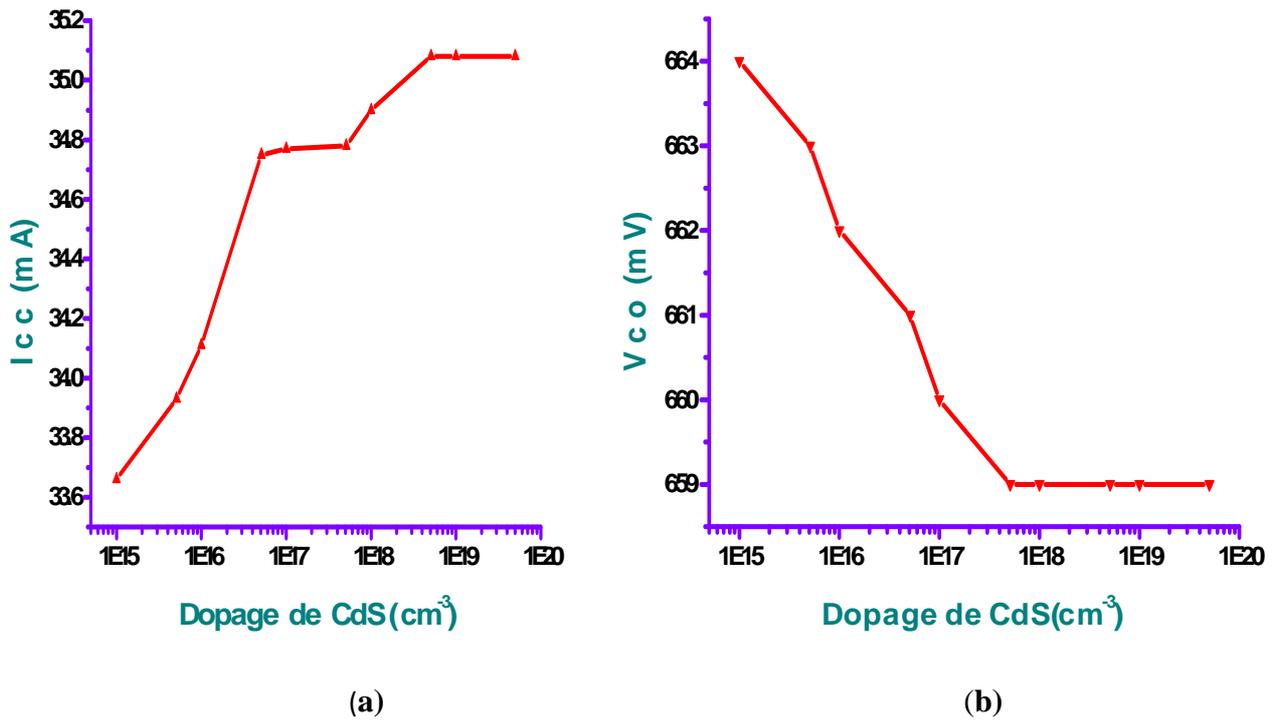


Fig. V.12. L'effet de dopage de la couche CdS sur le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$

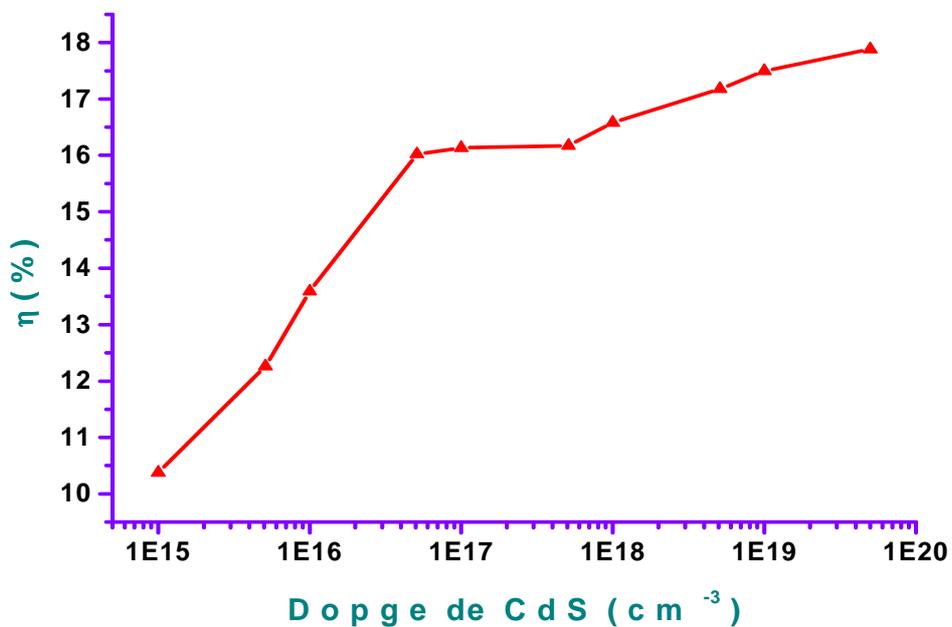


Fig. V.13. L'effet de dopage de la couche CdS sur le rendement

D'après la figure V.12.a le courant de court-circuit  $I_{cc}$  augmente avec l'augmentation du dopage de la couche tampon CdS jusqu'à une concentration du dopage de  $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , où le courant de court-circuit égale 35.08 mA, et après il reste constant malgré le dopage de la couche tampon augmente. Pour la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  qui est illustré dans la figure V.12.b, il commence à diminuer lorsque la concentration du dopage augmente. Ceci est du à l'augmentation du courant de saturation qui lié avec la tension du circuit ouvert par la relation suivante :

$$V_{co} = \frac{K_B T}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right) \quad (\text{V.2})$$

Et au dopage par la relation suivante :

$$I_0 = \frac{q D_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{q D_p n_i^2}{L_p N_D} \quad (\text{V.2})$$

Nous remarquons dans la figure V.13 que le rendement de notre structure augmente avec la concentration du dopage de la couche tampon. D'un point de vue théorique, lorsque le dopage de la couche tampon augmente, la barrière de potentiel dans l'hétérojonction CdS/CIGS augmente selon la relation (III.14) de troisième chapitre :

$$E_{s1} = -q N_{a1} / \epsilon_1 W_1 \quad (\text{V.2})$$

En plus une diminution de la zone de charge d'espace selon la relation suivante:

$$N_{a1} W_1 = N_{a2} W_2 \quad (\text{V.2})$$

D'où une amélioration de la collecte des porteurs photogénérés et donc une augmentation du rendement de conversion. Suite à ces résultats, nous pouvons dire que pour avoir une amélioration des performances pour une structure à base de CIGS, nous devons utiliser une couche tampon de type N fortement dopée.

### III.3.2. Effet de la couche CIGS sur le rendement de la cellule

#### ■ Effet de l'épaisseur de la couche CIGS :

Le tableau V.5 résume les variations des valeurs de  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$  et  $\eta$  de la structure en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS, qui varie de 0.5  $\mu\text{m}$  jusqu'à 4  $\mu\text{m}$ .

Epaisseur de CIGS ( $\mu\text{m}$ )	$I_{cc}$ (mA)	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)
0.5	34.35	658	16.01
1	34.79	660	16.21
<b>1.5</b>	<b>34.81</b>	<b>661</b>	<b>16.25</b>
2	34.78	659	16.17
2.5	34.77	659	16.13
3	34.77	658	16.11
3.5	34.76	658	16.08
4	34.75	658	16.05

**Tableau V.5. Caractéristiques de cellule solaire de CIGS en fonction d'épaisseur de la couche CIGS .**

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS de 0.5 à 4  $\mu\text{m}$  sur le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert et sur le rendement est illustré respectivement sur les figures V.14.a, V.14.b et V.15.

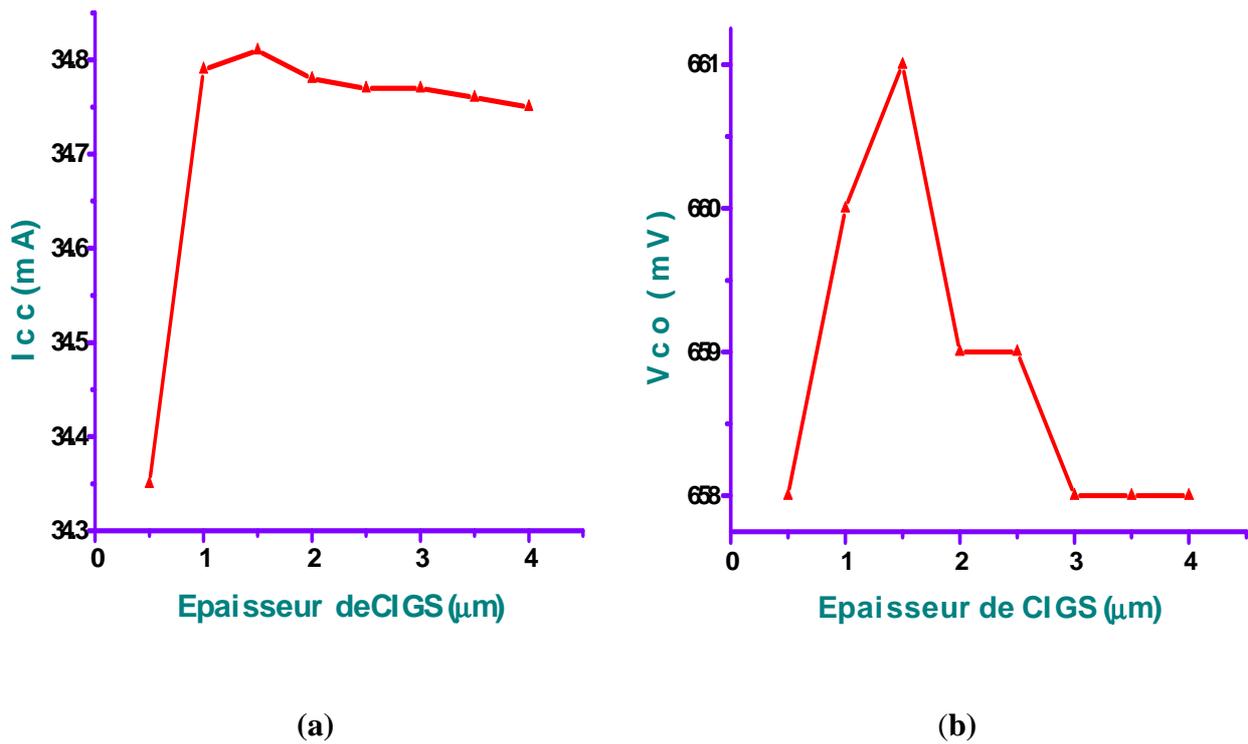


Fig. V.14. L'effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$

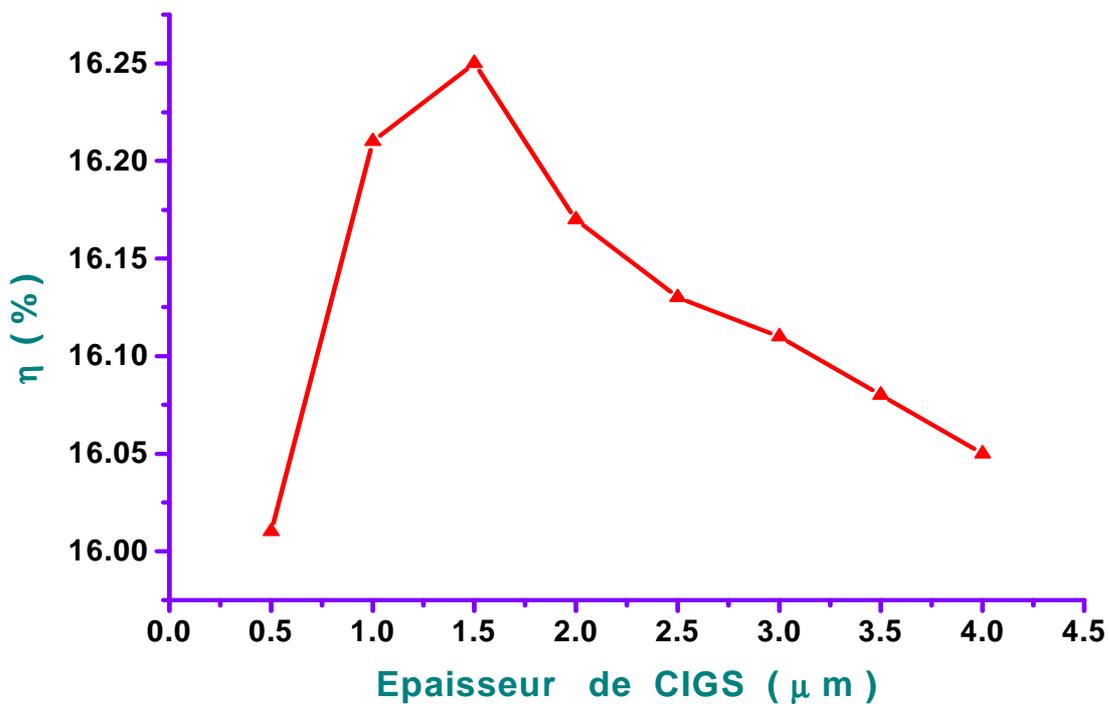


Fig. V.15. L'effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur Rendement

La figure V.14.a, représente la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS en fonction du courant de court-circuit, montre qu'il y a une petite augmentation du courant de court-circuit avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CIGS jusqu'à la valeur de 1.5  $\mu\text{m}$  où le courant  $I_{cc}$  prend sa valeur maximale de 34.81 mA, puis il commence à décroître lorsque l'épaisseur de la couche absorbante CIGS augmente.

Pour la figure V.14.b, qui montre la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS en fonction de la tension en circuit ouvert qui atteint sa valeur maximale de 661 mV puis diminue avec l'augmentation de la couche absorbante jusqu'à la valeur de 658 mV pour une épaisseur de 3  $\mu\text{m}$  puis demeure constante au-delà de cette dernière valeur.

On remarque d'après la figure V.15 qui représente la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS en fonction du rendement de notre structure que l'augmentation de l'épaisseur de la couche CIGS, provoque une petite amélioration du rendement jusqu'à sa valeur maximal de 16.25% pour une épaisseur de 1.5  $\mu\text{m}$  et puis il commence sa décroissance d'une manière douce vers une valeur finale égale à 16.05 % correspondant à une épaisseur maximale de 4 $\mu\text{m}$ .

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué que lorsque l'épaisseur de la couche absorbante augmente, il y a une décroissance de la tension en circuit ouvert et légère décroissance du courant de court-circuit et par conséquent, le rendement diminue. Ce résultat est expliqué par le retard du temps de transit des paires électrons trous créées à l'interface de la jonction CdS/CIGS vers le contact arrière, qu'implique une augmentation de la probabilité de recombinaison des porteurs générés (Recombinaison Volumique) dans cette couche ce qui diminue la densité du courant photo-généré et par la suite la diminution du rendement de conversion.

Il faut noter que les absorbeurs des cellules solaires ont souvent une épaisseur proche ou inférieure à la longueur de diffusion de leurs porteurs, c'est pour cette raison ; il faudrait choisir une épaisseur seuil pour avoir le rendement électrique optimal. Dans notre cas, cette épaisseur est de 1.5 $\mu\text{m}$ .

■ Effet de dopage de la couche CIGS :

Le tableau V.6 résume les variations des valeurs de  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$  et  $\eta$  de la structure en fonction de dopage de la couche CIGS, qui varie de  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  jusqu'à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

$N_a \text{ de CIGS } (\text{cm}^{-3})$	$I_{cc}(\text{mA})$	$V_{co} (\text{V})$	$\eta$ (%)
$10^{15}$	27.50	574	7.50
$5 \times 10^{15}$	34.23	640	14.63
$10^{16}$	34.78	659	16.17
<b><math>5 \times 10^{16}</math></b>	<b>34.76</b>	<b>703</b>	<b>16.97</b>
$10^{17}$	32.30	716	16.27
$5 \times 10^{17}$	25.95	758	13.42
$10^{18}$	23.23	784	7.06
$5 \times 10^{18}$	17.31	871	0.34

**Tableau V.6. Caractéristiques de cellule solaire de CIGS en fonction du dopage de la couche CIGS.**

L'effet de la variation du dopage de la couche absorbante CIGS de  $10^{15}$  à  $5 \cdot 10^{18}$  sur le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert et sur le rendement est bien illustré respectivement sur les figures V.16.a, V.16.b et V.17.

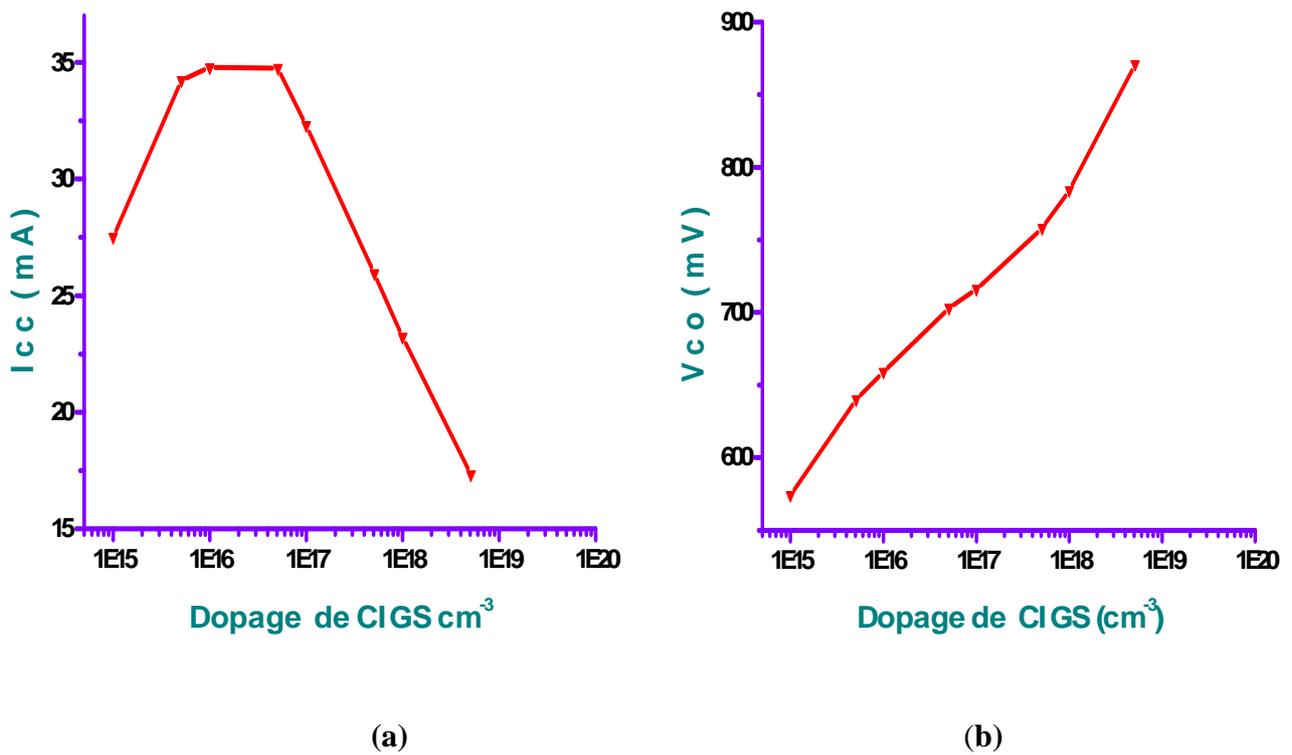


Fig. V.16. L'effet de dopage de la couche CIGS sur le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$

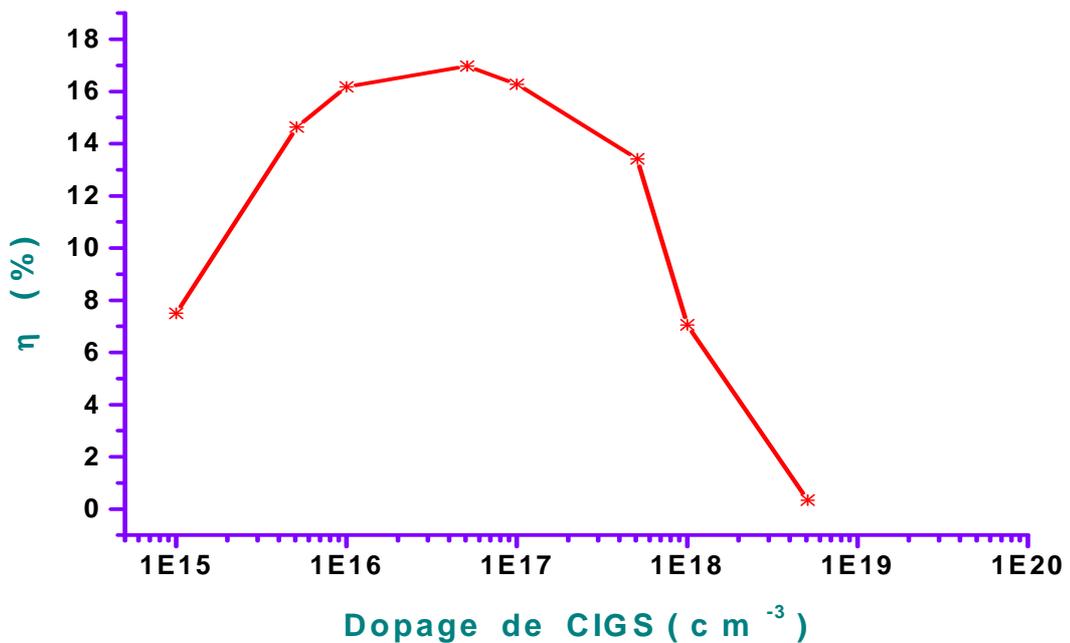


Fig. V.17. L'effet de dopage de la couche CIGS sur le rendement

La figure V.16.a, présente la variation du dopage de la couche absorbante CIGS en fonction du courant de court-circuit. On montre qu'il y a une petite augmentation du courant de court-circuit avec l'augmentation du dopage de la couche CIGS jusqu'à la valeur de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  où le courant  $I_{cc}$  prend sa valeur maximale de 34.78 mA, puis il commence à décroître lorsque le dopage de la couche absorbante CIGS augmente.

La figure V.16.b, montre la variation du dopage de la couche absorbante CIGS en fonction de la tension en circuit ouvert qui commence à croître avec le dopage de la couche absorbante où la tension en circuit ouvert attend sa valeur maximale de 871 mV pour un dopage de  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

On constate, d'après la figure V.17, que le rendement varie d'une manière croissante avec le dopage de la couche CIGS jusqu'à sa valeur maximal de 16.97 % , pour un dopage de  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , puis il commence à diminuer pour chaque augmentation du dopage jusqu'à sa valeur minimale de 0.34 % pour un dopage de  $10^{19}$ .

Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie, mais souvent ces impuretés dans le réseau, à partir d'un certain seuil, agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts défavorise le transport des porteurs.

D'un point de vue théorique, l'augmentation du dopage de la couche CIGS provoque la dégradation de la durée de vie ainsi que la mobilité des porteurs majoritaires ce qui implique l'augmentation des taux de recombinaison Shockley-Read-Hall et Auger. Cela entraîne une décroissance importante du rendement et du courant  $I_{cc}$  dans le cas d'une couche absorbante (La région P) fortement dopés.

Si la région P est faiblement dopé (inférieur à  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ), la hauteur de la barrière de potentiel de la jonction PN est réduite. Dans ce cas, le champ électrique de la jonction PN est moins fort et par conséquent la collecte des porteurs est mauvaise.

Cette étude nous a permis dans une première étape, de trouver les paramètres optimums de deux couches étudiées dans notre simulation (CdS et CIGS) qui donnent les meilleurs rendements. Ceci nous a permis dans une deuxième étape de concevoir la structure optimale de notre cellule solaire, en combinant les paramètres optimaux de chaque couche. Ceci nous a permis ainsi d'obtenir la structure optimale, qui nous a donné un rendement de conversion de 18.02 %. Nous présentons les paramètres optimums de la structure optimale obtenus par notre simulation dans le tableau V.7 suivant.

La couche tampon CdS		La couche absorbante CIGS		$I_{cc}(mA)$	$V_{co}(V)$	$\eta$ (%)
Epaisseur	Dopage	Epaisseur	Dopage			
0.03 $\mu$ m	$5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	1.5 $\mu$ m	$5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	35.08	675	18.02

Tableau V.7. Paramètres optimums de notre cellule solaire CdS/CGIS.

Après avoir trouvé les paramètres optimums qui nous donnent le rendement optimal nous passons maintenant à la deuxième partie de la simulation, où on varier la valeur du gap de la couche absorbante CIGS, en agissant sur le coefficient de composition stœchiométrique  $x$  qui est le rapport d'atomes de Gallium substitués par celles l'Indium de  $x = \left( \frac{\text{Ga}}{\text{In} + \text{Ga}} \right)$ .

### III.3.3. Effet du Gap de la couche CIGS sur le rendement de la cellule

Nous avons pris les valeurs optimales des différentes régions obtenues précédemment. Le tableau V.8 résume les variations des valeurs de  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$  et  $\eta$  de la structure en fonction du Gap de la couche CIGS agissant sur le coefficient de composition (X), qui varie entre 0.1 et 1, sachant que le Gap de la couche CdS reste constant (2.4 eV).

Gap	$X - comp$	$I_{cc} (mA)$	$V_{co} (V)$	$\eta$ (%)
1.0696	0	34.30	0.53	15.38
1.1042	0.05	34.41	0.58	16.23
1.1388	0.1	34.64	0.60	16.93
1.1734	0.15	34.87	0.63	17.47
1.208	0.2	35.08	0.675	18.02
1.2426	0.25	35.62	0.69	18.62
1.2772	0.3	35.72	0.71	19.08
1.3118	0.35	36.09	0.72	19.54
1.3464	0.4	36.23	0.74	20.11
<b>1.381</b>	<b>0.45</b>	<b>36.56</b>	<b>0.76</b>	<b>20.58</b>
1.4156	0.5	36.43	0.77	20.46
1.4502	0.55	36.29	0.78	20.33
1.4848	0.6	36.05	0.79	20.12
1.5194	0.65	35.11	0.80	19.17
1.554	0.7	34.58	0.81	18.42
1.5886	0.75	35.37	0.82	18.12
1.6232	0.8	35.18	0.83	17.86
1.6578	0.85	34.48	0.84	17.32
1.6924	0.9	34.97	0.85	16.87
1.727	0.95	34.12	0.86	16.13
1.7616	1	33.73	0.87	15.76

**Tableau V.8. Caractéristiques de cellule solaire de CIGS en fonction du facteur de composition (X).**

L'effet de la variation du coefficient de composition de 0.1 à 1 sur le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, ainsi que le rendement est bien illustré respectivement sur les figures V.18.a, V.18.b et V.19.

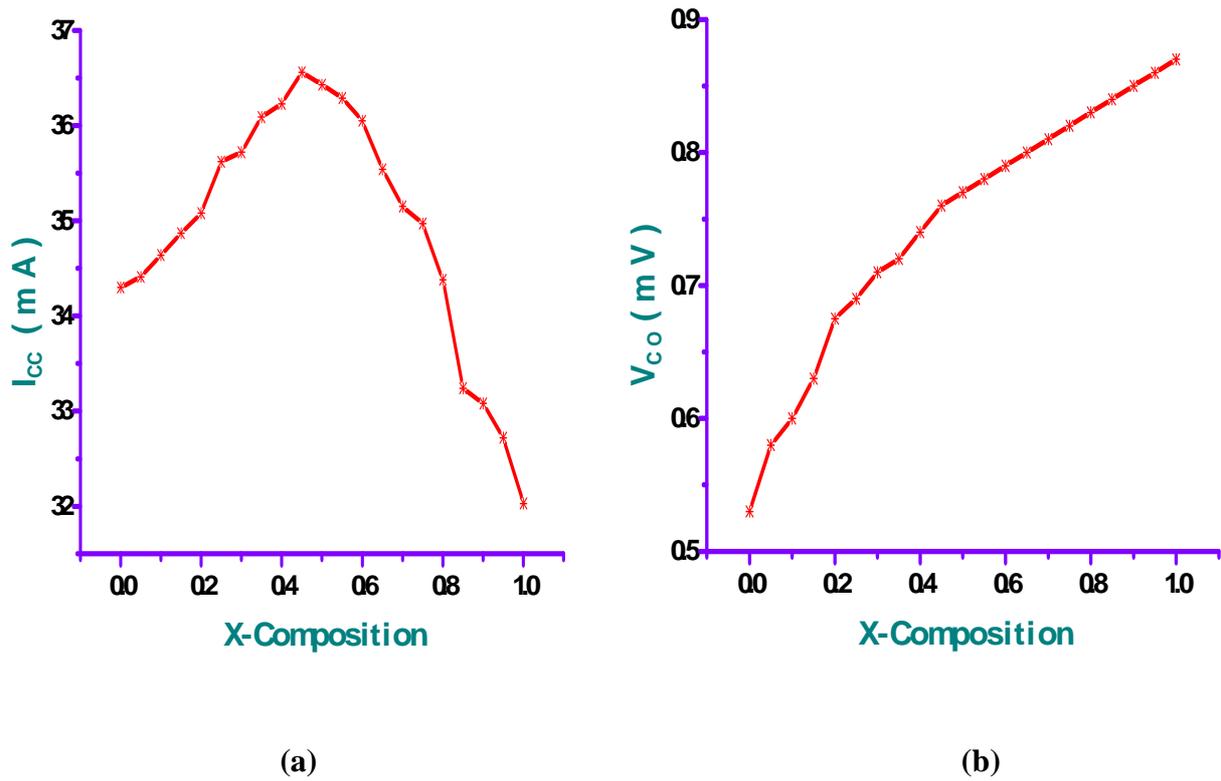


Fig. V.18. L'effet de Gap de CIGS sur le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$

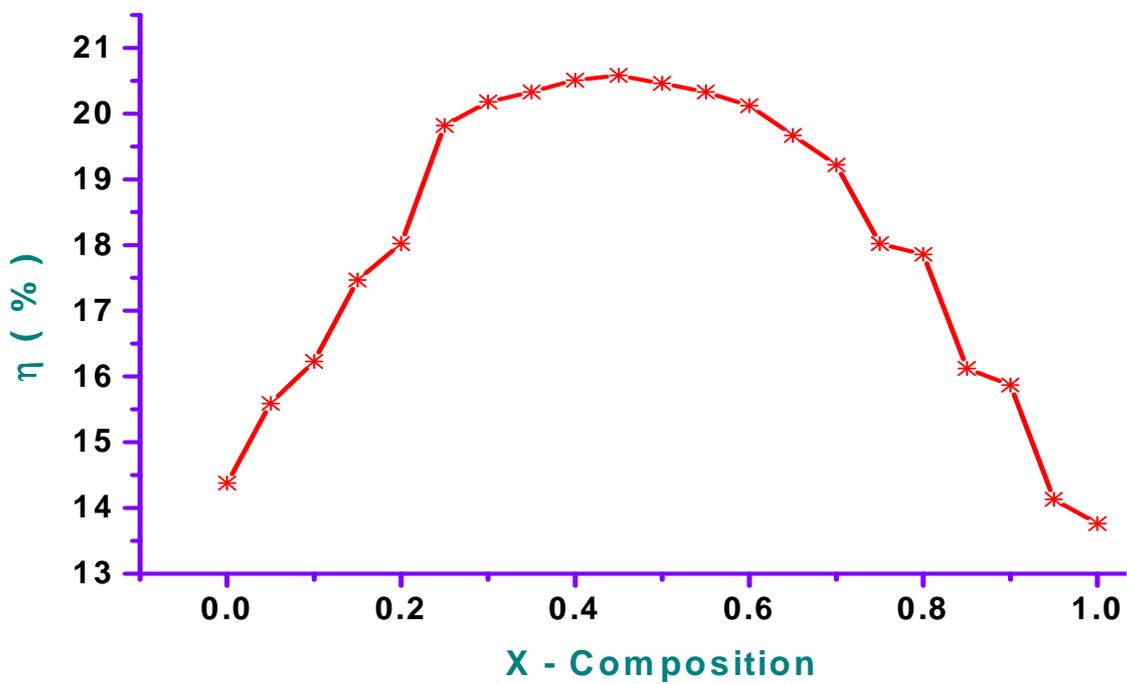


Fig. V.19. L'effet de Gap de CIGS sur le rendement

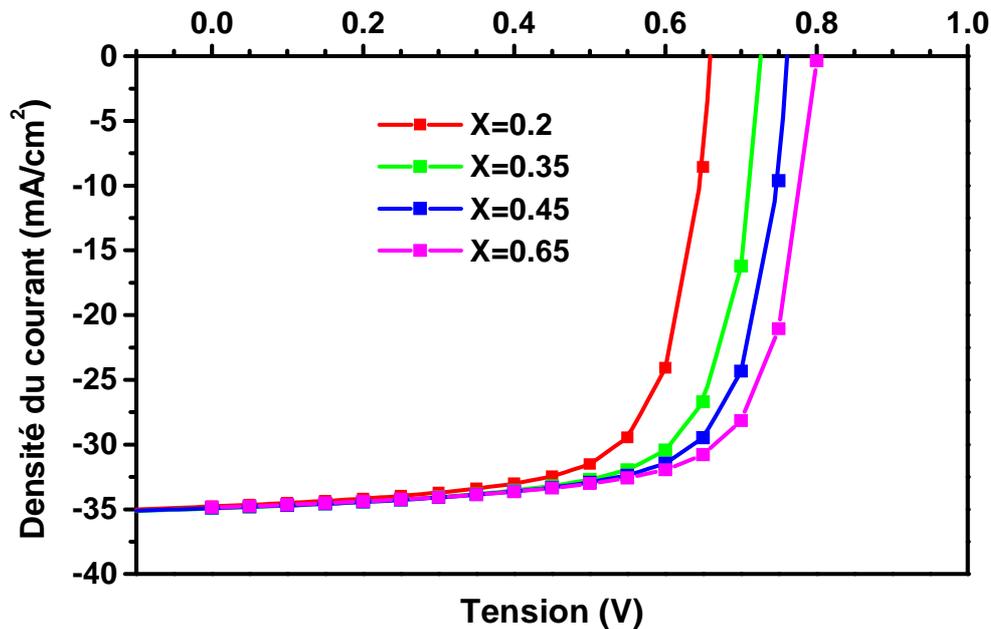


Fig. V.20. Evolution de la caractéristique I(V) en fonction du facteur de composition (X)

D'après la figure V.18.a qui représente la variation du coefficient de composition (X) en fonction du courant de court-circuit, nous remarquons une petite augmentation de courant de 35.51 mA jusqu'à sa valeur maximale de 35.61 mA pour un coefficient de composition variant de 0.30 jusqu'à 0.36, puis il commence à décroître. Alors pour la variation de X en fonction de la tension en circuit ouvert qui est illustré dans la figure V.18.b, nous remarquons une augmentation significative de la tension après chaque augmentation x jusqu'à sa valeur maximal de 900 mV.

Sur la figure V.19 nous représentons l'évolution du rendement de la cellule en fonction de x, on remarque qu'il prend la même allure que la courbe de V.18.a.

La variation de la caractéristiques I(V) de la cellule solaire en fonction de l'énergie de gap de CIGS est représentée sur la figure V.20. Les études actuelles s'orientent vers l'addition du Ga au CuInSe<sub>2</sub> pour augmenter le gap optique de ce matériau qui varie de 1.2 eV à 1.6 eV pour améliorer le rendement de conversion qui atteint 21.1% dans les conditions expérimentales. Une teneur plus élevée en Ga de 50% a un

---

effet néfaste sur la performance du dispositif, parce qu'elle affecte négativement les propriétés de transport du film d'absorbeur de CIGS.

Il est préférable d'avoir une valeur de  $E_g$  optimale, permettant d'absorber un spectre plus large. Il en résulte un courant plus important délivré par la cellule solaire ( $I_{cc}$ ). Cependant, c'est la valeur de  $E_g$  qui détermine la tension maximale délivrée par la cellule. Afin de maximiser le rendement de conversion, il est donc nécessaire d'obtenir un compromis idéal entre le courant et la tension. La plupart des résultats expérimentaux publiés dans le domaine des cellules CIGS montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un gap d'environ 1.4 eV, ceci correspond à un rapport de  $\left(\frac{Ga}{In + Ga}\right)$  entre 35 et 45%. [1]

#### IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'impact des deux couches, CdS (couche tampon), et CIGS (couche absorbante) sur le rendement d'une cellule solaire à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium ( $Cu(In,Ga)Se_2$ ), ayant une structure PN, dans le but de concevoir une structure photovoltaïque optimale, qui donne le meilleur rendement électrique. A cet effet, nous avons simulé les paramètres de sortie d'une cellule solaire à base de CIGS à hétérojonction en essayant de trouver les paramètres optimaux, donnant les meilleures caractéristiques de sortie.

En première partie, nous avons étudié l'effet du dopage et de l'épaisseur de chaque couche (CdS, CGIS) sur le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert ainsi que sur le rendement électrique. Nous avons constaté que les deux paramètres, dopage et épaisseur, ont un impact très significatif sur l'amélioration du rendement de la conversion électrique. On a constaté que la variation du dopage affecte les porteurs photo-générés. D'un côté, il est préférable d'augmenter la concentration du dopage dans la couche tampon CdS, car cette augmentation permet une amélioration de la collecte des porteurs photo-générés. Par contre, au niveau de la couche absorbante CIGS, un dopage de l'ordre de  $5.10^{16} \text{cm}^{-3}$  est suffisant pour donner un meilleur rendement.

Selon notre étude basée sur la simulation, nous avons, par ailleurs, pu optimiser des épaisseurs pour chaque couche. Ce qui permet à la fois une meilleure absorption de porteur des photons de courte longueur d'onde et une réduction considérable des pertes électriques associées aux mécanismes de recombinaison à l'interface et en volume. D'après notre étude, il

---

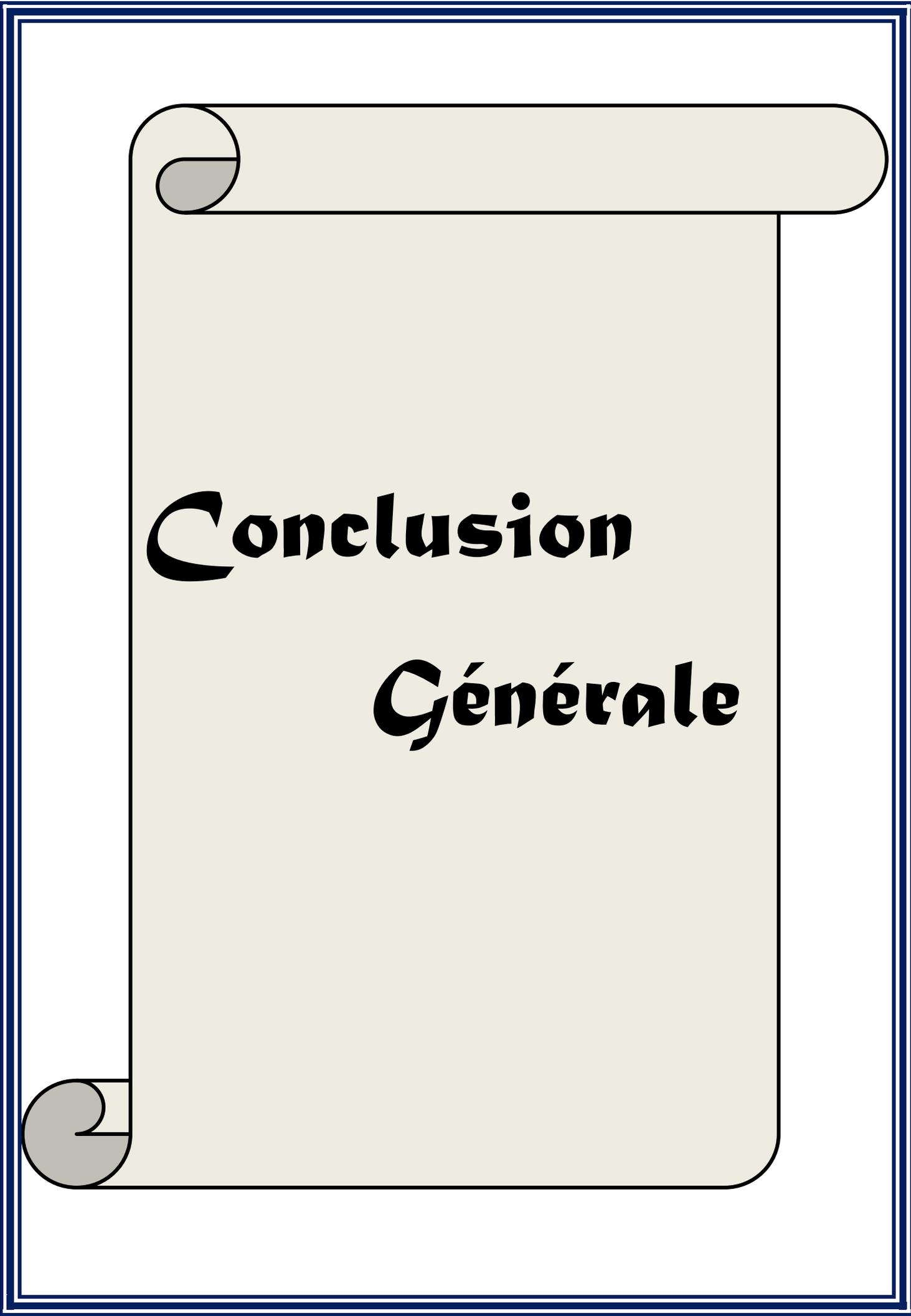
est nécessaire de diminuer l'épaisseur pour avoir un rendement optimale,  $0.03 \mu\text{m}$  pour la couche tampon CdS, et une épaisseur de  $1.5 \mu\text{m}$  de la couche absorbante assure le meilleur transport des porteurs en réduisant leurs recombinaisons au niveau du contact arrière.

En deuxième partie, et après avoir les valeurs optimales de chaque couche qui donnent le meilleur rendement électrique nous avons étudié l'effet du Gap de la couche CIGS sur le rendement de notre cellule. On a remarqué que l'accroissement du gap de cette couche provoque une hausse de la tension de diffusion. Il en découle l'amplification de la largeur de la zone neutre, donc la densité de courant de cette zone s'affaiblit, et le coefficient d'absorption de ce semi-conducteur diminue. Cela entraîne la décroissance des densités de courant de la zone de charge d'espace et la zone neutre P, mais la densité de saturation inverse diminue fortement et pour cela les performances de la cellule augmentent. On obtiendrait un meilleur rendement qui est de l'ordre de  $20.58 \%$  pour  $E_{g1}=2.4 \text{ eV}$ , et  $E_{g2}=1.38 \text{ eV}$ .

En effet, Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure ZnO/CdS/CIGS. Nous pouvons dire que les paramètres de chaque couche jouent un rôle très important vis-à-vis des performances du dispositif étudié et en particulier dans l'amélioration du rendement de conversion des cellules solaires à base de matériaux chalcopyrites (CIGS). Effectivement, puisqu'ils affectent les propriétés électriques de l'hétérojonction.

## Références bibliographiques

- [1] K. Bessem, « Etude par TCAD-silvaco d'une structure MOS pour la réalisation de capteurs ISFET paramètres technologiques et électrique », Mémoire magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [2] Site web [http://www.Silvaco.com/products/device\\_simulation/atlas.html](http://www.Silvaco.com/products/device_simulation/atlas.html). Mai 2012.
- [3] Bouaraba Fazia « Etude d'une LED à base d'InGaN pour l'émission de la lumière blanche » Mémoire magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi -Ouzou, 2012.
- [4] Fiche.pdf « Simulation des effets des irradiations par électrons a l'aide du simulateur de dispositifs atlas »
- [5] Kaghouch Bessem « Etude par Tcad-SILVACO d'une structure MOS pour la réalisation de capteurs ISFET : parametres technologiques et electriques », Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [6] Fiche.pdf « Utilisation des outils ATLAS (D EREDIT, DECKBUILD, TONYPLOT ) pour la simulation physique de la diode réalisée à l'AIME »
- [7] ATLAS users manual, SILVACO international, 2007
- [8] Fiche.pdf « TP SILVACO VWF Interactive Tools » Jérôme BOCH Jean-Marc GALLIERE
- [9] DIB Wassila « Modélisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliques ». Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen, 2010
- [10] Mostefa Kara Selma « Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS ». Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen, 2012
- [11] D. Truyen, « Etude par simulation composant 3D des effets singuliers SEU et SET induits par ions lourds sur le nœud technologique CMOS bulk 180 nm », thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 2007.
- [12] JONES PETTERSSON « Modelling Band Gap Gradients And Cd- free Buffer Layers in Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> Solar Cells ». Université UPPSALA, 2012.



**Conclusion**

**Générale**

---

## CONCLUSION GENERALE

L'utilisation massive de l'énergie solaire nécessite une réduction supplémentaire des coûts de production. Pour pallier à cela, un grand nombre d'équipes de recherches explorent et élaborent d'autres matériaux en couches minces pour fabriquer des cellules solaires à moindre coût et plus performantes. Dans cette perspective, la filière basée sur les composés  $\text{CuInGaSe}_2$  est en émergence car il se présente comme une alternative intéressante. Ce matériau a vu le jour récemment et il est encore au stade d'expérimentation; il est inscrit comme un bon candidat comme couche absorbante; bon marché et qui respecte l'environnement.

Malgré le développement de cette technologie, le contrôle des propriétés de ces matériaux reste encore difficile. Notre structure étudiée qui est une cellule solaire du type  $\text{ZnO/CdS/CIGS}$  est un exemple parmi tant pour exploiter au maximum cette source d'énergie éternelle. L'objectif de notre mémoire ne sort pas de ce contexte. Il a pour but de mettre en lumière l'influence des procédés d'élaboration et de fabrication de ce type de cellules photovoltaïques. L'étude théorique et la recherche bibliographique sur notre sujet a été bénéfique pour moi et je l'espère aussi pour les étudiants qui veulent travailler sur ce domaine pertinent.

La diversité des travaux de recherches concernant la technologie et les techniques de réalisation, nous a permis de voir notre problématique sous un autre angle, qui coule toujours vers un seul sens : comment optimiser toutes ces efforts pour aboutir à des dispositifs performants et qui a un meilleur rapport rendement/prix.

L'étude de simulation et de modélisation des phénomènes de conduction dans les cellules solaires en couches minces est intéressante. Les caractéristiques de ces dispositifs, nous a permis d'optimiser les paramètres physiques et technologiques d'une structure spécifique de cellule solaire à base de CIGS pour obtenir un rendement de conversion électrique maximal.

La modélisation et la simulation ont été faites à l'aide du logiciel ATLAS<sup>Silvaco</sup>-2D, pour étudier les performances de notre cellule solaire choisie.

Nous avons évalué, dans un premier temps, le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , la puissance maximale  $P_{max}$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement électrique  $\eta$ .

Grace à une comparaison avec des travaux expérimentaux réalisés par **JONES PETERSSON** [Université UPPSALA], on a pu constater une bonne concordance avec les résultats obtenus par simulation. Nous pouvons prédire de maximiser et de performer le fonctionnement de nos cellules par ajustage de certaines paramètres, en intervenant sur nos programmes de simulations.

Les courbes et résultats présentés dans ce mémoire concernent généralement la problématique de valorisation de l'énergie photovoltaïque par des outils puissants tels que la simulation optoélectronique. Notre prochaine étape, si les conditions seront favorables sera la réalisation de nos propres cellules, en choisissant les technique les plus économiques afin d'émerger cette maitrise technologique au pays plus ou moins pauvres afin qu'ils rentrent rapidement dans l'aire des nouvelles technologies pour une énergie renouvelable, surtout en confrontant les défis actuels de chute des prix des énergies fossiles et de plus en plus leur rareté.

## ABSTRACT

The global market for conventional silicon solar cells remains dominant over other types of semiconductors. However, the cost of producing solar cells in thin layers is reduced more and more, thanks to technological advances in recent years, research in this area. Therefore, several subsidiaries were reactivated, especially the so-called chalcopyrite semiconductor structures, with their interesting electrical properties for photovoltaic applications.

This work is the study and design of thin films heterojunction solar cells. The absorber layer is a chalcopyrite-type CIGS (Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>) material, on which is deposited a thin film of CdS is a wide gap semiconductor (window) and the ZnO is a transparent layer which constitutes front contact of our structure.

After the theoretical study of the principle solar cells heterojunction, the student must fly on the state of the art manufacturing technology and different techniques for making such structures, the manufacturing process and the choice of technology and techniques deposition.

Using a modeling technology and adequate electrical simulation (Athena and Atlas) of Silvaco, the student must control all calculation models involved in semiconductor devices, especially in the heterojunction devices.

Next, adjust all physical parameters in order to optimize the electrical parameters of the device as well studied, such as the photocurrent, the open circuit voltage and eventually, the photovoltaic efficiency.

**Keywords:** solar cell, thin film, chalcopyrite, heterojunction, simulation, ATLAS<sup>Silvaco</sup>.

## ملخص

إن السوق العالمية لخلايا السليكون الشمسية التقليدية لا يزال مهيمنا على الأنواع الأخرى من أشباه الموصلات. رغم ذلك، يتم إنتاج الخلايا الشمسية المسماة ذات الطبقات الرقيقة بتكلفة منافسة أكثر فأكثر، وهذا بفضل التقدم التكنولوجي و البحوث الذي عرفتها السنوات الأخيرة في هذا المجال. ولذلك، تم تنشيط العديد من الشركات و الهياكل التي تعمل في مجال أشباه الموصلات المسماة chalcopyrite، لما لها من خواص كهربائية جد مهمة لأجل التطبيقات الضوئية.

هذا العمل هو دراسة وتصميم الخلايا الشمسية الغير المتجانسة ذات طبقات رقيقة. طبقة ماصة هي مادة ال chalcopyrite من نوع CIGS التي نضع فوقها طبقة CdS (نافذة) ثم أخرى هي أكسيد الزنك ZnO و التي هي بمثابة طبقة شفافة و الذي يعتبر الواجهة الأمامية للجهاز.

بعد الدراسة النظرية لعمل الخلايا الشمسية غير المتجانسة، يجب على الطالب أن يتطلع بدراسة شاملة و حديثة عن تكنولوجيا التصنيع والتقنيات المختلفة لصنع مثل هذه الخلايا، من عملية التصنيع، واختيار التكنولوجيا فيما يتعلق غيرها من تقنيات ترسيب المواد المستعملة في هذا الإطار.

باستخدام تقنية النمذجة والمحاكاة الكهربائية الكافية (Athena-Atlas de Silvaco)، يجب على الطالب إتقان كافة نماذج الحساب التي تتحكم في

حركة حاملات الشحنة في أشباه الموصلات، وخاصة في غير المتجانسة منها.

أخيرا، يجب ضبط جميع العوامل المادية و الفيزيائية من أجل تحسين الخواص الكهربائية التي تم دراستها للجهاز و المتمثلة في ال photocourant، توتر الدارة المفتوحة V<sub>co</sub> و حتما المرودود الكهروضوئي.

**كلمات البحث:** الخلايا الشمسية، الطبقات الرقيقة، chalcopyrite، شبه الموصلات الغير المتجانسة، المحاكاة الكهربائية، ATLAS<sup>Silvaco</sup>.