

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des matériaux

Présenté par :

BEN ABD RREZAK AYMEN & CHEBABHI MESSAOUD

Thème

**Étude comparative entre les performances des cellules
Photovoltaïques (CdS / CIGS) et (ZnSe/CIGS).**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Benhamadouche .L	MCB	Président
Bechane.L	MCB	Encadreur
DAOUDARI .A	MAA	Examineur.

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2021



REMERCIEMENTS

Nous remercions notre Dieu pour la santé et le courage qu'il nous a donnés
pour accomplir cet humble travail.

Nous remercions nos chers parents qui font de leur mieux dans la vie pour
la réussite de leurs enfants, et je souhaite que Dieu les protège. Cela leur
donne santé et activité.

Nous remercions également Me Bechane Leila, qui a mené nos travaux avec
beaucoup de patience et d'amitié malgré ses nombreuses inquiétudes.

Je la remercie également pour son aide et ses conseils durant ce travail.

Nous remercions du fond du cœur tous les enseignants du Collège de
technologie, en particulier ses professeurs à

Département de mécanique d'Al-Msila qui a contribué à ma formation.

Enfin, je tiens à remercier toutes les
personnes du monde entier qui ont
contribué à la réalisation de ce
travail.



DÉDICACE

Nous commençons notre dévotion en remerciant Dieu, car Il nous a guidés dans notre cheminement d'étude et nous a donné une forte volonté de continuer à étudier.

Nous dédions cet acte humble en signe d'appréciation et de respect à : nos parents, pour nous avoir donné confiance, courage et toutes les possibilités de terminer nos études universitaires.

A nos chères sœurs, qui nous ont toujours préférées,

À tous nos amis et j'espère que nous n'oublierons jamais personne À toute la famille et à tous ceux qui nous connaissent.

Remerciements

Avant tout, nous remercions dieu qui nous aidé et donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous tient à remercier notre encadreur le professeur **Bechane. LEILA** pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils.

Nous souhaiterons ensuite remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

N'oublions pas nos parents et nos familles, pour leurs prières et leurs encouragements.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à vous tous.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos mères, sources de tendresse et d'amours pour leurs soutiens
tout le long de notre viescolaire.

Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout possible pour nous aider.

Nos frères et nos sœurs, que

nous aimons beaucoupNos

grandes familles

Nos Chers amis et enseignants

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur les cellules Photovoltaïque

I.1.Introduction.....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	4
I.3.1. Notion préliminaire sur le rayonnement solaire	6
I.3.2. L'interaction rayonnement/semi-conducteur.....	8
I.3.3. Illustration des différents mécanismes au niveau des bandes énergétiques.....	10
I.3.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	11
I.4. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	13
I.5. Les différentes filières photovoltaïques.....	14
I.5.1. La filière silicium cristallin	14
I.5.1.1. Le silicium monocristallin	15
I.5.1.2. Le silicium multi cristallin.....	15
I.5.2. La filière couches minces	16
I.5.2.1. Le silicium amorphe (a -Si : H)	16
I.5.2.2. Le tellure de cadmium CdTe	16
I.5.3. Le di sélénure de cuivre et indium (CIS ou CIGS)	17
I.5.4. La filière des cellules organiques	18
I.5.5. La filière des pérovskites	19
I.5.6. Cellules multi-jonctions à haut rendement.....	20

Chapitre II : Propriété des matériaux (ZnSe, CdS, CIGS et ZnO

II.1. Propriétés fondamentales de CIGSe	23
II.1.1. Structure cristallographique du composé CIGSe.....	23
II.1.2. Propriétés optiques.....	24
II.2. Le matériaux ZnO.....	29
II.2.1. Propriétés cristallographiques du ZnO.....	29
II.2.2. Propriétés électriques de l'oxyde de Zinc (ZnO)	32

II.2.3. Propriétés optiques.....	32
II.3. Propriétés de sulfure de cadmium (CdS).....	33
II.3.1 Structure cristalline du sulfure de cadmium (CdS).....	33
II.3.2. Propriétés électriques du CdS.....	34
II.3.3. Propriétés optiques du CdS.....	34
II.4. Structure de blende (ZnS, ZnSe).....	36
II.4.1. propriétés électriques de ZnS et ZnSe.....	36
II.4.2. Propriétés optiques de ZnS et ZnSe.....	37

Chapitre III : Logiciel de simulation AMPS-1D

III. Aperçu sur le fonctionnement de l'AMPS	41
III.1. Liste des paramètres à introduire	42
III.1.1. Paramètres qui s'appliquent au dispositif entier	43
III.1.1.1. Conditions aux limites	43
III.1.1.2. Vitesse de recombinaison en surface	44
III.1.1.3. Coefficient de réflexion de la lumière entrant sur les surfaces avant et arrière	44
III.1.1.4. La température T(k)	44
III.1.2. Paramètres qui s'appliquent à une région particulière	44
III.1.2.1. La largeur W ou XLAYER (A) d'une région	44
III.1.2.2. Propriétés du matériau	44
III.1.2.3. États de défaut discret	45
III.1.2.4. Défauts localisés aux queues et aux états moyens (forme ``V`` ou ``U``)	47
III.1.2.5. Niveaux gaussiens (0,1 ou 2 niveaux accepteurs et 0,1 ou 2 niveaux donneurs)	47
III.1.3. Paramètres qui définissent le spectre d'illumination	49
III.2. le panneau de différents résultats obtenus	50

Chapitre IV: Simulation et interprétation des résultats

IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Simulation et interprétation du résultats	52
IV.2.1. Description de la structure.....	52

IV.2.2. Paramètres d'entrées et Simulation de la structure.....	53
IV.3. Résultats et discussion de la cellule (ZnO/CdS/CIGS).....	54
IV.3.1. Effet de l'épaisseur de la couche active $\text{Cu In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) en fonction de la Concentration.....	54
IV.3.2. Effet de l'épaisseur de la couche tampon (CdS) en fonction de la concentration.....	56
IV.3.3. Effet de l'épaisseur de la couche tampon (ZnO) en fonction de la concentration.....	58
IV.4. Résultats et discussion de la cellule (ZnO/ZnSe/CIGS).....	59
4.1 Effet de l'épaisseur de la couche active $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) en fonction de la Concentration.....	59
IV.4.2. Effet de l'épaisseur de la couche tampon (CdS) en fonction de la concentration.....	60
IV.4.3. Effet de l'épaisseur de la couche tampon (ZnO) en fonction de la concentration.....	62
IV.5. Rendement quantique.....	64
IV.6. Comparaison entre les deux cellules.....	65
IV.7. Conclusion.....	65
Conclusion générale	66

Liste des figures :

Figure I.1 : schéma de principe convention de cellule photovoltaïque.....	5
Figure I.2 : Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque..	6
Figure I.3 : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 d'après Le domaine Spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.....	8
Figure I.4 : Transitions interbandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) Correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect.....	9
Figure I.5. Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en Fonction de la longueur d'onde, d'après.....	10
Figure I.6 : lustration des différents mécanismes au niveau des bandes énergétiques...	11
Figure I.7. lustration des différents mécanismes extérieurs.....	12
Figure I.8 : schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	14
Figure I.9. Part de marché des différentes technologies photovoltaïques en 2007.....	15
Figure I.10 : cellule abrase de silicium monocristallin	16
Figure I.11 : Cellules de silicium poly cristallin.....	17
Figure I.12 : cellule pérovskite.....	21
Figure I.13 : Cellules multi-jonctions à haut rendement.....	22
Figure II.1: Classification périodique des éléments constituant la famille I-III-VI ₂	24
Figure II.2: Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines CIGS.....	24
Figure II.3: Représentation des coefficients d'absorptions de quelques matériaux en Fonction de longueur d'onde.....	26
Figure II.4 : Représentation des indices de réfraction (réelle et imaginaire) en fonction de L'énergie pour le CIGS, avec $x = 0$ et $x = 0.2$	27
Figure II.5: Largeur de bande interdite et paramètre de maille a de certaines chalcopyrites..	28
Figure II.6: Variation de $(\alpha h\nu)^2$ en fonction de $h\nu$	28
Figure II.7: Structure cristalline du ZnO.....	29
Figure II.8: (a) Structure wurtzite de CdS, (b) Structure blende de CdS.....	34
Figure II.9: structure de ZnS.....	36

Figure III.1: différentes fenêtres pour introduire les paramètres.....	43
Figure III.2: différentes paramètres pour la couche ZnO.....	45
Figure III.3: Défauts donneurs discrets et continues pour la couche CdS.....	46
Figure III.4: Défauts accepteur discrets et continues pour la couche CdS.....	49
Figure III.5: Coefficients d'absorption pour la couche CdS.....	50
Figure III.6: le panneau des courbes.....	51
Figure IV.1 : Structure de la cellule solaire, a (ZnO/CdS/CIGS) et b (ZnO/CdS/CIGS).....	53
Figure IV.2: Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS.....	55
Figure IV.3 : Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.....	57
Figure IV.4 : Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.....	58
Figure IV.5 : Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS.....	59
Figure IV.6 : Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche ZnSe.....	61
Figure IV.7 : Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.....	62
Figure IV.8: Rendement quantique pour les trios cellules simule en condition de court-circuit ($V_{oc}=0$) et d'illumination AM1.5G a l'aide d'AMPS-1D.....	64

Liste des tableaux :

Tableau II.1: Récapitulatif des caractéristiques de la structure cristalline du ZnO.....31

Tableau II.2: Gap optique E_g (eV), énergie d'Urbach (E_u), seuil d'absorption et transmittance des films de CdS déposé par bain chimique publiés dans la littérature...35

Tableau IV.1 Les paramètres des différentes couches de notre cellule dans le tableauIV.1...54

Tableau IV.2 la différence entre deux cellules lorsque $x=1$65

Liste des acronymes et abréviations

E_c : la bande de conduction
 E_f : niveau de fermi
 E_v : la bande de valence
 E_l : les électrons libres
 H_l : les trous libres
 J_d : caractéristique I-V à l'obscurité,
 J_l : caractéristique I-V à la lumière
 J_n : courant d'électrons
 J_p : courant de trous
 R_a : la recombinaison d'accepteurs
 R_d : la recombinaison de donneurs
 R_t : la recombinaison totale
 V_{co} : Tension de circuit ouvert
 η : Rendement électrique
FF : Facteur de forme
 P_m : Puissance maximale fournie par une cellule
 λ : Longueur d'onde
 ϕ : éclaircissement reçu par l'échantillon
H : Constante de planck
C : Vitesse de la lumière
 P_i : Puissance incidente
T : Température
I : Courant de la cellule
 I_m : Courant maximale
 V_m : Tension maximale
Q : charge élémentaire
 I_{ph} : Photo-courant
 I_0 : Courant inverse de saturation
A : Facteur de qualité de diode
K : Constante de Boltzmann
 R_s : Résistance en série
 R_{sh} : Résistance Shunt
 I_D : Courant de diode
A : Coefficient d'absorption
 E_g : Energie de bande interdite d'un matériau
V : Fréquence
 E_c : Energie du bas de la bande de conduction J ou eV
 E_v : Energie du haut de la bande de valence J ou eV
 L_n : Longueur de diffusion des électrons
 L_p : Longueur de diffusion des trous
G : Taux de génération
E : Energie d'irradiation
TCO : Transparent Conductiveoxide
EQE : Rendement Quantique Externe
CdS : Sulfure de cadmium
CIS : séléniure de cuivre et indium
CIGS : Di-séléniure de gallium d'indium de cuivre (Cu (In, Ga) Se₂)
HTM : matériau de transport de trous
ZnO : Oxyde de Zinc
N : Densité d'état par unité de volume cm⁻³
 $\epsilon_{0,er}$: La permittivité du semi-conducteur F cm⁻¹
EF : L'énergie de Fermi E_v

Liste des acronymes et abréviations

J_n, J_p : densités de courants des électrons et des trous mA cm^{-2}

ρ : La densité de charge d'espace C cm^{-3}

AMPS-1D : analyse des structures photoniques et microélectroniques à une seule dimension

Courant de court-circuit A

FF : Facteur de forme %

η : Rendement photovoltaïque

ν : Fréquence Hz

VOC : Tension de circuit ouvert V

k : La constante de Boltzmann J K^{-1}

E_g : L'énergie du gap eV

I_0 : l'intensité lumineuse incidente A

N_A : densité des accepteurs cm^{-3}

N_D : densité des donneurs cm^{-3}

N_c : Densité d'états des électrons
 cm^{-3}

N_v : Densité d'états des trous cm^{-3}

E : Champ électrique Vm^{-1}

Ψ : potentiel électrostatique V

Liste des acronymes et abréviations

Introduction générale :

Depuis le début du 21ème siècle, les problèmes énergétiques et environnementaux à l'échelle mondiale sont devenus de plus en plus importants. L'énergie solaire a les avantages d'une énergie inépuisable et propre, c'est donc une solution efficace aux pénuries d'énergie, à la pollution de l'environnement et à l'effet de serre. Les dispositifs photovoltaïques démontrent qu'ils sont prometteurs pour le marché commercial en tant que technologie de conversion d'énergie renouvelable portable, qui consiste à convertir directement la lumière du soleil en électricité sans qu'aucun moteur thermique n'interfère.

Aujourd'hui, le marché photovoltaïque est dominé par les cellules solaires en silicium cristallin (c-Si) sous ses formes multicristallines et monocristallines. Jusqu'à présent, les cellules solaires en silicium cristallin ont atteint une efficacité supérieure à 25%.

Les cellules à base de Cu (In, Ga) (S, Se)₂, l'une des cellules solaires en couches minces les plus compétitives, a atteint un rendement de conversion allant jusqu'à 23.35%. L'efficacité record des appareils PVK dépasse 22%. Le matériau CIGS est le semi-conducteur ayant un gap d'énergie approprié et un coefficient d'absorption optique élevé dans le domaine visible du spectre solaire. Le coefficient d'absorption de films en CIGS est 100 fois plus grand que celui du Si dans le domaine de visible du spectre solaire.

L'étude par simulation numérique des cellules solaires en couches minces reste la moyenne la plus performante pour estimer les performances des cellules. Par ces outils de simulation beaucoup de paramètres peuvent être variés pour modéliser les phénomènes expérimentalement observés.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier l'influence de l'épaisseur de la couche absorbant sur les performances photovoltaïques des cellules solaires ZnO/CdS/CIGS puis la cellule ZnO/ZnSe/CIGS, utilisant un outil de simulation très puissant et très adaptés à ce genre des structures, s'appel : AMPS-1D.

Ce mémoire est structuré de la façon suivante :

Après une introduction générale, le premier chapitre présente des généralités sur Généralités sur les cellules photovoltaïques ;

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les propriétés fondamentales du propriétés des Matériaux semi-conducteurs (ZnO, CIGS, CdS, ZnSe). Dans le troisième chapitre, nous présenterons le logiciel AMPS-1D utilisé dans notre étude de simulation.

Dans le quatrième chapitre, des discussions et des interprétations des résultats obtenus par la simulation de la cellule solaire à base du CIGS.

Nous clôturerons le travail par une conclusion générale ainsi que des perspectives de ce travail.

Chapitre I :

Généralités sur les cellules Photovoltaïque

I.1.Introduction

La technologie photovoltaïque, qui permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique par l'effet photovoltaïque, est considérée comme l'une des voies les plus prometteuses pour le développement de l'énergie propre et renouvelable. Depuis le début du siècle, l'industrie photovoltaïque a bénéficié d'une croissance exponentielle, pour atteindre une production supérieure à 23 GW en 2010 [2]. Selon le dernier rapport de « GTM Research » (Greentech Media) sur le marché solaire mondial pour le troisième trimestre 2016, la demande mondiale atteindra cette année un nouveau record à 73 gigawatt (GW) en croissance de 33 % par rapport à l'année précédente, avec une majorité de systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité [2].

Les systèmes photovoltaïques non raccordés au réseau sont également promis à un avenir radieux. Les systèmes PV isolés permettent, d'alimenter en énergie électrique des zones qui ne sont pas desservies par le réseau. D'autre part, les composants de récupération d'énergie par effet photovoltaïque, pour l'alimentation de dispositifs électroniques autonomes, constituent un marché en pleine expansion qui représentera plusieurs milliards de dollars à l'horizon 2020, à la fois pour des applications grand public (électronique nomade) mais également professionnelles (capteurs pour le bâtiment et la surveillance des structures) [3]. En 2011, 87 % des installations photovoltaïques installées dans le monde comportaient du silicium mono ou multi cristallin [3]. Bien qu'étant l'élément chimique le plus abondant sur Terre après l'oxygène, le silicium ne peut être trouvé à l'état pur. Il doit donc être extrait de la silice, purifié, mis en forme puis dopé avant d'être utilisé. Toutes ces opérations ont un important coût énergétique [3].

En 2011, 87 % des installations photovoltaïques installées dans le monde comportaient du silicium mono ou multi cristallin [3]. Bien qu'étant l'élément chimique le plus abondant sur Terre après l'oxygène, le silicium ne peut être trouvé à l'état pur. Il doit donc être extrait de la silice, purifié, mis en forme puis dopé avant d'être utilisé. Toutes ces opérations ont un important coût énergétique [3].

I.2. Historique

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte pour la première fois par Antoine Becquerel en 1839 [1]. C'était qu'en 1958 où le premier engin spatial alimenté par énergie photovoltaïque a été lancé dans l'espace. Jusqu'à maintenant, l'énergie solaire photovoltaïque est le seul type d'énergie d'alimentation des satellites [1]. Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que

l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware. La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie. En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne et ils se généralisent depuis 2001 [1]. Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter [1].

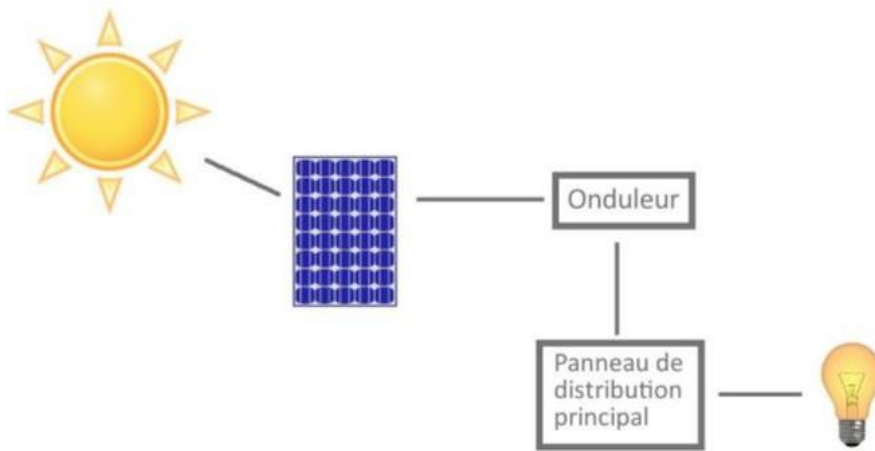


Figure I.1. Schéma de principe convention de cellule photovoltaïque

I.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule est l'élément de base d'un panneau photovoltaïque. C'est elle qui convertit l'énergie lumineuse des photons en énergie électrique par effet photoélectrique. L'effet photovoltaïque s'appuie principalement sur trois grands principes dont l'action combinée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [4] :

- *L'absorption de photons.
- *La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.
- *La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

Le principe général du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est décrit par le schéma de la figure (2) Les dispositifs classiques sont généralement constitués d'un matériau semi-conducteur, comme le silicium, qui absorbe les photons de la lumière incidente (absorbeur ou base). Un semi-conducteur est constitué d'une bande de valence et d'une bande de conduction, dans lesquelles circulent les porteurs de charges, respectivement positives (les trous) et négatives (les électrons). On définit alors la bande interdite EG (ou gap) par la

différence d'énergie entre le haut de la bande de valence E_V et le bas de la bande de conduction E_C . Lorsque l'énergie des photons incidents h est supérieure à la bande interdite E_G du semi-conducteur, un électron de la bande de valence est excité dans la bande de conduction, ce qui crée un trou : on dit qu'il y a photo génération de paires électron-trou. En conséquence, la concentration de porteurs dans les bandes d'énergie augmente. L'énergie absorbée en excès par rapport à E_G est perdue sous forme de chaleur par désexcitation des porteurs : c'est le processus de thermalisation. Ces porteurs photo- générés doivent ensuite se déplacer vers les contacts et être collectés, afin de générer un courant dans le circuit électrique connecté ; vu de l'extérieur de la cellule, les électrons proviennent du pôle négatif (n) et les trous du pôle positif (p). Pour réaliser cette séparation des porteurs, il est nécessaire que la structure du matériau soit dissymétrique. Il faut faire en sorte que les électrons (respectivement les trous) souhaitant circuler vers le côté p (respectivement le côté n) rencontrent une barrière. Concrètement, c'est un champ électrique au sein du matériau ou des interfaces, orienté de la zone n vers la zone p qui permet d'orienter le mouvement des porteurs. Par exemple, on peut créer un tel champ électrique en réalisant une jonction p/n par dopage de la surface du semi-conducteur, ou en réalisant une hétérojonction en associant deux matériaux de natures et de types différents [5].

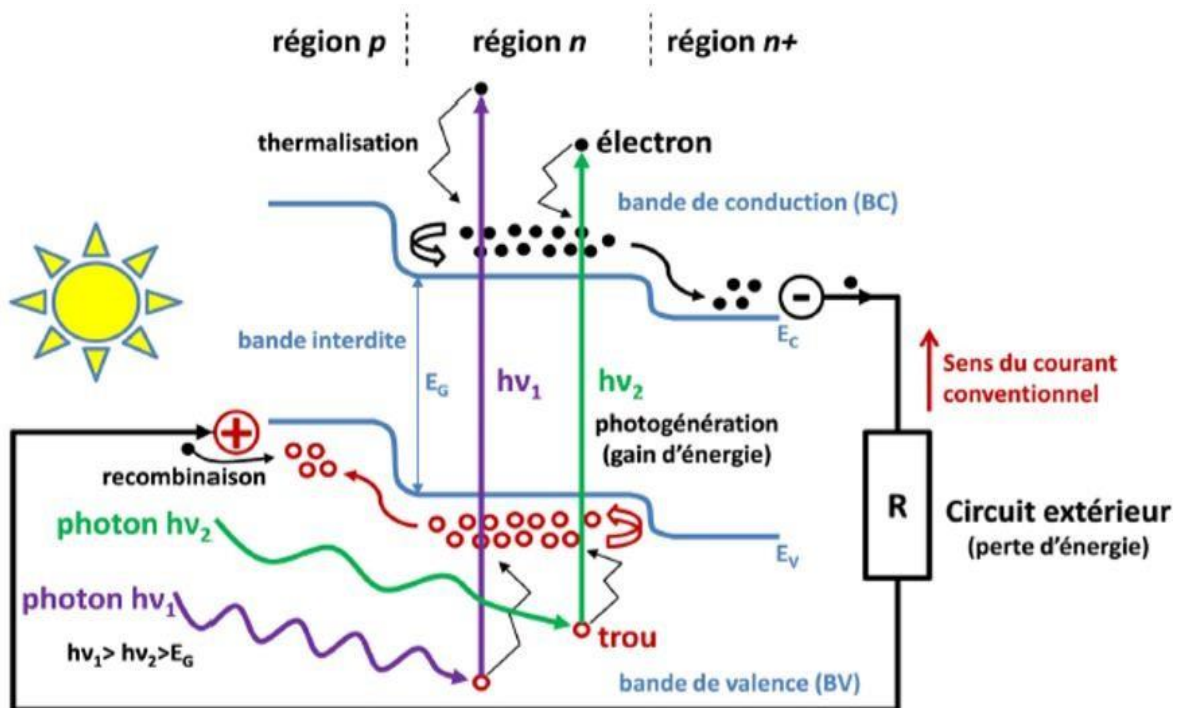


Figure I.2. Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque[5].

I.3.1. Notion préliminaire sur le rayonnement solaire

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée : le soleil. La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800 K. Ceci conduit un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5 μm pour une puissance d'environ 60 MW/m², soit un total de 9,5.10²⁵ W [5]. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairement moyen dans l'année de 1,36 kW/m² hors atmosphère.

Cette irradiante est pondérée par divers facteurs à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et saison. Des gaz comme l'ozone (O₃), pour des longueurs d'ondes inférieures à 0,3 μm , le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O), pour les infrarouges au-dessus de 2 μm , absorbent les énergies proches de leur énergie de liaison, ce qui conduit à des «trous» dans le spectre solaire visible au sol. Par ailleurs, les poussières et aérosols présents dans l'atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente. 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 Mass (AM). Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith :

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

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta=0^\circ$, $AM=1$: la notation utilisée est AM1.

AM0 correspond à l'irradiante 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 W/m², mais a été arrondi à 1kW/m². L'intensité I_D reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante [6] :

$$I_D = 1,353 (0,7^{AM})^{0,678} \quad (\text{I -2})$$

Avec I_D en kW/m^2 , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.

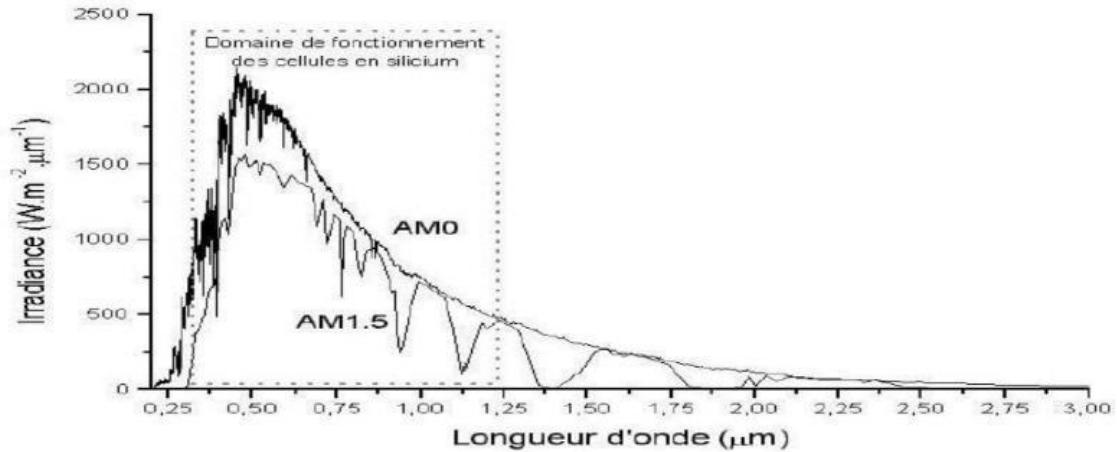


Figure I.3. Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 d'après [3] Le domaine

Effectivement, la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la Terre se situe dans le domaine du visible et du proche infrarouge. C'est dans cette plage de longueurs d'onde que la plus grande partie de l'énergie solaire est présente.

Cependant, il est important de noter que les irradiances solaires, qui mesurent la puissance solaire reçue par unité de surface, varient en fonction de divers facteurs tels que les conditions climatiques et l'altitude du lieu. Par conséquent, la répartition de la puissance solaire sur la Terre présente de grandes disparités régionales.

Dans des endroits tels que le nord de l'Australie et le Botswana, où l'ensoleillement est élevé, les irradiances moyennes sur l'année peuvent atteindre jusqu'à $7 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$. En Europe occidentale, des pays comme l'Espagne ont une puissance solaire moyenne d'environ $3 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$, tandis que dans le sud de la Suède, elle peut être inférieure à $1 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$. En France, la puissance solaire moyenne varie entre $1,5$ et $3 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ selon les régions.

Ces différences régionales dans la puissance solaire disponible sont prises en compte lors de la planification et de la conception de systèmes photovoltaïques, afin de maximiser leur rendement en fonction des conditions locales

I.3.2. L'interaction rayonnement/semi-conducteur

Dans les semi-conducteurs, l'écart entre les bandes de valence et de conduction, appelé gap, est une caractéristique fondamentale. La figure (I.3) présente décrit les différentes transitions possibles en fonction de la nature du gap. Lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k (vecteurs d'onde), on parle de gap direct. Dans ce cas, les transitions entre les bandes se font verticalement et sont donc radiatives (figure I-3(a)). Les semi-conducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, sont des exemples courants de matériaux à gap direct, largement utilisés en optoélectronique.

En revanche, dans le cas du silicium, le gap est indirect. Cela signifie que les transitions électroniques entre les extrema des bandes impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron, rendant ces transitions obliques et donc non radiatives. Cependant, les électrons du sommet de la bande de valence peuvent être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction en absorbant un photon de plus grande énergie. Pour que cette transition ait lieu dans le gap indirect, un phonon doit être absorbé ou émis par l'électron, afin que le vecteur d'onde de l'électron corresponde au maximum de la bande de valence pour absorber un photon (figure suivant). Il est important de noter que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (correspondant à une longueur d'onde de 1107 nm), tandis que la valeur du premier gap direct est de 3,4 eV (soit 365 nm).

Ces informations décrivent les propriétés des gaps directs et indirects dans les semi-conducteurs, mettant en évidence les différences dans les mécanismes de transition électronique et leurs implications pour les propriétés optoélectroniques des matériaux.

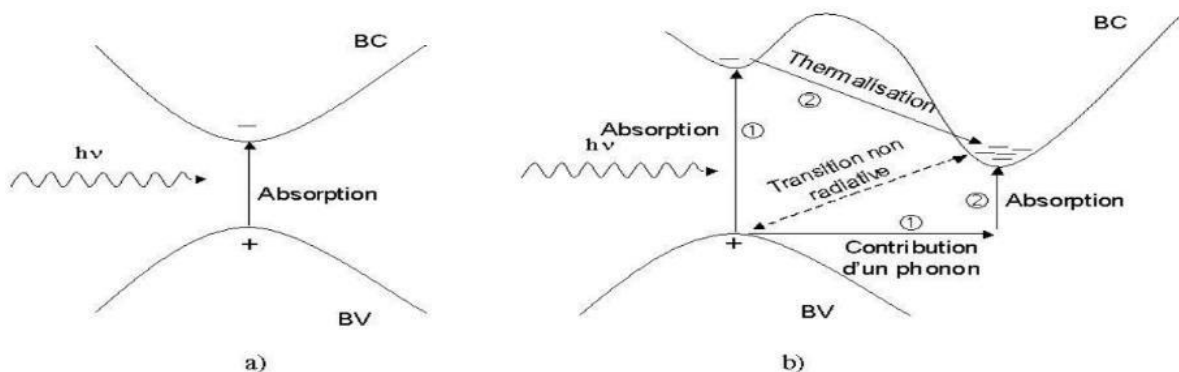


Figure I.4. Transitions interbandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect [7].

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se manifeste par le coefficient d'absorption, qui mesure le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure I-3 présente le coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde. On observe que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å (angstroms) du matériau.

Cependant, au-delà de cette longueur d'onde critique, les transitions directes dans la bande de conduction ne sont plus possibles. Pour que l'électron passe dans la bande de conduction, au moins un phonon doit assister la transition. Cela réduit la probabilité de transition et entraîne une diminution du coefficient d'absorption lorsque la longueur d'onde des photons augmente. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

Ces informations soulignent l'importance du coefficient d'absorption dans les semi-conducteurs pour déterminer l'efficacité de l'absorption des photons et l'utilisation de différentes longueurs d'onde dans les cellules solaires.

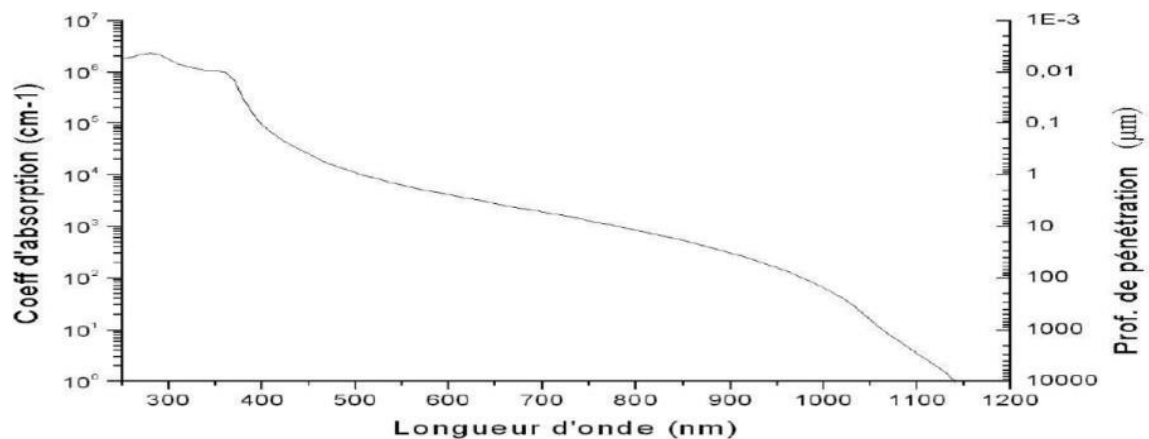


Figure I.5. Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde, d'après[8].

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure I-3 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

I.3.3. Illustration des différents mécanismes au niveau des bandes énergétiques

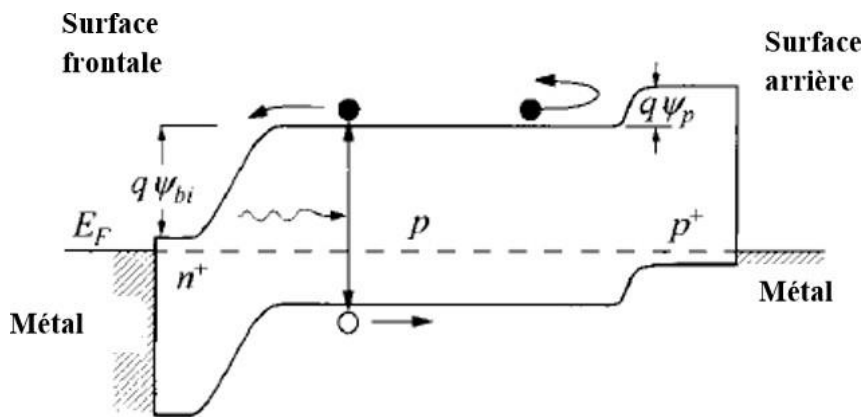


Figure I.6. lustration des différents mécanismes au niveau des bandes énergétiques

Absorption de la lumière : Lorsque la cellule solaire est exposée à la lumière, les photons d'énergie correspondante peuvent être absorbés par le matériau semi-conducteur. Cette absorption génère des paires électron-trou dans la région de la bande de valence.

Transition électronique : Les paires électron-trou générées par l'absorption de la lumière peuvent subir une transition électronique. Les électrons excités peuvent passer de la bande de valence à la bande de conduction, laissant derrière eux des trous dans la bande de valence.

Séparation des charges : Une fois que les électrons sont dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence, ils sont séparés par la jonction PN de la cellule solaire. Les électrons se déplacent vers la région N, tandis que les trous se déplacent vers la région P, créant ainsi une différence de potentiel.

Flux de courant : La différence de potentiel créée par la séparation des charges entraîne un flux de courant électrique dans le circuit externe connecté à la cellule solaire. Ce courant peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou être stocké dans des batteries.

Ces mécanismes au niveau des bandes énergétiques sont essentiels pour la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique dans une cellule photovoltaïque

-Illustration des différents mécanismes au niveau des bandes énergétiques

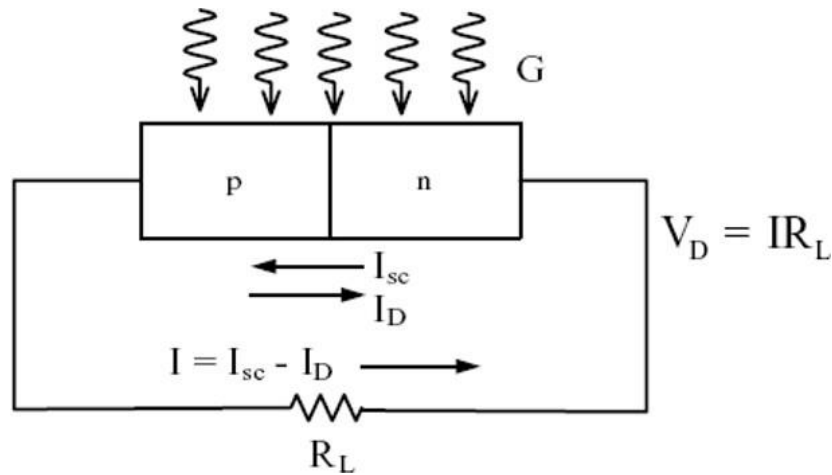


Figure I.7. Illustration des différents mécanismes extérieurs

I.3.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

A/ Courant de court-circuit J_{cc} :

Il s'agit du courant obtenu avec une différence de potentiels nulle aux bornes de la cellule ($V = 0$ V). Il s'agit du courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Il croît avec l'intensité d'illumination et dépend de la surface de la cellule, du spectre d'excitation, de la mobilité des porteurs et de la température [5].

B/ Tension à circuit ouvert V_{co}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Dans le cas de cellules solaires organiques, la V_{co} est majoritairement dépendante du niveau de la HOMO du matériau donneur et le niveau de la LUMO du matériau accepteur [5]. L'équipe de

Brabec [63-64] a établi la relation entre V_{co} et le niveau HOMO de polymère (thiophène, fluorine, phénylène vinylène..). Les auteurs ont trouvé une relation linéaire entre V_{co} et le potentiel d'oxydation du polymère (HOMO). La différence entre LUMO du PCBM et la valeur la plus petite de l'HOMO de polymère représente l'énergie perdue pendant la photo-génération de charge

$$V_{co} = |E_{HOMO}^{Donneur}| - |E_{LUMO}^{PCBM}| - 0.3V \quad (I-3)$$

C/ Facteur de forme FF :

Le facteur de forme FF est un indicateur de la qualité de la diode et résulte des résistances séries et parallèles. Il est déterminé par equation suivante

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{cc}V_{co}} \quad (I-4)$$

ù I_{max} et V_{max} représentent respectivement le courant et la tension du point de fonctionnement qui permet d'extraire le maximum de puissance (P_{max}) de la cellule (Figure I13). Plus la valeur de FF est grande, plus la caractéristique $I(V)$ ressemble à celle d'une source idéale de courant I_{cc} tant que $V < V_{co}$ et à une source idéale de tension pour $I > I_{cc}$ [8].

D/ Rendement de conversion en puissance η

Le rendement de conversion photovoltaïque en puissance η des cellules photovoltaïques se définit comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} [8].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{in}} \quad (I-5)$$

L'efficacité maximale de conversion d'une cellule n'a de signification que pour une distribution spectrale et une intensité donnée. L'illumination standard la plus communément utilisée correspond au standard AM1.5G [8].

I.4. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Si nous considérons le cas d'une cellule solaire idéale à jonction PN exposée à un flux lumineux, cette cellule fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent, illustré dans la Figure suivant, est représenté par une diode idéale en parallèle avec une source de courant

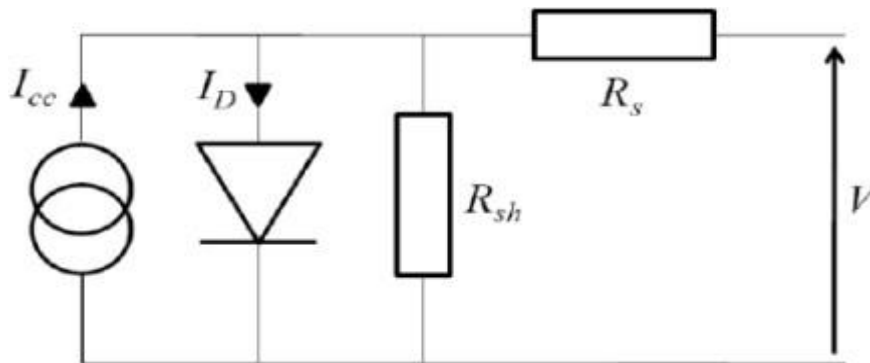


Figure I.8 schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Résistance série (R_s) : Elle représente les pertes de tension internes de la cellule photovoltaïque. La résistance série est généralement causée par la résistivité volumique du matériau semi-conducteur, les contacts électriques et les connexions internes. Elle peut également inclure les pertes d'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe $I(V)$ au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$). Pour minimiser les pertes, il est souhaitable de réduire la valeur de R_s .

Résistance shunt (R_{sh}) : Elle représente les pertes de courant dues aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La résistance shunt est liée aux chemins de fuite qui permettent au courant de contourner la cellule photovoltaïque plutôt que de passer à travers elle. Elle peut être influencée par des imperfections dans le matériau semi-conducteur et par d'autres facteurs. La pente de la courbe $I(V)$ au point I_{sc} 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 est souhaitable d'augmenter la valeur de R_{sh} .

L'objectif est d'obtenir une résistance série (R_s) aussi faible que possible et une résistance shunt (R_{sh}) aussi élevée que possible pour réduire les pertes et maximiser l'efficacité de la cellule photovoltaïque. Dans un cas idéal, R_{sh} serait infinie (pas de fuite de courant) et R_s serait nulle (pas de perte de tension interne). Cependant, dans la réalité, il y aura toujours des limitations et des valeurs finies pour ces résistances.

Le diode (D) dans le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque représente les caractéristiques de non-linéarité de la cellule. Elle est utilisée pour modéliser les effets de la recombinaison des porteurs de charge et la caractéristique courant-tension asymétrique de la cellule photovoltaïque.

I.5. Les différentes filières photovoltaïques

I.5.1. La filière silicium cristallin

L'industrie du silicium représente actuellement la majorité de la production mondiale de panneaux photovoltaïques (graphique). C'est une substance extrêmement abondante, stable et non toxique. Le domaine lui-même est subdivisé en technologies. Varie selon la nature du silicium utilisé et/ou son mode de fabrication

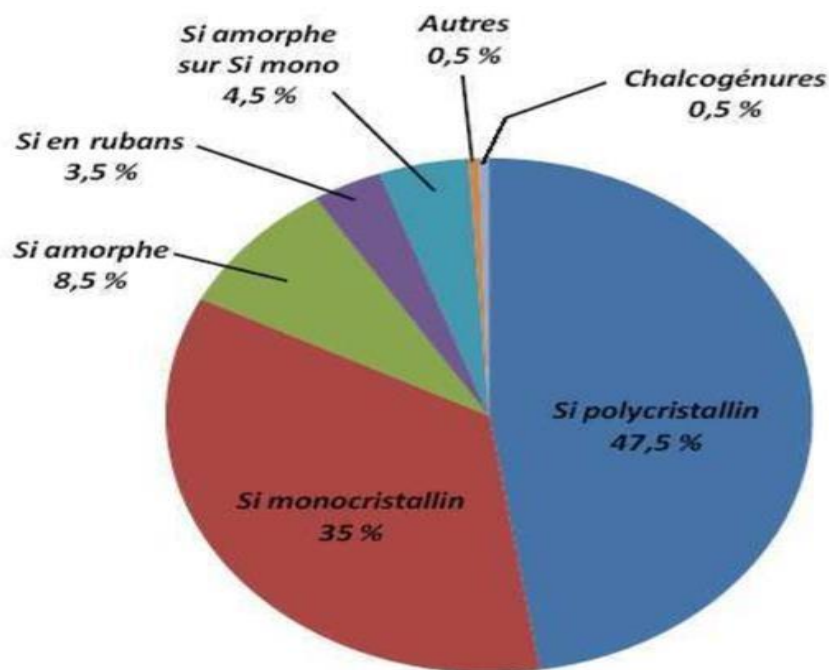


Figure I.9. Part de marché des différentes technologies photovoltaïques en 2007

I.5.1.1. Le silicium monocristallin

Cette technologie a atteint des valeurs record dans le rendement de conversion du matériau : plus de 25 % en laboratoire⁹. Il existe deux méthodes de fabrication. La méthode dite de Czochralski, encore largement utilisée dans l'industrie aujourd'hui, consiste à faire croître des monocristaux de silicium sous forme de lingots de silicium à partir de creusets de silicium fondu. La méthode "zone flottante" offre une plus grande pureté du matériau car elle est réalisée sous vide (pas de contamination par l'oxygène) et le processus n'a pas de creusets présents, donc pas d'impuretés métalliques, dans lesquelles il pénètre facilement. Monocristallin Si les rendements commerciaux sont de l'ordre de 17%, ce qui constitue le meilleur rendement pour des panneaux photovoltaïques produits en masse de quelques technologies que ce soit, la technologie souffre de rendements médiocres en lumière faible et/ou diffuse, et de coûts de production extrêmement élevés.

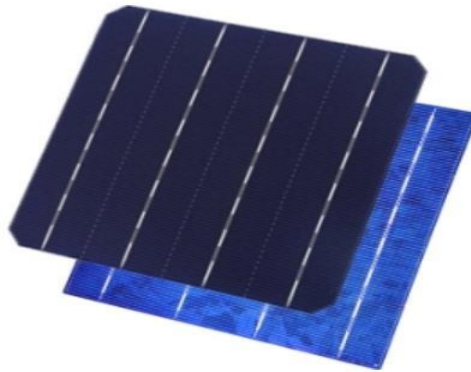


Figure I.10. Cellule a base silicium monocristallin

I.5.1.2. Le silicium multi cristallin

Cette approche est moins chère d'un point de vue énergétique et d'un point de vue économique : les cellules poly cristallines sont plus résistantes à la présence d'impuretés que les cellules monocristallines. Nous utilisons donc généralement du silicium de pureté inférieure qui est moins cher mais nécessite également moins d'étapes de fusion/purification, moins d'énergie. Le poly silicium est généralement produit en versant du silicium fondu dans des creusets. La taille des cristaux formés lors de la solidification peut être facilement contrôlée en contrôlant la vitesse de refroidissement. Le contrôle de la taille de ces cristaux est essentiel car les joints de grains peuvent nuire aux performances. Photovoltaïque. Mitsubishi Corporation of Japan a établi ce nouveau record en février 2010 Le matériau (cellule 15*15cm) a été obtenu en laboratoire, et le rendement était de 19,6 %. Ces batteries sont généralement utilisées dans des applications de type toit car elles sont moins



Figure I.11. Cellules de silicium polycristallin

I.5.2. La filière couches minces

I.5.2.1. Le silicium amorphe (a -Si : H)

Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. La désorganisation atomique a d'autres conséquences. Les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent dénaturer les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si:H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes [9].

I.5.2.2. Le tellurure de cadmium CdTe

La filière CdTe a connu un développement fulgurant ces dernières années, portée par sa compétitivité en termes de coût, de rendement de conversion et de procédé de fabrication. Actuellement, la filière CdTe est la technologie couches minces leader de l'industrie photovoltaïque ; elle permet d'atteindre des rendements de modules commerciaux allant jusqu'à 12,6 %. Le CdTe a un gap direct (ou « bande interdite* », cf. II.6) de 1,45 eV et est donc bien adapté au spectre solaire. Des techniques de dépôt simples et appropriées pour une production à bas coût ont été développées (telles que la sublimation* ou l'électro dépôt).

3 Dans cette filière (figure 1a) on dépose d'abord une couche de CdS (sulfure de cadmium) de type *n* sur un substrat de verre/SnO₂ dopé F, puis une couche de CdTe de type *p* (d'environ 3 à 7 microns) et enfin une couche conductrice de carbone dopée cuivre ou d'antimoniure de tellure qui sert de contact-arrière. Le substrat de verre couvert de SnO₂ dopé F sert à la fois de contact et de fenêtre-avant permettant de laisser passer le maximum de lumière pour qu'elle soit ensuite absorbée par la couche absorbeur de CdTe. Le dépôt de CdTe se fait généralement par sublimation sous vide à partir de sources portées à 600 – 700 °C conduisant à des vitesses de dépôt de plusieurs microns par minute, le substrat de verre étant à 500 °C environ.

4 La combinaison de rendements élevés avec la robustesse de la structure et des procédés à haut débit est à l'origine de l'essor de cette filière. Toutefois, on lui reproche souvent l'utilisation d'un matériau toxique, le cadmium, bien que celui-ci soit présent en faible quantité et que toutes les précautions aient été prises tant dans le procédé de fabrication que dans la sécurisation du module et son recyclage en fin de vie[10].

I.5.3. Le di séléniure de cuivre et indium (CIS ou CIGS)

5 Actuellement, dans l'univers des couches minces la technologie CIGS est considérée comme celle qui présente le meilleur potentiel en termes de rendement avec des rendements de modules* de 11 % à 14 %, très proches de ceux du silicium poly cristallin.

6 La figure 1b montre la structure de base des cellules CIGS. L'empilement de couches commence par le contact arrière métallique de molybdène déposé sur verre par pulvérisation cathodique*. La couche de CIGS, d'environ 2 microns, est déposée ensuite par co-évaporation sous ultravide à des températures de substrat d'environ 550 °C. La substitution de l'In par du Ga permet de faire varier sa largeur de bande interdite entre 1 eV et 1,7 eV (la composition la plus efficace atteint une valeur de 1,15 eV). Une couche inter faciale (dite « couche tampon ») de CdS ou, de plus en plus de ZnS (sulfure de zinc), de type *n* d'une cinquantaine de nanomètres est ensuite déposée par dépôt chimique en solution. Elle permet d'adapter l'interface entre le CIGS et les couches de ZnO (oxyde de zinc) non dopé (i-ZnO) et d'oxyde transparent conducteur de ZnO dopé à l'aluminium (ZnO : Al) de type *n* que l'on dépose ensuite par pulvérisation cathodique pour prendre le contact avant tout en laissant passer un maximum de lumière – qui sera ensuite absorbée par le CIGSe.

7Actuellement, de nombreuses recherches portent sur la diminution des coûts de fabrication des cellules solaires à base de CIGS, avec par exemple la mise au point des dépôts électrolytiques qui constituent un des leviers pour abaisser le coût de production ou le remplacement de l'indium par des éléments abondants tels que les composés de type kèsterite ($\text{Cu}_2(\text{Zn, Sn})\text{S}_4$, CZTS). [11]

1.5.4. La filière des cellules organiques

La filière des cellules organiques, également connue sous le nom de cellules solaires organiques ou cellules photovoltaïques organiques, fait référence à une classe de dispositifs photovoltaïques qui utilisent des matériaux organiques pour convertir la lumière en électricité. Ces cellules solaires organiques ont gagné en popularité en raison de leurs nombreux avantages.

L'un des principaux avantages des cellules organiques est leur flexibilité. Les matériaux organiques utilisés dans ces cellules sont légers, minces et peuvent être fabriqués sur des substrats souples, tels que des films plastiques. Cela permet une grande flexibilité dans la conception et l'intégration des cellules solaires organiques dans différents appareils et applications, y compris les dispositifs portables, les vêtements intelligents et les applications intégrées.

Un autre avantage des cellules organiques est leur potentiel de coût réduit. Les matériaux organiques peuvent être fabriqués à grande échelle à des coûts relativement bas, et les processus de fabrication utilisés pour produire des cellules solaires organiques sont moins complexes et moins énergivores que ceux des cellules solaires traditionnelles à base de silicium. Cela ouvre la voie à des applications à faible coût et à grande échelle des cellules solaires organiques.

Les cellules organiques offrent également une meilleure performance dans des conditions de faible luminosité et en présence de lumière diffuse. Elles peuvent générer de l'électricité à partir de la lumière ambiante, ce qui les rend adaptées à des environnements intérieurs et à des situations où l'exposition directe au soleil est limitée.

Cependant, il convient de noter que les cellules solaires organiques présentent également des défis. Leur efficacité de conversion de la lumière en électricité est actuellement inférieure à celle des cellules solaires traditionnelles, bien que des améliorations significatives aient été réalisées ces dernières années. De plus, les matériaux organiques peuvent être plus sensibles à la dégradation due à l'exposition à la lumière, à l'humidité et à d'autres facteurs environnementaux, ce qui limite leur durée de vie et leur stabilité à long terme.

Malgré ces défis, la filière des cellules solaires organiques continue de progresser et de susciter un intérêt croissant en raison de ses avantages potentiels. Des recherches et des développements sont en cours pour améliorer l'efficacité, la durabilité et la stabilité des cellules solaires organiques, ouvrant la voie à de nouvelles applications et à une plus large adoption de cette technologie prometteuse.

I.5.5. La filière des pérovskites

La filière des pérovskites, en particulier les pérovskites hybrides organe-métalliques, a suscité un intérêt considérable en tant que matériau prometteur pour les dispositifs photovoltaïques. Les pérovskites présentent une structure cristalline à la fois simple et complexe, qui leur confère des propriétés optiques et électroniques remarquables.

Les pérovskites peuvent être fabriquées à partir d'une variété de matériaux, tels que le plomb, le césium, le bismuth, l'iodure et des cations organiques. Leur structure permet une large gamme de compositions et de modifications, ce qui ouvre la voie à une optimisation des propriétés pour les applications photovoltaïques.

Les pérovskites présentent des avantages significatifs, notamment une bande interdite ajustable, une forte absorption de la lumière, une diffusion efficace des charges, une faible recombinaison des porteurs de charge et une bonne adaptabilité aux techniques de fabrication en couches minces. Ces caractéristiques offrent des opportunités pour atteindre des rendements élevés dans les dispositifs photovoltaïques.

Cependant, la filière des pérovskites est également confrontée à des défis, notamment en termes de stabilité à long terme, de durabilité et de toxicité potentielle. Des efforts de recherche considérables sont déployés pour améliorer la stabilité des pérovskites et développer des stratégies de protection contre l'humidité, la chaleur et d'autres facteurs environnementaux.

Malgré ces défis, les pérovskites ont montré des progrès significatifs ces dernières années, avec des rendements de conversion record dans les dispositifs photovoltaïques atteignant près de 25%. Leur potentiel élevé en termes de rendement, de coût abordable et de facilité de fabrication en fait un domaine de recherche très actif [12].

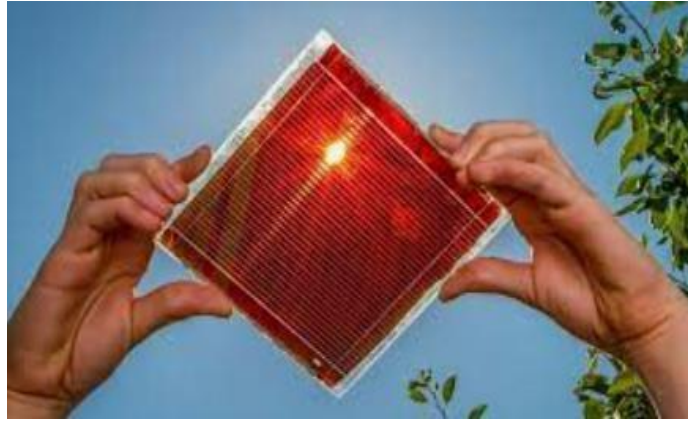


Figure I.12.cellule pérovskite

I.5.6. Cellules multi-jonctions à haut rendement

Les cellules multi-jonctions à haut rendement sont des dispositifs photovoltaïques qui utilisent plusieurs couches de semi-conducteurs avec des bandes interdites différentes pour absorber efficacement un large spectre de lumière solaire. Ces cellules offrent des rendements plus élevés que les cellules solaires conventionnelles à simple jonction en exploitant l'énergie de différentes longueurs d'onde de la lumière.

Un exemple notable de cellule multi-jonctions à haut rendement est la cellule solaire multi-jonctions à base de composés III-V, tels que le gallium, l'arséniure de gallium (GaAs), le phosphore d'indium-gallium (InGaP) et le phosphore d'indium-gallium-nitride d'indium (InGaInN). Ces matériaux ont des propriétés optiques et électroniques exceptionnelles, ce qui permet d'obtenir des rendements élevés.

Les cellules multi-jonctions à base de composés III-V ont été largement étudiées et ont atteint des rendements de conversion solaire record de plus de 46%. Elles sont principalement utilisées dans des applications spatiales et de concentration solaire, en raison de leur coût élevé et de leur complexité de fabrication.

Une autre approche prometteuse est l'utilisation de cellules solaires multi-jonctions à base de pérovskites, qui ont montré des rendements de conversion record dépassant 25%. Les pérovskites sont des semi-conducteurs à bas coût et facilement synthétisables, ce qui en fait des candidats attrayants pour les cellules solaires à haut rendement.

Les recherches dans le domaine des cellules multi-jonctions à haut rendement se poursuivent activement pour améliorer encore les performances, réduire les coûts de production et accroître la durabilité. Ces cellules offrent un potentiel significatif pour augmenter l'efficacité globale de la conversion de l'énergie solaire et contribuer à l'avenir de l'énergie renouvelable [13]



Figure I.13. Cellules multi-jonctions à haut rendement

Références

- [1] LA Lamont, History of Photovoltaics, in Comprehensive Renewable Energy, Elsevier, Volume 1 31 – 45, (2012).
- [2] OUSSIDHOUM Samira, « Etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simple et multiple », Mémoire de magister, Université MOULOUD MAMMERI Tizi- Ouzou, (2015).
- [3] GUITOUNI Samira, « Elaboration et étude de structures à base de couches minces de ZnO et de chalcogénures (CIS, CZTS) pour des applications photovoltaïques », Thèse de doctorat en physique énergétique, université de MENTOURI- Constantine1, (2017).
- [4] <Etude comparative entre les cellules de type p+-AlGaAs/p-GaAs/n-GaAs et une autre de type n+-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs>, Mémoire de Magister, Universite Mohamed Kheider-Biskra,
- [5] Raphaël LACHAUME, Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction, THÈSE de Doctorat, l'université de Grenoble, (2014).
- [6] O. Benseddik, F. Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Master en Automatique, Université d'Ouargla, (2012).
- [7] O. Benseddik, F. Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Master en Automatique, Université d'Ouargla, (2012).

- [8] Dangminhtrung, “Elaboration de cellules solaires photovoltaïques A base dePolymères conjugués, Etudes des systèmes restituables ». Thèse de doctorat de L’universitébordeaux1. (2009).
- [9] K. AMARA, Contribution à l’étude d’une conception d’une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, thèse de magister, université de Tizi- Ouzou, (2015).
- [10] <https://books.openedition.org/editionscnrs/11061?lang=fr>
- D. LINCOT *et al.* – *L’Électricité, fille du Soleil*, Dossier pour la science, n° 69, (2010).
- [11] <https://books.openedition.org/editionscnrs/11061?lang=fr>
- D. LINCOT *et al.* – *L’Électricité, fille du Soleil*, Dossier pour la science, n° 69, (2010).
- [12] Kojima, A. et al. <Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells>, Journal of the American Chemical Society, 131(17), 6050-6051, (2009).
- [13] Green, M. A., et al. <Solar cell efficiency tables (version 55). Progress in Photovoltaics>, Research and Applications, 27(7), 565-575, (2019).
- Snaith, H. J. <Present status and future prospects of perovskite photovoltaics>. Nature Materials, 17(5), 372-376,(2018).

Chapitre II :

**Propriété des matériaux (ZnSe, CdS, CIGS
et ZnO)**

II.1. Propriétés fondamentales de CIGSe

Le rendement d'une cellule solaire à base de CIGSe est fortement dépendant des propriétés du matériau absorbeur. Comme dans le cas d'autres semi-conducteurs, la structure cristalline du CIGS ainsi que sa composition peuvent fortement influencer sur ses propriétés optiques et électroniques. La bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire dans le but d'optimiser un dispositif à base de CIGSe. Le CIGSe est un semi-conducteur composé de quatre matériaux semi-conducteurs (quaternaire), di-séléniure de cuivre, d'indium et de gallium.

Les principaux avantages de ce matériau consistent en une très bonne stabilité et des caractéristiques optoélectroniques performantes, notamment un fort coefficient d'absorption optique ($\alpha > 10^5 \text{ cm}^{-1}$). Quelques micromètres d'épaisseur suffisent à absorber la partie utile du spectre solaire. Ce qui se répercute de manière significative sur le coût de fabrication.

Les composés CIGS, possèdent de bonnes propriétés telles qu'un coefficient d'absorption très élevé (10^5 cm^{-1}) et une bande interdite qui varie dans une gamme de 1 eV à 1.6 eV, ce qui rend les cellules solaires à base de ces composés très utilisées dans le domaine photovoltaïque [01].

II.1.1. Structure cristallographique du composé CIGSe

Le matériau à base du CIGS est le CIS (CuInSe_2). C'est un semi-conducteur I-III-VI₂ (Figure I.1) qui possède une structure cristalline chalcopyrite. Cette structure tétragonale peut être décrite comme un empilement de deux structures zinc-blende dans lequel les sites tétraédriques sont occupés par des atomes du groupe III (Se) (anions) et les autres sites sont occupés de manière ordonnée par des atomes des groupes I (Cu) et II (In) (cations). Le ratio des paramètres de maille c/a est légèrement différent de 2 (distorsion tétraédrique), ce qui est dû à des différences d'énergie entre les liaisons Cu-Se et In-Se. Dans le cas du CIGSe, 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. En d'autres termes, le CIGSe est une solution solide de CuInSe_2 et de CuGaSe_2 . La figure I-2 présente les différences de structure cristalline entre deux matériaux semi-conducteurs utilisés dans le photovoltaïque: le CdTe et le CIGS [02].

							VIIIA
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	He
		B	C	N	O	F	Ne
		10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.183
		Al	Si	P	S	Cl	Ar
		26.982	28.086	30.974	32.064	35.453	39.948
IB	IIB						
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
63.54	65.37	69.72	72.59	74.922	78.96	79.909	83.80
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
107.87	112.40	114.82	118.69	121.75	127.60	126.904	131.30
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
196.967	200.59	204.37	207.19	208.980	209	210	222

Figure II.1: Classification périodique des éléments constituant la famille I-III-VI2

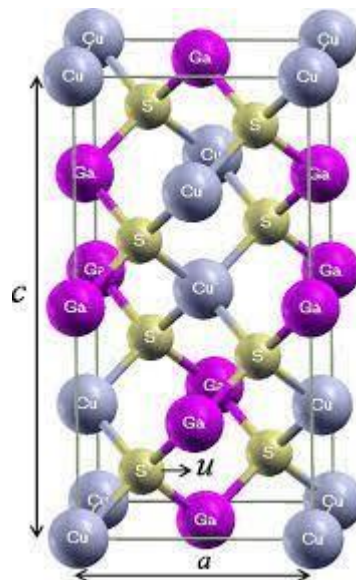


Figure II.2: Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines CIGS

II.1.2. Propriétés optiques

a. Coefficient d'absorption (α)

L'absorption optique d'un matériau reflète les bandes d'énergie de celui-ci. Un photon d'énergie E absorbé par le matériau induit des transitions électroniques entre les différents états. Ainsi, pour chaque photon absorbé, un transfert d'énergie E est réalisé du faisceau lumineux incident vers le milieu absorbeur. Le coefficient d'absorption $\alpha(E)$ est défini par [03]:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (\text{II.1})$$

Où $I(x)$: est l'intensité lumineuse traversant le matériau dans la direction x . I_0 : l'intensité

lumineuse incidente.

Une absorption maximale de la lumière sur tout le spectre solaire est l'une des propriétés les plus importantes qui doit posséder un absorbeur pour les cellules solaires. Le CIGS à un coefficient d'absorption très élevé (105 cm⁻¹). Ce coefficient d'absorption se calcule à partir de l'équation:

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

Où

d: est l'épaisseur de la couche.

T: la transmission de l'échantillon.

R: la réflectivité de l'échantillon.

Dans les semi-conducteurs, l'absorption fait intervenir en plus des états délocalisés (bande de valence et de conduction), les états localisés des queues de bandes et de la bande interdite. Les spectres d'absorption présentent alors, en fonction de l'énergie, trois régions

- Une queue à faible absorption à basse énergie. Une absorption résiduelle généralement associée à la présence de défauts localisés (impuretés, ...);
- Une queue exponentielle à moyenne énergie. Une absorption qui aurait pour origine des transitions qui impliquent les queues de bandes. Elle varie selon une loi exponentielle:

$$\alpha = c \exp \beta(hv) \quad (\text{II} - 3)$$

- Une composante de forte absorption à haute énergie. Le coefficient d'absorption est lié à l'énergie du gap et aux énergies des photons incidents selon la relation

$$\alpha = \frac{A}{hv} (hv - E_g)^\beta \quad (\text{II} - 4)$$

Où E_g est l'énergie de la bande interdite, A est une constante, h la constante de Planck et $\beta=1/2, 3/2$ et 2, respectivement pour une transition directe permise, une transition directe interdite et une transition indirecte permise. Dans le cas du CIGS, $\beta = 1/2$. Le coefficient d'absorption α pour le CuInSe₂ est très grand. Il est supérieur à 105 cm⁻¹ pour $E_g = 1.04$ eV et des énergies de photons plus élevées [04].

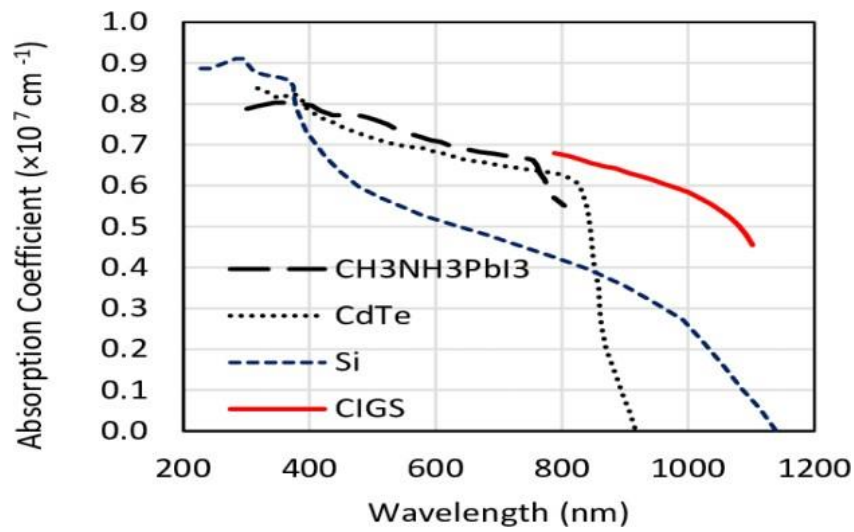


Figure II.3: Représentation des coefficients d'absorptions de quelques matériaux en fonction de longueur d'onde [04].

b. Constante optique (indice de réfraction)

Les Courbes de la Figure II.4 représentent l'indice de réfraction complexe, $\eta = n + ik$ (n : indice réel). Pour des échantillons $x = 0$ et 0.2 (x étant la concentration en Ga dans le CIGS). L'indice de réfraction complexe (k) peut être utilisé pour calculer d'autres Paramètres optiques comme le coefficient d'absorption.

$$\alpha = \frac{4\pi K}{\lambda} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

k : Indice imaginaire.

λ : Longueur d'onde du photon.

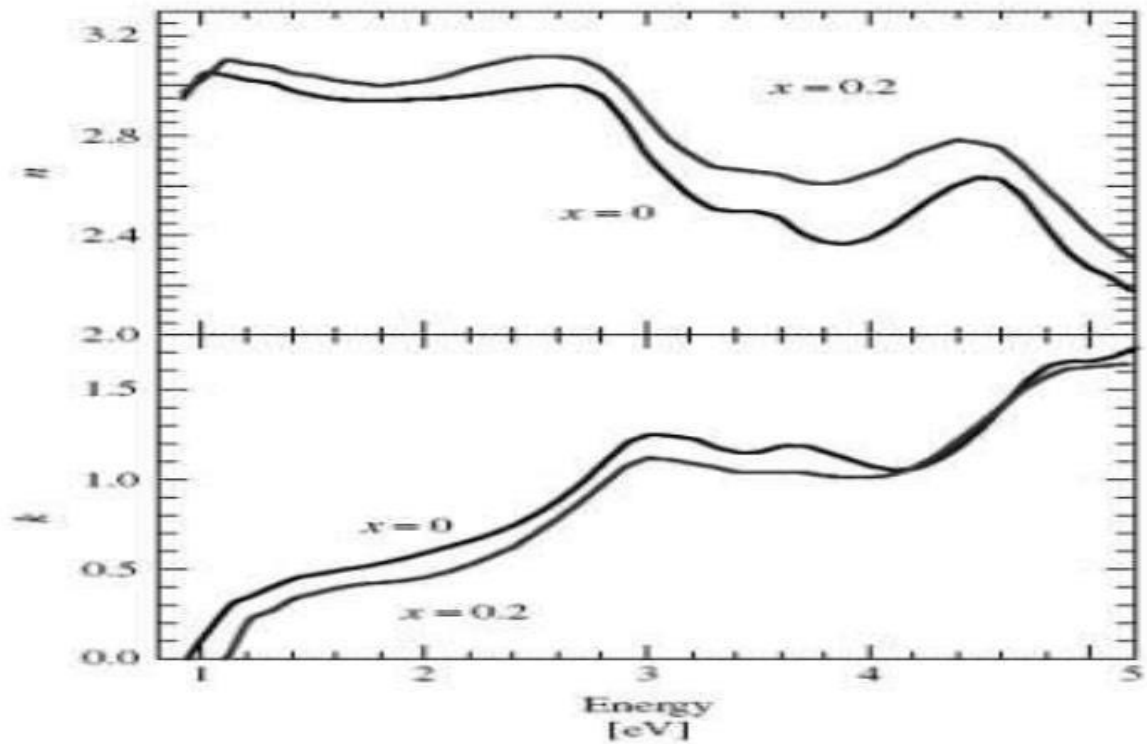


Figure II.4 : Représentation des indices de réfraction (réelle et imaginaire) en fonction de L'énergie pour le CIGS, avec $x = 0$ et $x = 0.2$ [05].

c. Largeur de la bande interdite (GAP) Tous ces composés ont une bande d'énergie directe qui occupe une importance dans les matériaux photovoltaïques en couches minces comme des absorbeurs. La Figure (II.5) montre la valeur de la bande interdite en fonction de la valeur du paramètre de maille a de quelques chalcopyrites.

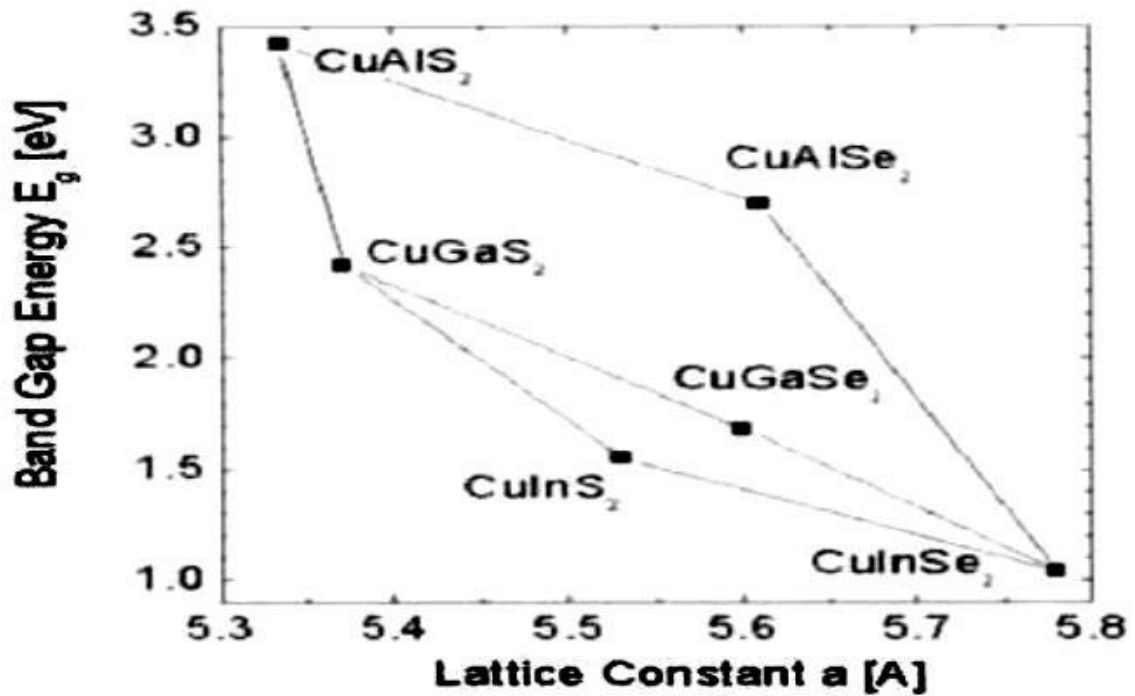


Figure II.5: Largeur de bande interdite et paramètre de maille a de certaines chalcopyrites [05]

La valeur de E_g peut être déterminée à partir de la courbe $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$. L'extrapolation linéaire à $(\alpha h\nu)^2 = 0$ de cette courbe permet de déterminer le gap optique E_g .

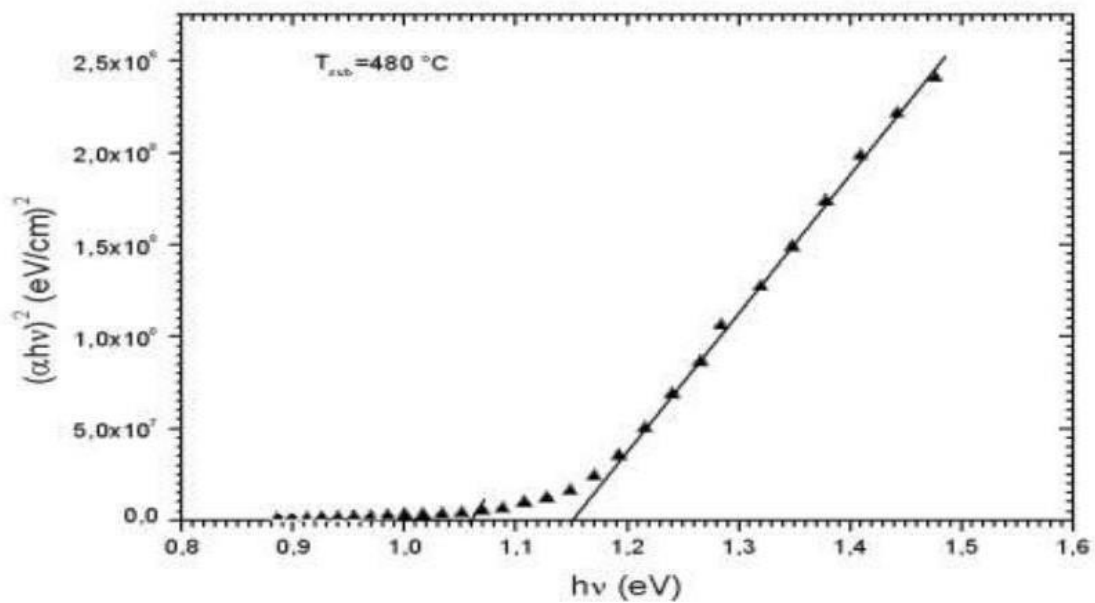


Figure II.6: Variation de $(\alpha h\nu)^2$ en fonction de $h\nu$ [06].

La figure II.6 représente le spectre d'absorption de la couche CIGS pour $x = 0.3$ à la température ambiante. Il est décrit par une dépendance linéaire de 2 en fonction de $(\alpha h\nu)$ l'énergie des photons qui est indicatif de la largeur de la bande directe dans le CIS. La largeur de la bande interdite a été estimée par l'intersection de la droite d'extrapolation avec l'axe des énergies, soit : $E_g = 1.15$ eV [06]

II.2. Le matériaux ZnO

En raison de ses propriétés électromécaniques très intéressantes, le ZnO est utilisé à grande échelle comme conducteur transparent dans les dispositifs acoustiques et dans les lignes à retard micro-ondes. De plus, en raison de son faible coût, des recherches approfondies ont été menées sur le ZnO

II.2.1. Propriétés cristallographiques du ZnO

Les propriétés mentionnées ci-dessus permettent d'accéder à de nouvelles données dans la région transparente. L'oxyde de zinc, appartenant à la classe cristalline 6mm, cristallise dans une structure hexagonale de type Wurtzite. Dans cette structure, les ions d'oxygène O^{2-} sont arrangés selon un réseau hexagonal compact, tandis que les ions de zinc Zn^{2+} occupent les positions interstitielles tétraédriques, qui ont le même arrangement que les ions d'oxygène (voir Figure 1.1).

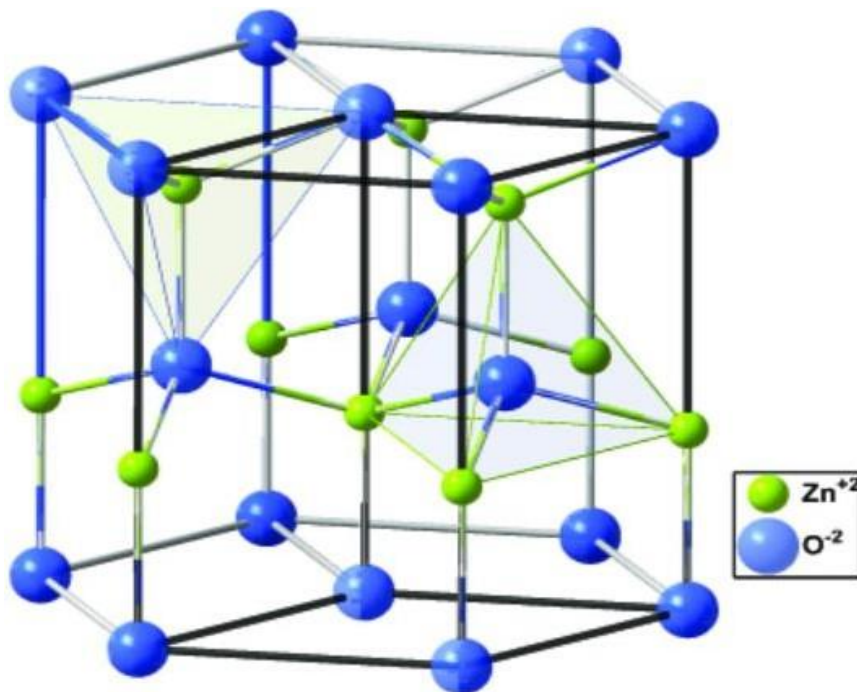


Figure II.7: Structure cristalline du ZnO

Chapitre II : Propriété des matériaux (ZnSe, CdS, CIGS et ZnO)

En réalité, l'environnement de chaque ion ne possède pas une symétrie exactement tétraédrique. En effet, la distance entre les proches voisins dans la direction c' est plus petite que pour les trois autres voisins. Ceci est à l'origine de la pyroélectricité du ZnO. Chaque atome de zinc est entouré par quatre atomes d'oxygène et vice-versa.

On dit que le nombre de coordination est de 4 : 4.

La maille hexagonale de la structure Wurtzite se caractérise par trois constantes de réseau a , c et u ; a étant le côté d'un losange constituant la base, c le coté parallèle à l'axe oz et u est une coordonnée intérieure le long de cet axe. Ces constantes déterminent la position relative des sous-réseaux de l'anion O^{2-} et du cation Zn^{2+} . La coordonnée u est dénie par la relation suivante :

$$u = \frac{1}{4} + \frac{c^2}{3a^2} \quad (II.6)$$

D'après cette relation, on remarque que le paramètre u est sans dimension. La distance séparant les plans réticulaires d'indices (h, k, l) est donnée par la relation :

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3a^2}(h^2 + hk + k^2) + \frac{l^2}{c^2} \quad (II.7)$$

La condition de stabilité de cette structure est donnée par la relation suivante :

$$0, 225 \leq R_a R_c \leq 0, 414$$

où R_a et R_c désignent respectivement le rayon de l'anion et celui du cation. L'origine de cette condition provient des considérations suivantes :

♦ pour une structure hexagonal compact (H.C.), on a :

$$R_a + R_c = \frac{3}{8}c \quad (II.8)$$

$$\frac{c}{a} = 2\sqrt{\frac{2}{3}} \quad (II.9)$$

Et

$$2R_a < a \quad (II.10)$$

♦ Comme la structure H.C dérive de la structure cubique à face centré (C.F.C.) de la blende, on a aussi :

$$\frac{R_a}{R_c} \leq 0,414 \quad (\text{II.11})$$

Dans le tableau 1.1, on présente un récapitulatif des caractéristiques importantes de l'oxyde de zinc. D'après les valeurs des rayons ioniques du cation et de l'anion indiquées dans le tableau, on peut remarquer que la structure est relativement ouverte. En eet, les atomes de zinc et d'oxygène n'occupent que 40 % du volume du cristal [7], laissant des espaces vides de rayon 0,95 Å. Il est possible que, dans certaines conditions, des atomes de zinc en excès puissent se loger dans ces espaces c'est-à-dire en position interstitielle. Cette caractéristique permet d'expliquer certaines propriétés particulières de l'oxyde, liées aux phénomènes de semi-conductivité, de photoconductivité, de luminescence, ainsi qu'aux propriétés catalytiques et chimiques du solide [8].

Tableau II.1:Récapitulatif des caractéristiques de la structure cristalline du ZnO

Réseau		Hexagonal Wurtzite
Paramètres de maille		$a = 3,2499 \text{ Å}$ $\Rightarrow c/a = 1,6019$ $c = 5,2060 \text{ Å}$
Distance entre O^{2-} et Zn^{2+} , (les plus proches voisins)		Suivant l'axe c $d = 1,96 \text{ Å}$ Pour les trois autres $d = 1,98 \text{ Å}$
Rayon ionique pour une coordination tétraédrique	Liaison covalente Liaison ionique	$Zn \text{ neutre} = 1,31 \text{ Å}$ $O \text{ neutre} = 0,66 \text{ Å}$ $Zn^{2+} = 0,60 \text{ Å}$ $O^{2-} = 1,38 \text{ Å}$
Rayon cristallin pour une coordination tétraédrique		$Zn^{2+} = 0,74 \text{ Å}$ $O^{2-} = 1,24 \text{ Å}$

II.2.2. Propriétés électriques de l'oxyde de Zinc (ZnO)

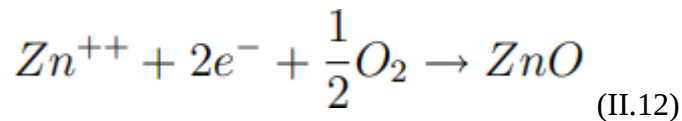
C'est un semi-conducteur dégénéré de type n, La grande conductivité des couches d'oxydes purs est due à la forte concentration en porteurs (électrons), étant donné que la mobilité dans ces couches est considérablement plus faible que celle en volume du matériau correspondant. La forte concentration en électrons est attribuée à la déviation par rapport à la stoechiométrie (ou défauts dans la structure).

Il y a une certaine anomalie dans la littérature concernant l'énergie du gap. Srikant et Clarke [9] annoncent que le gap d'énergie du ZnO à la température ambiante est de 3,3 eV, tandis qu'une bande de valence à la transition de niveau de donneur à 3,15 eV explique le fait qu'une plus petite valeur (typiquement 3,2 eV) est souvent rapportée. Ainsi, le gap à température ambiante du ZnO est compris entre 3,2 et 3,3 eV.

Une conductivité élevée ($> 5.10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) est possible dans le ZnO de type n, en raison des défauts intrinsèques, des dopants (Al, In, Ga, B, F) ou en combinaison [10]. Les mobilités des électrons dans des couches minces de ZnO rapportées, sont typiquement

de l'ordre de 20 à 30 $\text{cm}^2/\text{V.s}$. En outre, la mobilité maximale obtenue dans les cristaux simples de ZnO est de l'ordre de $\sim 200 \text{ cm}^2/\text{V.s}$.

La réaction de formation (stoechiométrie) est la suivante :



La conductivité de type p a été obtenue pour la première fois par Aoki et al. en 2001 [11].

II.2.3. Propriétés optiques

L'interaction de la lumière (onde électromagnétique) avec la matière (électrons du matériau) peut expliquer clairement les propriétés optiques d'un matériau. Lors de l'application de la théorie de dispersion sur un matériau, il convient de séparer l'absorption fondamentale de l'absorption des porteurs libres. Si seule la première contribution est présente, le matériau est qualifié de diélectrique. Le cas échéant, le matériau est un métal. Pour les semi-conducteurs, les deux contributions sont importantes. La première correspond au seuil d'absorption interbandes et sépare la zone d'absorption dans l'ultraviolet de la zone à forte transparence dans le visible. La seconde repère le front de la montée de la réactivité dans l'infrarouge correspondant aux oscillations de plasma des électrons de conduction.

Une onde électromagnétique interagissant avec le semi-conducteur sera complètement absorbée par celui-ci si l'énergie associée à l'onde électromagnétique est capable de transférer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction, c'est-à-dire, si cette énergie est

au moins égale à celle de la largeur de la bande interdite.

L'indice de réfraction de l'oxyde de zinc sous la forme massive est égal à 2,0 [12]. En couches minces, son indice de réfraction et son coefficient d'absorption varient en fonction des conditions d'élaboration des couches. L'indice de réfraction a une valeur variante entre 1,7 et 2,2 suivant les auteurs [13, 14]. L'amélioration de la stoechiométrie du ZnO conduit à une diminution du coefficient d'absorption et à une augmentation de l'énergie de la bande interdite [15, 16].

Sous l'effet d'un champ électromagnétique intense, d'une énergie supérieure à l'énergie de la bande interdite (dans notre cas supérieur à 3,37 eV), l'oxyde de zinc émet des photons, c'est ce qu'on appelle la photoluminescence. En pratique différentes émissions (bandes de luminescence) peuvent être observées en fonction des méthodes d'élaboration et de traitement. Dans les couches minces de ZnO, la luminescence visible est due aux défauts liés aux émissions des niveaux profonds (niveaux virtuels entre la bande de conduction et la bande de valence), tels que les interstitiels de zinc et les lacunes d'oxygène [18].

II.3. Propriétés de sulfure de cadmium (CdS)

Le sulfure de cadmium peut être obtenu de différentes manières. Une méthode courante consiste à réagir le sulfure d'hydrogène avec la vapeur de cadmium à une température de 800 °C. Un autre procédé implique le chauffage d'un mélange de cadmium (ou d'oxyde de cadmium) avec du soufre.

Dans la plupart des cas, les sulfures de cadmium sont précipités à partir de solutions aqueuses contenant des sels de cadmium en ajoutant du sulfure d'hydrogène (ou un autre sulfure soluble tel que le sulfure de sodium). Une autre méthode de préparation du CdS consiste à faire barboter du sulfure d'hydrogène dans une solution de sel de cadmium acidifiée avec de l'acide chlorhydrique.

II.3. Structure cristalline du sulfure de cadmium (CdS)

Le sulfure de cadmium est un semi-conducteur qui cristallise dans deux types de structures figure (I.8): La structure cubique zinc blende de la sphalérite (b) et la structure hexagonale de la wurtzite (a). Toutes les deux, se caractérisent par une disposition tétraédrique des atomes. La structure du type blende est une structure cubique à faces centrées (CFC) dont la maille primitive contient 4 cations (Cd^{2+}) et quatre anions (S^{2-}) [18]. Chaque espèce d'un constituant

est entourée à égale distance par quatre atomes de l'autre constituant. L'ensemble définit un tétraèdre régulier dont les atomes occupent les sommets [19].

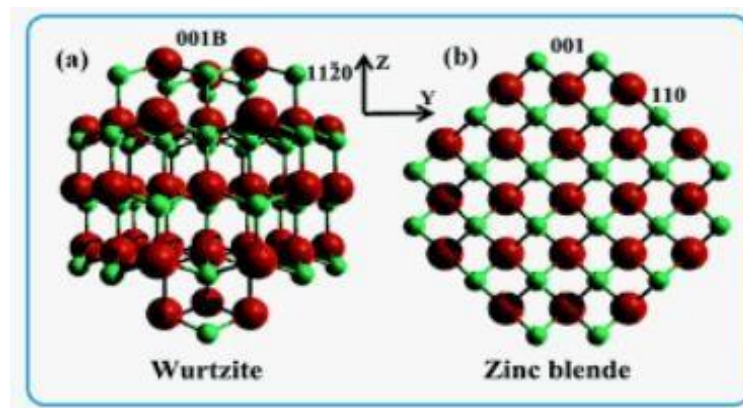


Figure II.8: (a) Structure wurtzite de CdS, (b) Structure blende de CdS.

II.3.1. Propriétés électriques du CdS

Plusieurs chercheurs ont étudié les propriétés électriques des films minces de CdS, à titre d'exemple : A.Kariper et al [20] ont étudié les propriétés électriques, des films minces de CdS, en fonction du pH de la solution. Ils ont mesuré la résistivité électrique (ρ), la mobilité des porteurs (μ) et la concentration des porteurs (n) des films de CdS en utilisant les mesures de l'effet Hall à la température ambiante, en utilisant un contact ohmique Ag et un champ magnétique (0.54 T). Ils ont montré que les films de CdS sont de type n et que la résistivité électrique augmente de 4.375×10^5 à 8.931×10^5 ($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$) avec l'augmentation du pH. Cependant, dans leur travail la mobilité diminue de 1.636×10^2 à 7.5×10^{-1} ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$) avec l'augmentation du pH et la concentration des porteurs est de l'ordre de 10^{13} (cm^{-3}).

II.3.2. Propriétés optiques du CdS

Les propriétés optiques les plus généralement rapportées sont : la transmission optique, le gap optique. A partir de la littérature, les films CdS ont une transparence optique très élevée variant entre 60 et 90%, dans les régions visibles du spectre solaire (520-850) nm, ce qui permet de les utiliser comme des couches fenêtres dans les cellules solaires (cellules photovoltaïques) [21]. Cependant, ces films sont uniformes, ont une forte adhérence et une excellente transmission dans le spectre visible [22]. La transmission est liée directement à l'épaisseur, au gap optique et à la structure du film [23].

Le gap diminue de 2,46 à 2,4 eV avec l'augmentation de l'épaisseur de film de 26 à 95 nm [24,25]. Cette diminution du gap est due à l'influence de divers facteurs tels que la taille des grains, les paramètres structuraux, la concentration des porteurs, la présence des impuretés, le décalage de la stœchiométrie du film et la diminution de la contrainte du réseau [26,27]. A.Kariper et al [20] ont étudié les propriétés structurale, électrique et optique du CdS déposé par bain chimique en fonction du pH de la solution. Ils ont fait l'étude de la transmittance dans la gamme de longueur d'onde entre 300 et 1100 nm pour obtenir les informations sur les propriétés optiques des films minces de CdS obtenues pour différentes valeurs de pH. Ils ont trouvé que dans la gamme 400 -700 nm la transmittance est la plus élevée 79 % pour pH =10 et diminue à 76 % pour le pH= 12. Parmi les films déposés, les films déposés pour pH=10 ont la meilleure cristallinité et la transmittance la plus élevée dans la région du visible. Ils ont conclu que la diminution de la valeur du pH dans la solution du bain chimique améliore la transmission optique des films et de même pour la cristallinité. Dans l'intervalle de longueur d'onde entre 400-1100 nm le coefficient d'absorption optique était dans l'ordre de 10^5 cm^{-1} . Dans leur recherche, le gap optique diminue de 2.45 à 2.28 eV avec l'augmentation du PH, et les valeurs de l'indice de réfraction n et l'indice d'extinction k changent dans les gammes 4.145-1.839 et 0.059-0.017, respectivement dans le visible.

Plusieurs auteurs ont fait des études sur les propriétés optiques des films minces déposés par bain chimique. Le tableau (I.1) donne le gap optique E_g (eV), l'énergie d'Urbach (E_u), la transmittance et le seuil d'absorption.

Tableau II.2: Gap optique E_g (eV), énergie d'Urbach (E_u), seuil d'absorption et transmittances des films de CdS déposé par bain chimique publiés dans la

E_g (eV)	E_u (eV)	T(%)	Limite d'absorption	Références
2.0-2.34	0.180-0.470	70	490 nm	[28]
2.22-2.34	0,54- 0,58	80-85	450 nm	[29]
2.38	1,069	85	420 nm	[30]
2.2-2.44	0 ,42- 0,52	85	~500 nm	[31]
2,44	-	80	425nm	[20]

littérature.

II.4. Structure de blende (ZnS, ZnSe)

Ces matériaux binaires cristallisent dans la structure cubique zinc-blende : Les atomes de zinc et les atomes de sélénium ou sulfure, forment deux sous-réseaux cubiques à faces centrées, décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la grande diagonale du cube figure (2.5). La différence du paramètre de maille entre ZnSe et ZnS est très importante car ce désaccord joue un rôle primordial dans la réalisation d'hétéro-structures .

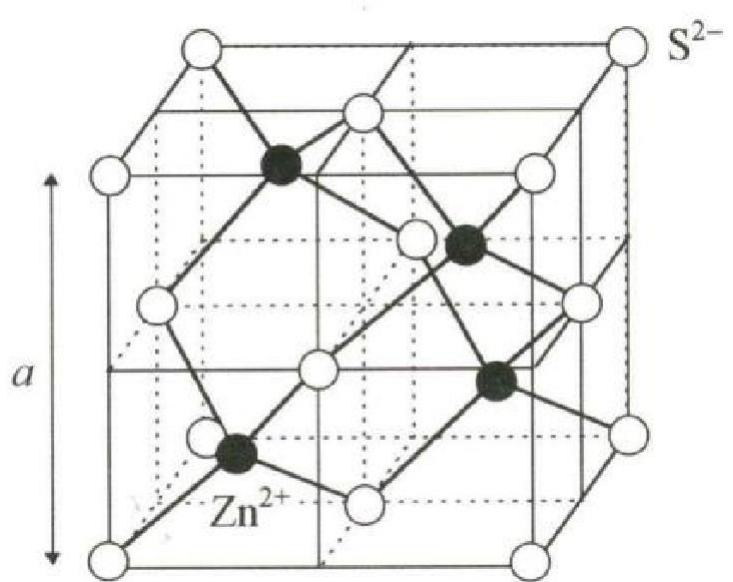


Figure II.9: structure de ZnS

I4.1. propriétés électriques de ZnS et ZnSe

Le sulfure de zinc (ZnS) et le sélénium de zinc (ZnSe) sont des semi-conducteurs qui présentent des propriétés électriques intéressantes. Ils sont caractérisés par leur capacité à conduire l'électricité de manière sélective en fonction de la présence de porteurs de charge, tels que les électrons et les trous.

Ces matériaux ont des bandes interdites spécifiques qui déterminent leur comportement électrique. Le ZnS a une bande interdite d'environ 3,7 eV, ce qui en fait un semi-conducteur à large bande interdite. Le ZnSe a une bande interdite d'environ 2,7 eV, le classant également dans la catégorie des semi-conducteurs à large bande interdite.

En raison de leur structure cristalline et de leur composition chimique, le ZnS et le ZnSe peuvent être dopés pour augmenter leur conductivité électrique. Par exemple, en dopant ces matériaux avec des impuretés de type n ou de type p, il est possible de moduler la concentration des porteurs de charge et d'ajuster les propriétés électriques des matériaux.

De plus, le ZnS et le ZnSe peuvent être utilisés comme matériaux de contact dans les dispositifs électroniques en raison de leur bonne compatibilité avec d'autres matériaux et de

leur faible résistivité électrique.

Ces propriétés électriques font du ZnS et du ZnSe des choix intéressants pour diverses applications, y compris les dispositifs électroniques, les cellules solaires et d'autres dispositifs optoélectroniques, où leur comportement électrique peut être exploité pour améliorer les performances et l'efficacité des dispositifs.

II.4.2. Propriétés optiques de ZnS et ZnSe

Le ZnS et le ZnSe ce sont des semi-conducteurs à gap direct avec $E_g=3.78$ eV et $E_g=2.82$ eV

[33] lui permet des transitions radiatives et elle se varier en fonction du taux de dopage entre

3.65 et 3.7 eV [34], ils possèdent un a taux absorption de la lumière caractérisée par

le coefficient d'absorption α [35] :

$$A(\text{ZnS, ZnSe}(E)) = A(E - E(\text{ZnS, ZnSe})). \quad (\text{II.13})$$

A : est une constante qui dépend de la densité d'état associée aux photons absorbés.

E : l'énergie d'irradiation.

$E_{\text{ZnS, ZnSe}}$: L'énergie de bande interdite.

Le ZnS a une bande interdite directe d'environ 3,7 eV, ce qui le rend transparent dans la région du spectre visible. Le ZnSe a une bande interdite directe d'environ 2,7 eV, ce qui lui confère une transparence dans le spectre visible et une absorption dans le proche infrarouge.

Les deux matériaux présentent un indice de réfraction élevé, ce qui signifie qu'ils sont efficaces pour guider et confiner la lumière à l'intérieur des dispositifs optiques tels que les cellules solaires avec des coefficients d'absorption élevés dans certaines parties du spectre optique. Cela permet une absorption efficace de la lumière et une génération de porteurs de charge dans les cellules photovoltaïques.

Les deux matériaux peuvent également présenter des propriétés d'émission de lumière lorsqu'ils sont excités par une source appropriée. Par exemple, le ZnS peut émettre de la lumière dans le spectre bleu-vert, tandis que le ZnSe peut émettre dans le spectre bleu et leur coefficient d'extinction relativement faibles, ce qui signifie qu'ils permettent à la lumière de se propager sur de longues distances sans une atténuation significative.

Utilisés comme couches absorbantes ou comme matériaux de guidage de la lumière pour améliorer l'efficacité et les performances des dispositifs.

Références

- [01] J. Verschraegen, M. Burgelman, «Numerical modeling of intra-band tunneling for heterojunction solar cells in SCAPS», J. Appl. Phys pp: 6277-6278.
- [02] A. Bouloufa, “Etude et Caractérisation des Semi-conducteurs Ternaires et Quaternaires $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ par Spectroscopie Photoacoustique”, Thèse de doctorat en électronique, Université Ferhat-Abbas, Sétif, (2007).
- [03] K. YANG, JACK R. EAST and GEORGE I. HADDAD «Numerical modeling of abrupt heterojunctions using a thermionic-field emission boundary condition».
- [04] A. Kanevce, "ANTICIPATED PERFORMANCE OF $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ SOLAR CELLS IN THE THIN-FILM LIMIT", These PhD, Colorado, USA, (2007).
- [05] L. Bailly, “cellules photovoltaïques organiques Souples à grande surface”, Thèse de doctorat en Chimie Physique, Université bordeaux I, (2010).
- [06] N. Nabil. "Contribution à la modélisation d'une cellule solaire de la 3^{ème} génération à haut rendement", Mémoire de master en instrumentation électronique, université de Ferhat Abbas Sétif1, (2017).
- [7] J. Joussot-Dubien, Nouveau Traité de Chimie Minérale, Vol. 5, Masson & Cie, Paris (1962).
- [8] A.F. Kohn, G. Ceder, D. Morgon, C.G. Van de Walle, Phys. Rev.B., 61, 15019 (2000)
- [9] V. Srikant, D.R. Clarke, J. App. Phys., 83, 5447 (1998)
- [10] K.I. Chopra, S. Major and D.K. Pandya, Thin solid lms 1, 102 (1986)
- [11] T. Aoki, Y. Shimizu, A. Miyake, A. Nakamura, Y. Nakanishi, Y. Hatanaka, p-Type ZnO Layer Formation by Excimer Laser Doping, physica status solidi b, 229, 2, 911 (2001).
- [12] Handbook of Chemistry and Physics, 56th Edition, Ed. R.C. Weast, CRS Press, (1975).
- [13] E.M. Bachari, G. Baud, S. Ben Amor, M. Jacquet, Thin Solid Films, 348, 165 (1999).
- [14] T.K. Subramanyam, B. Srinivasulu Naidu, S. Uthanna, Cryst. Res. Technol., 35, 1193 (2000).
- [15] M. Rebien, W. Henrion, M. Bär, C.H. Fischer, App. Phys. Lett., 80, 3518 (2002)
- [16] F. Ng-Cheng-Chin, M. Roslin, Z.H. Gu. T.Z. Fahidy, J. Phys. D : Appl. Phys., 31, L71 (1998).

- [17] W. Li, D. Mao, F. Zhang, X. Wang, X. Liu, S. Zou, Q. Li and J. Xu, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B169, 59 (2000)
- [18] W. Li, D. Mao, F. Zhang, X. Wang, X. Liu, S. Zou, Q. Li and J. Xu, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B169, 59 (2000)
- [19] Virginie Albe, Thèse de doctorat « Nano-cristaux semi-conducteurs : effets de confinement, de forme et de dopage », Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc (1997).
- [20] A. Kariper, E. Guneria, F. Gode, C. Gumus, T. Ozpozan, Materials Chemistry and Physics 129 (2011) 183
- [20] A. Kariper, E. Guneria, F. Gode, C. Gumus, T. Ozpozan, Materials Chemistry and Physics 129 (2011) 183.
- [21] K. Ravichandran, V. Senthamilselvi, Applied Surface Science 270 (2013) 439.
- [22] A. Cortesa, H.Gomez, R.E. Marottib, G.Riverosa, c, E.A. Dalchieleb; Solar Energy Materials & Solar Cells 82 (2004) 21. Chapitre I : Revue Bibliographique 19
- [23] J. Hiie, T. Dedova, V. Valdna, K. Muska, Thin Solid Films. 511 (2006) 443.
- A. Kariper, E. Guneria, F. Gode, C. Gumus, T. Ozpozan, Materials Chemistry and Physics 129 (2011) 183
- [24] Li Wenyi, Cai Xun, Chen Qiulong, Zhou Zhibin, Materials Letters. 59 (2005) 1.
- [25] Gary Hodes, Chemical Solution Deposition of Semiconductor Films, New York, 2002.
- [26] E. Çetinörgü, C. Gümüş, R. Esen, Thin Solid Films. 515 (2006) 1688.
- [27] Joel Pantoja Enríquez, Xavier Mathew, Solar Energy Materials & Solar Cells. 76(2003) 313.
- [28] A.E. Rakhshani, A.S. Al-Azab, J. Phys. Condens. Matter. 12 (2000) 8745. [29] M. Patabi, J. Uchil, Solar Energy Mater. Solar Cells 63 (2000) 309.
- [30] M.A. Islam, M.S. Hossain, M.M. Aliyu, P. Chelvanathan, Q. Huda, M.R. Karim, K. Sophia, N. Amin, Energy Procedia 33 (2013) 203.
- [31] H. Moualkia, G.Rekhila, M.Izerrouken, A.Mahdjoub, M.Trari; Materials Science in Semiconductor Processing 21 (2014) 186.
- [32] <http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/opto.htm>.
- [33]. Çetinörgü, C. Gümüş, R. Esen, Thin Solid Films. 515 (2006) 1688-1693.
- [34] Des, F., & Exactes, S. (n.d.). Aspect de modelisation des proprietes physiques

des alliages semiconducteurs ii-via application photovoltaïque.

[35]Adnane, M., Hamzaoui, S., Mostapha, B., & Toufik, S. (2011). Elaboration et caractérisation des couches minces conductrices et transparentes pour les cellules solaire de type TCO / ZnS / CIS.

Suhail, M. (2012). Structural and optical properties of ZnS, PbS, Zn (1-x) Pb (x) S, Zn (x) Pb (1-x) S and PbZn (x) S (1-x) thin films. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*.

Chapitre III :

Logiciel de simulation AMPS-1D

III. Aperçu sur le fonctionnement de l'AMPS :

En donnant un bref aperçu sur les méthodes de modélisation des dispositifs microélectroniques et optoélectroniques, nous notons que la physique du transport des dispositifs peut être décrite par trois équations : l'équation de Poisson, l'équation de continuité pour les trous libres et l'équation de continuité pour les électrons libres. La résolution de ces trois équations différentielles non linéaires, chacune avec deux conditions aux limites associées, permet de déterminer les caractéristiques de transport.

Dans le cadre de l'Analyse de Monte Carlo pour les dispositifs microélectroniques (AMPS), ces trois équations, avec les conditions aux limites, sont résolues simultanément pour obtenir un ensemble de trois variables d'état inconnues à chaque point du dispositif : le potentiel électrostatique, le quasi-niveau de Fermi des trous et le quasi-niveau de Fermi des électrons. À partir de ces variables d'état, on peut calculer les concentrations de porteurs, les champs, les courants, etc.

Pour déterminer ces variables d'état, l'ordinateur utilise la méthode des différences finies et la technique de Newton-Raphson. La méthode de Newton-Raphson permet de trouver itérativement la racine d'une fonction ou les racines d'un ensemble de fonctions, à condition d'avoir une estimation initiale appropriée pour ces racines.

Dans l'AMPS, le dispositif unidimensionnel analysé est divisé en segments par une grille de points, dont le nombre est décidé par l'utilisateur. Les trois ensembles d'inconnus sont alors résolus pour chaque point de la grille. Il convient de noter que dans l'AMPS, l'espacement de la grille peut être variable en fonction du choix de l'utilisateur.

Une fois que ces trois variables d'état sont obtenues en fonction de la position x , il est possible de déterminer le bord de la bande, le champ électrique, la charge des défauts, les populations de porteurs, les densités de courant, les profils de recombinaison et toute autre information sur le transport.

Veuillez noter que la description fournie est générale et qu'il existe différentes méthodes de modélisation des dispositifs microélectroniques et optoélectroniques, chacune avec ses propres approches et techniques spécifiques [1,2].

III.1. Liste des paramètres à introduire :

La figure III-1, est une liste de paramètres d'entrée que L'AMPS a besoin pour résoudre l'ensemble des équations de transport et de conditions aux limites. En général, cette liste s'appliquera à toutes les versions du programme en cours à quelque exception mineurs. Les différences dans la liste des paramètres entre chaque version de programme seront mentionnées comme elles sont discutées les paramètres peuvent se trouver dans l'une des trois catégories générales suivantes :

- 1-Paramètres qui s'appliquent au dispositif entier.
- 2-Paramètres qui s'appliquent à une région particulière du dispositif.
- 3-Paramètres qui définissent les spectres d'illumination (pour le cas de la lumière)

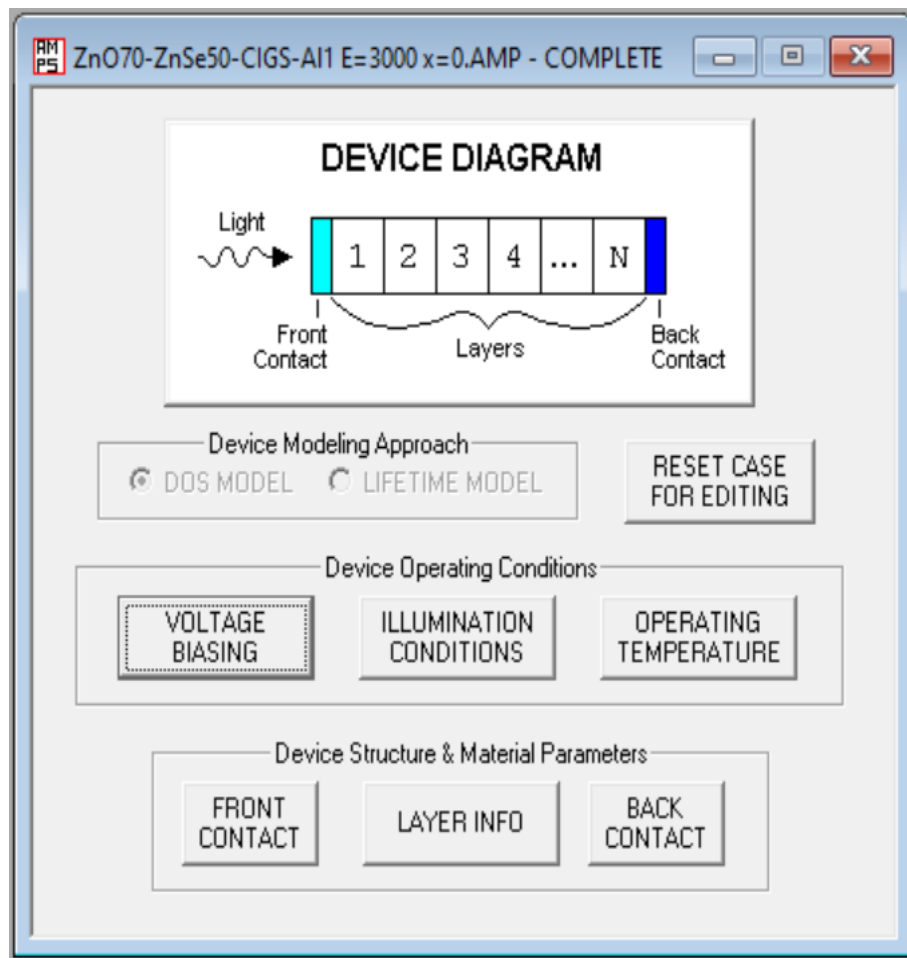


Figure III.1: différentes fenêtres pour introduire les paramètres

Les paramètres peuvent appartenir à l'une des trois catégories suivantes :

Paramètres qui s'appliquent au dispositif entier.

Paramètres qui s'appliquent à une région particulière de dispositif.

Paramètres qui définissent les spectres d'illumination (pour le cas de la lumière)

III.1.1. Paramètres qui s'appliquent au dispositif entier :

Les Paramètres qui s'appliquent au dispositif entier incluent (les unités utilisées dans l'AMPS sont entre parenthèse) ce qui suit :

$$\text{PHIBO} = \phi_{b0} = E_C - E_F \text{ pour } x=0 \text{ (eV)}$$

$$\text{PHIBL} = \phi_{bL} = E_C - E_F \text{ pour } x=L \text{ (eV)}$$

III.1.1.1. Vitesse de recombinaison en surface :

- $SNO = SNO$: pour les électrons interface $x=0$ (cm/sec)
- $SPO = SPO$: pour les trous interface $x=0$ (cm/sec)
- $SNL = SNL$: pour les électrons interface $x=L$ (cm/sec)
- $SPL = SPL$: pour les électrons interface $x=L$ (cm/sec)

III.1.1.2. Coefficient de réflexion de la lumière entrant sur les surfaces avant et arrière :

- $RF = RF$ = coefficient de réflexion à $x=0$ (réflexion sur surface avant)
- $RB = RB$ = coefficient de réflexion à $x=L$ (réflexion sur surface arrière)

III.1.1.3. La température $T(k)$:

Ces paramètres sont entrés seulement une fois, et appliquent en général au dispositif entier[1,2].

III.1.2. Paramètres qui s'appliquent à une région particulière :

Les paramètres dans la figure IV-3, peuvent avoir différentes valeurs pour les différentes couches. Ces les paramètres incluent (les unités sont entre parenthèses) :

III.1.2.1. La largeur W ou XLAYER (A) d'une région :

III.1.2.2. Propriétés du matériau :

- a) EPS : la constante diélectrique ϵ_r à la température T tels que $\epsilon = \epsilon_r * \epsilon_0$ ou ϵ_0 est la constante diélectrique du semi-conducteur
- b) NC : densité d'états effective des électrons NC (cm^{-3}) dans la bande de conduction à la température T
- c) NV : densité d'états effective des trous NV (cm^{-3}) dans la bande de valence à la température T
- d) EG : largeur de la bande interdite (E_v) a la température T
- e) $EGOP$: largeur de la bande interdite optique
- f) CHI : l'affinité d'électron
- g) MUN : mobilité des électrons ($cm^2/V.sec$)
- h) MUP : mobilité des trous ($cm^2/V.sec$)

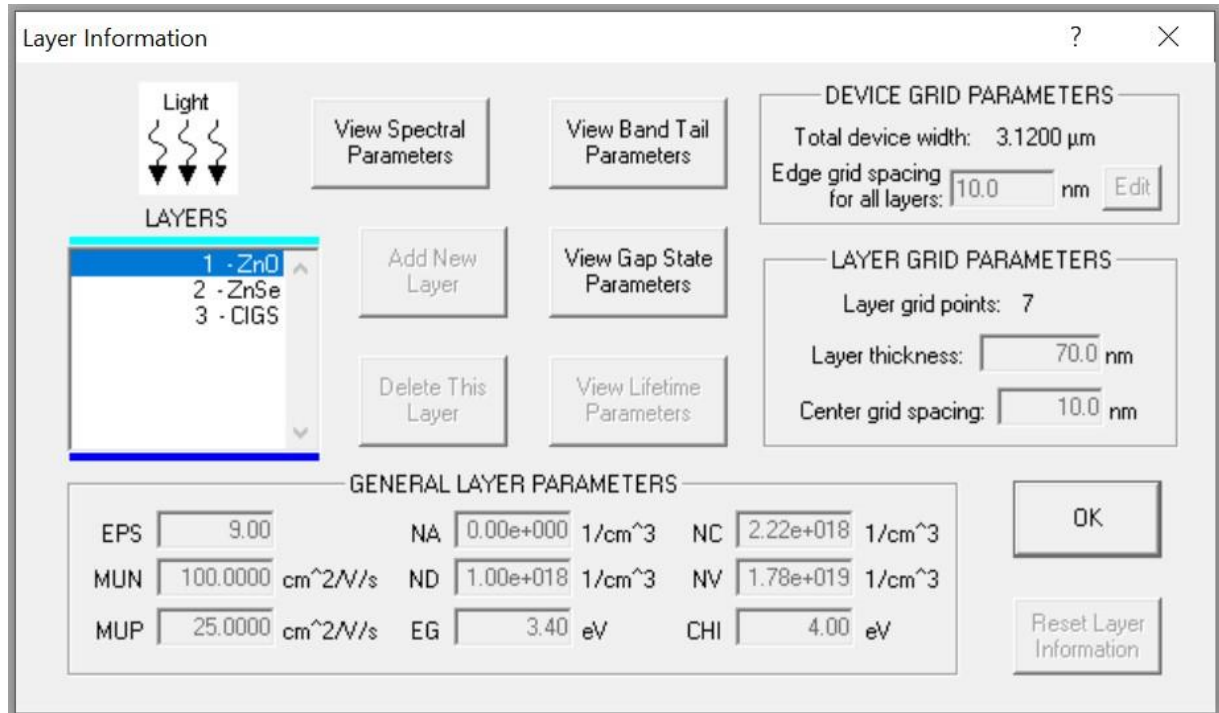


Figure III. 2 : différents paramètres pour la couche a-Si.

III.1.2.3. États de défaut discret :

DLVS est le nombre de niveaux de donneurs discrets comme : $(0 \leq DLVS \leq \delta)$ et ALVS est le nombre de niveaux d'accepteurs discrets comme : $(0 \leq ALVS \leq \delta)$.

a. Concentrations du niveau donneur discret et énergies d'ionisation.

i. Pour l'ionisation total DVLS=0 et :

- $ND(i) = ND,i$ = Concentration (cm^{-3}) au $i^{\text{ème}}$ niveau donneur.

ii. Si $DLVS > 0$ (ionisation partielle), ainsi l'entrée pour chaque $i = DLVS$ (niveaux discrets)

- $ND(i) = ND,i$ = concentration (cm^{-3}) au $i^{\text{ème}}$ niveau donneur.
- $EDON(i)$ = énergie d'ionisation (eV) du $i^{\text{ème}}$ niveau donneur mesuré positivement du bord de la bande de conduction E_c .
- $WDSD(i) = WD,i$ = largeur (eV) du $i^{\text{ème}}$ donneur dopant
- $DSIG/ND(i)^*$ = section droite de capture de l'électron (cm^2) pour la $i^{\text{ème}}$ niveau donneur discret.
- $DSIG/PD(i)^*$ = section droite de capture trou (cm^2) pour le $i^{\text{ème}}$ niveau donneur discret.

b. Concentration du niveau accepteur et énergies d'ionisation :

i. pour l'ionisation total DVLS=0 et : a) $NA(i) = NA,i$ = Concentration (cm^{-3})

iii) au $i^{ème}$ niveau accepteur ii. Si $ALVS > 0$ (ionisation partielle), et pour $i=1$ à $ALVS$.

a) $NA(i) = NA,i$ = Concentration (cm^{-3}) au $i^{ème}$ niveau accepteur

b) $EACP(i)$ = énergie d'ionisation (eV) du $i^{ème}$ niveau accepteur mesuré positivement du bord E_v de la bande de valence.

c) $WDSA(i) = WA,i$ = largeur (eV) du $i^{ème}$ accepteur dopant.

d) $DSIG/NA(i)^*$ = section droite de capture de l'électron (cm^2) pour le $i^{ème}$ niveau accepteur discret.

e) $DSIG/PA(i)^*$ = section droite de capture trou (cm^2) pour le $i^{ème}$ niveau accepteur discret.

Gap State Parameters

Current Layer: 2 - CdS

Background State Distribution:

- ☐ Flat Distribution
- ☒ V-Shaped Distribution

Flat Distribution Parameters:

EDA: 0.56 eV

GMGD	1.00e+012	1/cm ³ /eV	GMGA	1.00e+012	1/cm ³ /eV
MSIG/ND	1.00e-015	cm ²	MSIG/NA	1.00e-017	cm ²
MSIG/PD	1.00e-017	cm ²	MSIG/PA	1.00e-015	cm ²

Discrete Defects:

☒ Donor ☐ Acceptor

Defect: 1

ND: 1.00e+012 1/cm³

EDON: 0.56 eV

WDS: 0.10 eV

DSIG/ND: 1.00e-015 cm²

DSIG/PD: 1.00e-017 cm²

Gaussian Defects:

☐ Donor ☒ Acceptor

Defect: 1

NAG: 1.00e+018 1/cm³

EACPG: 1.25 eV

WDSAG: 0.10 eV

GSIG/NA: 1.00e-017 cm²

GSIG/PA: 9.80e-012 cm²

Figure III.3 : Défauts donneurs discrets et continues pour la couche CdS.

III.1.2.4. Défauts localisés aux queues et aux états moyens (forme ``V`` ou ``U``) :

a. Si forme en V, donc :

- GDO = prefacteur ($1/\text{cm}^3/\text{eV}$) dans l'equation: $g_d = G_{do} \exp(E-EV/E_d)$
- GAO = Prefacteur ($1/\text{cm}^3/\text{eV}$) dans l'équation : $g_a = G_{ao} \exp(E-EC/E_a)$;
- ED = énergie Caractéristique E_d (eV) pour donneur dans les queues
- EA = énergie Caractéristique E_a (eV) pour accepteur dans les queues.
- TSIG/ND* = section droite de capture des électrons dans les états de queue de donneur (cm^2)
- TSIG/PD* = section droite de capture des trous dans les états de queue de donneur (cm^2)
- TSIG/NA* = section droite de capture pour les électrons dans les états de queue accepteur (cm^2)
- TSIG/PA* = section droite de capture pour les trous dans les états de queue accepteur (cm^2)

b. Si forme en U, alors, en plus des paramètres V en forme :

- GMGA = densité d'états accepteur moyenne à GMGa ($1/\text{cm}^3/\text{eV}$)
- GMGD = densité d'états donneur moyenne à GMGd ($1/\text{cm}^3/\text{eV}$).
- EDA = énergie de basculement 'EDA (eV) mesurée positivement à partir de E_v .
- MSIG/ND* = section droite de capture pour des électrons dans les états donneur moyennes (cm^2)
- MSIG/PD* = section droite de capture pour des trous dans les états donneur moyennes (cm^2)
- MSIG/NA* = section droite de capture pour des électrons dans les états accepteurs moyennes (cm^2)

III.1.2.5. Niveaux gaussiens (0,1 ou 2 niveaux accepteurs et 0,1 ou 2 niveaux donneurs) :

a. Nombre de niveau d donneur Gaussien, si $DLVSG > 0$, pour chaque $i=DLVSG$ 28 niveaux donneurs Gaussien.

- NDG(i) = densité d'état de donneur de Gaussien expose ($1/\text{cm}^{-3}$) pour la i' -ème donneur Gaussien.

- EDONG(i)=énergie de donneur Gaussien au sommet (eV) mesuré positif à partir de E_c pour la $i^{ème}$ donneur Gaussien.
 - GSIG/ND(i)* = section droite de capture du $i^{ème}$ état donneur Gaussien pour les électrons (cm^2).
 - WSDSG(i)=écart standard (Ev) du $i^{ème}$ niveau de donneur Gaussien.
 - GSIG/PD(i)*= section droite de capture du $i^{ème}$ état donneur gaussien pour les trous (cm^2)
- b. Nombre de niveaux accepteur Gaussien, si ALVSG >0, pour chacun du $i=DLVSG - 2\delta$ niveaux accepteur Gaussien.
- NAG(i)=densité d'état accepteur Gaussien ($1/ cm^{-3}$) pour le $i^{ème}$ accepteurGaussien
 - EACPG(i)=énergie accepteur Gaussien au sommet (eV) mesuré positif à partir de E_c pour la $i^{ème}$ accepteur Gaussien.
 - WDSAG(i)=écart standard (eV) du $i^{ème}$ niveau accepteur Gaussien
 - GSIG/NA(i) 4=section droite de capture du $i^{ème}$ état donneur Gaussien pour les électrons (cm^2).
 - GSIG/PA(I)*= section droite de capture du $i^{ème}$ état donneur Gaussien pour les trous (cm^2).

Gap State Parameters

Current Layer: 2 - CdS

Background State Distribution:

- ☐ Flat Distribution
- ☒ V-Shaped Distribution

Flat Distribution Parameters:

EDA: 0.56 eV

GMGD	1.00e+012	1/cm ³ /eV	GMGA	1.00e+012	1/cm ³ /eV
MSIG/ND	1.00e-015	cm ²	MSIG/NA	1.00e-017	cm ²
MSIG/PD	1.00e-017	cm ²	MSIG/PA	1.00e-015	cm ²

Discrete Defects:

☒ Donor ☐ Acceptor

Defect:

ND: 1/cm³

EDON: eV

WDSD: eV

DSIG/ND: cm²

DSIG/PD: cm²

Gaussian Defects:

☐ Donor ☒ Acceptor

Defect:

NAG: 1/cm³

EACPG: eV

WDSAG: eV

GSIG/NA: cm²

GSIG/PA: 9.80e-012 cm²

Figure III.4: Défauts accepteur discrets et continues pour la couche CdS

III.1.3. Paramètres qui définissent le spectre d'illumination :

Le premier de ces paramètres appelés LIGHT dans le programme détermine si la lumière est désirée dans le programme. Si LIGHT=NO, donc aucun spectre ne doit être défini et l'utilisateur est seulement intéressé par les caractéristiques du dispositif dans l'obscurité sous polarisation. Si cependant l'utilisateur veut voir le dispositif sous illumination, donc pour chaque longueur d'onde dans le spectre, les paramètres suivants doivent être définis (les unités entre parenthèses) [1,2] :

1. La longueur d'onde LAMBDA (m).
2. Le FLUX incident à cette longueur d'onde (1/ cm² /s).
3. Le coefficient d'absorption ALFA (1/ cm²) à cette longueur d'ondes dans chaque région de la structure.

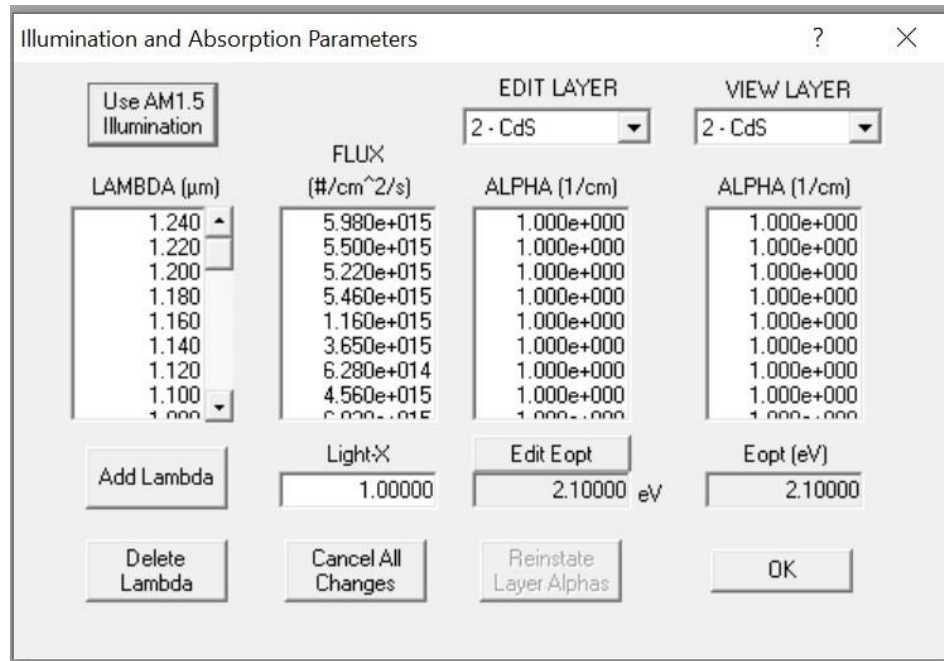


Figure III.5: coefficients d'absorption pour la couche CdS

III.2. Le panneau de différents résultats obtenus :

Le panneau suivant (voir figure III-5) indique les différentes courbes obtenues lors de la simulation il contient les points suivants :

E_c : la bande de conduction

E_f : niveau de fermi

E_v : la bande de valence

E_l : les électrons libres

H_l : les trous libres

J_d : caractéristique I-V à l'obscurité,

J_l : caractéristique I-V à la lumière

J_n : courant d'électrons

J_p : courant de trous

R_a : la recombinaison d'accepteurs

R_d : la recombinaison de donneurs

R_t : la recombinaison totale

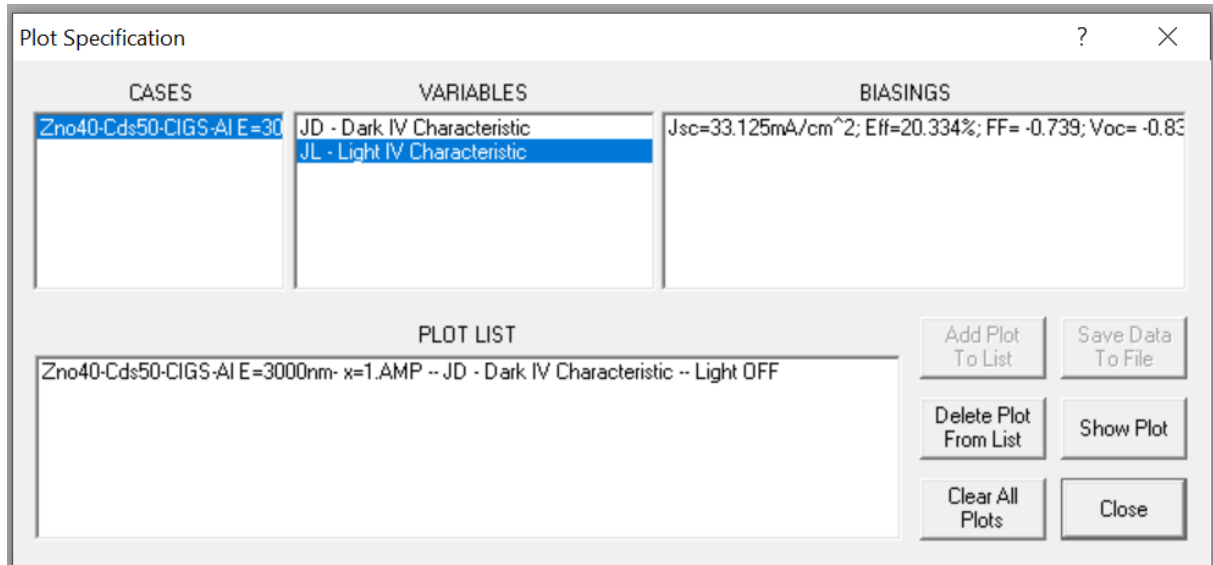


Figure III.6 : le panneau des courbes

Le logiciel de simulation AMPS est largement utilisé dans le domaine photovoltaïque en raison de son efficacité et de sa convivialité. Il offre la possibilité d'ouvrir plusieurs fenêtres simultanément, ce qui permet d'effectuer plusieurs tâches en même temps, en fonction de la puissance de l'ordinateur et de la stabilité du logiciel. Une caractéristique distincte d'AMPS est sa capacité à gérer jusqu'à trente couches (LAYERS), ce qui constitue un avantage significatif par rapport à d'autres logiciels tels que SCAPS. Cependant, un inconvénient de ce logiciel réside dans sa vitesse d'exécution, qui peut prendre plus d'une heure avant de terminer une simulation. De plus, il peut parfois échouer à s'exécuter sans fournir d'indication claire sur les éventuelles erreurs numériques saisies par l'utilisateur.

Références :

[1].AMPS-1D Manual for windows 95-NT A One-Dimensional Device Simulation Program for the Analysis of Microelectronic and Photonic Structures.

[2] P. Chatterjee, 6th Int'l PVSEC, New Delhi, Feb.10-14(1992) 329.

Chapitre IV :

Simulation et interprétation des résultats

IV.1. Introduction

Pour que les systèmes photovoltaïques soient économiquement viables pour des applications terrestres à grande échelle, des cellules solaires efficaces fabriquées à l'aide de matériaux peu coûteux et facilement disponibles sont nécessaires. L'objectif principal est de maximiser l'efficacité de conversion de ces cellules. Il est impératif d'analyser et d'affiner notre compréhension des différents facteurs qui limitent les performances de la cellule. Ceci peut être mieux réalisé à l'aide de modèles électro-optiques qui permettent l'analyse des propriétés de transport dépendant de la position dans des dispositifs basés sur de tels matériaux absorbants. Un modèle de simulation 1D a été développé.

Par conséquent, l'optimisation des cellules solaires consiste à étudier les effets de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure qui se traduit par une efficacité maximale. Nous avons utilisé le logiciel AMPS1D, développé par le professeur Fonash [1], comme modèle de simulation.

IV .2. Simulation et interprétation du résultats

IV.2.1. Description de la structure

Au début on a pris une cellule typique de chalcopyrite $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) qui est illustrée dans la figure (IV.1.a), avec une couche de (CIGS) de type p (~3000nm) pour deux concentration ($x=0$ et $x=1$) et une couche mince (~ 30nm) de (CdS) de type n pour former une hétérojonction.

La couche de (CdS) est fondamentalement transparente aux photons incidents, car son énergie de gap de 2.4 eV. Les photons sont principalement absorbés par la couche de (CIGS), pour compléter la cellule, une couche TCO (Transparent Conductive Oxide) (ZnO) recouvre la couche (CdS) et se connecte aux contacts électriques. Les contacts électriques à l'arrière de la cellule peuvent être métalliques et peuvent couvrir toute la surface car la couche n'a pas besoin d'être transparente.

Pour améliorer le rendement on a remplacé la couche (n-CdS) par une couche (n-ZnSe) par la suite on fait la comparaison entre les deux cellules Voir figure (IV.1.b).

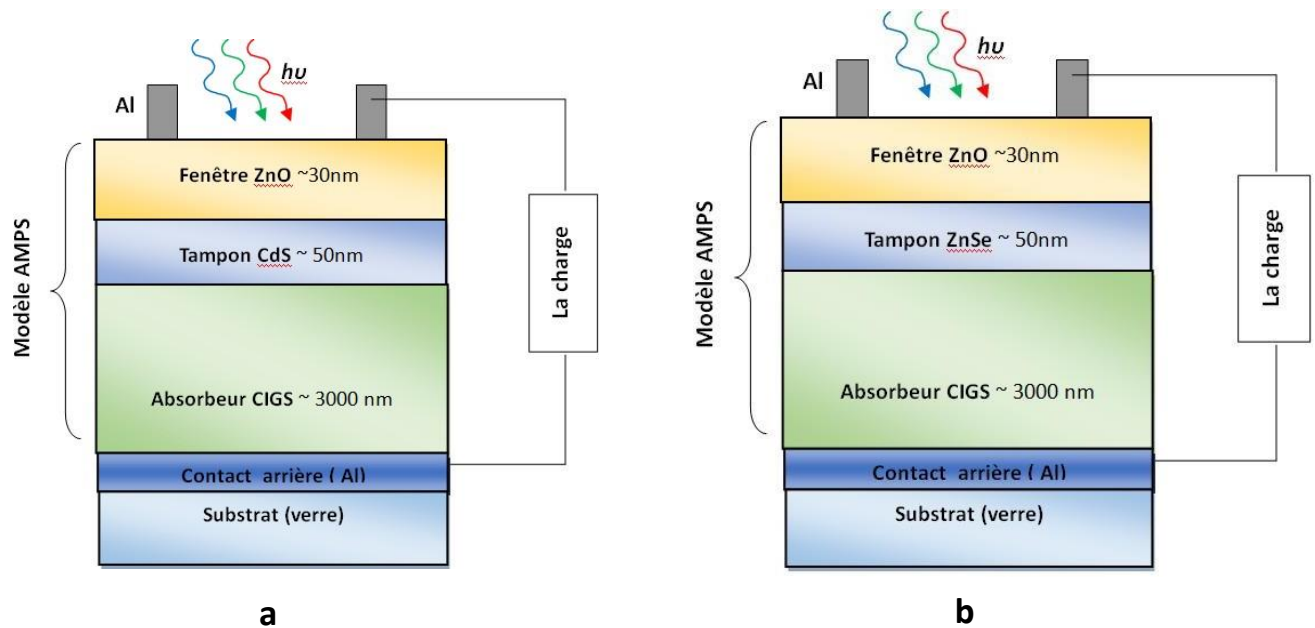


Figure IV.1 : Structure de la cellule solaire, **a** (ZnO/CdS/CIGS) et **b** (ZnO/ZnSe/CIGS).

IV.2.2. Paramètres d'entrées et Simulation de la structure

A- Paramètres d'entrées électriques

Les calculs utilisant le programme AMPS-1D nécessitent des paramètres d'entrée, tels que, la densité de puissance radiante, la hauteur de la barrière et les caractéristiques des couches qui composent la structure à simuler [2-4].

Pour les électrons et les trous, nous avons utilisé la valeur de : 10^7 cm/s, comme vitesses de recombinaison en surface [4]. La hauteur des barrières du contact avant ϕ_{b0} (TCO/p - couche) et du contact arrière ϕ_{bL} (n - couche/métal) ont été fixées à 1,4 eV et 0,02 eV [6], respectivement, ϕ_{bL} : Représente l'énergie d'activation de la couche n.

B- Paramètres d'entrées optiques

Le rayonnement solaire est pris : AM 1,5 avec une densité de puissance de 100 mW/cm^2 , la réflexion de la lumière à la face avant (RF) a été fixée à 0,02. Pour le contact arrière nous avons choisi la valeur de 0,8 pour rétro-réflexion (RB).

Le coefficient d'absorption, pour les différentes couches a été intégré dans le code AMPS-1D . Tous les paramètres utilisés dans la simulation sont décrits dans le tableau (IV.1) :

Les paramètres des différentes couches de notre cellule dans le tableaux IV.1 :

	Propriétés des différentes couches			
	ZnO	CdS	ZnSe	CIGS
Épaisseur	30 nm	50 nm	50 nm	3000 nm
Constante diélectrique	9	10	10	13.6
Mobilité d'électrons	100 cm ² /Vs	100 cm ² /Vs	50 cm ² /Vs	100 cm ² /Vs
Mobilité de trous	25 cm ² /Vs	25 cm ² /Vs	20 cm ² /Vs	25 cm ² /Vs
Bande de gap	3.3 eV	2.4 eV	2.7 eV	CIGS (1.69 eV), CIS(1.02 eV)
Densité d'effective NC	2.2x10 ¹⁸ cm ⁻³	2.2x10 ¹⁸ cm ⁻³	1.5x10 ¹⁸ cm ⁻³	2.2x10 ¹⁸ cm ⁻³
Densité d'effective NV	1.8x10 ¹⁹ cm ⁻³	1.8x10 ¹⁹ cm ⁻³	1.8x10 ¹⁹ cm ⁻³	1.8x10 ¹⁹ cm ⁻³
Les affinités des électrons	4 eV	3.8 eV	4.09 eV	4.1 eV
Les densités	N _D : 10 ¹⁸ cm ⁻³	N _D : 1.1x10 ¹⁸ cm ⁻³	N _D : 1.1x10 ¹⁸ cm ⁻³	NA : 2x10 ¹⁶ cm ⁻³
	Défauts Gaussiens			
Défauts de densités	N _{DG} : 10 ¹⁷ cm ⁻³	N _{AG} : 10 ¹⁸ cm ⁻³	N _{AG} : 10 ¹⁸ cm ⁻³	N _{DG} : 10 ¹⁴ cm ⁻³

IV.3. Résultats et discussion de la cellule (ZnO/CdS/CIGS)

IV.3.1. Effet de l'épaisseur de la couche active Cu In_{1-x}Ga_xSe₂ (CIGS) en fonction de la Concentration

Le CIGS est un matériau à gap direct. Il absorbe un spectre plus large que le silicium. Il permet d'atteindre un haut niveau de performance. De plus, il peut également être utilisé dans des structures en tandem pour une couverture étendue du spectre.

La gamme de la variation de la concentration de Ga est choisi suivant la valeur de x dans l'alliage, cette dernière est variée entre 0 et 1. Le rapport du Gallium dans l'absorbeur de CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ (CIGS), correspond au rapport des concentrations [Ga]/([Ga]+[In]). La valeur de x dans l'alliage CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ est calculé selon l'équation suivante [7] :

$$E_g = 1.02 + 0.67 \cdot x + b \cdot x \cdot (x - 1) \dots\dots\dots (IV.1)$$

Où b est le coefficient d'inclination optique qui varie entre 0.11-0.24, d'après Wei et Zunger , on peut considérer cette variation est linéaire à partir des résultats expérimentaux .

Prenons la relation linéaire entre le pourcentage du Gallium dans l'alliage de CIGS qui corresponde à une valeur de x à partir du rapport des concentrations : $[Ga]/([Ga]+[In])$.

D'après l'équation (VI.1) on peut calculer la largeur de la bande interdite correspondante à $x=0$ et $x=1$. Elles sont données comme suite :

$X = 0$, la concentration du Gallium est 0% dans l'alliage, alors $E_g = 1.02$ eV.

$X = 1$, la concentration du Gallium est 100% dans l'alliage, alors $E_g = 1.69$ eV.

-L'épaisseur de la couche de CIGS a été variée de 1000 nm à 5000 nm dans notre étude, tandis que l'épaisseur des couches de CdS et de ZnO était maintenue constante à 100 nm et 50 nm respectivement. Nous avons examiné l'effet de cette variation d'épaisseur de la couche de CIGS sur les performances de la cellule solaire. Dans nos analyses, nous avons également considéré deux concentrations de gallium différentes, représentées par les valeurs de $x = 0$ et $x = 1$.

Les caractéristiques du sortie (J_{sc} , Eff , FF , V_{oc}) obtenus ont été représentés graphiquement dans la figure (IV.2).

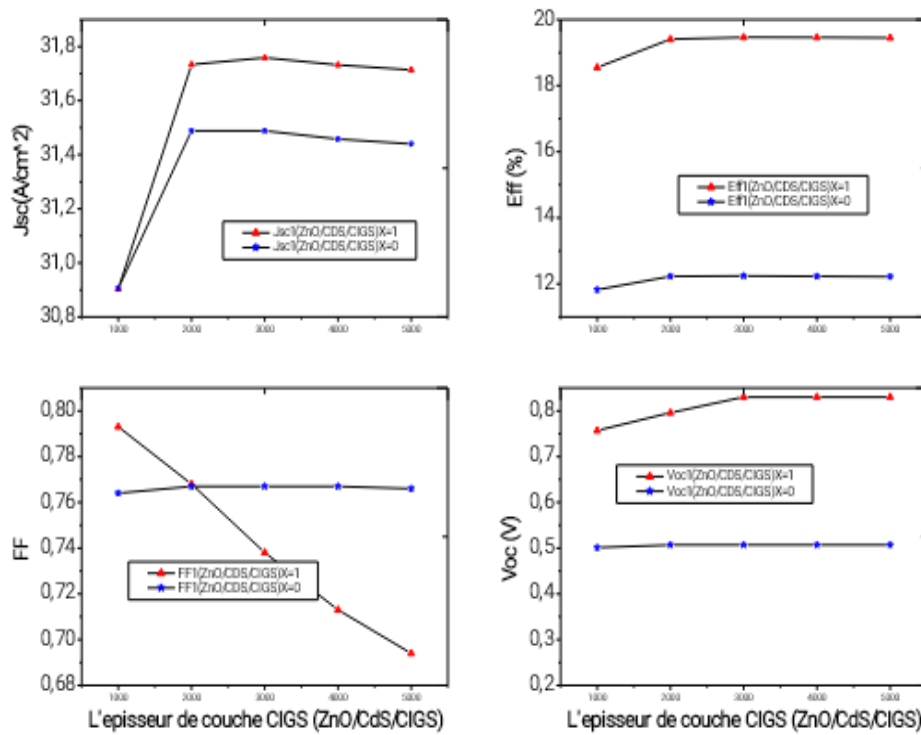


Figure IV.2: Variation des paramètres photovoltaïques (V_{oc} , J_{sc} , FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS.

Nous avons analysé l'effet de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS, ainsi que les deux concentrations de gallium ($x=0$ et $x=1$), sur les paramètres photovoltaïques des cellules solaires en couches minces. Voici les principales observations :

- Courant de court-circuit (J_{sc}) : Les courbes pour les deux concentrations de gallium montrent un pic de courant de court-circuit entre 1000 et 2000 nm d'épaisseur de CIGS. Ce pic atteint une valeur maximale de 31,759 mA/cm² pour $x=1$ et 31,488 mA/cm² pour $x=0$ à une épaisseur de 3000 nm. Au-delà de cette épaisseur, le courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de l'épaisseur.
- Rendement : Le rendement de la cellule augmente progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'absorbeur de CIGS jusqu'à environ 3000 nm, où il atteint son optimum. Au-delà de cette valeur, la courbe reste constante. Les rendements obtenus sont de 19,45% pour $x=1$ et 12,24% pour $x=0$, pour des épaisseurs de 1000 et 5000 nm respectivement.
- Tension de circuit ouvert (V_{co}) : La tension de circuit ouvert reste constante à environ 0,51 V pour la concentration de gallium $x=0$, indépendamment de l'épaisseur de la couche d'absorbeur. En revanche, pour la concentration de gallium $x=1$, la tension de circuit ouvert évolue de 0,75 V à 0,83 V dans la plage d'épaisseur de 1000 à 3000 nm, puis reste constante avec l'augmentation de l'épaisseur.
- Facteur de forme (FF) : Pour la concentration de gallium $x=0$, le facteur de forme reste presque constant autour de 0,767 indépendamment de l'épaisseur de la couche d'absorbeur. En revanche, pour la concentration de gallium $x=1$, le facteur de forme diminue avec l'augmentation de l'épaisseur, atteignant sa valeur maximale de 0,793 à une épaisseur de 1000 nm.

IV.3.2. Effet de l'épaisseur de la couche tampon (CdS) en fonction de la concentration

L'épaisseur de la couche en CdS est variée de 50 nm à 200 nm tandis que l'épaisseur de la couche en CIGS est maintenue constante (3 μ m) et fixée l'épaisseur de la couche de ZnO en (50 nm) et la couche absorbant dans l'épaisseur (3000nm). L'effet de l'épaisseur de la couche en CdS sur la cellule solaire est illustré dans la figure (IV.3).

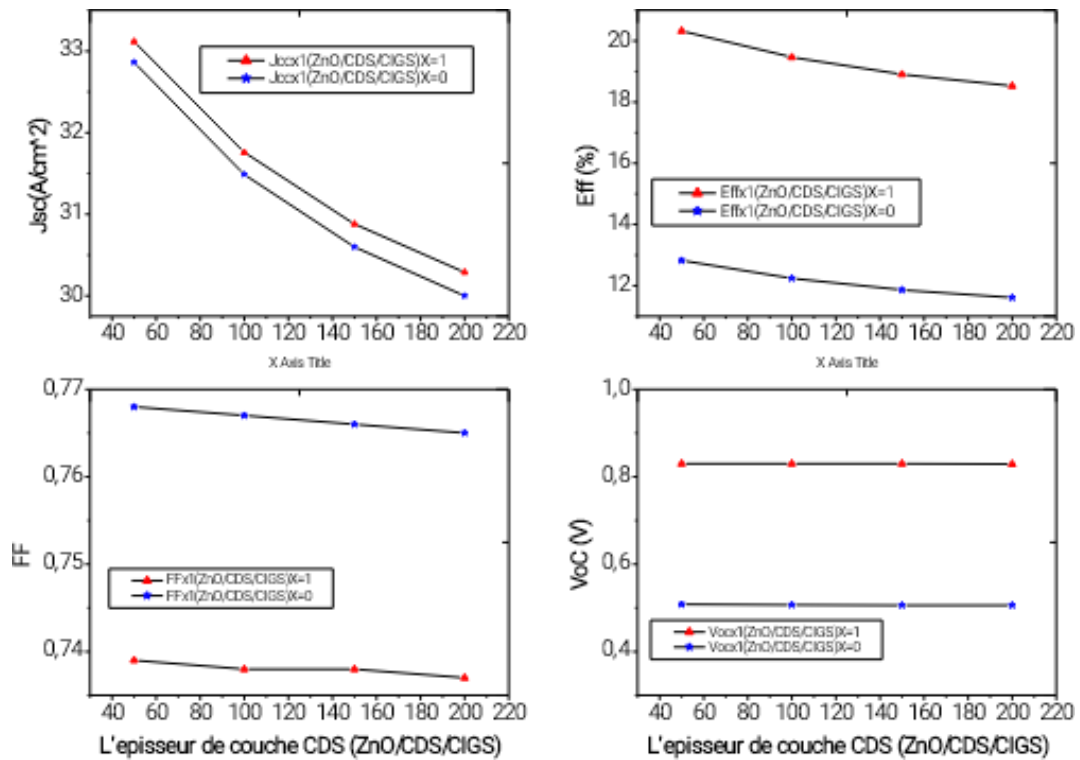


Figure IV.3 : Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.

Dans cette étude sur les performances des Cellules solaires ZnO /CdS/CIGS, nous avons analysé l'impact de l'épaisseur de la couche CdS sur différents paramètres. Pour commencer, le courant de court-circuit (Jsc) diminue à mesure que l'épaisseur de CdS augmente. Les valeurs de Jsc sont de 33,117 mA/cm² pour x=1 et de 32,862 mA/cm² pour x=0, avec une épaisseur de 50 nm. En ce qui concerne le rendement (Eff), nous avons constaté que l'épaisseur de 50 nm donne les meilleurs résultats, avec des valeurs de 12,826% pour x=0 et de 20,329% pour x=1. Cependant, le rendement diminue lorsque l'épaisseur augmente pour les deux cas de x. Le facteur de forme des cellules diminue également avec l'augmentation de l'épaisseur, passant de 0,768 à 0,507 pour x=0 et de 0,739 à 0,737 pour x=1. En revanche, la tension en circuit ouvert (Voc) reste constante, avec des valeurs de 0,511 V pour x=0 et de 0,83 V pour x=1, indépendamment de l'épaisseur de CdS. Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'épaisseur de la couche CdS dans les performances des cellules solaires, avec des variations significatives du Jsc, du rendement et du facteur de forme.

IV.3.3. Effet de l'épaisseur de la couche tampon (ZnO) en fonction de la concentration

L'épaisseur de la couche en ZnO est variée de 30 nm à 70 nm tandis que l'épaisseur de la couche en CIGS est maintenue constante (3.5 μm) et fixée l'épaisseur de la couche de CdS en (50 nm). L'effet de l'épaisseur de la couche en CdS sur la cellule solaire est illustré dans la figure

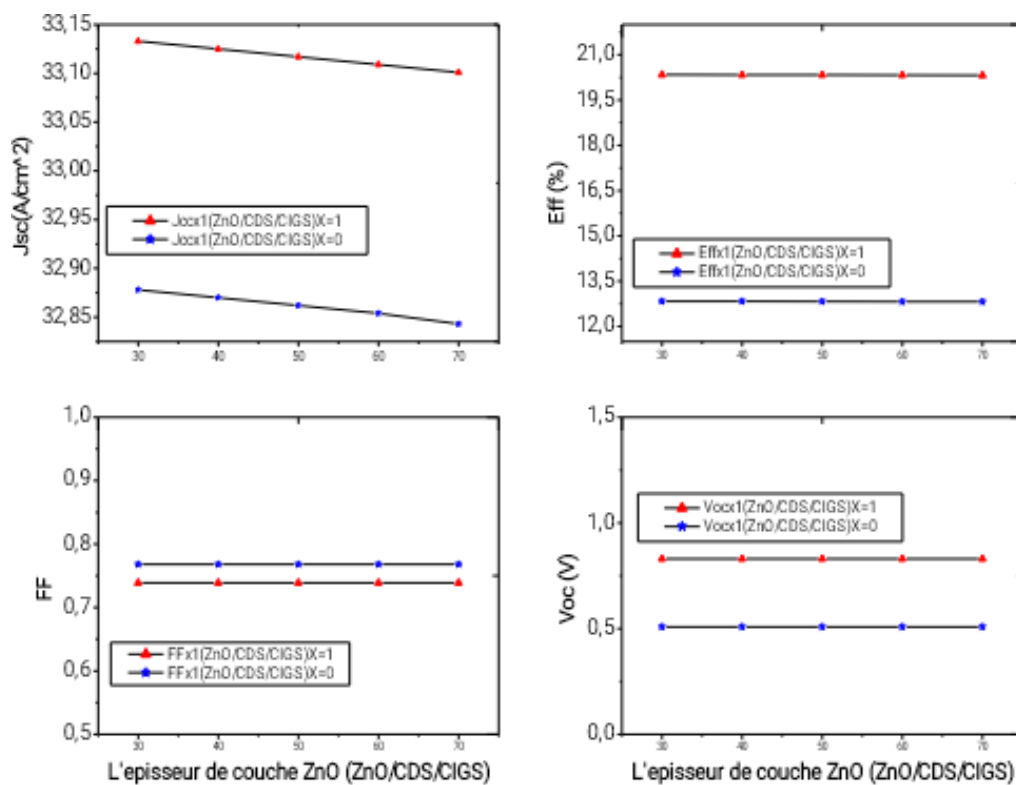


Figure IV.4 : Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

La Figure (IV.4) présente l'effet de l'épaisseur de la couche fenêtre ZnO sur le courant de court-circuit, le rendement, le facteur de forme et la tension de circuit-ouvert. Nous observons une diminution du courant de court-circuit avec l'augmentation de l'épaisseur, et les valeurs maximales sont de 33,133 mA/cm² pour x=1 et de 32,878 mA/cm² pour x=0 avec une épaisseur de 30 nm. En revanche, nous constatons que l'épaisseur n'a pas d'incidence sur la tension de circuit-ouvert et le rendement. Le facteur de forme reste constant quelle que soit l'épaisseur.

IV.4. Résultats et discussion de la cellule (ZnO/ZnSe/CIGS)

IV.4.1. Effet de l'épaisseur de la couche active $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) en fonction de la Concentration

L'épaisseur de la couche en CIGS est variée de 1000 nm à 5000 nm tandis que l'épaisseur de la couche en ZnSe est maintenue constante (100 nm) et fixée l'épaisseur de la couche de ZnO en (50 nm). L'effet de l'épaisseur de la couche en CIGS sur la cellule solaire est illustré dans la figure

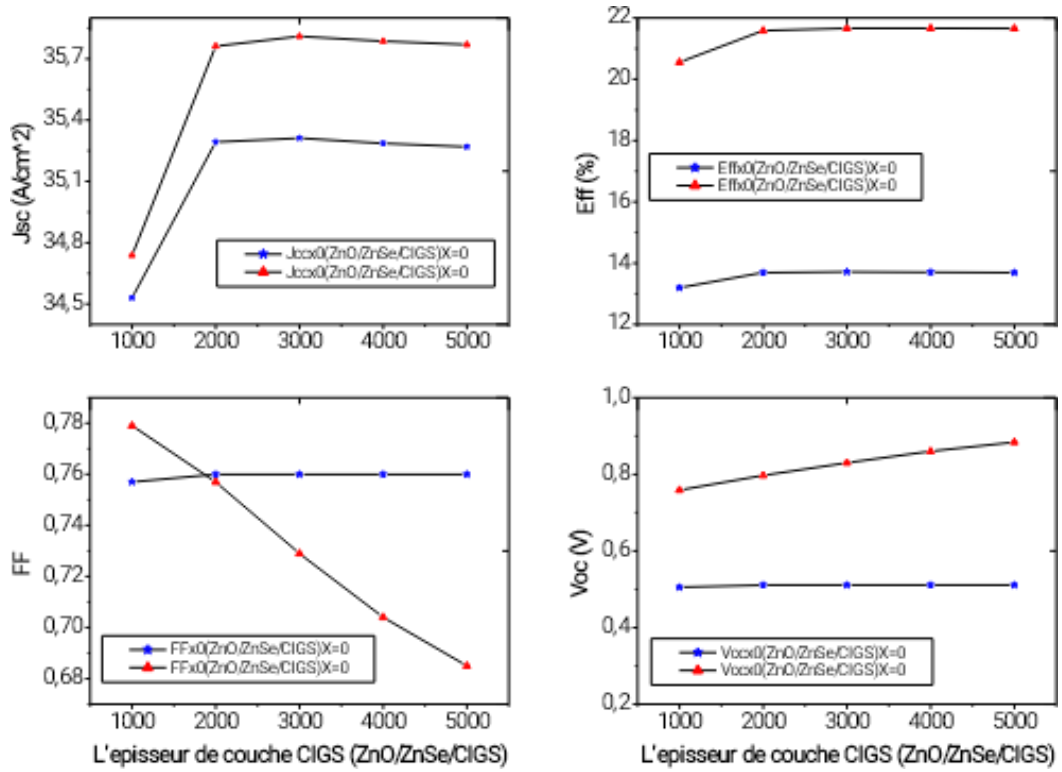


Figure IV.5 : Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS.

La figure présente l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante de CIGS sur les paramètres photovoltaïques des cellules solaires, en tenant compte de deux concentrations de gallium ($x=0$ et $x=1$). L'épaisseur varie de 1000 à 5000 nm.

Le rendement de la cellule, exprimé en pourcentage, présente une augmentation progressive avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante de CIGS jusqu'à atteindre des valeurs maximales de 13,712 % pour $x=0$ et 21,665 % pour $x=1$, observées autour de 3000 nm. Au-delà de cette épaisseur, le rendement se stabilise.

Le courant de court-circuit (J_{sc}), mesuré en mA/cm^2 , présente un pic entre 1000 et 2000 nm pour les deux courbes $x=0$ et $x=1$, puis diminue avec l'augmentation de l'épaisseur.

La tension de circuit-ouvert (V_{oc}), exprimée en volts, reste constante autour de 0,507 V avec l'augmentation de l'épaisseur pour la concentration $x=0$ de gallium. En revanche, pour la concentration $x=1$, la tension de circuit-ouvert augmente de 0,75 V à 0,83 V entre 1000 et 3000 nm, puis se stabilise.

En ce qui concerne le facteur de forme (FF), il représente l'efficacité de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Pour la concentration $x=0$ de gallium, le facteur de forme reste pratiquement constant autour de 0,511 avec l'augmentation de l'épaisseur. En revanche, pour la concentration $x=1$, le facteur de forme atteint une valeur optimale de 0,779 à une épaisseur de 1000 nm, puis diminue avec l'augmentation de l'épaisseur.

IV.4.2. Effet de l'épaisseur de la couche tampon (CdS) en fonction de la concentration.

L'épaisseur de la couche en ZnSe est variée de 50 nm à 200 nm tandis que l'épaisseur de la couche en CIGS est maintenue constante (3 μm) et fixée l'épaisseur de la couche de ZnO en (50nm). L'effet de l'épaisseur de la couche en ZnSe sur la cellule solaire est illustré dans la figure

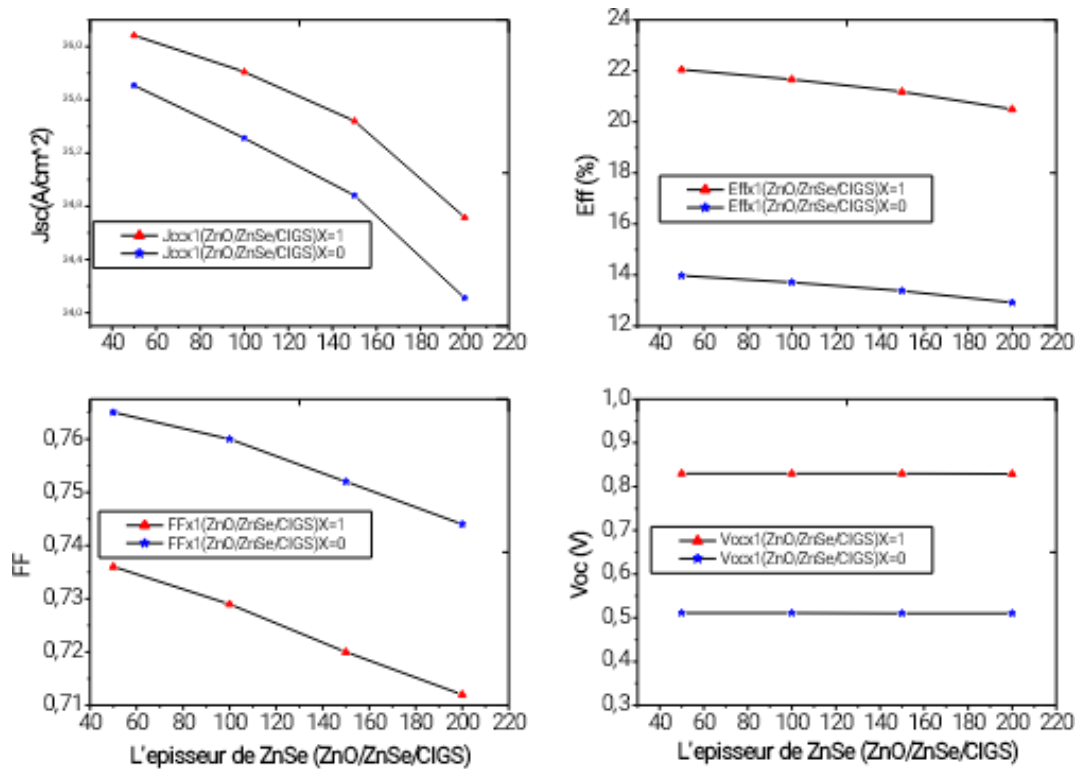


Figure IV.6 : Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche ZnSe.

Remarque : Plus l'épaisseur de la couche absorbante augmente, le courant de court-circuit diminue. Les meilleures valeurs de courant de court-circuit sont obtenues pour une épaisseur de 50 nm, avec 36,084 mA/cm^2 pour $x=1$ et 35,708 mA/cm^2 pour $x=0$.

Eff : En observant les variations du rendement, on constate que l'épaisseur de 50 nm donne les meilleurs rendements, avec 13,974 % pour $x=0$ et 22,051 % pour $x=1$. Ensuite, le rendement diminue avec l'augmentation de l'épaisseur pour les deux cas.

Facteur de forme : Le facteur de forme diminue avec l'augmentation de l'épaisseur. Pour la courbe $x=0$, il passe de 0,765 à 0,744, et pour la courbe $x=1$, il passe de 0,736 à 0,712.

JCC : La tension en circuit ouvert n'est pas affectée par les changements d'épaisseur. On observe que les deux courbes restent constantes : 0,511 V pour $x=0$ et 0,83 V pour $x=1$.

IV.4.3. Effet de l'épaisseur de la couche tampon (ZnO) en fonction de la concentration.

L'épaisseur de la couche en ZnO est variée de 30 nm à 70 nm tandis que l'épaisseur de la couche en CIGS est maintenue constante (3 μm) et fixée l'épaisseur de la couche de (ZnSe) en (50 nm).. L'effet de l'épaisseur de la couche en (ZnO) sur la cellule solaire est illustré dans la figure

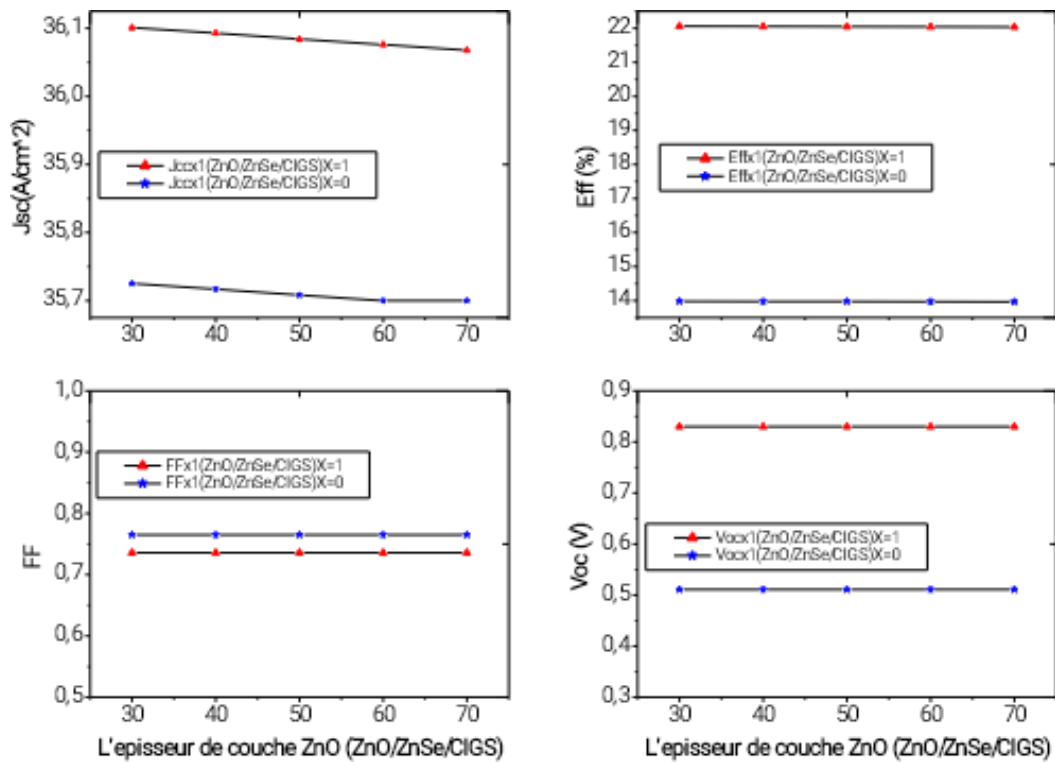


Figure IV.7 : Variation des paramètres photovoltaïques (VCO, JSC, FF et Eff) en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO.

L'analyse des données nous permet de constater une diminution du courant de court-circuit à mesure que l'épaisseur de la couche absorbante augmente. Les valeurs maximales de courant de court-circuit sont de 33,133 mA/cm² pour $x=1$ et 32,878 mA/cm² pour $x=0$, avec une épaisseur de 30 nm. Par ailleurs, l'influence de l'épaisseur sur la tension en circuit ouvert (V_{co}) et le rendement (Eff) a été étudiée pour les deux concentrations ($x=0$ et $x=1$). Il a été observé que l'épaisseur n'a pas d'impact significatif sur V_{co} et Eff . En examinant la figure, nous constatons que le facteur de forme reste constant avec l'augmentation de l'épaisseur, quelle que soit la concentration de gallium ($x=0$ ou $x=1$). Ces résultats mettent en évidence l'importance de trouver un équilibre optimal dans l'épaisseur de la couche absorbante afin de maximiser le courant de court-circuit, tandis que la tension en circuit ouvert et le rendement sont moins sensibles à cette variation d'épaisseur.

IV .5. Rendement quantique.

L'efficacité quantique (EQ) est le rapport entre le nombre de porteurs collectés et le nombre de photons incidents. Il peut être utilisé pour déterminer si l'absorption de photons se produit réellement à une longueur d'onde donnée. La figure (IV.8), présente la réponse spectrale pour les deux cellules.

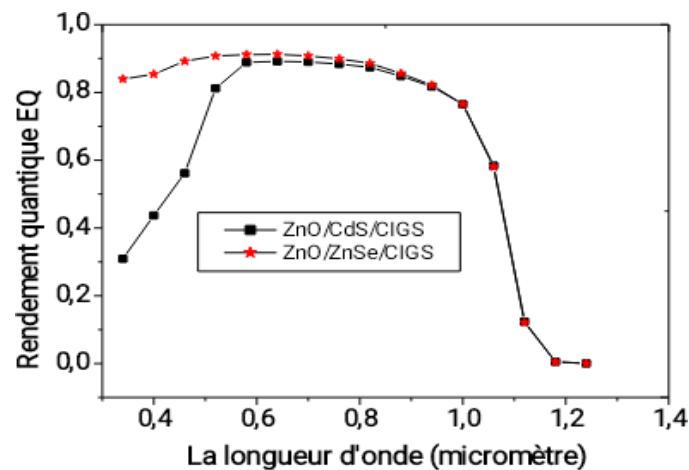


Figure IV. 8 : Rendement quantique pour les deux cellules Simulée en conditions de court- Circuit ($V_{oc}=0$) et d'illumination AM1.5G à l'aide de L'AMPS-1D.

IV .6. Comparaison entre les deux cellules

Le tableau représente la différence entre deux cellules lorsque $x=1$

	Jsc	Eff	FF	Voc
CdS/CIGS (X=1)	33,133	20,339	0,739	0,83
ZnSe/CIGS (X=1)	36,101	22,062	0,736	0,83

IV .7. Conclusion :

La cellule ZnSe/CIGS présente de meilleures performances en raison de plusieurs facteurs optiques et électriques. Sur le plan optique, la couche tampon ZnSe permet une meilleure transmission de la lumière incidente vers la couche absorbante de CIGS en réduisant les pertes de réflexion à l'interface. Cela entraîne une meilleure absorption de la lumière et un courant de court-circuit plus élevé. Sur le plan électrique, le ZnSe offre une interface de meilleure qualité avec la couche absorbante de CIGS, favorisant une séparation efficace des porteurs de charge et réduisant les pertes de courant.

En combinant ces améliorations optiques et électriques, la cellule ZnSe/CIGS affiche de meilleures performances en termes de courant de court-circuit et de rendement par rapport à la cellule CdS/CIGS. La transmission améliorée de la lumière, la réduction des pertes de réflexion et une interface de meilleure qualité contribuent à l'augmentation du courant de court-circuit. De plus, la largeur de bande interdite plus élevée du ZnSe lui permet d'absorber efficacement les photons à haute énergie du spectre solaire, améliorant ainsi la conversion de l'énergie solaire en électricité.

L'incorporation de gallium dans la composition de la couche CIGS est également importante. Le gallium optimise les propriétés électroniques du matériau, favorisant la séparation des charges photo-générées et une meilleure collecte des électrons et des trous. Cela se traduit par un courant de sortie plus élevé. De plus, le gallium améliore la stabilité et la durabilité des cellules solaires CIGS.

En résumé, la cellule ZnSe/CIGS présente des avantages optiques tels qu'une meilleure transmission de la lumière et une réduction des pertes de réflexion, ainsi que des avantages électriques tels qu'une interface de meilleure qualité et une séparation efficace des porteurs de charge. Ces améliorations conduisent à une augmentation du courant de court-circuit et du rendement global de la cellule. De plus, la largeur de bande interdite plus élevée du ZnSe et l'incorporation de gallium contribuent également aux performances améliorées de la cellule solaire.

Références

- [1] S. Fonash, J. Arch., J. Hou, W. Howland, P. Mcelheny, A. Moquin, M. Rogosky, T. Tran, H. Zhu, F. Rubinelli, "A Manual for AMPS-1D for Windows 95/NT a One-Dimensional Device Simulation Program for the Analysis of Microelectronic and Photonic Structures", The Pennsylvania State University, (1997).
- [2] H. Heriche, Z. Rouabah, N. Bouarissa, "High-efficiency CIGS solar cells with Optimization of layers thickness and doping ", Optics 127 , 11751,(2016).
- [3] H. Heriche, Z. Rouabah, N. Bouarissa, " New ultra -thin CIGS structure solar cells using SCAPS simulation program ", Intern. J. Hydr. Ener. 42 ,9524, (2017).
- [4] A. Gueddim, N. Bouarissa, A. Naas, F. Daoudi, N. Messikine, « Characteristics and Optimization of ZnO/CdS/CZTS photovoltaic solar cell»,Appl. Phys. A124 ,199, (2018).
- [6] Hamdan A. S. Al-shamiri¹, Mohamed O. Sid-Ahmed, Faisal Abdu Hezam <Simulation of Performance of Cadmium Telluride Solar Cell Using AMPS-1D Program> urnal of Photonic Materials and Technology; 2(2): 14-19, (2016).
- [7] These Phd Band Gap Profiling and uppsal speed deposition of Cu(In,Ga)Se for thin film solar cells by olle Lindberg University of uppsala (2003)
- [8] These "Impact of secondary barriers on CuIn_{1-x}GaxSe₂ solar-cell operation" Submitted by Alexei O. Pudov Department of Physics In partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy Colorado State University Fort Collins, Colorado Spring, (2005).

Conclusion générale

L'étude comparative entre les cellules solaires ZnSe/CIGS et CdS/CIGS a démontré que la cellule ZnSe/CIGS présente de meilleures performances en termes de courant de court-circuit et de rendement. Les améliorations optiques, telles que la transmission améliorée de la lumière et la réduction des pertes de réflexion grâce à la couche tampon ZnSe, ainsi que les avantages électriques, tels qu'une interface de meilleure qualité et une séparation efficace des porteurs de charge, ont joué un rôle clé dans ces résultats.

De plus, la largeur de bande interdite plus élevée du ZnSe a permis une absorption plus efficace des photons à haute énergie du spectre solaire, augmentant ainsi la conversion de l'énergie solaire en électricité. L'incorporation de gallium dans la couche CIGS a également contribué à améliorer les performances en favorisant la séparation et la collecte des charges photo-générées.

Ces résultats soulignent l'importance des choix de matériaux et de la conception de l'interface dans le développement de cellules solaires performantes. La cellule ZnSe/CIGS offre des perspectives prometteuses pour l'amélioration de l'efficacité et de la stabilité des dispositifs photovoltaïques. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser davantage les paramètres de fabrication et comprendre les mécanismes sous-jacents afin de réaliser pleinement le potentiel de cette technologie.

L'étude a également mis en évidence l'importance de l'épaisseur des différentes couches de matériaux dans la conception des cellules solaires en couche mince. L'optimisation de l'épaisseur de l'absorbeur CIGS, de la couche tampon de CdS et ZnSe, ainsi que de la fenêtre optique de ZnO a montré des améliorations significatives du rendement de la cellule.

En résumé, en remplaçant le CdS par le ZnSe et en incorporant du gallium dans la couche CIGS, il est possible d'améliorer les performances des cellules solaires en réduisant les pertes de recombinaison, en favorisant la séparation des porteurs de charges et en augmentant l'absorption de la lumière. L'optimisation de l'épaisseur des différentes couches et des concentrations de gallium joue un rôle essentiel dans l'optimisation des performances photovoltaïques. Cette étude fournit des informations précieuses pour la conception et le développement de cellules solaires plus efficaces et plus performantes.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un ensemble d'informations générales sur le domaine de la conversion photovoltaïque ainsi que le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs principales caractéristiques et les limites du modèle théorique. Et nous avons finis par les différentes filières photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les propriétés cristallographiques, physiques et optiques des matériaux semi-conducteurs utilisés dans notre simulation.

Le troisième chapitre a été consacré spécifiquement pour le code numérique AMPS-1D utilisé dans notre simulation. Ce code est adapté à la simulation de cellules solaires et conçu sur les équations de base décrivant les changements du potentiel et de la densité de courant des deux porteurs.

Enfin, dans le quatrième chapitre nous avons étudié par simulation, les propriétés électriques et optiques de deux types de cellules sous l'éclairement AM1.5G en utilisant le logiciel l'AMPS-1D unidimensionnelle

Résumé

Le principal objectif de ce travail était d'étudier les performances de deux types de cellules photovoltaïques à couches minces : ZnO/CdS/CIGS et ZnO/ZnSe/CIGS. Les performances de ces cellules ont été évaluées en utilisant le logiciel AMPS-1D, en variant l'épaisseur de chaque couche. Les résultats ont été comparés en termes de courant de court-circuit, tension en circuit ouvert, facteur de forme et rendement. L'absorption de la lumière et les meilleurs matériaux pour obtenir un rendement optimal ont également été étudiés. Cette étude contribue à l'avancement de la technologie photovoltaïque en identifiant les meilleures configurations et matériaux pour améliorer les performances des cellules solaires à couches minces.

المخلص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة أداء نوعين من الخلايا الكهروضوئية ذات الأغشية الرقيقة: ZnO/CdS/CIGS و ZnO/ZnSe/CIGS. تم تقييم أداء هذه الخلايا باستخدام برنامج AMPS-1D، من خلال تغيير سمك كل طبقة. وتمت مقارنة النتائج من حيث تيار الدائرة القصيرة، جهد الدائرة المفتوحة، عامل الشكل والكفاءة. كما تمت دراسة امتصاص الضوء وأفضل المواد لتحقيق الأداء الأمثل. تساهم هذه الدراسة في تقدم التكنولوجيا الكهروضوئية من خلال تحديد أفضل التكوينات والمواد لتحسين أداء الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة.