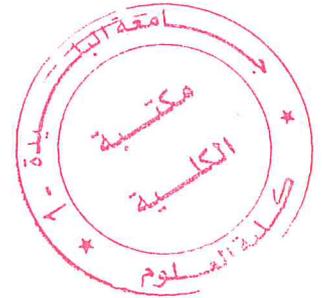


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة ساد دحلب البليدة 1
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1



كلية العلوم-دائرة الفيزياء
Faculté des Sciences
Département de Physique



MEMOIRE
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN PHYSIQUE
Option : Matières Rayonnements

THÈME

Étude des performances de la cellule solaire en couche mince à base de CIGS

Par :

OUADAH Sihem

Devant le jury composé de:

M .A. BENAMAR	Professeur	Université de Blida 1	Président
A. BEDIA	MCB	Université de Blida 1	Encadreur
F .Z. BEDIA	MCB	Université de Blida 1	Examineur
N.BENZEKKOUR	MCB	Université de Blida 1	Examineur

Blida. Septembre 2017

Remerciements

« Tout d'abord, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné l'occasion de poursuivre mes études à l'université de Blida 1 »

Ce travail a été mené au sein du laboratoire « FUNDAPL » du département de physique, faculté des sciences, Université de Blida 1.

*J'exprime mes sincères remerciements et ma grande gratitude à Dr **BEDIA ASMA**, Maître de conférences classe B de l'Université de Blida 1, pour avoir accepté d'être la promotrice de mon mémoire, ainsi que pour son encouragement et la grande confiance qu'elle m'a accordé. Je voudrais le remercier de m'avoir épaulé et d'avoir amélioré mes connaissances scientifiques.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur le professeur **BENAMAR Mohamed El Amine**, Professeur et directeur de laboratoire à l'Université de Blida 1, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de mémoire.*

*Je remercie chaleureusement **F.Z. BEDIA** et **N.BENZEKKOUR** d'avoir accepté de participer au jury et pour l'intérêt qu'elles ont manifesté pour ce mémoire.*

*J'exprime également ma gratitude pour Mr **BOUTAÏRAOUI BELKACEM** et Dr **BABA AHMED**.*

Un grand merci à tous les autres membres du laboratoire « FUNDAPL ».

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A toute ma famille :

Mes parents

Mes sœurs

*Mes Frères , leurs
femmes et leurs enfants .*

*Finalement, je dédie ce travail à
tous mes camarades du group, à
tous mes chers amis pour les
moments inoubliables qui on a
passé ensemble.*

SHEM

Table des matières

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Résumé	vi
Introduction générale	1

Chapitre 1 :

Cellules solaires en couche mince à base de CIGS

I.1. Introduction.....	3
I.2. L'effet photovoltaïque	3
I.2.1 Rayonnement solaire.....	3
I.2.2 Principe d'une cellule photovoltaïque.....	5
I.2.3 Le mécanisme de la recombinaison des porteurs.....	7
I.2.3.1 La recombinaison radiative	7
I.2.3.2 La recombinaison Auger	8
I.2.3.3 Recombination Shockley Read Hall (SRH)	8
I.2.4 Caractéristiques électriques et optiques d'une cellule solaire.....	10
I.2.5 Paramètres par défaut	11
I.2.5.1 Résistance en série.....	11
I.2.5.2 Résistance en parallèle	11

I .3. Différentes technologies de la cellule solaire en couche mince	12
I.4. Cellule solaire en couche mince à base de CIGS	12
I.4.1 Histoire de la cellule solaire CIGS.....	12
I.4.2 Les avantages de CIGS.....	13
I.4.2 Fabrication d'une cellule à base de CIGS.....	14
I.4.3.1 Le substrat	15
I.4.3.2 Contact arrière	15
I.4.3.3 Couche absorbante	15
I.4.3.4 Couche tampon.....	15
I.4.3.5 Couche d'oxyde transparent conducteur (OTC)	16
I.5 Conclusion	17

Chapitre II :

Présentation du logiciel et de la structure de la cellule solaire CIGS

II.1. Introduction	19
II.2. Équations fondamentales dans les semi-conducteurs.....	19
II. 2. 1 Équation de Poisson.....	20
II.2. 2 Équations de continuité	20
II.2. 3. Équations de transport	21
a). Diffusion.....	22
b). Conduction	22
II.3. Simulation des cellules solaires.....	23
II. 3.1 Simulation.....	23
II.3. 2 Logiciel de simulation	23
II.4. Utilisation du logiciel SCAPS	25
II.4.1 Menu principal (Action panel)	25

II.4. 2 Choix de la cellule	26
II.4.3 Les propriétés des couches	26
II.4.4 Résultat de la simulation (Caractéristique J(V))	27
II. 5. Présentation de la structure de la cellule solaire.....	28
II. 5. 1 les paramètres de la cellule solaire	28
II.5.1.1 Les défauts	29
II.5.1.2 Les recombinaisons.....	29
II.5.1.3 Diagramme de bande	30
II.5.1.4 Spectre solaire	31
II.6. Conclusion.....	32

Chapitre III:

Résultats et Discussions

III.1.Introduction	34
III.2. Caractéristique électrique de la cellule solaire.....	34
III.3. Effet de la couche CIGS sur les performances de la cellule solaire.....	35
III.3.1. Effet de l'épaisseur de la couche en CIGS	35
III.3.2. Effet du dopage de la couche en CIGS.....	37
III.4. Effet de la couche CdS sur les performances de la cellule solaire.....	38
III.4.1. Effet de l'épaisseur de la couche tampon CdS	38
III.4.2. Effet du dopage de la couche en CdS.....	40
III.5. Effet de la température	42
III.6.CONCLUSION	43
<i>Conclusion Générale</i>	47

Liste des figures

Figure I-1. Radiation spectral pour différent air masses.....4

Figure I-2. Spectre solaire..5

Figure I-3. Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.....6

Figure I-4 . Recombinaison radiative d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence.....7

Figure I-5. Exemple de recombinaison Auger.....8

Figure I-6. Transitions élémentaires de génération-recombinaison Schokley-Read-Hall.....9

Figure I-7. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....10

Figure I-8. Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de CuInSe₂.....14

Figure II-1. Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.....25

Figure II-2 : Définition de la structure d'une cellule solaire.....26

Figure II-3. Paramètres d'une couche (absorbeur CIGS) d'une cellule.....27

Figure II-4. Panneau d'affichage des courbes J-V à l'obscurité et en éclaircissement.....27

Figure II-5. Schéma simplifié d'une cellule solaire en couches minces en CIGS.....28

Figure II-6. diagramme des bandes d'énergie du la cellule CIGS/ CdS/ZnO.....30

Figure II-7. Spectre solaire terrestre AM 1.5G.....31

Figure III-1. Caractéristique J(V) de la cellule solaire en CIGS illumination et L'obscurité.....34

Figure III-2. Influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS (X_{CIGS}) sur les caractéristique J-V.....36

Figure III-3. Influence de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS (X_{CIGS}) sur les paramètres photovoltaïque : (a) V_{co} , (b) J_{cc} , (c) FF et (d) η36

Figure III-4. Influence du dopage $N_A/CIGS$ sur la caractéristique J-V.....37

Figure III-5. Influence du dopage $N_A/CIGS$ sur les paramètres électriques: V_{co} , J_{cc} , FF et η	37
Figure III-6. Influence du l'épaisseur de la couche tampon CdS (X_{CdS}) sur les caractéristique J-V	39
Figure III-7. L'influence de l'épaisseur de la couche tampon X_{CdS} sur les paramètres électriques : V_{co} , J_{cc} , FF et η	39
Figure III-8. Influence du dopage de la couche tampon N_D/CdS sur la caractéristique J-V...40	
Figure III-9. (a)La Variation de la tension en circuit ouvert en fonction du dopage de la couche CdS ,(b)Variation du la court circuit en fonction du dopage de la couche CdS, (c) Variation du facteur de forme en fonction du dopage de la couche CdS ,(d) Variation du rendement en fonction du dopage de la couche CdS.....	41
Figure III-10. Influence de la température sur la caractéristique J(V).....	42
Figure III-11. La Variation du le facteur de forme et le rendement en fonction de la température.....	42

Liste des tableaux

Tableau I.1.Les caractéristique structurales optiques et le rendement de chaque couche mince13

Tableau II.1.Paramètres des matériaux en ZnO, CdS et CIGS utilisés dans la simulation de la cellule solaire.29

Tableau II.2.Paramètres de la densité de défauts des matériaux en ZnO, CdS et CIGS.29

Tableau II.3.Paramètres de Recombinaison CIGS.30

Tableau III.1.la Comparaison entre les résultats de simulations.....35

Liste des symboles

E : Champ électrique.

E_g : L'énergie de bande interdite

n : Concentration des électrons et des trous respectivement

n_0, p_0 : Concentration des électrons et des trous à l'équilibre respectivement

j_n, j_p : Densité de courant des électrons et des trous respectivement

j_s : Densité de courant de saturation inverse

I_{ph} : Le photo-courant

J_{ph} : Densité de courant de photo génération : Densité de courant de sortie de la cellule

J_c : La densité de courant de court-circuit

R : le taux des porteurs

h : Constante de Planck (6.62×10^{-34} J.s)

ν : La fréquence du rayonnement incident

c : La vitesse de la lumière dans le vide (3×10^8 m/s)

K : Constante de Boltzmann

E_c : Énergie du bas de la bande de conduction

E_v : Énergie du haut de la bande de valence

$\Delta n(p)$: La densité d'électrons (de trous) en excès.

N_A, N_D : Concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs respectivement

μ_n, μ_p : Mobilité des électrons et des trous respectivement

D_n, D_p : Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement.

T : Température de la cellule

Q : Facteur de qualité

n_i : Concentration intrinsèque

S_n, S_p : Vitesse de recombinaison des électrons et des trous à la surface respectivement

ϵ, ϵ_0 : Permittivité du vide, permittivité relative et permittivité totale respectivement

G_n et G_p : les taux de génération pour les électrons et les trous par des agents externes

R_n et R_p : respectivement les taux de recombinaisons (internes) pour les électrons et les trous

J_n et J_p : sont les densités des courants des électrons et des trous.

τ : Durée de vie des porteurs libres

R_s : Résistance série

R_{sh} : Résistance parallèle

q : Charge de l'électron

KT : énergie thermique à la température ambiante.

L : est la longueur de diffusion.

D_n, D_p : les coefficients d'Einstein

V_d : Potentiel de diffusion

V : Tension de sortie de la cellule.

Ψ : Le potentiel électrique

P_i : La puissance incidente fournie par l'éclairement

ZnO : Oxyde de Zinc

CdS : Sulfure de Cadmium

CIGS : Di-sélénium de galium d'indium de cuivre (Cu (In, Ga) Se₂)

AM 1.5 : Spectre de la lumière solaire

Mo : Molybdénium

Al : Aluminium

AM : La masse d'air

V_{CO} : Tension de circuit ouvert

F : Facteur de forme

SR: Réponse spectrale λ

η : Rendement de conversion

P : Puissance maximale

X_{CIGS} : Épaisseur de la couche CIGS

X_{CdS} : Épaisseur de la couche CdS

Résumé :

Dans ce travail de simulation, nous utilisons le logiciel SCAPS, pour étudier les performances des cellules solaires à base de Cu (In, Ga) Se (CIGS). Nous évaluons dans un premier temps, le courant de court circuit J_{SC} , la tension en circuit ouvert V_{CO} , le facteur de forme FF et le rendement électrique η pour une structure typique de ZnO/CdS/CIGS. Par la suite nous nous intéressons au l'effet de la température et à l'épaisseur de la couche (CIGS) et le dopage, ainsi que l'épaisseur de CdS et le dopage pour étudier l'influence de celles-ci sur les paramètres de sortie, surtout le rendement électrique et le facteur de forme de la structure.

Mots Clés : Cellule solaire, photovoltaïque, couches minces, CIGS, simulation, SCAPS.

Abstract:

In this work of modeling and simulation, we use the software SCAPS, to study the performances of the solar cells based on Cu (In, Ga) Se (CIGS). We evaluate initially, the current of short-circuit J_{SC} , the tension in open circuit V_{CO} , the factor of form FF and the electrical efficiency η for a typical structure of ZnO/CdS/CIGS. Thereafter we are interested in the effect of temperature and thickness of the layer (CIGS) and doping, and thickness of the CdS and doping to investigate the influence of these on the output parameters, especially the electrical efficiency of the structure.

Keys Words: Solar cells, photovoltaic, thin films, Cu (In, Ga) Se, simulation SCAPS.

ملخص:

في هذه النمذجة والمحاكاة, نستخدم برنامج SCAPS, لدراسة أداء الخلايا الشمسية القائمة على CIGS نقيم في البداية , تيار الدارة القصيرة (I_{CC}) و جهد الدارة المفتوحة (V_{CO}), معامل الشكل (FF) . و المردود الكهربائي η للبنية النموذجية ZnO/CdS/CIGS, نهتم بعد ذلك بدراسة تأثير درجة الحرارة و سمك وفجوة طبقة CIGS وسمك وفجوة طبقة CdS لدراسة تأثيرها على خصائص الخلية الضوئية خاصة المردود الكهربائي .

كلمات مفتاحية: الخلايا الشمسية ، الكهروضوئية ، الأفلام الرقيقة، Cu (In, Ga) Se, المحاكاة SCAPS.

Introduction générale

Introduction générale :

La production d'électricité solaire photovoltaïque augmente exponentielle depuis les dernières décennies. Cette croissance est due à la diminution du prix du kWh (kilowatt-heure) qui passe par Une augmentation du rendement de conversion et une réduction des coûts de fabrication.

Pour cela, les technologies basées sur le dépôt de couches minces représentent un Challenge technologique dans lequel de nombreux chercheurs investissent massivement Dans la maitrise de cette technologie.

La technologie en couches minces, qui utilise des couches absorbantes poly cristallines ou amorphes, concerne actuellement le a-Si hydrogéné, le GaAs, le CdTe, CuInSe₂ et sa variante Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS). Ces matériaux sont considérés comme les meilleurs choix pour la production des cellules solaires à couches minces en raison de leurs bonnes propriétés optiques et de leurs bandes interdites souhaitables à l'absorption du spectre solaire [1,2]. Les cellules solaires en couches minces à base de Cu(In,Ga) Se₂ (CIGS) ont atteint étonnamment un rendement de conversion élevé qui s'approche de 20.8 % [3] au laboratoire pour un ensoleillement nombre de masse AM1.5 et de 25 % par simulation [4] .

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude des différents paramètres influant sur les performances de la cellule solaire photovoltaïque en couche mince à base deCu(In,Ga) Se₂ (CIGS) à l'aide du logiciel SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator).

Ce mémoire est organisé comme suit :

- ✓ Le premier chapitre : on fait rappel aux notions générales sur les cellules solaires photovoltaïques et basé sur la cellule en couche mince CIGS.
- ✓ Le deuxième chapitre, nous présenterons les équations du modèle d'une cellule solaire photovoltaïque et le l'outil de simulation SCAPS.
- ✓ Dans le troisième chapitre nous présentons et discutons les résultats obtenus.

Références bibliographiques de l'introduction générale

- [1] J.B. Shi, Y. C. Chen, C. J. Chen and P. Wu, « Optical properties and synthesis of CuInSe₂ thin films by selenization of Cu/In layers », Cryst. Res. Technol., Vol. 47, 2012, pp. 183.
- [2] S. C. Haudhuri, S. K. Das and A. K. Pal, « Optical transitions in CdTe thin films produced by hot-wall vacuum evaporation », Thin Solid Films, vol. 147, 1987, pp. 9.
- [3] P. Jackson, D. Hariskos, R. Wuerz, W. Wischmann and M. Powalla, « Compositional investigation of potassium doped Cu (In,Ga) Se₂ solar cells with efficiencies up to 20.8% », Phys. Status Solidi RRL, Vol. 8, 2014, pp. 219.
- [4] H. Ullah, B. Marí and H. N. Cui, « Investigation on the Effect of Gallium on the Efficiency of CIGS Solar Cells through Dedicated Software », Applied Mechanics and Materials, Vol. 448, 2014, pp. 1497.

Chapitre I :

**Cellules solaires en
couche mince à base de CIGS**

I.1. Introduction

Dans ce chapitre on fait appel à quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie photovoltaïque. Nous décrirons ensuite les caractéristiques photovoltaïques et les différentes technologies de la cellule solaire en couche mince et nous présentons quelques notions sur les cellules solaires à base de CIGS.

I.2. L'effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques (PV) sont des composants optoélectroniques capables de convertir directement la lumière en électricité, en utilisant l'interaction de la lumière avec certains matériaux semi-conducteurs. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et celles des semi-conducteurs. Il a été découvert en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel qui mirent en évidence l'effet électrique produit sous l'influence de la lumière. Il a observé l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution hautement conductrice, lorsque celle-ci était exposée à la lumière naturelle [1]. Cette découverte représente l'origine des piles solaires mais elle reste longtemps en suspens jusqu'à 1954, année de fabrication de la première cellule solaire au silicium Chapin et al [2]. Le rendement énergétique de cette cellule était de 6 %. Dès lors, de nombreux progrès ont été réalisés dans ce domaine, notamment motivés par la conquête de l'espace. Au cours des années 1980, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales. Le recours à l'énergie photovoltaïque est devenu alors une évidence et des efforts considérables pour le développement de cette énergie ont été consentis depuis quelques années.

I.2.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement reçu par la terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m² avant d'aborder la couche atmosphérique [3].

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

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

Où est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par définition, AM1 correspond aux conditions hors atmosphère.

Quand le soleil fait un angle de 48° par rapport au zénith, la lumière incidente est dite AM1.5. Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement Solaire (83.3 mW/cm² pour AM1.5) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques.

Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffusée (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global.

La Figure (I.1) montre le spectre d'émission solaire sous AM 1.5G global normalisé à 100 mW/cm² [3].

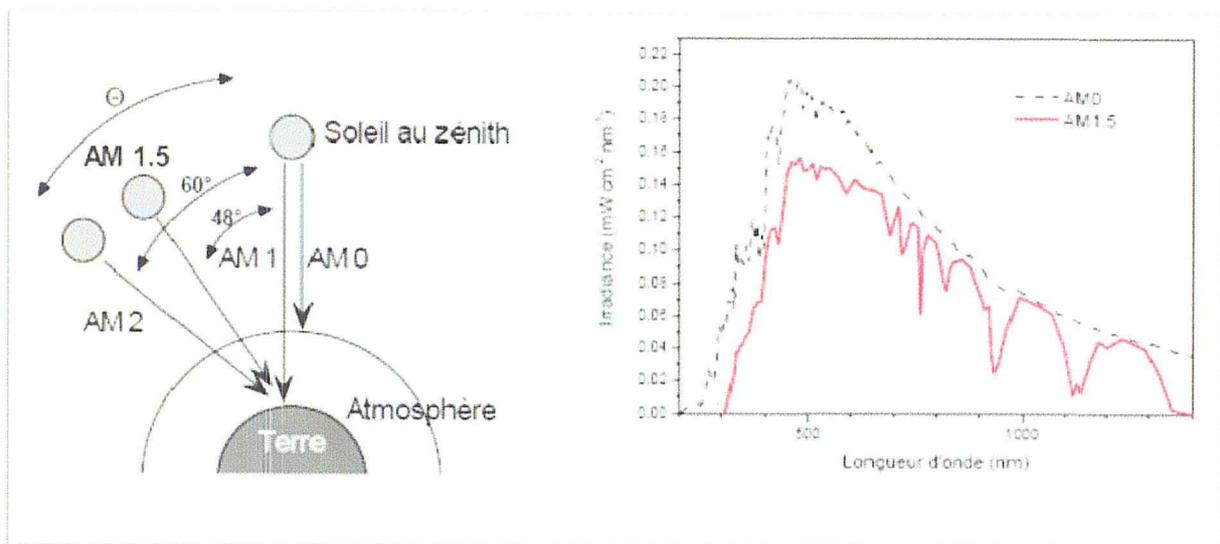


Figure I-1. Radiation spectral pour différent air masses

• **Spectre solaire**

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

$$E=h\nu=\frac{hc}{\lambda} \quad (I.2)$$

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites [3]. Sa distribution en énergie est répartie comme il est indiqué sur la Figure. I-2 :

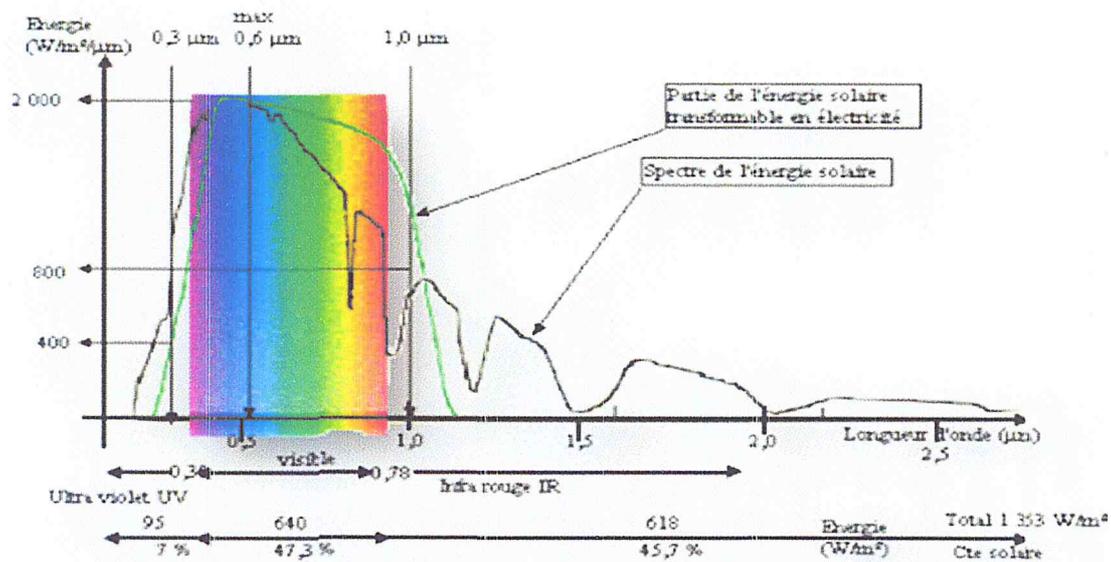


Figure I-2. Spectre solaire Chapitre

I.2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont le matériau est supérieur au gap) par l'énergie constituant le dispositif ;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la Figure I-3:

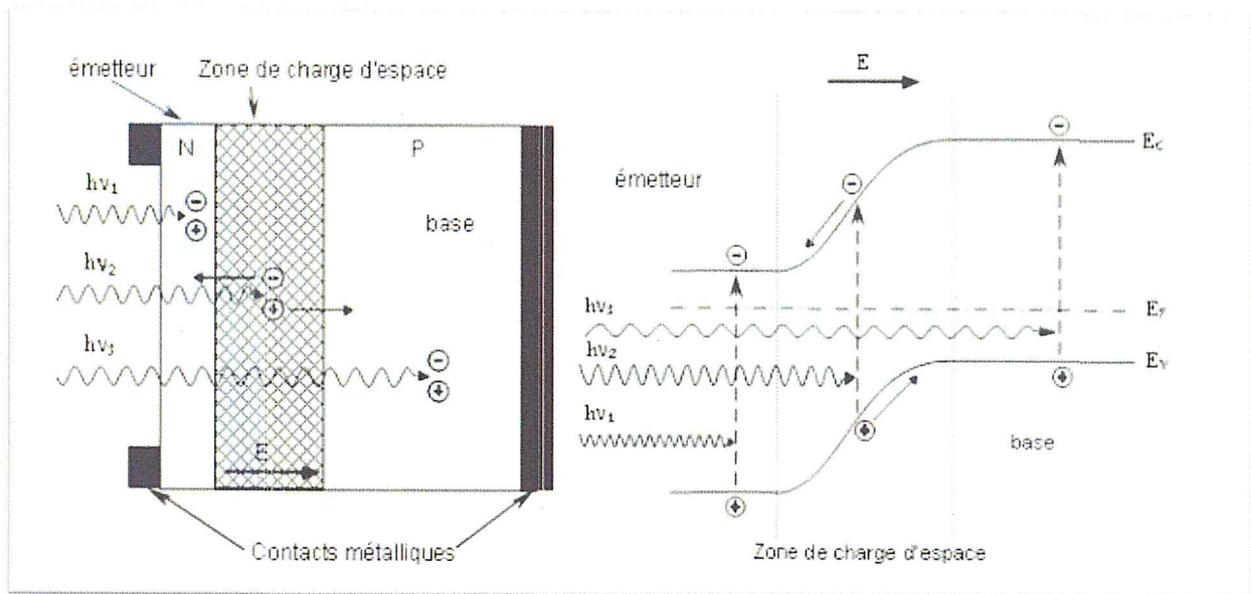


Figure I-3. Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées [4].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photos porteuses auront un comportement différent suivant la région :

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion
- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura une photo courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner une photo courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse[4].

I.2.3. Le mécanisme de la recombinaison des porteurs

Les principaux mécanismes de recombinaison des porteurs de charge libres dans les semi-conducteurs sont : la recombinaison SRH (Shockley-Read-Hall), radiatives, Auger et la recombinaison surface (cas particulier de SRH).

À chaque mécanisme de recombinaison des porteurs de taux R est associée une durée de viét par la relation :

$$R = \frac{\Delta n(p)}{\tau_{n(p)}} \quad (\text{I. 3})$$

$\Delta n(p)$: La densité d'électrons (de trous) en excès. Dans notre cas, ils correspondent aux porteurs photo générés.

I.2.3.1. La recombinaison radiative :

Le porteur en excès repasse directement de la bande de conduction à la bande de valence, en évacuant son énergie par émission d'un photon (figure. I.4).

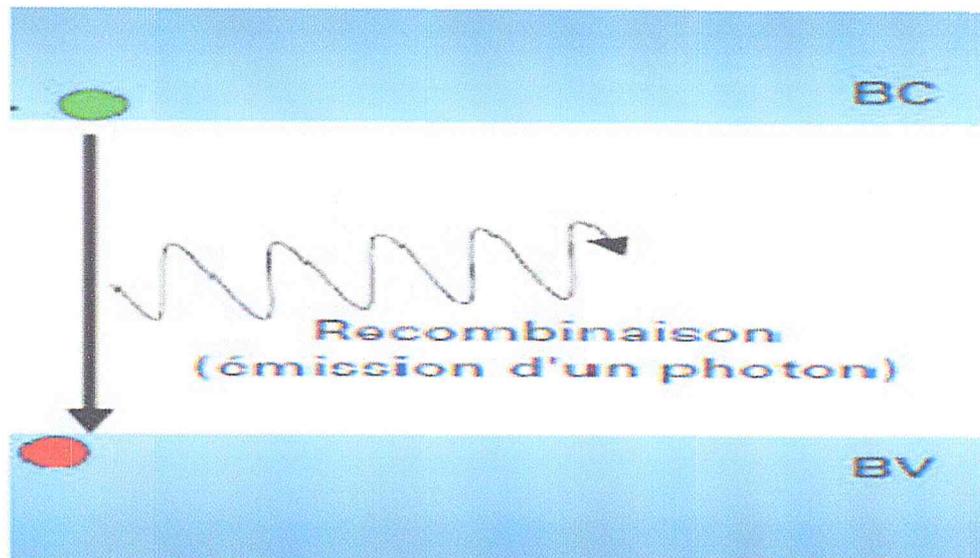


Figure I-4. Recombinaison radiative d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence[5].

Ce processus est important pour les matériaux à bande interdite directe et faible pour les matériaux à gaps indirects. Le taux de recombinaison net est défini par :

$$U = B_0 (np - n_i^2) \quad (I. 4)$$

Où B_0 (cm^3 / s) est le coefficient de recombinaison radiative, n_i (cm^3 / s) est la concentration intrinsèque et n et p (cm^3) sont la concentration des électrons et des trous à l'équilibre.

I.2.3.2. La recombinaison Auger :

Pour de très fortes concentrations de porteurs, un autre mécanisme de recombinaison prend le pas sur le processus Shockley-Read-Hall. Schématiquement, il s'agit d'une recombinaison directe électron-trou, l'énergie de la transition étant transférée sous forme cinétique à un autre porteur, électron ou trou (voir figure I-5).

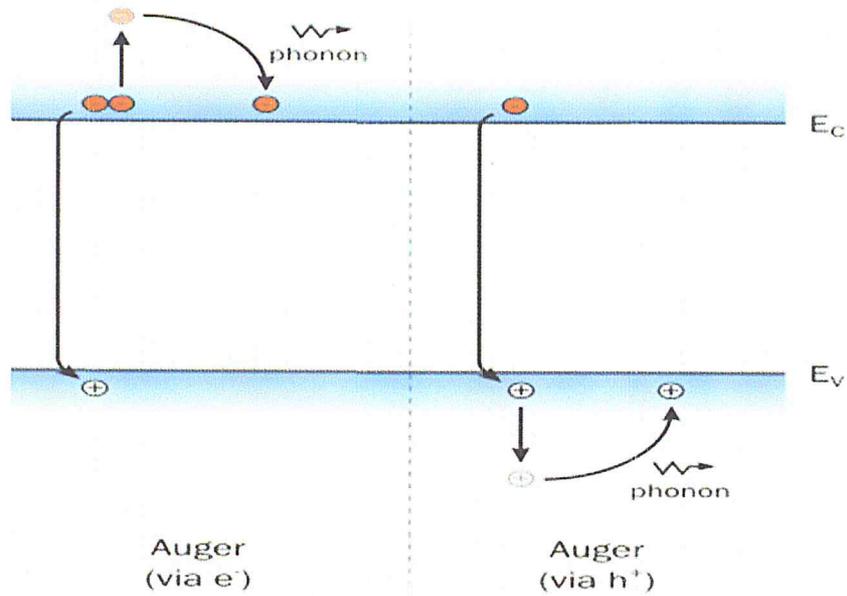


Figure I-5. Exemple de recombinaison Auger [5].

L'expression correspondante du taux net de recombinaison s'écrit [5] :

$$U = (C_n n + C_p p) (np - n_i^2) \quad (I. 5)$$

Avec :

C_n et C_p les coefficients Auger pour les électrons et les trous.

I.2.3.3. La recombinaison Shockley Read Hall (SRH):

Dans un cristal réel, de nombreux types de défauts et d'impuretés (autres que les dopants), dont la présence, souvent non maîtrisée, peut aussi être voulue par la technologie des composants, constituent des centres actifs de génération et de recombinaison indirecte. Le rôle de ces centres est illustré par la figure I-6.

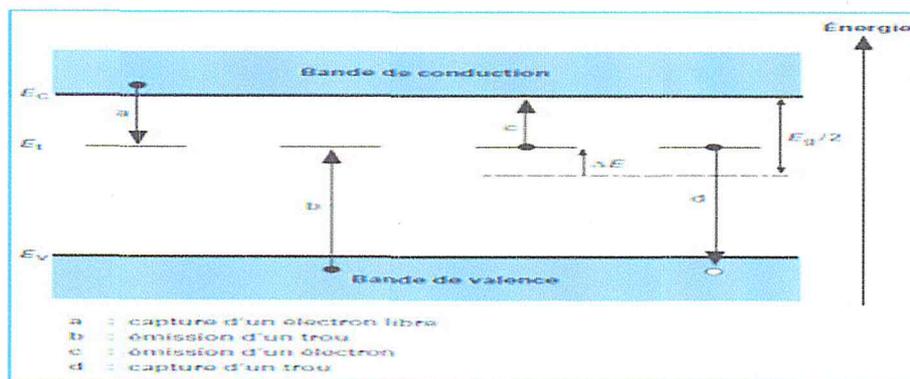


Figure I-6. Transitions élémentaires de génération-recombinaison Schokley-Read-Hall.

Des niveaux d'énergie possibles sont offerts aux électrons dans la bande dite interdite et, par leur intermédiaire, la génération et la recombinaison des porteurs peuvent s'effectuer en plusieurs temps.

Dans le cas le plus simple :

• La génération d'une paire électron-trou est le résultat de la capture d'un électron de valence par le centre (émission d'un trou), précédée ou suivie par l'émission d'un électron libre (figure I-6, b + c) ;

• La recombinaison correspond aux transitions inverses de capture d'un électron libre suivie ou précédée de la réinsertion d'un électron de valence (capture d'un trou) (figure I-6, a + d). On voit que les centres de recombinaison sont temporairement chargés au cours d'une transition et peuvent donc jouer un rôle donneur ou accepteur similaire à celui des atomes dopants. Une expression type du taux net de recombinaison peut facilement être établie en supposant les centres présents tous identiques et le niveau d'énergie associé unique [6]:

$$U_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n(p + p_1) + \tau_p(n + n_1)} \quad (I. 6)$$

Où n_i correspond à la concentration intrinsèque, n et p représentent les concentrations des électrons et des trous libres, et n_1 et p_1 , représentent les termes d'émission et sont donnés par:

$$n_1 = n_i \exp \frac{E_i - E_{Fi}}{K.T}, \quad p_1 = n_i \exp \frac{-(E_i - E_{Fi})}{K.T} \quad (I. 7)$$

Tels que E_i représente l'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite, E_{Fi} le niveau de Fermi intrinsèque et τ_n et τ_p sont les durées de vie des électrons et des trous. Les durées de vie limites sont inversement proportionnelles à la concentration des centres de recombinaison et à leur section de capture vis-à-vis des trous d'une part, des électrons d'autre part.

Si plusieurs types de centres concourent aux recombinaisons, ce qui est fréquemment le cas, le taux de recombinaison est donné par une somme de termes de la forme de l'équation (I.8).

$$U_{SRH} = \sum_i U_{SRH, i} \quad (I.8)$$

Chaque i étant un piège avec un niveau d'énergie $E_{i,t}$ dans la bande interdite.

I.2.4. Caractéristiques électriques et optiques d'une cellule solaire :

Le tracé de la caractéristique I (V) de la cellule solaire est représenté sur la figure (I-7) qui montre la variation du courant en fonction de la tension (I-V) pour une cellule solaire typique. Sous obscurité, la courbe caractéristique est la même que celle d'une diode simple, et sous éclairement, la courbe est décalée vers le bas d'une valeur égale au photo-courant I_{ph}. L'I_{cc} et le V_{co} sont, respectivement, le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert.

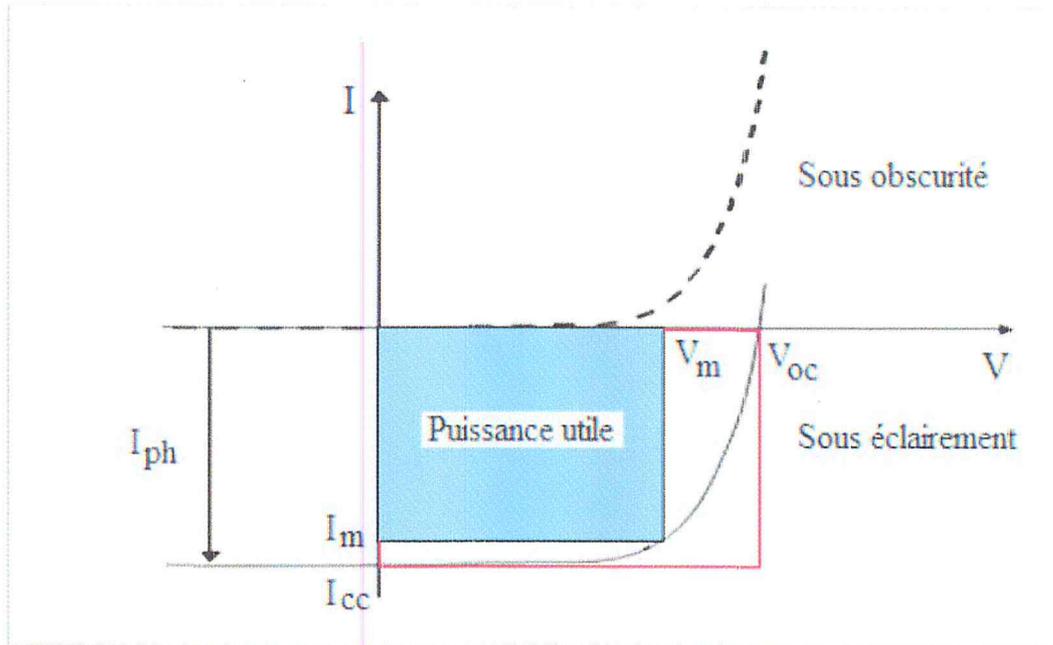
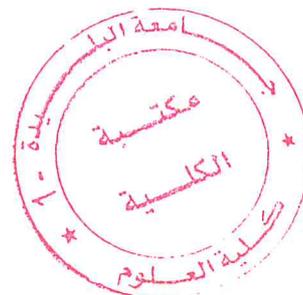


Figure I-7. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [8].

- Courant de court-circuit : il est obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V=0$). Il correspond au photo-courant I_{ph} généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photo-courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [7].
- Tension en circuit ouvert : si la cellule est laissée en circuit ouvert (courant nul), la tension mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert V_{co}. C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo-courant I_{cc} [8]. Elle est donnée par la relation:

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (I. 9)$$

Où : I₀ est le courant de saturation de diode



• Facteur de forme : le facteur de forme ou FF (Fill Factor).le rapport entre la puissance maximale débitée $V_m \cdot I_m$ (la surface du plus petit rectangle) et la puissance idéale $V_{oc} \cdot I_{cc}$ (la surface du plus grand rectangle) [8]. Où V_m et I_m sont les valeurs de tension et du courant correspondant au point de fonctionnement pour lequel la puissance, qui est égale à $U \cdot I$, est maximale. Le FF, est. Donne par la relation suivante :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad (I. 10)$$

• Rendement : il est défini par le rapport entre l'énergie maximale délivrée par la cellule P_{MAX} et l'énergie lumineuse incidente P_{in} par unité de surface :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{FF V_{oc} I_{cc}}{P_{in}} \quad (I. 11)$$

I.2.5. Paramètres par défaut :

I.2.5.1. Résistance en série :

La résistance série R_s : modélise [9] les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations). Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau ; il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension V_j aux bornes de la jonction pn. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. .

I.2.5.2. Résistance en parallèle :

La résistance parallèle R_p (résistance shunt R_{sh}) : correspond [9] à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction; il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.

I.3. Différentes technologies de la cellule solaire en couche mince :

Une couche mince ou TF (Thin Film) est un revêtement dont l'épaisseur peut varier de quelques couches atomiques à une dizaine de micromètres. La technologie des cellules solaires en couches minces ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseurs suffisent), ce qui rend ces cellules peu gourmandes en matériaux de fabrication et facilement adaptables aux supports flexibles. Cependant, le problème majeur est le rendement moindre de ce type de cellules et la toxicité de certains éléments (cadmium) utilisés pour leur fabrication.

La technologie en couches minces, qui utilise des couches absorbantes poly cristallines ou amorphes, concerne actuellement le a-Si hydrogéné, le GaAs, le CdTe, CuInSe₂ et sa variante Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS). Ces matériaux sont considérés comme les meilleurs choix pour la production des cellules solaires à couches minces en raison de leurs bonnes propriétés optiques et de leurs bandes interdites souhaitables à l'absorption du spectre solaire [11,12]. Les couches minces commencent à pénétrer le marché mondial du photovoltaïque, elles ont atteint en 2012 le 15%, ce qui confirme leur l'intérêt en tant que solution photovoltaïque [10]. Actuellement, il existe trois principales concurrentes technologies couches minces photovoltaïques à base de a-Si, CdTe, et CIGS disponibles pour la production d'énergie terrestre à grande échelle et d'autres applications électroniques grand public.

I.4. Cellule solaire en couche mince à base de CIGS :

I.4.1. Histoire de la cellule solaire CIGS :

L'émergence des cellules solaires, basées sur les matériaux à structures chalcopyrites, a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques CuInSe₂/CdS par S. Wagner et coll. de Bell Téléphone en 1974-1975 [13]. S. Wagner et coll. avaient rapporté la préparation d'hétérojonctions p-n CuInSe₂/CdS à partir d'un monocristal CuInSe₂, dont la conductivité est de type p, sur lequel une couche mince de CdS de 5- 10 nm d'épaisseur avait été déposée. La réponse photovoltaïque de ces détecteurs pour une lumière incidente à travers la couche fenêtre CdS donnait lieu à de très hauts rendements quantiques (>70%) uniformes entre 0,55 et 1,25 μm. Ces hétérojonctions avaient des rendements solaires de l'ordre de 5%. Les composés ternaires chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement : CuGaSe₂, CuInS₂, Cu (In, Al) Se₂ et Cu (In, Ga) Se₂(Tableau I.1).

Matériau	a (nm)	c (nm)	Eg(eV)	Rendement(%)
CuGaSe ₂	0.560	1.099	1.67	8.3
CuInS ₂	0.551	1.106	1.53	11.4
Cu(InAl)Se ₂	0.575	1.145	1.16	16.9
CuInSe ₂	0.577	1.155	1.02	15.4
Cu(InGa)Se ₂	0.572	1.143	1.12	18.8

Tableau I.1. Les caractéristique structurales et optiques et le rendement de chaque couche mince [13].

I.4.2- Les avantages de CIGS

Les principaux avantages de ce matériau semi-conducteur sous sa structure chalcopyrite sont les suivants [13] :

- Son gap direct a une valeur de 1.04 eV, cette énergie permet d'absorber une large gamme du spectre solaire :
- Son coefficient d'absorption qui est très élevé dans le domaine du visible est proche de l'infrarouge ; une couche de CuInSe₂ avec une épaisseur de 1 µm permet l'absorption de 99 % des photons qui arrivent à la surface de la cellule, pour atteindre ce taux d'absorption dans le cas des cellules à base de silicium il faut une épaisseur d'environ de 300 µm.
- La possibilité de changement de type de conduction (n ou p) de ce semi-conducteur et de son gap sans passer par le dopage par des atomes étrangers ;
- La possibilité d'élaboration de ce semi-conducteur par plusieurs techniques et sur différents types de substrat ;
- Il présente des paramètres de maille et une affinité électronique compatibles avec ceux des matériaux utilisés dans la fabrication des autres couches constituant la cellule solaire à savoir le CdS, ITO, ZnO, etc. ;
- Sa stabilité électrique et thermique excellente sous les conditions d'opérations ;
- Excellente résistance aux irradiations.

I.4.3- Fabrication d'une cellule à base de CIGS

Une cellule solaire est constituée d'un ensemble de couches minces semi-conductrices avec une épaisseur totale de 5 µm (Figure I.8). Le substrat de ce composant électronique est en verre. La première étape de fabrication d'une cellule photovoltaïque est le dépôt d'une couche de molybdène ou d'ITO de 1 µm d'épaisseur, généralement par la technique d'évaporation thermique ou pulvérisation cathodique. Cette couche est le contact ohmique arrière de la cellule ; elle assure l'adhésion entre la couche active de la cellule (la couche absorbante) et le substrat.

La couche la plus importante dans la cellule photovoltaïque est la couche absorbante, car, elle est responsable de l'absorption des rayonnements solaires ainsi que la génération des porteurs de charges (les électrons et les trous).

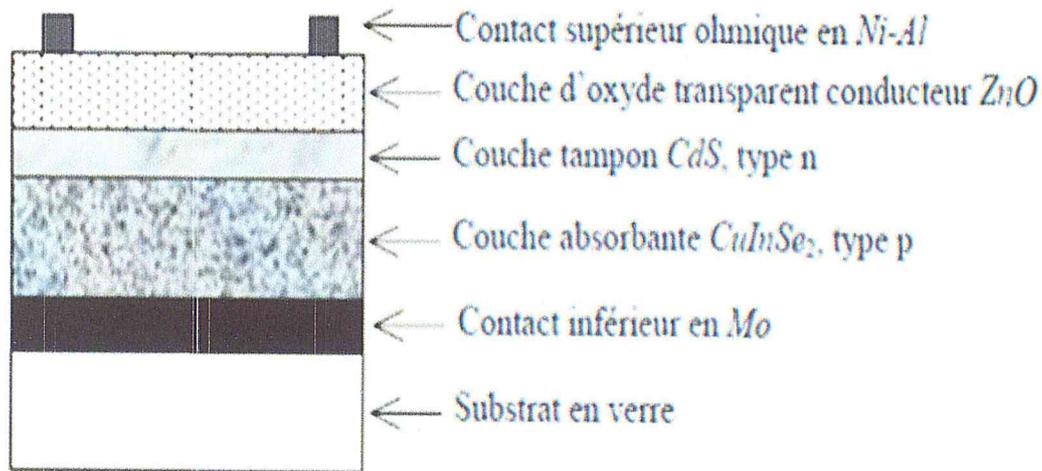


Figure I-8. Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de CuInSe_2 [13].

Généralement il existe six couches principales dans une cellule solaire à couches minces (Figure I.8) [13] :

I.4.3.1- Le substrat :

Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodo-calcique, qui présente toutes les propriétés requises. Il contient notamment du sodium, qui diffuse vers le CIGS lors de l'étape de recuit. Son effet bénéfique sur le fonctionnement de la cellule a été démontré par de nombreux auteurs [14,15].

I.4.3.2- Contact arrière :

Le contact arrière, qui constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque, est un métal déposé sur la partie inférieure de l'absorbeur dont le rôle est de collecter les porteurs à partir de l'absorbeur et de les livrer à la charge externe. Il doit donc, répondre à certains critères chimiques, mécaniques et économiques. De nombreux métaux ont été étudiés comme le Tungstène, le Molybdène, le Chrome, le Tantale, le Manganèse [16], l'Or, l'Aluminium, l'Argent et le cuivre [17]. Parmi ces métaux, le Molybdène qui est le plus couramment utilisé comme contact arrière des cellules solaires CIGS par les laboratoires de recherche et en industrie, en raison de sa stabilité relative aux températures élevées rencontrées lors du procédé de fabrication du CIGS (de l'ordre de 550 à 600 °C), et de sa faible résistance de contact avec le CIGS. Son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm.

I.4.3.3- Couche absorbante :

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande

interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1.1-1.7 eV. Sa conductivité doit être de type p, et de l'ordre de $1 \cdot 10^{-2}$ ($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$).

I.4.3.4- Couche tampon :

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante et la couche d'oxyde transparent conducteur (OTC).

- OTC est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister, mais son rendement sera limité par :

- L'inadaptation des bandes interdites ;

- Les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains.

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

- Une bande interdite intermédiaire permettant une transition souple entre celle du semi-conducteur et celle de l'OTC, soit une valeur comprise entre 2.4 et 3.2 eV ;

- Une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est, elle, de type p; de plus, afin d'éviter les effets de fuites de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante, soit de l'ordre de 10^{-3} ($\Omega \text{ cm}^{-3}$) ;

- Morphologiquement elle doit être très homogène pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains.

I.4.3.5 - Couche d'oxyde transparent conducteur (OTC) :

Oxyde transparent conducteur (OTC) doit être simultanément transparente et conductrice.

Dans le domaine du spectre solaire, la transmission des couches doit être supérieure à 80 %. La conductivité de ces mêmes couches doit être supérieure à 10^3 ($\Omega \text{ cm}^{-1}$).

De telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces de SnO_2 , In_2O_3 , de leur alliage ITO et de ZnO . Leur transparence est liée à la valeur de leur bande interdite, tandis que, leurs propriétés électriques dépendent de la composition des couches et d'un éventuel dopage. On dépose généralement une première couche non dopée de ZnO , puis une couche dopée de ZnO : Al ou d'ITO. En effet, la couche de ZnO intrinsèque, donc non-conductrice, évite toute fuite de courant entre la couche absorbante et le contact supérieur. Il a été montré que cette couche pouvait être évitée si l'on déposait une couche tampon (CdS par exemple) plus épaisse.

I.5 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les bases fondamentales à la compréhension de la cellule solaire. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres qui influent sur leurs caractéristiques. Puis nous avons présenté quelques notions sur les cellules solaires à base de CIGS.

Références bibliographiques du chapitre I

- [1] A. E. Becquerel, *Compt. Rend. Acad. Sci.* 9, (1839), 561.
- [2] D. M. Chapin, C. S. Fuller and G. L. Pearson, *Journal of Applied Physics*. 25, 676, (1954).
- [3] Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, «*Applied Photovoltaic*», Bridge Printer, Sidney, (1994).
- [4] M. Lopez (contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolienne pour une unité de production isolée), thèse de doctorant université PARIS SUD 11, 2008.
- [5] Y. Sayade, "Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière", thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [6] H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 2ème Edition, Masson, 1990.
- [7] M. Oukachmih, « Les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques discotiques », Thèse de Doctorat, Université Toulouse-Paul Sabatier, 2003.
- [8] R. Alain, « Convertisseurs photovoltaïques », Compresses.doc, 2007. http://www.cythelia.fr/images/file/Convertisseurs%20photovoltaïques_Alain%20Ricaud_Nov-07.pdf
- [9] B. Equer, *Energie solaire photovoltaïque « volume1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque »*, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993.
- [10] G. Masson, M. Latour, M. Reking, I.T. Theologitis and M. Papoutsis. *Global Market Outlook for photovoltaics*. Technical report, EPIA, 2013.
- [11] J.B. Shi, Y. C. Chen, C. J. Chen and P. Wu, « Optical properties and synthesis of CuInSe₂ thin films by selenization of Cu/In layers », *Cryst. Res. Technol.*, Vol. 47, 2012, pp. 183.
- [12] S. C. Haudhuri, S. K. Das and A. K. Pal, « Optical transitions in CdTe thin films produced by hot-wall vacuum evaporation », *Thin Solid Films*, vol. 147, 1987, pp. 9.
- [13] A. Luque, *Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)*-2012
- [14] F. Kessler, D. Herrmann and M. Powalla, « Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells », *Thin Solid Films*, Vol. 480-481, 2005, pp. 491.
- [15] K. Granath, M. Bodegård and L. Stolt, « The effect of NaF on Cu (In, Ga) Se₂ thin film solar cells », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 60, 2000, pp. 279.

- [16] K. Orgassa, H. W. Schock and J. H. Werner, « Alternative back contact materials for thin film Cu (In, Ga) Se₂ solar cells », *Thin Solid Films*, Vol. 431–432, 2003, pp. 387.
- [17] R. J. Matson, O. Jamjoum, A. D. Buonaquisti, P. E. Russell, L. L. Kazmerski, P. Sheldon and R. K. Ahrenkiel, « Metal contacts to CuInSe₂ », *Solar cells*, Vol. 11, 1984, pp. 301.
- [18] P. Jackson, D. Hariskos, R. Wuerz, W. Wischmann and M. Powalla, « Compositional investigation of potassium doped Cu (In,Ga) Se₂ solar cells with efficiencies up to 20.8% », *Phys. Status Solidi RRL*, Vol. 8, 2014, pp. 219.
- [19] H. Ullah, B. Marí and H. N. Cui, « Investigation on the Effect of Gallium on the Efficiency of CIGS Solar Cells through Dedicated Software », *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 448, 2014, pp. 1497.
- [20] *Energie solaire photovoltaïque.doc* / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.

Chapitre II :
présentation du logiciel et de
la structure de la cellule
solaire CIGS

II.1. Introduction

Quel que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire. Habituellement, les paramètres à optimiser sont les épaisseurs, les largeurs de la bande interdite (gap) E_g et les niveaux de dopage des différents couches constituant la cellule. L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum. Cette optimisation peut se faire soit expérimentalement ou soit par simulation.

L'optimisation expérimentale a l'avantage d'être réelle mais elle est fastidieuse, ennuyeuse et coutant chère. En plus, nous n'avons pas accès à certains paramètres de la cellule. Tandis que l'optimisation par simulation, vu qu'elle suit un modèle mathématique du système réel. Elle présente les avantages suivants :

- ✓ Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des paramètres différents
- ✓ Elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres)
- ✓ On peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètres interdépendants (par exemple: mobilité, longueur de diffusion et durée de vie). Dans ce chapitre, on va présenter les équations de base de modélisation utilisées par le logiciel SCAPS, ainsi qu'une brève description de la méthode de simulation par ce logiciel.

II.2. Équations fondamentales dans les semi-conducteurs :

Des années de recherche dans la physique des dispositifs à la base des semi-conducteurs ont conduit à la réalisation d'un modèle mathématique [1]. Ce modèle est capable d'opérer dans quasiment n'importe quel dispositif à base de semi-conducteurs. Il consiste en un ensemble fondamental d'équations qui rassemblent le potentiel électrostatique et les densités de porteurs de charge dans un domaine de simulation bien précis. Ces équations, qui sont résolues via des logiciels spécifiques de simulation des dispositifs à la base de semi-conducteurs, sont dérivées des équations de Maxwell. Elles sont principalement : L'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport. L'équation de Poisson lie les variations dans le potentiel électrostatique aux densités locales de charge. Les équations de continuité ou de transport décrivent le mode par lequel les densités d'électrons et des trous se

comportent en fonction des processus de transport, de génération et de recombinaison. Pour que les équations que nous allons présenter dans la suite de ce chapitre soient résolues, une discrétisation a dû être réalisée afin de les appliquer à une grille d'éléments finis utilisés pour représenter le domaine de simulation [2].

II. 2. 1. Équation de Poisson :

L'équation de Poisson s'exprime par :

$$\text{div } \varepsilon \nabla \psi = - \rho \quad (\text{II.1})$$

Où

Ψ : représente le potentiel électrostatique.

ε : La permittivité électrique ($\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, ε_0 est la permittivité du vide et ε_r est la permittivité relative du matériau).

ρ : est la densité volumique nette de charges libres.

Le champ électrique E est donné par la relation :

$$E = - \text{grad } \psi \quad (\text{II.2})$$

II.2. 2. Équations de continuité :

Les équations de continuité décrivent la vitesse de variation en fonction du temps des concentrations des porteurs. Les causes de la variation des concentrations des trous ou des électrons sont :

- Les générations dues aux agents externes (qui sont souvent la création de paires électron-trou).
- les générations-recombinaisons internes
- Les phénomènes de transport (par la présence des courants de conduction ou diffusion). L'équation de continuité s'exprime par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (\text{II.4})$$

G_n et G_p sont les taux de génération pour les électrons et les trous par des agents externes, R_n et R_p sont respectivement les taux de recombinaisons (internes) pour les électrons et les trous, J_n et J_p sont les densités des courants des électrons et des trous.

II.2. 3. Équations de transport

Dans le cas des hypothèses de base des équations de la physique des semi-conducteurs (le champ magnétique extérieur est nul, la température est uniforme dans toute la structure) les causes de l'apparition des courants électriques sont le champ électrique et le gradient des concentrations des porteurs de charge. Les courants déterminés par le champ électrique s'appellent courant du champ ou courant de drift. Et les courants déterminés par le gradient de concentration des porteurs s'appellent courant de diffusion. Dans le cas hors équilibre thermodynamique, nous définissons deux quasi-niveaux de Fermi, un pour les électrons et un pour les trous, qui expriment la modification de la probabilité d'occupation des états.

Ainsi les densités des courants des équations de continuité peuvent être approximées à l'aide de la théorie de transport de Boltzmann par le modèle de drift-diffusion [3] (modèle iso thermique de transport). Dans ce modèle, les densités de courants sont exprimées en fonction des quasi-niveaux de Fermi par les expressions :

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n \nabla \phi_n \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \nabla \phi_p \quad (\text{II.6})$$

Avec q est la charge électrique, μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous. Les expressions pour les concentrations des électrons et des trous sont :

$$n = n_{ie} \text{Exp} [q(\Psi - \phi_n) / kTL] \quad (\text{II.7})$$

$$p = n_{ie} \text{Exp} [q(\Psi - \phi_p) / kT] \quad (\text{II.8})$$

Avec n_{ie} est la densité effective intrinsèque.

KT : énergie thermique à la température ambiante.

L : est la longueur de diffusion.

En introduisant ces équations dans les expressions de densité de courant, on obtient :

$$\vec{J}_n = qD_n \nabla n - qn \mu_n \nabla \psi - \mu_n n (kTL \nabla (\ln n_{ie})) \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{J}_p = qD_p \nabla p - qp \mu_p \nabla \psi + \mu_p p (kTL \nabla (\ln n_{ie})) \quad (\text{II.10})$$

Avec D_n et D_p sont les coefficients d'Einstein qui ont pour expression :

$$\vec{D}_n = KTq\mu_n \quad (\text{III.11}) \quad \vec{D}_p = KTq\mu_p \quad (\text{II.12})$$

a). Diffusion

Les courants de diffusion sont générés par l'existence d'une concentration non uniforme des électrons ou des trous dans le semi-conducteur. Il est nettement plus probable qu'une charge d'une zone de concentration élevée se déplace vers une zone de basse concentration que l'inverse. Ce phénomène de diffusion est décrit quantitativement par la première loi de Fick qui montre la proportionnalité entre le flux de particules F et le gradient de leur concentration ∇C selon la relation :

$$\vec{F} = -D \cdot \nabla C \quad (\text{II.13})$$

Le facteur de proportionnalité D s'appelle coefficient de diffusion. En appliquant la relation (II.13) pour les électrons ($C = n, D = D_n$) et les trous ($C = p, D = D_p$) nous trouvons les densités des courants de diffusion :

$$\vec{J}_{ndif} = -q\vec{F}_n = qD_n\nabla n \quad (\text{II.14})$$

$$\vec{J}_{pdif} = q\vec{F}_p = qD_p\nabla p \quad (\text{II.15})$$

Qui représente en pratique le premier terme des équations (II.9) et (II.10). Notons que le troisième terme des équations (II.9) et (II.10) est aussi un courant de diffusion. Mais il est dû au gradient des densités effectives d'états nie.

b). Conduction

En présence d'un champ électrique le porteur de charge est accéléré entre deux collisions aléatoires. La direction est donnée par le champ électrique et génère un déplacement moyen avec une vitesse donnée par :

$$\text{pour les électrons : } \vec{V}_n = -\mu_n \vec{E} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{pour les trous : } \vec{V}_p = -\mu_p \vec{E} \quad (\text{II.17})$$

Dans les mêmes conditions de champ, les vitesses des électrons sont plus grandes que celle des trous. Donc nous avons beaucoup plus de chance de collecter des électrons que des trous. Le courant de drift est donné par :

$$\vec{J}_{ncdn} = -qn \vec{V}_n \quad (\text{II.18})$$

$$\vec{J}_{pcon} = qp \vec{V}_p \quad (\text{II.19})$$

Ainsi le courant de drift est représenté dans le second terme des équations (II.9) et (II.10).

II.3. Simulation des cellules solaires :

II. 3. 1 Simulation :

La simulation numérique désigne l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe. Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques. Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. Ces simulations permettent de limiter le risque et d'éviter le coût d'une série d'épreuves réelles. Elles peuvent offrir un aperçu sur le développement d'un système trop complexe pour le simuler avec des simples formules mathématiques [4].

II.3. 2. Logiciel de simulation :

Plusieurs logiciels ont été écrits avec un but précis de modélisation des cellules solaires. Ils ont différentes possibilités et limitations, mais les principes de base sont les mêmes. En principe, n'importe quel programme numérique capable de résoudre les équations de base des semi-conducteurs peut être employé pour modéliser les piles solaires à couches minces. Un certain nombre de ces logiciels de simulation ont été développées dans des universités ou des instituts de recherche, et ceux-ci sont généralement disponibles sans frais et sans soutien. Ce groupe de programmes comprend AMPS-1D[11], SCAPS-1D[12],PC-1D[13], ASA, AFORS-HET[14]. Tous ces éléments sont unidimensionnel et peut être utilisé pour évaluer directement ou indirectement les performances des cellules solaires. Certains contiennent également d'autres expériences telles que la capacité liée caractérisation (SCAPS-1D, ASA[15], AFORS-HET). AMPS-1D, SCAPS-1D, ASA, et PC-1D ont été comparés dans un article de revue de Burgelman et al. [5].

L'extension en deux ou trois dimensions, ce qui permet de simuler fluctuations latérales dans les cellules solaires en couches minces poly cristallin (par exemple, les limites de grains), est plus difficile à atteindre et reste dans le domaine des logiciels commerciaux, tels que APSYS, ATLAS 2D[16].

Les équations de base sont l'équation de Poisson, reliant la charge au potentiel électrostatique, et les équations de continuité pour les électrons et les trous. Cependant, plusieurs options additionnelles doivent être réunies dans le programme quand on veut simuler des piles solaires à couches minces. Il devrait être capable de prendre en compte la

présence de plusieurs couches dans la cellule ; le phénomène de recombinaison à l'interface des couches, introduit par les discontinuités dans les bandes d'énergie (E_c et E_v). Il devrait aussi, traiter correctement le problème de recombinaison et les centres de génération recombinaisons dans les états profonds dans le volume des couches. Il devrait être aussi capable de calculer et simuler des mesures électro-optiques effectuées généralement sur les piles solaires à couches minces, non seulement la caractéristique $I(V)$, mais également la réponse spectrale et les mesures de capacité $C(V)$ et $C(f)$. En fin, il devrait fournir la convergence au moins pour les structures les plus communes des cellules à couches minces. Toutes ces options sont mises en application dans le programme de simulation SCAPS [6]. Pour cela on a utilisé un logiciel de simulation numérique unidimensionnel appelé SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension), développé au laboratoire ELIS (Electronics and Information Systems) de l'université de Gent, Belgique [6]. SCAPS est un logiciel à application sur Windows. Il a été développé pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires à hétérojonction et à couches minces. Il a été extensivement, testé sur des cellules solaires à base de CdTe et Cu(In,Ga)Se₂ par M. Burgelman et al. Les résultats simulés et mesurés ont été en très bon accord [6]. Cependant, Plusieurs version ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe) [7].

Avec SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires ainsi que les contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés, dans le volume et aux interfaces pour un spectre de lumière arbitraire [7]. En effet, SCAPS possède une base de données contenant plusieurs types de cellules solaires, fichier data, d'extension « def » dont on peut modifier leurs différents paramètres (largeur, dopage...).

II.4. Utilisation du logiciel SCAPS :

Afin de simuler et contrôler toutes les paramètres d'un dispositif photovoltaïque au moyen du Logiciel SCAPS nous devons passer par trois grandes fenêtres :

- ✓ Fenêtre d'exécution (« action panel »)
- ✓ Fenêtre de conception de dispositif et la définition du problème (« Définition panel »)
- ✓ Fenêtre des résultats.

II.4.1. Menu principal (Action panel) :

Après le lancement du logiciel et l'ouverture de la fenêtre d'exécution on modifie les paramètres : la température, la résistance série et parallèle et les paramètres d'illumination. On peut à n'importe quel moment accéder aux deux autres fenêtres, fenêtre de conception de dispositif et fenêtre des résultats comme le montre les figures ci-dessous.

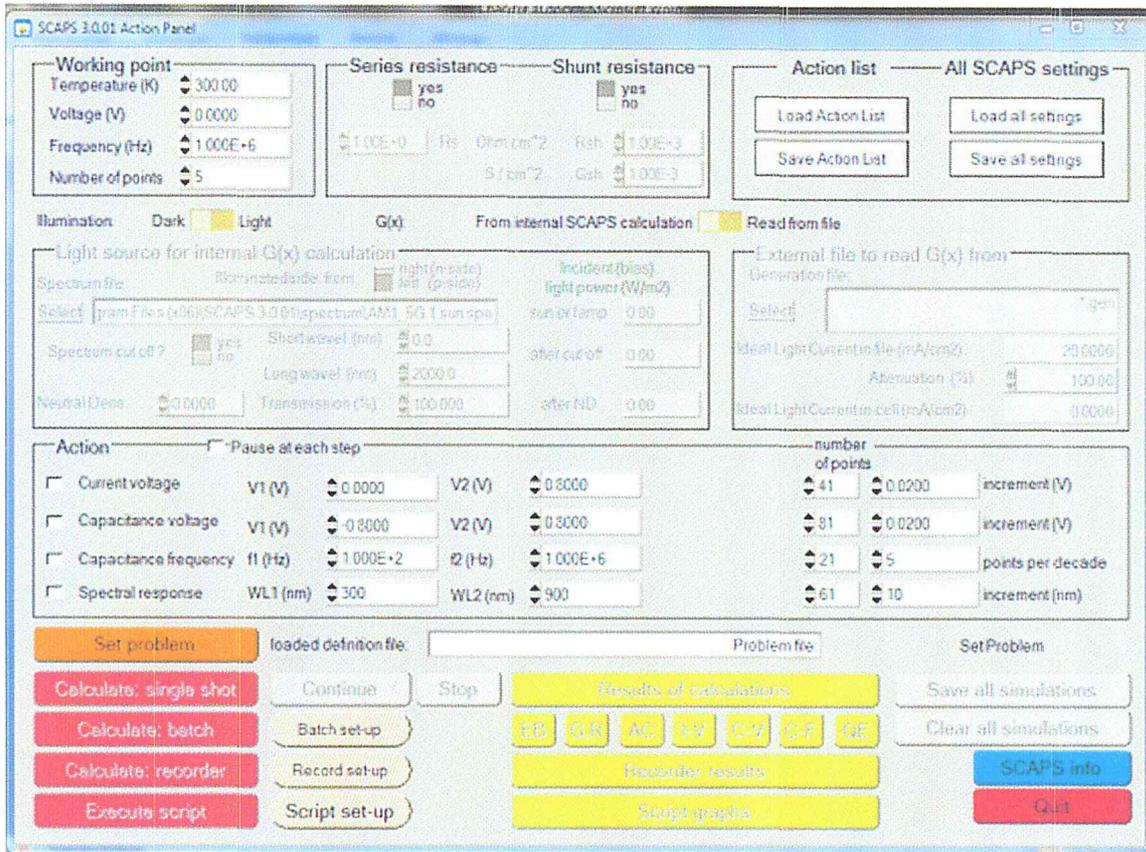


Figure II-1.Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

II.4.2. Choix de la cellule :

Quand on clique sur le bouton " SET PROBLEME " sur le panneau d'action le panneau " SOLAIRE DEFFINITION " s'affichera. Ce dernier paramètre de créer ou modifier les structures des cellules solaire et enregistrer charger a partir d'autres fichiers (Figure II-2).

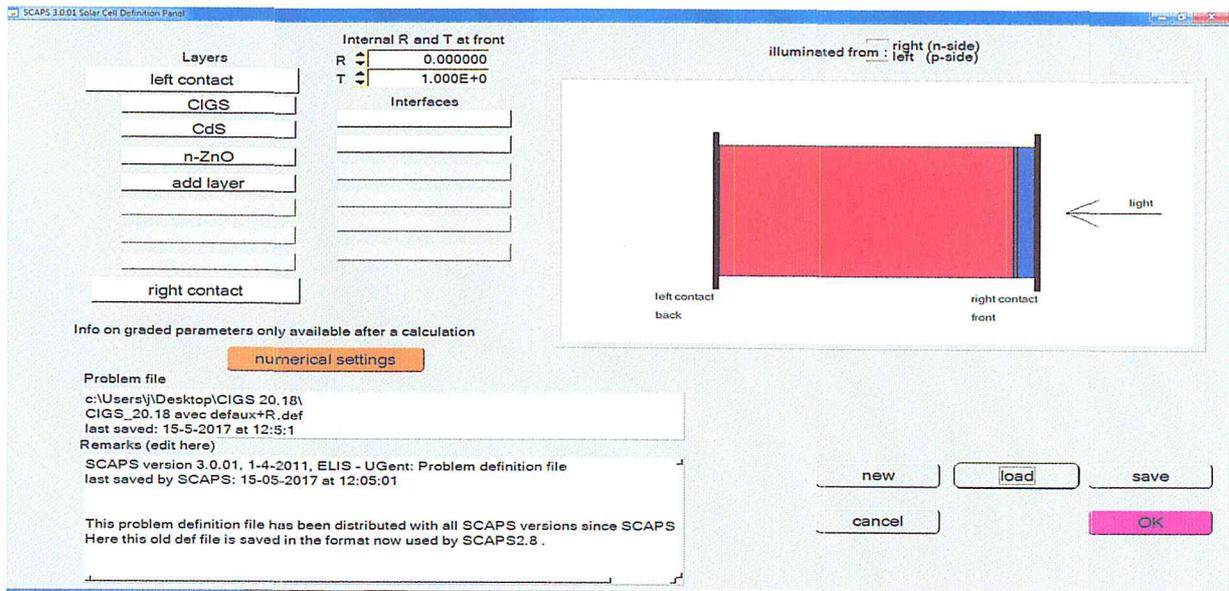


Figure II-2.Définition de la structure d'une cellule solaire.

II.4.3. Les propriétés des couches :

La fenêtre représentée par la figure II-3 contient plusieurs paramètres comme énergie de gap, permittivité électrique, l'affinité, dopage, type de dopage. Il faut noter que l'utilisateur peut utiliser directement des valeurs standards dans les fichiers data du logiciel.

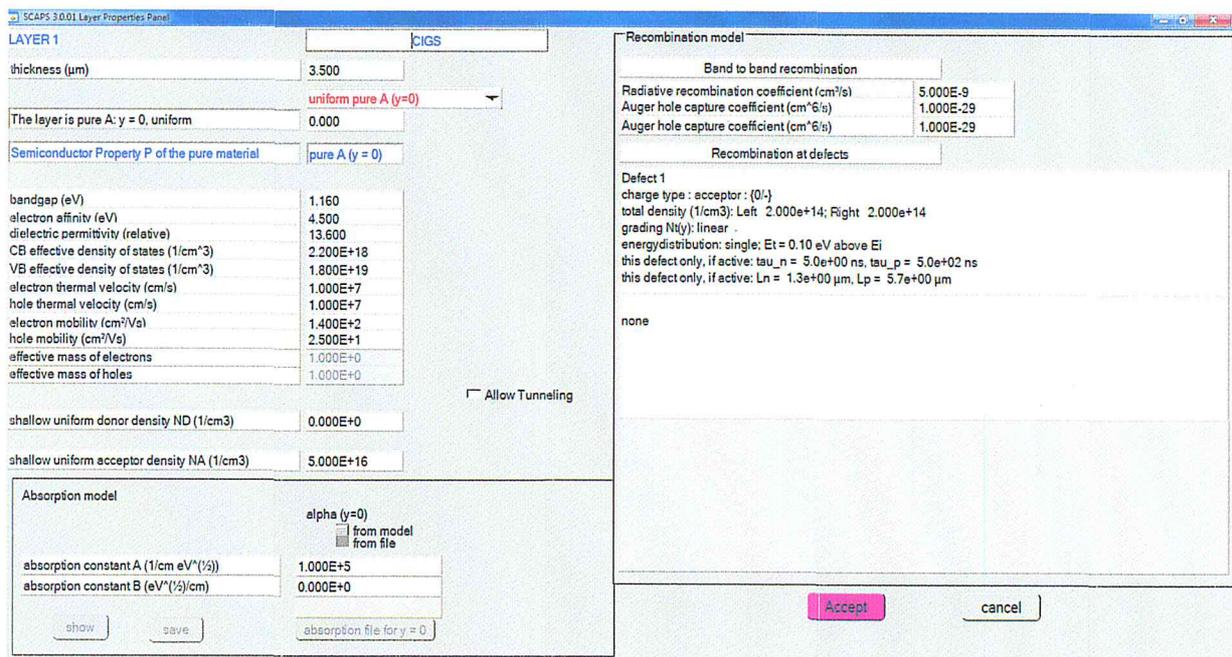


Figure II-3.Paramètres d'une couche (absorbeur CIGS) d'une cellule.

II.4.4. Résultat de la simulation (Caractéristique J(V)) :

Exécuter la simulation « Calculate », noter les résultats de simulation (J_{CC} , V_{co} , FF, η) dans la fenêtre «J-V panel », la caractéristique J-V... On peut afficher et copier ces résultats sous forme de tableau en appuyant « show ».

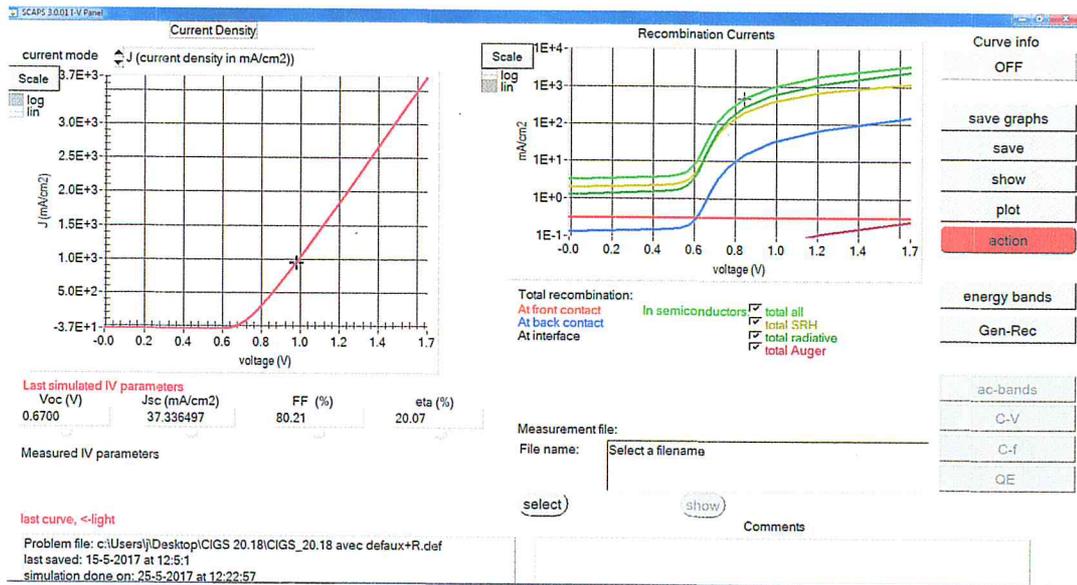


Figure II-4.Panneau d'affichage des courbes J-V à l'obscurité et en éclaircissement.

II. 5. Présentation de la structure de la cellule solaire :

Dans cette étude on utilise une cellule solaire avec une couche absorbeur en CIGS dont la structure est la suivante : ZnO /CdS /CIGS (Figure II-5). Nous avons simulé ses paramètres électriques, optiques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant un rendement électrique maximal.

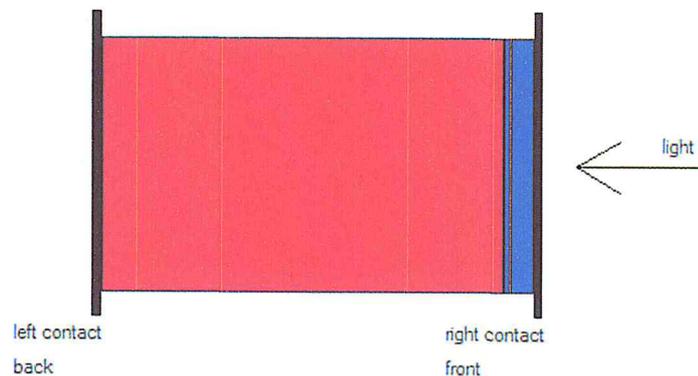


Figure II-5.Schéma simplifié d'une cellule solaire en couches minces en CIGS.

II.5.1 les paramètres de la cellule solaire :

Les paramètres des matériaux en ZnO, CdS et CIGS et utilisés dans la simulation de la cellule solaire sont reportés de la littérature [10] et sont groupés dans le tableau II.1.

Région	ZnO	CdS	CIGS
Epaisseur (μm)	0.2	0.05	3.5
E_g (eV)	3.3	2.5	1.16
N_C (cm^{-3})	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
N_V (cm^{-3})	1.5×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
Mobilité des électrons ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	10^2	1.4×10^2	1.4×10^2
Mobilité des trous ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	2.5×10	2.5×10	2.5×10
Permittivité	9	10	13.6
Affinité électronique (eV)	4.7	4.5	4.5
La vitesse thermique des électrons (cm/s)	10^7	10^7	10^7
La vitesse thermique des trous (cm/s)	10^7	10^7	10^7
Coefficient d'absorption (cm^{-1})	Fichier Data Scaps	Fichier Data Scaps	10^5

Tableau II.1. Paramètres des matériaux en ZnO, CdS et CIGS utilisés dans la simulation de la cellule solaire.

II.5.1.1. Les défauts :

Dans le tableau (II.2), nous avons groupé les valeurs des paramètres de la densité de défauts où $N_{DG(AG)}$ est la densité des états accepteurs (donneurs) de la formes gaussiennes, $E_{A(D)}$ est l'énergie du pic de la gaussienne, W_G la largeur de la distribution et section de capture. Les valeurs de ces paramètres sont extraites de la référence [10].

	ZnO	CdS	CIGS
$N_{DG}, N_{(AG)}(\text{cm}^{-3})$	D : 10^{17}	A : 10^{15}	A : 10^{14}
$E_A, E_D(\text{ev})$	Milieu du gap	Milieu du gap	Milieu du gap
$W_G(\text{ev})$	0.1	0.1	0.1
$\sigma_n(\text{cm}^2)$	10^{-15}	10^{-17}	10^{-15}
$\sigma_p(\text{cm}^2)$	10^{-13}	10^{-13}	10^{-15}

Tableau II.2.Paramètres de la densité de défauts des matériaux en ZnO, CdS et CIGS.

II.5.1.2. Les recombinaisons :

La recombinaison est définie comme le mécanisme inverse de la génération.Elle engage une perte d'énergie : les porteurs en excès disparaissent en rétablissant leur équilibre thermodynamique. UN semi-conducteur ayant subi une perturbation reconstitue son équilibre thermodynamique à travers plusieurs mécanismes possibles :

- ✓ la recombinaison radiative ou bande a bande.
- ✓ la recombinaison indirecte ou assistée (par piège).
- ✓ la recombinaison Auger
- ✓ recombinaison superficielle.

Recombinaison radiative (cm^6/s)	5.000E-9
Coefficient de capture Auger trous (cm^6/s)	1.000E-29
Coefficient de capture Auger électron (cm^6/s)	1.000E-29

Tableau II.3.Paramètres de Recombinaison CIGS.

II.5.1.3. Diagramme de bande :

La Figure II.6montre le diagramme de bandes associé aux cellules CIGS. La jonction électrique est formée par le contact entre le CIGS de type p et les couches CdS/ZnO de type n [8].

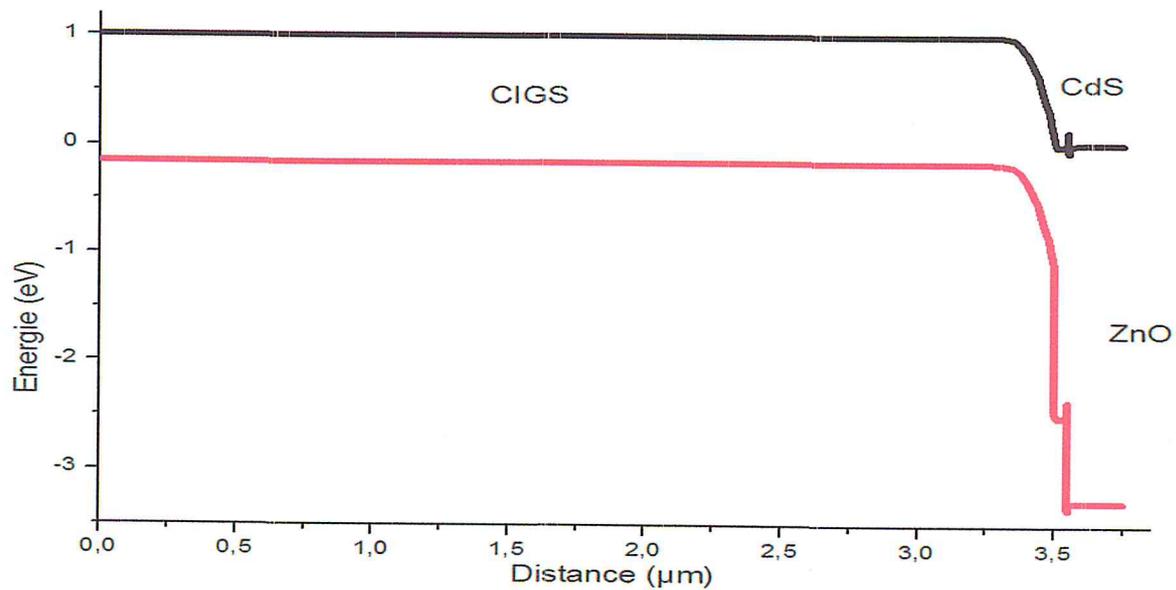


Figure II-6.Diagramme des bandes d'énergie de la cellule CIGS/ CdS/ZnO

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

II.5.1.4. Spectre solaire :

Le spectre solaire AM1.5G correspond aux applications terrestres, conventionnellement normalise a 1000W/m^2 , standard ASTM G173, comprend le spectre direct et le spectre diffus. [9]

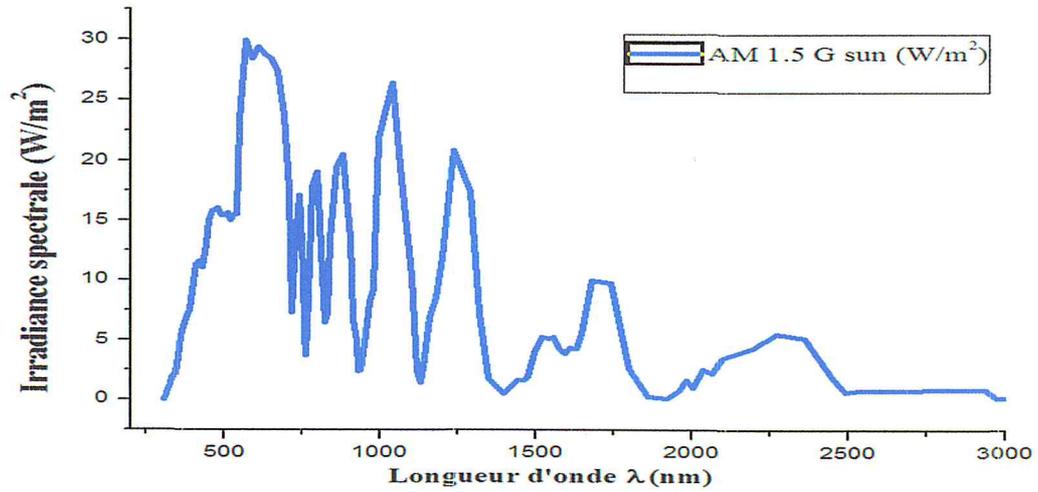


Figure II-7.Spectre solaire terrestre AM 1.5G

II.6. Conclusion

L'utilisation de logiciel Scapes est très pratique et très utilisable par la communauté scientifique depuis sa mise en service. Les différentes étapes que nous avons décrit dans ce paragraphe nous a permis de bien comprendre le fonctionnement du logiciel et de l'exploiter par la suite dans notre simulation. Ainsi elle est nécessaire pour l'optimisation des structures des dispositifs photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres qui influent sur leurs caractéristiques. Puis nous avons présenté quelques notions sur les cellules solaires à base de CIGS.

Références bibliographiques du chapitre II

- [1] PINTO M. R, Conor S. Rafferty and Robert W. Dutton, "PSCES2 - Poisson and continuity equation solver", Stanford Electronics Laboratory Technical Report, Stanford University, September 1984.
- [2] Y. MAROUF. Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco, Mémoire de Magister. Université Med Khider Biskra, 2013.
- [3] SELBERHERR, S. Analysis and simulation of semiconductor devices. Wien, New York: Springer-Verlag, 1984. (s.d.).
- [4] MELOUAH MILOUD, BAKHTI SAFIA, Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$, Mémoire master académique ,université kasdi merbeh Ouargla,2016.
- [5] Burgelman M, Verschraegen J, Degrave S, Nollet P. Prog Photovoltaics Res Appl 2004; 12:143-153.
- [6] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.
- [7] <http://scaps.elis.ugent.be/>
- [8] www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2007/03/refdp_5.pdf
- [9] A. MC.Evoy, T. Markvart and L. Castaner, practical handbook of photovoltaics fundamentals and applications, second edition, elsevier ltd, 2012, ISBN: 978-0-12-3859334-1.
- [10] 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion May 11-18.2003 Osaka. Japan
- [11] S.J. Fonash et al., A manual for AMPS-1D for Windows 95/ NT; A one-dimensional device simulation program for the analysis of microelectronic and photonic structures, Pennsylvania State University, 1997. See also <http://www.ampsmodeling.org>.
- [12] Marc Burgelman. Simulation programme SCAPS-1D for thin film solar cells. <http://users.elis.ugent.be/ELISgroups/solar/projects/scaps.html> [6] Bird and Riordan, Solar Cells, vol 15, pp.

[13] PC-1D <https://www.engineering.unsw.edu.au/energy-engineering/research/software-data-links/pc1d-software-for-modelling-a-solar-cell>

[14] AFORS-HET https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/ee/si-pv/projekte/asicsi/afors-het/index_en.html

[15] ASA <http://www.ewi.tudelft.nl/en/the-faculty/departments/electrical-sustainable-energy/photovoltaic-materials-and-devices/software-platform/asa-software/concept/>

[16] Atlas is a 2D and 3D device simulator that performs DC, AC, and transient analysis for silicon, binary, ternary, and quaternary material-based devices. Atlas enables the characterization and optimization of semiconductor devices for a wide range of technologies.

Chapitre III :

Résultats et Discussions

III.1.Introduction:

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de la simulation numérique de la cellule solaire en couche mince à base de CIGS. Nous devons étudier l'influence des différents paramètres sur la structure hétérojonction ZnO/CdS/CIGS.

Nous allons tout d'abord définir la cellule solaire de référence avec un ensemble des paramètres fixés, puis nous varions les paramètres géométriques et physiques afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire qui sont la tension de circuit ouvert V_{OC} , la densité du courant de court-circuit J_{cc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η .

III.2.Caractéristique électrique de la cellule solaire:

La structure et les paramètres de la cellule solaire à base de CIGS sont présentés dans le chapitre précédent. La caractéristique densité du courant-tension $J(V)$ de la cellule solaire à base de CIGS dans obscurité et sous l'éclairement par le spectre solaire AM 1.5 et de densité de puissance 100 mW/cm^2 est représentée par la figure III-1. Les paramètres électriques de cette cellule sont : la densité de courant de court-circuit $J_{cc} = 37.33 \text{ mA/cm}^2$, la tension en circuit ouvert $V_{co} = 0.670 \text{ V}$, le facteur de forme $FF = 80.21 \%$ et le rendement de conversion $\eta = 20.07 \%$.

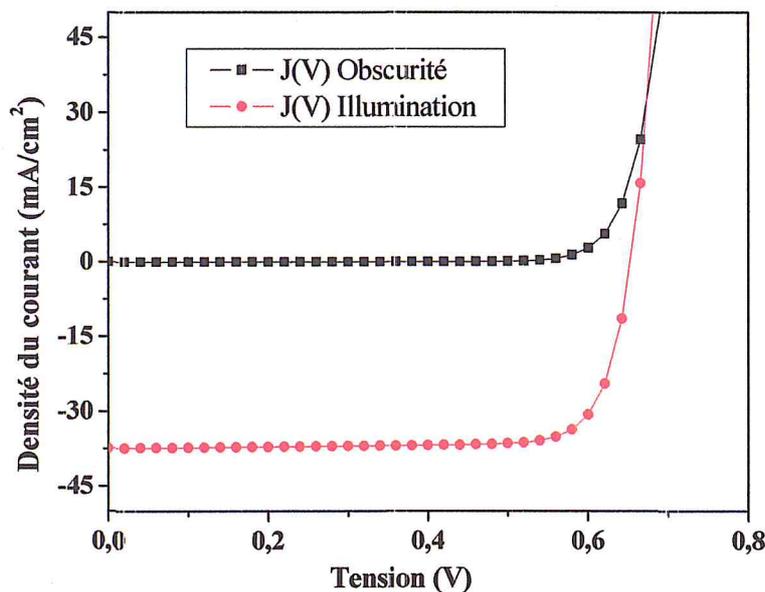


Figure III-1. Caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire à base de CIGS dans obscurité et sous l'éclairement.

Paramètres électriques	Simulation Scaps Notre travail	Simulation Silvaco [1]	Expérimental [2]	Expérimental [2]
V _{co} (V)	0.670	0.680	0.740	0.720
J _{cc} (mA/cm ²)	37.33	36.91	35.4	36.3
FF (%)	80.21	80	77.5	76.8
η (%)	20.07	20.1	20.3	20.1

Tableau III.1. les paramètres électriques des cellules solaires de structures ZnO/CdS /CIGS.

Le tableau III.1 regroupe les paramètres électriques des cellules solaires de la structure ZnO/CdS/CIGS/Mo du record mondial avec des rendements de 20.1 % et 20.3% [2] et ceux obtenus par la simulation [1]. D'après le tableau, nos résultats sont en bon accord avec celles trouvés dans la littérature.

III.3. Effet de la couche CIGS sur les performances de la cellule solaire :

III.3.1. Effet de l'épaisseur de la couche en CIGS :

Nous avons fait varier l'épaisseur des couches de CIGS (X_{CIGS}) entre 0.05 μm et 10 μm pour voir son influence sur les paramètres électriques et la couche en CdS est de 50 nm. Figure III-2 montre l'influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS (X_{CIGS}) sur la caractéristique J(V).

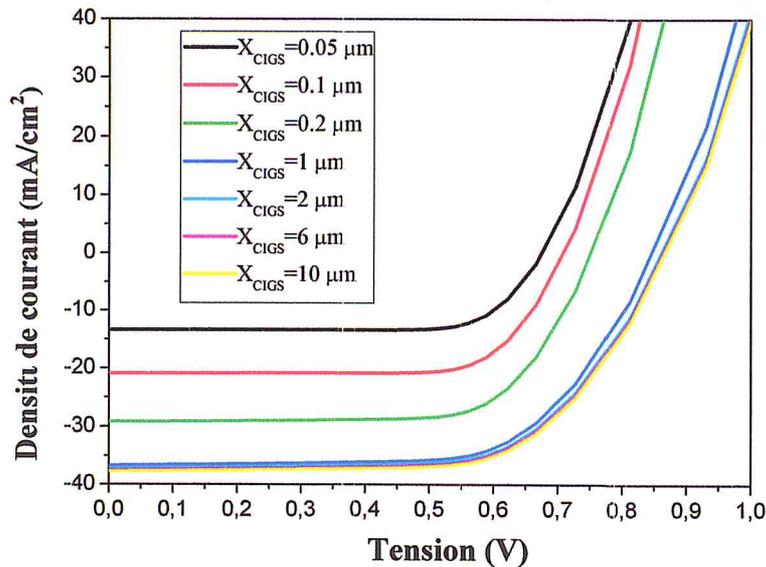


Figure III-2. Influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS (X_{CIGS}) sur la caractéristique $J(V)$.

La figure III-3 montre l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS sur les paramètres électriques de la cellule solaire telle que J_{cc} , V_{oc} , le rendement (η) et le facteur de forme (FF). Nous observons une augmentation de ces paramètres lorsque l'épaisseur de la couche CIGS augmente. Ces résultats sont en accord avec des résultats de simulation dans [3,4]. Dans la figure III-3 (a, b), V_{co} et J_{ca} augmentent parce que la couche absorbante plus épaisse va absorber plus de photons avec une grande longueur d'onde, ce qui, à apporter une contribution à la génération de paires électron-trou [5]. Cependant, presque une diminution linéaire de J_{sc} et V_{co} est observée lorsque l'épaisseur de la couche CIGS est inférieure à 1 μm , qui peut être principalement attribuée à l'absorption incomplète des photons incidents et l'augmentation de la recombinaison des porteurs photo-générés au contact arrière [5]. Ces résultats sont en accord avec des résultats de simulation dans la littérature [5].

Par conséquent, J_{cc} et V_{co} augmentent, l'efficacité s'améliore (figure III-3 (d)). Nous pouvons constater que le taux d'augmentation de l'efficacité est lent lorsque l'épaisseur de la couche est plus de 2 μm , ce qui signifie que l'épaisseur de l'ordre 2 μm est suffisante pour absorber la plupart des photons incidents.

Par conséquent, si l'on prend en compte le coût des matériaux et le processus de fabrication, il ne serait pas rentable pour produire des cellules solaires CIGS avec des couches absorbantes épaisses.

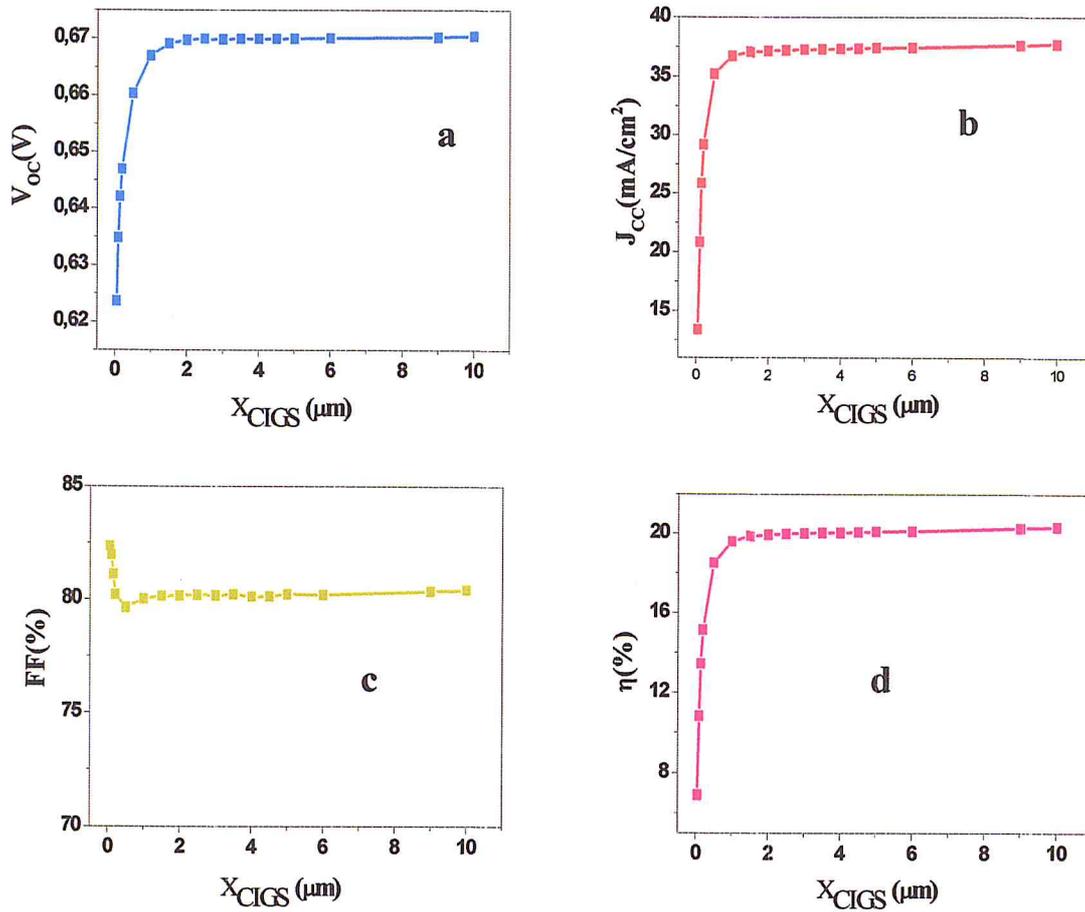


Figure III-3. Influence de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS (X_{CIGS}) sur les paramètres photovoltaïques : (a) V_{co} , (b) J_{cc} , (c) FF et (d) η .

III.3.2. Effet du dopage de la couche en CIGS :

Pour voir l'influence du dopage de l'absorbeur CIGS ($3.5 \mu m$) sur les paramètres électriques de la cellule nous avons procédé à la variation des valeurs de la concentration du dopage $N_A/CIGS$ dans la gamme $10^{14} cm^{-3}$ et $10^{18} cm^{-3}$. L'influence de la concentration du dopage $N_A/CIGS$ sur la caractéristique $J(V)$ et les paramètres électriques sont illustrées sur les figures III-4 et III-5.

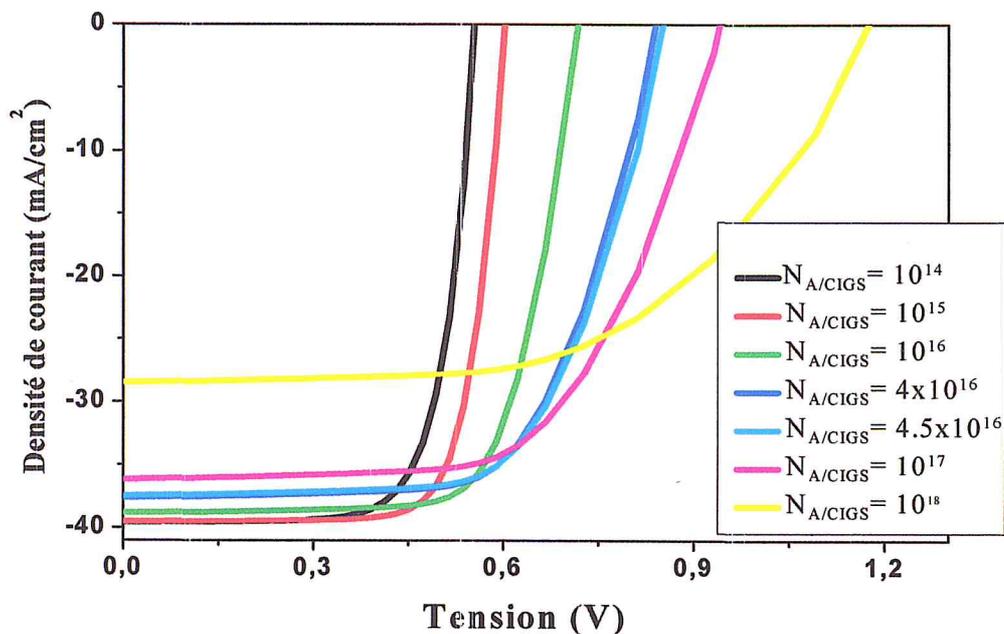


Figure III-4. Influence du dopage $N_{A/CIGS}$ sur la caractéristique $J(V)$.

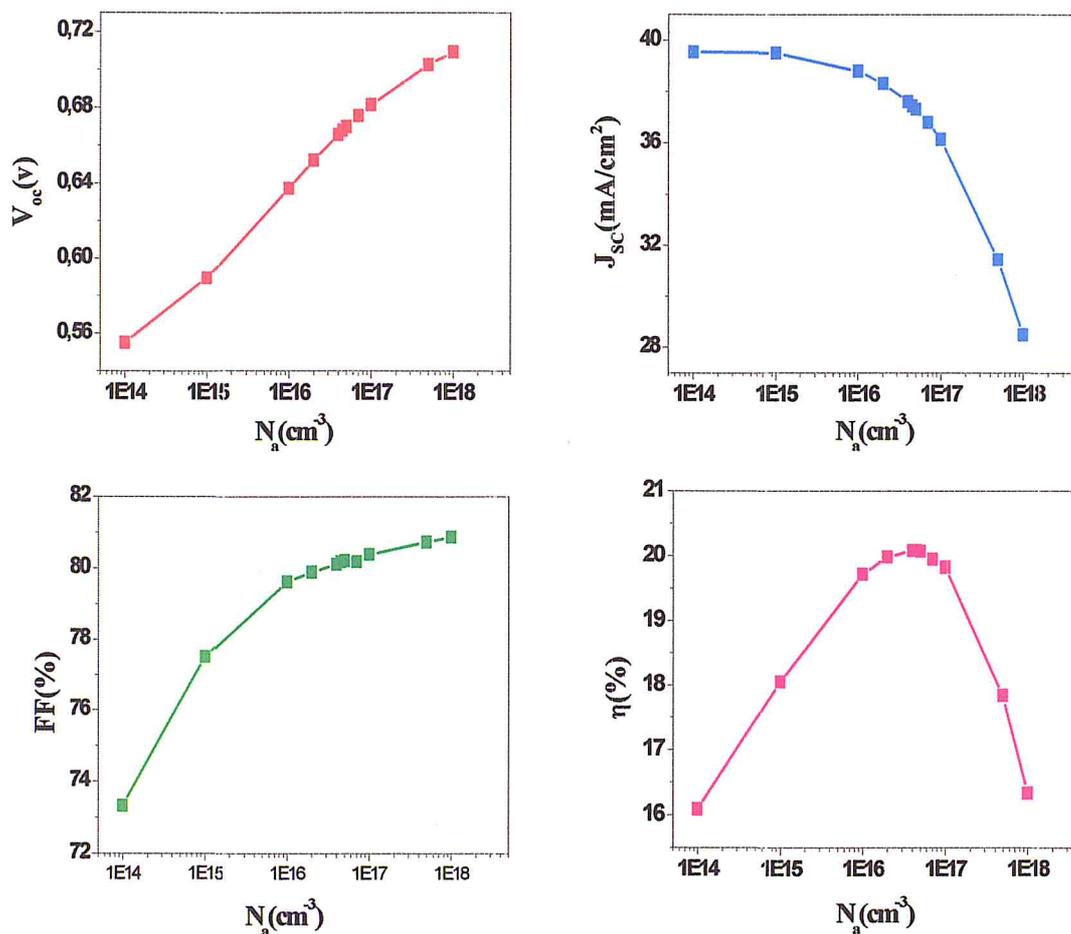


Figure III-5. Influence du dopage $N_{A/CIGS}$ sur les paramètres électriques : V_{oc} , J_{sc} , FF et η

Dans la figure III-5, nous remarquons qu'avec l'augmentation de la concentration du dopage $N_{A/CIGS}$, V_{co} augmente et le J_{sc} diminue. Ce phénomène peut être expliqué par la relation de V_{co} (Chapitre 1)). Le courant de saturation réduit si $N_{A/CIGS}$ augmente. Par conséquent, V_{co} va augmenter.

D'autre part, le courant de court-circuit J_{sc} diminue avec l'augmentation de la densité des porteurs $N_{A/CIGS}$. Ceci est principalement dû au fait que les densités des porteurs plus élevée permettra d'augmenter le processus de recombinaison et de réduire la probabilité de la collecte des électrons de photons générés [6].

Dans la figure III-5, Nous remarquons que le rendement η augmente et passe de 16.1% à 20.1 % quand le dopage augmente de 10^{14} cm^{-3} à $4.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Pour des valeurs de dopages supérieurs à $4.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, le rendement diminue. Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau, à partir d'un certain seuil, agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts défavorise le transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion. Dans notre simulation, le meilleur dopage pour la couche absorbante est $4.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

III.4. Effet de la couche CdS sur les performances de la cellule solaire

III.4.1. Effet de l'épaisseur de la couche tampon CdS:

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche tampon X_{CdS} de 1 à 1000 nm tandis que l'épaisseur de la couche en CIGS est maintenue constante (3.5 μm) sur la caractéristique $J(V)$ est illustrés sur les figures III-6.

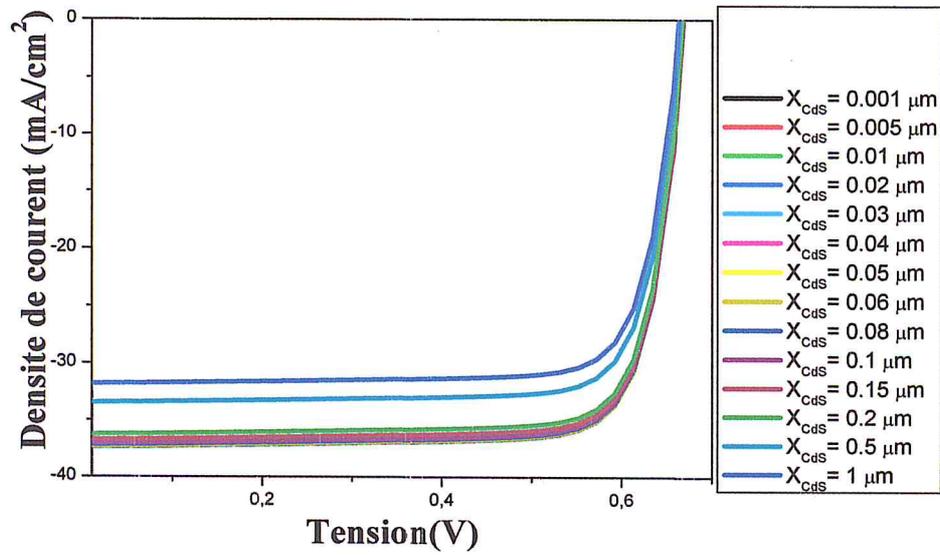


Figure III-6. Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS (X_{CdS}) sur les caractéristique J-V.

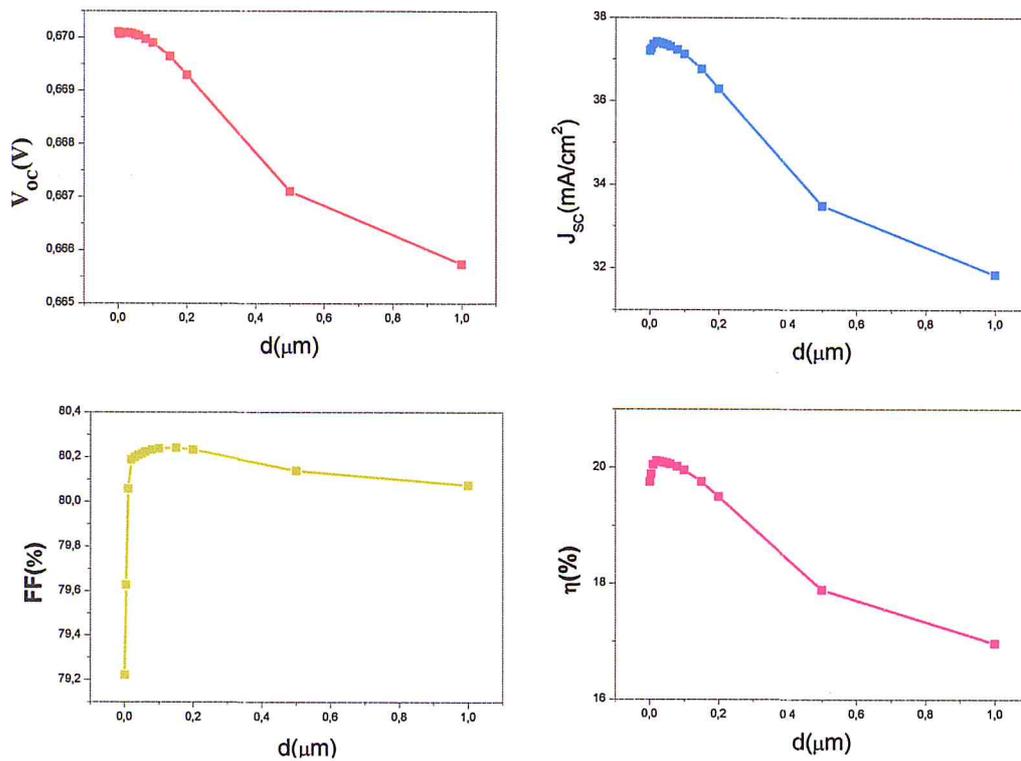


Figure III-7 : L'influence de l'épaisseur de la couche tampon X_{CdS} sur les paramètres électriques : V_{co} , J_{cc} , FF et η .

La figure III-7 montre la variation de la tension en circuit ouvert et la densité du courant de court-circuit et le facteur de forme et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CdS. nous remarquons que la densité du courant de court-circuit commence à augmenter progressivement jusqu'à la valeur de 37.41 (épaisseur CdS = 20nm), ensuite il diminue avec l'augmentation de l'épaisseur. Une faible diminution de la tension en circuit ouvert donc l'épaisseur n'a pas beaucoup d'influence sur V_{co} . Le facteur de forme augmente progressivement jusqu'à la valeur 80.23 (épaisseur CdS = 60nm) et après cette valeur il est presque constant. Le rendement augmente progressivement jusqu'à la valeur 20.10 % (épaisseur CdS = 20nm) et après cette valeur décroît avec l'augmentation de l'épaisseur.

L'effet de l'épaisseur de la couche en CdS peut être expliqué comme suit : pour une couche en CdS plus mince, la plupart des porteurs photo générés dans cette couche sont collectés. Quand l'épaisseur augmente, les photons de courtes longueurs d'onde sont absorbés à une distance plus loin de la jonction CdS/CIGS par conséquent les porteurs photo générés se recombinent avant d'atteindre la jonction. Généralement l'épaisseur de la couche en CdS doit être entre 50 nm et 60 nm [7].

III.4.2. Effet du dopage de la couche en CdS :

Les figures III-8 représentent respectivement la caractéristique I-V de notre cellule photovoltaïque pour une gamme de dopage de la couche tampon CdS allant de 10^{14} jusqu'à 10^{19} cm^{-3} .

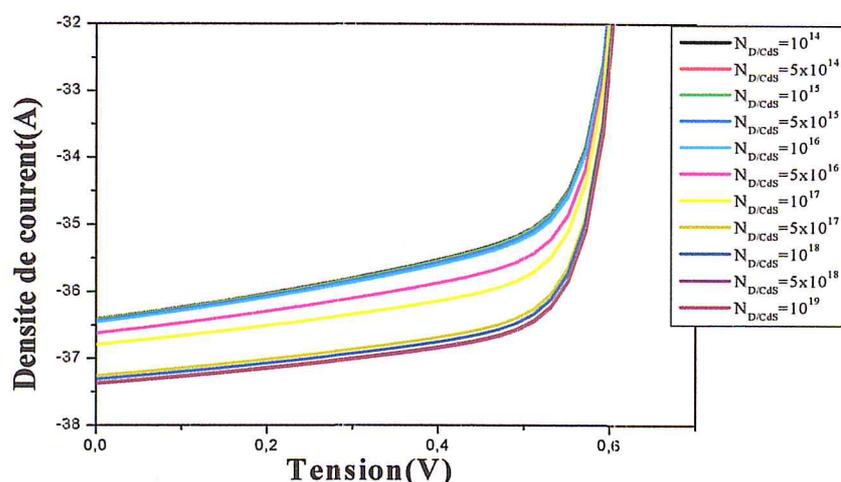


Figure III-8. Influence du dopage de la couche tampon N_D/CdS sur la caractéristique J-V.

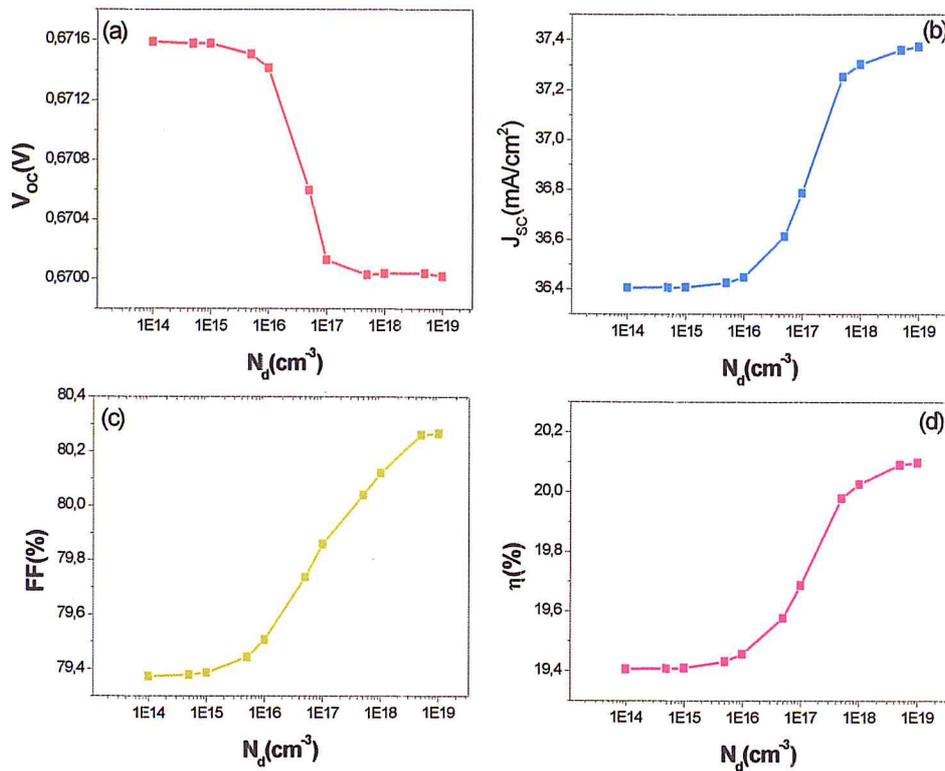


Figure III-9.(a)La Variation de la tension en circuit ouvert en fonction du dopage de la couche CdS ,(b)Variation du la court-circuit en fonction du dopage de la couche CdS, (c) Variation du facteur de forme en fonction du dopage de la couche CdS,(d) Variation du rendement en fonction du dopage de la couche CdS.

la figure III-9 montre la Variation de la tension en circuit ouvert et la courant de court- circuit et le facteur de forme et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CdS. nous remarquons qu'une réduction de la tension en circuit ouvert avec une augmentation du dopage de la couche en CdS conduit à une amélioration de la tension en circuit ouvert.L'accroissement du dopage de 10^{14} à 5×10^{18} cm^{-3} mène à une augmentation du facteur de forme et le rendement photovoltaïque.

L'accroissement du rendement est principalement du la réduction de la tension en circuit ouvert et l'augmentation du facteur de forme. Ces résultats sont en accord avec des résultats de simulation d'une cellule solaire en CIGS par l'utilisation du simulateur AMPS-1D [8].

III.5.Effet de la température :

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. Les figures III.10 et III.11 représentent l'influence de la température sur la caractéristique J(V).

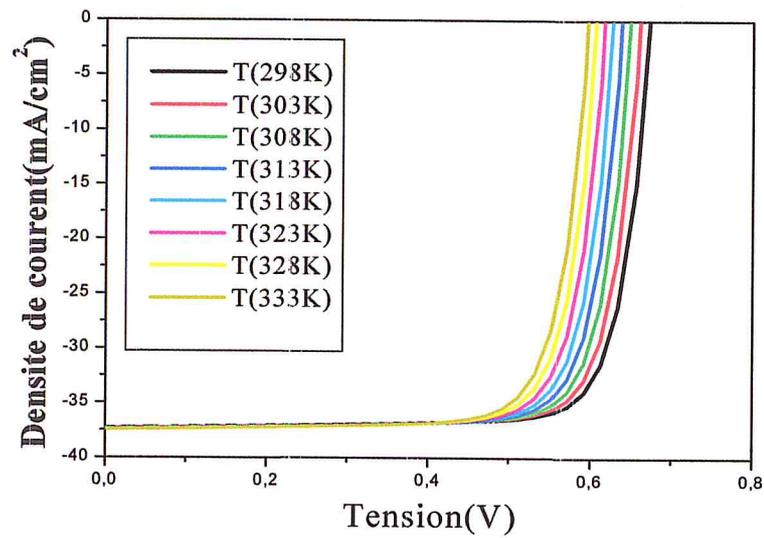


Figure III-10. Influence de la température sur la caractéristique J(V) de la cellule solaire à base de CIGS

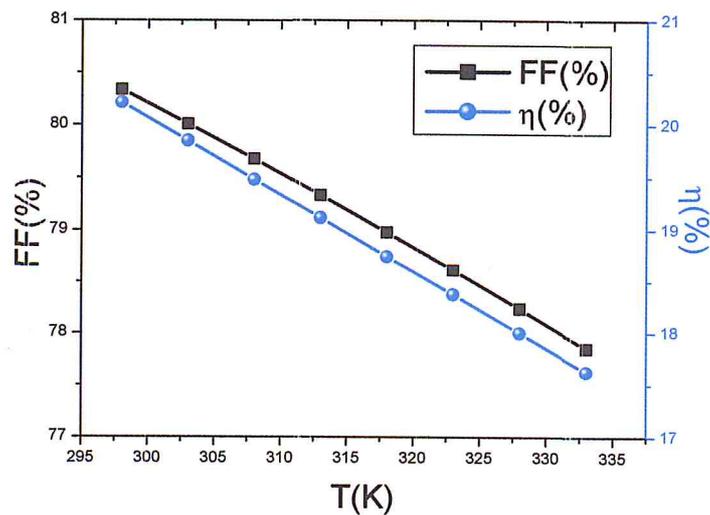


Figure III-11. Variation du facteur de forme et du rendement de la cellule solaire à base de CIGS en fonction de la température.

La figure III-11 montre la Variation du facteur de forme et du rendement de la cellule solaire à base de CIGS en fonction de la température. Nous remarquons une diminution progressivement du facteur de forme et du rendement avec l'augmentation de la température.

III.6.CONCLUSION :

Dans ce travail nous avons étudié l'effet de température et l'impact de deux couches, CdS (couche tampon), CIGS (couche absorbeur) dans le but de concevoir une structure optimale à hétérojonction ZnO/CdS/CIGS qui donne le meilleur rendement électrique. A cet effet, nous avons simulé les paramètres de sortie d'une cellule solaire à base de CIGS à hétérojonction en essayant de trouver les paramètres optimaux, donnant les meilleures caractéristiques de sortie. Nous avons alors, étudié l'effet du dopage et de l'épaisseur de chaque couche sur la caractéristique J-V ainsi que sur le rendement électrique. Nous avons constaté que les deux paramètres, dopage et épaisseur, ont un impact très significatif sur l'amélioration du rendement de la conversion électrique. En effet, la variation du dopage peut affecter les porteurs photogénérés. D'un coté, il est préférable d'augmenter la concentration du dopage de la couche tampon CdS, car cette augmentation permet une amélioration de la collecte des porteurs photogénérés dans la couche tampon CdS. Par contre, au niveau de l'absorbeur CIGS, un dopage de l'ordre de $4.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ est suffisant pour donner un meilleur rendement est 20,07. Du fait des largeurs de bandes interdites élevées, les couches ZnO et tampon (CdS) laissent passer le rayonnement visible (d'où leur nom de couches fenêtres), qui est ensuite absorbé dans la couche de CIGS. Donc une concentration de dopage élevée peut affecter le transport des porteurs au sein de l'absorbeur CIGS ce qui provoque une diminution du rendement. Selon notre étude basée sur la simulation, l'amélioration du rendement de conversion est obtenue pour une couche de CdS de type n, fortement dopé (de l'ordre de 10^{19} cm^{-3}), ainsi qu'une couche d'absorbeur CIGS dopé de type p de l'ordre de $4.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. De même la variation de l'épaisseur peut affecter la collecte les porteurs photogénérés. Nous avons, par ailleurs, pu optimiser des épaisseurs pour chaque couche. Ce qui permet à la fois une meilleure absorption de porteur des photons de courte longueur d'onde et une réduction considérable des pertes électriques associées aux mécanismes de recombinaison à l'interface. D'après notre étude, il est nécessaire de diminuer l'épaisseur pour avoir un rendement optimale $0.05 \mu\text{m}$ pour la couche CdS. Une épaisseur de $1.5 \mu\text{m}$ de l'absorbeur CIGS assure le meilleur transport des porteurs. En effet, Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure ZnO/CdS/CIGS. Nous pouvons dire que les paramètres de chaque couche jouent un rôle très important vis-à-vis des performances du dispositif étudié et en particulier dans l'amélioration du rendement de

conversion des cellules solaires à base de matériaux chalcopyrites Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS). Effectivement, puisqu'ils affectent les propriétés électriques de la jonction.



Références bibliographiques du chapitre III

- [1] Amar Hichem, Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSélénure de Cuivre Indium Galium $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS), thèse de magister, Université de Biskra,
- [2] P. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann and M. Powalla, Prog. Photovolt. Res.Appl. 19 (2011) 894-897.
- [3] Puvaneswaran Chelvanathan, Moharnmad Istiaque Hossain, Nowshad Amin, Current Applied Physics 10 (2010) 387–S391.
- [4] Nowshad Amin, Puvaneswaran Chelvanathan, M. Istiaque Hossain and Kamaruzzaman Sopian, Energy Procedia 15 (2012) 291 – 298.
- [5] Nima Khoshsirafat, Nurul Amziah Md Yunus, Mohd Nizar Hamidon, Suhaidi Shafie, Nowshad Amin, Optik 126 (2015) 681–686.
- [6] M. Patel, A. Ray, “Enhancement of output performance of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cells numerical simulation approach and comparison to experiments “, Physica B: Condensed Matter, vol. 407, p. 4391,(2012).
- [7] Yamamoto, Y. Saito, K. Takahashi, M. Konagai, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 65 (2001)125–132.
- [8] Jiyeon Song, T. J. Anderson, and Sheng S.Li, Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons effectué une simulation numérique de la cellule solaire en couches minces à hétérojonction à base de ZnO/CdS/CIGS en utilisant le logiciel SCAPS.

Pour simuler les caractéristiques électriques d'une cellule solaire par SCAPS. Nous avons commençons par la définition de la structure de la cellule de référence. La simulation numérique nous a permis de calculer les paramètres photovoltaïques qui caractérisent la cellule solaire. Les valeurs de ces paramètres photovoltaïques sont : La densité du courant de court-circuit $J_{CC} = 37.33 \text{ mA/cm}^2$, la tension en circuit ouvert $V_{co} = 0.67 \text{ V}$, le facteur de forme $FF = 80.21\%$ et le rendement de conversion $\eta = 20.07\%$. Ces valeurs sont en très bon accord avec celles trouvées dans la littérature. Nous avons ensuite étudié la sensibilité des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire aux grandeurs (épaisseur, dopage) des couches CIGS de type p et CdS de type n et la température de l'environnement.

L'épaisseur de la couche en CdS est variée de 1 à 1000 nm, nous avons remarqué qu'avec l'augmentation de l'épaisseur, le courant de court-circuit décroît tandis que la tension en circuit ouvert est diminuait, et le rendement diminue aussi.

Le dopage de la couche en CdS est aussi varié de 10^{14} à 10^{19} cm^{-3} . Nous avons trouvé que le dopage de la couche en CdS conduit à une amélioration de la tension en circuit ouvert. L'accroissement du dopage de 10^{14} à $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ mène à une augmentation du rendement. D'après ces résultats, l'accroissement du rendement est principalement due à l'augmentation de la tension en circuit ouvert et du facteur de forme avec le dopage de la couche en CdS.

Les résultats de simulation de l'effet de l'épaisseur et du dopage de la couche en CdS sont en accord avec des résultats de simulation d'une cellule solaire en CIGS trouvés dans la littérature.

Nous avons observé une augmentation des paramètres photovoltaïques lorsque l'épaisseur de la couche en CIGS augmente de 0.05 à 10 μm . Le meilleur rendement est 20.07 % correspondant à une épaisseur de 4.5 μm .

L'effet du dopage de la couche en CIGS sur la cellule a été simulé pour des valeurs de la concentration du dopage dans la gamme entre 10^{14} et 10^{18} cm^{-3} . La concentration du dopage de la couche absorbante CIGS influe systématiquement sur les paramètres photovoltaïques. Il y'a une chute rapide de la densité du courant de court-circuit avec le dopage. En particulier,

un meilleur rendement $\eta = 20.07 \%$, de la tension en circuit ouvert et du facteur de forme lieu pour une concentration du dopage de l'ordre de $4.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Les résultats de simulation de l'effet de l'épaisseur et du dopage de la couche en CIGS sont aussi en accord avec des résultats de simulation d'une cellule solaire en CIGS trouvés dans la littérature.

L'effet principal de l'augmentation de la température de la cellule CIGS consiste à l'accroissement du courant de court-circuit et la diminution de la tension en circuit ouvert et le facteur de forme et le rendement.

Comme perspective, on souhaite réaliser et caractériser cette cellule expérimentalement avec ces paramètres optimaux et faire une comparaison entre elles.