

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد Dahlab بلية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : Électronique
Spécialité : micro-électronique

Présenté par

BOUDEFASeddik

&

GHALI Akram

Optimisation des paramètres photovoltaïques du CIGS à l'aide du simulateur SCAPS

Proposé par : Dr FEROUANI Abdelmadjid

Co-promoteur : PrAISSAT Abdelkader

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Monsieur **Dr. FEROUANI Abdelmadjid** pour son encadrement efficace, ses conseils précieux et sa patience.

Nous tenons à remercier aussi notre Co-promoteur le **Professeur AISSAT Abdelkader** pour ses remarques et ses conseils.

Nous souhaiterons à la fin remercier les membres du jury **Mm ZERROUK** et **Mr AMRAOUI** d'avoir acceptés de juger ce modeste travail.

Dédicaces

Entémoignaged'amouretderespectà tousceuxquimesontchers,jedédiecemodestetravailà:
Nosgrandesfamilles.

Noschers amisetenseignants.

Ainsiqu'à tousceuxquim'ontaidé,soutenuetconseillétoutaulongdesépreuvesquiontdonnélumièreàcetravail.

Mercià tous

ملخص: في السياق العالمي لتنويع استخدام الموارد الطبيعية، يتزايد اللجوء إلى الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الشمسية

الكهروضوئية. على هذا النحو، فإن تطوير جيل جديد من الخلايا الكهروضوئية على أساس يبدو واعدًا. وبالفعل فقد تجاوزت كفاءة هذه والهدف هو Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS) الخلايا 20٪ في السنوات الأخيرة. وبالتالي فإن عملنا يتكون من نمذجة خلية شمسية على أساس تحسين المعلمات الفيزيائية من أجل تحقيق أفضل كفاءة تحويل ضوئية ممكنة.

SCAPS-1D يعد برنامجًا أداة عملية للغاية ويوصى به لهذه الدراسة

Résumé : Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de CIGS semble prometteur. En effet, le rendement de ces cellules a dépassé les 20% ces dernières années. Ainsi notre travail consiste à la simulation d'une cellule solaire à base de Cu (In,Ga)Se₂ (CIGS). Le but est d'optimiser les paramètres physiques afin d'aboutir au meilleur rendement de conversion photovoltaïque possible. Le logiciel SCAPS-1D est un outil très pratique et il est recommandé pour cette étude.

Abstract: In the global context of the diversification of the use of natural resources, the use of renewable energies and in particular solar photovoltaic is increasing. As such, the development of a new generation of photovoltaic cells based on photovoltaics seems promising. Indeed, the cost efficiency η of these cells has exceeded 20% in recent years. Thus, our work consists in the simulation of a solar cell based on Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS). The goal is to optimize the physical parameters in order to achieve the best possible photovoltaic conversion efficiency. The SCAPS-1D software is a very practical tool and it is recommended for this study.

Listes des acronymes et abréviations

Acronymes	Signification	Unité
Jcc	Densité de Courant de Court-circuit	mA/cm ²
Vco	Tension de Circuit Ouvert	V
η	Rendement électrique	%
FF	Facteur de forme	%
P _m	Puissance maximale fournie par une cellule	W.m ⁻²
X	Fraction molaire	%
V _m	Tension maximale	V
Gsh	Générateur en parallèle	S/Cm ²
T	Température	K
I	Courant de la cellule	A
μ_n	La mobilité des porteurs de charge pour un électron	m ² .V ⁻¹ .s ⁻¹
μ_p	La mobilité des porteurs de charge pour un trou	m ² .V ⁻¹ .s ⁻¹
Rsh	Résistance shunt	Ω .cm ²
Rs	Résistance en série	Ω .cm ²
α	Coefficient d'absorption	cm ⁻¹
E _g	Energie de bande interdite d'un matériau	eV
$\partial n, \partial p$	Les taux de variation des densités des électrons	cm ⁻³ s ⁻¹
I _m	Courant maximale	A
h ν	Énergie de photon	eV
E _g	L'énergie de gap	eV
A	Paramètre de forme de bande	
ϵ	La constante diélectrique	F/cm
n et p	Densités des porteurs.	C/cm
N _d	Concentrations des dopants donneurs ionisées	cm ⁻³
N _a	Concentrations des dopants accepteurs ionisées	cm ⁻³
q	La charge élémentaire d'électrons	A. s
V	Le potentiel	V
G	Tau de génération des porteurs	cm ⁻³ S ⁻¹
U	Tau de recombinaison des porteurs	

E_g	Energie de gap	$S.m^{-1}$
σ_n	La conductivité	$S.m^{-1}$
σ_p	La conductivité	cm^2
$N_{DG(AG)}$	La densité des états donneurs de la forme gaussiennes	cm^{-3}
$E_{A(D)}$	L'énergie du pic de la gaussienne	eV
W_G	La largeur de la distribution et section de capture	eV
$N_{(AG)}$	La densité des états accepteurs la formes gaussiennes	cm^{-3}
Dn et Dp	Les coefficients de diffusion	$m^2.s^{-1}$

Signe	Signification
TCO	Transparent Conductive Oxide
a-Si	Silicium amorphe
CdS	Sulfure de cadmium
SCAPS	Simulateur de capacité de la cellule solaire
CIS	Sélénure de Cuivre et Indium
CIGS	Sélénure de Cuivre et Indium et de Gallium
Mo	Molybdène
Mono-Si	Monocristallin
Poly-Si	Polycristallin
Micro Si	(μ -Si)
Cu	Cuivre
Ga	Galium
In	Indium
P	Phosphore
UR	Ultra-violet
IR	Infra rouge
As	Arséniure
S	Sulfure
Se	Sélénure
Al	Aluminium
Zn	Zinc
O	Oxygène
Mg	Magnésium
Ni	Nickel

Table des matières

Introduction générale.....	12
Chapitre 1 Généralités sur les cellules photovoltaïques.....	14
I Introduction.....	15
I.2. Effet photovoltaïque.....	15
I.2.1. Principe de fonctionnement	15
I.3. Historique.....	16
I.4. Rayonnement solaire.....	18
I.4.1. Les types de rayonnements.....	18
I.5. Cellule photovoltaïque.....	19
I.6. Types des matériaux utilisés pour la fabrication des cellules PV.....	20
I.7. Conclusion	21
Chapitre 2 Les cellules solaires Cu (In, Ga) Se₂.....	22
II.1. Introduction.....	23
II.2. Les cellules solaires à base CIGS	23
II.2.1. Structure d'une cellule solaire CIGS	23
A) Substrat	24
b) Contact métallique arrière.....	24
c) L'absorbeur.....	24
d) Couchetampon.....	25
e) Couche fenêtre.....	25
f) Grille	25
II.2.2. Propriété CIGS	25

II.2.2 .1. Propriété électronique (Dopage).....	25
II .2.2.2. Propriété optique.....	26
II.3. Simulation des cellules solaires.....	26
II. 3. 1. Simulation.....	26
II.4. Utilisation de logiciel SCAPS.....	28
II.4.1. Menu principal (Action panel).....	28
II.5. Présentation de la structure de la cellule solaire.....	29
II.5.1. les paramètres de la cellule solaire	30
II.5.1.1. Les défauts	32
II.5.1.2. Les recombinaisons.....	32
II.6. Conclusion.....	33
Chapitre 3 Résultats de Simulation Et Discussions.....	34
III.1. Introduction.....	35
III.2. Caractéristique électrique de la cellule solaire.....	36
III.2.1. Réfraction molaire.....	36
III.3. Effet de la couche CIGS sur les performances de la cellule solaire	38
III.3.1. Effet de l'épaisseur de la couche en CIGS	38.
III.3.2. Effet du dopage de la couche en CIGS	42
III.4. Effet de la couche CdS sur les performances de la cellule solaire.....	46
III.4.1. L'Effet de l'épaisseur de la couche tampon CdS.....	46
III.4.2. Effet du dopage de la couche en CdS	49
III.5. Structure Optimiser.....	52

III.6. Effet de la température sur les performances de la cellule solaire.....	54
III.7. Effet des résistances série (Rs) et parallèle (Rp) sur et les performances de la cellule solaire.....	56
III.8. Effet des défauts de la couche CIGS sur les performances de la cellule solaire.....	58
III.9. Conclusion.....	60
Conclusion générale	62
Références bibliographiques	65
Liste des figures	
Figure I.1. Phénomène photovoltaïque.....	16
Figure I.2. Le rayonnement solaire	18
Figure I.3. Type de décomposition des ondes.....	19
Figure II.1. Structure standard d'une cellule à base de CIGS.....	24
Figure II.2. Structure de la cellule solaire à hétérojonction (Al-ZnO/ i-ZnO /CdS/CIGS) étudiée.....	29
Figure II.3. Structure d'une cellule solaire à base de (CIGS) utilisé pour la simulation...30	
Figure.III.1. Structure d'une cellule solaire à base de (CIGS) utilisé pour la simulation.....	36
Figure III.2. Caractéristique J(V) de la cellule solaire à base de CIGS sous l'éclairement.....	37
Figure III.3. Influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS (d_{CIGS}) sur la caractéristique J(V).....	40
Figure III.4. Influence de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS (d_{CIGS}) sur les paramètres photovoltaïques : (a) V_{co} , (b) J_{cc} , (c) FF et (d) η	42
Figure III.5. Influence du dopage $N_{A/CIGS}$ sur la caractéristique J(V).....	44

Figure III.6. Influence du dopage NA/CIGS sur les paramètres électriques : V_{co} , J_{cc} , FF et η	46
Figure III.7. Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS (d_{CdS}) sur les caractéristique J-V.....	47
Figure III.8. L'influence de l'épaisseur de la couche tampon d_{CdS} sur les paramètres électriques : V_{co} , J_{cc} , FF et η	48
Figure III.9. Influence de dopage de la couche tampon N_d/CdS sur la caractéristique J-V.....	51
Figure III.10. Caractéristique I-V de structure de référence et optimiser.....	53
Figure III.11. La Variation de facteur de forme et le rendement en fonction de la température.....	54
Figure III.12. La Variation de facteur de forme et le rendement en fonction de défaut (Nt).....	

Liste des tableaux

Tableau I.1. Type des matériaux utilisés pour la fabrication des cellules PV.....	19
Tableau II.1 Paramètres des matériaux en ZnO, CdS et CIGS utilisés dans la simulation de la cellule solaire.....	30
Tableau II.2 Paramètres de la densité de défauts des matériaux en ZnO, CdS et CIGS...31	
Tableau II.3 Paramètres de Recombinaison CIGS.....	31
Tableau III.1 Variation de Energie de gap en fonction de Fraction molaire.....	35
Tableau III.2 La Comparaison entre les résultats de simulations.....	36
Tableau III.3 l'influence de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS (d_{CIGS}) sur Les Paramètres photovoltaïque.....	37
Tableau III.4 L'influence de dopage de la couche d'absorbeur NA/CIGS sur Les Paramètres photovoltaïque.....	40

Tableau III.5 L'influence de l'épaisseur de la couche tampon (d_{CdS}) sur Les Paramètres photovoltaïque.....	43
Tableau III.6 L'influence de dopage de la couche tampon CdS sur Les Paramètres photovoltaïque.....	46
Tableau III.7 Comparaison entre les paramètres de cellule de base et optimiser.....	47
Tableau III.8 L'influence de la température sur Les Paramètres photovoltaïque.....	49
Tableau III.9 L'influence des résistances série (R_s) et parallèle (R_p) sur Les Paramètres photovoltaïque.....	50
Tableau III.10 L'influence des résistances série (R_s) et parallèle (R_p) sur Les Paramètres photovoltaïque de la cellule optimisé.....	51
Tableau III.11 L'influence des défauts de la couche CIGS sur Les Paramètres photovoltaïques.....	51

Introduction Générale

La consommation totale de l'énergie dans le monde est en très forte croissance dans toutes les régions du monde avec une consommation de 81% provenant des combustibles fossiles d'après « International Energy, 2014 ». L'exploitation de ces ressources non renouvelables est le fait que la demande de l'énergie est en augmentation. Notre dépendance actuelle sur ces énergies entraîne des conséquences dévastatrices non seulement ces ressources d'énergie ne sont pas inépuisables mais de plus l'environnement subit une augmentation des émissions de CO₂ liée à la production et à la consommation d'énergie par combustion des fossiles. Si le pendule de la production d'énergie ne se déplace pas vers les énergies renouvelables il y aura des conséquences importantes, les plus évidentes comprennent le réchauffement climatique et la crise économique. Parmi les alternatives aux énergies fossiles l'énergie hydraulique et l'énergie solaire qui demeurent une solution idéale.

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et puissante parmi d'autres énergies renouvelables. On peut profiter de celle-ci, par l'effet photovoltaïque en transformant la lumière en électricité par l'utilisation des cellules photovoltaïques basé sur un effet dit « Effet photovoltaïque ».

Aujourd'hui, Plusieurs technologies sont actuellement développées pour la réalisation de cellules photovoltaïques. Les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents d'une technologie à l'autre, Les cellules solaires qui utilisent le Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) représentent la technologie la plus prometteuse au plan de réduction des coûts de production.

Alors Notre but principal dans ce travail est l'identification des verrous technologiques qui se posent actuellement à la fabrication des cellules photovoltaïques en

couches minces à base de matériaux chalcopyrites CIGS en se focalisant surtout sur l'amélioration du rendement de conversion de ces dispositifs. Pour cela, une étude de simulation d'une structure spécifique de cellule solaire à base de CIGS a été menée dans le but d'obtenir un rendement de conversion électrique optimal. Dans ce travail de simulation, nous utilisons le logiciel Scaps-1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS).

Notre mémoire comporte trois chapitres. Dans la première partie, nous avons présenté des généralités sur les cellules photovoltaïques (définition, étapes de fonctionnement, Type des matériaux utilisés).

Le deuxième chapitre nous avons parlé de structure et propriétés des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) à la fin de ce chapitre nous avons présenté la simulation d'une structure à hétérojonction Al-ZnO/ i-ZnO/CdS/CIGS sous logiciel SCAPS

Dans le dernier chapitre, nous avons utilisé logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles SCAPS dans le but d'optimiser le rendement électrique d'une conception spécifique d'une structure à hétérojonction Al-ZnO/ i-ZnO/CdS/CIGS. Nous avons par la même occasion, déterminé

L'influence des paramètres physiques et technologiques, tels que le dopage et l'épaisseur, températures et résistances ainsi que les défauts de la couche CIGS sur les performances du dispositif. Le travail a été terminé par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les cellules photovoltaïques

I.1. Introduction :

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque....

Dans ce chapitre, on va exposer une généralité sur le domaine photovoltaïque. Après une définition de l'effet photovoltaïque et son principe de fonctionnement, un bref historique ainsi que le rayonnement solaire et la définition des cellules solaires. Nous terminerons par mentionner les Types des matériaux utilisés pour la fabrication des cellules photovoltaïque pour chaque génération.

I.2. Effet photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque provient de « photo » qui signifie lumière, et de « volta » qui signifie électricité, désignant donc la production d'électricité à partir de lumière.

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons en énergie électrique à l'aide de cellules solaires. [1]

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons d'un matériau, qui peut être un métal ou un semi-conducteur, lorsqu'il est éclairé. Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée (la fréquence limite dépend du matériau), alors que leur nombre, qui détermine l'intensité du courant, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse. Deux effets sont à distinguer : l'émission d'électrons proprement dite et la modification de la conductivité du matériau qui donne l'effet photovoltaïque.

I.2.1. Principe de fonctionnement :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. Cette conversion se réalise grâce à la production et au transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Un matériau semi-conducteur comporte deux parties : une zone présentant un excès d'électrons (dopée de type n) et une autre zone, un déficit en électrons (dopée de

Chapitre I Généralités sur les Cellules Photovoltaïques

type p). Lorsque la zone de type n est mise en contact avec la zone de type p, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite (ou gap qui représente la zone inaccessible aux électrons) communiquent leur énergie aux atomes. Chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule. [2]

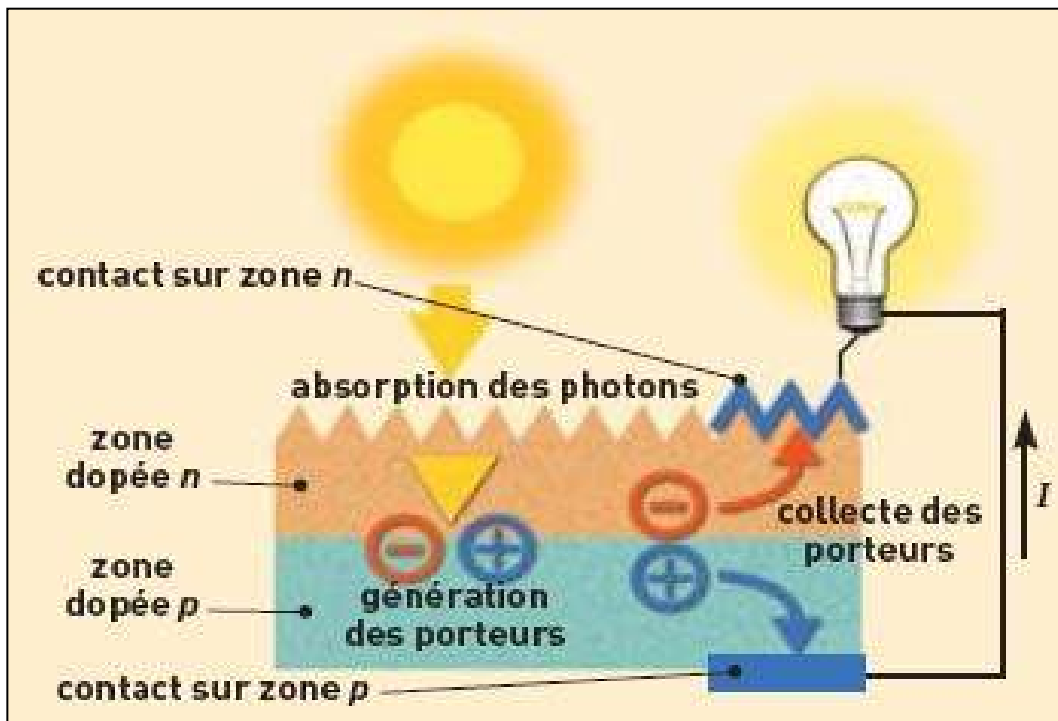


Figure I.1. Phénomène photovoltaïque. [3]

I.3. Historique :

1839 : le français Edmonde Becherel découvre l'effet photovoltaïque

1883 : Fritts réalisa la première cellule photovoltaïque à base de sélénium

1954 : les laboratoires Bell (Etats-Unis) développèrent une cellule à base de silicium ayant un rendement de 6%, Au cours de la même année, les laboratoires de l'armée de l'air américaine publièrent également un rendement de 6% pour une cellule à base de

Cu₂S/CdS

1955 : Hoffman electronics (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W

1958 : Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh

1970 : Première cellule solaire à hétérostructures GaAs élaborée par Alferov, Andree et al. En URSS

1973 : Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu₂S

1980 : La première cellule à base de Cu₂S/CdS délivrant un rendement > 10%

1982 : Première unité de production de 1MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si

1985 : Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire

1994 : Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multi jonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA)

1996 : Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland)

1998 : Cellules couches minces Cu(InGa) Se₂ atteignent un rendement de 19% (NREL, US)

2002 : Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW

2007 : Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA)

2008 : rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm² obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)

2009 : Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA) Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Solarmer Energy Inc., University of California, University of Chicago, USA)[4]

I.4. Rayonnement solaire :

Le soleil dégage une énergie lumineuse de $6,3.10^7 \text{ W/m}^2$. Au-dessus de l'atmosphère l'énergie lumineuse du soleil a été évaluée avec précision à 1366 W/m^2 . Il s'agit de l'irradiance reçue, ou rayonnement solaire instantané, à un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre en incidence normale (c'est-à-dire sur un plan perpendiculaire à la direction du soleil). Cette énergie, qui descend en ligne droite vers la Terre, ne parvient pas en intégralité sur la Terre car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère : par absorption et par diffusion.

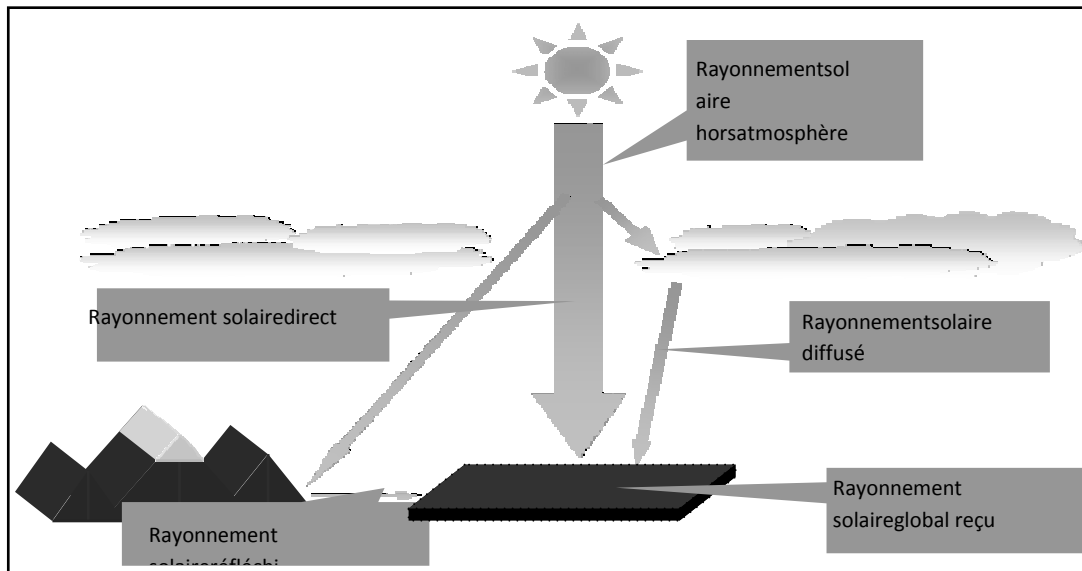


Figure I.2. Le rayonnement solaire.[2]

I.4.1. Types de rayonnements :

Chapitre I Généralités sur les Cellules Photovoltaïques

- Rayonnement solaire direct
- Le rayonnement solaire réfléchi
- Le rayonnement solaire.
- Le rayonnement solaire global[2]

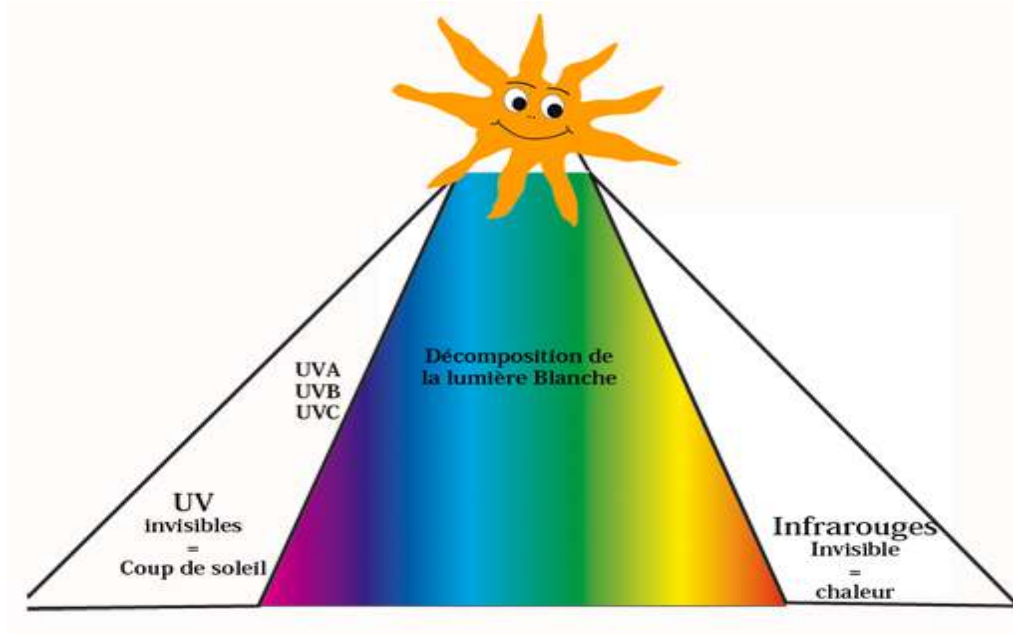


Figure I.3. Type de décomposition des ondes.

Les rayons à ondes longues qui parviennent à la surface de la terre sont principalement [5] :

- Les Ultraviolets A et B (UVA et UVB) - environ 56 %
- La lumière visible - environ 39%
- Les infrarouges (IR) - environ 5%

I.5. Cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est un dispositif électronique destiné à transformer la lumière en électricité, sa structure est basée sur la jonction PN c'est-à-dire est composée de deux couches : une couche P et une couche N.

Chapitre I Généralités sur les Cellules Photovoltaïques

La cellule solaire est basée sur le semi-conducteur qui est en silicium, c'est un convertisseur instantané fournissant de l'énergie électrique s'il reçoit une énergie solaire sous forme de rayonnement.

Se comporte alors comme en génération de courant continue. [6]

I.6. Type des matériaux utilisés pour la fabrication des cellules PV

Génération	Type de matériaux	
1 ^{ère} génération : Silicium cristallin « classique » Épaisseur = 100 à 250µm	A base de Silicium	Monocristallin (Mono-Si)
		Polycristallin (Poly-Si)
		Polycristallin ruban (Poly-Si)
2 ^{ème} génération : Couches minces Épaisseur = de l'ordre de 1µm	A base de Silicium	Amorphe (a-Si)
		Microcristallin (µ-Si)
		Micro morphe (µ-Si/a-Si)
	Autres matériaux	Cuivre-Indium- Sélénium
		Tellure de Cadmium
		Cellules à colorant (TiO ₂)
	Cellules Hybrides	Cellules Hybrides HIT
3 ^{ème} génération :	Organiques	
	Cellules à nanocristaux	
	Pérovskites	

Tableau I.1 Type des matériaux utilisés pour la fabrication des cellules PV [7]

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu sur l'énergie photovoltaïque, le principe de fonctionnement, un bref historique, nous avons présenté aussi les cellules photovoltaïques et cité les types des matériaux utilisés pour leur fabrication pour chaque génération (1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} génération).

On n'en déduit que le meilleur rendement est porté par les cellules au silicium monocristallin (entre 14% et 16% pour les cellules industrielles), mais pour des raisons économiques et le coût faible du silicium multicristallin (Polycristallin) cette technologie est devenue actuellement la plus utilisée. D'autres technologies récentes des cellules solaires en couches minces CIGS offrent un potentiel important en termes d'amélioration du rendement tout en réduisant les coûts de fabrication, ces cellules feront l'objet de notre étude dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

Les cellules solaires Cu (In, Ga) Se₂

II.1. Introduction

La filière photovoltaïque à base de couches minces de diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe₂ noté CIS) et de ses alliages avec du gallium ou/et du soufre (Cu (In, Ga) (S, Se)₂). Depuis son développement initial été considérée comme prometteuse pour les cellules solaires en raison de ses propriétés électroniques et optiques favorables. [8]

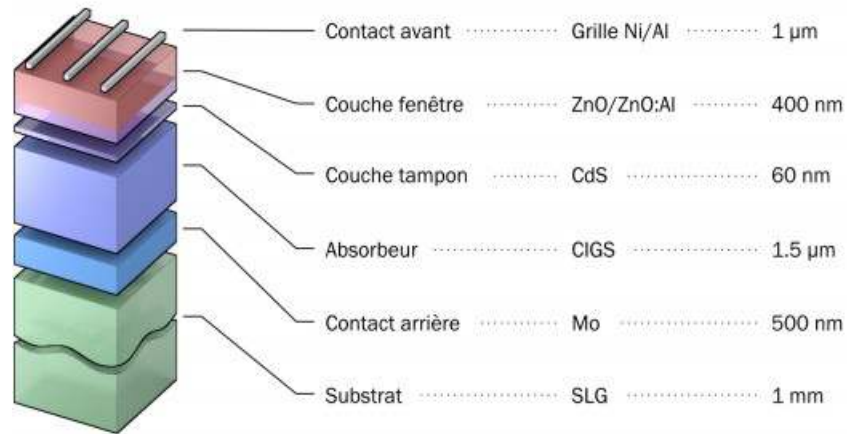
Dans notre étude nous avons simulé une structure de cellule solaire réalisée à base de couches minces Cu (In, Ga) Se₂ et nous avons simulé ses paramètres physiques et électriques par le logiciel unidimensionnel appelé SCAPS alors Dans ce chapitre nous décrivons la structure d'une cellule solaire à base de CIGS, le rôle et les caractéristiques des différentes couches constituant la cellule. Ensuite nous présentons les propriétés fondamentales du matériau CIGS. Enfin nous présentons le logiciel SCAPS et sa façon d'utilisation.

II.2. Les cellules solaires à base CIGS

Parmi les convertisseurs solaires de 2ème génération, la technologie des cellules solaires en couches minces basée sur un absorbeur de Cu (In, Ga) Se₂ est la plus prometteuse. Ces cellules ont récemment atteint un rendement de conversion photovoltaïque supérieur à 20% en laboratoire [9]. Elles se composent d'un empilement de cinq couches polycristalline [10]

II.2. 1. Structure d'une cellule solaire CIGS

Dans sa configuration la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. Ce dernier est généralement une plaque de verre sodo-calcique (Soda-Lime Glass, SLG).



LaFigure II.1 : Structurestandardd'unecelluleà base deCIGS [11]

a) Substrat :

Le substrat est le support permettant la tenue mécanique des différentes couches, dont l'empilement ne dépasse pas quelques micromètres d'épaisseur. Il doit répondre à différents critères chimiques et mécaniques, qui le rendent apte à suivre toutes les étapes de fabrication de la cellule, sans en détériorer la qualité, tout en ayant un coût limité. Il existe trois catégories de substrat : le verre, les métaux, et les polymères. Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodocalcique, qui présente toutes les propriétés requises. [12]

b) Contact métallique arrière:

La première couche déposée sur le substrat est l'électrode de contact arrière. Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule. D'un point de vue électrique, elle constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque. Cette couche est composée de molybdène (Mo) et son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt la plus utilisée pour le contact arrière est la pulvérisation cathodique.

c) L'absorbeur:

La couche située directement au-dessus du contact arrière est composée du matériau absorbant, le CIGS. Il s'agit d'un semi-conducteur de type p qui forme la

première partie de l'hétérojonction p-n. C'est aussi dans ce matériau que la majorité des photons est absorbée pour former les paires électron-trou. Son épaisseur est d'environ 1 µm à 2 µm.

d) Couche tampon :

L'hétérojonction p-n avec le CIGS est formée en ajoutant une couche appelée couche tampon. Cette dénomination provient du fait qu'elle joue aussi un rôle de protection physique du

CIGS lors du dépôt par pulvérisation cathodique des couches suivantes [12].

Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de sulfure de cadmium (CdS). Aussi, c'est le matériau le plus utilisé. Cependant, en raison de la toxicité du cadmium, d'importants efforts sont tournés vers le développement de couches tampon alternatives (Zn(O, S), (Zn, Mg) O, In₂(S, Se)₃, etc.).

e) Couche fenêtre:

La couche tampon est recouverte d'une couche fenêtre (Windows Layer). Cette couche est composée d'un dépôt d'oxyde de zinc (ZnO) et d'un dépôt d'oxyde transparent conducteur (Transparent Conducting Oxide, TCO). La couche de ZnO est résistive et sert à limiter la formation de court-circuit dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon [13]. Les TCO les plus utilisés sont le ZnO dopé aluminium (ZnO : Al) et l'oxyde d'indium et d'étain (Indium Tin Oxide, ITO) déposés par pulvérisation cathodique. Le TCO permet à la couche fenêtre de constituer en partie le contact avant de la cellule photovoltaïque tout en étant transparente au rayonnement solaire, ce dernier devant être absorbé dans la couche de CIGS. L'épaisseur de la couche fenêtre est de l'ordre de 300 nm à 500 nm.

f) Grille :

Le contact avant final est réalisé en ajoutant à l'empilement une grille qui collectera les charges générées par le dispositif. Cette grille est composée d'une couche de nickel et d'une couche d'aluminium. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Alliée à la présence sous-jacente du TCO.

II.2.2 Propriété CIGS

II.2.2 .1. Propriété électronique

Le CuInSe₂ et le CuGaSe₂ sont des matériaux semi-conducteurs possédant respectivement des gaps directs de 1.035 eV et 1.68 eV. Cette différence est majoritairement liée à une différence de minimum de la bande de conduction (E_C) [14].

Le ratio $x = [Ga]/([In]+[Ga])$ détermine le taux d'atomes de gallium qui remplacent les atomes d'indium dans la structure. La largeur de la bande interdite du CIGS varie en fonction de x entre les valeurs du pur CIS et du pur CGS, suivant la loi empirique suivante [15]:

$$E_g = 1.01 + 0.626x + 0.167x(1 - x) \quad (II.1)$$

Le CIGS est donc un matériau dont E_g peut être ajusté entre 1.035 eV et 1.68 eV en fonction du taux de gallium. La valeur optimale de E_g dépend de plusieurs facteurs. Du point de vue de l'absorption des photons, il est préférable d'avoir une valeur de E_g réduite, permettant d'absorber un spectre plus large (plus grandes longueurs d'onde). Il en résulte un courant plus important délivré par la cellule solaire (J_{cc}). Cependant, c'est la valeur de E_g qui détermine la tension maximale délivrée par la cellule. Afin de maximiser le rendement de conversion, il est donc nécessaire d'obtenir un compromis idéal entre courant et tension. La plupart des résultats expérimentaux publiés dans le domaine des cellules CIGS montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un gap d'environ 1.2 eV [16], ce qui correspond à un taux de Ga proche de 30%.

II.2.2 .2. Propriété optique

Si le CIGS est utilisable dans des dispositifs photovoltaïques en couches minces, c'est parce qu'il possède un gap direct. De ce fait, l'absorption des photons ayant une énergie proche du gap nécessite pas l'intervention de phonon et il en résulte un coefficient d'absorption optique α élevé (comparé à un semi-conducteur à gap indirect comme

lesilicium). Pour une énergie de photon h donnée, le coefficient d'absorption vaut approximativement [17]:

$$\alpha(h\nu) = \frac{A}{h\nu} \sqrt{h\nu - E_g} \quad (\text{II.2})$$

Cette relation illustre clairement l'influence du gap sur la plage d'énergies dans laquelle le CIGS absorbe.

α : coefficient d'absorption

E_g : l'énergie de gap (eV)

$h\nu$: énergie de photon (eV)

A : une constante de proportionnalité

II.3. Simulation des cellules solaires

II.3.1. Simulation

L'étude de la plupart des dispositifs à semi-conducteurs est basée sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique. L'équation de Poisson définit la relation entre le potentiel et la densité des porteurs

$$\Delta V = \frac{-q}{\epsilon} (N_d - N_a + p - n) \quad (\text{II.3})$$

Où :

ϵ : est la constante diélectrique (F/cm)

V : le potentiel (V)

q : est la charge élémentaire d'électrons (A. s)

N_d et N_a : sont les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisées (cm⁻³)

n et p sont les densités des porteurs (C/cm)

L'évolution temporelle des densités de porteurs obéit aux équations de continuité pour

Respectivement les électrons et les trous :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - U_n + \frac{1}{e} \text{div} \vec{j}_n \quad (\text{II.4})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G - U_p + \frac{1}{e} \text{div} \vec{j}_p \quad (\text{II.5})$$

Où :

G et U : sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs, et sont respectivement les densités de courant des électrons et des trous.

Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle d'entraînement-diffusion. Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le premier correspond à l'entraînement des charges par le champ électrique et le second correspond à la diffusion des porteurs.

$$\vec{j}_n = qn \mu_n \vec{E} + q D_n \overrightarrow{\text{grad}} n \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{j}_p = qp \mu_p \vec{E} + q D_p \overrightarrow{\text{grad}} p \quad (\text{II.6})$$

Où : D_n et D_p : sont les coefficients de diffusion.

II.4. Utilisation du logiciel SCAPS

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve [18]. [19].

Afin de simuler et contrôler tous 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.

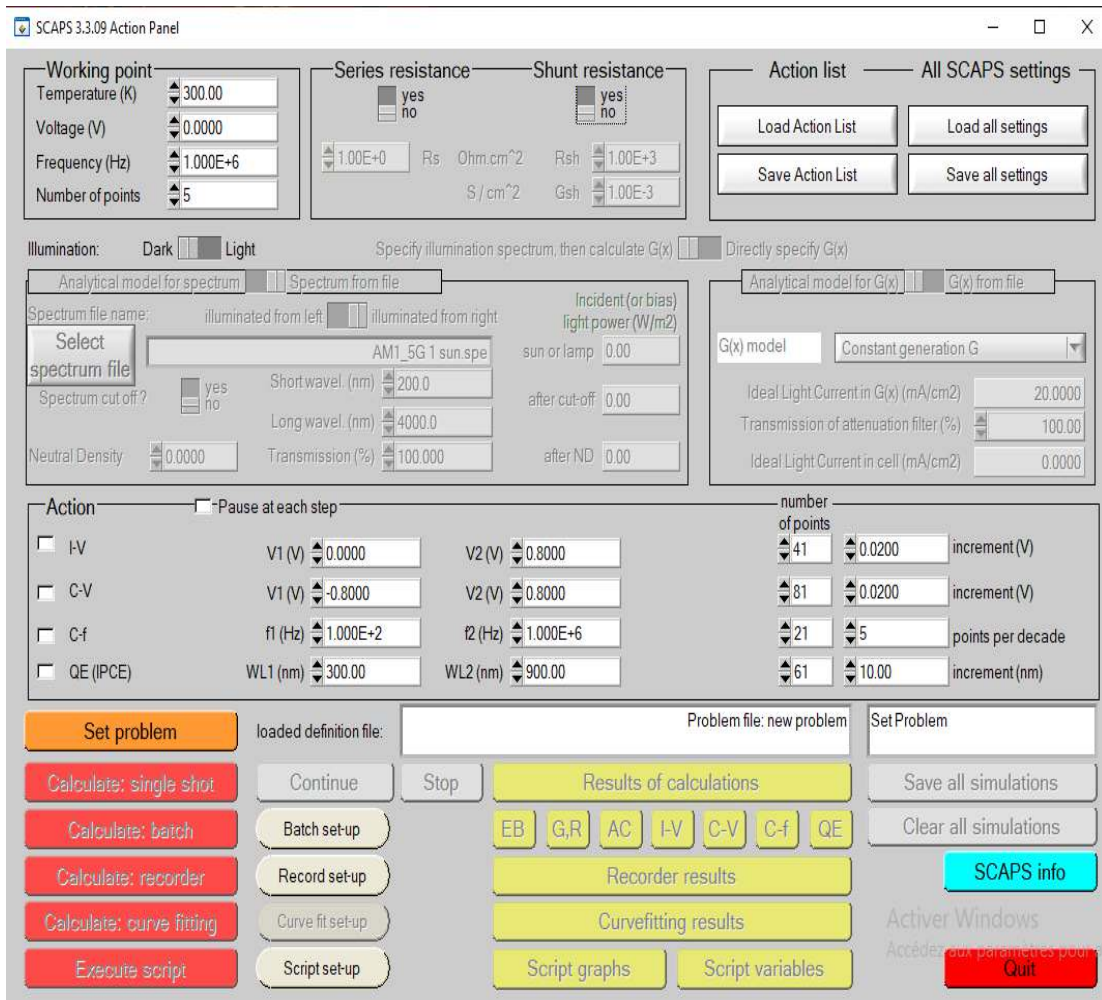


Figure II.2. Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

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

Notre travail consiste à modéliser une cellule solaire à base de CIGS et à simuler ces paramètres électriques, optiques afin de concevoir une cellule ayant le rendement électrique optimal. Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée des hétérojonctions suivantes : ZnO /CdS /CIGS/ Mo/verre. Le schéma simplifié de l'hétérostructure est représenté sur les couches semi-conductrices CIGS (absorbeur), CdS (tampon) et ZnO (fenêtre), ont fait l'objet de notre étude dans les modèles numériques pour voir l'influence de celles -ci sur les performances électriques de la cellule solaire

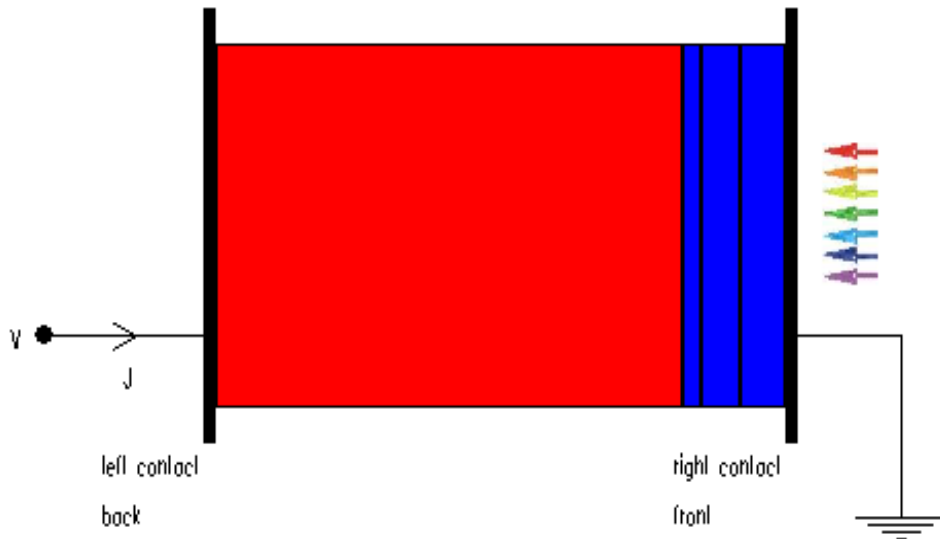


Figure II-3 : Structure de la cellule solaire à hétérojonction (Al-ZnO/ i-ZnO /CdS/CIGS) étudiée.

II. 5. 1 les paramètres de la cellule solaire :

Les paramètres des matériaux en ZnO, CdS et CIGS utilisés dans la simulation de la cellule solaire sont reportés de la littérature [13] [14] et sont groupés dans le tableau II.1.

Région	Al- ZnO	i-ZnO	CdS	CIGS
Paramètres des matériaux				
Epaisseur (µm)	0.100	0.08	0.04	1
E_g(eV)	3.3	3.3	2.4	1.15
N_C (cm⁻³)	2.2X10 ¹⁸	2.2X10 ¹⁸	2.2X 10 ¹⁸	2.2X 10 ¹⁸
N_V (cm⁻³)	1.8X 10 ¹⁹	1.8X 10 ¹⁹	1.8X 10 ¹⁹	1.8 X10 ¹⁹
Mobilité des électrons (cm²/V. s)	1.5X10 ²	1.5X10 ²	1 X10 ²	1 X10 ²
Mobilité des trous (cm²/V. s)	2.5 X10	2.5 X10	2.5 X10	2.5 X10
Permittivité	9	9	10	13.6
Affinité électronique (eV)	4.6	4.6	4.2	4.5
La vitesse thermique des électrons (cm/s)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷
La vitesse thermique des trous (cm/s)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷
Coefficient d'absorption (cm⁻¹)	Fichier Data Scaps	Fichier Data Scaps	Fichier Data Scaps	Fichier DataScaps

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 :

Chapitre II Cellules solaires à base de CuInGaSe2

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 [20]. [21].

	Al-ZnO	i-ZnO	CdS	CIGS
$N_{DG}, N_{(AG)}(\text{cm}^{-3})$	D : 1×10^{20}	D : 1×10^{20}	D : 10^{17}	A : 2×10^{16}
$E_A, E_D(\text{ev})$	Milieu du gap	Milieu du gap	Milieu du gap	Milieu du gap
$W_G(\text{ev})$	0.1	0.1	0.1	0.1
$\sigma_n(\text{cm}^2)$	5.6×10^{-3}		5.6×10^{-3}	1.1×10^1
$\sigma_p(\text{cm}^2)$	5.6×10^{-3}		5.6×10^{-3}	5.6×10^3

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

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 de 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. 6. Conclusion

La technologie photovoltaïque à couche mince, en particulier le CIGS, est une technologie clé pour faire partie des technologies futures du photovoltaïque et présente un potentiel important pour de futurs développements technologiques. Les modules à couche mince CIGS ont de plus en plus d'investissements dans l'industrie solaire

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 ont permis de bien comprendre le fonctionnement du logiciel et de l'exploiter par la suite dans notre simulation. Ainsi qu'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.

Chapitre III

**Résultats de Simulation
Et Discussions**

III.1. Introduction :

Dans le but d'optimiser une conception spécifique d'une structure d'hétérojonction Al-ZnO/i-ZnO/CdS/CIGS, nous devons analyser et interpréter les résultats pour déterminer l'influence des paramètres physiques et technologiques sur les performances du dispositif

Dans le travail qui suit nous allons étudier l'effet des deux couches CdS et CIGS, l'effet de la température sur le rendement de conversion électrique ainsi que l'effet des résistances série (R_s) et parallèle (R_{sh}) et défauts de la couche CIGS sur les performances de la cellule solaire telle que la densité de courant du court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η) Pour cela Nous avons simulé ses paramètres électriques, afin de concevoir une cellule ayant un rendement électrique maximal.

La Figure III-1représente notre structure à étudier, c'est une cellule à simple hétérojonction N+ P dont le schéma de principe, elle est constituée, principalement, A l'arrière de la jonction, le substrat est ici du verre sodo-calcique et le molybdène forme le contact ohmique arrière recueillant les trous. La couche de $1\mu\text{m}$ de CIGS permet d'absorber la lumière. Sur cet absorbeur, une couche de 40 nm de CdS (appelée couche tampon, faiblement dopée n) réalise la jonction. Une couche de ZnO intrinsèque de 200 nm de haute résistivité s'intercale en général entre le CdS et le ZnO dopé. Selon Rau et al. [22], elle permet une limitation des pertes électriques dues aux inhomogénéités dans l'absorbeur, en empêchant les défauts du CIGS de dominer la V_{co} . Puis une couche d'oxyde de zinc dopé aluminium ($0.2\mu\text{m}$), donc fortement dopée n, forme la fenêtre avant, conductrice, et transparente, pour récupérer les électrons. Un contact ohmique.

Toutes les données et les paramètres d'entrée comme {L'épaisseur, dopage, les résistances série (R_s) et parallèle (R_{sh}), les défauts} utilisées dans cette étude sont tirées depuis sources scientifiques

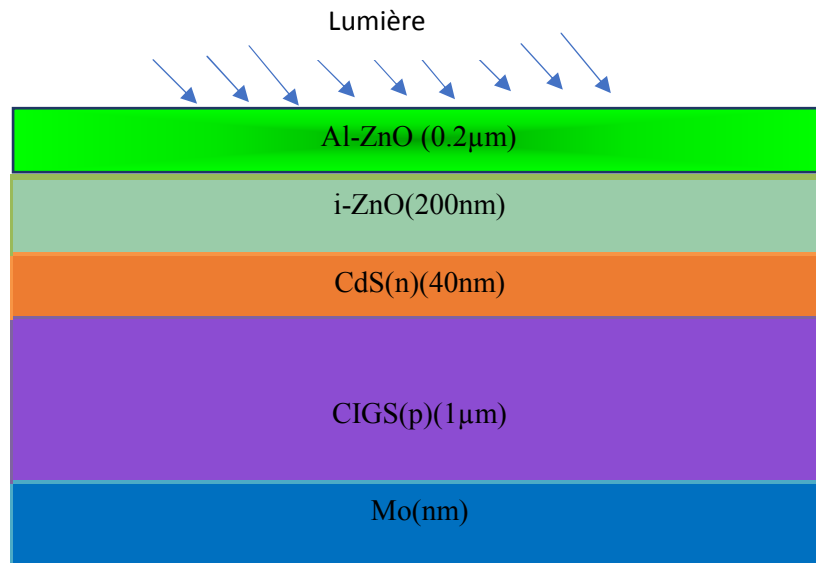


Figure III-1. Structure d'une cellule solaire à base de CIGS utilisée pour la simulation

III.2. Caractéristique électrique de la cellule solaire

III.2.1 Réfraction molaire

Le composé quaternaire $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) est caractérisé par une bande interdite qui varie avec la composition en Ga. La fraction molaire $x = \text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$ modifie la largeur de la bande interdite (gap) suivant l'équation suivante [23].

$$E_g(x) = 1.010 + 0.626x - 0.167x(1-x) \quad (\text{III.1})$$

La fraction molaire x de la couche en CIGS a une valeur optimale autour de 0.31 correspondant à une énergie du gap de 1.16 eV [24] donc l'énergie optimale de l'énergie de gap est 1.15 eV avec x égal à 0.28

Fraction molaire(%)	0	0.1	0.28	0.31	0.48	0.65	0.88	1
Energie de gap (eV)	1.01	1.01	1.15	1.17	1.26	1.37	1.52	1.64

Tableau (III.1) Variation de l'énergie de gap en fonction de la fraction molaire

La caractéristique électrique $J(V)$ de la cellule solaire en CIGS illumination par la densité de puissance 100 mW/cm^2 est représentée sur la Figure III-2. La densité du courant de court-circuit $J_{cc} = 37.5715 \text{ mA/cm}^2$, la tension en circuit ouvert $V_{co} = 0.6410 \text{ V}$, le facteur de forme $FF=78.571\%$ et le rendement de conversion $\eta=18.92\%$

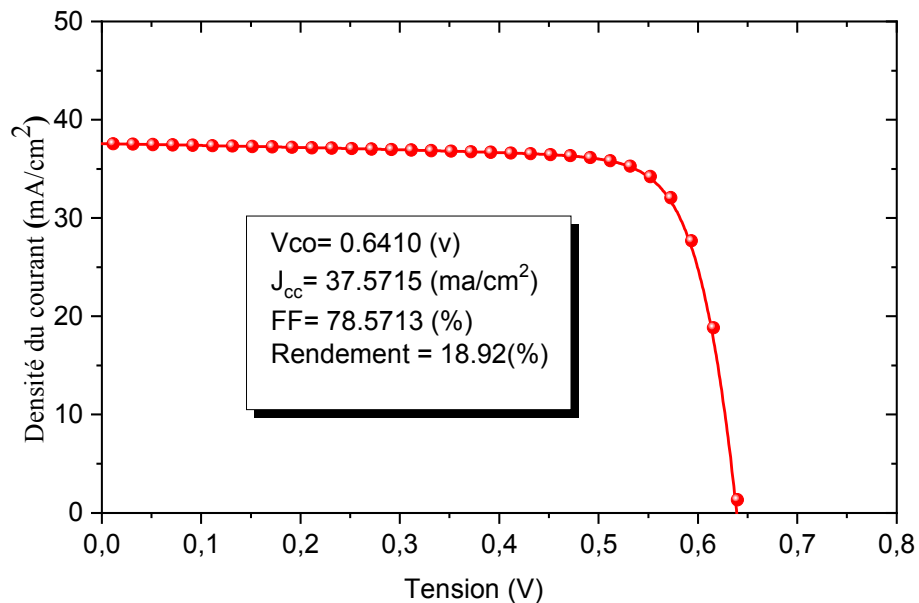


Figure III-2. Caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire à base de CIGS sous l'éclairage. Les résultats que nous avons obtenus sont en très bon accord avec ceux trouvés expérimentalement et par simulation, ils sont représentés dans le tableau III.2 suivants

Paramètres externe	Simulation Scaps Notre travail	Simulation Silvaco [25]	Expérimental [26]
V_{co} (mV)	0.6410	0,68	0.752
J_{cc} (mA/cm ²)	37.57	36.91	31.2
FF (%)	78.57	0,80	77.73
η (%)	18.92	20,10	18.3

Tableau (III.2) : Comparaison entre les résultats de simulations.

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 (d_{CIGS}) entre 1 μm et 4 μm [27]

pour voir son influence sur les paramètres électriques et les paramètres d'entrée sont

$$R_s = 2.3 \times 10^{-1} (\Omega \cdot \text{cm}^2), R_{sh} = 2.77 \times 10^{20} (\Omega \cdot \text{cm}^2), G_{sh} = 1.14 \times 10^{-21}$$

, $E_g = 1.15 \text{ eV}$, $T = 300 \text{ K}$, l'épaisseur CdS = 40 nm ; dopage NA/CIGS = $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; dopage Nd/CdS = $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Le tableau suivant III.3 résume les différentes caractéristiques de la structure pour différentes épaisseurs :

d(μm)	1	2	3	4
Paramètres				
V _{co} (V)	0.641	0.653	0.655	0.655
J _{cc} (mA/cm ²)	37.571	38.989	39.310	39.394
FF (%)	78.571	79.219	79.297	79.300
V _{max} (V)	0.545	0.557	0.559	0.560
J _{max} (mA/cm ²)	34.672	36.207	36.506	36.582
P _{max} (mW)	18.896	20.167	20.406	20.485
Rendement (%)	18.92	20.17	20.43	20.49

Tableau III.3: l'influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS (d_{CIGS}) sur les Paramètres photovoltaïque

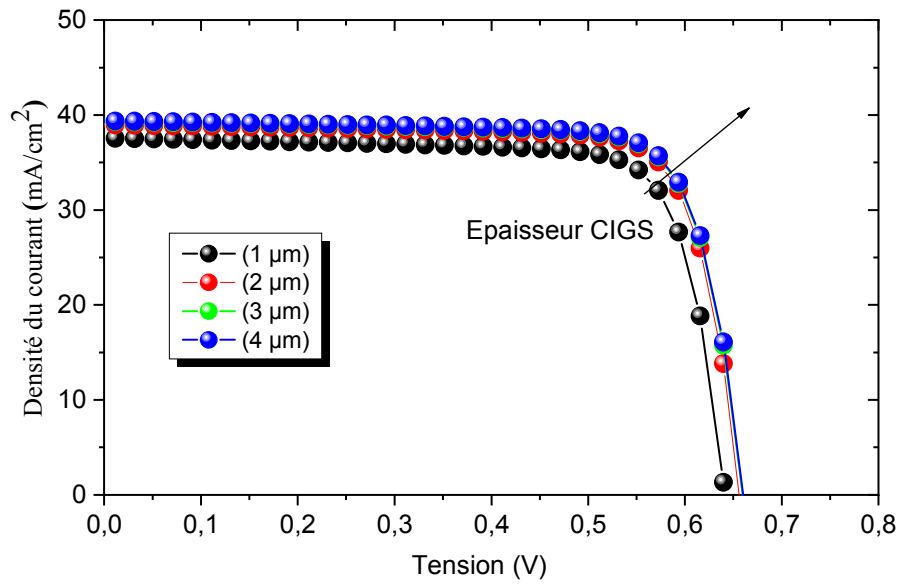
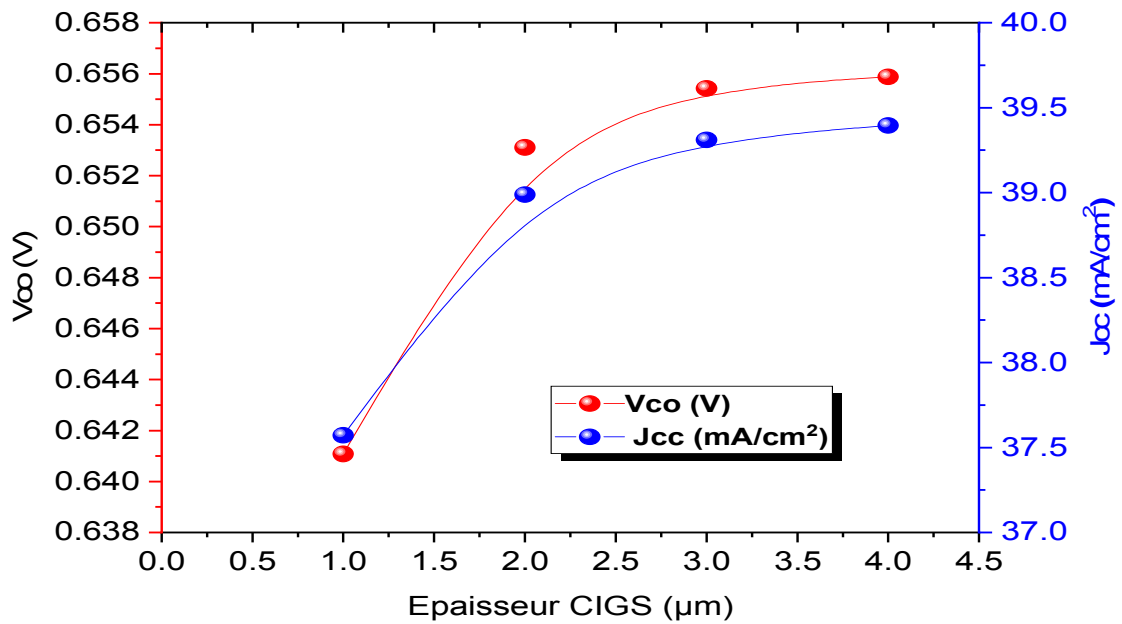


Figure III-3. Influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS (d_{CIGS}) sur la caractéristique $J(V)$.



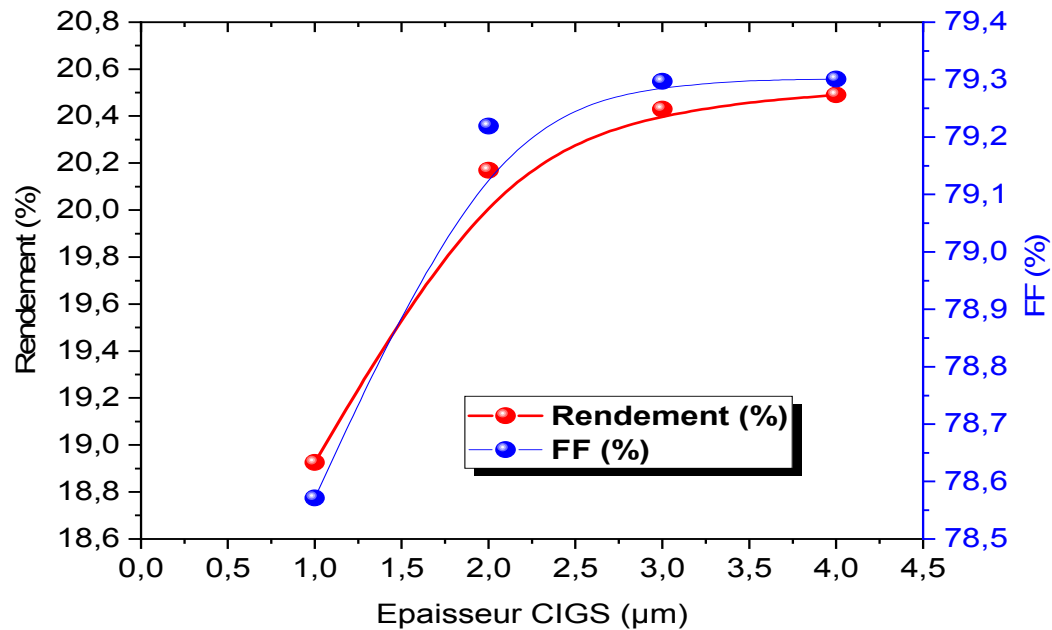


Figure III-4. Influence de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS (d_{CIGS}) sur les paramètres photovoltaïques : (a) V_{co} , (b) J_{cc} , (c) FF et (d) η .

La figure III-3et la figure III-4 représentent respectivement l'influence de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS (d_{CIGS}) sur les caractéristique J-V et la Variation du courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert et le factor de forme et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS (d_{CIGS}). Nous remarquons une augmentation progressivement dans les paramètres (V_{OC} , J_{CC} , FF, η) avec l'augmentation de l'épaisseur. Dans le rendement on a obtenu la valeur 20.43 % avec une épaisseur 3 μm mais le meilleur rendement est 20.49 % correspondant à une épaisseur de 4 μm de la couche absorbante.

Plus l'épaisseur de cette couche augmente, plus de photons ayant des longueurs d'onde plus longues peuvent être collectées dans la couche absorbante [28]. Par la suite, ceci contribuera à plus de génération de paires d'électron-trou et par conséquent une augmentation de la tension en circuit ouvert et du courant de court-circuit. L'accroissement de V_{co} et J_{SC} engendre une augmentation du rendement de conversion de la cellule solaire. Une couche absorbante très mince signifie physiquement que le

contact en arrière et la région de déplétion sont très proches, ce qui favorise la capture d'électrons par ce contact. Cette forme de processus de recombinaison est préjudiciable aux performances de la cellule car il affecte V_{co} , J_{SC} et le rendement de conversion.

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

Pour voir l'influence du dopage de l'absorbeur CIGS ($4 \mu\text{m}$) 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 $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ et $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$. 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-5 et III-6 et récapitulés dans le Tableau (III.4), On note que L'épaisseur CIGS = $4 \mu\text{m}$; L'épaisseur CdS = 40nm et le dopage $N_d/\text{CdS} = 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$

Dopage N_A/CIGS (cm^{-3})	2×10^{14}	2×10^{15}	<u>2×10^{16}</u>	4×10^{16}	1×10^{17}
Paramètres					
V_{co} (V)	0.569	0.617	0.655	0.666	0.682
J_{cc} (mA/cm^2)	41.678	40.927	39.394	38.333	36.083
FF (%)	77.384	78.086	79.300	78.274	66.825

Les résultats de simulation sont récapitulés dans le tableau :

V _{max} (V)	0.474	0.561	0.560	0.564	0.514
J _{max} (mA/cm ²)	38.737	38.232	36.582	35.423	31.962
P _{max} (mW)	18.361	21.448	20.485	19.978	16.428
Rendement (%)	18.36	19.73	<u>20.49</u>	20.01	16.44

Tableau (III.4) : l'influence du dopage de la couche d'absorbeur NA/CIGS sur Les Paramètres photovoltaïque

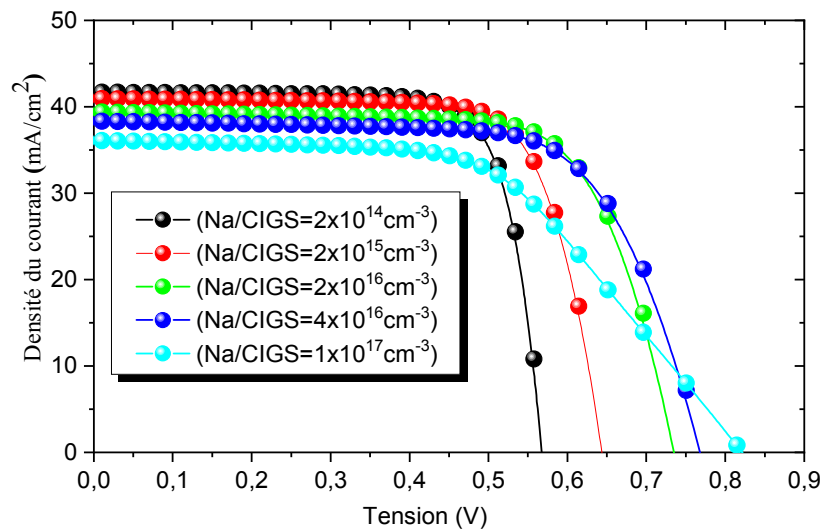


Figure III-5. Influence de la densité de dopage $N_{A/CIGS}$ sur la caractéristique J(V).

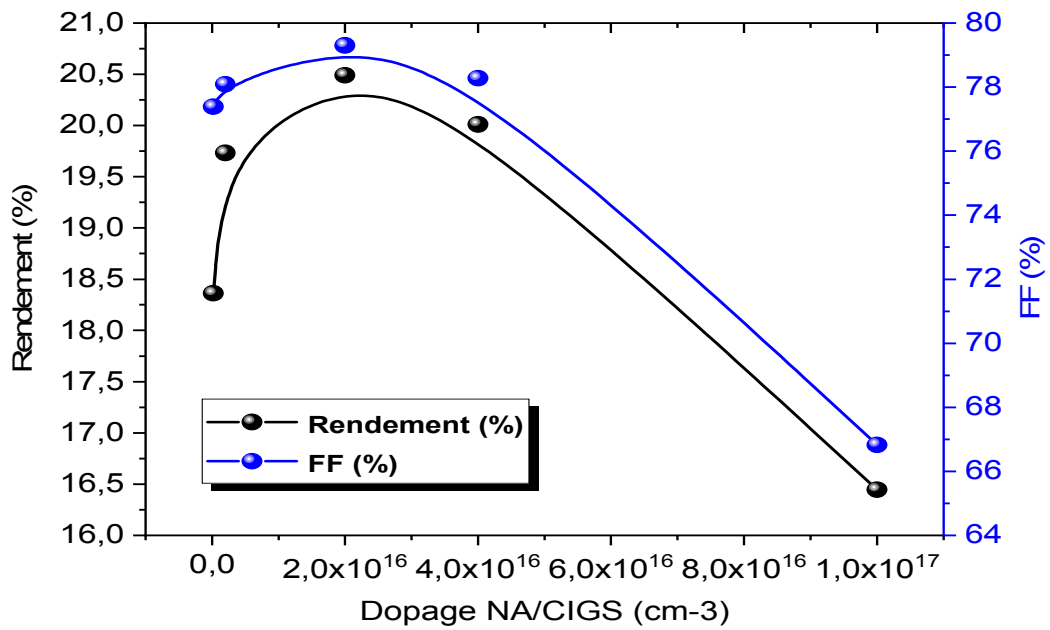
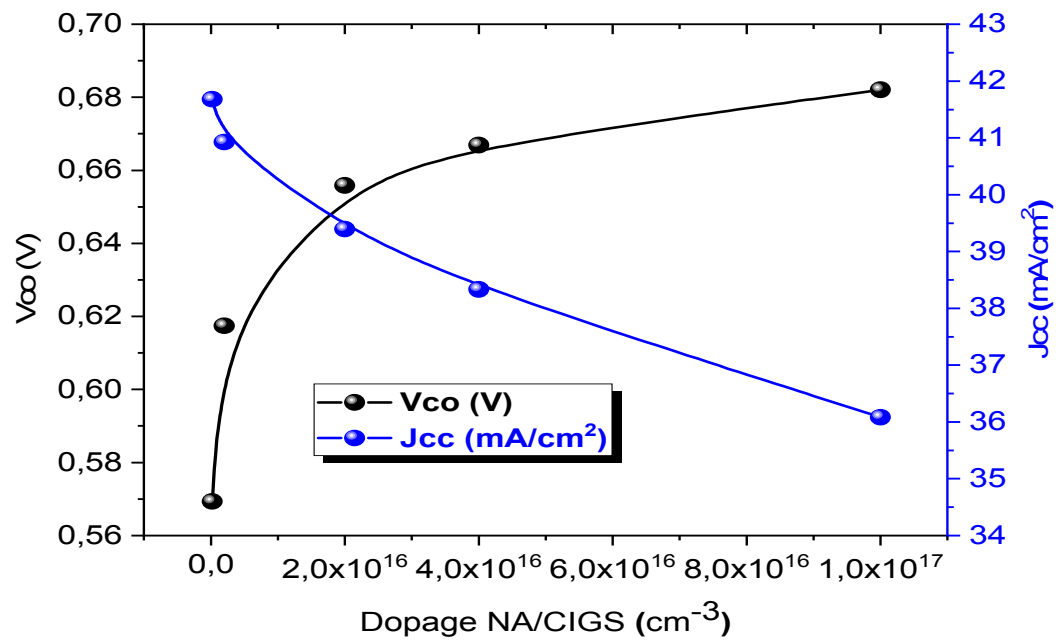


Figure III-6. Influence du dopage NA/CIGS sur les paramètres électriques : V_{co} , J_{cc} , FF et η

La figure (III-6) représente l'influence de dopage NA/CIGS sur les paramètres électriques : V_{co} , J_{cc} , FF et η . On constate que l'augmentation de la tension de circuit-ouvert dû à l'augmentation de dopage NA/CIGS, par exemple à $NA=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ on aura $V_{co}=0.6558 \text{ V}$ et pour $NA=1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ on obtient $V_{co}=0.6820 \text{ V}$, soit une variation de $\Delta V_{co}=0.0262 \text{ V}$. On remarque par contre, que la densité de courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de dopage NA/CIGS. Par exemple à $NA=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, le J_{cc} est de 39.394 mA/cm^2 et pour $NA=1 \times 10^{17}$ il est de 36.0834 mA/cm^2 avec une variation de $\Delta J_{cc} = 3.3115 \text{ mA/cm}^2$.

Nous remarquons aussi que le rendement et FF subit une augmentation pour un dopage entre $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ et $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ mais commence à diminuer quand on augmente la concentration du dopage au-delà de $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Le rendement le plus élevé est obtenu à la concentration de $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

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.

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 d_{CdS} de 20 à 100 nm tandis que l'épaisseur de la couche en CIGS est maintenue constante $4 \mu\text{m}$ sur la caractéristique $J(V)$ est illustrée sur la figure III-7. On note que l'épaisseur CIGS $= 4 \mu\text{m}$; dopage NA/CIGS $= 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; dopage ND/CdS $= 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques de la structure pour différentes épaisseurs. :

Epaisseur CdS (nm) Paramètres de sortie	<u>20</u>	40	60	80	100
V _{co} (V)	0.656	0.655	0.655	0.654	0.654
J _{cc} (mA/cm ²)	39.829	39.399	38.657	37.855	37.294
FF (%)	79.734	79.300	79.314	79.794	79.979
V _{max} (V)	0.561	0.560	0.561	0.561	0.561
J _{max} (mA/cm ²)	37.127	36.582	35.818	35.199	34.744
P _{max} (mW)	20.828	20.485	21.093	19.746	19.491
Rendement (%)	<u>20.84</u>	20.49	20.10	19.77	19.51

Tableau (III.5) : l'influence de l'épaisseur de la couche tampon (d_{CdS}) sur Les Paramètres photovoltaïque

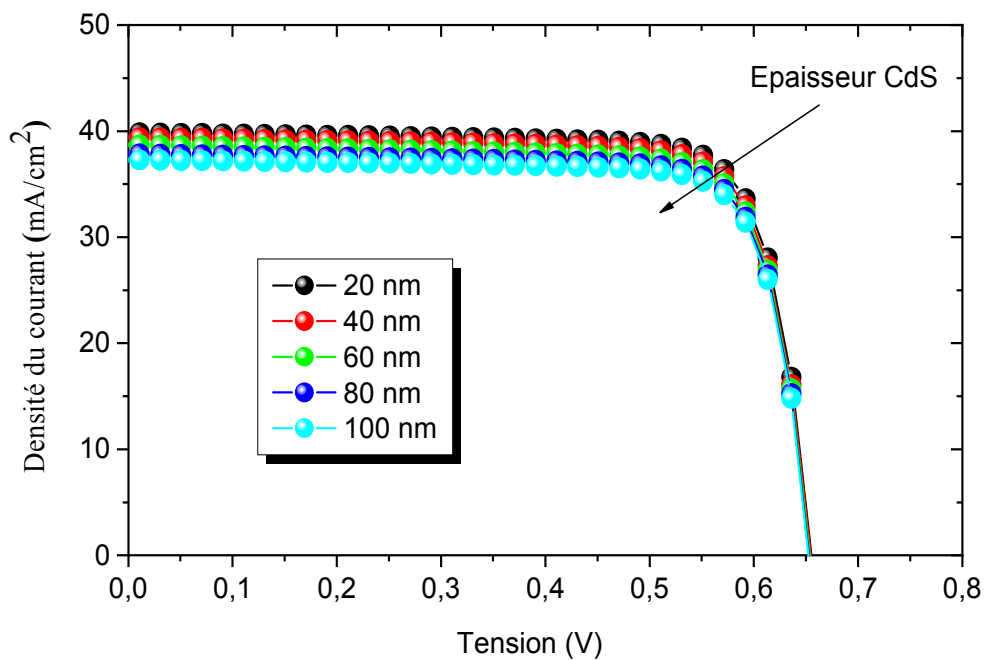
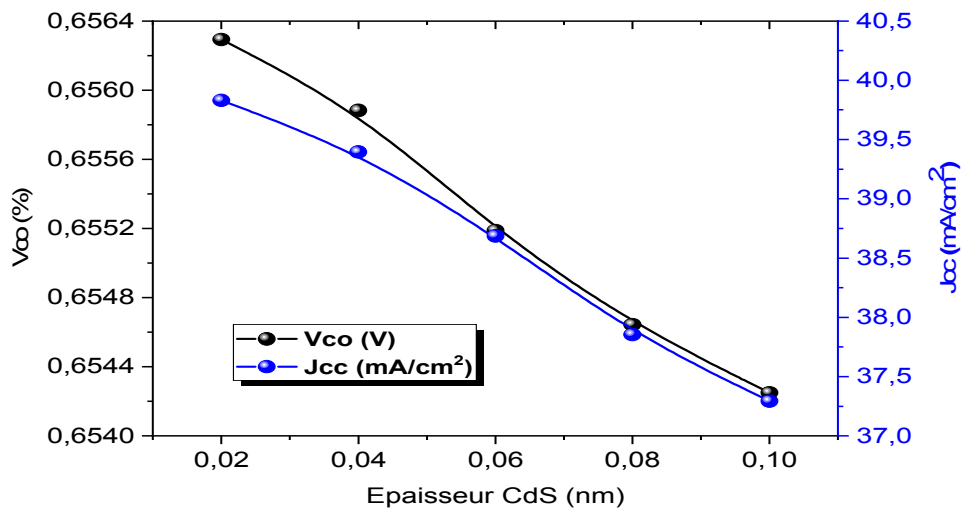


Figure III-7. Influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS(d_{CdS}) sur les caractéristique J-V.



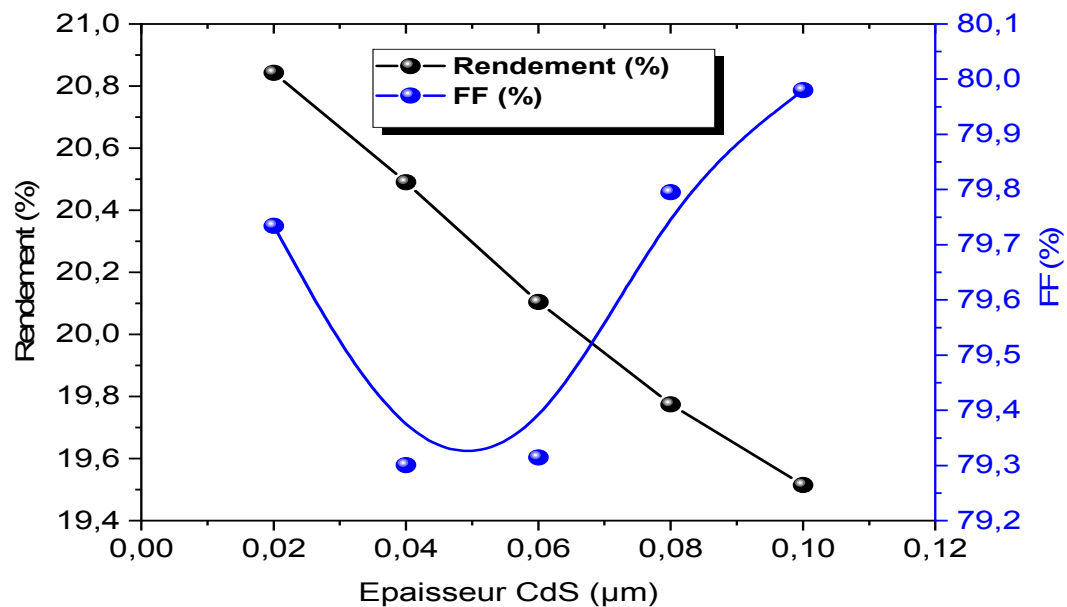


Figure III-8 : L'influence de l'épaisseur de la couche tampon d_{CdS} sur les paramètres Paramètres photovoltaïque

Les résultats de simulations présentés dans la figure III-8 et récapitulés dans le tableau III.5 montrent une diminution des performances de la cellule avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche tampon CdS. Ceci est dû à la faible longueur de diffusion des porteurs minoritaires (trous) de la couche n par rapport aux porteurs minoritaires (électrons) de la couche p. Lorsque l'épaisseur augmente, un grand nombre des photons sont absorbés dans la couche n avant d'être arrivés à la couche p, ce qui diminue l'absorption dans la couche p. D'où, on choisit une épaisseur de la couche n qui soit la plus faible possible et qui est prise dans notre cas égale à 20 nm.

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

Les figures III-9 représentent respectivement la caractéristique I-V de notre cellule photovoltaïque pour une gamme de dopage de couche tampon CdS allant de 10^{15} cm^{-3} jusqu'à 10^{19} cm^{-3} . L'épaisseur CIGS = 4 μm ; L'épaisseur CdS = 20 nm ; dopage NA/CIGS = $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Les résultats de simulation sont récapitulés dans le tableau :

Paramètres de sortie \ Dopage CdS (cm^{-3})					
	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}
Vco (V)	0.656	0.656	0.656	0.655	0.655
Jcc (mA/cm^2)	39.810	39.808	39.829	39.651	39.380
FF (%)	79.234	79.301	79.730	80.378	80.380
Vmax (V)	0.557	0.558	0.561	0.562	0.562
Jmax (mA/cm^2)	37.110	37.113	37.127	37.152	36.913
Pmax(mW)	20.607	20.709	20.828	20.879	20.745
Rendement (%)	20.70	20.72	20.84	<u>20.90</u>	20.77

Tableau (III.6) : l'influence du dopage de la couche tampon CdS sur Les Paramètres photovoltaïques

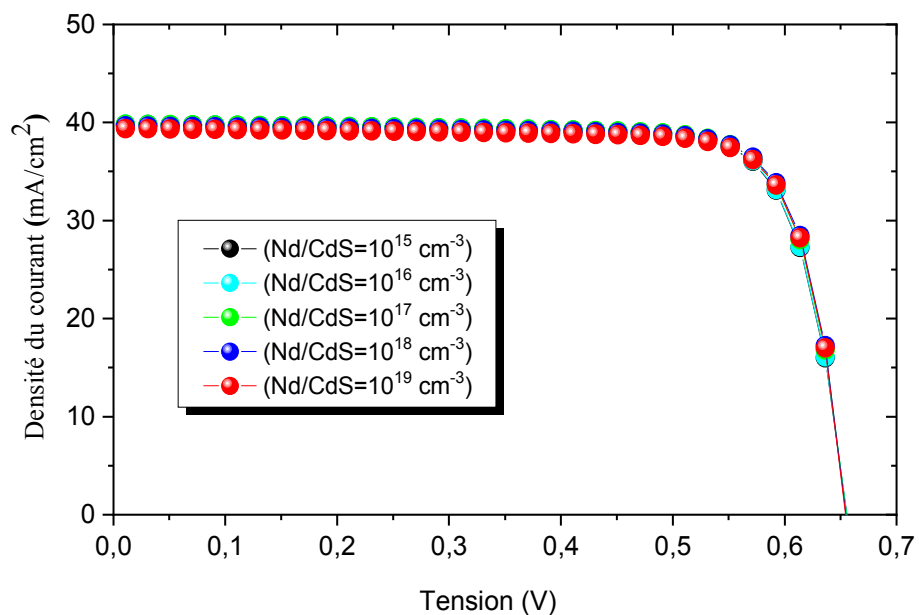


Figure III.9. Influence du dopage de la couche tampon Nd/CdS sur la caractéristique J-V.

Après variation de dopage de la couche tampon CdS, nous observons que la courbes de figure III-9 présentent sont apparemment identiques (ont la même allure) ; l'élévation du dopage n'a pas une influence significative sur la caractéristique J-V

Le Tableau III.6 montre que le rendement et le FF subissent une augmentation sauf que le rendement subissent pour un dopage entre 10^{15} cm^{-3} et 10^{18} cm^{-3} mais il diminue quand on augmente la concentration du dopage au-delà de 10^{19} cm^{-3} . Le rendement le plus élevé est obtenu à la concentration de 10^{18} cm^{-3} égale à 20.90%. La tension de circuit ouvert et la densité court-circuit diminue lorsque la concentration du dopage augmente. Ceci est dû à la diminution du courant de saturation puisque ce dernier est lié à la tension du circuit ouvert

III.5. Structure Optimiser

Le Tableau (III.7) regroupe tous les paramètres de sortie des cellules solaires à base de CIGS de référence en comparaison avec nos résultats :

Structure Paramètres	Base	Optimiser
d/CIGS (μm)	1	4
d/CdS (μm)	0.04	0.02
Na/CIGS (cm^{-3})	2×10^{16}	2×10^{16}
Nd/CdS (cm^{-3})	10^{17}	10^{18}
Efficacité (%)	18.92	20.90

Tableau (III.7) : comparaison entre les paramètres de cellule de base et optimiser

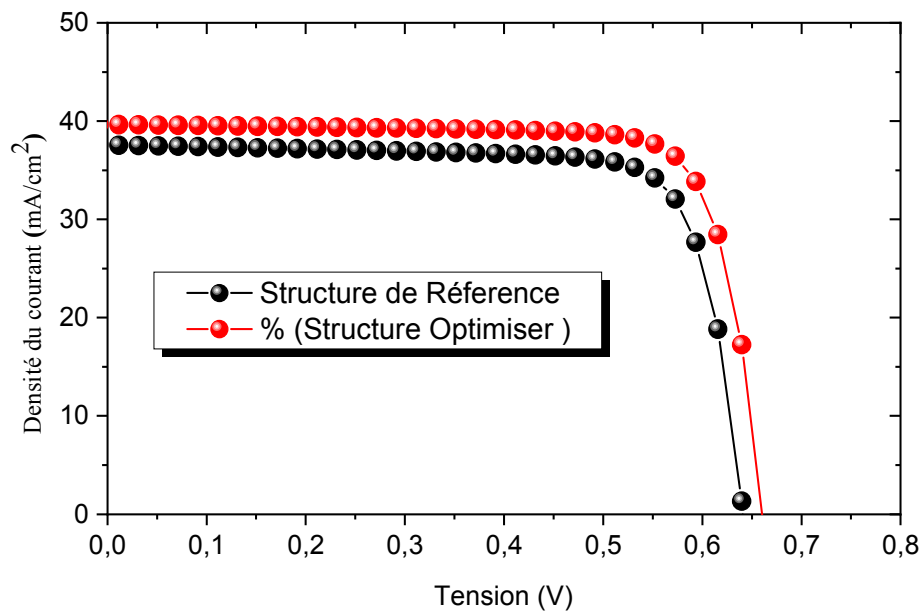


Figure III- 10 :CaractéristiqueJ-Vde structure deréférence et optimiser

En comparant nos résultats de la cellule optimiseravec celles de la cellule de référence, nous remarquons que le rendement η est optimiserde 18.92% à 20.90%, ces résultats sont en très bon accord avec notre étude.

III.6. Effet de la température sur les performances de la cellule solaire :

La température est un paramètre important dans le comportement des cellulesla figures III.11 représententLa Variation du le facteur de forme et le rendement en fonction de la température.La figure III-11 montre la Variation du le facteur de forme et le rendement en fonction de la température. Nous remarquons une diminution progressivement du le facteur de forme jusqu' la valeur 69.952% avec l'augmentation de la température.et dans le rendement de même une diminution jusqu' la valeur 11.36% avec l'augmentation de la température.

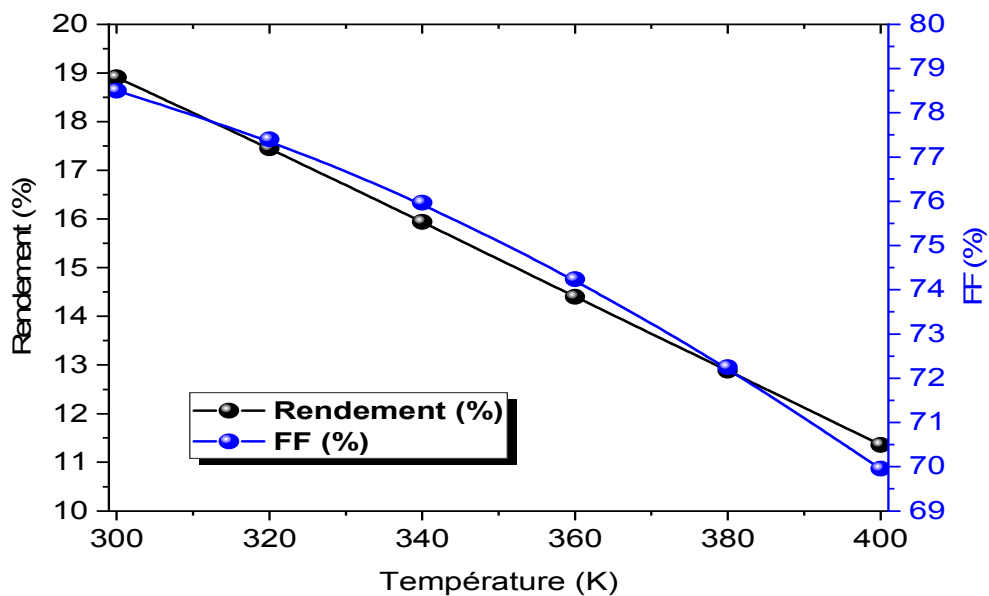


Figure III-11. La Variation du facteur de forme et le rendement en fonction de la température.

T(K)	300	320	340	360	380	400
Paramètres						
Vco(v)	0.641	0.559	0.557	0.515	0.473	0.430
Jcc (mA/cm ²)	37.571	37.596	37.626	37.660	37.700	37.740
FF (%)	78.504	77.394	75.967	74.243	72.255	69.952
Vmax(v)	0.547	0.506	0.464	0.422	0.383	0.338
Jmax (mA/cm ²)	34.528	34.445	34.294	34.140	33.877	33.519
Pmax(mW)	18.886	17.429	15.910	14.407	12.974	13.005
Rendement (%)	18.90	17.44	15.94	14.40	12.88	11.36

Tableau III.8 : l'influence de la température sur Les Paramètres photovoltaïque

Nous remarquons que la température influe négativement sur le rendement des cellules solaires CIGS(p)/CdS(n)/ZnO. La décroissance du rendement de ces cellules pour des températures supérieures à 300K.

III.7. Effet des résistances série (R_s) et parallèle (R_{sh}) sur les performances de la cellule solaire

Le Tableau (III.9) montre l'effet de la Variation des résistances série (R_s) et parallèle (R_{sh}) sur les paramètres photovoltaïques de notre cellule de référence, les valeurs de (R_s) et (R_{sh}) sont tirées depuis sources [28].

Paramètres (R_s), (R_{sh}) ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	V_{oc} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	V_{max} (V)	J_{max} (mA/cm^2)	P_{max} (mW)	η (%)
$R_s : 0.17/R_{sh} : 3095$	0.640	37.541	78.413	0.549	34.350	18.858	18.86
$R_s : 0.23 /R_{sh} : 880$	0.640	37.530	77.183	0.546	33.931	18.526	18.55
$R_s : 0.25/R_{sh} : 1565$	0.640	37.532	77.667	0.546	34.177	18.660	18.67
$R_s : 0.27/R_{sh} : 1360$	0.640	37.527	77.643	0.545	34.124	18.597	18.63
$R_s : 0.27/R_{sh} : 1755$	0.640	37.531	77.652	0.545	34.208	18.643	18.67
$R_s : 0.29/R_{sh} : 1505$	0.640	37.528	77.451	0.545	34.156	18.615	18.62
$R_s : 0.29/R_{sh} : 1580$	0.640	37.529	77.487	0.545	34.171	18.623	18.63
$R_s : 0.29/R_{sh} : 1605$	0.640	37.529	77.499	0.545	34.176	18.625	18.63
$R_s : 0.30/R_{sh} : 1465$	0.640	37.527	77.384	0.544	34.146	18.575	18.60
$R_s : 0.30/R_{sh} : 1680$	0.640	37.528	77.4842	0.544	34.189	18.598	18.63
AVG/ $R_s : 0.31/R_{sh} : 1732$	0.640	37.527	77.457	0.544	34.197	18.603	18.63
$R_s : 0.42/R_{sh} : 1825$	0.640	37.538	77.975	0.541	34.188	18.495	18.50
$R_s : 0.42/R_{sh} : 2710$	0.640	37.521	77.176	0.541	34.280	18.545	18.55
$R_s : 0.49/R_{sh} : 1495$	0.640	37.510	76.512	0.539	34.116	18.388	18.39

Tableau III.9 : l'influence des résistances série (R_s) et parallèle (R_{sh}) sur Les Paramètres photovoltaïques

D'après Les résultats de simulation qui sont récapitulés dans le Tableau III.9 Le paramètre le plus affecté par Variation des résistances série (R_s) et parallèle (R_{sh}) est le rendement, On peut remarquer un comportement décroissant avec l'augmentation de la résistance série sauf les cas dans lesquels une augmentation de résistances parallèle accompagnant une augmentation de résistance série. Le Tableau suivant montre la Variation des résistances série (R_s) et parallèle (R_{sh}) sur notre cellule optimisée :

Paramètres (R_s), (R_{sh}) ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	V_{max} (V)	J_{max} (mA/cm^2)	P_{max} (mW)	η (%)
$R_s : 0.17$ $R_{sh} : 3095$	0.655	39.65	80.221	0.565	36.879	20.836	20.86

Tableau III.10 : l'influence des résistances série (R_s) et parallèle (R_{sh}) sur Les Paramètres photovoltaïque de la cellule optimisée

III.8. Effet des défauts de la couche CIGS sur les performances de la cellule solaire :

Le Tableau III.11 résume les différentes caractéristiques de la structure pour différentes valeurs de défauts de la couche CIGS :

N_t (cm^{-3}) [29]	1.77×10^{13}	10^{14}	5×10^{14}	10^{15}	5×10^{15}	10^{16}
Taux de type n (n.S)	1.1×10^1	2	4×10^{-1}	2×10^{-1}	4×10^{-2}	2×10^{-2}
Taux de type p (n.S)	5.6×10^3	1×10^3	2×10^2	1×10^2	2×10^1	1×10^1
V_{co} (V)	0.665	0.648	0.620	0.604	0.555	0.528
J_{cc} (mA/cm^2)	39.274	38.050	37.958	35.136	32.260	30.564
FF (%)	79.595	77.609	73.958	71.832	65.961	63.242
V_{max} (V)	0.570	0.550	0.517	0.498	0.439	0.409
J_{max} (mA/cm^2)	36.490	34.769	32.038	30.623	26.903	24.943
P_{max} (mW)	20.799	19.122	16.563	15.250	11.810	10.201
Rendement (%)	20.81	19.14	16.58	15.25	11.81	10.22

Tableau III.11 : l'influence des défauts de la couche CIGS sur Les Paramètres photovoltaïque

Le tableau III.11 représente l'influence de l'effet de la densité de défaut de l'absorbeur CIGS sur les paramètres électriques : V_{oc} , J_{sc} , FF et η . On constate que tous les paramètres chutent considérablement dû à l'augmentation de densité de défauts. Par exemple, à $N_t = 1.772 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, on aura un rendement de 20.81% et pour $N_t = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, on obtient un rendement de 10.22%. Les défauts de la couche CIGS ont un rôle crucial dans les performances de la cellule. L'atteinte de hautes performances de la cellule solaire CIGS nécessite l'optimisation des propriétés de l'absorbeur mais aussi une attention particulière à l'interface Mo/CIGS.

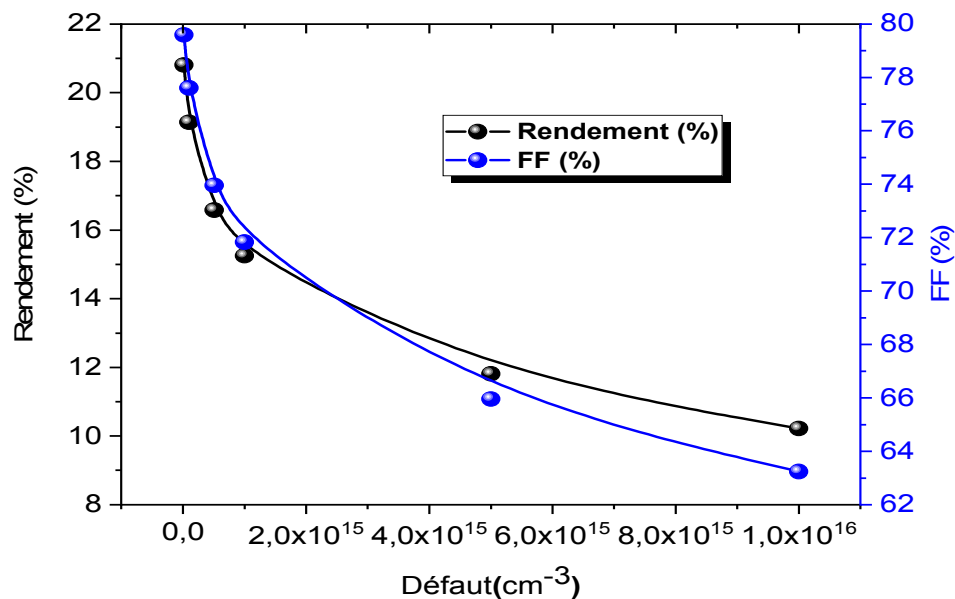


Figure III-12. La Variation du le facteur de forme et le rendement en fonction de défaut (N_t).

III.9 COCLUSION

Dans ce travail nous avons étudié l'impact des deux couches, CdS (couche tampon) et CIGS (couche absorbante) dans le but de concevoir une structure optimale à hétérojonction qui donne le meilleur rendement électrique.

Dans cette partie nous avons simulé la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire à base de CIGS et on a déduit les paramètres de sortie tels que : le courant de court-circuit I_{CC} , le rendement de conversion électrique, la tension de circuit ouvert V_{CO} et le facteur de forme FF . Cette simulation nous a permis de mieux comprendre la sensibilité et la variation de ces grandeurs en fonction du dopage et de l'épaisseur de chacun de la couche tampon et couche absorbeur, la température, résistances série (R_s) et parallèle (R_p) et à la fin la densité de défaut de l'absorbeur 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.

Conclusion Générale

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque

Dans ce travail nous avons présenté une étude théorique et simulation d'une cellule photovoltaïque à couches minces (CIGS). Nous avons simulé une structure spécifique à l'aide de logiciel SCAPS -1D. Tel que nous avons déterminé l'influence de certains paramètres (épaisseur, concentration de dopage des deux couches CdS/CIGS, effet des résistances série (R_s) et parallèle (R_{sh}), la température et les défauts de la couche CIGS) sur les performances de la cellule : tension de circuit ouvert V_{OC} , courant de court-circuit J_{sc} , facteur de forme FF et le rendement η .

Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure ZnO/CdS/CIGS et de montrer l'impact de deux couches minces (CdS et CIGS) sur les performances du dispositif en fonction du rôle de chacune d'elles. Les paramètres optimaux de la structure optimale obtenus par notre simulation pour les deux couches (CdS et CIGS) sont présentés dans le tableau (III.7)

En conclusion, nous pouvons dire que les caractéristiques des cellules dépendent étroitement de celles des couches individuelles et de leurs interfaces.

Espérant que notre mémoire peut fournir une base théorique et des connaissances physiques pour la conception des cellules solaires à base de CIGS.

Références bibliographiques

- [1] A. Rahmani, K. Selmani :« Etude des performances d'une cellule Photovoltaïque à hétérojonctions », thèse de Master en Composants et Systèmes de télécommunication,(2017), Université de Saida.
- [2]Remi Laronde, l'Energie solaire photovoltaïque,Solutions photovoltaïques dans le bâtiment,15/06/2009extraitc121, 9-18.
- [3] collectif,Les Clefs du CEA, un effort public soutenu en faveur des nouvelles technologies de l'énergie ,01/12/2004, N°50/51.
- [4]Chellalihichem, Selama Amina : « Etude d'une cellule solaire à base de CIGS (ZnS/CdS/ZnSe) », thèse de master ,2017/2018, UniversitéSaaddahlebde blida.
- [5] Site web:<https://www.teteamodeler.com/sante/soleil/vichy/soleil2.htm> 2000
- [6] A, Mefti ; Y, bouroubi ; H, Mimouni. « Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables »décembre (2002), N°2, p 12.
- [7]Constance Briand, cellule et technologie photovoltaïque,Transénergie, (2017).
- [8] D. Lincot, JF. Guillemo,Cellules solaires en canapés hachés à base de CuInSe,Reflats de la Physique,2007.
- [9] Ph. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann, M. Powalla, «New world record efficiency for Cu (In, GA) Se₂ thin -film solar cells beyond 20%», Progress in photovoltaic, (2011).
- [10] siteweb: <https://www.cnrs-imn.fr>
- [11] Charles Roger. Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques, Autre, 2013, Université de Grenoble.
- [12] M. Bouafia& L. Deblaoui, « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS) », thèse de Master professionnel, (2012), Université de Ouargla.
- [13] SR. Wenham, MA. Green and M E. Watt «Applied Photovoltaic», Bridge Printer, (1994), Sidney.

- [14] M. Turcu, I. M. Kotschau, and U. Rau. « Composition dependence of defect energies and band alignments in the Cu(In,Ga)(Se,S)₂ alloy system ». *Journal of Applied Physics*, (2002).
- [15] P. D. Paulson, R. W. Birkmire, and W. N. Shafarman. « Optical characterization of Cu(In,Ga)Se₂ alloy thin films by spectroscopic ellipsometry ». *Journal of Applied Physics*, (2003).
- [16] Sunghun Jung, SeJinAhn, Jae Ho Yun, JiHyGwak, Donghwan Kim, and KyunghoonYoon. « Effects of Ga contents on properties of CIGS thin films and solar cells fabricated by co- evaporation technique ». *Current Applied Physics*, (2010).
- [17] M. Agrawal, C. Bolman, S. Carnahan, B. Merewitz, G. Phipps, M. Rogol, S. Willhaus, and T. Xu, “Solar Annual: The Next Wave.” Photon Consulting, 2012.
- [18] A. Niemegeers, M. Burgelman, « Numerical modeling of ac-characteristics of CdTe and CIS solarcells, » *Photovoltaic Specialists Conference Washington DC*,(1996), pp.901-904.
- [19] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, «Modelling polycrystalline semi-conductor solar cells, *Thin Solid. Films*» (2000), 361,527-532.
- [20] P. Chelvanathan, a. Mohammad, I. Hossain a, Nowshad, A. Amin, «Performance analysis of copper–indium–gallium–diselenide (CIGS) solar cells with various buffer layers by SCAP *Current Applied Physics*», (2010), S387–S391.
- [21] A. Sylla, S. Touré, J-P. Vilcot «Numerical Modeling and Simulation of CIGS-Based Solar Cells with ZnS Buffer Layer *Open Journal of Modeling and Simulation*», (2017), 218-231.
- [22] U. Rau and M. Schmidt, «Electronic properties of ZnO/CdS/Cu (In, Ga) Se₂ solar cells aspects of hetero junction formation». *Thin Solid Films*, 387, (2001), pp. 141-146.
- [23] A.Luque and S.Hegedus, «*Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*» 1st ed. NJ: Wiley,(2003),pp. 574.
- [24] N. Severino, N. Bednar, N. Adamovic «Guidelines for Optimization of the Absorber Layer Energy Gap for High Efficiency Cu (In,Ga)Se₂ Solar Cells *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*»,(2018), 6, 147-162.

- [25] H. Amar, S.Tobbeche, « Etude des caractéristiques électriques de cellule solaire à hétérojonction CdS/CIGS (cadmium- sulfide/ cuivre- indium- gallium- sélénium) », (2015).
- [26] Efficiency and band gap, energy, Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique, Centre de recherche Glenn, 1999.
- [27] Puvaneswaran Chelvanathan a, Mohammad Istiaque Hossain a, Nowshad Amin a,b,c, « Performance analysis of copper–indium–gallium–diselenide (CIGS) solar cells with various buffer layers by SCAPS » Current Applied Physics, (2010), S387–S391, 10 .
- [28] Philip Jackson, Dimitrios Hariskos, Erwin Lotter, Stefan Paetel, Roland Wuerz, Richard Menner, Wiltraud Wischmann and Michael Powalla, « New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells beyond 20% progress in photovoltaics: research and applications » (2011)
- [29] Adama Sylla, Siaka Touré, Jean-Pierre Vilcot « Numerical Modeling and Simulation of CIGS-Based Solar Cells with ZnS Buffer Layer Open » Journal of Modelling and Simulation, (2017), 218-231.

