

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 دحلبا بليلة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Télécommunications
Spécialité Réseaux & télécommunications

présenté par

CHELLALI Hichem

&

SELAMA Amina

Etude d'une cellule solaire à base de CIGS (ZnS/CdS/ZnSe)

Proposé par : AISSAT Abdelkader

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

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

Nous tenons à remercier notre encadreur le Professeur AISSAT Abdelkader pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils.

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

Un grand merci à Monsieur Fethi BENYETTOU doctorant à l'université de CHLEF pour son aide, son écoute et sa disponibilité durant toute la période du travail.

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

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

Merci à vous tous

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

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

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

Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.

Nos grandes familles.

Nos chers amis et enseignants.

Tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص: الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة أداء الخلايا الشمسية على أساس Cu (In, Ga) Se_2 (CIGS) للطبقات الرقيقة، بفضل استخدام برنامج Silvaco TCAD تم تحقيق أداء الخلايا الشمسية، في البداية، قمنا بتقييم كثافة الدائرة المغلقة J_{cc} ، توتر الدارة المفتوحة V_{co} ، القوة القصوى P_m ، ومعامل الجود FF ، مردودية η ، لثلاث طبقات سداة ZnS ، CdS ، ZnSe ، ثم معايير الكهروضوئية للخلية شمسية، يتم دراستها وتحليلها من خلال بتغيير القيم (الكسر المولي ودرجة الحرارة). تم محاكاة بنيات مختلفة، النتائج التي تم الحصول عليها تمت مقارنة لتحديد أفضل بنية.

Résumé : L'objectif principal de ce travail est l'étude des cellules photovoltaïques à base de Cu (In,Ga)Se₂ (CIGS) sur des substrats métalliques. Les performances des cellules solaires à base de (CIGS) ont été réalisées grâce au logiciel Silvaco TCAD. Dans un premier temps, nous avons évalué la densité de court-circuit J_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} , la puissance maximale P_m , le facteur de forme FF et le rendement η pour les trois couches tampon CdS, ZnS, ZnSe. Ensuite, les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire, sont étudiés et analysés par la variation des grandeurs (la fraction molaire et la température). Les différentes structures ont fait l'objet de simulations. Les résultats obtenus ont été comparés afin de déterminer la meilleure structure.

Mots clés : Les paramètres de cellule solaire ;

Abstract: The main objective of this work is to study the performance of solar cells based on Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS) for thin layers, thanks to the use of Silvaco TCAD program. The performance of the solar cells was achieved. Initially, we evaluated the Closed circuit density JCC, Open circuit tension Vco, maximum strength Pm, Quality factor FF, cost efficiency η , three-layer plug CdS, ZnS, ZnSe. , Then the photovoltaic parameters of the solar cell are studied and analyzed by changing the values (molar fracture and temperature). Different structures were simulated; the results obtained were compared to determine the best structure.

Keywords : Solar cell parameters

Listes des acronymes et abréviations

Acronymes	Signification	Unité
J_{cc}	Densité de Courant de Court-circuit	mA/cm ²

V_{co}	Tension de Circuit Ouvert	V
η	Rendement électrique	%
FF	Facteur de forme	%
P_m	Puissance maximale fournie par une cellule	$W.m^{-2}$
λ	Longueur d'onde	Mm
ϕ	éclairage reçu par l'échantillon	$W.cm^{-2}$
H	Constante de Planck	J.s
C	Vitesse de la lumière	m/s
P_i	Puissance incidente	$W.m^{-2}$
T	Température	K
I	Courant de la cellule	A
I_m	Courant maximale	A
V_m	Tension maximale	V
Q	Charge élémentaire	C
I_{ph}	Photo-courant	A
I_0	Courant inverse de saturation	A
A	Facteur de qualité de diode	-
K	Constante de Boltzmann	$eV.K^{-1}$
R_s	Résistance en série	Ω
R_{sh}	Résistance shunt	Ω
I_D	Courant de diode	A
A	Coefficient d'absorption	cm^{-1}
E_g	Energie de bande interdite d'un matériau	eV
ν	Fréquence	Hz
E_c	Energie du bas de la bande de conduction	J ou eV

E_v	Energie du haut de la bande de valence	J ou eV
L_n	Longueur de diffusion des électrons	Cm
L_p	Longueur de diffusion des trous	cm
G	Taux de génération	$cm^{-3}S^{-1}$
E	Energie d'irradiation	J ou eV

Signe	Signification
TCO	Transparent ConductiveOxide
EQE	Rendement Quantique Externe
a-Si	Silicium amorphe
CdS	Sulfure de cadmium
CIS	Séléniure de Cuivre et Indium
CIGS	Séléniure de Cuivre et Indium et de Gallium
Mo	Molybdène
SCAPS	Simulateur de capacité de la cellule solaire

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 Notions fondamentales sur les cellules photovoltaïques	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 Historique	2
1.3 Technologies de cellules solaires photovoltaïques	3
1.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	4
1.4.1 L'absorption de la lumière dans le matériau.....	4
1.4.2 Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques	5
1.4.3 La collecte des charges-Jonction p-n.....	6
1.5 Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque.....	6
1.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	7
1.6.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque	7
1.6.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	7
1.7 Conclusion	7
Chapitre 2 Cellule solaire en couche mince (CIGS)	8
2.1 Introduction.....	8
2.2 Structure d'une cellule en couche mince de CIGS.....	8
2.2.1 Substrat	8
2.2.2 Contact arrière	9
2.2.3 Absorbeur	9
2.2.4 Couche tampon	9
2.2.5 Couche fenêtre d'oxyde transparent conducteur (TCO).....	10
2.2.6 Contact avant	10
2.3 Propriétés du CIGS.....	10
2.3.1 Structure cristalline	11
2.3.2 Propriétés électroniques	12
2.3.3 Propriétés optiques	12
2.4 Propriétés du sulfure de cadmium CdS	13
2.4.1 Structure du CdS.....	13
2.4.2 Propriétés optiques.....	14
2.5 Propriétés de zinc-blende.....	14
2.1.1 Structure de blende ZnS, ZnSe	14

2.5.1	Propriétés optiques de ZnS et ZnSe	15
2.6	Les paramètres d'une cellule photovoltaïque et caractéristiques électriques	15
2.6.1	Courant de court-circuit, I_{cc}	17
2.6.2	Tension de circuit ouvert, V_{co}	18
2.6.3	Puissance maximale, P_m	18
2.6.4	Facteur de forme, FF	18
2.6.5	Rendement de conversion η	18
2.7	Le rendement quantique externe EQE	19
2.6	Conclusion :	20
Chapitre 3	Simulations	20
3.1	Introduction.....	21
3.2	Propriétés optiques et électriques de la structure	21
3.2.1	Effet de la contrainte en fonction de concentration du Gallium x.....	21
3.2.2	Variation de la bande interdite E_g de la couche active CIGS en fonction de x	22
3.2.3	Variation de la bande interdite E_g de la couche active	23
3.2.4	Variation du coefficient d'absorption la couche absorbeur CIGS	24
3.3	Propriétés électriques de la structure.....	25
3.3.1	Propriétés électriques de la structure CIGS/ZnS	25
a	Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/ZnS en fonction de x	27
b	Variation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/ZnS en fonction de x.....	28
3.3.2	L'effet de la température sur les paramètres caractéristiques.....	29
a	Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/ZnS en fonction de T.....	29
b	Variation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/ZnS en fonction de T.....	30
3.3.3	Variation de l'efficacité quantique externe (EQE).....	31
3.3.4	Propriétés électriques de la structure CIGS/CdS.....	31
a	Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/CdS en fonction de x	32
b	Variation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/CdS en fonction de x	34
3.3.5	Effet de température sur les paramètres caractéristiques	34
a	Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/CdS en fonction de T.....	34

b	Variation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/CdS en fonction de T	35
3.3.6	Variation de l'efficacité quantique externe (EQE).....	36
3.3.7	Propriétés électriques de la structure CIGS/ZnSe	37
a	Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/ZnSe en fonction de x	37
b	Variation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/ZnSe en fonction de x	39
3.3.8	Effet de température sur les paramètres caractéristiques	39
a	Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/ZnSe en fonction de T	39
b	Variation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/ZnSe en fonction de T	41
3.3.9	Variation de l'efficacité quantique externe (EQE).....	41
3.4	Conclusion	42
	Conclusion générale	43
	Bibliographie	44

Liste des figures

Figure 1. 1. Schéma d'une jonction p-n	6
Figure 2. 1. Structure standard d'une cellule solaire en couches minces à hétérojonction de structure chalcopyrite.....	10
Figure 2. 2. Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d'après.....	11
Figure 2. 3. Structure blende du CdS.	13
Figure 2. 4. Structure wurtzite du CdS.	14
Figure 2. 5. La maille élémentaire d'une structure zinc-blende.	15
Figure 2. 6. Schéma de principe de la conversion photoélectrique.....	16
Figure 2. 7. Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	16
Figure 2. 8. Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire.....	20
Figure 3. 1. La variation de la contrainte en fonction de la concentration de Ga x pour les trois couches tampon (ZnS, ZnSe, CdS).	22
Figure 3. 2. Représentation de l'énergie la bande interdite en fonction de la concentration du Ga pour deux paramètres de Bowing.	23
Figure 3. 3. Variation de la bande interdite en fonction de la température pour x=0.3.	24
Figure 3. 4. Variation du coefficient d'absorption α de la couche absorbeur CIGS en fonction de la longueur d'onde pour x=0.3.....	24
Figure 3. 5. Variation du coefficient d'absorption α de la couche absorbeur CIGS en fonction de la longueur d'onde pour différente x.....	25
Figure 3. 6. Structure d'une cellule solaire à base du (CIGS) utilisé pour la simulation	26
Figure 3. 7. Variation de la caractéristique J-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.	27
Figure 3. 8. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert (b) représentation de facteur de forme et le rendement, en fonction de concentration du Gallium x.	28
Figure 3. 9. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.	28
Figure 3. 10. Variation de la caractéristique J-V pour plusieurs températures.	29
Figure 3. 11. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert (b) représentation de facteur de forme et le rendement, en fonction de la température T.....	30
Figure 3. 12. Variation de La caractéristique P-V pour plusieurs températures.....	30
Figure 3. 13. Variation de l'efficacité quantique externe EQE de la structure (CIGS/ZnS) en fonction de la longueur pour différents températures avec x=0.3.	31
Figure 3. 14. Structure d'une cellule solaire à base du (CIGS) utilisé pour la simulation.	32
Figure 3. 15. Variation de la caractéristique J-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.	33
Figure 3. 16. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert, (b) représentation de facteur de forme et le rendement en fonction de concentration du Gallium x.	33
Figure 3. 17. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.	34
Figure 3. 18. Variation de la caractéristique J-V pour plusieurs températures.	35
Figure 3. 19. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert (b) représentation de facteur de forme et le rendement, en fonction de la température T.....	35

Figure 3. 20. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs températures T.	36
Figure 3. 22. Structure d'une cellule solaire à base du (CIGS) utilisé pour la simulation [57].	37
Figure 3. 23. Variation de la caractéristique J-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.	38
Figure 3. 24. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert, (b) représentation de facteur de forme et le rendement en fonction de concentration du Gallium x.	39
Figure 3. 25. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.	39
Figure 3. 26. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs températures.	40
Figure 3. 27. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert (b) représentation de facteur de forme et le rendement, en fonction de la température T.	40
Figure 3. 28. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs températures.	41
Figure 3. 29. Variation du rendement quantique externe EQE de la structure (CIGS/ZnSe) en fonction de la longueur pour différent température a x=0.3.	42

Liste des tableaux

Tableau 1. 1. Evénements notables dans l’histoire du photovoltaïques.....	3
Tableau 3. 1. Valeurs des données utilisées dans la simulation.....	26
Tableau 3. 2. Valeurs des données utilisées dans la simulation.....	32
Tableau 3. 3. Valeurs des données utilisées dans la simulation.....	37

Introduction générale

L'énergie solaire est en train de devenir l'une des principales sources d'énergie. Les cellules solaires, convertissent cette énergie solaire en énergie électrique à base du CIGS et présentent une stabilité et une grande résistance aux rayonnements [1, 2]. Le CIGS est un semi-conducteur ayant un gap d'énergie spécifique et un coefficient d'absorption optique élevé dans le domaine visible du spectre solaire. Le coefficient d'absorption de CIGS est 100 fois plus grand que celui du Si dans le domaine visible du spectre solaire[3]. La structure du dispositif est composée par : Ni-AL/ZnO/ZnS,CdS,ZnSe/CIGS/Mo/substrat en acier inoxydable. La fraction molaire x de la couche CIGS a une valeur optimale de 0.30 correspondant à une énergie du gap de 1.16 eV[4].

Dans ce travail, nous allons employer le simulateur SILVACO-TCAD dans la conception et l'étude d'une cellule solaire en CIGS. L'outil Atlas permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à base de semi-conducteurs et les cellules solaires. Ce travail contribuera à une meilleure compréhension et analyse des cellules solaires en CIGS.

Ce mémoire est structuré de la façon suivante : dans le premier chapitre, nous expliquons le principe de fonctionnement des cellules solaire et les différentes applications des photovoltaïques. La structure de cellule solaire à base de CIGS ainsi que les propriétés électriques et optiques des matériaux CIGS, Zns, CdS, ZnSesont détaillées dans le deuxième chapitre.

La déterminationdes caractéristiques électriques et les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS, et la comparaison des résultats sont présentées dans le troisième chapitre.

Chapitre 1 Notions fondamentales sur les cellules photovoltaïques

1.1 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.

Ce chapitre aborde des généralités sur les cellules photovoltaïques et leur fonctionnement. Le Tableau 1 résume les événements importants de l'histoire du photovoltaïque.

1.2 Historique

1839	le français Edmonde Becquerel 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 Cu ₂ S/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 Cu ₂ S

1980	La première cellule à base de Cu ₂ S/CdS délivrant un rendement > 10%
1982	Première unité de production de 1 MW (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 multijonctions 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) Se ₂ 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	n rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm ² 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 PBDDTTT-CF et PC70BM (SolarmerEnergy Inc., University of California, University of Chicago, USA)

Tableau 1. 1. Événements notables dans l'histoire du photovoltaïques [5].

1.3 Technologies de cellules solaires photovoltaïques

La cellule solaire est un élément unitaire d'un module photovoltaïque et aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque. Celui-ci permet au matériau de la cellule de capter l'énergie lumineuse (photons) et la transformer en énergie électrique caractérisée par un déplacement de charges.

Les caractéristiques communes à toutes les technologies photovoltaïques est la mise en présence dans le matériau de la cellule d'un donneur et d'un accepteur d'électrons pour permettre ce déplacement de charges. Une fois transféré dans un circuit électrique extérieur, celui-ci prend la forme d'un courant électrique continu.

1.4 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 [5] :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges.

1.4.1 L'absorption de la lumière dans le matériau

La lumière c'est une onde électromagnétique elle est composée de minuscules boules d'énergie qu'on appelle des photons. Les photons n'ont pas de masse c'est-à-dire leur masse est nulle, ils n'ont pas de charge et leur vitesse dans le vide c'est la vitesse de la lumière ($c=3.10^8$ m/s) et il a une énergie caractérisé par [6] :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} (1.1)$$

avec :

h : constante de Planck ($6,62.10^{-34}$ J.s).

ν : fréquence (Hz).

c : vitesse de la lumière (3.10^8 m/s).

λ : longueur d'onde (m).

Plus généralement un rayon lumineux qui arrive sur un objet peut subir trois événements optiques [5] :

- **la réflexion** : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- **la transmission** : la lumière traverse l'objet.
- **l'absorption** : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

1.4.2 Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

On va s'intéresser maintenant à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et expliquer comment son énergie est convertie en électricité [7]. Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons (de charge $q=1.6 \times 10^{-19}$), charges négatives élémentaires contenus dans la matière semi-conductrice, tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (constitué de protons et de neutrons) est un ensemble d'électrons gravitant autour [8].

Les photons absorbés vont tout simplement transférer leurs énergies aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leurs permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leurs noyau, ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les (attire) ensuite vers l'extérieur.

En régime permanent, l'électron libre laisse un trou qui se traduit par une charge positive, si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite, on génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique [8].

Les photons absorbés pourront générer ainsi des paires électron-trou (e^-e^+) provoquant l'effet photovoltaïque dans des conditions appropriées. La génération optique des paires e^-e^+ est le phénomène le plus important sur lequel repose le fonctionnement des photopiles [9].

Dans un métal les électrons peuvent absorber l'énergie des photons et passer à un niveau d'énergie supérieur puis par thermalisation retourner très rapidement à l'état initial on ne peut utiliser les métaux pour la conversion puisque l'énergie est perdue en énergie thermique lorsqu'elle est absorbée sinon elle est réfléchié [9].

Dans un isolant, il ne peut y avoir de circulation de courant, il reste forcément comme déjà indiqué les semi-conducteurs dont la bande interdite idéal se situe autour de 1.35 eV (la largeur de bande interdite dans les semi-conducteurs (est $0.6 \text{ eV} < E_g < 2 \text{ eV}$), de plus la durée de vie des porteurs ainsi générés est bien supérieur à celle des électrons dans un métal [9].

Ceci laisse beaucoup plus de temps pour séparer les électrons des trous, combattre les recombinaisons électrons-trous et générer un courant électrique, tout ceci sous l'influence d'un

champ électrique. Ce champ sera disponible grâce à une jonction p-n ou une hétérojonction métal [9].

1.4.3 La collecte des charges-Jonction p-n

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner [10].

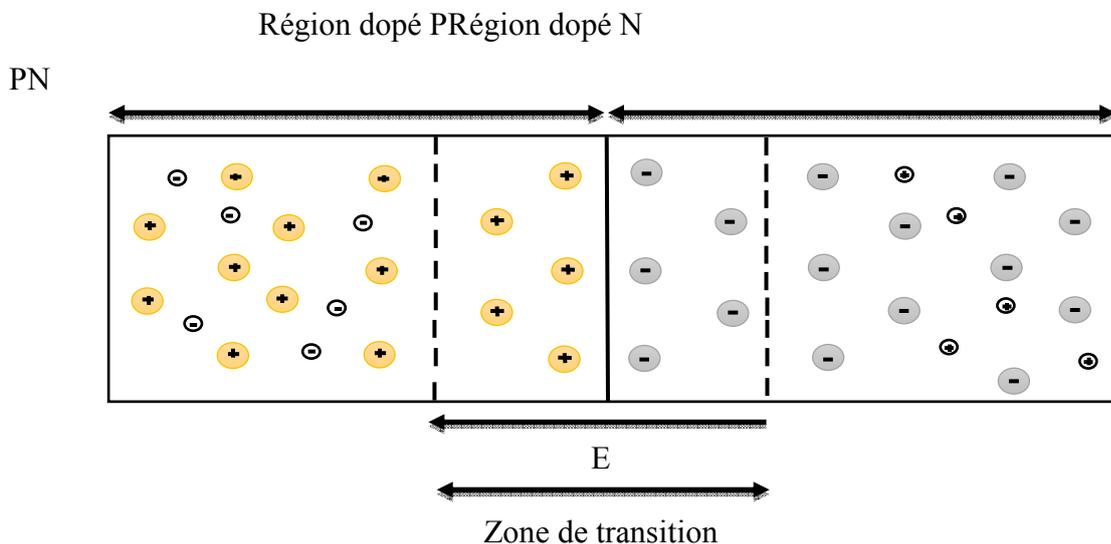


Figure 1. 1. Schéma d'une jonction p-n [11].

1.5 Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque

Les applications de l'énergie photovoltaïque sont nombreuses elles peuvent être divisées en deux grandes catégories :

Les applications autonomes, c'est-à-dire non-raccordées à un réseau électrique comme les satellites artificiels, les appareils portables, les relais de télécommunications, les balises maritimes et l'électrification rurale des sites isolés.

Les applications raccordées au réseau public de distribution d'électricité comme les systèmes attachés à un bâtiment consommateur, les parcs (centrales) photovoltaïques au sol [12].

1.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

1.6.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque

- Une haute fiabilité : les modules sont garantis pendant 30ans par la plupart des constructeurs.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Peut être installé très rapidement à presque tous les points d'utilisation [17].

1.6.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %).
- Le coût initial d'installation est élevé.
- Manque de stockage d'énergie économiquement efficace.
- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [17].

1.7 Conclusion

Les cellules photovoltaïque est en plein essor, elle permet beaucoup d'avantages pour la terre et elle pourrait devenir l'énergie du futur. Pour cela Dans ce chapitre nous avons présenté des notions fondamentales pour les cellules photovoltaïques et expliquer brièvement son principe de fonctionnement, et indiquer aussi leurs avantages et l'inconvénient avec quelle que application.

Chapitre 2 Cellule solaire en couche mince (CIGS)

2.1 Introduction

Le but de deuxième chapitre présenté la technologie des cellules solaire à base de Cu (In, Ga) Se₂ qui constitué le cœur de la mémoire, car La filière industrielle CIGS émerge aujourd'hui dans le domaine photovoltaïque. Cependant des améliorations significatives sont possibles, qui permettraient d'en améliorer encore les performances. Ainsi on va présenter le différent matériau utilisé en couche tampon (CdS, ZnS, ZnSe) et leur caractéristiques et le principe de fonctionnement.

2.2 Structure d'une cellule en couche mince de CIGS

Dans sa structure la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. La figure (2.1) présente la structure standard d'une cellule à base de Cu (In, Ga) (Se)₂. Les principaux éléments dans la cellule sont :

2.2.1 Substrat

La préparation de cellules solaires chalcopyrites commence par le dépôt du Molybdène (Mo) sur un substrat en verre ou flexible [18]. Pour le substrat en verre on deux type sont utilisé :

Verre sodocalcique (Soda-lime Glass, SLG), Verre borosilicate. Par contre le substrat flexible on a : substrat Métallique, Substrat en plastique.

Les propriétés du Molybdène et le choix du substrat sont de première importance pour la qualité du dispositif final. Le matériau de substrat pour les cellules solaires chalcopyrites doit satisfaire plusieurs exigences [19] :

- Résistance à des températures allant jusqu'à 550 °C.

- Aucune réaction avec Molybdène et la couche absorbeur.
- Barrière à l'humidité et à la stabilité substantielle sur les environnements agressifs.
- Surface lisse.
- Résistance mécanique [20].

2.2.2 Contact arrière

Le matériau le plus couramment utilisé comme un contact arrière dans les cellules solaires chalcopyrites est le molybdène Mo [21]. Ceci est dû à sa faible résistivité et à sa stabilité à des températures élevées pendant le processus de croissance absorbeur. Une couche de molybdène d'épaisseur de 0,5µm à 1µm [22, 23] est généralement déposée sur le matériau de substrat par pulvérisation cathodique ou par magnétron.

2.2.3 Absorbeur

L'absorbeur est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous. Dans le cas présent, il s'agit d'un semi-conducteur de type P de la famille I-III-VI, dont les différentes variantes déjà étudiées conduisent à la formule générale suivante : $(\text{Cu, Ag}) (\text{In, Ga, Al}) (\text{Se, S, Te})_2$. La substitution du Cu par de l'argent, de l'indium par du gallium ou de l'aluminium, du sélénium par du soufre ou du tellure, permet de modifier les propriétés du matériau comme sa largeur de bande interdite. Le composé le plus développé en recherche et en industrie, et qui constitue le sujet de notre étude, est le $\text{Cu} (\text{In, Ga}) \text{Se}_2$ [24].

2.2.4 Couche tampon

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante et la couche d'oxyde transparent conducteur (TCO). Deux rôles lui sont majoritairement attribués : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice. Du point de vue électrique, cette couche adapte la largeur de la bande interdite entre l'absorbeur et la couche fenêtre [25] et limite les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. Elle permet également de protéger la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de ZnO, qui peut engendrer des défauts à la surface du CIGS [26].

2.2.5 Couche fenêtre d'oxyde transparent conducteur (TCO)

On dépose finalement deux épaisseurs d'oxyde de zinc (ZnO) par pulvérisation cathodique [27]. La première couche est constituée par du ZnO très résistif. La seconde couche constitue le contact transparent et conducteur. Son rôle est de constituer l'électrode avant tout en assurant la transmission optimale des photons du spectre solaire. C'est donc un matériau grand gap dont la conductivité est favorisée par dopage à l'aluminium que l'on nommera ZnO:Al. La couche de ZnO:Al participe également à la jonction p-n de la cellule solaire.

2.2.6 Contact avant

Le contact avant final est réalisé en ajoutant à l'empilement une grille de Ni-Al déposée sur la couche fenêtre et qui a le rôle de réduire les pertes ohmiques (meilleure collecte de charges générées par le dispositif). Le Ni de ~50 nm sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al (~1µm) liée à la présence sous-jacente du TCO. Les grilles sont déposées en général par évaporation en utilisant un masque de dépôt. Afin de réduire la perte par réflexion, une couche antireflet en MgF2 de ~50 nm d'épaisseur est souvent déposée en dessus de la cellule pour capter la lumière incidente de façon plus efficace [22, 23]. Enfin, l'encapsulation est effectuée pour la protection mécanique et à la corrosion [22]

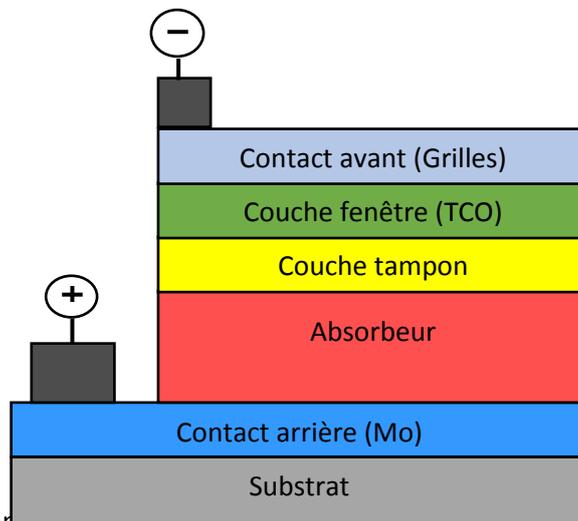


Figure 2. 1. Structure standard d'une cellule solaire en couches minces à hétérojonction de structure chalcopyrite [28].

2.3 Propriétés du CIGS

Le rendement d'une cellule solaire à base de CIGS est fortement dépendant des propriétés du matériau absorbeur. Comme dans le cas d'autres semi-conducteurs, la structure cristalline

du CIGS ainsi que sa composition peuvent fortement influencer sur ses propriétés optiques et électroniques. La bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire dans le but d'optimiser un dispositif à base de CIGS.

2.3.1 Structure cristalline

Le matériau à la base du CIGS est le CIS (CuInSe_2). C'est un semi-conducteur I-III-VI₂ qui possède une structure cristalline chalcopyrite. Cette structure tétragonale peut être décrite comme un empilement de deux structures zinc blende dans lequel les sites tétraédriques sont occupés par des atomes du groupe III (Se) (anions) et les autres sites sont occupés de manière ordonnée par des atomes des groupes I (Cu) et II (In) (cations).

(Figure 2.2) présente les différences de structure cristalline entre 3 matériaux semi-conducteurs utilisés dans le photovoltaïque : le Si, le CdTe et le CIGS.

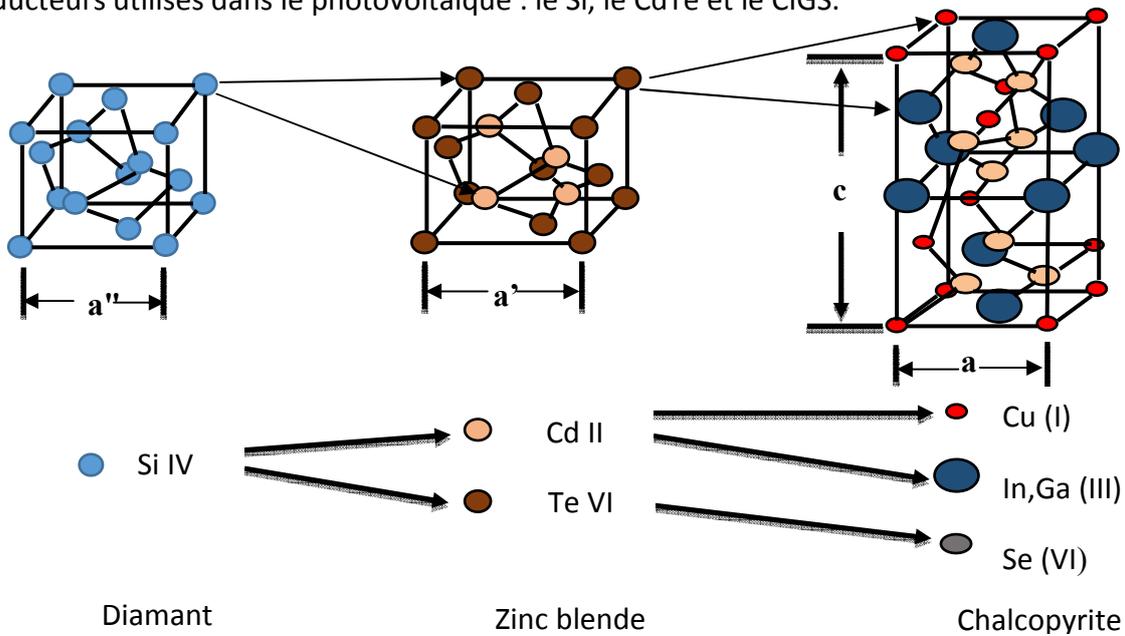


Figure 2. 2. Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d'après [29].

Le ratio des paramètres de maille c/a est légèrement différent de 2 (distorsion tétraédrique), ce qui est dû à des différences d'énergie entre les liaisons Cu-Se et In-Se [29]. Dans le cas du CIGS, les sites des atomes du groupe III sont donc occupés par des atomes d'In ou de Ga,

dans des proportions dépendant de la composition de l'alliage. En d'autres termes, le CIGS est une solution solide de CuInSe_2 et de CuGaSe_2 .

2.3.2 Propriétés électroniques

Le CuInSe_2 et le CuGaSe_2 sont des matériaux semi-conducteurs possédant respectivement des gaps directs de 1.035eV et 1.68eV. Cette différence est majoritairement liée à une différence de minimum de la bande conduction (E_c) [30]. Comme nous l'avons vu précédemment, le CIGS est une solution solide de ces deux matériaux. Le ratio $x=[\text{Ga}]/([\text{In}]+[\text{Ga}])$ 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 [31] :

$$E_g = 1.01 + 0.626x + 0.167x(1 - x) \quad (2.1)$$

Le CIGS est donc un matériau dont E_g peut être ajusté entre 1.035eV et 1.68eV 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 1.2eV [32], ce qui correspond à un taux de Ga proche de 30%.

2.3.3 Propriétés optiques

Le rendement des cellules solaires dépend principalement de la lumière absorbée par la couche absorbante. Du point de vue technologique la couche absorbante doit avoir une bande de gap optimale pour absorber la plus large gamme de longueurs d'ondes du spectre solaire avec un coefficient d'absorption élevé [33]. L'expression du coefficient d'absorption est donnée par [34] :

$$\alpha_{\text{Absorbeur}}(E) = B(E - E_{\text{Absorbeur}})^{1/2} \quad (2.2)$$

avec :

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

E : l'énergie d'irradiation.

$E_{\text{Absorbeur}}$: L'énergie de bande interdite.

2.4 Propriétés du sulfure de cadmium CdS

2.4.1 Structure du CdS

Le semi-conducteur le sulfure de cadmium CdS construit par deux colonnes II et VI de la table périodique de l'élément chimique, la colonne II pour le Cd et l'autre pour S. Le CdS possède deux structures : la structure hexagonale de la wurtzite (Figure 2.3) et la structure cubique zinc blende de la sphalérite (Figure 2.4). La structure du type blende est une structure cubique à faces centrées (CFC) dont la maille primitive contient 4 cations (Cd^{2+}) et quatre anions (S^{2-}) [35]. Chaque espèce d'un constituant est entourée à égale distance par quatre atomes de l'autre constituant. Pour zinc blende un paramètre de maille $a=5.83\text{\AA}$ et pour le wurtzite $a=4.135\text{\AA}$.

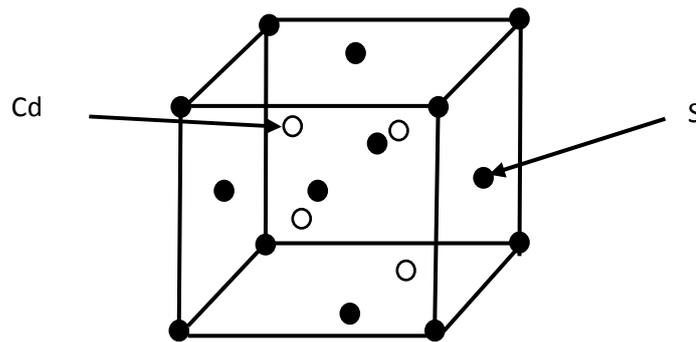


Figure 2. 3. Structure blende du CdS [36].

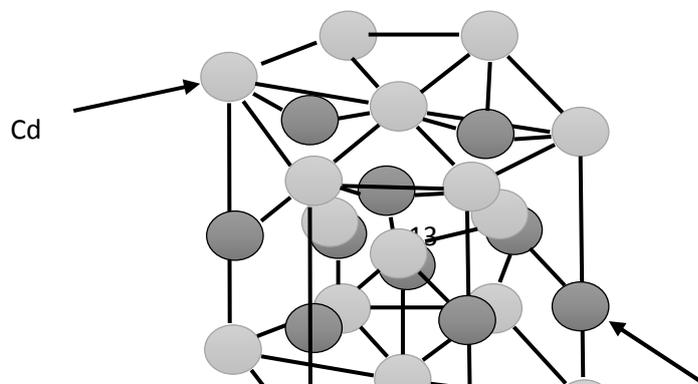


Figure 2. 4. Structure wurtzite du CdS [36].

2.4.2 Propriétés optiques

Le CdS en couche mince est un matériau à gap optique direct $E_g=2.4$ eV [37] et elle varie entre 2.33 et 2.56 eV [38], ou entre 2.1 à 2.4 [39] à différentes températures. L'indice de réfraction de couche mince en CdS est 2.5 [40]

Le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ pour le matériau CdS est donné selon [34] :

$$\alpha_{CdS}(E) = \frac{A}{E} (E - E_{CdS}) \quad (2.3)$$

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

E : l'énergie d'irradiation.

E_{CdS} : L'énergie de bande interdite.

2.5 Propriétés de zinc-blende

2.1.1 Structure de blende ZnS, ZnSe

Ces matériaux binaires cristallisent dans la structure cubique zinc-blende : Les atomes de zinc et les atomes de sélénium ou sulfure, forment deux sous-réseaux cubiques à faces centrées, décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la grande diagonale du cube figure (2.5). La différence du paramètre de maille entre ZnSe et ZnS est très importante car ce désaccord joue un rôle primordial dans la réalisation d'hétéro-structures [40].

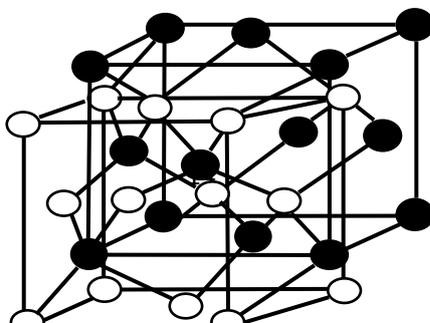


Figure 2. 5. La maille élémentaire d'une structure zinc-blende [41].

2.5.1 Propriétés optiques de ZnS et ZnSe

Le ZnS et le ZnSe ce sont des semi-conducteur à gap direct avec $E_g=3.78$ eV et $E_g=2.82$ eV [41] lui permet des transitions radiatives et elle se varier en fonction du taux de dopage entre 3.65 et 3.7 eV [42], ils possèdent un a taux absorption de la lumière caractérisé par le coefficient d'absorption α [43] :

$$\alpha_{\text{ZnS,ZnSe}}(E) = \frac{A(E-E_{\text{ZnS,ZnSe}})}{E} \quad (2.4)$$

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

E : l'énergie d'irradiation.

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

2.6 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque et caractéristiques électriques

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément La figure (2.7) présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle qui constitué d'un générateur de courant en parallèle avec une diode et une résistance de shunt R_{sh} qui sont tous connectés en série avec une résistance en série R_s . La résistance série R_s cette résistance est liée à l'impédance des électrodes et des matériaux [44], il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction. La résistance shunt R_{sh} est une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction qui correspond aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Ces résistances série et

shunt dépendent de la technologie de fabrication des jonctions et des électrodes. Il faut minimiser R_s et faire en sorte que R_{sh} ne soit pas trop faible.

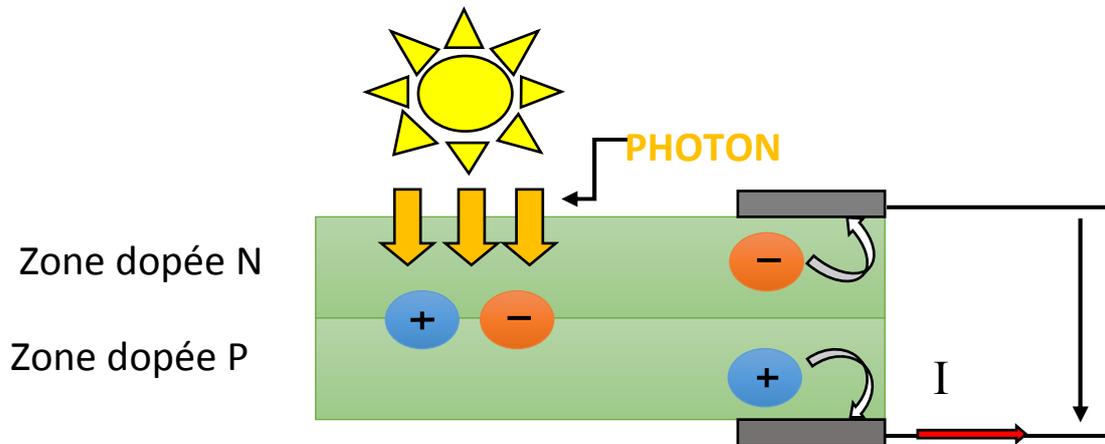


Figure 2. 6. Schéma de principe de la conversion photoélectrique [45].

Pour écrire L'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque en utilisant le circuit équivalent représenté sur la figure (2.7) et l'équation de la diode [46] :

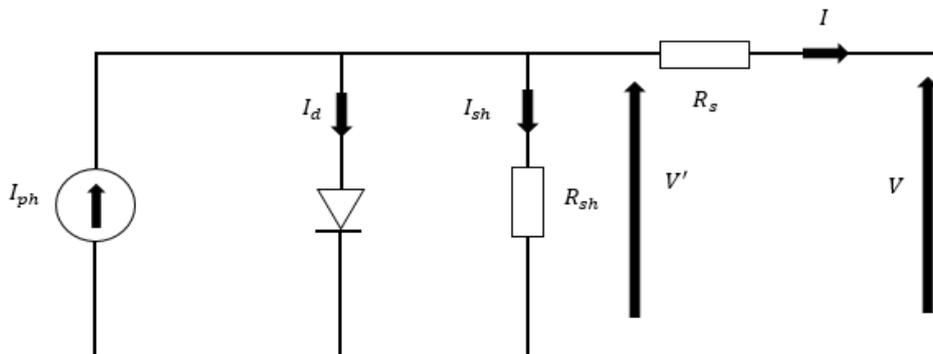


Figure 2. 7.Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [47].

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Suivant la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2.6)$$

La loi de tension de Kirchhoff et la loi d'ohm donnent :

$$V' = V + IR_s \quad (2.7)$$

Les équations (2.5) et (2.7) donnent :

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{\frac{q(V-IR_s)}{AKT}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

La loi d'ohm et l'équation (2.7)

$$I_{sh} = \frac{V'}{R_{sh}} = \frac{V-IR_s}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

La substitution de (2.8) et (2.9) dans (2.6) donne l'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V-IR_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (2.10)$$

avec :

I_{ph} : Photonique courant

I_0 : Courant inverse de saturation

q : charge élémentaire de l'électron

A : le facteur de qualité de diode

K : la constante de Boltzmann

T : la Température [K]

R_s : La résistance en série

R_{sh} : La résistance shunt

A partir de la caractéristique I(V) de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

2.6.1 Courant de court-circuit, I_{cc}

Le courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque obtenu pour une tension $V=0$, caractérise la quantité des paires électrons trous créés G qui traverse la jonction sans être recombinées et ce entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) [48]

$$I_{cc} = qG(L_n + L_p) \quad (2.11)$$

2.6.2 Tension de circuit ouvert, V_{co}

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire : $V_{co} = V (I = 0)$ [48].

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.12)$$

2.6.3 Puissance maximale, P_m

La puissance débitée par une cellule solaire est maximale quand le produit $V.I$ est maximum. Si V_m et I_m sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de cotés V_m et I_m [48].

$$P_m = (I \times V)_{\max} = I_m \times V_m \quad (2.13)$$

2.6.4 Facteur de forme, FF

On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit $I_{cc} \times V_{co}$. Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} [48].

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (2.14)$$

2.6.5 Rendement de conversion η

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance du rayonnement incident [49].

$$\eta = \frac{P_m}{A \cdot P_i} = \frac{I_{cc} \cdot V_{co} \cdot FF}{A \cdot P_i} \quad (2.15)$$

Où : P_i est la puissance incidente du rayonnement solaire au sol. Dans les conditions standard (AM1.5G et $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) $P_i = 100 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ [50]. A est la surface éclairée de la cellule. D'après l'équation (2.14) la puissance maximale délivrée par la cellule est :

$$P_m = I_{cc} \cdot V_{CO} \cdot FF = \eta \cdot A \cdot P_i \quad (2.16)$$

Donc, afin d'augmenter P_m il faut augmenter le rendement par augmentation des trois caractéristiques de la cellule (Le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} et le facteur de forme FF) où une optimisation est nécessaire. Ou, augmenter le produit $A \times P_i$, ce qui signifie d'augmenter la surface éclairée A et ou la puissance incidente P_i par utilisation des concentrateurs optiques.

2.7 Le rendement quantique externe EQE

Le rendement quantique, note EQE (external quantum efficiency), appelé aussi IPCE (incident photon to current conversion efficiency), est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Ce rendement ne prend pas en considération les photons réfléchis et transmis. Il est donné par la relation suivante [51] :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{hc}{e} \times \frac{J_{cc}}{\varphi(\lambda)\lambda} = 1.24 \times \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)\lambda} \quad (2.17)$$

où :

J_{cc} : est la densité de courant de Court-circuit ($\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$).

φ : est l'éclairement reçu par l'échantillon ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$).

λ : est la longueur d'onde monochromatique (nm).

h : est la constante de Planck (J.s).

c : est la vitesse de la lumière (Jms^{-1}).

e : la charge électronique.

E_{ph} : L'énergie du photon.

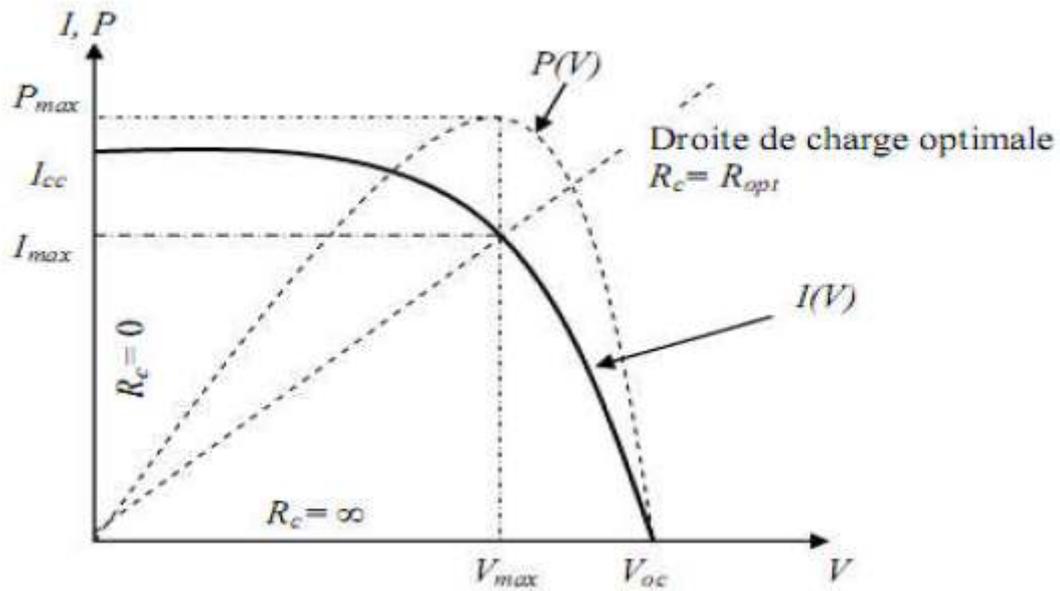


Figure 2. 8. Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire [52].

2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les propriétés générales des semi-conducteurs en CIGS, CdS, ZnS et ZnSe qui constituent la cellule solaire en CIGS. Ces propriétés concernent les propriétés structurales, électroniques, électriques et optiques. Nous avons ensuite expliqué les caractéristiques principales des cellules photovoltaïques ainsi que les paramètres qui influent sur leurs caractéristiques. Puis nous avons présenté la structure d'une cellule solaire à base de CIGS.

Chapitre 3 Simulations

3.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur la modélisation et la simulation d'une cellule solaire en couche mince CIGS. Pour cela, on a simulé trois types de cette cellule avec une couche tampon différentes ZnS, ZnSe et CdS. Pour chaque type on a étudié l'effet de plusieurs paramètres sur les caractéristiques électrique et optique, comme la caractéristique courant-tension (J-V), la caractéristique puissance-tension (P-V), l'efficacité optique externe $EQE(\lambda)$ et le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$. Le logiciel SILVACO TCAD a été utilisé à cet effet.

3.2 Propriétés optiques et électriques de la structure

3.2.1 Effet de la contrainte en fonction de concentration du Gallium x pour les trois couches tampon (ZnS, ZnSe, CdS)

La figure (3.1) représente l'évolution de la contrainte en fonction de la concentration du Gallium x pour les trois couches tampon. On remarque clairement que d'une part, la contrainte augmente linéairement avec la concentration du Ga pour les trois couches tampon et d'autre part, le matériau CdS provoque une contrainte compressive c'est-à-dire $\epsilon > 0$ ($a_e > a_s$) tandis que les deux autres matériaux provoquent une contrainte extensive $\epsilon < 0$ ($a_e < a_s$). Par exemple pour $x=0.3$ qui est la concentration optimale du Ga pour ce type de cellule solaire [53], la contrainte pour CdS, ZnS, et ZnSe est : $\epsilon=1.69\%$, $\epsilon=5.45\%$ et $\epsilon=2.84\%$, respectivement.

Etant donné que le CdS est un matériau toxique pour l'environnement, et le ZnS possède une contrainte un peu élevée d'une valeur de $\epsilon=5.45\%$ à $x=0.3$, il devient évident que le ZnSe est le meilleur matériau tampon avec une contrainte de $\epsilon=2.84\%$ à $x=0.3$.

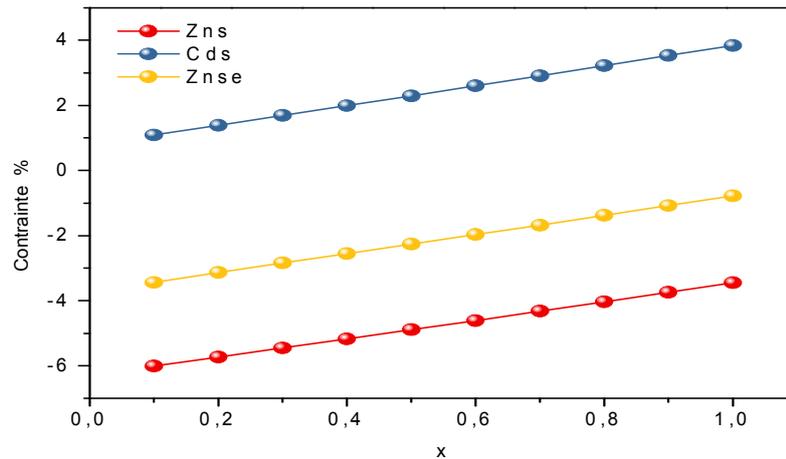


Figure 3. 1. La variation de la contrainte en fonction de la concentration de Ga x pour les trois couches tampon (ZnS, ZnSe, CdS).

3.2.2 Variation de la bande interdite E_g de la couche active CIGS en fonction de x

La largeur de bande interdite du CIGS varie en fonction de x. Plus elle est grande plus l'électron de la bande de valence nécessite une grande énergie du photon pour passer à la bande de conduction et vis-versa. La figure (3.2) présente l'évolution de l'énergie de la bande interdite en fonction de concentration du Gallium pour deux paramètres de bowing différente. Pour cela on a utilisé l'équation suivante afin de calculer E_g [54] :

$$E_g(x) = 1.01 + 0.26x + bx(1 - x) \quad (3.1)$$

Avec b est le paramètre de bowing tel que : $b = 0.167$ [55] et 0.264 [56]

On note d'après cette figure, que l'énergie de la band interdite du CIGS augmente avec l'augmentation de la concentration du Ga pour les deux paramètres de bowing. De plus, on observe que la courbe de l'énergie de la bande interdite pour $b = 0.167$ est petite que celle pour $b=0.264$, ce qui lui permet d'absorption des photons de petite énergie. Pour cette raison on a retenu $b=0.167$ pour le reste de cette étude. Par exemple à $x=0.3$ on trouve $E_g=1.16$ eV.

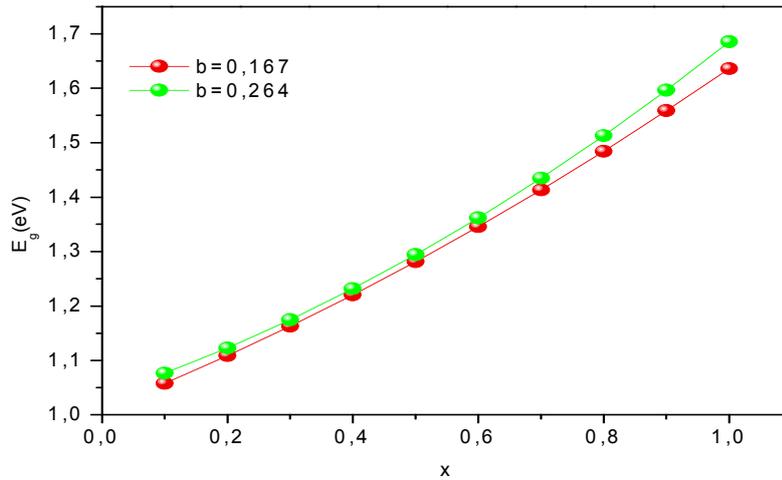


Figure 3. 2. Représentation de l'énergie la bande interdite en fonction de la concentration du Ga pour deux paramètres de Bowing.

3.2.3 Variation de la bande interdite E_g de la couche active CIGS en fonction de T

Dans cette partie de travail on a étudié l'effet de la température sur l'énergie de la bande interdite. La figure (3.3) illustre la variation de la bande interdite en fonction de la température pour x=0.3. A cet effet, on a utilisé le modèle suivante [57] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{aT^2}{(b+T)} \quad (3.2)$$

avec :

$$a=2.9 \times 10^4 \text{ eV K}^{-1}$$

$$b=244 \text{ K}$$

$$E_g(0)=1.25 \text{ eV.}$$

E_g(0) est la bande interdite à 300 K, a et b sont des constants.

On remarque que l'énergie de la bande interdite décroît avec la température, c'est-à-dire plus on augmente la température, E_g diminue. La valeur maximale de E_g est 1.215 eV à T=275 K.

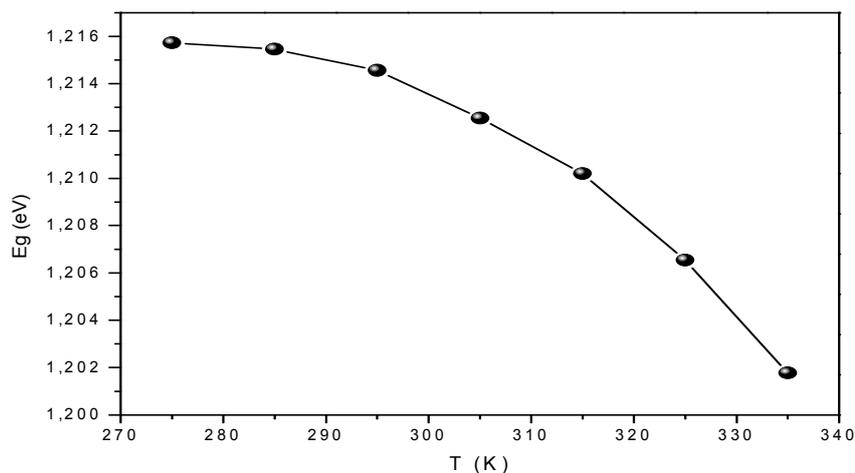


Figure 3. 3. Variation de la bande interdite en fonction de la température pour x=0.3.

3.2.4 Variation du coefficient d'absorption la couche absorbeur CIGS

Dans cette partie on a étudié la variation du coefficient d'absorption de la couche active CIGS. Comme on a vu dans le chapitre2, le coefficient d'absorption varie en fonction de la longueur d'onde qui est donnée par la relation suivante pour une couche active CIGS [54] :

$$\alpha_{\text{CIGS}}(E) = B(E - E_g)^{1/2} \quad (3.3)$$

avec : $B=5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \text{ eV}^{-1/2}$.

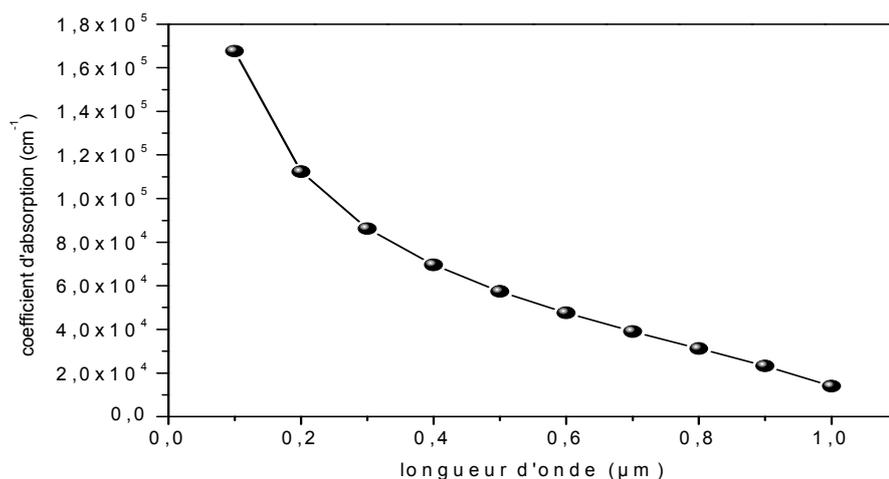


Figure 3. 4. Variation du coefficient d'absorption α de la couche absorbeur CIGS en fonction de la longueur d'onde pour x=0.3.

La figure 3.4 montre l'évolution du coefficient d'absorption du matériau absorbeur (CIGS) en fonction de la longueur d'onde. La simulation est performée avec une concentration $x=0.3$. Remarquons que l'absorption décroît à partir de $\lambda=0.1 \mu\text{m}$ jusqu'à $\lambda= 1 \mu\text{m}$ où elle présente une valeur minimale de $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$.

Dans ce qui suit, l'effet de la concentration du Ga sur la courbe de coefficient d'absorption de la couche absorbeur CIGS est analysé. La figure (3.5) représente la variation de coefficient d'absorption α en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs concentrations du Gallium. On remarque que plus on augmente la concentration plus le coefficient d'absorption diminue.

Cependant, on trouve que pour $x=0.1$ on aura un taux d'absorption plus élevée avec une valeur maximale obtenue à $\lambda=0.6 \mu\text{m}$ de $\alpha=5.024 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$.

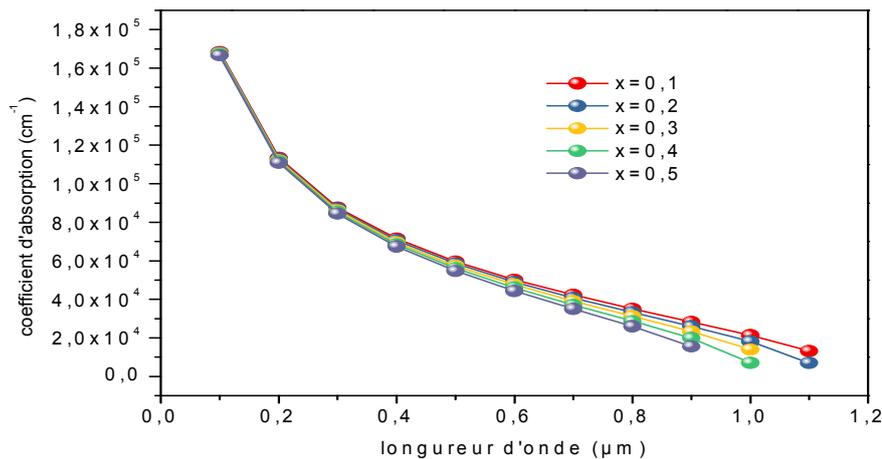


Figure 3. 5. Variation du coefficient d'absorption α de la couche absorbeur CIGS en fonction de la longueur d'onde pour différente x .

3.3 Propriétés électriques de la structure

3.3.1 Propriétés électriques de la structure CIGS/ZnS

Les paramètres électriques de différents matériaux constituant cette structure sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Matériau	ZnS	Réf	CIGS	Réf
Epaisseur de la couche (μm)	0.05	[53]	3.5	[53]
Affinité électronique χ (eV)	4.59	[58]	<i>variable</i>	[54]
Permittivité relative, ε _r	8.3	[58]	13.6	[58]
Mobilité des électrons, μ _n (Cm ² /V.s)	165	[58]	100	[58]
Mobilité des trous, μ _p (Cm ² / V.s)	5	[58]	25	[58]
Energie du gap, E _g (eV), paramètre de base	3.8	[58]	<i>variable</i>	[58]
Densité effective des états dans la bande de conduction, N _c (cm ⁻³)	6.35x10 ¹⁸	[58]	2.2x10 ¹⁸	[58]
Densité effective des états dans la bande de valence, N _v (cm ⁻³)	1.8x10 ¹⁹	[58]	1.8x10 ¹⁹	[58]

Tableau 3. 1. Valeurs des données utilisées dans la simulation.

Avec l'énergie de la bande interdite du CIGS calculée par l'équation (2.1), et l'affinité électronique donnée en fonction de x par l'équation suivante [55] :

$$\chi = 4.35 - 0.421x - 0.244x^2 \quad (3.4)$$

Le schéma de la structure CIGSZnS/ sur un substrat du silicium étudié dans cette partie est montré dans la figure (3.6) :

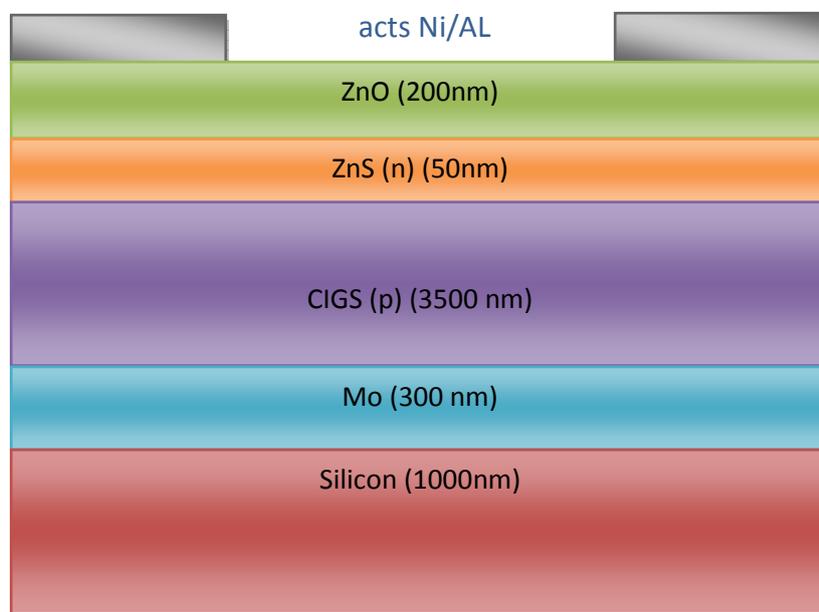


Figure 3. 6. Structure d'une cellule solaire à base du (CIGS) utilisé pour la simulation [57].

a *Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/ZnS en fonction de x*

La figure (3.7) représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension pour plusieurs concentrations de gallium x variable de 0.1 à 0.5. On note que lorsque x augmente, la tension de circuit ouvert V_{co} augmente. Par exemple, à x de 0.3 on trouve $V_{co}=0.67$ V et pour x=0.5 on obtient $V_{co}=0.8$ V, par conséquent une variation de $\Delta V_{co}=0.13$ V est obtenue. Cependant, la densité de courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de de la concentration du Ga. Par exemple à x de 0.3 on trouve $J_{cc}=40.19$ mA/cm²et pour x=0.5 on trouve $J_{cc} =37.41$ mA/cm², avec une variation de $\Delta J_{cc}=2.78$ mA/cm²trouvée. Ces résultats sont plus clairs dans la figure (3.8.a). Concernant le facteur de forme représenté sur la figure (3.8.b) on voit que la valeur maximale obtenue est à x=0.3 avec FF=84 %, et pour le rendement on remarque qu'il augmente de 19.27 % jusqu'à 25 % dans la plage de x 0.1-0.5. Comme à x=0.5 la contrainte est un peu élevée de 4.89 %. Suivant notre étude sur la variation de la contrainte avec la concentration x et en se basant sur les travaux expérimentaux sur cette structure [53] qui ont montré que x=0.3 est la concentration optimale qui donne le meilleur rendement de conversion et une contrainte assez petite, a motivé notre choix pour prendre cette valeur (x=0.3) pour ce qui suit dans la première partie de notre étude.

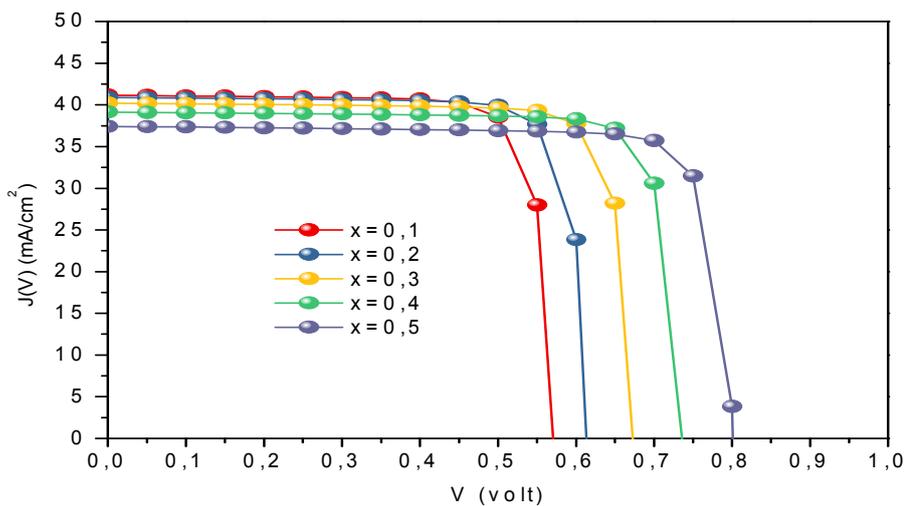


Figure 3. 7. Variation de la caractéristique J-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.

La figure (3.8) représente les performances de la cellule solaire CIGS/ZnS pour différentes concentration du Gallium, les valeurs de la densité de court-circuit et la tension de circuit-

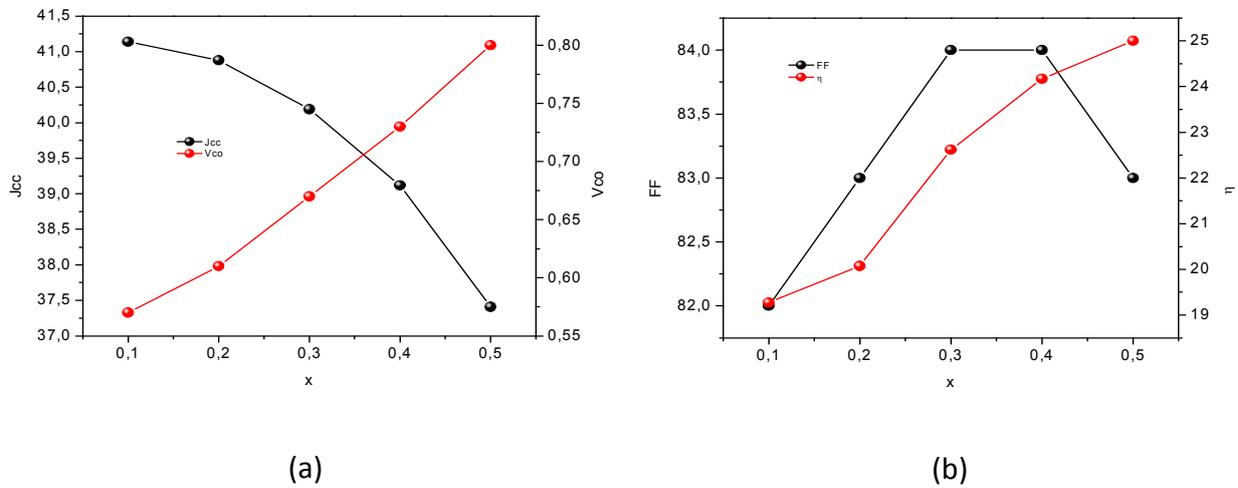


Figure 3. 8. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert (b) représentation de facteur de forme et le rendement, en fonction de concentration du Gallium x .

b Variation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/ZnS en fonction de x

La figure (3.9) montre la caractéristique P-V de la structure CIGS/ZnS pour différentes concentrations du Gallium.

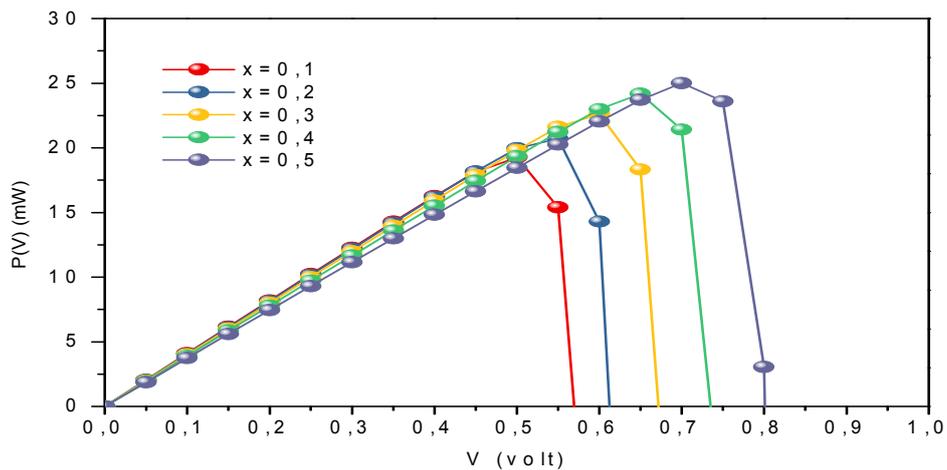


Figure 3. 9. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs concentrations du Gallium x .

On note que pour chaque x la puissance augmente jusqu'à atteindre une puissance maximale P_m , puis elle commence à diminuer. Par exemple pour $x=0.1$ on a $P_m=19.27$ mW et si on change la concentration à $x=0.3$ on aura $P_m=22.62$ mW.

3.3.2 L'effet de la température sur les paramètres caractéristiques

*a*Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/ZnS en fonction de T

La Figure (3.10) représente la variation de la caractéristique J-V pour plusieurs températures à une concentration du Gallium $x=0.3$. On constate que la température n'a pas une grande influence sur la densité de courant de court-circuit avec une valeur moyenne de 40.21 mA/cm^2 trouvée. Par contre, elle influe sur la tension de circuit-ouvert, plus la température augmente plus le V_{co} diminue. Concernant le facteur de forme et le rendement de la conversion, ils diminuent de façon drastique avec la température, pour des valeurs maximale de $\eta=24.59\%$ et $FF=85\%$ obtenues à une température $T=275$ K. Ces résultats sont plus évidents dans la figure 3.10.a et 3.10.b.

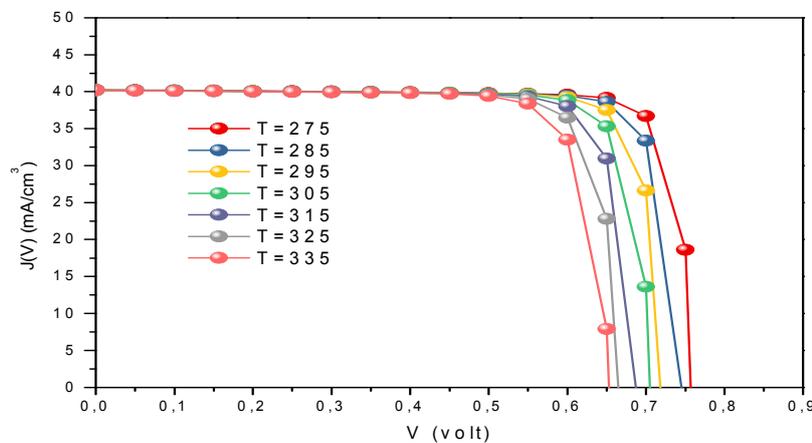


Figure 3. 10. Variation de la caractéristique J-V pour plusieurs températures.

La figure (3.11) représente les performances de la cellule solaire CIGS/ZnS pour plusieurs températures T , où la densité de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit-ouvert V_{co} sont déduire par la caractéristique J-V.

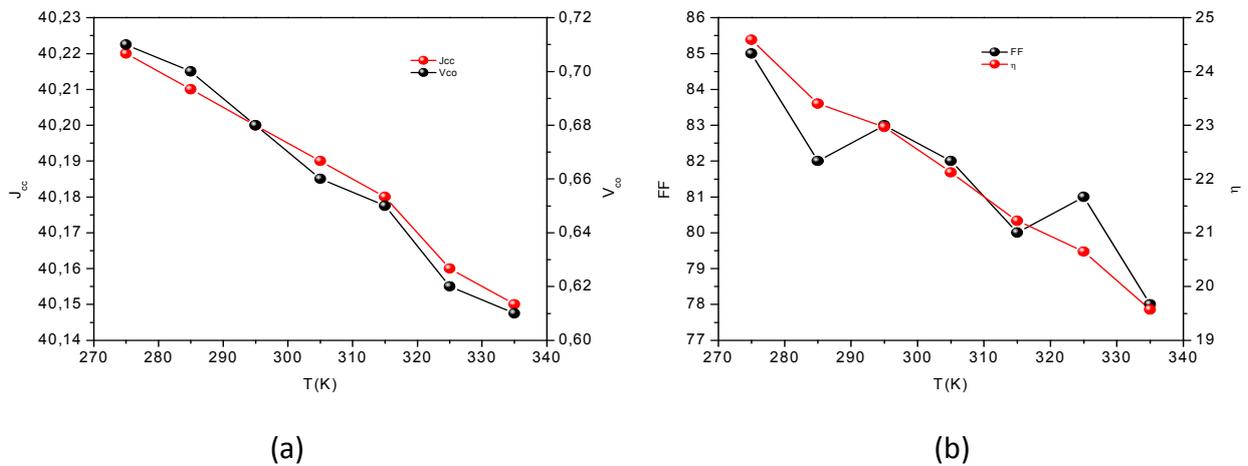


Figure 3. 11. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert (b) représentation de facteur de forme et le rendement, en fonction de la température T.

bVariation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/ZnS en fonction de T

La Figure (3.12) montre l'évolution de la puissance en fonction de la tension pour plusieurs températures à une concentration du gallium $x=0.3$. On remarque que plus la tension augmente, plus la puissance augmente aussi jusqu'à atteindre une puissance maximale P_m , à partir de laquelle elle commence de diminuer. La puissance maximale la plus grande de 25.69 mW est obtenue à $T=275$.

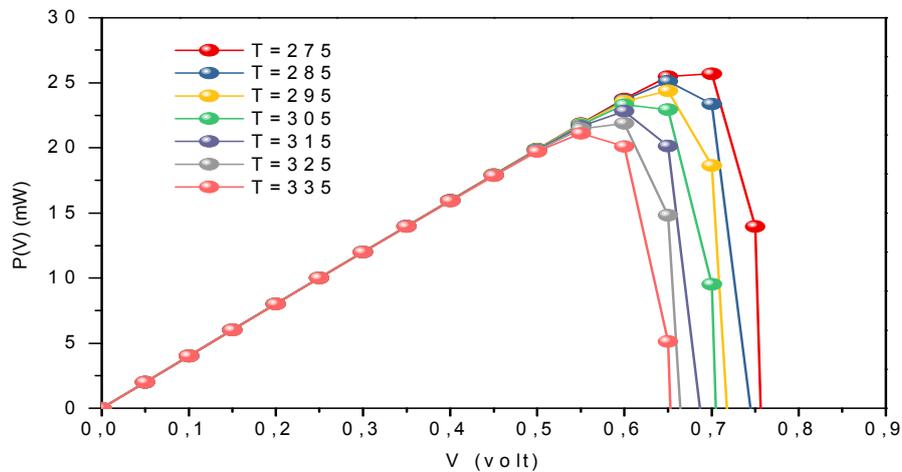


Figure 3. 12. Variation de La caractéristique P-V pour plusieurs températures.

3.3.3 Variation de l'efficacité quantique externe (EQE)

Comme évoqué dans le chapitre 2, l'efficacité quantique externe est un paramètre important qui caractérise une cellule solaire, puisque il donne une information sur les porteurs de charge collectés aux contacts par rapport à ceux qui sont créés au volume de la cellule solaire pour chaque photon absorbé. La figure (3.13) montre l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures et une concentration du Ga fixée de $x=0.3$. On voit clairement que la température n'a pas un grand impact sur la courbe d'EQE. D'autre part on observe que la structure ZnS/CIGS couvre une large gamme du spectre solaire variant de $0.3 \mu\text{m}$ jusqu'à $1.2 \mu\text{m}$ avec une valeur maximale de 77.77% à la longueur d'onde $0.525 \mu\text{m}$ avec une température de 275 K .

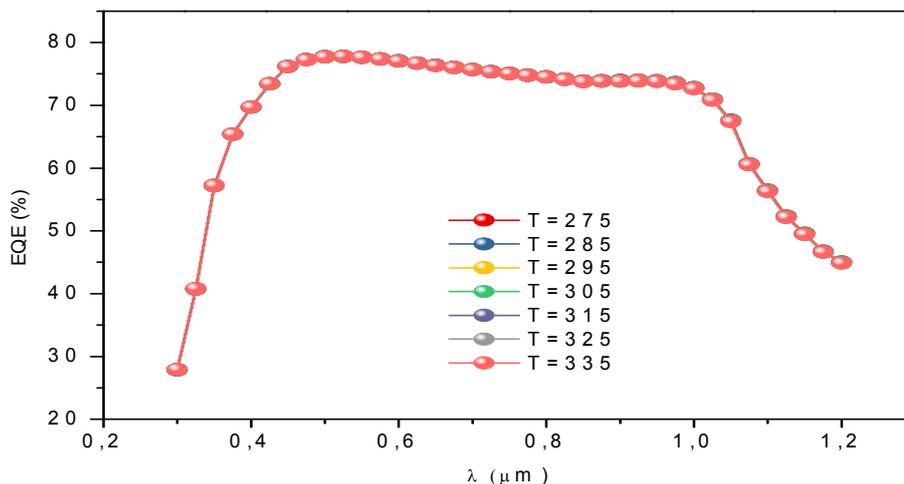


Figure 3. 13. Variation de l'efficacité quantique externe EQE de la structure (CIGS/ZnS) en fonction de la longueur pour différents températures avec $x=0.3$.

3.3.4 Propriétés électriques de la structure CIGS/CdS

Pour la deuxième partie de ce chapitre, l'étude porte sur la structure CIGS/CdS, où on extrait les différentes propriétés ainsi que sur l'effet de la température sur la structure. Le tableau suivant présente les données électriques introduites lors de la simulation.

matériau	CdS	Réf	CIGS	Réf
Epaisseur de la couche (μm)	0.05	[1]	3.5	[1]
Affinité électronique χ (eV)	4.5	[6]	<i>variable</i>	[2]
Permittivité relative, ϵ_r	10	[6]	13.6	[6]
Mobilité des électrons, μ_n ($\text{Cm}^2 / \text{V.s}$)	140	[1]	100	[6]
Mobilité des trous, μ_p ($\text{Cm}^2 / \text{V.s}$)	25	[1]	25	[6]
Energie du gap, E_g (eV), paramètre de base	2.4	[6]	<i>variable</i>	[3]
Densité effective des états dans la bande de conduction, N_c (cm^{-3})	2.2×10^{18}	[1]	2.2×10^{18}	[6]
Densité effective des états dans la bande de valence, N_v (cm^{-3})	1.8×10^{19}	[1]	1.8×10^{19}	[6]

Tableau 3. 2. Valeurs des données utilisées dans la simulation.

La figure (3.14) représente la structure de la cellule solaire CIGS/CdS utilisée dans cette partie d'étude.

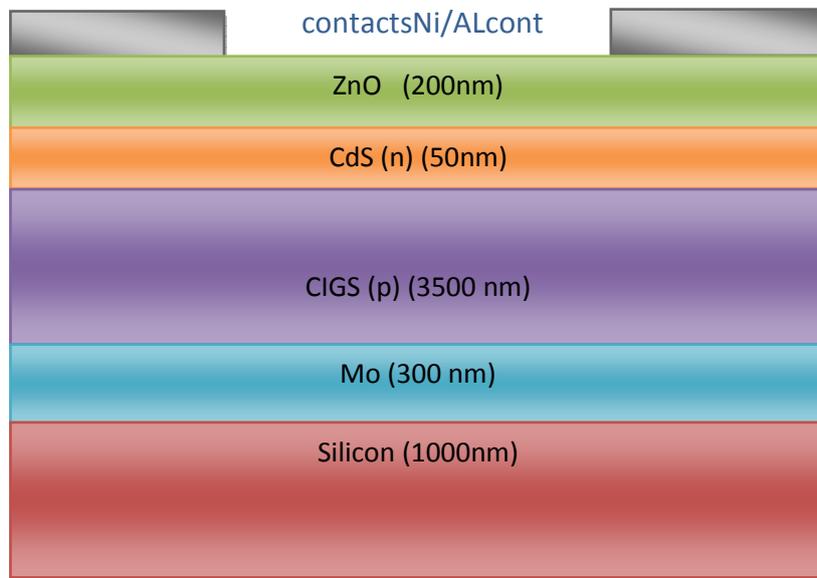


Figure 3. 14. Structure d'une cellule solaire à base du (CIGS) utilisé pour la simulation [57].

***a* Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/CdS en fonction de x**

La figure (3.16) représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension pour plusieurs concentrations de Gallium. On constate que l'augmentation de la tension de circuit-ouvert dû à l'augmentation de x, par exemple à $x=0.3$ on aura $V_{co}=0.67$ V et pour $x=0.5$ on obtient $V_{co}=0.79$ V, soit une variation de $\Delta V_{co}=0.12$ V. On remarque par contre, que la densité de courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de la concentration du Ga. Par exemple à $x=0.3$, le J_{cc} est de 32.1 mA/cm^2 et pour $x=0.5$ il est de 30.05 mA/cm^2 avec une

variation de $\Delta J_{cc} = 2.05 \text{ mA/cm}^2$. Ces résultats sont plus clairs dans la figure (3.17.a). Concernant le facteur de forme et le rendement représenté sur la figure (3.17.b), on remarque qu'il augmente de $\eta = 14.93 \%$ jusqu'à $\eta = 20.07 \%$ et $FF = 81 \%$ jusqu'à $FF = 84.4 \%$ dans la plage de $x = 0.1-0.5$. Comme on a déjà expliqué dans la première partie de l'étude, on va prendre $x = 0.3$ comme valeur optimale.

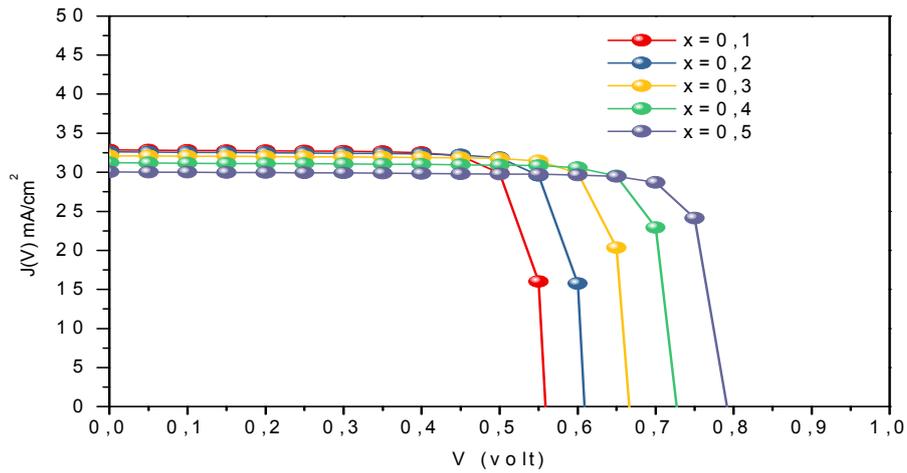


Figure 3. 15. Variation de la caractéristique J-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.

La figure (3.17) représente les performances de la cellule solaire CIGS/CdS pour plusieurs

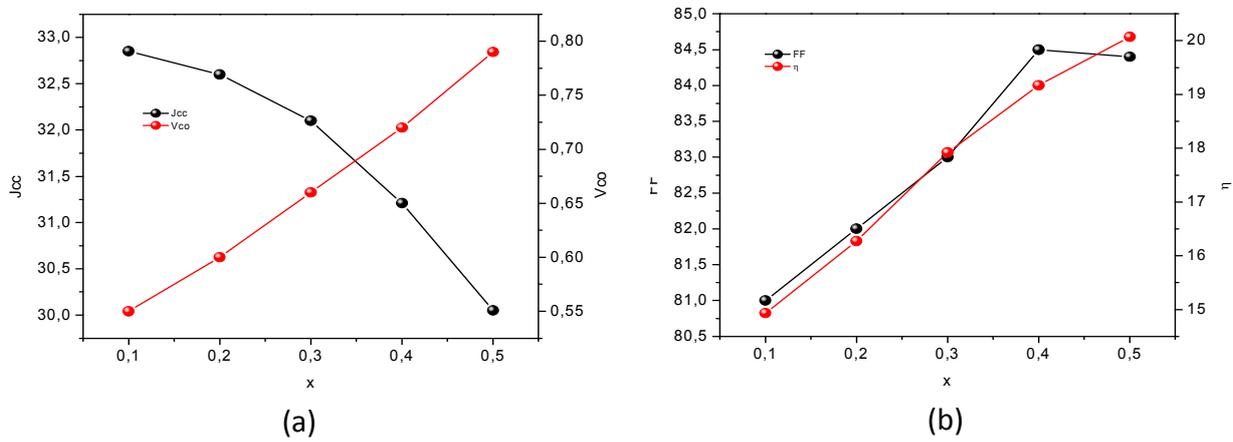


Figure 3. 16. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert, (b) représentation de facteur de forme et le rendement en fonction de concentration du Gallium x.

***b*Variation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/CdS en fonction de x**

La figure (3.18) montre la caractéristique P-V de la structure CIGS/ZnS pour différentes concentrations du Gallium. On note que pour chaque x la puissance augmente jusqu'à atteindre une puissance maximale P_m , puis elle commence à diminuer. Par exemple pour $x=0.1$ on a $P_m=14.93$ mW et si on change la concentration à $x=0.3$ la puissance maximale vaut $P_m=17.92$ mW.

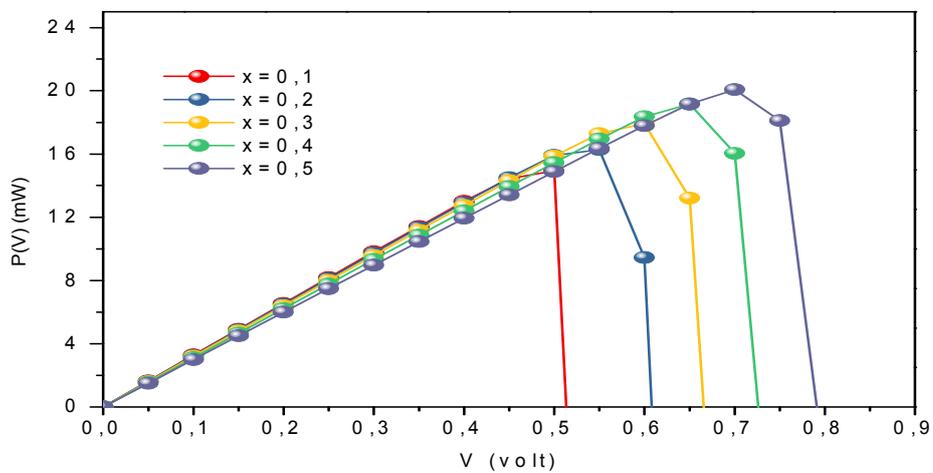


Figure 3. 17. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.

3.3.5 Effet de température sur les paramètres caractéristiques

***a*Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/CdS en fonction de T**

La Figure (3.19) représente la variation du J-V pour plusieurs températures à une concentration du Gallium $x=0.3$. On constate que la température n'a pas une grande influence sur la densité de courant de court-circuit avec une valeur moyenne de 32.12mA/cm^2 trouvée. Par contre, elle influe sur la tension de circuit-ouvert. On observe que plus la température augmente plus le V_{co} diminue. Concernant le facteur de forme et le rendement, ils diminuent avec l'augmentation de la température, et les valeurs maximales $FF=85\%$ et $\eta=19.41\%$ sont obtenues à une température $T=275$ K. Ces résultats sont plus évidents dans la figure 3.20.a et 3.20.b.

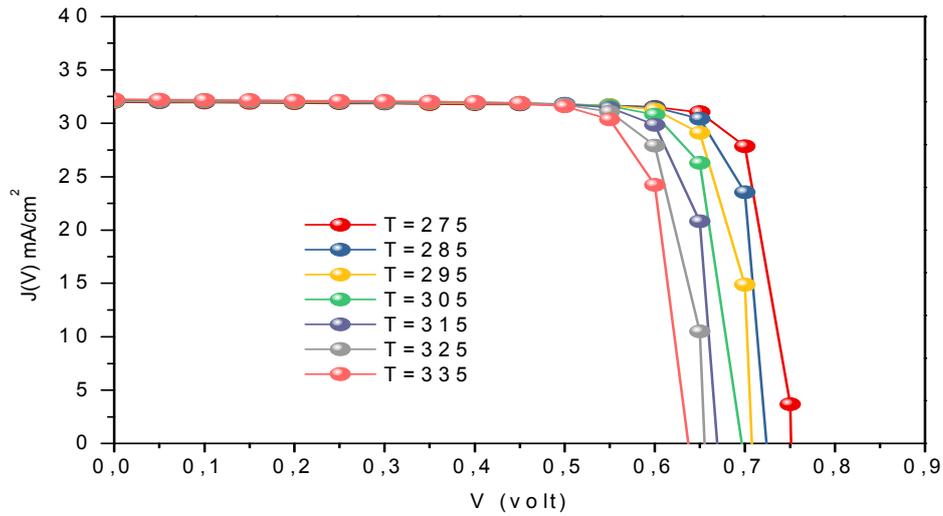


Figure 3. 18. Variation de la caractéristique J-V pour plusieurs températures.

La figure (3.20) représente les performances de la cellule solaire CIGS/CdS en fonction de la température

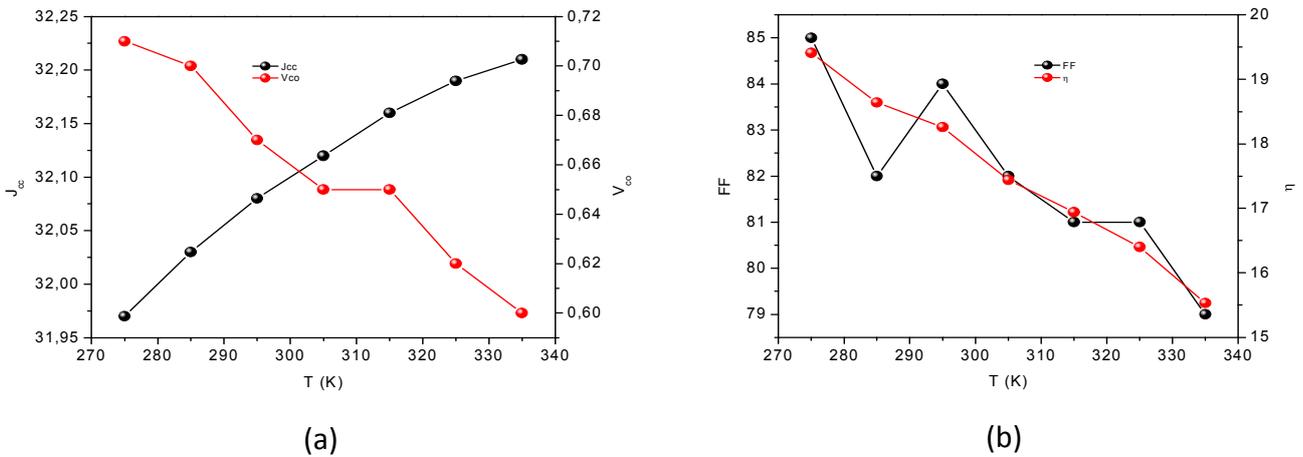


Figure 3. 19. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert (b) représentation de facteur de forme et le rendement, en fonction de la température T.

bVariation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/CdS en fonction de T

La Figure (3.21) montre l'évolution de la puissance en fonction de la tension pour plusieurs températures à une concentration du gallium x=0.3. On remarque qu'au cours de l'augmentation de la tension, la puissance augmente aussi jusqu'à atteindre une puissance maximale P_m , à partir de laquelle elle commence à diminuer. La puissance maximale la plus grande de 20.17 mW est obtenue à T=275.

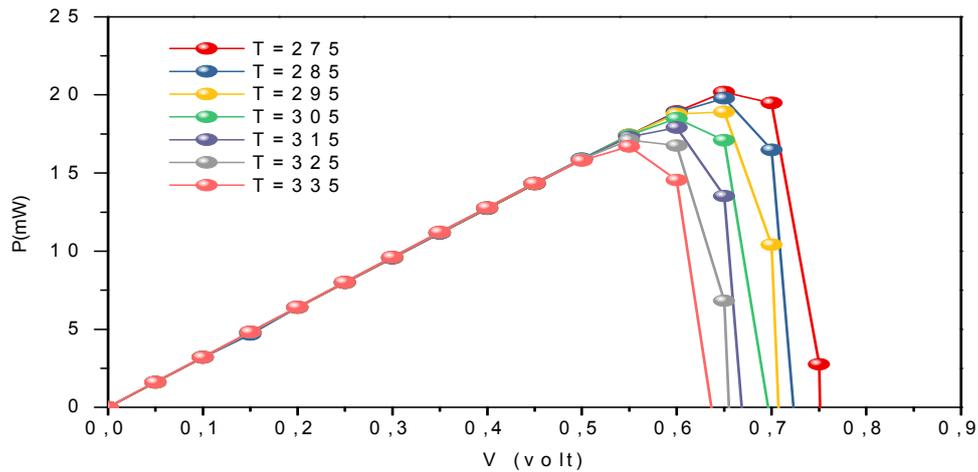


Figure 3. 20. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs températures T.

3.3.6 Variation de l'efficacité quantique externe (EQE)

La figure (3.22) présente l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures et une concentration du Ga fixée à $x=0.3$. On voit clairement que la température influe légèrement sur la courbe d'EQE.

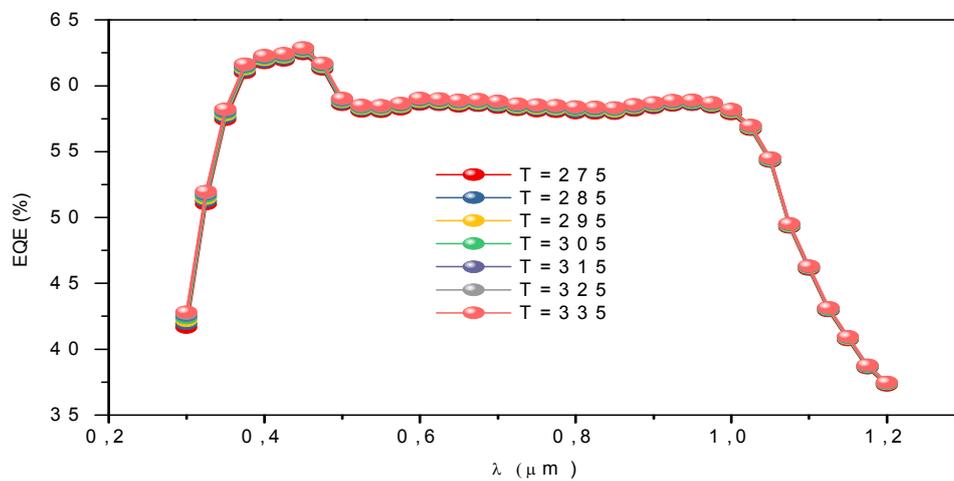


Figure 3. 21. Variation du rendement quantique externe EQE de la structure (CIGS/CdS) en fonction de la longueur pour différentes températures à $x=0.3$.

D'autre part, on observe que la structure CdS/CIGS couvre une large gamme du spectre solaire qui varie de $0.3 \mu\text{m}$ à $1.2 \mu\text{m}$ avec une valeur maximale de 62.9 % à la longueur d'onde $0.45 \mu\text{m}$ avec une température de 335K.

3.3.7 Propriétés électriques de la structure CIGS/ZnSe

La troisième partie de l'étude consiste à étudier la structure (CIGS/ZnSe), extraire les différents paramètres électriques et enfin l'étude de l'effet de température sur la structure. Le tableau suivant représente les caractéristiques du matériau utilisé pour la simulation.

Matériau	ZnSe	Réf	CIGS	Réf
Epaisseur de la couche (μm)	0.05	[56]	3.5	[53]
Affinité électronique χ (eV)	4.09	[58]	<i>variable</i>	[54]
Permittivité relative, ϵ_r	8.1	[58]	13.6	[58]
Mobilité des électrons, μ_n ($\text{Cm}^2 / \text{V.s}$)	100	[58]	100	[58]
Mobilité des trous, μ_p ($\text{Cm}^2 / \text{V.s}$)	16	[58]	25	[58]
Energie du gap, E_g (eV), paramètre de base	2.71	[58]	<i>variable</i>	[55]
Densité effective des états dans la bande de conduction, N_c (cm^{-3})	5×10^{18}	[58]	2.2×10^{18}	[58]
Densité effective des états dans la bande de valence, N_v (cm^{-3})	1.8×10^{19}	[58]	1.8×10^{19}	[58]

Tableau 3. 3. Valeurs des données utilisées dans la simulation.

La figure (3.23) représente la structure de la cellule solaire CIGS/ZnSe utilisée dans cette partie d'étude.

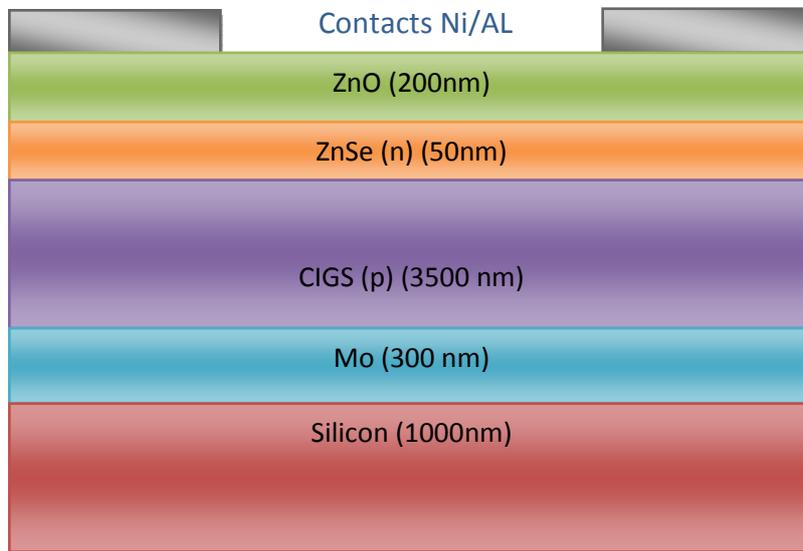


Figure 3. 22. Structure d'une cellule solaire à base du (CIGS) utilisé pour la simulation [57].

a Variation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/ZnSe en fonction de x

La figure (3.24) représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension pour plusieurs concentrations de Gallium x. On note que lorsque x augmente, la tension de

circuit ouvert V_{co} augmente. Par exemple à $x=0.3$ on trouve $V_{co}=0.69$ V et pour $x=0.5$ on obtient $V_{co}=0.82$ V, soit une variation de $\Delta V_{co}=0.13$ V. Cependant, la densité de courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de la concentration du Ga. Par exemple à $x=0.3$ on trouve $J_{cc}=40.8$ mA/cm² et pour $x=0.5$, le J_{cc} est de 38.09 mA/cm², avec une variation de $\Delta J_{cc}=2.71$ mA/cm² trouvée. Ces résultats sont plus clairs dans la figure (3.25.a). On remarque que le facteur de forme augmente avec l'augmentation de la concentration c'est-à-dire à $x=0.1$ on a $FF=70\%$ et si on change à $x=0.5$ on aura $FF=77\%$. Concernant le rendement représenté sur la figure (3.25.b), il augmente de 17.57 % jusqu'à 24.18 % dans la plage de x 0.1-0.5. On va prendre $x=0.3$ pour le reste de notre résultat pour des raisons déjà expliquées dans la première partie.

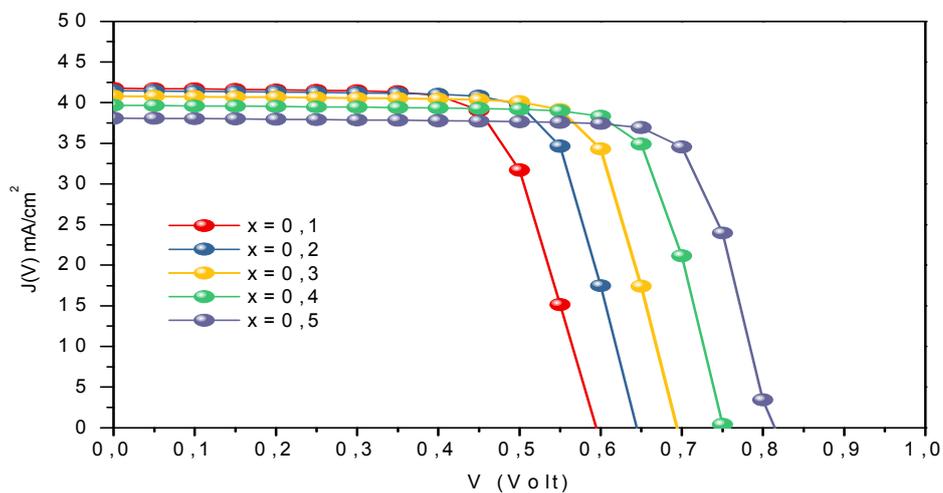


Figure 3. 23. Variation de la caractéristique J-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.

La figure (3.25) montre les performances de la cellule solaires CIGS pour une couche tampon ZnSe en fonction de la concentration du Gallium x

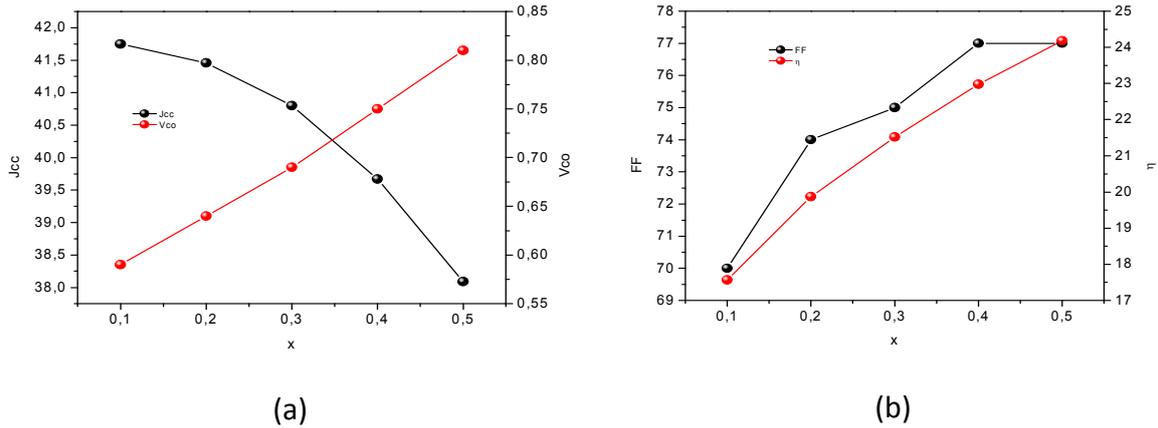


Figure 3. 24. (a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert, (b) représentation de facteur de forme et le rendement en fonction de concentration du Gallium x.

bVariation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/ZnSe en fonction de x

La figure (3.26) montre la caractéristique P-V de la structure CIGS/ZnSe pour différentes concentrations du Gallium. On note que pour chaque x la puissance augmente jusqu'à atteindre une puissance maximale P_m , puis elle commence à diminuer. Par exemple pour $x=0.1$ on a $P_m=17.57$ mW et si on change la concentration à $x=0.3$ on a $P_m=24.18$ mW.

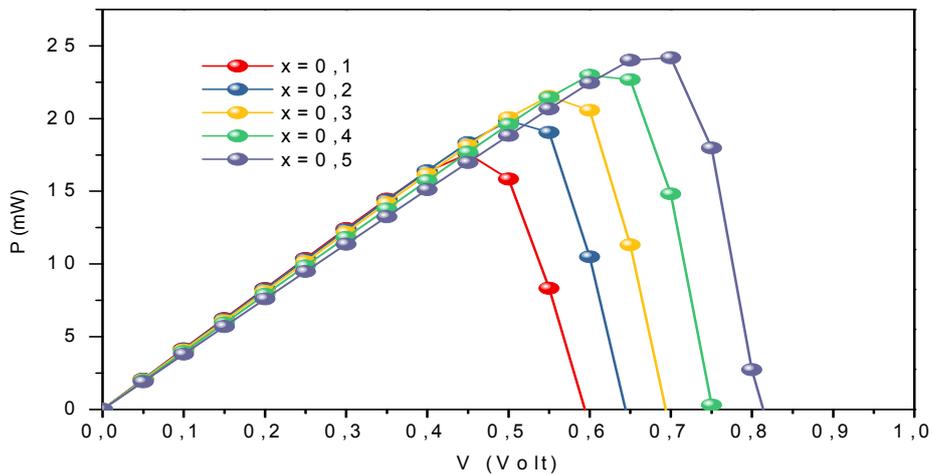


Figure 3. 25. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs concentrations du Gallium x.

3.3.8 Effet de température sur les paramètres caractéristiques

aVariation de la caractéristique courant-tension J-V de la structure CIGS/ZnSe en fonction de T

La Figure (3.27) représente la variation du J-V pour plusieurs températures à une concentration du Gallium $x=0.3$. On constate que la température n'a pas une grande influence sur la densité de courant de court-circuit avec une valeur moyenne de 40.82 mA/cm^2 . Par contre, elle influe sur la tension de circuit-ouvert. Plus la température augmente plus le V_{co} diminue. Le rendement de la conversion diminue avec diminution de la température pour une valeur maximale de 21.69% obtenue à la température $T=275 \text{ K}$, contrairement pour le facteur de forme, il augmente de 71% jusqu'à 87% sur la plage $275\text{-}335 \text{ K}$. Ces résultats sont plus évident dans la figure 3.28.a et 3.28.b.

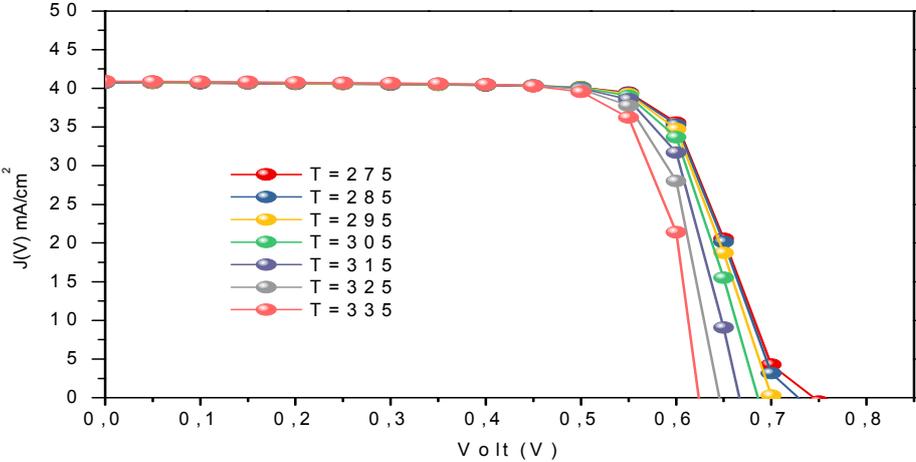


Figure 3. 26.Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs températures.

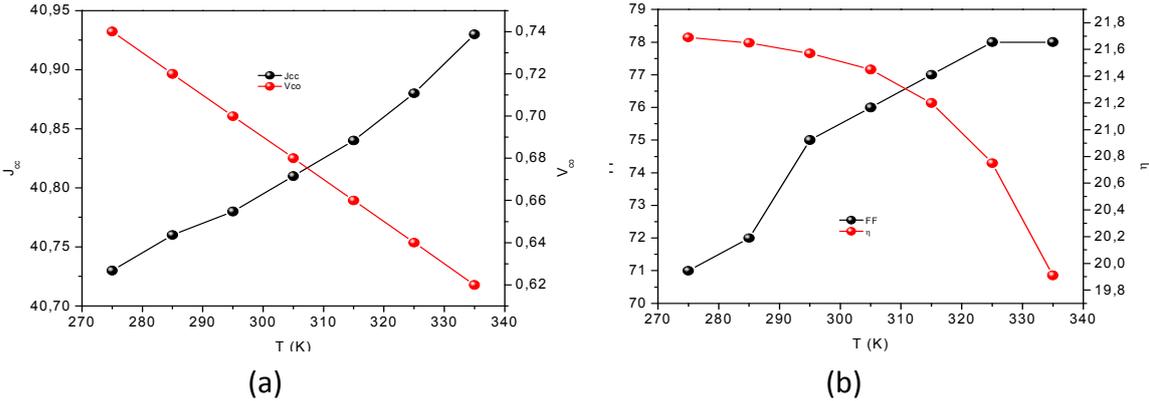


Figure 3. 27.(a) représentation de la densité de court-circuit et la tension de circuit-ouvert (b) représentation de facteur de forme et le rendement, en fonction de la température T.

***b*Variation de la caractéristique puissance-tension P-V de la structure CIGS/ZnSe en fonction de T**

La Figure (3.29) montre l'évolution de la puissance en fonction de la tension pour plusieurs températures à une concentration du gallium $x=0.3$.

On remarque que plus la tension augmente, plus la puissance augmente aussi jusqu'à atteindre une puissance maximal P_m , à partir de laquelle elle commence de diminuer. La puissance maximale la plus grande de 21.69 mW est obtenue à $T=275$.

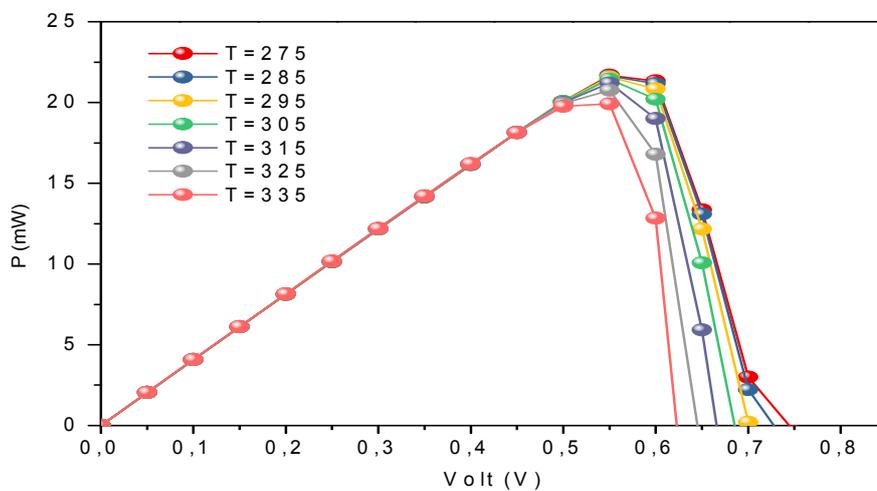


Figure 3. 28. Variation de la caractéristique P-V pour plusieurs températures.

3.3.9 Variation de l'efficacité quantique externe (EQE)

La figure (3.30) présente l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures et une concentration du Ga fixée de $x=0.3$. On voit clairement que la température influe légèrement sur la courbe d'EQE. D'autre part, on observe que la structure ZnS/CIGS couvre une large gamme du spectre solaire qui varie de $0.3 \mu\text{m}$ à $1.2 \mu\text{m}$ avec une valeur maximale de 78.86 % à la longueur d'onde $0.525 \mu\text{m}$ avec une température de 275 K.

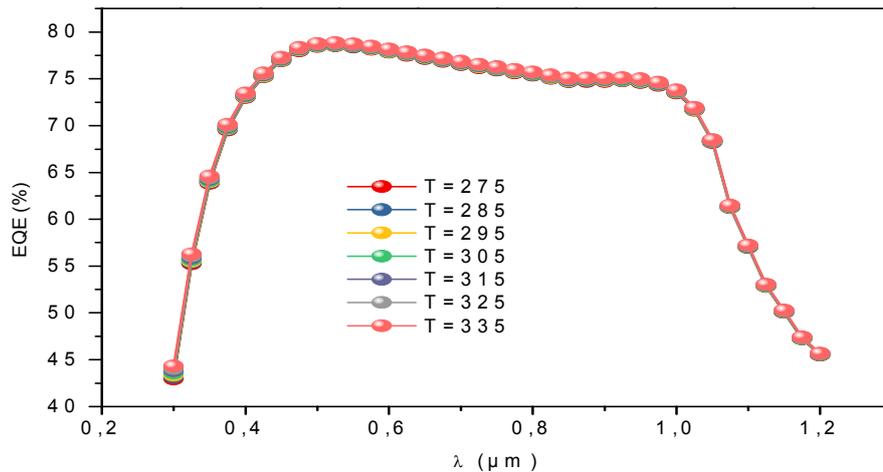


Figure 3. 29. Variation du rendement quantique externe EQE de la structure (CIGS/ZnSe) en fonction de la longueur pour différent température a x=0.3.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une simulation d'une cellule solaire à base de CIGS en utilisant trois différentes couches tampon ZnS, CdS et ZnSe. L'étude a consisté à faire les calculs des caractéristiques de chaque cellule et de procéder à des comparaisons afin d'obtenir la meilleure structure.

En ce sens, le CdS est à éviter principalement pour sa toxicité pour la nature ainsi que pour son faible rendement qui est de l'ordre de 17.92 % par rapport au ZnS et ZnSe qui sont respectivement de 22.62 % et 21.52 %.

Quant au ZnS, à une concentration de $x=0.3$, il présente un taux de déformation plus élevé par rapport au ZnSe. En effet, la contrainte du ZnS est de 5.45% et le ZnSe est égale à 2.84 %.

Enfin, d'après les résultats de notre étude, et pour une concentration du Gallium $x=0.3$, la meilleure structure est le CIGS/ZnSe et ce pour les raisons suivantes :

- un rendement de 21.52%.
- une densité de court-circuit $J_{cc}=40.8 \text{ mA/cm}^2$.
- une tension de circuit-ouvert $V_{co}=0.69 \text{ V}$.
- un facteur de forme $FF=75 \%$.

Conclusion générale

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et puissante parmi les 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.

Notre travail a porté sur l'étude d'une cellule solaire en couche mince en utilisant le matériau absorbeur CIGS. Dans la première partie, nous avons présenté des généralités sur les cellules photovoltaïques (définition, étapes de fonctionnement, avantages et inconvénients).

Dans la deuxième partie, nous avons présenté la structure d'une cellule solaire en couche mince et caractérisé celle-ci par un schéma équivalent. Les différentes propriétés physiques et optiques des matériaux CIGS, CdS, ZnS et ZnSe sont également abordées.

Nous avons par la suite, indiqué comment on peut extraire la caractéristique courant-tension I-V et présenter les différentes performances de la structure comme la caractéristique densité de court-circuit J_{cc} , la tension de circuit-ouvert V_{co} , le rendement η et l'efficacité quantique externe EQE.

Dans la troisième partie des simulations ont été réalisées en utilisant le logiciel SILVACO TCAD afin d'extraire les différentes caractéristiques électriques et optiques de la cellule solaire CIGS avec plusieurs couches tampon ZnS, CdS et ZnSe comme la caractéristique J-V et la caractéristique P-V et l'efficacité quantique externe EQE.

Et d'après nos résultats pour les différentes cellules utilisées nous avons conclu que pour une concentration de Gallium $x=0.3$, le CIGS/ZnSe présente une contrainte plus faible soit $\epsilon=2.84\%$, un rendement de 21.52 %, un facteur de forme $FF=75\%$, une densité de court-circuit $J_{cc}=40.8 \text{ mA/cm}^2$ et une tension de circuit-ouvert $V_{co}=0.69 \text{ V}$, ce qui la rend meilleure structure parmi les trois étudiées.

Bibliographie

- [1] Ullal HS, Zweibel K, Von Roedern B, Proc. 26th IEEE PhotovoltaicSpecialistsConf., Anaheim, CA, USA ; 1997, page. 301.
- [2] Yamaguchi M., J. Appl. Phys. 78 (1995).
- [3] Tuttle JR, Szalaj A, Keane J, Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Anchorage, 2000; 1042–1045.
- [4] I.Repins, S. Glynn, J. Duenow, T.J. Coutts, W. Metzger, and M.A. Contreras, Conference Paper NREL/CP-520-46235, juin 2009.
- [5] Intitul, L. (2011). République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l ' Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Med Khider Biskra Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie Département des Sciences de la Mati.
- [6] William N. Shafarman, Susanne Siebentritt, and Lars Stolt. Cu (InGa) Se₂SolarCells. In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, page 546. 2011.
- [7] Rémi de Bettignies : «CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUESDÉRIVÉES DE NOUVEAUX SYSTÈMES CONJUGUÉS», Thèse de Doctorat, 2003, Université d'Angers.
- [8] Maifi Lyes : «CALCUL DES PARAMÈTRES INTERNES D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE A PARTIR DES PARAMÈTRES EXTERNES MESURÉS», Thèse de Magister, 2010, Université Mentouri de Constantine.
- [9] BouchekoufSeloua : «MODELISATION NUMERIQUE DES OPVC DANS LES SYSTEMES EnR», Thèse de Doctorat, 2010, Université Mentouri de Constantine
- [10] M. Volle, A. Vernay, T. M. (2005). Les cellules photovoltaïques.
- [11] Roger, C., De, D., &Cigs, D. (2014). CIGS sur substrats métalliques. To cite this version : Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques.

- [12] N. Benabdallah, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe », thèse de magister, 2006, université Abou Bekrbelkaid Tlemcen.
- [13] Jianhua Zhao; Aihua Wang; Campbell, P.; Green, M.A.; « A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping », Electron Devices, IEEE Transactions on Volume 46, Issue10, Oct.1999.
- [14] Zaouk, D.; Zaatar, Y.; Khoury, A.; Llinares, C.; Charles, J.-P.; Bechara, J.; Ajaka, M.;« Electrical and optical characteristics of NAPS solar cells of Si (PiN) structure », Environment and Solar, 2000 Mediterranean Conference for 16-17 Nov. 2000 Page(s):93 – 95
- [15] Jianhua Zhao; Aihua Wang; Campbell, P.; Green, M.A.; « A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping », Electron Devices, IEEE Transactions on Volume 46, Issue10, Oct.1999, Page(s):1978–1983
- [16] Kasdi, U., & Ouargla, M. (2017).
- [17] A. Luque and S. Hegedus ; Handbook of Photovoltaic Science and Engineering ; John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, (2011).
- [18] J. H. Yoon, K. H. Yoon, W. M. Kim, J. K. Park, Y. J. Baik, T. Y. Seong, and J. Jeong ; Hightemperature stability of molybdenum (Mo) back contacts for CIGS solar cells: a route towards more robust back contacts ; Journal of Physics D: Applied Physics,(2011).
- [19] F. Kessler and D. Rudmann ; Technological aspects of flexible CIGS solar cells and modules; Solar Energy,(2004).
- [20] D. Brémaud and A. N. Tiwari; Flexible Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells and Technologies ; in Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milano, (2007).
- [21] R. L. Anderson; Experiments on Ge-GaAs Heterojunctions; Solid State Electronics, (1962).
- [22] Gavin J. Conibeer, Arthur Willoughby; Solar Cell Materials: Developing Technologies John Wiley & Sons, United Kingdom, (2014).

- [23] M. ParansParanthaman, Winnie Wong-Ng, Raghu N. Bhattacharya ; *Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells* ; Springer International Publishing Switzerland, (2016).
- [24] A. Duchatelet, « Synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se₂ pour cellules solaires par électro dépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium », Thèse de Doctorat, université de Lille1, 2012.
- [25] M. Buffiere, « Synthèse et caractérisation de couches minces de Zn(O,S) pour application au sein des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se₂ », Thèse de doctorat, université de Nantes,2011.
- [26] N. Naghavi, D. Abou-Ras, N. Allsop, N. Barreau, S. Bücheler, A. Ennaoui, C.H. Fischer, C. Guillen, D. Hariskos, J. Herrero, R. Klenk, K. Kushiya, D. Lincot, R. Menner and T. Nakada, « Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)₂ based thin film photovoltaics : present status and current developments », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol.18, 2010, pp. 411.
- [27] A. Luque and S. Hegedus ; *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* ; John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, (2011).
- [28] Adnane, M., Hamzaoui, S., Mostapha, B., & Toufik, S. (2011). Elaboration et caractérisation des couches minces conductrices et transparentes pour les cellules solaire de type TCO / ZnS / CIS.
- [29] M. Agrawal, C. Bolman, S. Carnahan, B. Merewitz, G. Phipps, M. Rogol, S. Willhaus, and T. Xu, "Solar Annual 2012: The Next Wave." Photon Consulting, 2012.
- [30] 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.
- [31] 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*.
- [32] Sunghun Jung, SeJinAhn, Jae Ho Yun, JihyeGwak, 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*,

- [33] Berger, J. (1976). Chapitre 3.
- [34] Kasdi, U., & Ouargla, M. (2017).
- [35] I. N. Ogorodnikov, V. A. Pustovarov, V. S. Chermnykh; Optics and Spectroscopy (2001).
- [36] Indium, C., & Cuin, G. (n.d.). Magister en : Electronique.
- [37] Silvaco, I. (2016). Atlas User's Manual. *Silvaco, Inc.*
- [38] Li Wenyi, CaiXun, Chen Qiulong, Zhou Zhibin, Materials Letters, (2005).
- [39] S. Prabakar, M. Dhanam, Journal of Crystal Growth. (2005).
- [40] E. Çetinörgü, C. Gümüş, R. Esen, Thin Solid Films. 515 (2006) 1688-1693.
- [41] Des, F., & Exactes, S. (n.d.). Aspect de modelisation des proprietes physiques des alliages semiconducteurs ii-vi a application photovoltaïque.
- [42] Adnane, M., Hamzaoui, S., Mostapha, B., & Toufik, S. (2011). Elaboration et caractérisation des couches minces conductrices et transparentes pour les cellules solaire de type TCO / ZnS / CIS.
- [43] Suhail, M. (2012). Structural and optical properties of ZnS, PbS, Zn (1-x) Pb (x) S, Zn (x) Pb (1-x) S and PbZn (x) S (1-x) thin films. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*,
- [44] Bernard.Equer ; Energie solaire photovoltaïque ; physique et technologie de la conversion photovoltaïque ; Volume 1 Ellipses Editions Marketing, (1993).
- [45] Serge Poignant : «L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE», Rapport D'information, 2009, Assemblée Nationale Constitution du 4 Octobre 1958 Treizième Législature.
- [46] S. R. Wenhan, M. A. Green, M. E. Watt, R.P. Corkish and A.B. Sproul, « Applied Photovoltaics, (third edition), Earthscan, 2011.
- [47] Des, U., & Mentouri, F. (2015). Doctorat en Sciences en Electronique Intitulée Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn 1-x Ga x Se
- [48] Hocine Ghembaza : «OPTIMISATION DU PROFIL DE DISTRIBUTION DU PHOSPHORE DANS LES CELLULES SOLAIRES A BASE DE», Thèse de Magister, 2011, Université Abou

BekrBelkïd de Tlemcen.

[49] Sze S M; Physics of semiconductor Devices, 2nd ed. ; John Wiley & Sons Inc, (1981).

[50] Stephen J. Fonash ; SolarCellDevicePhysics ; Second Edition Elsevier, USA, (2010).

[51] Dib Wassila: «MODELISATION DES STRUCTURES PHOTOVOLTAIQUES : ASPECTS FONDAMENTAUX ET APPLIQUES», Thèse de Doctorat, 2010, Université Abou BekrBelkïdde Tlemcen.

[52] Indium, C., &Cuin, G. (n.d.). Magister en : Electronique

[53] Yalçin, L., & Öztürk, R. (2013). *Performance comparison of c-Si, mc-Si and a-Si thin film PV by PVsyst simulation. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials.*

[54] BENMIR ABDELKADER, Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque en couche mince à hétérojonction : CdS/CIGS et CdS/CZTS, these de Doctorat, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2017.

[55] Des, U., & Mentouri, F. (2015). Doctorat en Sciences en Electronique Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$

[56] Charles Roger. Developpement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques, Université de Grenoble, 2013.

[57] CHAOUA Makhlof, Effet des couches conductrices et transparentes sur les performances des cellules solaires $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$, MAGISTER de 30/12/2014, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF – 1 – UFAS (ALGERIE)

[58] Troviano, M. (2009). URBACH ENERGY IN CIGS EXTRACTED FROM QUANTUM EFFICIENCY, (September).

[59] Silvaco, I. (2016). Atlas User's Manual. Silvaco,