



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par :

**Mme BENYOUB Hana**

Sur le thème

---

**Modélisation et simulation des caractéristiques d'une  
cellule solaire et théorie des milieux effectifs.**

---

Soutenu publiquement le 04. Juillet 2022 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme BENABADJI Batoul	MCB	Université de Tlemcen	Présidente
Mme RAHMOUN Khadidja	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrante
Mme FAKIRI Souhila	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice

*Année Universitaire : 2021 ~ 2022*

# Remerciements

*Je suis extrêmement heureuse et avec un grand plaisir je remercie :Allah qui m'a donnée la force de faire ce travail, qui m'a accordé la patience, le courage et l'aide*

*Ce travail a été réalisé au sein de l'Unité de recherche matériaux et Energies renouvelables (URMER)*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements, ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mon superviseur Mme **Khadidja RAHMOUN** professeur à l'Université de Tlemcen et directrice de l'URMER, pour le temps consacré, les efforts, les conseils, les orientations et les encouragements qu'elle m'a donnés. Sans son appui et sa complicité, la réalisation de ce travail n'aurait jamais été réalisée.*

*Mes remerciements les plus vives vont aux membres du jury, Mme **BENABADJI Batoul** pour avoir accepté de présider ce jury, et Mme **FAKIRI Souhila** pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*Je remercie mes parents pour leur soutien et patience et leurs contributions,*

*Ma petite princesse Lilia qui ma donné courage et force.*

*Enfin et surtout je tiens à remercier ma tante Samah pour son aide et son soutien , si j'ai pu faire ce travail ces surtout grâce à vos encouragements, merci.*

## *Dédicaces*

*Je vous consacre ce travail en signe de ma sincère tendresse et de mon attachement indéfectible, A mes précieux parents .*

*Aucune dédicace ne peut exprimer mon amour et ma gratitude envers mes sœurs , mon adorable frère Abdenour qui m'a toujours soutenu.*

*Je dédie mon travail aussi à mes deux anges bien-aimés, Lilia et Rifel, je vous aime de tout mon cœur.*

*A l'âme pure de mes grand parents paternel Zahra et Abdel-Kader et ma grand-mère Fatima zahra et à mon petit frère Salah Islam Puisse Dieu vous avoir en sa sainte miséricorde et que ce travail soit une prière pour vos âmes.*

*A ma très chère tante Samah, ainsi que son mari Youcef pour tous ses encouragements et son aide, et à ses enfants.*

*A mes chers amis, A tous ceux et celles qui m'ont soutenu de près ou de loin durant mon parcours d'étude.*

# Liste Des Symboles

$h$  : la constante de Planck.

$\nu$  : la fréquence

$E$  : énergie du photon

$I_{sc}$  : courant court-circuit

$V_{oc}$  : tension en circuit ouvert

$FF$  : facteur de forme

$P_{max}$  : puissance maximale

a-Si : silicium amorphe

CIS : di-sélénium de cuivre indium

CdTe : tellure de cadmium

TCO : transparent conducting oxides

ITO : oxyde d'indium-étain

CdS : Sulfure de cadmium

ZnO : oxyde de zinc

CIGS : Séléniure De Cuivre Indium Gallium

SiN: nitrure de silicium

Al: Aluminium

Mg : Magnésium

Mo : Molybdène

TiO<sub>2</sub> : Le Dioxyde De Titane

$\eta$  : rendement de la cellule.

N : une densité

$\epsilon_0$  : la permittivité du vide

$f$  : la fraction volumique

p : un pore.

$K_p$  : constant diélectrique du pore

M : le matériau.

$K_M$  : constante diélectrique du matériau

$K_{\text{eff}}$  : la constante diélectrique effective du matériau.

p : le taux de porosité introduite.

n : indice de réfraction

$v_0$  : Le volume d'une maille élémentaire.

r : Le rayon de l'inclusion sphérique.

## **Table d'abréviations**

PCE : Point De Comptage Et D'estimation

E.P.R: Electron Powder Ribbon

OPV : Photovoltaïque organique

MEB : Microscopie électronique à balayage

NREL : National Renewable Energy Laboratory

PV : photovoltaïque

AM : Air masse

# Table des matières

Remercîments

Dédicaces

Liste des symboles

Table d'abréviation

Introduction Générale.....1

## CHAPITRE I : Généralités Sur Les Cellules Solaires

1. Introduction .....	3
2. Energie Solaire Photovoltaïque .....	3
2.1 Principe de Conversion photovoltaïque.....	3
2.2 La cellule solaire .....	4
2.2.1. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	4
2.2.2. Caractéristique I-V d'une cellule et rendement de conversion .....	5
2.2.3. Influence de l'éclairement et de la température .....	5
2.2.3.1. Influence de l'éclairement .....	5
2.2.3.2. Influence de la température .....	6
2.2.4. Technologie des cellules photovoltaïques .....	6
a. Première Génération .....	7
a.1 Silicium monocristallin.....	7
a.2 silicium polycristallin .....	9
a.3 Le silicium en ruban .....	10
b. Deuxième Génération.....	11
b.1 Silicium nanocristallin et amorphe.....	11
b.2. Matériau à base de Tellure de Cadmium.....	12
b. 3 Matériaux à base de Sélénure de Cuivre Indium Gallium (CIGS).....	14
c.1 Multi Jonction.....	15
c.2 Cellule Organique.....	16
C.3 Les Pérovskite.....	17
4.Conclusion : .....	20

## Chapitre II : Modélisation et simulation d'une cellule solaire, Résultats et discussions

1.Introduction .....	Erreur ! Signet non défini.
2.Outil de simulation SCAPS .....	Erreur ! Signet non défini.
2.1Programme de simulation SCAPS .....	Erreur ! Signet non défini.
2.2Explication du processus de simulation à l'aide de SCAPS.....	Erreur ! Signet non défini.
1.Le Panneau de démarrage de SCAPS.....	Erreur ! Signet non défini.
2.Definition du Problème .....	Erreur ! Signet non défini.
3.Structure de la première cellule étudiée CIGS/CdS/ZnO/AZO.....	Erreur ! Signet non défini.

3.1. Résultats Et Discussion .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.1.1. Effet De L'épaisseur Sur Les Caractéristiques Electriques De La Cellule .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.1.2 Effet Du Dopage Sur Les Caractéristiques Electriques De La Cellule ..	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
4. Structure De La Deuxième Cellule Etudiée CIGS/ZnOS/AZO .....	46
4.1. Résultats Et Discussion .....	<b>48</b>
4.1.1. Effet De L'épaisseur Sur Les Caractéristiques Electriques De La Cellule .....	49
4.1.2 Effet Du Dopage Sur Les Caractéristiques Electriques De La Cellule .....	57
5. Interpretation .....	63
6. Conclusion.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

<b>Chapitre III. Modélisation de la permittivité diélectrique de la cellule solaire à base de CIGS - Théorie des milieux effectifs</b>
--

1. Introduction .....	68
2. Théories du milieu effectifs.....	69
2.1. Caractéristiques des modèles de milieu effectifs.....	69
2.1.1. Représentation géométrique symétrique .....	69
2.1.2. Hypothèse de milieu effectif .....	69
2.1.3. Cellule-unité .....	70
2.2. Equations des modèles .....	<b>70</b>
2.2.1. Modèle de Clausius-Mossotti .....	70
2.2.1.1. Equation de Clausius-Mossotti.....	71
2.2.2. Modèle de Maxwell-Garnett.....	71
2.2.2.1. Equation de Maxwell-Garnett. ....	72
2.2.3. Modèle de Bruggeman .....	73
2.2.3.1. Equation de Modèle de Bruggeman. ....	73
3. Permittivité diélectrique .....	74
4. Loi des mélange.....	74
5. Calcul de la constante diélectrique avec la théorie des milieux effectifs .....	75
5.1. Structure de la cellule à étudier MO/CIGS/CdS/ZnO/AZO .....	75
5.2. Calcul de la constante diélectrique de la cellule étudiée, modèle série.....	78
5.3. Calcul de la constante diélectrique de la cellule étudiée, modèle parallèle.....	80
5.4. Effet de l'épaisseur $x_{\text{CIGS}}$ de la couche(CIGS) sur la constante diélectrique :.....	80
6. Conclusion.....	84
Conclusion générale.....	89
Références.....	92

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Fonctionnement d'un panneau solaire (HOUÉE, 2011).....	3
Figure I.2. L'effet photovoltaïque (Mahammedi, 2020) .....	4
Figure I.3. Schéma électrique de la cellule photovoltaïque (Benadla, 2020).....	5
Figure I.4 Tension en circuit ouvert et courant de court-circuit en fonction de l'irradiation pour une cellule solaire (Meriem, 2019) .....	6
Figure I.5. Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V (Meriem, 2019).....	6
Figure I.6. Silicium à l'état brut (ABROUGUI, 2019) .....	7
Figure I.7. Principe de la méthode de tirage Czochralski (Ferrand, 2003) .....	8
Figure I.8 Croissance de silicium en film mince sur céramique par RT-CVD (S. Chander, 2015).....	9
Figure I.9 Procédé de tirage de rubans de silicium (Jean-Claude, 2006).....	10
Figure I.10 Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium amorphe (H. Keppner, 1999)	11
Figure I.11. Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe (NREL) (H. Keppner, 1999) (Quentin Mauguit, 2015).....	13
Figure I.12. Structure d'une cellule photovoltaïque au CIGS. (NREL) (al., 2010) .....	14
Figure I.13. (a)-(e) Concepts avancés de cellules solaires multi-jonctions à haut rendement et leurs limites de rendement thermodynamique .....	16
Figure I.14. Schéma de la cellule solaire OPV. (a) d' découpe laser sur la cellule solaire. (b) les couches Différentes de la cellule solaire et leurs d'épaisseurs respectives (Kurtz, 2011) .....	16
Figure I.15. Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskites (A) structure et (B) Image MEB montrant l'architecture d'une cellule solaire à hétérojonction planaire à base de matériaux pérovskites (A. von Hippel, 1950) (Ali, 2021). .....	18
FIGURE I.16 cellules photovoltaïques à concentration (franco-portugais, 2015).....	19
Figure I.17 Les cellules à pigments photosensibles (Burguière, 2021) .....	19
Figure II.1. Image MEB de la cellule standard et de la cellule à base de CIGS AZO/ZnO/CdS/CIGS/Mo et la cellule avec AZO/ZnOS (Abib Hocine Yacine 2019) .....	23
Figure II.2. (a) cellule à base de CIGS Standard, (b) Cellule à base de CIGS avec ZnOS .....	24
Figure II.3. Fenêtre principale du logiciel SCAPS.....	25
Figure II.4. Panneau de démarrage de SCAPS.....	25
Figure II.5. Définir le problème. ....	26
Figure II.6 Sélection des caractéristiques à simuler.....	27
Figure II.7. Panneau d'affichage des résultats .....	27
Figure II.8. Cellule à base de CIGS standard.....	28
Figure II.9. Schéma simplifié d'une cellule solaire à base de CIGS.....	28
Figure II-10. Paramètres électriques du contact gauche et droit de la structure. ....	30
Figure II.11. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V .....	32
Figure II .12. Variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et la densité de courant de court-circuit avec l'épaisseur $x_{CIGS}$ . .....	32
Figure II.13. Variation du Facteur de forme FF et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec avec l'épaisseur $x_{CIGS}$ . .....	33
Figure II.14. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V .....	34
Figure II.15. Variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit $J_{sc}$ avec l'épaisseur $x_{CdS}$ . .....	35
Figure II.16. Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur $x_{CdS}$ . .....	35

Figure II.17. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V .....	37
Figure II.18. Variation de la tension de circuit ouvert( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit $J_{sc}$ avec l'épaisseur $x_{ZnO}$ .....	37
Figure II.19. Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur $x_{ZnO}$ .....	38
Figure II.20. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V .....	39
Figure II.21. Variation de la tension de circuit ouvert( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit $J_{sc}$ avec l'épaisseur $x_{AZO}$ .....	40
Figure II.22. Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur $x_{AZO}$ .....	40
Figure II.23. Influence du dopage de la couche CIGS sur le rendement .....	42
Figure II.24. Influence du dopage de la couche CdS sur le rendement.....	43
Figure II.25. Influence du dopage de la couche ZnO sur le rendement .....	44
Figure II.26. Influence du dopage de la couche AZO sur le rendement .....	46
Figure II.27. cellule à base de CIGS standard.....	47
Figure II.28. Schéma simplifié d'une cellule solaire à base de CIGS.....	47
Figure II.29. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V .....	50
Figure II.30. Variation de la tension de circuit ouvert( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit $J_{sc}$ avec l'épaisseur $x_{CIGS}$ .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure II.31. Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur $x_{CIGS}$ .....	51
Figure II.32. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V .....	53
Figure II.33. Variation de la tension de circuit ouvert( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit $J_{sc}$ avec l'épaisseur $x_{ZnOS}$ .....	53
Figure II.34. Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur $x_{ZnOS}$ .....	54
Figure II.35. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V .....	55
Figure II.36. Variation de la tension de circuit ouvert( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit $J_{sc}$ avec l'épaisseur $x_{AZO}$ .....	56
Figure II.37. Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ )avec l'épaisseur $x_{AZO}$ .....	56
Figure II.38. Influence du dopage de la couche CIGS sur le rendement .....	58
Figure II.39. Influence du dopage de la couche ZnOS sur le rendement.....	60
Figure II.40. Influence du dopage de la couche AZO sur le rendement .....	62
Figure III-1 géométrie symétrique .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure III-2 Cellule-unité (modèle symétrique de Bruggeman, particules sphériques) .....	70
Figure III-3 Modèles à simple et double coque Le facteur de Clausius-Mossotti (facteur CM) de la coque simple .....	71
Figure III-4 Modèle de Maxwell-Garnett.....	72
Figure III-5 Modèle de Bruggeman appliqué à un gradient d'inclusion .....	73
Figure III-6 La loi de mélange discontinue P 0 (à gauche) et loi de mélange continue P 1 (à droite) d'un champ de valeur 1 dans le domaine inférieur et 5000 dans le domaine supérieur .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure III-7 Valeurs des permittivités effectives d'un milieu composite constitué de deux matériaux.....	75
Figure III-8 cellule à base de CIGS standard .....	76
Figure III-9(a) Modèles série et parallèle du SP constitué de vide et de silicium et (b) modèle série-parallèle .....	77

## LISTE DES TABLEAU

Tableau II- 1: Propriétés des couches CIGS /CdS/ ZnO /AZO.....	29
Tableau II-2 Résultats de la simulation par SCAPS-1D .....	29
Tableau II- 3: Propriétés des couches CIGS /CdS/ ZnO /AZO.....	30
Tableau II-4: Effet de l'épaisseur $x_{\text{CIGS}}$ de la couche(CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	31
Tableau II-5: Effet de l'épaisseur $x_{\text{CdS}}$ de la couche(CdS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	34
Tableau II-6: Effet de l'épaisseur $x_{\text{ZnO}}$ de la couche(ZnO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	36
Tableau II-7: Effet de l'épaisseur $x_{\text{AZO}}$ de la couche(AZO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	39
Tableau II- 8: Effet du dopage $N_{\text{D/CIGS}}$ de la couche(CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	41
Tableau II-9: Effet du dopage $N_{\text{D/CdS}}$ de la couche(CdS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS). .....	43
Tableau II-10: Effet du dopage $N_{\text{D/ZnO}}$ de la couche(ZnO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	44
Tableau II-11: Effet du dopage $N_{\text{D/AZO}}$ de la couche(AZO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	45
Tableau II-12: Effet de l'épaisseur $x_{\text{CIGS}}$ de la couche(CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	49
Tableau II-13: Effet de l'épaisseur $x_{\text{ZnO}}$ de la couche(ZnOS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	52
Tableau II-14: Effet de l'épaisseur $x_{\text{AZO}}$ de la couche(AZO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	55
Tableau II- 15: Effet du dopage $N_{\text{D/CIGS}}$ de la couche(CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	57
Tableau II-16: Effet du dopage $N_{\text{D/ZnO}}$ de la couche(ZnOS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	59
Tableau II-17: Effet du dopage $N_{\text{D/AZO}}$ de la couche(AZO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).....	61
Tableau II-18 :Le rendement optimal obtenus en fonction du dopage et les épaisseurs des couches CIGS /CdS/ ZnO /AZO .....	63
Tableau 19 : Le rendement optimal obtenus en fonction du dopage et les épaisseurs des couches CIGS /ZnOS /AZO .....	63

***INTRODUCTION GENERALE***

L'énergie renouvelable est une énergie obtenue à partir de ressources renouvelables qui se régénèrent naturellement. Elle inclut des sources telles que la lumière du soleil, le vent, les marées, les vagues et la chaleur du sous-sol. L'énergie renouvelable se diffère des combustibles fossiles, qui sont utilisés beaucoup plus rapidement qu'ils ne se renouvellent. Bien que la plupart des sources d'énergie renouvelables soient durables, certaines ne le sont pas ; on considère qu'au rythme de leurs utilisations actuelles, elles s'épuisent beaucoup plus rapidement que la nature met pour les renouveler. Environ 280 GW de capacités supplémentaires de production d'énergie renouvelable ont vu le jour en 2020, 45 % de plus par rapport aux nouveaux ajouts comptabilisés en 2019. (Foley, 2022)

On entend par énergie purement renouvelable une énergie dont la totalité de la consommation provient de sources d'énergie renouvelables. La conversion de la totalité de l'approvisionnement global en énergie primaire à des sources renouvelables nécessite une transition du système énergétique, car la majeure partie de l'énergie actuelle est dérivée de combustibles fossiles non renouvelable. (Cottrell, 2009). C'est pour cela qu'on cherche actuellement d'autres alternatives comme l'énergie solaire.

L'énergie solaire est l'une des ressources énergétiques les plus prometteuses pour l'avenir. Le soleil est une précieuse ressource renouvelable. De ce fait, la quantité d'énergie solaire que reçoit notre planète en une heure est bien plus élevée que celle consommée par toute la population mondiale en un an. L'énergie du soleil est convertie en chaleur grâce à l'utilisation des capteurs thermiques, en chaleur puis en électricité au moyen de concentrateurs solaires accompagnés d'un alternateur, soit en électricité grâce aux cellules solaires photovoltaïques qui font l'objet de notre travail. (Foley, 2022)

Notre travail consiste à étudier une cellule solaire de deuxième génération cherchant à améliorer ses performances par la modélisation et la simulation. Ce travail est scindé en (3) chapitres. Dans **le premier chapitre** nous allons mettre en lumière des généralités sur les cellules solaires photovoltaïques ; le **deuxième chapitre** sur l'optimisation des paramètres de deux cellules fabriquées par un membre de notre équipe à l'IEMN de Lille à base de CIGS par la simulation numérique en utilisant le logiciel SCAPS. **Le troisième chapitre** porte sur la modélisation de la permittivité diélectrique, l'indice de réfraction et l'énergie de gap de la cellule solaire par la théorie des milieux effectifs. Enfin nous terminons par une **conclusion générale**.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités Sur Les Cellules Solaires**

## 1. Introduction

L'énergie solaire est une des principales sources d'énergie durable et renouvelable exploitées dans le monde. La photo voltaïque (PV) est connue comme la conversion directe de la lumière du soleil en énergie électrique à l'aide de cellules solaires. Divers matériaux et technologies servent à produire des cellules solaires à faible coût et à haut rendement de conversion. (Mohammadnoor Imamzai, 2012)

## 2. Energie Solaire Photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque résulte de la conversion de la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui permet à certains matériaux d'absorber des photons (particules de lumière) et de libérer des électrons, créant ainsi un courant électrique (Foley, 2022)

Un système photovoltaïque utilise des modules solaires, comprenant chacun un certain nombre de cellules solaires, qui produisent de l'énergie électrique. La [figureI.1](#) montre le montage d'une installation photovoltaïque pouvant être posée sur le sol, sur un toit, sur un mur ou flottante. Le montage peut être fixe ou mobile utilisant un traqueur solaire pour suivre le mouvement du soleil dans le ciel (HOUÉE, 2011)

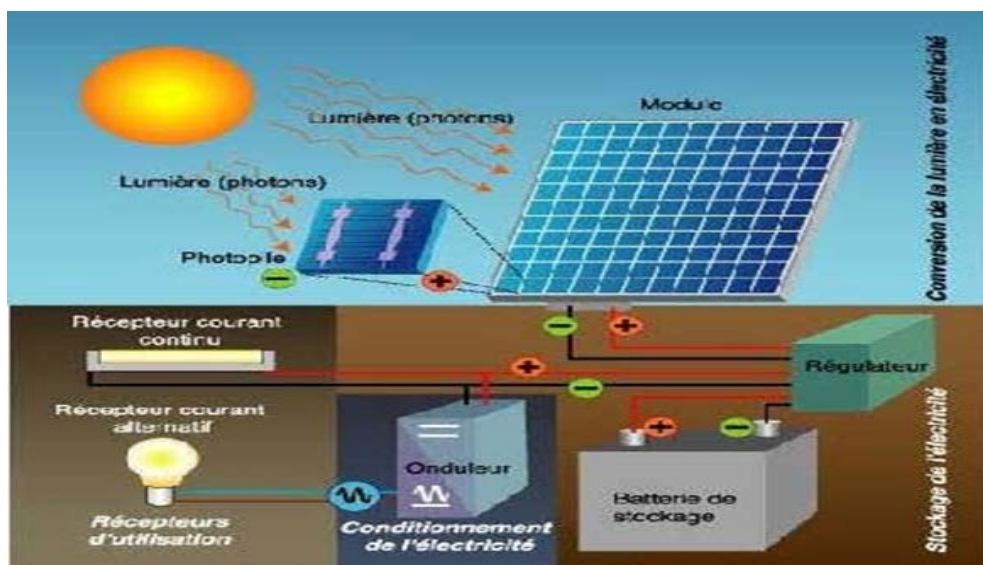


FIGURE I.1. Fonctionnement d'un panneau solaire (HOUÉE, 2011)

### 2.1 Principe de Conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique (al., 1996). La [figureI.2](#) donne un schéma de l'effet photovoltaïque (Mahammedi, 2020).

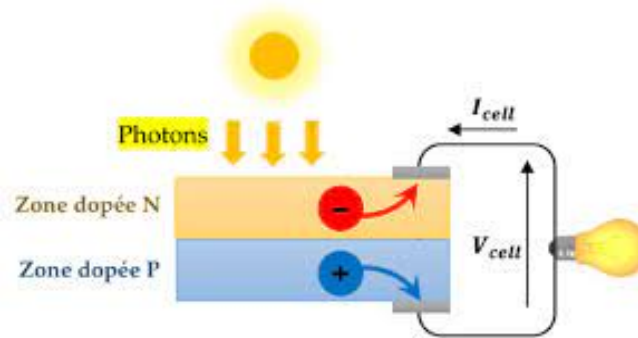


FIGURE I.2.L'effet photovoltaïque (MAHAMMEDI, 2020)

Cette conversion s'effectue en trois étapes :

- Absorption de photons d'énergie  $h\nu > E_g$  ce qui crée des générations d'électrons et de trous en déséquilibre
- Chaque type de porteur atteint très rapidement un quasi-équilibre défini par un quasi-niveau de Fermi (c'est-à-dire un potentiel électrochimique)
- La collecte des porteurs.

## 2.2 La cellule solaire

La cellule solaire est également appelée cellule photovoltaïque permettant de convertir la lumière en énergie électrique par l'effet photovoltaïque. La majorité des cellules solaires sont faites de silicium, dont l'efficacité et le coût progressent au fur et à mesure que les matériaux évoluent. Ces cellules sont très fragiles, elles sont enveloppées par une couche de verre résistant aux choc, à la différence de température etc... (Pabitra.K. Nayak, 2019)(Adobe, 2022)

### 2.2.1. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque consiste en une jonction entre deux zones différemment dopées du même matériau appelée homojonction p-n ; ou entre deux matériaux différents hétérostructures dont le plus fin est soumis au flux lumineux. Chacune des régions est connectée à une électrode métallique au moyen d'un contact ohmique de faible résistance.

Le principe de fonctionnement peut être décomposé en deux parties qui sont l'absorption des photons et la collecte des porteurs de charge.

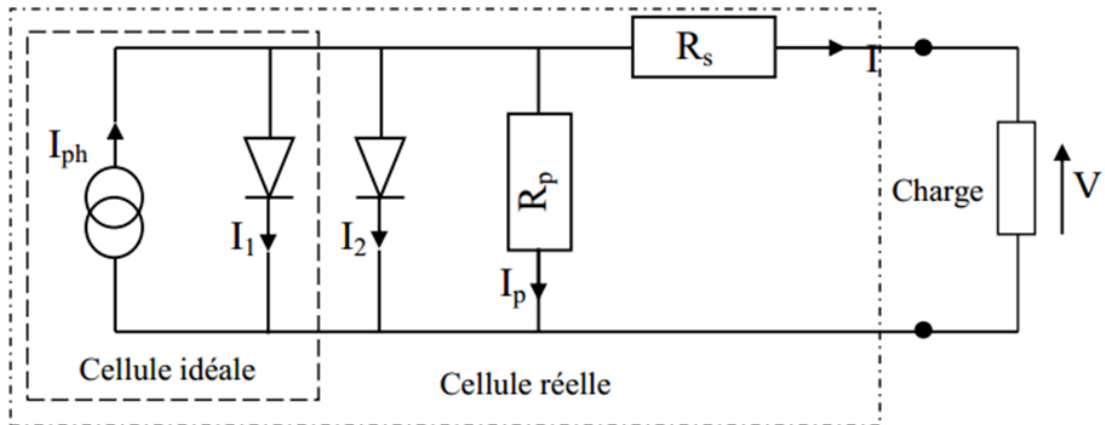


Figure I.3. Schéma électrique de la cellule photovoltaïque (Benadla, 2020)

### 2.2.2. Caractéristique I-V d'une cellule et rendement de conversion (Meriem, 2019)

- Le rendement de conversion énergétique de la cellule est le rapport entre la puissance électrique délivrée et la puissance incidente très souvent noté  $\eta$

$$\eta = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{INCIDENTE}} \quad \text{Équation I.1}$$

- $I_{cc}$ , (en anglais  $I_{sc}$ ) est équivalent au courant du photo-généré pour  $V=0$

$$I_{CC} = K_E \times E \quad \text{Équation I.2}$$

- $V_{co}$  en anglais  $V_{oc}$  est la tension en circuit ouvert

$$V_{oc} = \frac{kt}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} - 1 \right) \quad \text{Équation I.3}$$

- FF est un facteur de forme lié à la qualité de la cellule.

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad \text{Équation I.4}$$

### 2.2.3. Influence de l'éclairement et de la température

#### 2.2.3.1. Influence de l'éclairement

La variation de l'intensité de l'éclairage affecte de manière significative le courant de court-circuit  $I_{sc}$ . Tout changement de l'irradiation entraîne un changement proportionnel du courant de court-circuit (M. Chegaar, 2013).

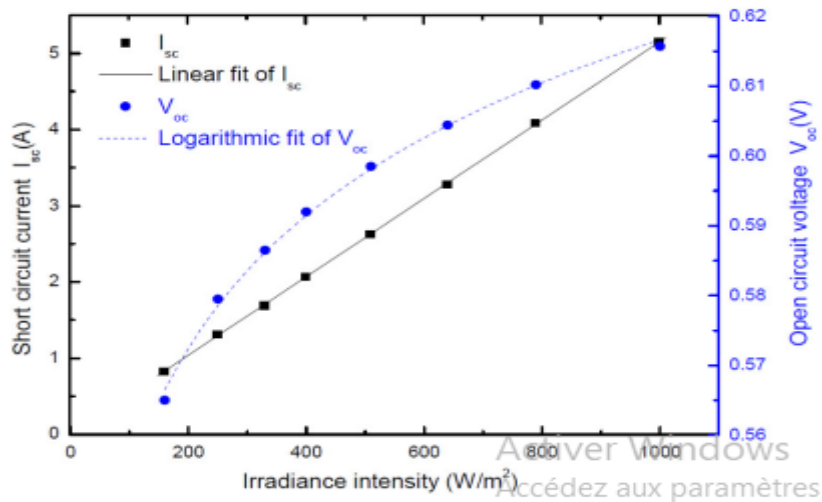


Figure I.4. Tension en circuit ouvert et courant de court-circuit en fonction de l'irradiation pour une cellule solaire (Meriem, 2019)

2.2.3.2 Influence de la température

La température de la cellule a un impact significatif sur les paramètres photovoltaïques contrôlant ainsi la qualité et la performance des cellules.

La tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) ou bien  $V_{co}$ , le point de puissance maximale ( $P_{max}$ ), le facteur de remplissage (FF) et l'efficacité de la cellule ( $\eta$ ) diminuent avec la température de la cellule, tandis que le courant de court-circuit augmente légèrement en raison de l'augmentation du taux de production d'électricité du fait de la croissance du taux de génération de porteurs de charge avec la température de la cellule (S. Chander, 2015), voir Figure I.5.

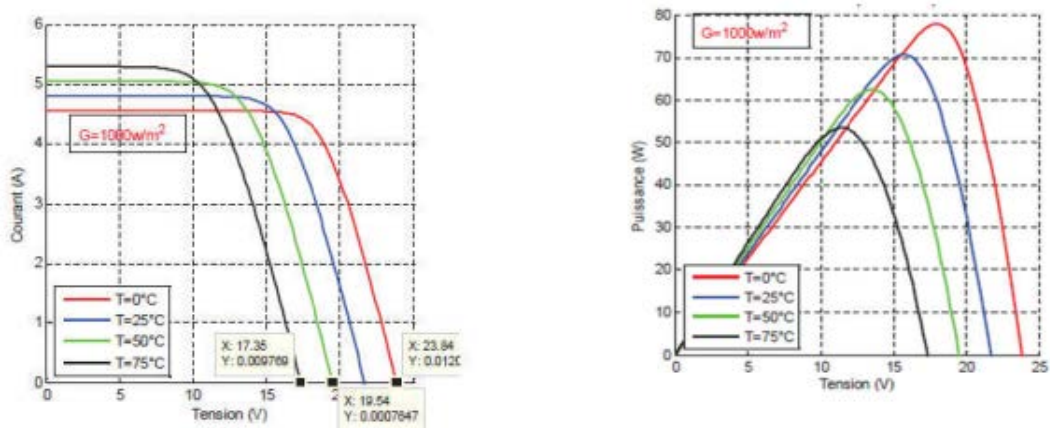


Figure I.5. Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V (Meriem, 2019).

2.2.4. Technologie des cellules photovoltaïques

Le progrès impressionnant des technologies photovoltaïques (PV), y compris les matériaux, les cellules et les modules, au cours des cinq dernières années, nécessite de

nouvelles évaluations en vue de leur progrès futurs. Ces évaluations ne sont pas limitées aux rendements de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique (PCE) mais également de nombreux facteurs qui influent sur la production d'énergie pour chaque type de cellule.

### a. Première Génération

Ce sont les cellules basées sur une seule jonction P-N et utilisant généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. Le silicium est fondu puis refroidi afin d'obtenir un cristal qui sera découpé en fines tranches (les wafers). Cette méthode de production est très énergivore et très chère nécessitant un silicium de grande pureté (Abrougui, 2019).

Le silicium est issu de la silice que l'on trouve notamment dans le sable. La silice représenterait 27% de la croûte terrestre et reste l'élément le plus présent sur la Terre après l'oxygène (Figure 1.6). La production de silicium exige le chauffage de la silice à 3000° dans des fours, après liquéfaction. Cette dernière est expurgée de 99,999 % de ses impuretés (Jean-Claude, 2006)



FIGURE I.6. Silicium à l'état brut (ABROUGUI, 2019)

#### a.1 Silicium monocristallin

La technologie de cellule solaire la plus ancienne et la plus efficace est celle des cellules solaires fabriquées à partir de fines tranches de silicium. Elles sont appelées cellules solaires monocristallines, qui désignent un matériau dont les atomes sont structurés de façon ordonnée (Mohammadnoor Imamzai, 2012)

##### a.1.1. Technique de croissance du silicium monocristallin

La technique la plus répandue aujourd'hui pour la réalisation de monocristaux est le tirage de Czochralski. Consistant à cristalliser le matériau à partir de sa phase liquide en plongeant un germe monocristallin orienté du cristal à obtenir à la surface du bain fondu. Le bain se solidifie sur le germe légèrement plus froid. Le cristal formé est extrait en tirant lentement le germe vers le haut. Le diamètre du cristal peut être contrôlé en faisant varier la

température du bain ou la vitesse de tirage. De plus la moitié de ce cristal sera perdu au cours de la découpe en tranche (Ferrand, 2003), Figure I.7.

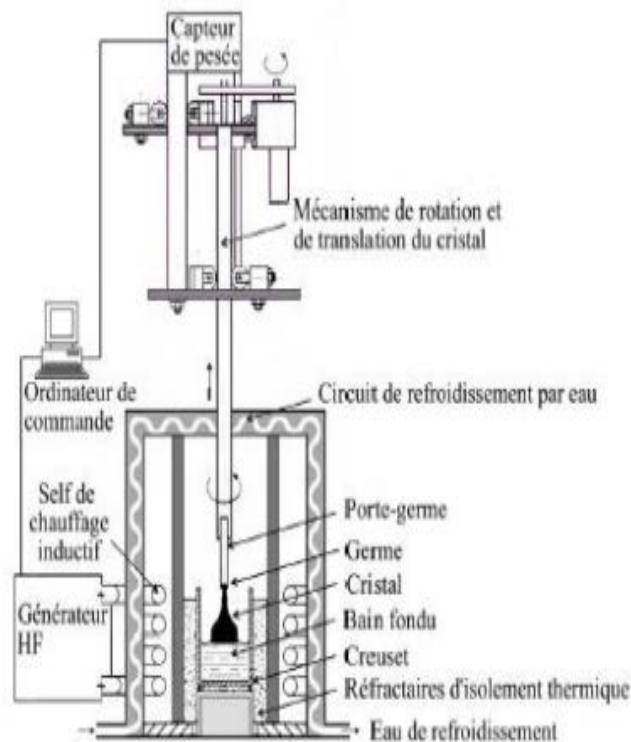


FIGURE I.7.Principe de la méthode de tirage Czochralski (Ferrand, 2003)

#### a.1.2. Rendement

Avec de tel matériaux il est possible d'obtenir un rendement de conversion de 22% ; en effet un record de 24,7% est obtenu par l'université de New South Walles, Australie (Abrougui, 2019).

#### a.1.3. Avantages

- Ils présentent le niveau d'efficacité le plus élevé, soit 17 à 22 %
- Une durée de vie plus grande environ de 25 ans
- Grande résistance à la chaleur
- Plus grande performance en cas de faible ensoleillement

#### a.1.4. Inconvénient

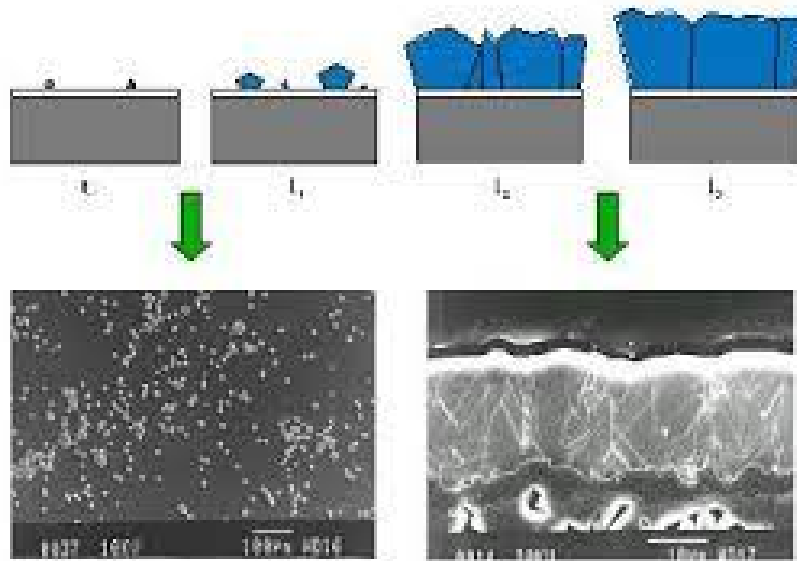
- Ce sont les cellules solaires les plus chères du marché
- Les niveaux de performances diminuent légèrement par rapport à d'autres formes de cellules solaires pour une augmentation de la température.
- Existence de beaucoup de déchets lors de la fabrication du silicium.

### a.2. Silicium polycristallin

Les cellules polycristallines sont appropriée pour réduire les coûts de développement des modules PV, leur efficacité est faible par rapport aux cellules monocristallines et aux autres matériaux de développement. Le silicium polycristallin est composé d'une multitude de cristaux appelés cristallites. Les atomes sont rangés de façon ordonnée dans chaque cristal. Il est plus économique de produire des plaquettes de silicium dans des moules à partir de plusieurs cristaux de silicium plutôt que d'un seul cristal et les conditions de croissance ne doivent pas être aussi étroitement contrôlées (Mohammadnoor Imamzai, 2012).

#### a.2.1. Technique de croissance

Le silicium poly-cristallin est produit en faisant fondre du silicium et en le solidifiant pour orienter les cristaux dans une direction fixe, ce qui produit un lingot rectangulaire de silicium polycristallin qui est ensuite découpé en blocs et enfin en tranches minces. Cependant, la dernière étape peut être supprimée en cultivant des rubans de tranches minces de silicium polycristallin. La technologie de fabrication polycristalline a été développée par Evergreen Solar ; voir **Figure I.7** (S. Chander, 2015).



**Figure I.8.** Croissance de silicium en film mince sur céramique par RT-CVD (S. Chander, 2015)

#### a.2.2. Rendement

Le rendement reste inférieur à 10% et ne passe à des valeurs de 13 à 16% qu'avec une recristallisation pour augmenter la taille des grains (S. Chander, 2015).

### a.2.3. Avantage

- Les panneaux poly-cristallins sont moins chers à l'achat
- Moins chers à la fabrication
- Aussi fiables que les panneaux au silicium monocristallins
- Il y a moins de gaspillage de silicium lors de la fabrication.

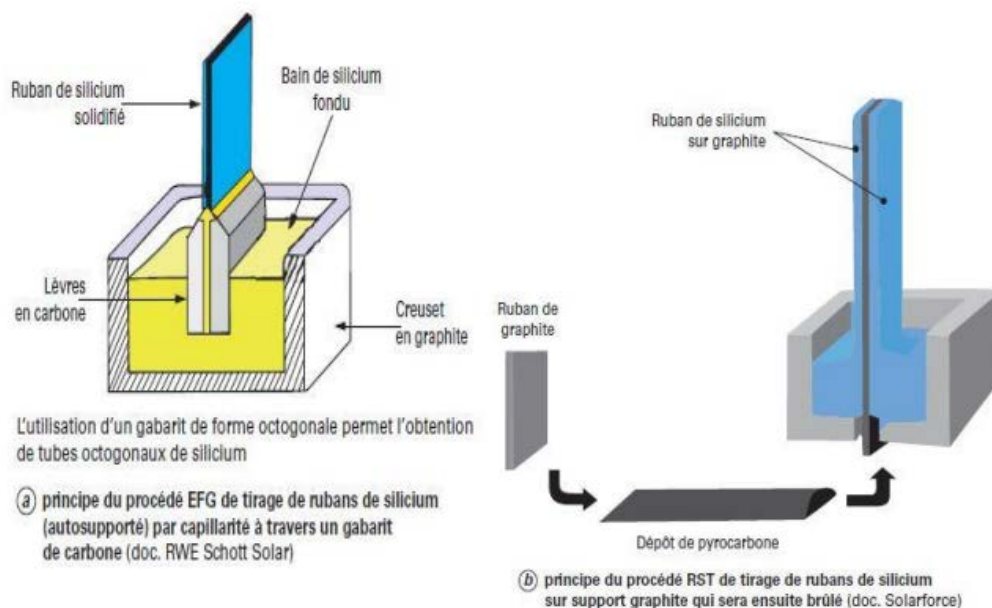
### a.2.4. Inconvénient

- Les panneaux solaires poly-cristallins ont un rendement plus faible, qui est estimé à environ 13-16 %
- Ils sont moins efficaces en termes d'espace et nécessitent une plus grande surface
- Les panneaux solaires poly-cristallins présentent une pureté moindre du silicium et un aspect moins uniforme.

## a.3. Le silicium en ruban

### a. 3 .1 Technique de croissance

Le ruban de silicium poly-cristallin E.P.R. (Electron Powder Ribbon) est obtenu par irradiation électronique sous vide de Poudre de silicium d'un ruban poly-cristallin (« ribbon to ribbon growth ») puis de faire fondre une mince zone de ce dernier par le biais d'un Faisceau laser (Ferrand, 2003). La **figure I.8** montre le procédé de tirage de rubans de silicium (S. Chander, 2015).



**Figure I.9** Procédé de tirage de rubans de silicium (Jean-Claude, 2006)

### a.3.2. Rendement

Les meilleurs rendements de conversion industriel de cette filière tournent autour des 15% .

### a.3.3. Avantage

- Cette technologie consomme très peu de silicium et présente un temps de retour énergétique particulièrement court.

## b. Deuxième Génération

Les couches minces constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Dans cette génération, on distingue le silicium amorphe (a-Si), le di-sélénium de cuivre indium (CIS), le tellure de cadmium (CdTe), ... (Abrougui, 2019)

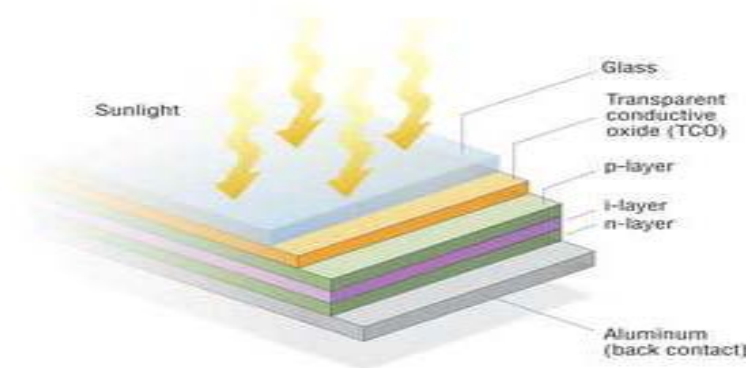
Dans le cas de couches minces, la couche de semi-conducteur est directement déposée sur un substrat. La production de ce type de cellules est moins coûteuse que celle de 1<sup>ère</sup> génération puisqu'elles consomment moins de matériaux semi-conducteur et ne nécessitent pas de passer par l'étape de transformation en « wafers » .

### b.1 Silicium nanocristallin et amorphe

La majorité des cellules solaires utilisées dans de nombreux petits appareils électroniques sont faites de silicium amorphe, le silicium est déposé en une couche très fine sur un substrat tel que le métal, le verre ou même le plastique (D. Chambonnet, 1987).

Désigne un silicium qui n'est pas cristallin c'est à dire dans lequel les atomes ne sont pas rangés de façon ordonnée. Il est utilisé dans la fabrication de cellules en couches minces.

La Figure I.9. Représente la structure d'une cellule photovoltaïque au silicium amorphe (H. Keppner, 1999).



**Figure I.10** Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium amorphe (H. Keppner, 1999)

La cellule au silicium amorphe se compose de :

- D'une couche de verre
- Film conducteur transparent, couche d'oxydes transparents (ou TCO, transparent conducting oxides) qui récupère les charges négatives comme l'oxyde d'Indium étain (ITO), l'oxyde de Zinc (ZnO) ou la stannate de cadmium ( $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$ )
- Trois couches de silicium amorphe, respectivement de type n, i puis p
- Couche conductrice réfléchissante qui récupère les trous (Aluminium).
- d'un substrat en verre (solide), en métal (souple) ou en plastique (souple).

### **b.1.2. Rendement**

Les rendements en laboratoire atteignent les 20% en double ou en triple p-i-n, les rendements industriels stagnent depuis des années (Jean-Claude, 2006).

### **b.1.3. Avantage**

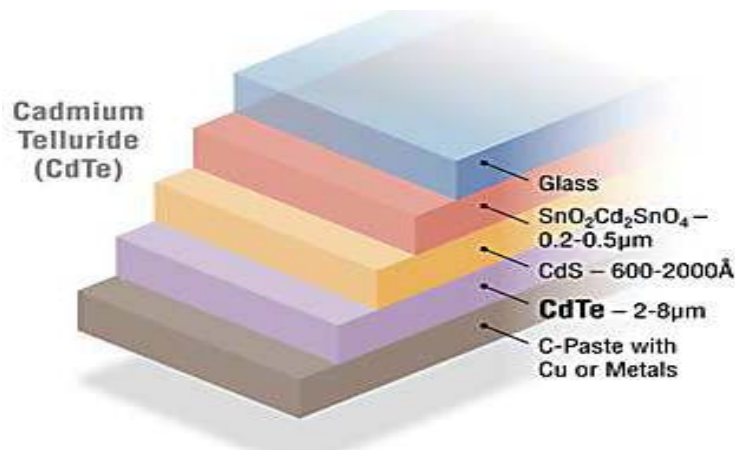
- Fonctionnent avec un éclairage faible
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules (silicium cristallin)
- Moins sensible aux températures élevées que les cellules mono ou poly-cristallines.

### **b.1.3. Inconvénients**

- Rendement faible en plein soleil, de 60W/m<sup>2</sup>.
- Performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

## **b.2. Matériau à base de Tellure de Cadmium**

La CdTe est l'un des matériaux utilisés pour réaliser de cellule solaire plus rentable et à faible coût. Les cellules PV à base de CdTe en couche mince sont l'un des concepts les plus prometteurs pour la conversion d'énergie PV à faible coût en raison de la possibilité d'obtenir un rendement plus élevé avec des matériaux réduits, ainsi qu'un fonctionnement fiable et stable des cellules (Mohammadnoor Imamzai, 2012). Le schéma de la figure I.11 représente la structure d'une cellule au CdTe.



**Figure I.11.** Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe (NREL) (H. Keppner, 1999) (Quentin Manguit, 2015)

Une cellule CdTe est composée de :

- Une vitre protectrice
- Une couche conductrice transparente (ITO) ou (ZnO). Elle récolte les charges négatives sur une épaisseur de 0,2 à 0,5 µm
- Une couche de Sulfure de cadmium CdS de type n de 0,06 à 0,2 µm d'épaisseur
- Une couche de Tellure de cadmium (CdTe) de type p de 2 à 8 µm d'épaisseur
- Une couche conductrice inférieure métallique
- Un substrat, souple ou rigide selon l'utilisation.

### b.2.1. Rendement

Un rendement record de 18,7 % a été atteint par une cellule expérimentale de First Solar, confirmé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL, laboratoire indépendant). Les panneaux commercialisés ont des rendements plus faibles, de l'ordre de 12,5 % .

### b.2.2. Avantage

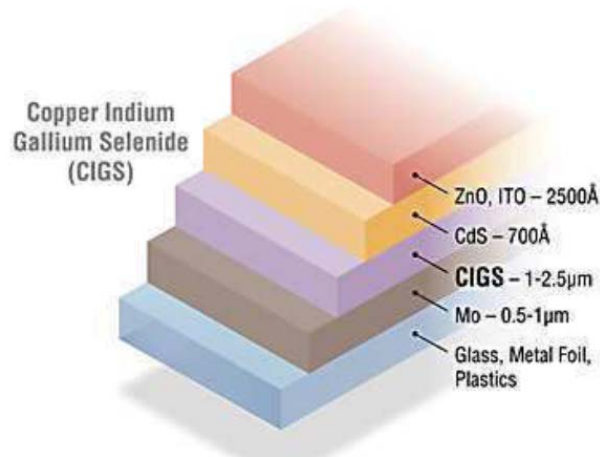
- Rentables, légères et robustes
- Peut être déposée (CdTe) à l'aide de différentes techniques peu coûteuses
- Le CdTe a une bande interdite optimale directe de 1,45eV avec un coefficient d'absorption élevé de plus de  $5 \cdot 10^{15}$  par centimètre.

### b.2.3. Inconvénient

- Le tellure est un élément rare.
- Le tellure est toxique.

### b. 3 Matériaux à base de Séléniure de Cuivre Indium Gallium (CIGS).

Les cellules solaires à base de (CIGS) sont considérées comme l'un des candidats les plus productifs pour la fabrication de cellules solaires et à faible coût, avec des rendements aussi élevés atteignant 20,0 % (Jouad, 2016). La figure I.11 représente la structure d'une cellule au CIGS (al., 2010).



**Figure I.12.** Structure d'une cellule photovoltaïque au CIGS. (NREL) (Al., 2010)

La cellule photovoltaïque au CIGS se compose de :

- Verre de protection
- Une couche conductrice transparente, en oxyde de zinc (ZnO) intrinsèque dopée à aluminium, de 450 nm d'épaisseur
- Une couche de sulfure de cadmium (CdS) d'environ 50 nm d'épaisseur, ou d'un composé mixte comprenant du zinc, de l'oxygène, du soufre et des hydroxydes [Zn (S, O, OH)]
- Une couche absorbante de CIGS d'épaisseur d'environ 2 µm
- Un collecteur de charges inférieur, constitué de molybdène Mo.

#### b.3.1. Rendement

Les cellules et modules CIGS ont un objectif de rendement de 22% à 25%. Ils ont récemment atteint un rendement de conversion record de 18,8% en laboratoire (NEREL) National Renewable Energy Laboratory (ABROUGUI, 2019).

#### b.3.2. Avantage

- Les cellules en CIGS résistent mieux à la température, conçues avec d'autres matériaux que le silicium, Moins toxique et le support utilisé est flexible

### b.3.3 Inconvénient

- Nécessite une surface plus importante. L'Indium et le Gallium sont des matériaux rares.

### c. Troisième Génération

La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles, qui est d'environ 30%. Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif (ABROUGUI, 2019). :

- La superposition de plusieurs cellules avec différentes bandes d'énergie
- Des cellules à concentration
- Utilisation de photons à basse énergie
- Cellules à électrons chauds produisant plus de paires d'électron/trou pour des énergies supérieures à la bande d'énergie
- Conversion des photons pour ajuster le spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi-conducteur.

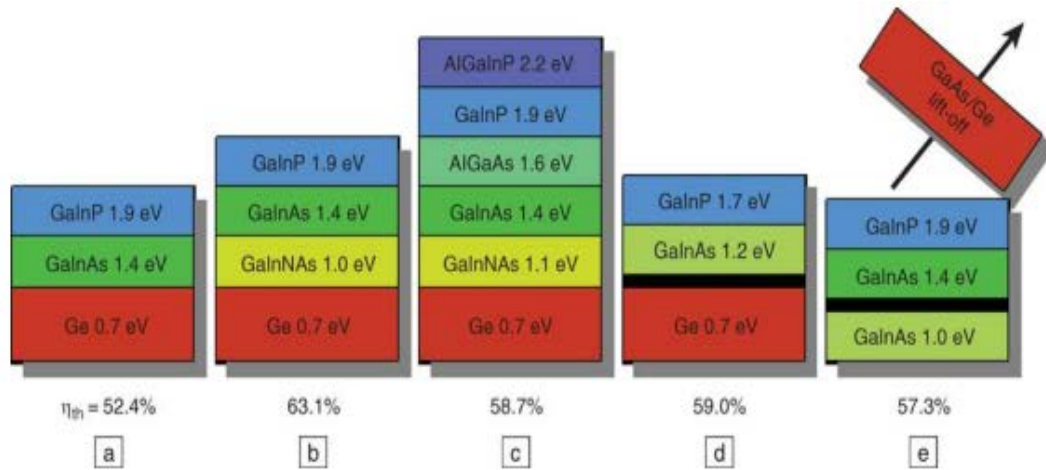
### c.1 Multi Jonction

Les cellules solaires tandem se composent de différentes couches actives entourées par des électrodes. Elles sont étudiées depuis 1960 (Wolf, 1960). Fan et al. (1982) ont encouragé la R&D des cellules tandems sur la base de leur analyse informatique (Quentin Mauguit, 2015).

#### c.1.1. Rendement

Les cellules solaires à jonctions multiples (tandem) ont le potentiel de réaliser des rendements de conversion élevés, au-delà de 50 % (Quentin Mauguit, 2015) (M. Yamaguchi, 2005) exemple de la Figure I.13.

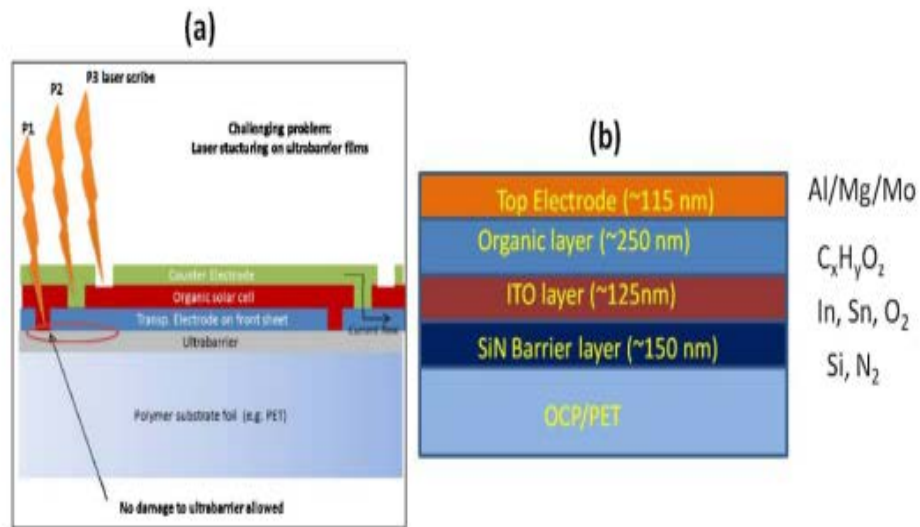
- Pour une cellule 2-jonctions : 42.1%
- Pour une cellule 4-jonctions : 54%
- Pour une infinité de jonctions : 65.4%



**Figure I.14.** (a)-(e) Concepts avancés de cellules solaires multi-jonctions à haut rendement et leurs limites de rendement thermodynamique

**c.2. Cellule Organique**

Ces cellules sont fabriquées à partir de fines couches organiques qui sont déposées dans une solution liquide située entre deux électrodes (des couches transparentes d'oxyde d'indium et d'étain (ITO)) sont déposées sur la couche barrière de nitrure de silicium (SiN) (Kurtz, 2011), Figure I.14.



**Figure I.15.** Schéma de la cellule solaire OPV. (a)d' découpe laser sur la cellule solaire. (b)les couches Différentes de la cellule solaire et leurs d' épaisseurs respectives (Kurtz, 2011)

Les cellules organiques sont constituées en générale,

- d'un verre ou d'un plastique transparent par lequel pénètre la lumière ;
- de l'anode qui doit être transparente
- d'une couche de PEDOT:PSS (mélange de deux polymères) qui bloque la diffusion de l'oxygène produit par l'ITO, car il peut altérer le polymère ;
- De la couche active incorporant les polymères n et p,
- Du contact métallique arrière ;
- du substrat.

Les cellules organiques sont constituées de , (cas particulier) de

- Une électrode supérieure (Al, Mg ou Mo),
- Une couche organique.
- Une électrode inférieure (oxyde d'indium et d'étain).
- Une couche barrière en nitrure de silicium.
- Des couches de substrat placées consécutivement à partir du haut.

### c.2.1. Avantages

Les matériaux organiques sont inoffensifs, flexibles. Ils ont une absorption optique élevée dans le domaine spectral visible. Ce sont des matériaux à faible coût.

### c.2.2. Rendement :

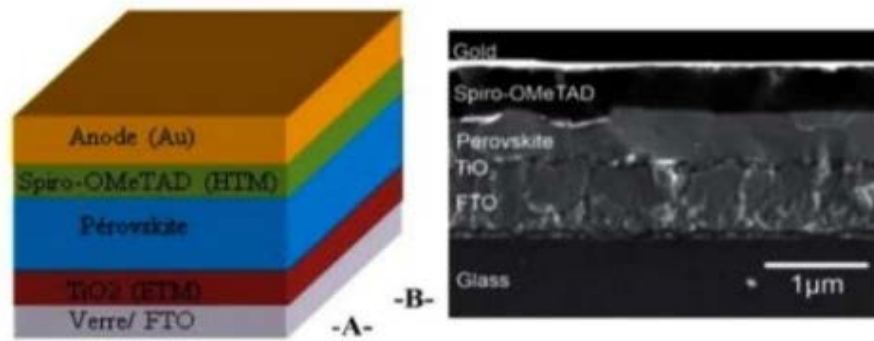
Le rendement des cellules à base de matériaux organique en laboratoires tourne autour de 5%

## C.3 Les Pérovskites

La pérovskite désignait à l'origine la forme minérale du titanate de calcium  $\text{CaTiO}_3$ , présente une excellente stabilité thermique et des performances photovoltaïques supérieures (S. Banerjee, 2017).

La cellule solaire de type pérovskite (Figure I.15) est composée de :

- Substrat en verre / FTO.
- Dioxyde de titane  $\text{TiO}_2$ .
- Couche active Matériaux pérovskite.
- Une couche de spiro-OMeTAD déposée entre l'électrode en or.



**Figure I.16.** Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskites (A) structure et (B) Image MEB montrant l'architecture d'une cellule solaire à hétérojonction planaire à base de matériaux pérovskites (A. von Hippel, 1950) (Ali, 2021).

### C.3.1. Rendement

Les pérovskites ont rapidement progressé et ont atteint 22,1% (Ali, 2021). Alors que certaines cellules photovoltaïques connaissent un succès grandissant, d'autres restent méconnues, même si elles sont prometteuses d'avenir. Les technologies utilisées sont diverses et variées prenons exemples des cellules photovoltaïques à concentration, les cellules à pigments photosensibles et les cellules solaires à boîtes quantiques (Quentin Mauguit, 2015)

### C.4. Cellules photovoltaïques à concentration

Les cellules photovoltaïques sont la pièce la plus coûteuse d'un panneau solaire. Pour réduire leur nombre, plusieurs solutions ont été envisagées. L'une d'entre elles consiste à concentrer 500 à 1000 fois la lumière du soleil sur des cellules, en utilisant des miroirs paraboliques ou des lentilles de Fresnel.

Ces cellules sont couramment utilisées dans l'industrie spatiale, mais rarement par les citoyens en raison de leurs coûts élevés. Cette technologie n'est cependant efficace qu'à une condition : les panneaux doivent suivre la trajectoire du Soleil. Pour qu'un courant soit généré, le faisceau de lumière concentré doit être focalisé en permanence sur la cellule. (Quentin Mauguit, 2015)

Le rendement des cellules à concentration en laboratoires tourne autour de 46% sur une cellule multi-jonctions en 2014 et entre 10% à 15% pour les cellules traditionnelles. (franco-portugais, 2015)



FIGURE I.17 Cellules photovoltaïques à concentration (franco-portugais, 2015)

### C.5. Les cellules à pigments photosensibles

En 1991, Michael Grätzel a mis au point les cellules à pigments photosensibles. Elles sont directement inspirées de la photosynthèse pratiquée par les plantes. (Quentin Mauguit, 2015)

Les cellules à pigments photosensibles se composent de

- surface conductrice transparente sur laquelle est déposé un matériau semi-conducteur dont en inclus des pigments
- Couche d'électrolytes (une solution iodure-triiodure)
- cathode qui forme la paroi inférieure de la cellule.

Les cellules à pigments photosensibles ont atteint un rendement de conversion record de 15 % en 2013 (Quentin Mauguit, 2015)

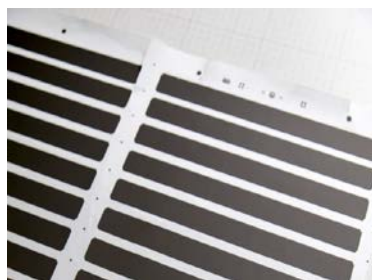


Figure I.18 Les cellules à pigments photosensibles (Burguière, 2021)

### C.6. Les cellules solaires à boîtes quantiques

- Les points quantiques sont des nanocristaux semi-conducteurs qui font moins de 10 nm (sachant que l'épaisseur totale du dispositif est d'environ 1,5  $\mu\text{m}$ ). Elles possèdent deux

caractéristiques importantes : elles captent la lumière à différentes longueurs d'onde, et elles sont faciles à produire à moindre coût. (Quentin Mauguit, 2015).

Les cellules solaires à boîtes quantiques se composent de :

- Plaque de verre qui est recouverte par de l'oxyde d'étain dopé au fluor (conducteur transparent )
- matériau semi-conducteur posé sur cette couche, avant d'être recouvert par les boîtes quantiques.
- un oxyde de molybdène, de l'or et de l'argent.

Un rendement record de 7% est détenu par des chercheurs de l'Université de Toronto, au Canada. Il serait théoriquement possible d'atteindre des valeurs de 60 à 83 %. (Quentin Mauguit, 2015)

#### **4.Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons évoqué quelques concepts de base sur l'effet photovoltaïque, le principe de fonctionnement ainsi que les caractéristique i-v et le rendement de conversion d'une cellule photovoltaïque .Nous avons fait un bref aperçu sur les différents types de cellules photovoltaïques, première, deuxième et troisième génération ainsi que les cellule solaire à venir comme les cellules à pérovskite, les cellules photovoltaïques à concentration, les cellules à pigments photosensibles et les cellules solaires à boîtes quantiques.

**Chapitre II :**  
**Modélisation Et Simulation D'une Cellule**  
**Solaire, Résultats Et Discussions**

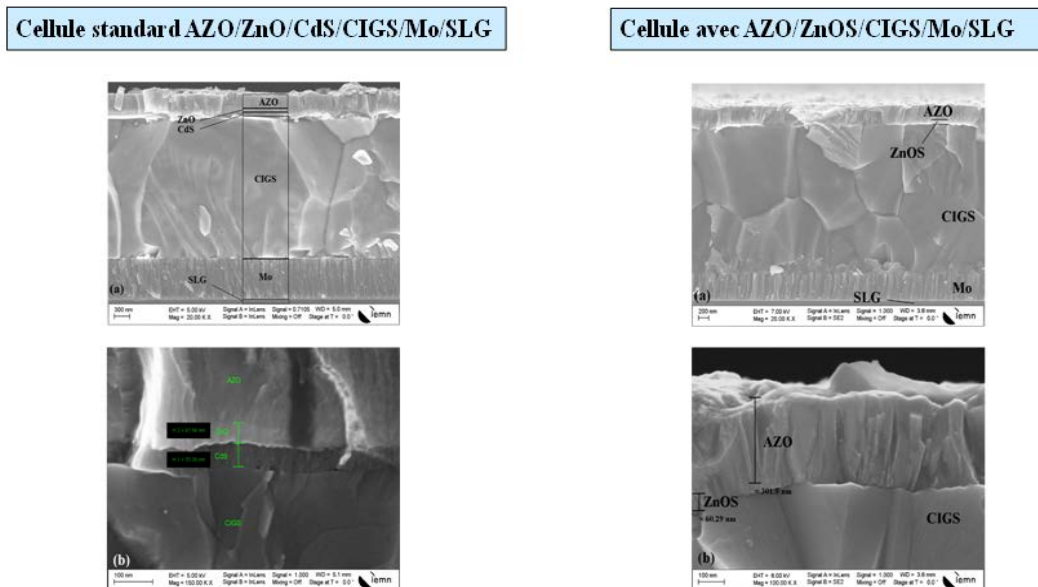
### 1.Introduction

Au sein de la communauté photovoltaïque (PV), il existe un grand nombre d'outils de prédiction et de paramètres d'entrée pour la simulation des cellules solaires.

La simulation électronique aide à effectuer des analyses de pertes, à prédire comment les modifications apportées à la conception ou à la procédure de fabrication d'une cellule solaire affecteront son efficacité, et à fournir une base quantitative (Fell, et al., 2014)

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'étude de simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à couches minces et à hétérojonction à base de CIGS et leurs interprétations.

Dans un premier temps, nous allons simuler deux structures de cellules solaires fabriqués à l'IEMN de Lille France (Yacine, 2019), Figure II.1 : AZO/ZnO/CdS/CIGS et AZO/ZnOS/CIGS en utilisant le logiciel Scaps-1D. Ensuite, nous comparerons les résultats de la simulation électrique de la cellule CIGS avec ceux trouvés expérimentalement, puis nous comparerons les résultats trouvés pour la cellule avec ZnO/CdS et la cellule avec ZnOS. Les modèles étudiés sont représentés en Figure II.2.



**Figure II.1** Image MEB de la cellule standard et de la cellule à base de CIGS AZO/ZnO/CdS/CIGS/Mo et la cellule avec AZO/ZnOS (Abib Hocine Yacine 2019)

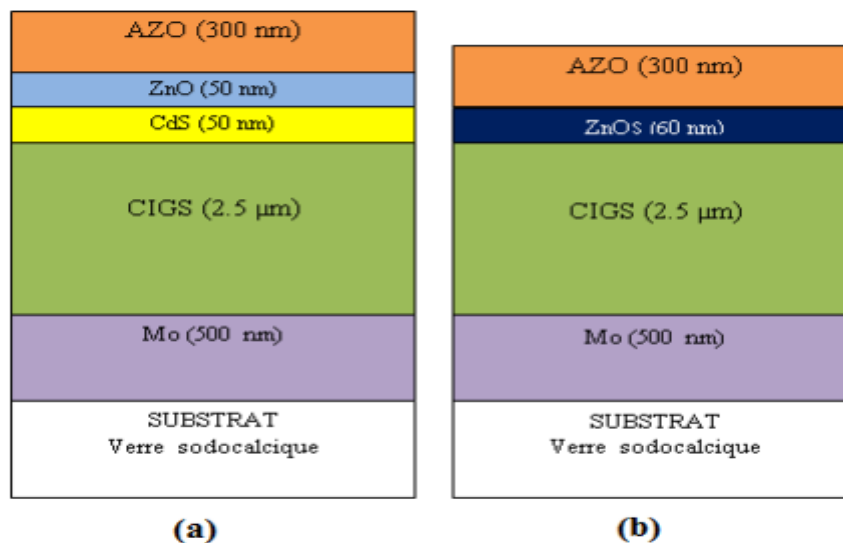


Figure II.19.(a) cellule à base de CIGS Standard, (b) Cellule à base de CIGS avec ZnOS .

## 2. Outil de simulation SCAPS

### 2.1 Programme de simulation SCAPS

SCAPS est un programme de simulation de cellules solaires à une dimension, développé au département d'électronique et de systèmes d'information (ELIS) de l'Université de Gand, en Belgique (M. Burgelman, 2000). Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degrave (Marc Burgelman Koen Decock, 2021).

Le programme est mis gratuitement à la disposition de la communauté des chercheurs en photovoltaïque (universités et instituts de recherche). Il fonctionne sur PC sous Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, et occupe environ 50 Mo d'espace disque.

SCAPS peut gérer l'illumination en régime permanent par une lumière monochromatique ou par une lumière d'un spectre standard. La figure II.20 représente la fenêtre principale du logiciel SCAPS.

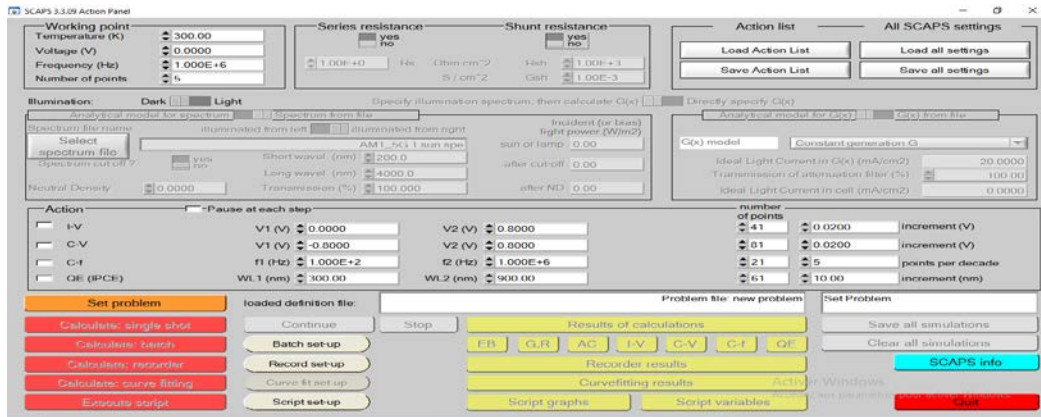


Figure II.21. Fenêtre principale du logiciel SCAPS

## 2.2. Explication du processus de simulation à l'aide de SCAPS

### 1. Le Panneau de démarrage de SCAPS (M. Burgelman, 2000)

Le panneau Action ou panneau principal la **Figure II.22.** représente le panneau de démarrage de SCAPS.

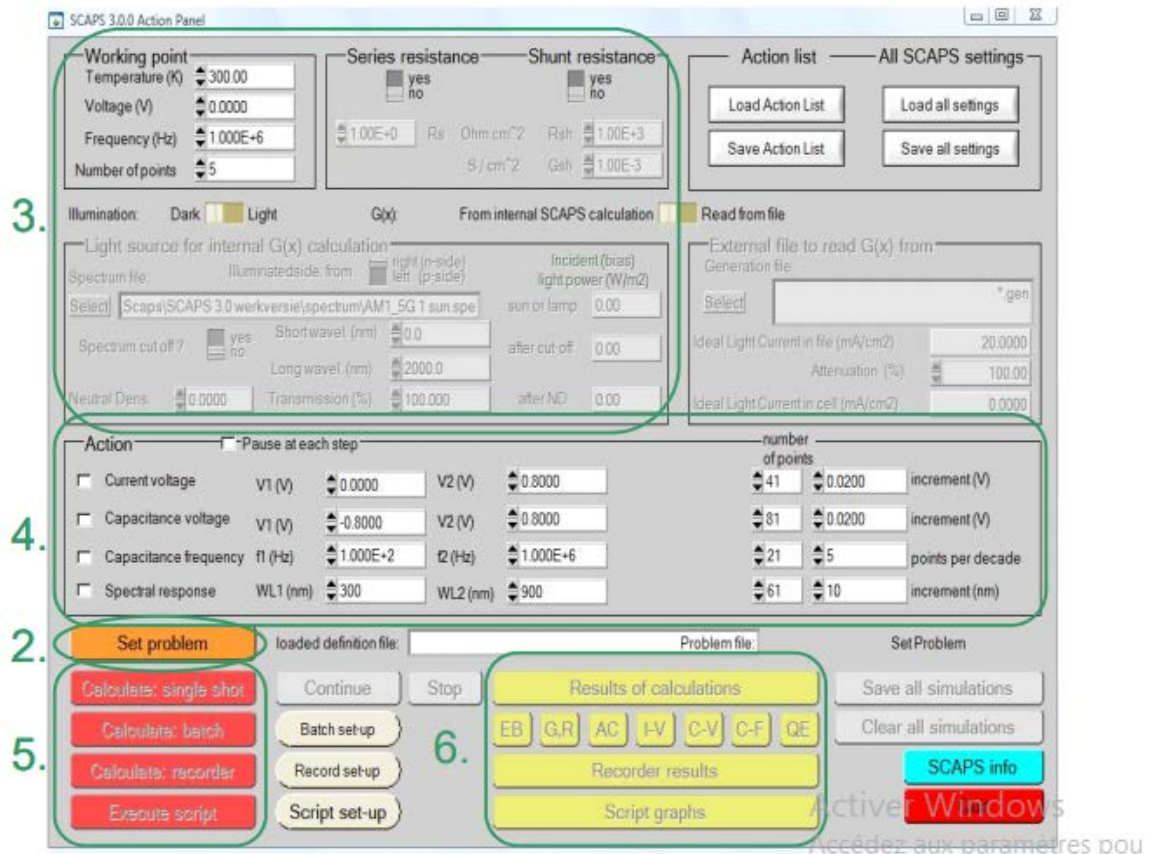


Figure II.23. Panneau de démarrage de SCAPS (M. Burgelman, 2000)

La signification des blocs numérotés de 1 à 6 de la figure II.4. est expliquée comme suit :

1. Exécuter SCAPS.
2. Définir le problème, donc la géométrie, les matériaux, toutes les propriétés de votre cellule solaire.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles vous voulez faire la simulation, c'est-à-dire spécifier le point de travail.
4. Indiquez ce que vous allez calculer, c'est-à-dire quelle mesure vous allez simuler.
5. Lancez-le(s) calcul(s)
6. Afficher les courbes simulées,

### 2. Définition du problème

Cliquez sur le bouton "set problem" dans le panneau d'action, puis choisissez "load" Figure II.5, dans le coin inférieur droit du panneau qui s'ouvre. Dans une étape ultérieure, vous pouvez modifier toutes les propriétés de la cellule et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers.



Figure II.24 .Définir le problème.

### 3. Définir le point de travail

Le point de travail indique les paramètres qui ne varient pas dans une simulation de mesure et qui sont pertinents pour cette mesure. Ainsi,

- La température  $T$  : pertinente pour toutes les mesures. Remarque : dans SCAPS, seuls  $NC(T)$ ,  $NV(T)$ , les vitesses thermiques, la tension thermique  $KT$  et toutes leurs dérivées sont les seules variables qui ont une dépendance explicite de la température on doit entrer pour chaque  $T$  les paramètres correspondants des matériaux.
- La tension  $V$  : n'est pas prise en compte dans les simulations I-V et C-V. Il s'agit de la tension de polarisation en courant continu. C'est la tension de polarisation continue dans la simulation C-f et dans la simulation QE. SCAPS commence toujours à 0 V, et avance à la tension du point de travail en un nombre des étapes qu'on doit également spécifier.
- La fréquence  $f$  : est rejetée dans la simulation I-V, QE et C-f. C'est la fréquence à laquelle la mesure C-V est simulée.

- L'illumination : est utilisée pour toutes les mesures. Pour la mesure QE, il détermine les conditions d'éclairage de biais.

### 4. Sélection des caractéristiques à simuler :

Dans la partie action du 'Action Panel', nous pouvons sélectionner une ou plusieurs des mesures suivantes à simuler : I-V, C-V, C-f et QE, Figure. II.25. Adaptons éventuellement les valeurs de départ et de fin de l'argument, de même que le nombre d'étapes.

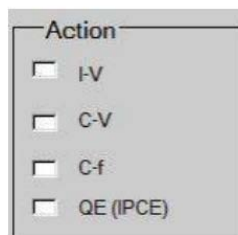


Figure II.26. Sélection des caractéristiques à simuler.

### 5. Lancer le calcul « calculate single shot »

Cliquez sur le bouton calculer dans le panneau d'action. Le panneau des bandes d'énergie s'ouvre, et les calculs commencent.

### 6. Affichage des courbes simulées

Après les calculs, SCAPS bouscule au panneau de la bande énergétique Figure II.27. On peut regarder les diagrammes de bande, les densités de porteurs, les densités de courant, ... au dernier point de polarisation calculé. On peut faire sortir les résultats (plot/legend, save graphs, show data) il est possible de les copier et de les coller vers Excel, par exemple. On peut passer à l'un des panneaux de sortie spécialisés.

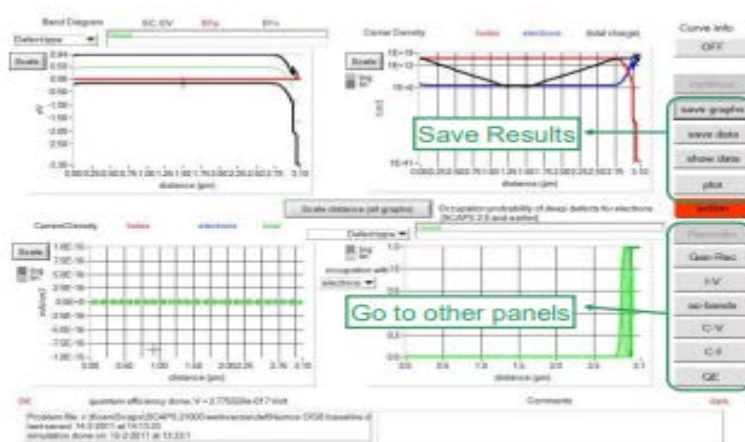
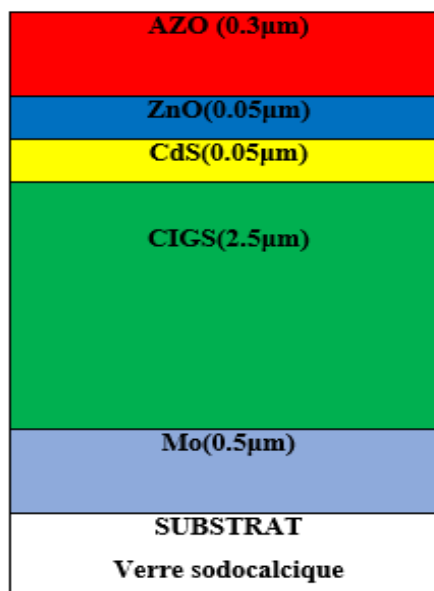


Figure II.28 . Panneau d'affichage des résultats

Notre travail consiste à modéliser une cellule solaire à base de CIGS et à simuler ces paramètres électriques, optiques et géométriques afin de concevoir une cellule ayant le rendement électrique optimal.

### 3. Structure de la première cellule étudiée CIGS/CdS/ZnO/AZO



**Figure II.29** .cellule à base de CIGS standard

Le schéma simplifié de l'hétéro structure est représenté sur la Figure II.30 qui suit



**Figure II.31**. Schéma simplifié de la cellule solaire à base de CIGS

Les paramètres du dispositif étudié de la cellule standard pour la simulation sont représentés dans le **Tableau II- 1**.

Couche	CIGS	CdS	ZnO	AZO
Propriété				
<b>Epaisseur (µm)</b>	2.500	0.050	0.050	0.300
<b>Bande de gap (eV)</b>	1.200	2.420	3.300	3.300
<b>Affinité électronique (eV)</b>	4.500	4.500	4.100	4.450
<b>Constante diélectrique</b>	10.000	9.000	9.000	9.000
<b>Nc (cm<sup>-3</sup>)</b>	2.00 10 <sup>18</sup>	2.24 10 <sup>18</sup>	4 10 <sup>18</sup>	2.2 10 <sup>18</sup>
<b>Nv (cm<sup>-3</sup>)</b>	2.00 10 <sup>18</sup>	1.8 10 <sup>19</sup>	1 10 <sup>19</sup>	1.8 10 <sup>19</sup>
<b>Vitesse thermique des électrons (cm/s)</b>	1 10 <sup>7</sup>	2.600 10 <sup>7</sup>	1 10 <sup>8</sup>	1 10 <sup>7</sup>
<b>Vitesse thermique des trous (cm/s)</b>	1 10 <sup>7</sup>	1.3 10 <sup>7</sup>	1 10 <sup>8</sup>	1 10 <sup>7</sup>
<b>Mobilité d'électron (cm<sup>2</sup>/V.s)</b>	5 10 <sup>1</sup>	3.4 10 <sup>2</sup>	1 10 <sup>2</sup>	1.10 <sup>2</sup>
<b>Mobilité du trou (cm<sup>2</sup>/V.s)</b>	2 10 <sup>1</sup>	1 10 <sup>1</sup>	2.5 10 <sup>1</sup>	2.10 <sup>1</sup>
<b>Densité de porteur (cm<sup>-3</sup>)</b>	0	3 10 <sup>16</sup>	10 <sup>18</sup>	10 <sup>18</sup>
<b>Densité d'accepteur (cm<sup>-3</sup>)</b>	5.5 10 <sup>15</sup>	0	1 10 <sup>15</sup>	110 <sup>0</sup>

**Tableau II. 2.** Propriétés des couches CIGS /CdS/ ZnO /AZO.

Les résultats de la simulation obtenus sont regroupés dans le tableau II.2.

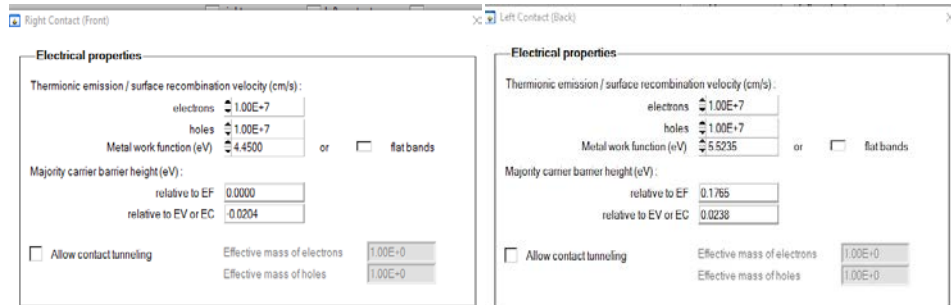
Les résultats sont en bon accord avec les travaux de Hocine Yacine Abib représentés dans le Tableau II.2.

VOC (VOLT)	JSC (mA/cm2)	FF %	η (%)	
0.549801	30.57085809	64.9317	<b>10.9136</b>	<b>Nos résultats-simulation</b>
0.288.7	33.6	63.9	<b>11.62</b>	<b>Résultats expérimentaux</b> (Abib Hocine Yacine 2019)

**Tableau II-3** Résultat de la simulation par SCAPS-1D

Dans tout ce qui suit nous avons utilisé les paramètres  $N_c$  et  $N_v$  utilisés dans la littérature (J. Husna, 2021) afin d'optimiser le rendement de nos cellules représentés dans le **Tableau II. 4**.

La figure II.10 représente les valeurs utilisées dans la simulation des contacts avant et arrière.



**Figure II-32.** Parametres électriques du contact avant et arriere de la structure.

	CIGS	CdS	ZnO	AZO
Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	2.500	0.050	0.050	0.300
$N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.00 \cdot 10^{16}$	$2.23 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{16}$	$2.2 \cdot 10^{16}$
$N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.00 \cdot 10^{16}$	$1.8 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{17}$	$1.8 \cdot 10^{17}$

**Tableau II. 5.** Parametres  $N_c$  et  $N_v$  utilisés pour la simulation des couches CIGS /CdS/ ZnO /AZO.

### 3.1. Résultats et discussion

Dans le but d'optimiser une conception spécifique d'une structure d'hétérojonction CIGS/CdS/ZnO/AZO nous devons analyser et interpréter les résultats pour déterminer l'influence des paramètres physiques et technologiques sur les performances du dispositif tels que le dopage et l'épaisseur.

#### 3.1.1. Effet de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule

##### a) Effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur les caractéristiques électriques de la cellule

Les résultats de la simulation obtenus pour différentes épaisseurs de la couche CIGS ( $X_{\text{CIGS}}$ ), sont récapitulés dans le **Tableau II.4**.

$X_{\text{CIGS}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_{oc}$ (Volt)	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
3.8	0.783206	31.46425638	68.1366	16.7909
3.4	0.783186	31.45841219	68.1516	16.7910
3	0.783196	31.45552680	68.1647	16.7929
2.6	0.783161	31.45355232	68.1756	16.7938
2.5	0.783187	31.45496400	68.1753	16.7951
2.2	0.783176	31.45302527	68.1826	16.7956
1.8	0.783172	31.45392093	68.1880	16.7973
<b>1.4</b>	<b>0.783170</b>	<b>31.45163171</b>	<b>68.1996</b>	<b>16.7989</b>
1	0.783139	31.43380436	68.2369	16.7979
0.6	0.782268	30.93105421	68.3481	16.5378
0.2	0.549801	30.57085557	64.9317	10.9136

**Tableau II-6:** Effet de l'épaisseur  $x_{\text{CIGS}}$  de la couche(CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

Nous remarquons que pour la même épaisseur 2.5  $\mu\text{m}$  le rendement est passé de **10.9136%** à **16.7951%** pour avoir utilisé les valeurs  $N_c$  et  $N_v$  du **tableau II.3**.

Les résultats de la simulation obtenus en faisant varier l'épaisseur  $x_{\text{CIGS}}$  de la couche (CIGS) sont représentés par les Figures II.11, II.12, II.13 . A savoir la Caractéristique I(V), la caractéristique tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ , la caractéristique densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$ , la caractéristique Facteur de forme FF et le rendement de conversion de la cellule étudiée ( $\eta$ ).

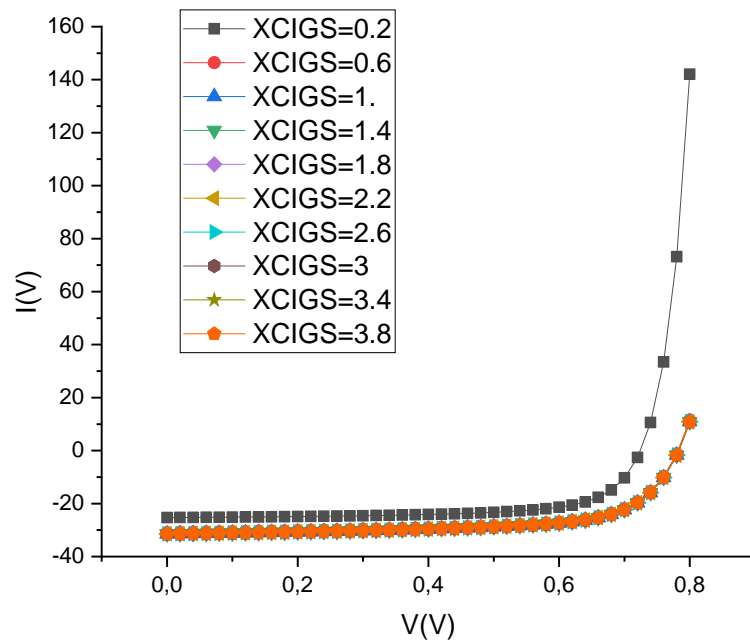


Figure II.33. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V

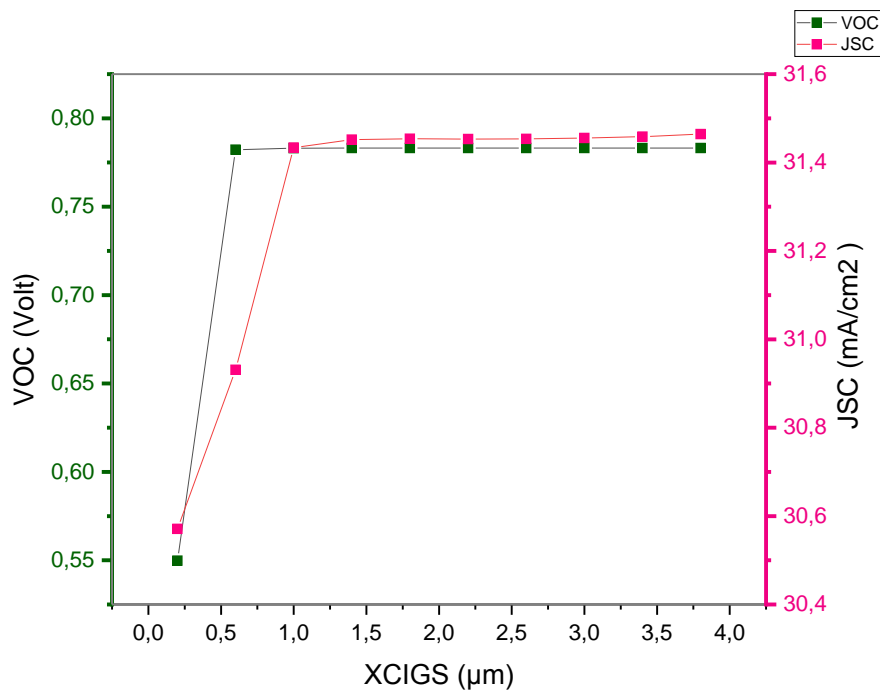
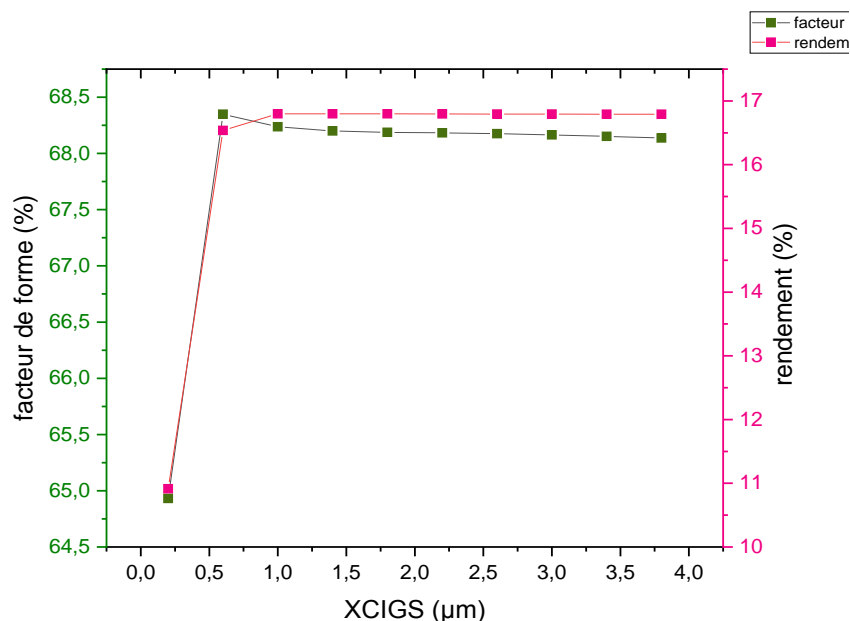


Figure II.34. Variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et la densité de courant de court-circuit avec l'épaisseur  $x_{CIGS}$ .



**Figure II.35.** Variation du Facteur de forme FF et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur  $x_{CIGS}$ .

Dans un premier temps les différents paramètres et caractéristiques s'améliorent pour La tension en circuit ouvert **0.783139 Volt** avec une épaisseur de **1 $\mu m$** , Le facteur de forme de **68.3481%** avec une épaisseur de à **0.6 $\mu m$**  et Un rendement maximal de **16.7989%** avec une épaisseur de **1.4 $\mu m$**  . Ces paramètres deviennent ensuite constants.

La densité de court-circuit augmente jusqu'à **31.4642 mA/cm<sup>2</sup>** avec une épaisseur de **1 $\mu m$** .

Le rendement maximal obtenu dans cette étude est de **16.7989%** avec une épaisseur de **1,4  $\mu m$** . Le rendement augmente en fonction de l'épaisseur de CIGS puis diminue.

#### **b) Effet de l'épaisseur de la couche CdS sur les caractéristiques électriques de la cellule**

Les résultats obtenus pour différentes épaisseurs  $X_{CdS}$ , de la couche CdS sont récapitulés dans le tableau **Tableau II-7** ; les résultats de la simulation sont représentés par les figures II.14, II.15, II.16, montrant que plus l'épaisseur de la couche CdS diminue et plus le rendement est meilleur.

$X_{CdS}$ ( $\mu m$ )	Voc (Volt)	Jsc ( $mA/cm^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
0.1	0.780984	30.05646338	68.1477	15.9967
0.09	0.781350	30.28561497	68.1578	16.1286
0.08	0.781741	30.53790062	68.1634	16.2725
0.07	0.782185	30.81594370	68.1735	16.4324
0.06	0.782677	31.12242215	68.1756	16.6068
0.05	0.783187	31.45495970	68.1753	16.7951
0.04	0.783730	31.81504373	68.1624	16.9959
0.03	0.784313	32.20359777	68.1231	17.2063
0.02	0.784890	32.61396103	68.0592	17.4220
<b>0.01</b>	<b>0.785469</b>	<b>33.04812226</b>	<b>67.9682</b>	<b>17.6434</b>

TABLEAU II-8: EFFET DE L'ÉPAISSEUR  $x_{CdS}$  DE LA COUCHE(CdS) SUR LES PARAMETRES PHOTOVOLTAÏQUES DE LA CELLULE SOLAIRE A BASE CIGS).

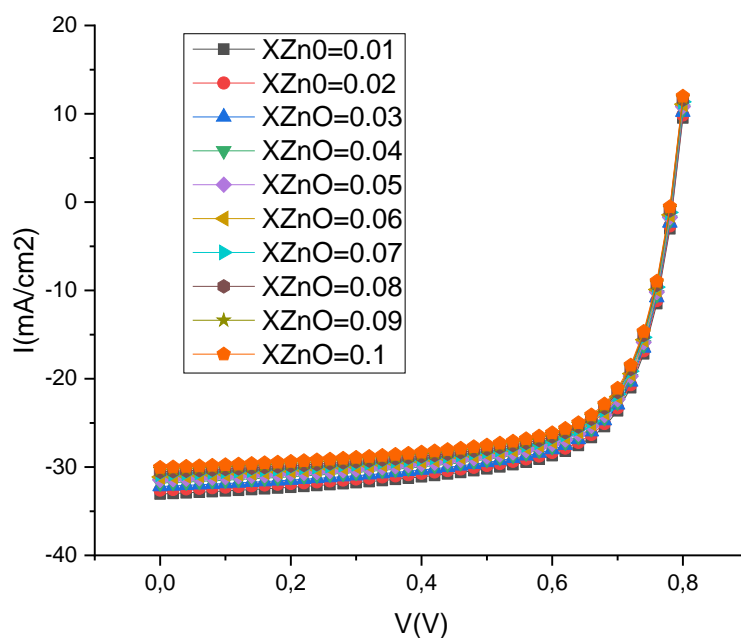


Figure II.36. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V

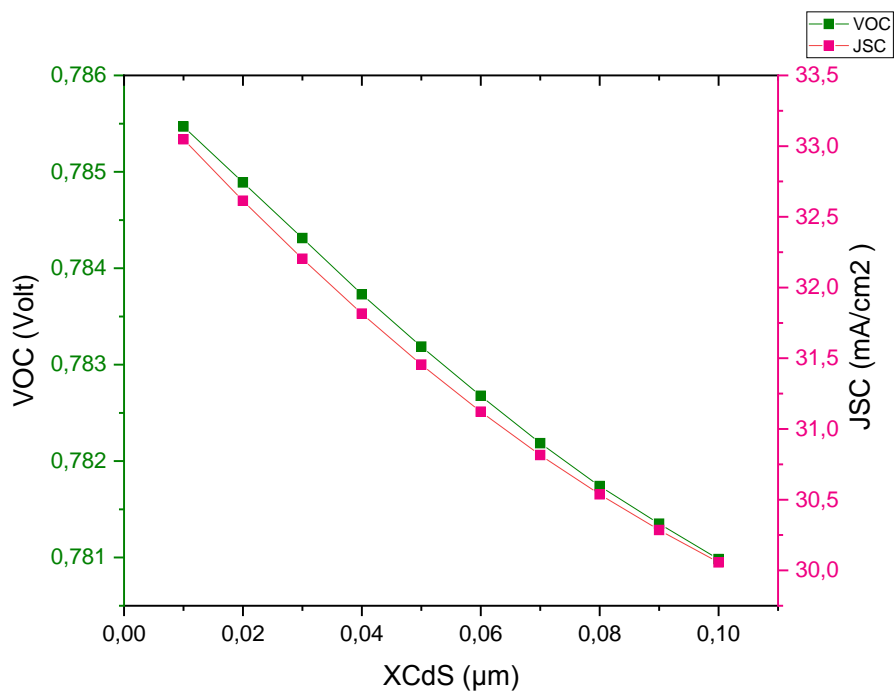


Figure II.37. Variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$  avec l'épaisseur  $x_{CdS}$ .

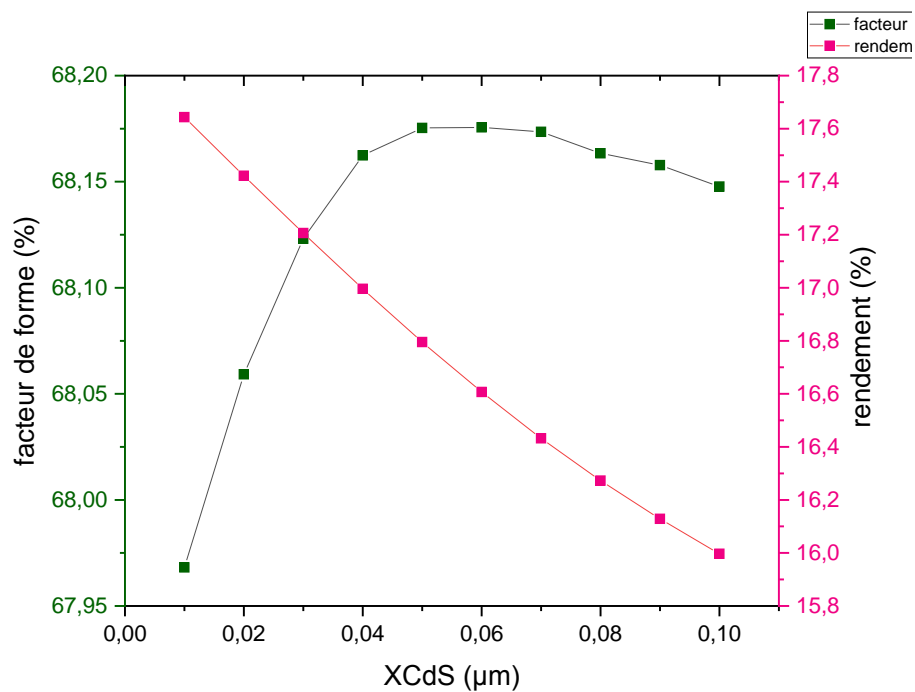


Figure II.38. Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur  $x_{CdS}$ .

On remarque que plus l'épaisseur de la couche CdS augmente plus les différents paramètres et caractéristiques comme la tension en court-circuit ouvert, la densité de courant court-circuit et le rendement diminuent, contrairement au facteur de forme qui augmente progressivement jusqu'à **68.1756%** pour une épaisseur de 0.06  $\mu\text{m}$  puis diminue.

On obtient un rendement maximal de **17.6434%** avec une épaisseur de **0.01 $\mu\text{m}$** .

**c) Effet de l'épaisseur de la couche ZnO sur les caractéristiques électriques de la cellule :**

les résultats obtenus pour différentes épaisseurs  $X_{\text{ZnO}}$ , sont récapitulés dans le **Tableau II.16**. la variation de l'épaisseur de la couche ZnO n'influe pas beaucoup sur la caractéristique I(V) Figure II.39. Voc et Jsc varient proportionnellement **Figure II.40**, le facteur de forme et le rendement sont inversement proportionnels Figure II.19.

$X_{\text{ZnO}}$ ( $\mu\text{m}$ )	Voc (Volt)	Jsc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
<b>0.1</b>	0.783072	31.38151847	68.1681	16.7516
<b>0.09</b>	0.783090	31.39289011	68.1692	16.7583
<b>0.08</b>	0.783110	31.40563954	68.1707	16.7659
<b>0.07</b>	0.783132	31.42006177	68.1720	16.7745
<b>0.06</b>	0.783158	31.43637490	68.1735	16.7841
<b>0.05</b>	0.783187	31.45496402	68.1753	16.7951
<b>0.04</b>	0.783220	31.47615136	68.1772	16.8076
<b>0.03</b>	0.783258	31.50027788	68.1769	16.8212
<b><u>0.02</u></b>	<b><u>0.783303</u></b>	<b><u>31.52707557</u></b>	<b><u>68.1613</u></b>	<b><u>16.8326</u></b>
<b>0.01</b>	0.783364	31.55574526	68.0926	16.8323

**Tableau II-9:** Effet de l'épaisseur  $x_{\text{ZnO}}$  de la couche(ZNO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

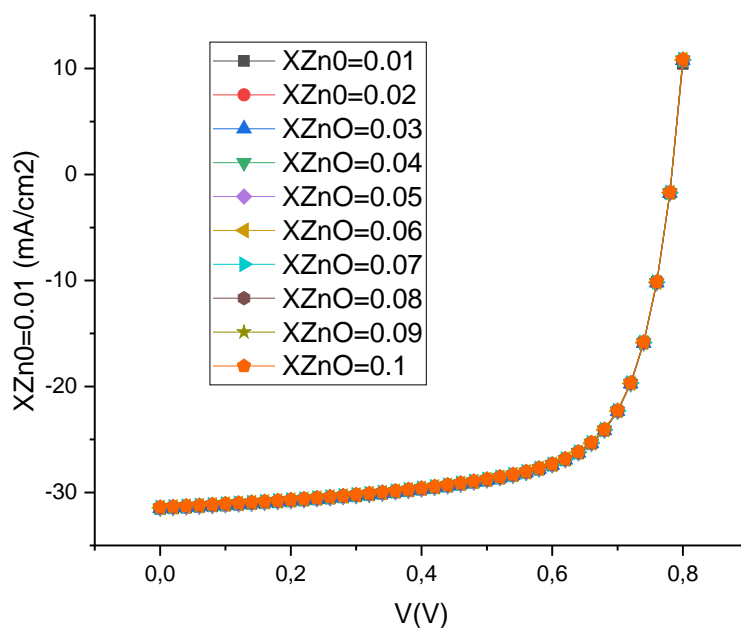


Figure II.41. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V

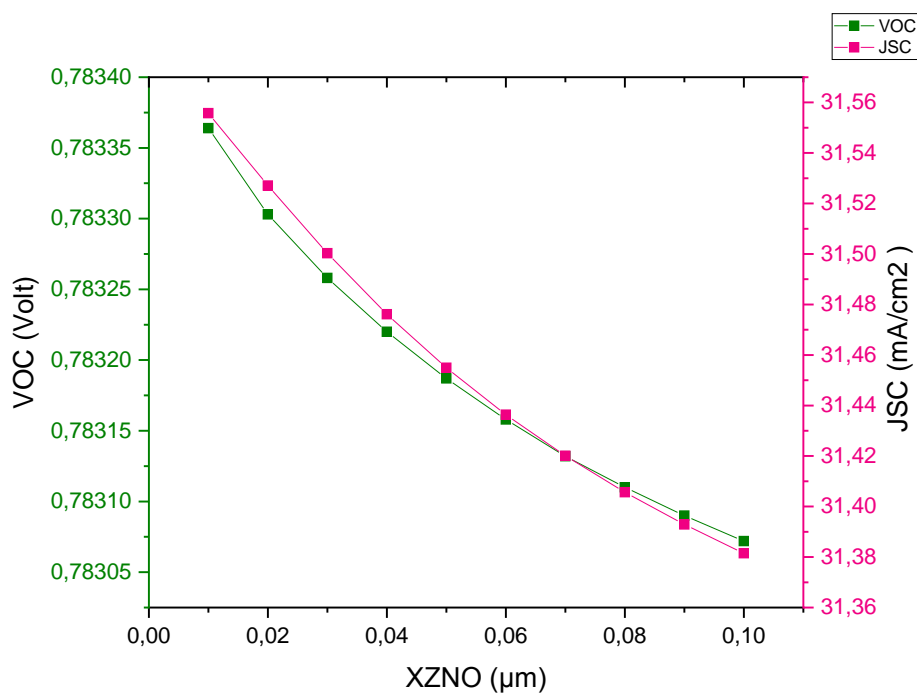
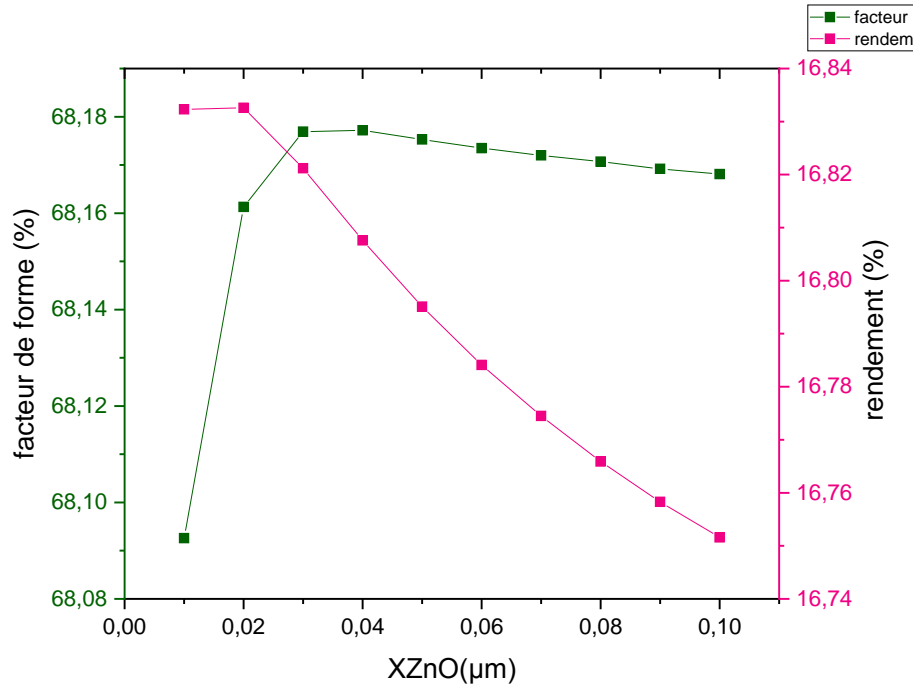


Figure II.42. Variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$  avec l'épaisseur  $XZnO$ .



**Figure II.43.** Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur  $x_{ZnO}$ .

Nous pouvons en déduire que plus l'épaisseur de la couche ZnO augmente plus la tension en circuit ouvert, et la densité de courant court-circuit diminuent, contrairement au facteur de forme qui augmente progressivement jusqu'à **68.1772%** pour une épaisseur de **0.04 μm** puis diminue. Le rendement est important pour les couches **de ZnO de faible épaisseurs**. On obtient un rendement maximal de **16.8326%** avec une épaisseur de **0.02μm**.

**d)Effet de l'épaisseur de la couche AZO sur les caractéristiques électriques de la cellule**

Les paramètres de la structure, pour différentes épaisseurs  $X_{AZO}$ , tirés des différentes caractéristiques, sont récapitulés dans le **Tableau II.10**. ci dessous.

$X_{AZO}$	Voc (Volt)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
1.0	0.783119	31.41065948	68.1733	16.7695
0.9	0.783123	31.41352061	68.1736	16.7712
0.8	0.783129	31.41708201	68.1740	16.7733
0.7	0.783133	31.42152766	68.1747	16.7759
0.6	0.783142	31.42711511	68.1703	16.7780
0.5	0.783153	31.43420836	68.1715	16.7823
0.4	0.783168	31.44327577	68.1733	16.7879
0.3	0.783187	31.45501920	68.1752	16.7951
0.2	0.783211	31.47028794	68.1774	16.8043
<b>0.1</b>	<b>0.783243</b>	<b>31.49033003</b>	<b>68.1803</b>	<b>16.8164</b>

Tableau II.11. Effet de l'épaisseur  $x_{AZO}$  de la couche(AZO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

Les variations de I(V) Voc et Jsc sont représentées dans les figures II.20, II.21 et II.23 et évoluent proportionnellement.

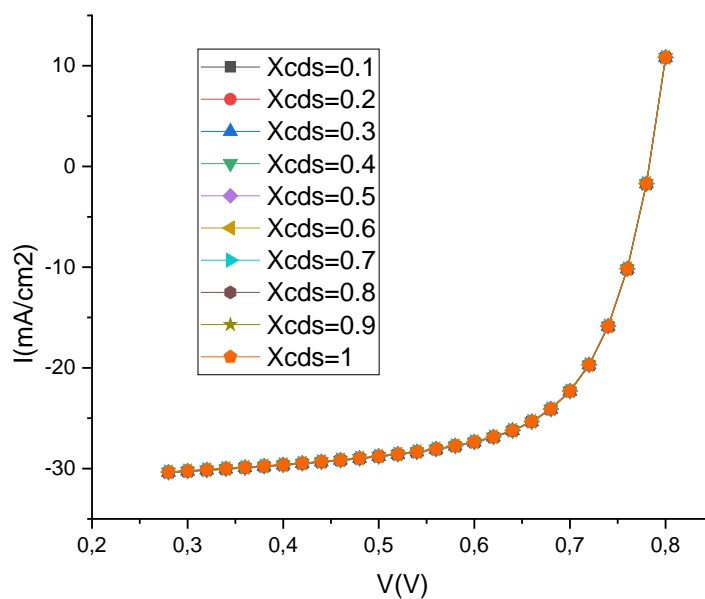


Figure II.44. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V

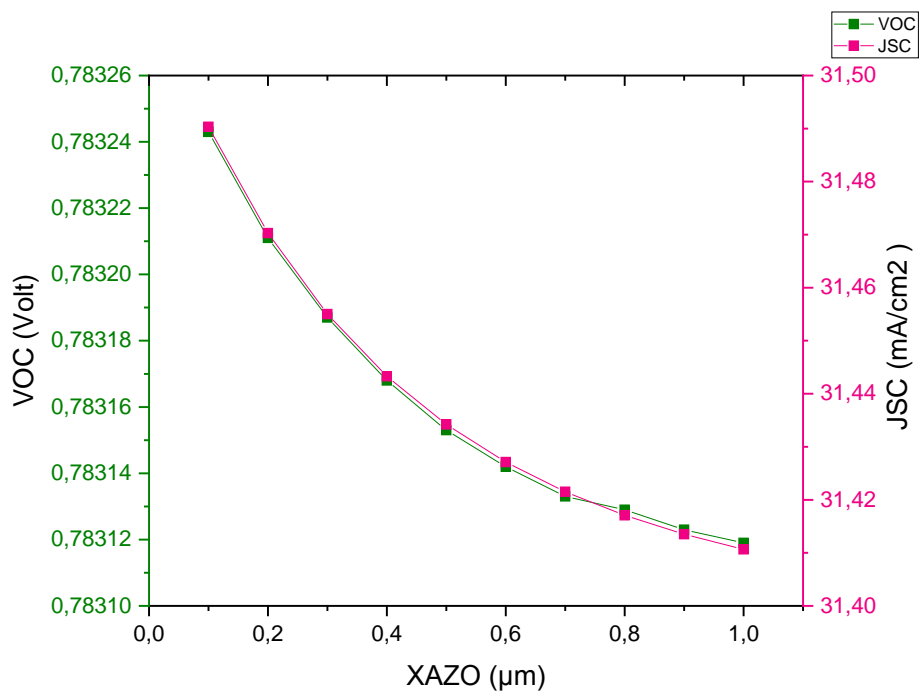


Figure II.45. Variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$  avec l'épaisseur  $x_{AZO}$ .

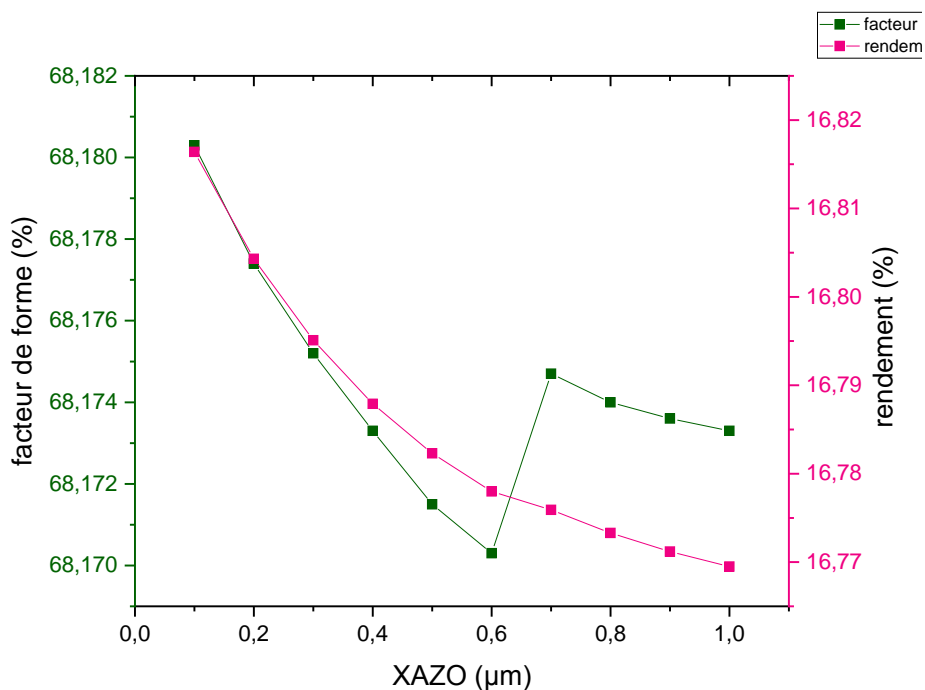


Figure II.46. Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur  $x_{AZO}$ .

On remarque que plus l'épaisseur de la couche AZO augmente plus les différents paramètres et caractéristiques (la tension en court-circuit ouvert, la densité de courant court-circuit et le rendement) diminuent, contrairement au facteur de forme qui diminue jusqu'à **68.1703%** pour une épaisseur de **0.6 $\mu$ m** ; augmente jusqu'à **68.1747%** pour une épaisseur de **0.7 $\mu$ m** puis diminue.

On obtient un rendement maximal de **16.1803%** avec une épaisseur de **0.1 $\mu$ m**.

### 3.1.2 Effet du dopage sur les caractéristiques électriques de la cellule

#### a) Effet du dopage de la couche CIGS sur les caractéristiques électriques de la cellule

Les résultats sont représentés par le **Tableau II- 12**.

Densité de dopage $N_{D/CIGS}$	Voc (Volt)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
$10^{15}$	0.783187	31.45495971	68.1754	16.7951
$5 \cdot 10^{14}$	0.783814	31.45341636	68.2621	16.8291
$10^{14}$	0.784424	31.45009318	68.3428	16.8603
$5 \cdot 10^{13}$	0.785023	31.44557922	68.4177	16.8892
$10^{13}$	0.785626	31.44004704	68.4877	16.9165
$5 \cdot 10^{12}$	0.786202	31.44018219	68.5428	16.9426
$10^{12}$	0.786760	31.43276981	68.6035	16.9657
$5 \cdot 10^{11}$	0.787308	31.42503359	68.6599	16.9873
$10^{11}$	0.787842	31.41576375	68.7133	17.0070
<b><u><math>5 \cdot 10^{10}</math></u></b>	<b><u>0.788362</u></b>	<b><u>31.40570029</u></b>	<b><u>68.7627</u></b>	<b><u>17.0250</u></b>

**Tableau II- 13.** Effet du dopage  $N_{D/CIGS}$  de la couche(CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

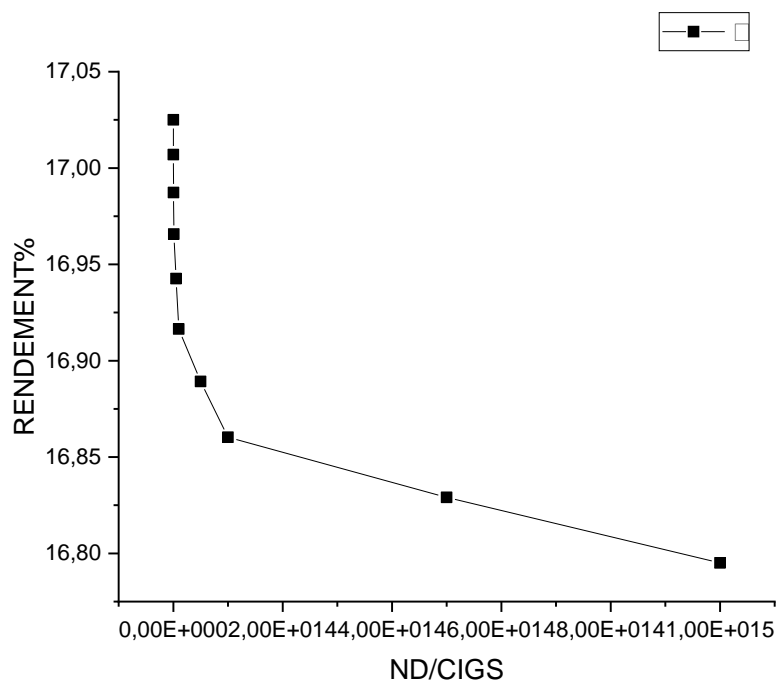


Figure II.47. Influence du dopage de la couche CIGS sur le rendement

On remarque que plus le dopage  $N_{D/CIGS}$  de la couche CIGS augmente plus le rendement diminue. La densité de courant de court-circuit s'améliore, la tension en circuit ouvert et le facteur de forme diminuent avec la concentration du dopage, figures II.23.

On obtient un rendement maximal de **17.0250%** avec un dopage de  **$5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$** .

**b) Effet du dopage de la couche CdS sur les caractéristiques électriques de la cellule.**

Densité de dopage $N_{D/CdS}$	Voc (Volt)	Jsc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
$5 \cdot 10^{20}$	0.788641	31.47760293	68.7288	17.0616
$10^{20}$	0.788638	31.47694620	68.7292	17.0613
$5 \cdot 10^{19}$	0.788635	31.47651202	68.7295	17.0610
$10^{19}$	0.788626	31.47548242	68.7307	17.0606
$5 \cdot 10^{18}$	0.788619	31.47541418	68.7322	17.0608

$10^{18}$	0.788599	31.47893817	68.7423	17.0648
<b><math>5 \cdot 10^{17}</math></b>	<b><u>0.788590</u></b>	<b><u>31.48086360</u></b>	<b><u>68.7535</u></b>	<b><u>17.0684</u></b>
$10^{17}$	0.788515	31.46820068	68.7816	17.0669
$5 \cdot 10^{16}$	0.788410	31.43421191	68.7818	17.0462
$10^{16}$	0.788181	31.36659672	68.7114	16.9872

Tableau II-14. Effet du dopage  $N_{D/CdS}$  de la couche (CdS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

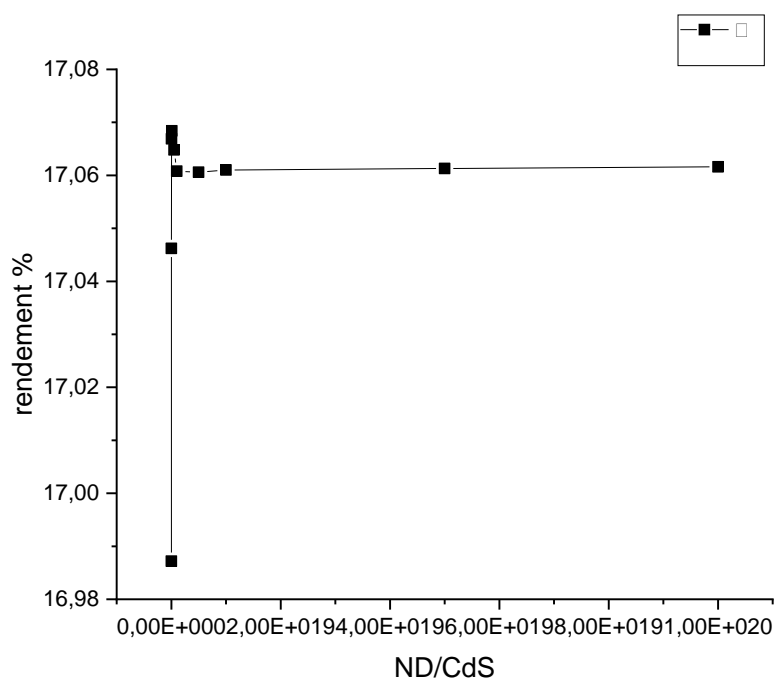


Figure II.48. Influence du dopage de la couche CdS sur le rendement

On remarque qu'il y a une augmentation du rendement Figure II.49, avec l'augmentation de dopage de la couche tampon CdS, les différents paramètres et caractéristiques s'améliorent, la tension en circuit ouvert augmente avec la concentration du dopage.

Nous avons obtenu un rendement maximal de **17.0684%** avec un dopage de  **$5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$**

c) Effet du dopage de la couche ZnO sur les caractéristiques électriques de la cellule

Densité de dopage $N_{D/ZnO}$	Voc (Volt)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
<b><u><math>5 \cdot 10^{20}</math></u></b>	<b><u>0.788326</u></b>	<b><u>31.41182659</u></b>	<b><u>68.7813</u></b>	<b><u>17.0321</u></b>
$10^{20}$	0.788325	31.41161953	68.7809	17.0319
$5 \cdot 10^{19}$	0.788324	31.41143651	68.7805	17.0317
$10^{19}$	0.788322	31.41048706	68.7793	17.0308
$5 \cdot 10^{18}$	0.788321	31.40980452	68.7777	17.0300
$10^{18}$	0.788316	31.40663215	68.7583	17.0234
$5 \cdot 10^{17}$	0.788314	31.40383036	68.7410	17.0176
$10^{17}$	0.788356	31.35527306	68.0106	16.8116
$5 \cdot 10^{16}$	0.788385	31.26234230	66.3932	16.3638
$10^{16}$	0.788389	31.01226033	61.1849	14.9596

Tableau II-15. Effet du dopage  $N_{D/ZnO}$  de la couche(ZnO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

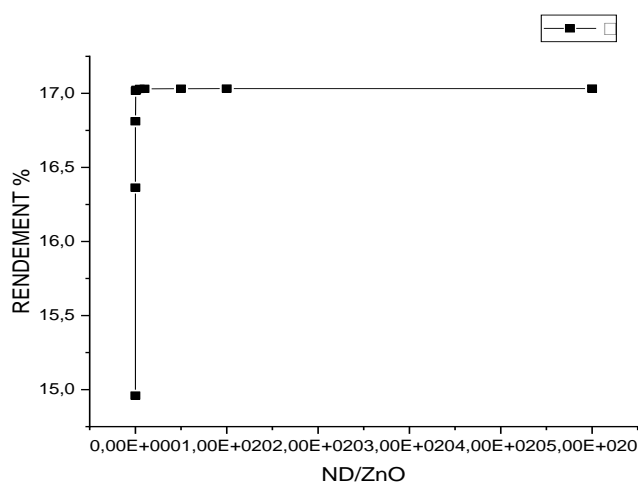


Figure II.50. Influence du dopage de la couche ZnO sur le rendement

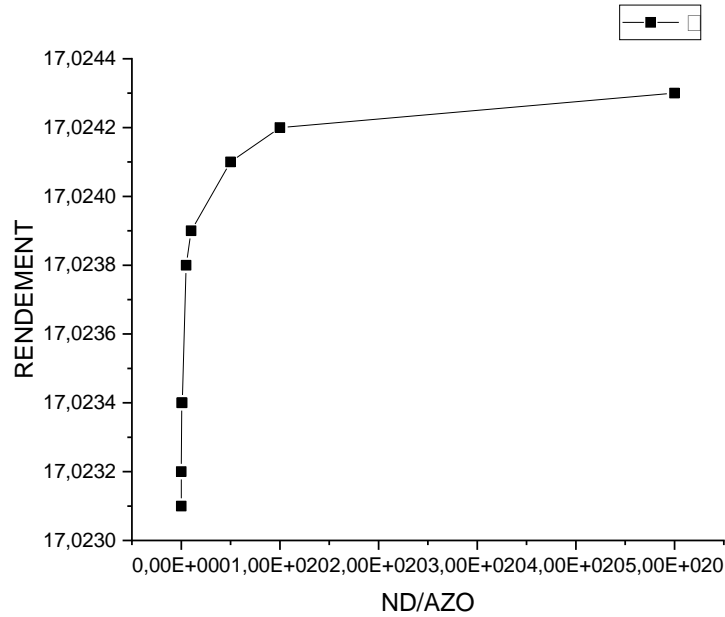
On remarque qu'il y a une augmentation du rendement avec l'augmentation de dopage de la couche ZnO, les différents paramètres et caractéristiques s'améliorent, la tension en circuit ouvert augmente avec la concentration du dopage.

Nous avons obtenu un rendement maximal de **17.0321%** avec un dopage de  **$5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$**

**d) Effet du dopage de la couche AZO sur les caractéristiques électriques de la cellule**

Densité de dopage $N_{D/AZO}$	Voc (Volt)	Jsc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
<b><math>5 \cdot 10^{20}</math></b>	<b>0.788316</b>	<b>31.40658101</b>	<b>68.7620</b>	<b>17.0243</b>
$10^{20}$	0.788316	31.40667605	68.7615	17.0242
$5 \cdot 10^{19}$	0.788316	31.40670056	68.7610	17.0241
$10^{19}$	0.788316	31.40666897	68.7602	17.0239
$5 \cdot 10^{18}$	0.788316	31.40665373	68.7596	17.0238
$10^{18}$	0.788316	31.40661974	68.7580	17.0234
$5 \cdot 10^{17}$	0.788316	31.40663215	68.7583	17.0234
$10^{17}$	0.788316	31.40660686	68.7575	17.0232
$5 \cdot 10^{16}$	0.788316	31.40660289	68.7574	17.0232
$10^{16}$	0.788316	31.40659215	68.7571	17.0231

**Tableau II-16.** Effet du dopage  $N_{D/AZO}$  de la couche(AZO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).



**Figure II.51.** Influence du dopage de la couche AZO sur le rendement

On remarque que plus le dopage  $N_{D/AZO}$  de la couche AZO augmente plus le rendement augmente mais faiblement.

Après la variation du dopage de la couche AZO, les courbes présentent deux zones différentes :

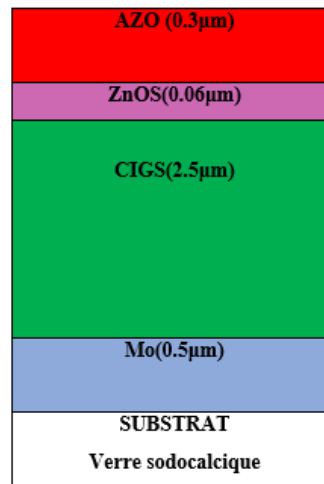
- La première zone ( $10^{16}$ - $10^{19}$ ) : les rendements sont identiques (ont la même allure) ; l'augmentation du dopage n'a pas une influence significative sur le rendement.
- Deuxième zone ( $10^{19}$ - $5.10^{20}$ ) : les courbes subissent des modifications, ces dernières montrent qu'il y a une augmentation du rendement avec l'augmentation de dopage.

Les différents paramètres et caractéristiques s'améliorent, la tension en circuit ouvert reste constante avec la concentration du dopage.

Nous avons obtenu un rendement maximal de **17.0243%** avec un dopage de  **$5.10^{20} \text{ cm}^{-3}$** ,

#### 4. Structure De La Deuxième Cellule Étudiée CIGS/ZnOS/AZO

Nous allons étudier le modèle représenté par La Figure II.27 en utilisant ZnOS au lieu de CdS et ZnO du modèle précédent.



**Figure II.27.** cellule à base de CIGS standard

Le schéma simplifié de l'hétéro structuré simulé par SCAPS est représenté sur la figure **Figure II.28** suivante :



**Figure II.28.** Schéma simplifié d'une cellule solaire à base de CIGS

Les paramètres du dispositif étudié de la cellule standard utilisés pour la simulation sont représentés dans le **Tableau II- 172**

	CIGS	ZnOS	AZO
<b>Epaisseur (µm)</b>	2.500	0.060	0.300
<b>Bande de gap (eV)</b>	1.200	2.830	3.300
<b>Affinité électronique (eV)</b>	4.500	4.450	4.450
<b>Constante diélectrique</b>	10.000	9.000	9.000
<b>Nc (cm<sup>-3</sup>)</b>	2.00 10 <sup>16</sup>	1 10 <sup>16</sup>	2.2 10 <sup>16</sup>
<b>Nv (cm<sup>-3</sup>)</b>	2.00 10 <sup>16</sup>	1 10 <sup>16</sup>	1.8 10 <sup>17</sup>
<b>Vitesse thermique des électrons(cm/s)</b>	1 10 <sup>7</sup>	1 10 <sup>7</sup>	1 10 <sup>7</sup>
<b>Vitesse thermique des trous (cm/s)</b>	1 10 <sup>7</sup>	1 10 <sup>7</sup>	1 10 <sup>7</sup>
<b>Mobilité d'électron (cm<sup>2</sup> /V.s)</b>	5 10 <sup>1</sup>	1.10 <sup>2</sup>	1.10 <sup>2</sup>
<b>Mobilité du trou (cm<sup>2</sup> /V.s)</b>	2 10 <sup>1</sup>	2.5 10 <sup>1</sup>	2.10 <sup>1</sup>
<b>Densité de porteur (cm<sup>-3</sup>)</b>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>18</sup>
<b>Densité d'accepteur (cm<sup>-3</sup>)</b>	5.5 10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	1

**Tableau II-18** propriétés des couches CIGS /ZnOS /AZO.

#### 4.1. Résultats Et Discussion

Dans le but d'optimiser une conception spécifique d'une structure d'hétérojonction CIGS/ZnOS/AZO nous devons analyser et interpréter les résultats pour déterminer l'influence des paramètres physiques et technologiques sur les performances du dispositif tels que le dopage et l'épaisseur afin de comparer ces résultats avec celle de la première cellule de structure CIGS/ CdS/ZnO/AZO.

4.1.1. Effet De L'épaisseur Sur Les Caractéristiques Electriques De La Cellule

a) Effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur les caractéristiques électriques de la cellule

Les résultats de la simulation obtenus pour différentes épaisseurs de la couche CIGS ( $X_{CIGS}$ ), sont récapitulés dans le **Tableau II.13** :

$X_{CIGS}$ ( $\mu\text{m}$ )	Voc (Volt)	Jsc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
<b>3.8</b>	<b>0.787318</b>	<b>34.20912801</b>	<b>68.4633</b>	<b>18.4395</b>
3.4	0.787350	34.20115575	68.4670	18.4370
3	0.787310	34.19255052	68.4745	18.4334
2.6	0.787307	34.18276070	68.4860	18.4312
2.2	0.787281	34.17177244	68.4927	18.4264
1.8	0.787274	34.15886870	68.4998	18.4212
1.4	0.787247	34.14335076	68.5088	18.4147
1	0.787200	34.11042351	68.5345	18.4027
0.6	0.786334	33.59596201	68.6292	18.1302
0.2	0.728103	27.78764899	70.0496	14.1726

**Tableau II-19:** Effet de l'épaisseur  $x_{CIGS}$  de la couche(CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

Les résultats de la simulation obtenus sont représentés par les figures II.29, II.30, II.31.

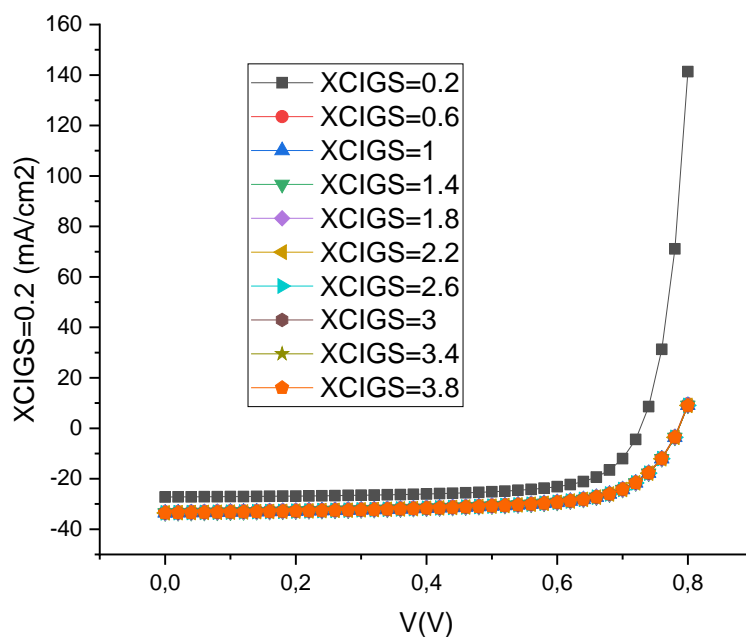


Figure II.29. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V

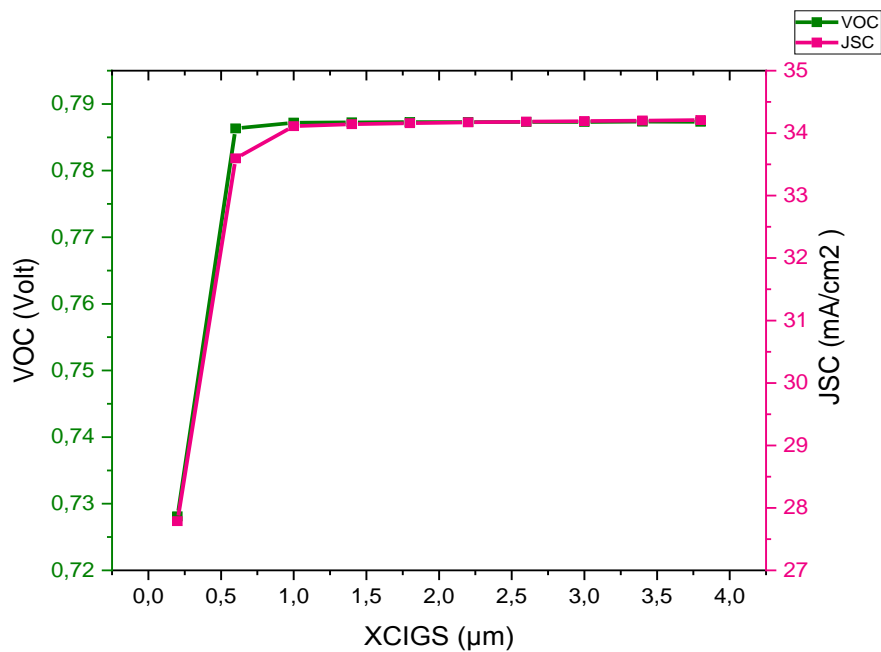
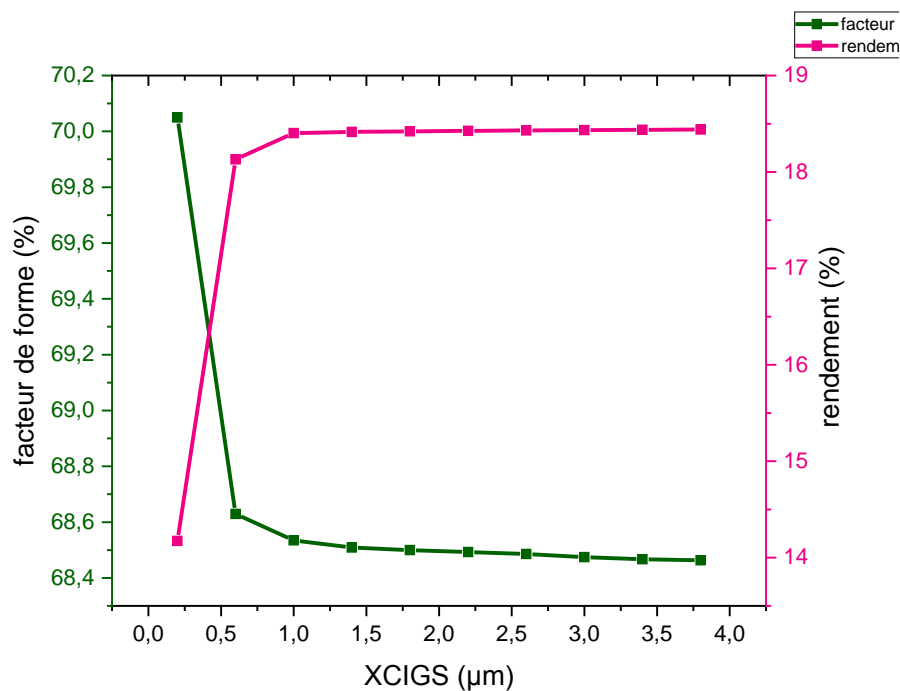


Figure II.30. Variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$  avec l'épaisseur  $X_{CIGS}$ .



**Figure II.31.** Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur  $x_{\text{CIGS}}$ .

On remarque que plus l'épaisseur de la couche CIGS augmente plus la tension en circuit ouvert, et la densité de courant court-circuit et le facteur de forme augmentent.

Le rendement augmente pour les couches de CIGS jusqu'à **18.4395%** pour une épaisseur de **3.8 μm**.

**b) Effet de l'épaisseur de la couche ZnOS sur les caractéristiques électriques de la cellule**

Les résultats obtenus pour différentes épaisseurs  $X_{CdS}$ , de la couche CdS sont récapitulés dans le tableau **Tableau II-14** ; les résultats de la simulation sont représentés par les figures II.31, II.32, II.33, montrant que plus l'épaisseur de la couche ZnOS diminue et plus le rendement est meilleur.

$X_{ZnOS}$	Voc (Volt)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
<b>0.1</b>	0.787064	33.78099981	68.6828	18.2613
<b>0.09</b>	0.787056	33.88019868	68.7152	18.3233
<b>0.08</b>	0.787096	33.96749134	68.6993	18.3672
<b>0.07</b>	0.787148	34.03829729	68.6508	18.3937
<b><u>0.06</u></b>	<b><u>0.787188</u></b>	<b><u>34.09094890</u></b>	<b><u>68.5781</u></b>	<b><u>18.4036</u></b>
<b>0.05</b>	0.787209	34.12533911	68.4864	18.3980
<b>0.04</b>	0.787180	34.14148799	68.3837	18.3789
<b>0.03</b>	0.787174	34.13958827	68.2815	18.3498
<b>0.02</b>	0.787143	34.12108412	68.1886	18.3142
<b>0.01</b>	0.787072	34.09068542	68.1215	18.2782

**Tableau II-20** Effet de l'épaisseur  $x_{ZnO}$  de la couche(ZnOS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

Les résultats de la simulation obtenus sont représentés par les figures II.32, II.33, II.34.

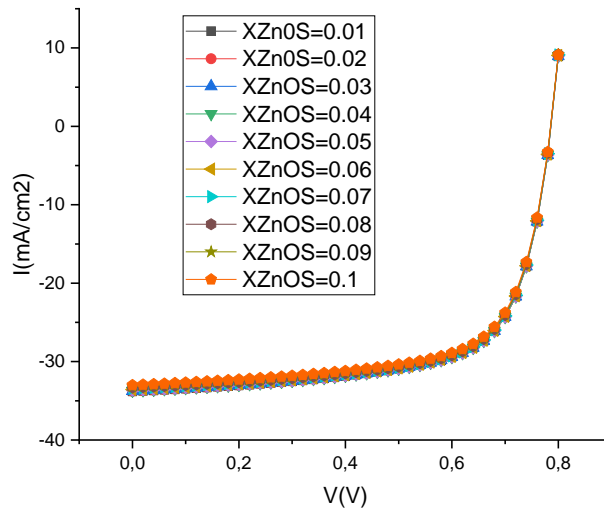


Figure II.32. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V

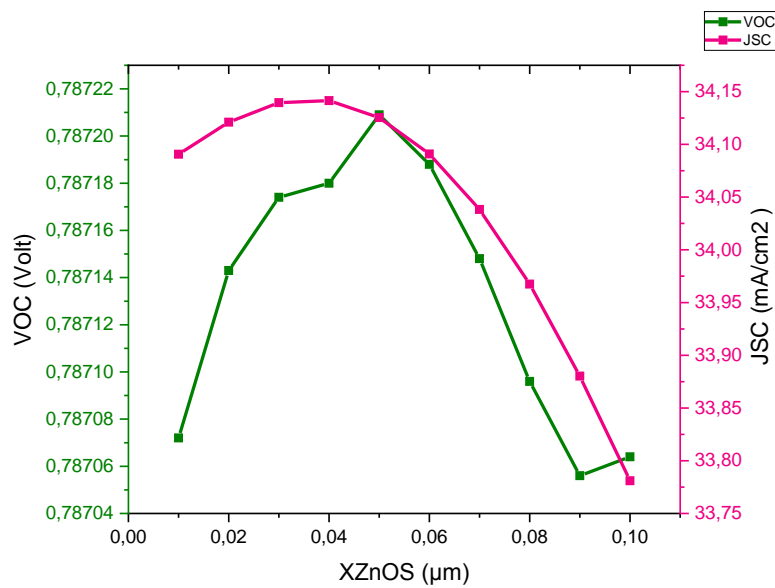
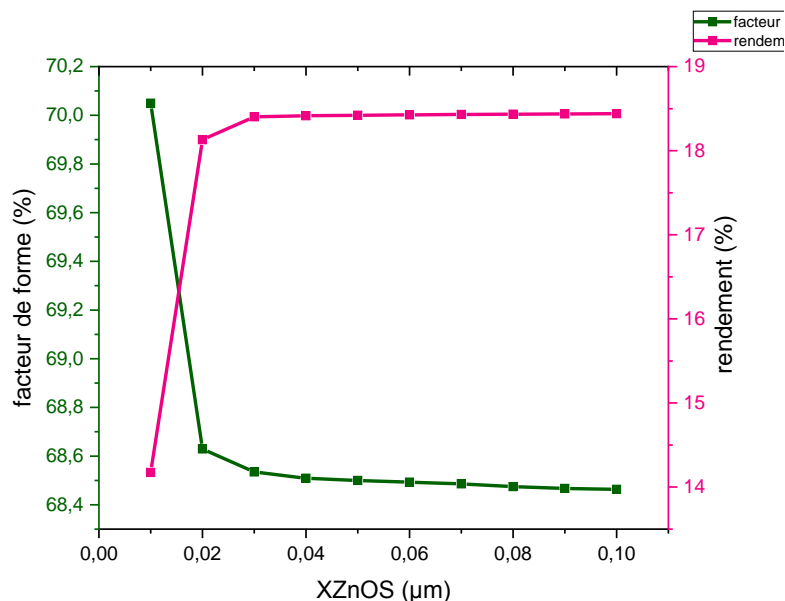


Figure II.33. Variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$  avec l'épaisseur  $x_{ZnOS}$ .



**Figure II.34.** Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur  $x_{ZnOS}$ .

Nous remarquons qu'il Ya deux parti dans l'évolution de l'épaisseur de la couche ZnOS :

- ❖ Dans un premier temps les différents paramètres et caractéristiques s'améliorent jusqu'à :
  - La tension en circuit ouvert **0.787209** Volt avec une épaisseur de 0.05μm.
  - La densité de court-circuit **34.14148799** mA/cm<sup>2</sup> avec une épaisseur de 0.04μm.
  - Le facteur de forme de **68.7152%** avec une épaisseur de 0.09 μm.
  - Un rendement maximal de **18.4036%** avec une épaisseur de 0.06μm.
- ❖ Dans un second temps elles diminuent

On obtient un rendement maximal de **18.4036%** avec une épaisseur de **0.06μm**.

**c)Effet de l'épaisseur de la couche AZO sur les caractéristiques électriques de la cellule :**

Les paramètres de la structure, pour différentes épaisseurs  $X_{AZO}$ , tirés des différentes caractéristiques, sont récapitulés dans le **tableauII.15**.

les résultats de la simulation sont représentés par les figures II.35, II.36, II.37.

$X_{AZO}$	Voc (Volt)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
1.0	0.786791	33.82466627	68.5156	18.2340
0.9	0.786820	33.84516422	68.5168	18.2460
0.8	0.786853	33.86847443	68.5182	18.2598
0.7	0.786891	33.89514686	68.5199	18.2755
0.6	0.786935	33.92586811	68.5220	18.2936
0.5	0.786986	33.96150150	68.5246	18.3147
0.4	0.787046	34.00314069	68.5262	18.3390
0.3	0.787116	34.05218178	68.5295	18.3680
0.2	0.787200	34.11042351	68.5345	18.4027
<b>0.1</b>	<b>0.787300</b>	<b>34.18022827</b>	<b>68.5411</b>	<b>18.4445</b>

Tableau II-21 Effet de l'épaisseur  $x_{AZO}$  de la couche(AZO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

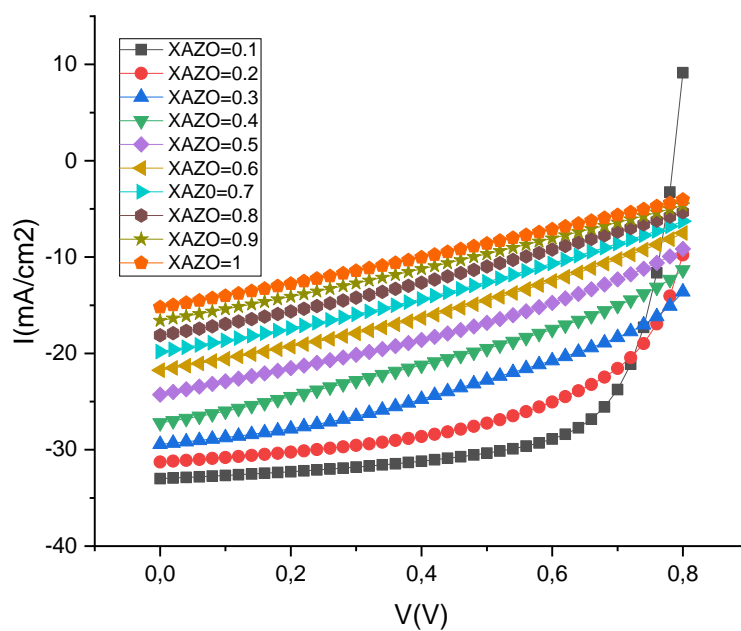


Figure II.35. Influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V

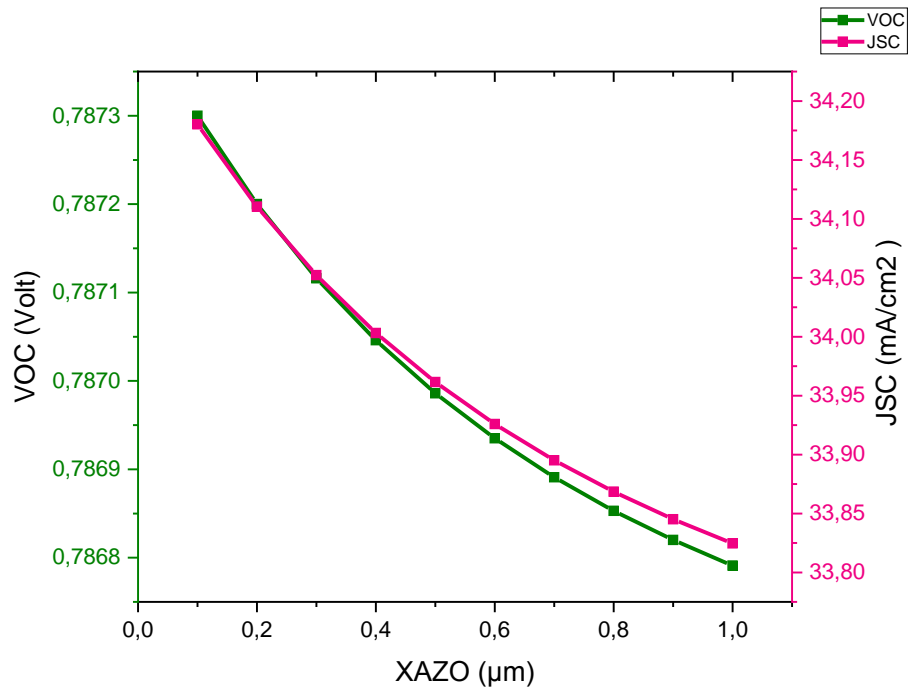


Figure II.36. Variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et de la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$  avec l'épaisseur  $x_{AZO}$ .

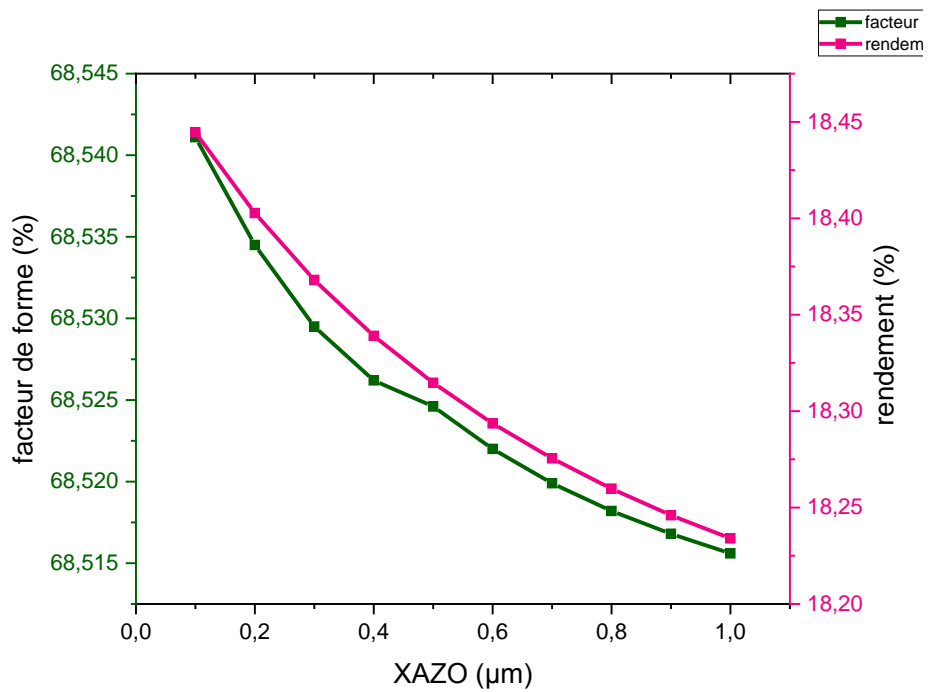


Figure II.37. Variation du Facteur de forme FF et du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur  $x_{AZO}$ .

On remarque que plus l'épaisseur de la couche AZO augmente plus les différents paramètres et caractéristiques (la tension en court-circuit ouvert, la densité de courant court-circuit, le facteur de forme et le rendement).

On obtient un rendement maximal de **18.4445%** avec une épaisseur de **0.1 $\mu$ m**.

#### 4.1.2 Effet Du Dopage Sur Les Caractéristiques Electriques De La Cellule

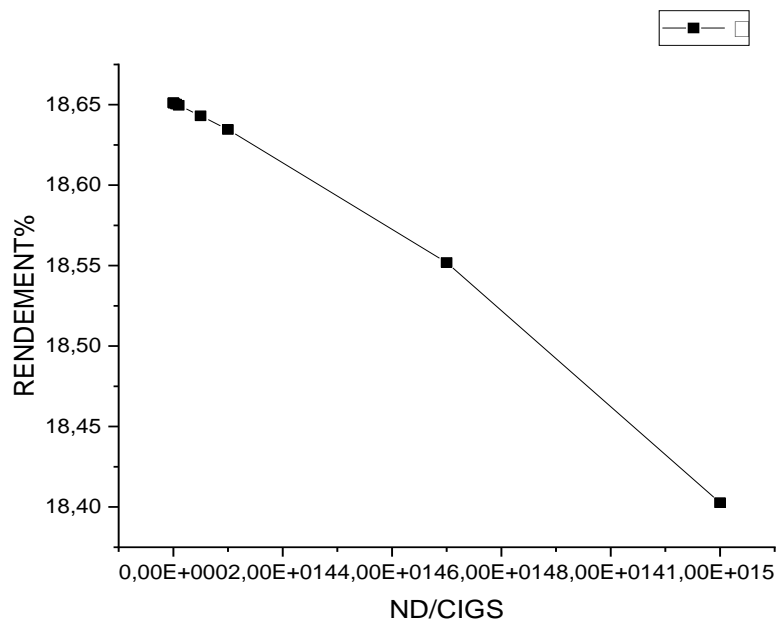
##### a) Effet Du Dopage De La Couche CIGS Sur Les Caractéristiques Electriques De La Cellule

Les résultats sont représentés par le **Tableau II- 16**.

Densité de dopage $N_{D/CIGS}$	Voc (Volt)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
$10^{15}$	0.787200	34.11042351	68.5345	18.4027
$5 \cdot 10^{14}$	0.789976	34.07936574	68.9103	18.5519
$10^{14}$	0.791970	34.03814583	69.1267	18.6346
$5 \cdot 10^{13}$	0.792207	34.03219151	69.1495	18.6431
$10^{13}$	0.792396	34.02731478	69.1671	18.6496
$5 \cdot 10^{12}$	0.792419	34.02669826	69.1693	18.6504
$10^{12}$	0.792438	34.02620397	69.1710	18.6510
$5 \cdot 10^{11}$	0.792440	34.02614211	69.1712	18.6511
$10^{11}$	0.792442	34.02609261	69.1714	18.6512
<u><math>5 \cdot 10^{10}</math></u>	<u>0.792442</u>	<u>34.02608642</u>	<u>69.1714</u>	<u>18.6512</u>

**Tableau II- 22.** Effet du dopage  $N_{D/CIGS}$  de la couche(CIGS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

les résultats de la simulation sont représentés par les figures II.38,. Influence du dopage de la couche CIGS sur le rendement



**Figure II.38.** Influence du dopage de la couche CIGS sur le rendement

On remarque que plus le dopage  $N_{D/CIGS}$  de la couche CIGS augmente plus le rendement diminue. La densité de courant de court-circuit s'améliore et le facteur de forme diminuent avec la concentration du dopage, contrairement à la tension en circuit ouvert.

Nous avons obtenu un rendement maximal de **18.6512%** avec un dopage de  **$5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$**

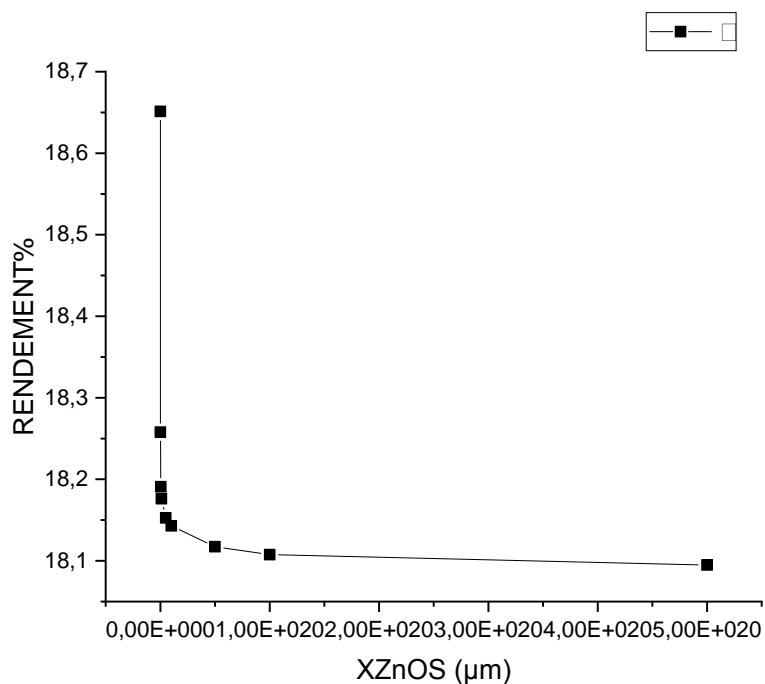
**b) Effet Du Dopage De La Couche ZnOS Sur Les Caractéristiques Electriques De La Cellule**

Les résultats sont représentés par le **Tableau II- 17**.

Densité de dopage $N_{D/ZnOS}$	$V_{oc}$ (Volt)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
$5 \cdot 10^{20}$	0.786733	33.86431780	67.9184	18.0949
$10^{20}$	0.786765	33.88577798	67.9201	18.1076
$5 \cdot 10^{19}$	0.786790	33.90215233	67.9214	18.1173
$10^{19}$	0.786858	33.94421393	67.9275	18.1429
$5 \cdot 10^{18}$	0.786885	33.95873519	67.9326	18.1527
$10^{18}$	0.786948	33.98743555	67.9578	18.1762
$5 \cdot 10^{17}$	0.786973	34.00280949	67.9795	18.1908
$10^{17}$	0.787027	34.07312952	68.0841	18.2578
$5 \cdot 10^{16}$	0.787120	34.11911541	68.1648	18.3062
<u><math>10^{16}</math></u>	<u>0.787205</u>	<u>34.13005857</u>	<u>68.4432</u>	<u>18.3889</u>

**Tableau II-23** Effet du dopage  $N_{D/ZnO}$  de la couche(ZnOS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

les résultats de la simulation sont représentés par la figure II.39 Influence du dopage de la couche ZnOS sur le rendement,



**Figure II.39.** Influence du dopage de la couche ZnOS sur le rendement

On remarque qu'il y a une diminution du rendement avec l'augmentation de dopage de la couche ZnOS., les différents paramètres et caractéristiques diminuent avec la concentration du dopage.

Nous avons obtenu un rendement maximal de **18.3889%** avec un dopage de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$

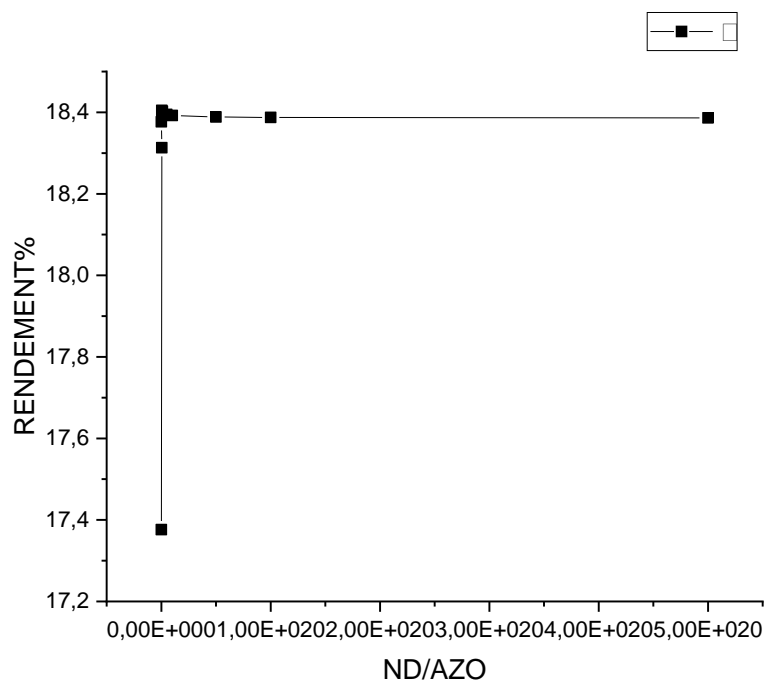
c) Effet Du Dopage De La Couche AZO Sur Les Caractéristiques Electriques De La Cellule :

Les résultats sont représentés par le **Tableau II- 124**.

Densité de dopage $N_{D/AZO}$	Voc (Volt)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
$5 \cdot 10^{20}$	0.787207	34.13873157	68.4156	18.3862
$10^{20}$	0.787208	34.13747776	68.4229	18.3875
$5 \cdot 10^{19}$	0.787208	34.13652433	68.4284	18.3885
$10^{19}$	0.787209	34.13223410	68.4512	18.3923
$5 \cdot 10^{18}$	0.787209	34.12868429	68.4681	18.3949
$10^{18}$	0.787200	34.11042351	68.5345	18.4027
<b><u><math>5 \cdot 10^{17}</math></u></b>	<b><u>0.787190</u></b>	<b><u>34.09337031</u></b>	<b><u>68.5772</u></b>	<b><u>18.4047</u></b>
$10^{17}$	0.787115	33.98612807	68.6956	18.3768
$5 \cdot 10^{16}$	0.787094	33.85731057	68.7195	18.3130
$10^{16}$	0.795124	32.94197894	66.3396	17.3763

**Tableau II-25** Effet du dopage  $N_{D/AZO}$  de la couche(AZO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base CIGS).

les résultats de la simulation sont représentés par la figure II.40 Influence du dopage de la coucheAZO sur le rendement,



**Figure II.40.** Influence du dopage de la couche AZO sur le rendement

On remarque que plus le dopage  $N_{D/AZO}$  de la couche AZO augmente plus le rendement.

Après la variation du dopage de la couche AZO, les courbes présentent deux zones différentes :

- La première zone ( $10^{16}$ - $5 \cdot 10^{19}$ ) : les rendements augmentent.
- Deuxième zone ( $5 \cdot 10^{19}$ - $5 \cdot 10^{20}$ ) : il y a une diminution du rendement avec l'augmentation de dopage.

Les différents paramètres et caractéristiques s'améliorent, Le facteur de forme augmente jusqu'à 68.7195% puis sa diminue avec la concentration du dopage.

Nous avons obtenu un rendement maximal de **18.4047%** avec un dopage de  $5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$

### 5. Interpretation

Dans ce travail, deux structure d'un dispositif de cellules solaires à hétérojonction à couche mince CIGS /CdS/ ZnO /AZO et CIGS/ ZnOS /AZO ont été modélisée numériquement à l'aide des outils logiciels SCAPS-1D. Les performances de la cellule ont été étudiées en fonction des différentes propriétés de la couche de matériau, telles que l'épaisseur et la concentration en porteurs ou le niveau de dopage.

En effet, ce travail effectué nous a permis, dans un premier lieu, de déterminer les paramètres optimaux de chacune des différentes couches constituant les deux structure solaire (CIGS /CdS/ ZnO /AZO et CIGS/ZnOS /AZO) qui procurent les meilleures performances. Cela a permis dans un deuxième temps de concevoir la version optimale de la cellule solaire.

Le rendement optimal obtenus par la simulation est récapitulé dans le tableau II.19 ci-dessous. Une amélioration du rendement est obtenue.

	CIGS		CdS		ZnO		AZO		Rendement (%)
	X <sub>CIGS</sub>	N <sub>D/CIGS</sub>	X <sub>CdS</sub>	N <sub>D/CdS</sub>	X <sub>ZnO</sub>	N <sub>D/ZnO</sub>	X <sub>AZO</sub>	N <sub>D/AZO</sub>	
<b>Cellule de référence</b>	2.5	10 <sup>15</sup>	0.050	3 10 <sup>16</sup>	0.050	10 <sup>18</sup>	0.3	10 <sup>18</sup>	16.7951
<b>Cellule optimal</b>	1.4	5 10 <sup>10</sup>	0.01	5 10 <sup>10</sup>	0.02	5 10 <sup>20</sup>	0.1	5 10 <sup>20</sup>	<b>18.2150</b>

**Tableau II-26** Le rendement optimal obtenus en fonction du dopage et les épaisseurs des couches CIGS /CdS/ ZnO /AZO

	CIGS		ZnOS		AZO		Rendement (%)
	X <sub>CIGS</sub>	N <sub>D/CIGS</sub>	X <sub>ZnOS</sub>	N <sub>D/ZnOS</sub>	X <sub>AZO</sub>	N <sub>D/AZO</sub>	
<b>Cellule de référence</b>	2.5	10 <sup>15</sup>	0.060	10 <sup>15</sup>	0.3	10 <sup>18</sup>	18.0622
<b>Cellule optimal</b>	3.8	5 10 <sup>10</sup>	0.06	10 <sup>16</sup>	0.1	5 10 <sup>17</sup>	<b>18.3971</b>

**Tableau 27** Le rendement optimal obtenus en fonction du dopage et les épaisseurs des couches CIGS /ZnOS /AZO

Nous avons conclu que les deux paramètres, le dopage et l'épaisseur, avaient un effet considérable sur l'amélioration de la conversion électrique. En effet, la variation du dopage peut influencer sur les porteurs photo-générés.

✚ Pour la première structure CIGS /CdS/ ZnO /AZO

Il est nécessaire de diminuer l'épaisseur pour avoir un rendement optimale,  $0.01\mu\text{m}$  pour la couche CdS ;  $0.02\ \mu\text{m}$  pour la couche ZnO et jusqu'à  $0.1\mu\text{m}$  pour la couche AZO. Une épaisseur de  $1.4\mu\text{m}$  de l'absorbeur CIGS assure le meilleur transport des porteurs en réduisant leurs recombinaisons au niveau du contact arrière

Nous avons pu augmenter le rendement de  $16.7951\%$  jusqu'à  **$18.2150\%$**

✚ Pour la deuxième structure CIGS /ZnOS /AZO

Il est nécessaire d'augmenter l'épaisseur de la couche CIGS jusqu'à  $3.8\ \mu\text{m}$  ; et de diminuer l'épaisseur de la couche ZnO et jusqu'à  $0.1\mu\text{m}$  pour la couche AZO.

Nous avons pu augmenter le rendement de  $18.0622\%$  jusqu'à  **$18.3971\%$**

Effectivement, cette étude permet d'optimiser les performances électriques des deux structure AZO/ZnO/CdS/CIGS et CIGS /ZnOS /AZO. Nous pouvons dire que les paramètres de chaque couche jouent un rôle primordial dans la performance du dispositif étudié puisqu'ils affectent les propriétés électriques de la jonction.

On peut conclure que la deuxième structure CIGS / ZnOS /AZO offre un rendement plus important que la première CIGS /CdS/ ZnO /AZO.

### 6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié deux cellules réalisées expérimentalement à l'IEMN de Lille en France (Hocine Yacine Abib 2019) et caractérisées mécaniquement AZO/ZnO/CdS/CIGS et CIGS /ZnOS /AZO .Nous avons étudié numériquement les paramètres électriques à l'aide du logiciel SCAPS de chaque cellule afin de les comparer. La cellule en ZnOS offre un meilleur rendement.

Nous avons étudié la performance de ces cellule par la simulation numérique.

Pour cela nous avons fait varier les épaisseurs et le dopage de chaque couche par rapport à la cellule de référence.

Pour la première cellule le rendement est passé de 16.7951 % à 18.2150%.

Pour la deuxième cellule il passe de 18.0622% à 18.3971%.

Enfinement en comparant les deux cellules une amélioration est constatée passant de **18.21%** à **18.3971%**. Nous concluons donc qu'il est préférable d'utiliser une seule couche en **ZnOS** au lieu de deux couches de **CdS et ZnO**.

## **CHAPITRE III**

**Modélisation de la permittivité diélectrique de la  
cellule solaire à base de CIGS –  
Théorie des milieux effectifs**

## 1.Introduction

L'étude des matériaux composites a débuté il y a plus d'un siècle et, depuis lors, les efforts pour développer de nouveaux produits ont été soutenus. Un engouement particulier a été porté aux matériaux utilisés dans les divers domaines et variés des micro-ondes, notamment dans les années 1970. Parmi les matériaux composites étudiés, un intérêt spécifique a été porté aux mélanges diélectriques pour les applications micro-ondes, étant donné leurs performances, qui sont souvent largement supérieures à celles des matériaux homogènes. (Wypych, 2000)

On appelle un milieu effectif lorsque la dimension des particules est réduite par rapport à la longueur d'onde, l'introduction du milieu effectif permet de comptabiliser une certaine forme d'interaction entre les particules lorsque la dimension des particules est réduite par rapport à la longueur d'onde.

La permittivité effective (constante diélectrique) des hétérostructures, exprimant la réponse du matériau diélectrique à une excitation par un champ électrique, et représentant ainsi la relation entre les propriétés macroscopiques des composites, a été décrite par de nombreuses formules analytiques et théories, connues sous le nom de "la théorie des milieux effectif ». (H. Abdesselam, 2017)

Les théories du milieu effectif définissent une fonction diélectrique effective pour un matériau composite en termes de fonction diélectrique et de ses composants et de leur disposition géométrique. (SOUHILA, 2012)

Au cours du siècle dernier, de nombreuses théories des milieux effectifs ont été proposées. Parmi eux celle de Clausius-Mossotti (Balzarini, 2011), Maxwell-Garnett (Maxwell-Garnett, 2015) et Bruggeman (Bruggeman, 1935) permettent de déterminer les caractéristiques optiques effectives des milieux nanocomposites en se fiant à la seule maîtrise des paramètres suivants (Gherras, 2004) :

- ✚ Des indices optiques des constituants (permittivité diélectrique complexe)
- ✚ De la concentration des constituants et de l'épaisseur du milieu.

Dans ce chapitre nous décrivons cette théorie, en abordant dans un premier lieux les modèles de milieu effectif, en présentant les notions de géométrie symétrique, d'hypothèse de milieu effectif.et nous exposant dans un lieu secondaire Les différents modèles, nous finalisant notre

## Chapitre III : Modélisation de la permittivité diélectrique de la cellule solaire à base de CIGS - Théorie des milieux effectifs

travaille par le calcul de la constante diélectrique de notre cellule à base de CIGS ainsi que l'indice de réfraction et l'énergie de gap en utilisant la théorie des milieux effectifs.

### 2. Théories du milieu effectif

Les théories des milieux effectifs sont des théories d'homogénéisation, permettent d'estimer les propriétés effectives (c'est-à-dire macroscopiques) d'un milieu en fonction des propriétés locales de chaque composant et d'un certain nombre d'informations sur la microstructure, comme la concentration de chaque phase (Glossary, 2020)

#### 2.1. Caractéristiques des modèles de milieu effectif

##### 2.1.1. Représentation géométrique symétrique

Pour les modèles de milieu effectif, la représentation géométrique symétrique considère le matériau comme un mélange de deux types de particules (conductrices ou isolantes) :

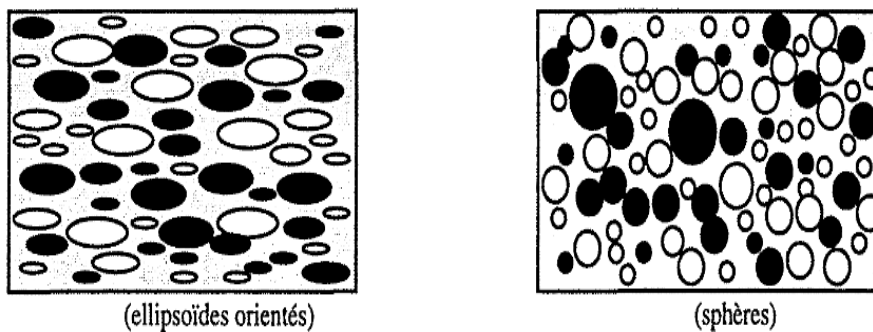


Figure III.1 géométrie symétrique

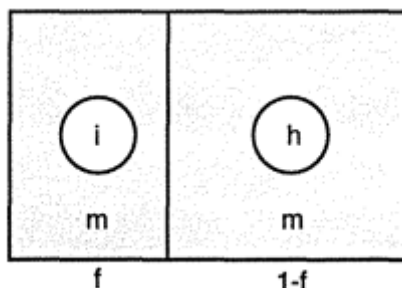
(Gherras, 2004)

##### 2.1.2. Hypothèse de milieu effectif

L'hypothèse de milieu effectif suppose que chaque particule est entourée d'un milieu de permittivité  $\epsilon_m$  (la permittivité du matériau composite). Ce voisinage des particules est le milieu effectif. Cette hypothèse signifie que chaque particule est en interaction avec toutes les autres (même avec les plus éloignées), et l'ensemble des interactions est représenté par un calcul de champ moyen. A l'inverse du calcul en milieu dilué, qui sous-estime les interactions entre particules, l'hypothèse de milieu effectif les surestime en supposant que leur portée est infinie (Gherras, 2004)

### 2.1.3. Cellule-unité

En 1984 Niklasson et Granqvist on décrit un schéma équivalent, appelé "cellule-unité" qui visualise un composite (Gherras, 2004)



**Figure III.2** Cellule-unité (modèle symétrique de Bruggeman, particules sphériques) (Gherras, 2004)

Chacune des deux phases, conductrice et isolante, possède un " poids " spécifique  $f$  et  $1-f$  dans le composite (représentation symétrique). Afin d'obtenir les équations du modèle, on considère que toutes particule est entourée par le milieu effectif (hypothèse du milieu effectif).

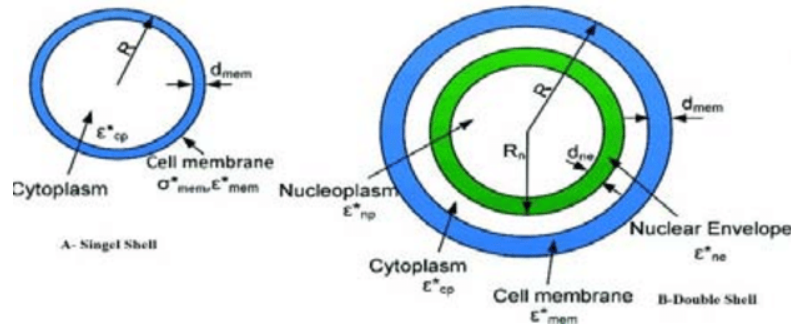
## 2.2. Equations des modèles

Les principaux modèles de milieu effectif sont :

- ❖ Modèle de Clausius-Mossotti.
- ❖ Modèle de Maxwell-Garnett.
- ❖ Modèle de Bruggeman.

### 2.2.1. Modèle de Clausius-Mossotti.

La relation Clausius-Mossotti est nommé en l'honneur du physicien italien OTTAVIANO-FABRIZIO MOSSOTTI , qui a analysé dans son livre de 1850 (Mossotti, 1850) la relation entre les constantes diélectriques de deux milieux différents. Ainsi que du physicien allemand RUDOLF CLAUSIUS, qui a explicitement décrit la formule dans son livre de 1879 (Clausius, 1858) dans le contexte non pas de constantes diélectriques mais d'indices de réfraction.



**Figure III-3** Modèles à simple et double coque Le facteur de Clausius-Mossotti (facteur CM) de la coque simple (Clausius-Mossotti, 2018)

### 2.2.1.1. Equation de Clausius-Mossotti

La formule de Clausius-Mossotti est une corrélation entre la polarisabilité microscopique  $\alpha$  d'un milieu diélectrique et sa constante diélectrique macroscopique  $\epsilon_r$  (Clausius-Mossotti, 2019)

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{1}{3\epsilon_0} N\alpha \quad \text{Équation III-5}$$

D'où :

$N$  est une densité (nombre de particules polarisables par unité de volume)

$\epsilon_0$  est la permittivité du vide

### 2.2.2. Modèle de Maxwell-Garnett.

En 1904, Maxwell Garnett a développé une théorie d'homogénéisation à la fois simple et très aboutie (J. C. M. Garnett et J. Larmor, 1904), En tant que théorie de ce type, elle vise à rapprocher un milieu électromagnétique complexe, d'un milieu effectif homogène. La Formule de mélange de Maxwell Garnett fournit la permittivité de ce milieu effectif en conditions de permittivités et de fractions volumiques des constituants individuels du milieu complexe. (Markel, 2016)

Cette théorie est basée sur les hypothèses suivantes :

- ✚ Les inclusions sont de formes sphériques
- ✚ Les sphères sont assez écartées les unes des autres afin que les interactions entre leurs moments dipolaires soient négligées.

✚ La superficie des sphères est inférieure à la longueur d'onde du rayonnement excitateur.

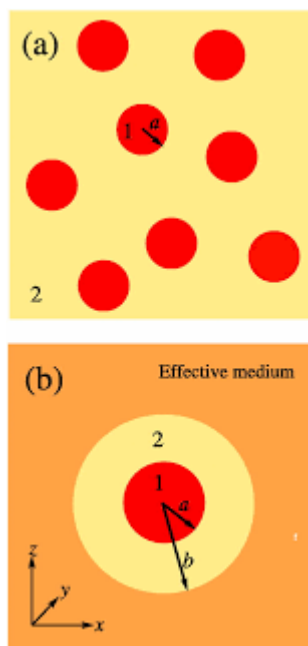


Figure III.4 Modèle de Maxwell-Garnett (Maxwell-Garnett, 2015)

### 2.2.2.1. Equation de Maxwell-Garnett.

En substituant dans les équations de Maxwell, et En posant  $f = \frac{4}{3} N\pi r^3$ , fraction volumique des sphères on obtient L'équation qui est l'écriture la plus rencontrée dans la littérature de la formule de Maxwell Garnett pour des inclusions sphériques (Gherras, 2004)

$$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - 1}{\epsilon_{\text{eff}} + 2} = f_1 \left( \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + 2} \right) + f_2 \left( \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2 + 2} \right) \quad \text{Équation III-6}$$

D'ou :

$f$  : est la fraction volumique

$\epsilon_1, \epsilon_2$  : sont les permittivités des particules.

2.2.3. Modèle de Bruggeman.

Introduite pour la première fois par Van Der Walls en 1873 sur l'équation des fluides simples puis généralisée et unifiée par Landau en 1937, elle a été utilisée par Weiss pour expliquer le ferromagnétisme et par Bruggeman en 1935 pour calculer la constante diélectrique effective des milieux hétérogènes (Gherras, 2004)

Bruggeman a estimé dans son modèle qu'une particule dans l'armature interagit avec toutes les autres particules du milieu sans tenir compte de la distance qui les sépare (Kader, 2020)

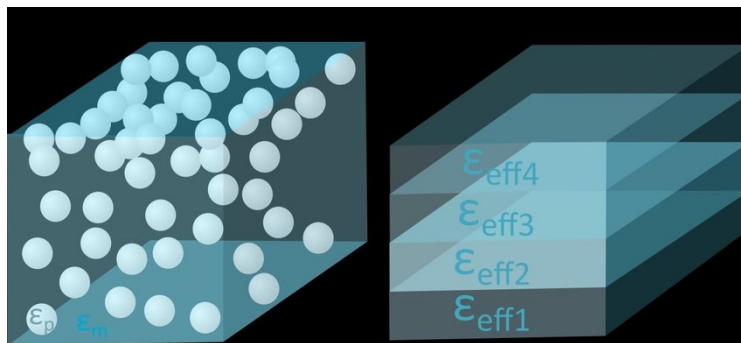


Figure III.4 Modèle de Bruggeman appliqué à un gradient d'inclusion (Maudet, 2018)

2.2.3.1. Equation de Modèle de Bruggeman.

La présence de pores sur la constante diélectrique du matériau a prouvé que, dans le cas où la constante diélectrique des pores ( $k_p$ ) est plus basse que celle du matériau ( $k_M$ ), le modèle de Maxwell-Garnett peut être appliqué selon l'équation suivante (SOUHILA, 2012):

$$\frac{K_{eff} - K_M}{K_{eff} + 2K_M} = f \frac{K_P - K_M}{K_P + 2K_M} \quad \text{Equation III-7}$$

D'où :

Pet  $k_p$  représentent un pore et sa constante diélectrique.

M et  $k_M$  est le matériau et sa constante diélectrique.

$k_{eff}$  est la constante diélectrique effective du matériau poreux.

$f$  le taux de porosité introduite.

### 3. Permittivité diélectrique

Dans les matériaux purement diélectriques, un champ électrique extérieur polarise les porteurs de charges liées qui subissent un léger déplacement par rapport à leur position d'équilibre : toutes les charges positives se déplacent vers la direction conforme à celle du champ, et les charges négatives dans la direction opposée, ce qui crée une polarisation du diélectrique. La conduction électrique est donc négligeable, mais la densité des dipôles qui s'alignent sur le champ électrique extérieur peut être significative (H. Abdesselam, 2017)

La permittivité effective (ou constante diélectrique macroscopique) peut servir à décrire des milieux qui restent homogènes tant que les effets de dispersion sont insignifiants lorsque les ondes radio pénètrent le matériau. (ORLOWSKA, 2003)

La permittivité effective d'un composite est une fonction très complexe qui dépend des permittivités de ses constituants, de leurs fractions volumiques, et de la forme des inclusions. Pour un mélange à structure unique et périodique, la permittivité effective peut être évaluée analytiquement par des lois dites de mélange. (H. Abdesselam, 2017) (D. K. Hale, 1976)

### 4. Loi des mélange

Les physiciens spécialisés dans l'étude des matériaux composites chargés visent à établir, à partir des équations générales de l'électromagnétisme définissant les interactions onde-matière, la fonction qui représente le mieux le comportement réel de la permittivité totale du matériau. Ce dernier a suscité de nombreuses recherches depuis le début du siècle et le concept de lois de mélange a été acquis par la communauté scientifique pour désigner l'ensemble des lois qui modélisent la permittivité des matériaux hétérogènes dans l'approximation quasi-statique en supposant que les phénomènes de diffusion des ondes par les inclusions sont négligeables. (H. Abdesselam, 2017)

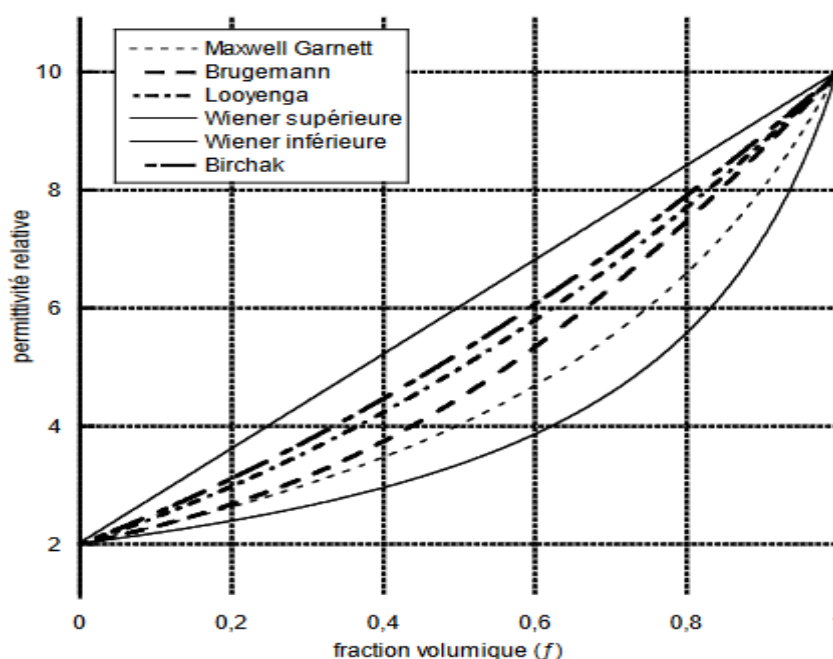
La Loi des mélanges se décline en plusieurs modèles :

- Loi de mélange de Maxwell-Garnett.
- Loi de mélange de Bruggeman.
- Loi de mélange de Bottcher.
- Loi de mélange de mélange exponentielles.
- Loi de mélange de Birchak.
- Loi de mélange de Looyenga.

### Chapitre III : Modélisation de la permittivité diélectrique de la cellule solaire à base de CIGS - Théorie des milieux effectifs

- Loi de mélange de Wiener.
- Loi de mélange de Lichtenecker-Rother.
- Loi de mélange de Kim.

Ces formules et d'autres ont été proposées dans le vingtième siècle pour calculer la permittivité effective. Toutefois, les résultats obtenus par les diverses formules, pour le même support de modèle, ne concordent pas toujours parfaitement. Ils diffèrent en fonction des équations employées. Cependant, toutes les prévisions issues des différentes approches peuvent être incluses par une région sous la forme d'un prisme. Ceci a été proposé par Bergman, Stroud et Milton. (H. Abdesselam, 2017)



**Figure III.5** Valeurs des permittivités effectives d'un milieu composite constitué de deux matériaux. (H. Abdesselam, 2017)

## 5. Calcul de la constante diélectrique avec la théorie des milieux effectif

### 5.1. Structure de la cellule à étudier MO/CIGS/CdS/ZnO/AZO

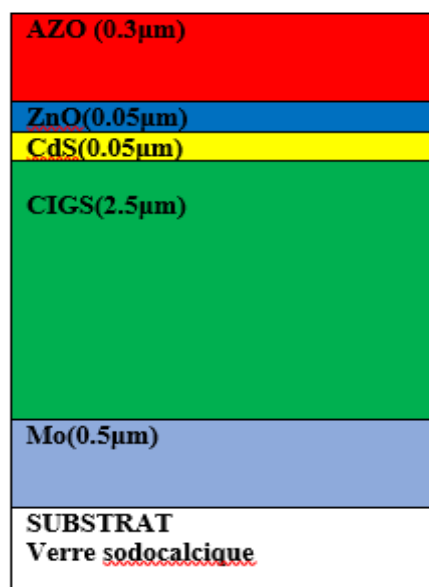


Figure III.6 cellule à base de CIGS standard

Toute fonction diélectrique effective en fonction diélectrique effective d'un composite constitué de deux composants avec des fonctions diélectriques  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  peut être exprimée comme suit {**théorie des milieux effectif**} (ORLOWSKA, 2003): (Modèle parallèle équation III.4 et modèle série, équation III.5.

$$\epsilon = (1 - p)\epsilon_1 + f\epsilon_2 \quad \text{ÉQUATION III-8}$$

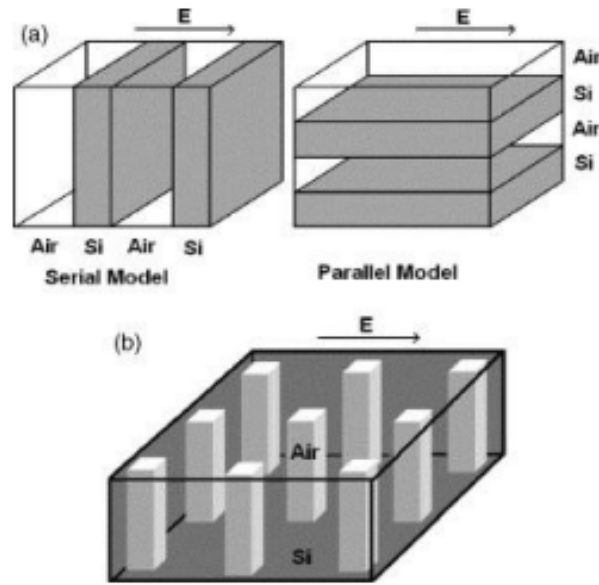
$$\frac{1}{\epsilon} = \frac{1-f}{\epsilon_1} + \frac{f}{\epsilon_2} \quad \text{EQUATION III-9}$$

Avec :

f : la fraction volumique

$\epsilon$  : la constante diélectrique

La Figure III-52 représente (a) Modèles série et parallèle du Silicium poreux constitué de vide et de silicium et (b) modèle série-parallèle (SOUHILA, 2012)



**Figure III.7(a)** Modèles série et parallèle du SiP constitué de vide et de silicium et (b) modèle série-parallèle (SOUHILA, 2012)

Pour calculer la permittivité diélectrique de la cellule **MO/CIGS/CdS/ZnO/AZO** nous nous basons sur les paramètres obtenus dans SCAPS du chapitre précédent comme représenté sur le **Tableau III-28**. La constante diélectrique de la couche Mo est liée à l'indice de réfraction  $n$  du milieu par la relation de l'équation III.6 suivante

$$n = \sqrt{\epsilon} \quad \text{EQUATION III-10}$$

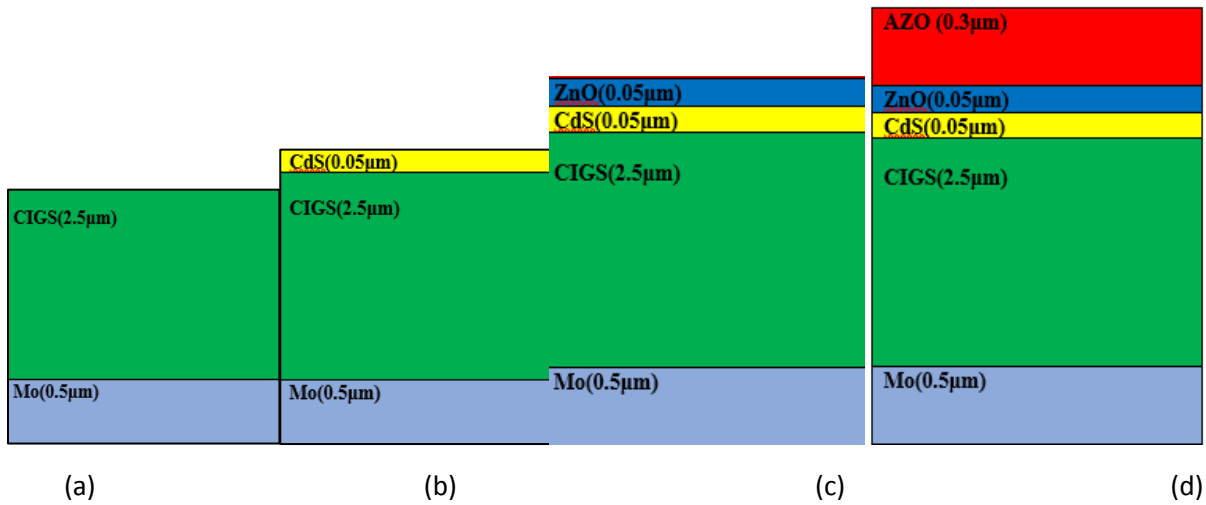
L'indice de réfraction est donné par  $n_{MO} = 3.70009$  (filmetrics, 2022), la valeur trouvée est donc  $\epsilon_{MO} = 13,7$

Matériaux	Mo	CIGS	CdS	ZnO	AZO
Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	0,5	2,5	0,05	0,05	0,3
Permittivité diélectrique $\epsilon$	13,7 (calculé)	10	9	9	9

**Tableau III.1** Constante diélectrique de chaque couche [SCAPS]

## 5.2. Calcul de la constante diélectrique de la cellule étudiée, modèle série.

Nous allons calculer la constante diélectrique de la cellule étape par étape comme représenté sur le schéma de la Figure III-10



**Figure III-8.** Représentation des différentes étapes de calcul de la permittivité diélectrique de la cellule solaire en CIGS

### 5.2.1. Calcul de la constante diélectrique du composite MO/CIGS

Nous utilisant le modèle série, dont l'équation est énoncée ci-dessous (ORLOWSKA, 2003) :

$$\frac{1}{\epsilon} = \frac{1-f}{\epsilon_1} + \frac{f}{\epsilon_2} \quad \text{Equation III-11}$$

Ainsi, la formule permettant d'obtenir le constant diélectrique effective est définie comme suit (ORLOWSKA, 2003) :

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{(1-f)\epsilon_2 + \epsilon_2 f} \quad \text{Équation III-12}$$

La fraction volumique des inclusions sphériques est obtenue grâce à la relation ci-dessous (ORLOWSKA, 2003):

$$f = \frac{v_i}{v_0} \quad \text{EQUATION III-13}$$

f La fraction volumique.

$V_0$  Le volume d'une maille élémentaire.

$V_i$  Le volume d'une maille incluse.

La fraction volumique  $f$  est donnée par l'équation III.10 suivante

$$f = \frac{S \cdot h}{S \cdot h_0} \quad \text{Equation III-10}$$

Notre relation sera  $\epsilon' = \frac{10,13,7}{(1-0,17)13,7+10,0,17}$  Avec  $S=1\text{cm}^2$ , d'où  $f = \frac{0,5}{3}$  ce qui donne  $f=0,17$  et

On aura comme résultat  $\epsilon' = 10,48$ , la permittivité diélectrique du modèle (a), CIGS/Mo qu'on appellera Substrat1.

Le même raisonnement est appliqué pour tous les modèles, modèle (b) composé de Substrat1/CdS ou bien Substrat2, modèle(c) composé de Substrat 2/ZnO appelé substrat3 et modèle(c) composé de Substrat3/AZO comme représenté sur le schéma de la Figure III.2.

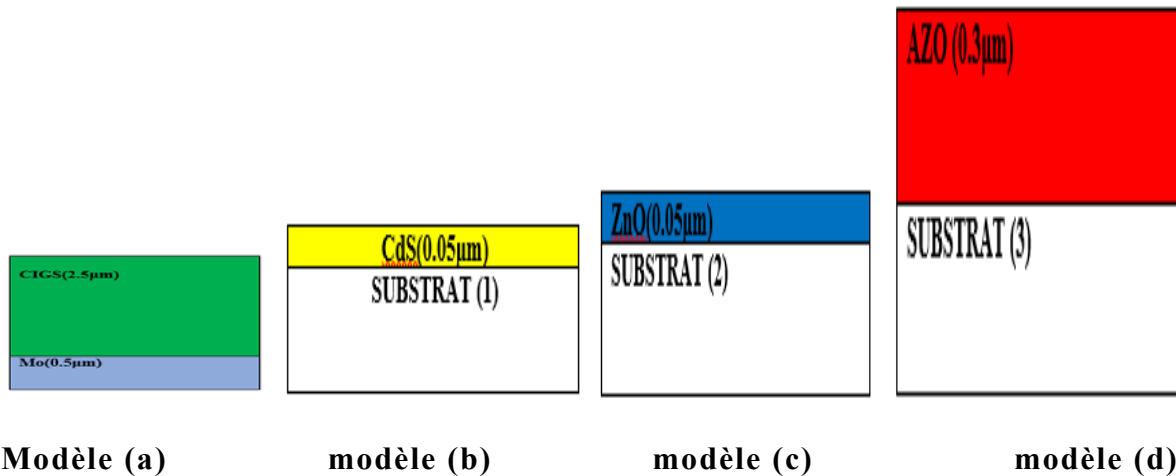


Figure III.9. Représentation schématique des différents modèles étudiés

### 5.2.2. Calcul de la Constante diélectrique du composite modèle(b), Substrat1/CdS

L'équation III.8 et III.9 nous permettent de calculer  $\epsilon''$  la permittivité diélectrique

Substrat1/CdS qui sera donne par  $\epsilon'' = \frac{\epsilon' \epsilon_{CdS}}{(1-f)\epsilon_{CdS} + \epsilon' f}$ , Avec  $f = \frac{0,05}{3,05}$ ,  $f = 0,02$ ,

$$\epsilon'' = \frac{9,10,48}{(1-0,02)9+10,48 \cdot 0,02} \quad \text{qui sera égale à } \epsilon'' = 10,45$$

### 5.2.3. Calcul de la constante diélectrique du composite Substrat2/Zn0

**Chapitre III : Modélisation de la permittivité diélectrique de la cellule solaire à base de CIGS - Théorie des milieux effectifs**

L'équation III.8 et III.9 nous permettent de calculer  $\epsilon'''$  la permittivité diélectrique

Substrat2/ZnO qui sera donné par  $\epsilon''' = \frac{\epsilon''\epsilon_{ZnO}}{(1-f)\epsilon_{ZnO} + \epsilon''f}$ , Avec  $f = \frac{0,05}{3,1}$ ,

$$f = 0,02, \epsilon''' = \frac{9,10,45}{(1-0,02)9 + 10,45 \cdot 0,02} \text{ qui sera donc égale à } \epsilon''' = 10,42$$

**5.2.4. Calcule De La Constante Diélectrique Du Composite Substrat3/AZO**

L'équation III.8 et III.9 nous permettent de calculer  $\epsilon'''$  la permittivité diélectrique

Substrat3/AZO qui sera donné par  $\epsilon''' = \frac{\epsilon'''\epsilon_{AZO}}{(1-f)\epsilon_{AZO} + \epsilon'''f}$  Avec  $f = \frac{0,3}{3,4}$ ,  $f = 0,09$ ,

$$\epsilon''' = \frac{10,42 \cdot 9}{(1-0,09)9 + 10,42 \cdot 0,09}, \epsilon''' = 9,41.$$

La constante diélectrique de notre cellule étudiée **MO/CIGS/CdS/ZnO/AZO** est finalement égale à  $\epsilon''' = 9,41$ .

**5.3. Calcul de la constante diélectrique de la cellule étudiée, modèle parallèle**

Le calcul de la constante diélectrique du modèle parallèle de la cellule est établi étape par étape comme représenté sur le schéma de la Figure III-10 en utilisant l'équation III.4. Le tableau récapitulatif Tableau III.2 regroupe les résultats obtenus pour les deux modèles.

modèle	(a)	(b)	(c)	(d)
<i>Eserie</i>	10,48	10,45	10,42	9,41
$\epsilon = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{(1-f)\epsilon_2 + \epsilon_2 f}$				
<i>ε//</i>	13.071	9.0296	9.029	9.1278
$\epsilon = (1-f)\epsilon_1 + f \epsilon_2$				

**Tableau III.2** Résultats obtenus pour les modèles série et parallèle.

**5.4.Effet de l'épaisseur  $x_{CIGS}$  de la couche(CIGS) sur la constante diélectrique**

Pour y parvenir, nous avons utilisé le même raisonnement que précédemment, en faisant varier l'épaisseur de la couche de CIGS en allant de 0,2 $\mu$ m jusqu'à 3,8 $\mu$ m. les Tableaux III.3 et III.4 regroupe tous les résultats obtenus des deux modèles.

**Chapitre III : Modélisation de la permittivité diélectrique de la cellule solaire à base de CIGS - Théorie des milieux effectifs**

$x_{\text{CIGS}}(\mu\text{m})$	(a)	(b)	(c)	(d)
0.2	11.74	11.5	11.29	10.29
0.6	11.38	11.24	11.13	10.51
1	10.98	10.91	10.84	10.43
1.4	10.75	10.69	10.64	10.36
1.8	10.64	10.60	10.56	10.33
2.2	10.54	10.51	10.48	10.29
2.6	10.45	10.42	10.39	10.25
3	10.39	10.36	10.33	10.22
3.4	10.36	10.34	10.32	10.22
3.8	10.33	10.31	10.29	9.21

**Tableau III.29** Effet de l'épaisseur  $x_{\text{CIGS}}$  de la couche(CIGS) sur la constante diélectrique(modèle série)

$x_{\text{CIGS}}(\mu\text{m})$	(a)	(b)	(c)	(d)
0.2	11,073	9,147	9,009	9,003
0.6	12,035	9,136	9,006	9,002
1	12,479	9,115	9,004	9,0008
1.4	12,738	9,097	9,003	9,0005
1.8	12,886	9,082	9,002	9,0003
2.2	12,997	9,072	9,001	9,0001
2.6	13,108	9,066	9,001	9,00009
3	13,182	9,059	9,0008	9,00006
3.4	13,219	9,055	9,0007	9,00005
3.8	13,256	9,051	9,0006	9,00004

**Tableau III.30.** Effet de l'épaisseur  $x_{\text{CIGS}}$  de la couche(CIGS) sur la constante diélectrique(modèle parallèle)

### Chapitre III : Modélisation de la permittivité diélectrique de la cellule solaire à base de CIGS - Théorie des milieux effectifs

On remarque que la constante diélectrique diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CIGS pour les deux modèles.

#### 5. 5. Calcul de l'indice de réfraction de la cellule MO/CIGS/CdS/ZnO/AZO Etudiée

L'indice de réfraction est une quantité adimensionnelle caractéristique d'un milieu qui permet de décrire le phénomène de la lumière dans celui-ci, il varie en fonction de la longueur d'onde de mesure et également des caractéristiques du milieu (en particulier la pression et la température). On désigne parfois l'indice de réfraction par le terme de "constante optique" d'un matériau (Wikipédia, 2022) . Sachant que l'indice de réfraction  $n$  du milieu est liée à la constante diélectrique par la relation de l'équation III.6 ; nous pouvons déduire les indices de réfraction de la cellule pour le modèle série et parallèle.

L'énergie du gap est facilement calculée par le relation  $E_g = (n - \alpha) / \beta$  avec  $\alpha = 4.048$ ,  $\beta = -0.62$ . Le **Tableau III.5**. Regroupe les résultats obtenus.

Le tableau III.5 résume les indices de réfraction ainsi que l'énergie de gap obtenus pour la cellule.

modèle	(d)
$n_{serie} = \sqrt{\epsilon}$	3.07
$E_g = (n - \alpha) / \beta$ $\alpha = 4.048, \beta = -0.62$	1,577
$n_{//}$	3.02
$E_g$	1,658

**Tableau III.5.** Indice de réfraction et énergie du Gap de la cellule MO/CIGS/CdS/ZnO/AZO

➤ Effet de l'épaisseur  $x_{\text{CIGS}}$  de la couche(CIGS) sur l'indice de réfraction et l'énergie du Gap:

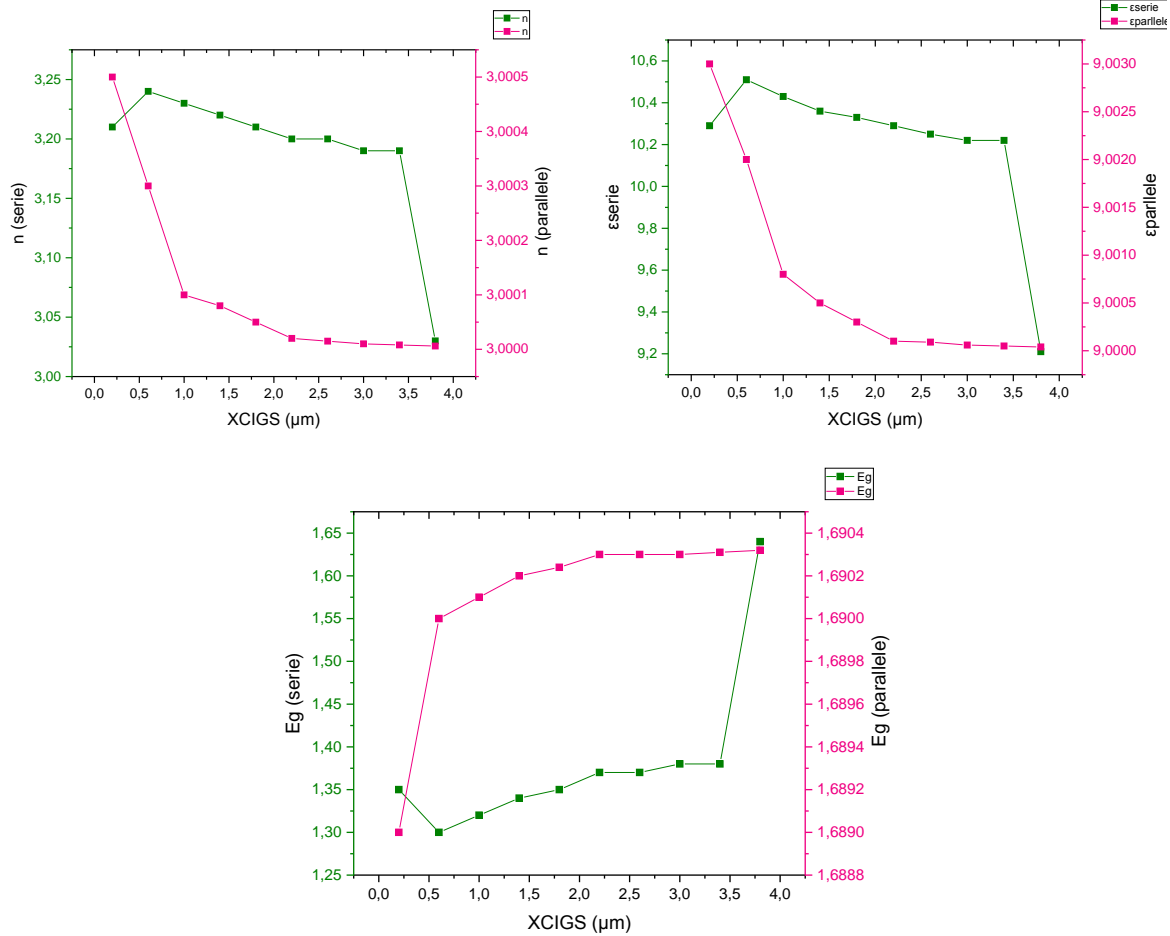
$x_{\text{CIGS}}(\mu\text{m})$	(d)	$n_{\text{serie}}$	$E_g$
0.2	10.29	3,21	1,35
0.6	10.51	3,24	1,30
1	10.43	3,23	1,32
1.4	10.36	3,22	1,34
1.8	10.33	3,21	1,35
2.2	10.29	3,20	1,37
2.6	10.25	3,20	1,37
3	10.22	3,19	1,38
3.4	10.22	3,19	1,38
3.8	9.21	3,03	1,64

TABLEAU III.6 EFFET DE L'ÉPAISSEUR  $x_{\text{CIGS}}$  DE LA COUCHE(CIGS) SUR LA CONSTANTE DIELECTRIQUE, L'INDICE DE REFRACTION ET L'ÉNERGIE DU GAP (MODELE SERIE)

$x_{\text{CIGS}}(\mu\text{m})$	(d)	$n_{\text{parallele}}$	$E_g$
0.2	9,003	3,0005	1,689
0.6	9,002	3,0003	1,690
1	9,0008	3,0001	1,6901
1.4	9,0005	3,00008	1,6902
1.8	9,0003	3,00005	1,69024
2.2	9,0001	3,00002	1,6903
2.6	9,00009	3,000015	1,6903
3	9,00006	3,00001	1,6903
3.4	9,00005	3,000008	1,69031
3.8	9,00004	3,000006	1,69032

TABLEAU III.7 EFFET DE L'ÉPAISSEUR  $x_{\text{CIGS}}$  DE LA COUCHE(CIGS) SUR LA CONSTANTE DIELECTRIQUE, L'INDICE DE REFRACTION ET L'ÉNERGIE DU GAP (MODELE PARALLELE)

## Chapitre III : Modélisation de la permittivité diélectrique de la cellule solaire à base de CIGS - Théorie des milieux effectifs



**Figure III.10** Variation la constante diélectrique et l'indice de réfraction et l'énergie du Gap avec l'épaisseur  $x_{CIGS}$  des deux modèles.

On remarque que plus l'épaisseur de la couche de CIGS augmente plus la constante diélectrique et l'indice de réfraction diminue, tandis que l'énergie du Gap augmente pour les deux modèles.

### 6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons tenté de calculer les paramètres électriques de nos cellules à base de CIGS que nous avons étudié précédemment. Pour cela nous avons fait un rappel sur différents modèles de la théorie des milieux effectifs qui est une quantité effective statique attribuable à des environnements hétérogènes et qui peut être qualifiée comme homogène à l'échelle de la longueur.

La loi des mélanges nous a permis de considérer une cellule solaire comme un matériau homogène rempli d'inclusions. Ces inclusions sont représentées par les différentes couches de Mo, CIGS, CdS, ZnO puis AZO. Nous avons utilisé cette loi pour définir la permittivité

### Chapitre III : Modélisation de la permittivité diélectrique de la cellule solaire à base de CIGS - Théorie des milieux effectifs

diélectrique effective complexe à deux phases de notre cellule à base de CIGS. Nous avons aussi déduit l'indice de réfraction et l'énergie de gap.

Nous avons étudié la variation de l'épaisseur de la couche de CIGS en fonction de l'indice de réfraction et l'énergie du Gap avec l'épaisseur  $x_{\text{CIGS}}$  des deux modèles. On a vu que plus l'épaisseur de la couche de CIGS augmente plus la constante diélectrique et l'indice de réfraction diminue, tandis que l'énergie du Gap augmente pour les deux modèles.

***CONCLUSION GENERALE***

## Conclusion Générale

---

Dans ce travail nous avons vu que l'énergie solaire est l'un des types les plus significatifs de sources d'énergie durables et renouvelables qui ont été utilisées dans le monde. Le photovoltaïque (PV) est connue comme la conversion directe de la lumière du soleil en énergie électrique à l'aide de cellules solaires.

Nous nous sommes basé sur les cellules solaires à couche mince plus précisément les cellules à base de CIGS ayant une production moins coûteuse et une rentabilité plus importante.

Nous avons étudié deux cellules réalisées expérimentalement à l'IEMN de Lille en France (Hocine Yacine Abib 2019) et caractérisées mécaniquement AZO/ZnO/CdS/CIGS et CIGS /ZnOS /AZO . Nous avons étudié numériquement les paramètres électriques à l'aide du logiciel SCAPS de chaque cellule afin de les comparer. La cellule en ZnOS offre un meilleur rendement.

Nous avons étudié les performances de la cellule en fonction des différentes propriétés de la couche de matériau, telles que l'épaisseur et le niveau de dopage par la simulation numérique.

Effectivement, cette étude permet d'optimiser les performances électriques des deux structures AZO/ZnO/CdS/CIGS et CIGS /ZnOS /AZO. Nous pouvons dire qu'il est préférable d'utiliser une seule couche en **ZnOS** au lieu de deux couches de **CdS** et **ZnO**.

Pour conclure, nous avons étudié la théorie des milieux effectifs, qui est une quantité effective statique attribuable aux milieux hétérogènes et pouvant être décrite comme homogène à l'échelle de longueur, et ses différents modèles.

La loi des mélanges ainsi que celle des différents modèles ont été mises en évidence. Cette loi nous a permis de considérer une cellule solaire comme un matériau homogène rempli d'inclusions. Ces inclusions sont représentées par les différentes couches de Mo, CIGS, CdS, ZnO puis AZO. Nous avons utilisé cette loi pour définir la permittivité diélectrique effective

## **Conclusion Générale**

---

complexe à deux phases de notre cellule à base de CIGS. Nous avons aussi déduit l'indice de réfraction et l'énergie de gap.

## ***REFERENCES***

- A von Hippel. 1950.** Ferroelectricity, Domain Structure, and Phase Transitions of Barium Titanate. s.l. : Rev. Mod. Phys, 1950. Vol. 22, p. 221-237. doi: 10.1103/RevModPhys.22.221..
- ABROUGUI, M & al. 2019.** les différentes générations technologiques des cellules photovoltaïques. 2019.
- Adobe. 2022.** Les cellules photovoltaïques. s.l. : M. Colonna d'Istria/CEA, 2022.
- al., K. Emery et. 1996.** Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems. Washington, DC, USA : IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1996. p. 1275-1278. . doi: 10.1109/PVSC.1996.564365..
- al., S. Niki et. 2010.** CIGS absorbers and processes . s.l. : Prog. Photovolt. Res, 2010. Vol. 18, p. 453-466. doi: 10.1002/pip.969..
- Ali, ABDERRAHIM. 2021.** Contribution à l'étude des cellules solaires à base de matériaux Pérovskites. 2021.
- Benadla, Nadjat. 2020.** Etude comparative de différentes cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités. s.l. : thèse de Doctorat, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2020.
- D. Chambonnet, R. Gauthier, R. M'Ghaieth, et P. Pinard,. 1987.** Le ruban de silicium E.P.R.: élaboration et mise au point d'un dispositif d'analyse des contraintes résiduelles . 1987. Vol. 22, 7. doi: 10.1051/rphysap:019870.
- Ferrand, Bernard. 2003.** La méthode de tirage de Czochralski. 2003.
- Foley, Aoife. 2022.** *Renewable & Sustainable Energy Reviews* . s.l. : Journal - Elsevier, 2022. Vol. 167.
- H. Keppner, J. Meier, P. Torres, D. Fischer, et A. Shah,. 1999.** Microcrystalline Silicon and Micromorph Tandem Solar Cells . s.l. : Phys. Mater. Sci. Process, 1999. Vol. 69. doi: 10.1007/s003390050987..
- HOUÉE, Patrick. 2011.** Une installation photovoltaïque en site isolé. 2011.
- Jean-Claude. 2006.** Nouvelles technologies de l'énergie. Paris : Hermès science publications-Lavoisier, 2006.
- Jouad, Zouhair El. 2016.** Réalisation et caractérisation des cellules. 2016.
- Kurtz, Frank Dimroth et Sarah. 2011.** High-Efficiency Multijunction Solar Cells. s.l. : Cambridge University Press, 2011.

- M. Chegaar, A. Hamzaoui, A. Namoda, P. Petit, M. Aillerie, et A. Herguth. 2013.** Effect of Illumination Intensity on Solar Cells Parameters. s.l. : Energy Procedia, 2013. Vol. 36, p. 722-729. doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.084..
- M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, et N. Ekins-Daukes. 2005.** Multi-junction III–V solar cells: current status and future potential. s.l. : Sol. Energy, 2005. Vol. 79, 78-85. doi: 10.1016/j.solener.2004.09.018..
- Mahammedi, Abdellatif. 2020.** Contribution to the control of a Power Converter with Improved Topologies Associated with a Photovoltaic Generator Based on Advanced Techniques. 2020.
- Meriem, Djedid. 2019.** Etude expérimentale de l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement d'une cellule PV. 2019.
- Mohammadnoor Imamzai, Mohammadreza Aghaei , Yasmin Hanum Md Thayoob , Mohammadreza Forouzanfar. 2012.** A Review on Comparison between Traditional Silicon Solar Cells and Thin-Film CdTe Solar Cells. Universiti Tenaga Nasional, Putrajaya Campus : s.n., 2012.
- Pabitra.K. Nayak, Suhas Mahesh, Henry J. Snaith, David Cahen. 2019.** Photovoltaic Solar Cell Technologies: Bounds and Challenges. 2019.
- Quentin Manguit, Futura. 2015.** CIGS : une cellule photovoltaïque. 2015.
- S. Banerjee, T. Sarnet, P. Siozos, M. Loulakis, D. Anglos, et M. Sentis. 2017.** Characterization of Organic Photovoltaic Devices Using Femtosecond Laser Induced Breakdown Spectroscopy . s.l. : Appl. Surf. Sci., 2017. Vol. 418, 542-54. doi: 10.1016/j.apsusc..
- S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, Arvind, S. P. Nehra, et M. S. Dhaka,. 2015.** A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature . s.l. : Energy Rep., 2015. Vol. 1, p. 104-109,. doi: 10.1016/j.egypr.2015.03.004..
- Fell, Andreas, et al. 2014.** Parameters for the Simulation of Silicon Solar Cells. s.l. : IEEE, 2014.
- J. Husna, P. Menon, P. Chelvanathan, M. Mohamed, S. Tripathy, et T. Lenka, Chalcogenide Lett. 2021.** Numerical study of semi-transparent thin film heterojunction p-CuO/n- ZnO/AZO/ITO solar cells device model using SCAPS-1D. 2021. Vol. 8, 667 679.
- M. Burgelman, P. Nollet, et S. Degrave. 2000.** Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid Films. 2000. Vols. 361 362, 527 532. doi: 10.1016/S0040-6090(99)00825-1.

**Marc Burgelman Koen Decock, Alex Niemegeers, Johan Verschraegen, Stefaan Degrave. 2021.** SCAPS manual. Belgium: s.n., 2021.

**Balzarini, P. Palffy-Muhoray et D. 2011.** The Clausius-Mossotti relation for anisotropic molecular fluids. s.l. : Can. J. Phys., 2011. Vol. vol. 59, p. 375-377. doi: 10.1139/p81-048..

**Bruggeman, D.A.G. 1935.** Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. *Annalen der Physik*,. s.l. : Scientific Research Publishing, 1935. Vol. 416, 636-664.

**Clausius, R. 1858.** Die Mechanische Behandlung der Elektrizität, Vieweg, Braunschweig,. 1858. Vol. 62.

**Clausius-Mossotti. 2018.** A Single and double shell models The Clausius-Mossotti factor . s.l. : Download Scientific Diagram, 2018.

**Formule de Clausius-Mossotti** . s.l. : Wikipédia, 2019.

**D. K. Hale, J. Mater. Sci. 1976.** The physical properties of composite materials. 1976. Vol. 11, 2105-214. doi: 10.1007/BF02403361..

**filmetrics. 2022.** Indice de réfraction du Mo, Molybdène pour la mesure de l'épaisseur des couches minces. 2022.

**Gherras, Nassiba. 2004.** ÉTUDE THÉORIQUE DES PROPRIÉTÉS OPTIQUES D'UN MILIEU COMPOSITE DIÉLECTRIQUE MÉTAL. 2004.**Glossary, the. 2020.** Théories des milieux effectifs. 2020.

**H. Abdesselam, B. Mohamed, B. Nacerdine, B. Nacerdine, A. Salih, et K. Djamel. 2017.** Modélisation et Simulation Numérique de Mélanges de Matériaux Diélectriques binaire et ternaire. 2017. Vol. 146.

**J. C. M. Garnett et J. Larmor. 1904.** XII. Colours in metal glasses and in metallic films. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Contain. Pap. Math. Phys. Character.* 1904. Vol. 203, 385-420. doi: 10.1098/rsta.1904.0024..

**Kader, A. 2020.** Caractérisation et modélisation électromagnétique de multimatériaux composites: application aux structures automobiles. 2020. Vol. 198.

**Markel, Vadim A. 2016.** Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial . 2016. doi.org/10.1364/JOSAA.33.001244.

**Maudet, Florian. 2018.** Couches nanostructurées par dépôt en incidence oblique : corrélations microstructure et propriétés optiques pour application aux traitements antireflets hautes performances dans le visible étendu et l'infrarouge. 2018.

**Maxwell-Garnett. 2015.** Maxwell-Garnett effective medium theory: Quantum nonlocal effects. s.l. : Physics of Plasmas, 2015. Vol. Vol 22, No 4. doi10.10631.4917252.

**Mossotti, O.F. 1850.** Memorie di Matematica e di Fisica della Società Italiana delle Scienze Residente in Modena . 1850. Vol. 49–74.

**ORLOWSKA, Sabina. 2003.** Conception et prediction des caracteristiques dielectriques des materiaux composites a deux et trois phases par la modelisation et la validation experimentale. LYON : s.n., 2003.

**FAKIRI SOUHILA, 2012.** Modélisation de la Permittivité Diélectrique du Silicium poreux Oxydé et Non Oxydé, mémoire de l'université de tTemcen, 2012.

**Wikipédia. 2022.** Indice de réfraction . 2022.

**Wypych, George. 2000.** *HANDBOOK OF FILLERS 2nd Edition.* s.l. : ChemTec Publishing, Toronto, 2000.

## Résumé :

L'énergie solaire est l'un des types les plus significatifs de sources d'énergie durables et renouvelables qui ont été utilisées dans le monde. Elle est convertie en chaleur grâce à l'utilisation des capteurs thermiques, en chaleur puis en électricité au moyen de concentrateurs solaires accompagnés d'un alternateur, soit en électricité grâce aux cellules solaires photovoltaïques.

L'objectif de ce travail est de :

- Modélisation numérique de deux structures d'un dispositif de cellules solaires à hétérojonction à couche mince CIGS /CdS/ ZnO /AZO et CIGS/ ZnOS /AZO à l'aide des outils logiciels SCAPS-1D.
- Etude de la théorie du milieu effectif.
- Définition de la permittivité diélectrique effective complexe à deux phases de notre cellule à base de CIGS par la loi des mélanges.

**Mots clés :** cellules solaires photovoltaïques, SCAPS-1D, modèle, optique, thermique.

## Abstract:

Solar energy is one of the most significant types of sustainable and renewable energy sources that have been used in the world. It is converted into heat through the use of thermal collectors, into heat and then into electricity by means of solar concentrators accompanied by an alternator, or into electricity through photovoltaic solar cells.

The objective of this work is to:

- Numerical modelling of two thin film heterojunction solar cell device structures CIGS /CdS/ ZnO /AZO and CIGS/ ZnOS /AZO using the SCAPS-1D software tools.
- Study of the effective medium theory.
- Definition of the complex two-phase effective dielectric permittivity of our CIGS-based cell by the law of mixtures.

**Keywords:** photovoltaic solar cells, SCAPS-1D, model, optical, thermal.

## المخلص:

الطاقة الشمسية هي واحدة من أهم أنواع مصادر الطاقة المستدامة والمتجددة المستخدمة في العالم. يتم تحويله إلى حرارة من خلال استخدام مجمعات الحرارة، ثم الحرارة ثم الكهرباء عن طريق مراكز شمسية مصحوبة بمردد، أو الكهرباء بواسطة الخلايا الشمسية الكهروضوئية.

والهدف من هذا العمل هو ما يلي:

• النمذجة العددية لهيكلين من أجهزة CIGS/CdS/ZnO/AZO و CIGS/ZnOS/AZO الرقيقة الغشاء المتغاير للخلايا الشمسية باستخدام أدوات برمجية SCAPS-1D.  
• دراسة نظرية البيئة الفعالة.

• تعريف النفاذية الكهربائية الفعالة المعقدة ذات المرحلتين لخلية CIGS الخاصة بنا بموجب قانون المخاليط.

الكلمات الرئيسية: الخلايا الشمسية الكهروضوئية، SCAPS-1D، النموذج، البصرييات، الحرارية.