

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

SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département d'électronique*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Electronique**

**Spécialité : Electronique Industriel**

*Par*

- **Lamari Feriel**
- **Ben Abd El Moumene Soulef**

*Intitulé*

*Etude et simulation des cellules solaires à base de CIGS*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.Djemouai Abdelouahab</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.Zouache Rafik</i>	<i>MAB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.Yousfi Abderrahim</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2023/2024*

# *Remerciements*

*Nous exprimons notre gratitude à Allah le tout puissant pour nous avoir accordé le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail. Nous prions pour qu'Il nous guide dans la réalisation de nos aspirations.*

*Nous souhaitons également exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadreur, M. **Rafik Zouache**, pour son soutien constant tout au long de ce projet. Ses conseils précieux et son intérêt manifesté ont grandement contribué à notre réussite.*

*Nous tenons également à remercier chaleureusement les enseignants, spécialement M. **Saidani Okba**, pour leurs précieuses remarques et leur soutien tout au long de notre travail. Leurs contributions ont été d'une grande valeur pour notre progression.*

*Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et qui ont partagé leurs connaissances et leur expertise avec nous.*

# Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{ وَ لَقَدْ مَنَّا عَلَيْكَ مَرَّةً أُخْرَى }

الحمد لله حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه، الحمد لله حبا و شكرا و امتنانا على البدء و الختام، الحمد لله الذي وفقني وأعانني على تكملة مشوار دام خمس سنوات. لم تكن الرحلة قصيرة و لم يكن الطريق محفوا بالتسهيلات لكنني فعلتها .

اهدي عملي هذا إلى :

من كان خير عون عند المحن و إلى من تملك جنة تحت القدم والداي إن ما جنيته من جهودكم نجم، شكرا لكم على الصبر و العطاء و التضحية كنتم لي السند و الداعم الأول بآرك الله فيكما و بوركت جهودكما .

إلى من قال الله فيهم { سَنَسُدُّ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ } إلى أخواتي إكرام و ندى و ملاك.

إلى الزميل بن خليل إسلام شكرا على دعمك المستمر خلال خمس سنوات.

إلى زميلتي في البحث بن عبد المومن سولاف .

لكل الزملاء و الزميلات في دفعة 2024 تخصص إلكترونيك جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج و لكل أساتذة كلية علوم و تكنولوجيا .

## لعماري فريال

ها قد وصلنا إلى نهاية المطاف بعد مشوار دام خمس سنوات بخلوها و مرها، الحمد لله حمدا كثيرا ، إنا هنا بتوفيق من الله عز و جل و دعوات من قلوب طاهرة ، أريد أن اهدي هذا المشروع إلى :  
روح جدي الطاهرة و جدتي التي سعت في تربيتي و إيصالي إلى ما أنا عليه.  
أبي و أمي و إخوتي.

اعز صديقة ساندتني في مسيرتي فريال بوداود.

صديقة جمعنتي بها مقاعد الدراسة نور هدى شتوي.

أغلى و أثنم الصديقات و قطع الروح ميار، ليلي ، وفاء ، وابتسام.

كما أتوجه إلى عائلة لعماري بشكر خاص و خاصة عمي كمال ، و ابنته فريال زميلتي في البحث.

## بن عبد المومن سولاف

## *Table des matières*

ملخص.....	
Résumé.....	
Abstract.....	
Nomenclature .....	
Liste des Figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction Générale.....	

### *Chapitre I: Les cellules solaires*

<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>I.2. Histoire de l'énergie photovoltaïque .....</b>	<b>1</b>
<b>I.3. Les cellules photovoltaïques .....</b>	<b>2</b>
<b>I.3.1. Structure de la cellule solaire photovoltaïque .....</b>	<b>2</b>
<b>I.3.1.1. Couche absorbante .....</b>	<b>3</b>
<b>I.3.1.2. Couche tampon.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3.1.3. Couche de fenêtre .....</b>	<b>4</b>
<b>I.4. Principes de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....</b>	<b>4</b>
<b>I.5. Les caractéristiques I(V) d'une cellule solaire .....</b>	<b>5</b>
<b>I.5.1. Courant de court-circuit (I<sub>cc</sub>).....</b>	<b>6</b>
<b>I.5.2. Tension de circuit ouvert (V<sub>co</sub>) .....</b>	<b>6</b>
<b>I.5.3. Facteur de forme (FF) .....</b>	<b>6</b>
<b>I.5.4. Rendement <math>\eta</math> .....</b>	<b>7</b>
<b>I.6. Circuit électrique équivalent .....</b>	<b>7</b>
<b>A. Cas d'une cellule solaire idéale .....</b>	<b>7</b>
<b>B. Cas d'une cellule réelle.....</b>	<b>8</b>
<b>I.7. Influence des résistances série R<sub>s</sub> et parallèles R<sub>sh</sub>.....</b>	<b>8</b>
<b>I.7.1. Influence de la résistance série R<sub>s</sub> .....</b>	<b>8</b>
<b>I.7.2. Influence de la résistance parallèle R<sub>sh</sub> .....</b>	<b>9</b>
<b>I.8. Les différentes filières photovoltaïques.....</b>	<b>9</b>
<b>I.8.1. Cellules solaires de la première génération .....</b>	<b>10</b>
<b>I.8.2. Cellules solaires de la deuxième génération .....</b>	<b>11</b>
<b>➤ Le silicium amorphe .....</b>	<b>11</b>
<b>Les cellules à base de tellure de Cadmium (CdTe) .....</b>	<b>11</b>
<b>➤ Chalcopyrite basée sur le Cu<sup>II</sup>VI<sub>2</sub> .....</b>	<b>12</b>
<b>➤ Cellules à base cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS).....</b>	<b>12</b>

I.8.3. Cellules solaires de la troisième génération .....	13
I.9. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque et ses applications .....	13
I.9.1. Les avantages d'énergie solaire photovoltaïque .....	13
I.9.2. Les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque .....	13
I.9.3. Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque .....	14
I.10. Conclusion.....	15

## Chapitre II : Les propriétés des cellules à base CIGS

II.1. Introduction .....	16
II.2. L'histoire des cellules solaires à base de CIGS.....	16
II.3. Propriétés du matériau CIGS.....	19
II.3.1. Généralités sur les éléments de base du matériau CIGS .....	19
II.3.2. Structure cristalline et différents alliages dérivés du $\text{CuInSe}_2$ .....	20
II.3.2.1. Structure cristalline .....	20
II.3.2.2. Les différents alliages dérivés du $\text{CuInSe}_2$ .....	21
II.4. Propriétés électriques.....	22
▪ Dopage .....	22
II.5. Propriétés optiques .....	22
II.6. Structure d'une cellule à couche mince CIGS .....	25
II.6.1 Substrat .....	26
II.6.2 Contact arrière .....	26
II.6.3 Couche absorbeur .....	27
II.6.4 Couche tampon.....	27
II.6.5 Couche fenêtre.....	28
II.6.6 Jonction p-n.....	28
II.7. Principe de fonctionnement physique d'une cellule solaire en CIGS .....	29
II.8. Conclusion.....	32
<i>Référence bibliographiques.....</i>	

## Chapitre III : Résultat de simulation numérique et interprétation

III.1. Introduction.....	33
III.2. Simulateur SCAPS .....	33
III.2.1. Utilisation et étape de simulation.....	33
III.3. Description de la structure de la cellule solaire à base CIGS.....	34
III.3.1. Description de la structure .....	34
III.3.2. Modèles et paramètres de simulation .....	35

<b>III.3.3. Diagramme de bande d'énergie</b> .....	36
<b>III.3.4. Effet de l'épaisseur de la couche de CIGS</b> .....	37
<b>III.3.5. Effet de l'épaisseur de la couche de PEDOT : PSS</b> .....	39
<b>III.3.6. Effet de l'épaisseur de la couche de 3C_SiC</b> .....	40
<b>III.3.7. Effet des défauts de la couche de CIGS</b> .....	42
<b>III.3.8. Effet de la température sur les performances des cellules solaires</b> .....	42
<b>III.3.9. Effet de la résistance série et shunt sur les performances des cellules solaires</b> .....	44
<b>III.4. Conclusion</b> .....	<b>46</b>
<i>Référence bibliographique</i> .....	
<i>Conclusion générale</i> .....	

## ملخص

باختصار، تقدم هذه الدراسة دراسة محاكاة للخلية الشمسية المعتمدة على CIGS. دمج طبقة عازلة 3C - SiC واستخدام طبقات مجال السطح الخلفي (BSF) المكونة من PEDOT:PSS. يتم إجراء عمليات المحاكاة هذه باستخدام جهاز محاكاة SCAPS-1D. النتائج تثبت ذلك الهياكل المتغايرة المكونة من ZnO/3C-SiC/CIGS/PEDOT: PSS/Mo تعرض تحويلًا ضوئيًا رائعًا كفاءة. و علاوة على ذلك، يتم إجراء تحليل شامل لاستكشاف آثار مختلفة المعلمات، بما في ذلك سمك ممتص CIGS ، و :سمك PEDOT-PSS ، وسمك 3C-SiC، و درجة الحرارة. تكشف نتائج المحاكاة عن جهد الدائرة المفتوحة الأمثل ( $V_{co}$ ) البالغ 0.86 فولت، و كثافة تيار الدائرة القصيرة ( $J_{cc}$ ) البالغة 58 مللي أمبير/سم<sup>2</sup>، عامل تعبئة (FF) بنسبة 82%، وكفاءة إجمالية قدرها 33%، وكلها تتوافق بشكل جيد مع البيانات الواردة في الدراسات السابقة. هذه المحاكاة واسعة النطاق لا يوفر البحث رؤى قيمة حول العوامل المعقدة التي تؤثر على الخلايا الشمسية CIGS فحسب، بل أيضًا يشير أيضًا إلى اتجاه واعد للتقدم المستقبلي في هذا المجال.

## Résumé

En résumé, cette étude présente une étude de simulation d'une cellule solaire basée sur CIGS. Incorporant une couche tampon 3C-SiC et utilisant des couches de champ de surface arrière (BSF) composées de PEDOT : PSS. Ces simulations sont réalisées à l'aide du simulateur SCAPS-1D. Les résultats démontrent quelles hétérostructures constituées de ZnO/3C-SiC/CIGS/PEDOT:PSS/Mo présentent une photo conversion remarquable efficacité. En outre, une analyse complète est menée pour explorer les effets de divers Paramètres, y compris l'épaisseur de l'absorbeur CIGS, PEDOT : épaisseur PSS, épaisseur 3C-SiC et température. Les résultats de la simulation révèlent une tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) optimale de 0.86 V, une densité de courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ) de 58 mA/ cm<sup>2</sup>, un facteur de remplissage (FF) de 82 % et une efficacité globale de 33%, ce qui correspond tous bien aux données rapportées dans les études précédentes. Cette simulation approfondie la recherche fournit non seulement des informations précieuses sur les facteurs complexes qui influencent les cellules solaires CIGS, mais indique également une direction prometteuse pour les progrès futurs dans le domaine.

## Abstract

In summary, this study presents a simulation investigation of a CIGS-based solar cell incorporating a 3C-SiC buffer layer and utilizing back surface field (BSF) layer composed of PEDOT: PSS. These simulations are performed using the SCAPS-1D simulator. The results demonstrate that heterostructures consisting of ZnO/3C-SiC/CIGS/PEDOT: PSS/Mo exhibit remarkable photoconversion efficiency. Furthermore, a comprehensive analysis is conducted to explore the effects of various parameters, including CIGS absorber thickness, PEDOT: PSS thickness, 3C-SiC thickness, and temperature. The simulation findings reveal an optimal open-circuit voltage ( $V_{co}$ ) of 0.86V, a short-circuit current density ( $J_{cc}$ ) of 58 mA/ cm<sup>2</sup>, a fill factor (FF) of 82%, and an efficiency of 33%, all of which align well with data reported in previous studies. This extensive simulation research not only provides valuable insights into the intricate factors influencing CIGS solar cells but also indicates a promising direction for future advancements in the field.

## *Nomenclature*

**PV** : Photovoltaïque.

**Amx** : Air mass.

**AM1.5** : Spectre de la lumière solaire.

**Cu** : Cuivre.

**CIGS** : Di sélénium de galium d'indium de cuivre.

**CdS** : Sulfure de Cadmium.

**CdTe** : Tellure de Cadmium.

**CuIn Se<sub>2</sub>** : Di sélénium d'indium de cuivre.

**d(CIGS)** : Epaisseur de l'absorbeur CIGS.

**d(CdS)** : Epaisseur de la couche tampon CdS.

**EV** : Electro-volt.

**Eg** : Energie de gap.

**FF** : Facteur de forme.

**Ga** : Gallium.

**ICC** : Courant de court-circuit.

**In**: Indium.

**Iph**: Courant photogénéré.

**Mo** : Molybdénium

**OTC** : Oxyde Transparent Conducteur.

**QE** : Quantum efficiency.

**RS** : Resistance série.

**Rsh** : Resistance shunt (parallèle).

**Se** : Sélénium.

**ZnO** : Oxyde de Zinc.



# *Liste des figures*

## Chapitre I : Les cellules solaires

**Fig.I.1** : Panneaux photovoltaïque.

**Fig. I.2**: Représentation schématique d'une structure de cellule solaire typique.

**Fig. I.3** : le fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

**Fig. I.4** : Caractéristique courant -tension d'une cellule solaire.

**Fig. I.5** : Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.

**Fig. I.6** : Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.

**Fig. I.7** : Influence de la résistance série  $R_s$  sur caractéristique  $I(V)$ .

**Fig. I.8** : Influence de la résistance parallèle  $R_{sh}$  sur caractéristique  $I(V)$ .

**Fig. I.9** : Différentes générations de la cellule solaire.

**Fig. I.10** : Quelques applications autonomes de l'énergie solaire photovoltaïque.

**Fig. I.11** : Quelques applications raccordées au réseau public de distribution d'électricité.

## Chapitre II : Les propriétés des cellules à base CIGS

**Fig.II.1** : Graphique de bande d'énergie des cellules solaires à films minces de CIGS.

**Fig.II.2** : Progrès de l'efficacité en laboratoire dans les cellules solaires CIGS de 1975 à 2022.

**Fig.II.3** : (a) Structure de la maille élémentaire du zinc-blende, (b) Structure de la maille élémentaire de la chalcopyrite du  $CuInSe_2$ .

**Fig.II.4** : Evolution des valeurs de paramètres de maille  $a$  et  $c$ , et du rapport  $c/a$  en fonction du rapport  $Ga/(Ga+In)$  pour  $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ .

**Fig.II.5** : Bande interdite  $E_g$  en fonction de la constante de réseau  $a$  des éléments  $CuInSe_2$ ,  $CuGaSe_2$ ,  $CuInS_2$  et  $CuGaS_2$ .

**Fig.II.6** : Coefficient d'absorption des différents matériaux.

**Fig.II.7** : Coefficient d'absorption de  $CuInSe_2$  et  $CuInGaSe_2$  en fonction de longueur d'onde.

**Fig.II.8** : Variation de l'énergie du gap de  $CuInSe_2$  en fonction de la température.

**Fig.II.9** : L'évolution de l'indice de réfraction  $n$  et le coefficient d'extinction  $k$  du CIGS en fonction de la longueur d'onde.

**Fig. II.10**: - a- Schéma de l'empilement typique des cellules solaires à base de CIGS.

-b- Image de la tranche d'une cellule en CIGS obtenue par un microscope électronique à balayage (MEB).

**Fig. II.11:** Structure de bande d'une cellule solaire Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>.

**Fig. II.12 :** principe de fonctionnement d'une cellule solaire à base CIGS.

**Fig.II.13 :** Caractéristique J-V mesurée d'une cellule solaire en CIGS pour trois énergies de bande interdite.

**Fig.II.14 :** Rendement quantique externe mesuré sur une cellule en CIGS pour différentes proportions x de Ga.

### **Chapitre III : Résultat de simulation numérique et interprétation**

**Fig. III. 1 :** Fenêtre d'exécution « Action Panel » du logiciel SCAPS.

**Fig. III.2 :** Structure de référence d'une cellule solaire Substrat à base de CIGS.

**Fig. III.3:** Diagramme des bandes d'énergie.

**Fig. III.4 :** Influence de l'épaisseur de l'absorbeur CIGS sur la caractéristique J-V.

**Fig.III.5 :** Influence de l'épaisseur de la couche absorbante  $d(\text{CIGS})$  sur les performances de la cellule solaire à base de CIGS.

**Fig. III.6 :** Effet de l'épaisseur de la couche de PEDOT-PSS (BSF) sur les performances de la structure du CIGS.

**Fig. III.7 :** Influence de l'épaisseur de la couche PEDOT-PSS sur la caractéristique J-V.

**Fig. III.8 :** Influence de l'épaisseur de la couche buffer  $d(3\text{C\_SIC})$  sur la caractéristique J-V.

**Fig.III.9:** Influence de l'épaisseur de la couche buffer  $d(3\text{C\_SIC})$  sur les performances de la cellule solaire à base de CIGS.

**Fig.III.10 :** Effet des défauts de la couche de CIGS.

**Fig. III.11:** Effet de la température sur la caractéristique J-V.

**Fig. III.12 :** L'impact de la température sur les performances de la cellule étudiée.

**Fig. III.13 :** Influence de la résistance série sur les performances des cellules solaires.

**Fig. III.14 :** Influence de la résistance shunt sur les performances des cellules solaires.

**Fig. III.15:** Caractéristiques J-V pour la cellule solaire CIGS avec et sans couche BSF.

# *Liste des tableaux*

## **Chapitre II : Les propriétés des cellules à base CIGS**

**Tab.II.1:** Propriétés physiques et chimiques des éléments Cu, In, Ga et Se.

**Tab.II.2 :** La classification périodique des éléments constituant la famille I-III-VI 2.

## **Chapitre III : Résultat de simulation numérique et interprétation**

**Tab III.1 :** Propriétés des différentes couches.

**Tab III.2 :** Ce travail comparé à d'autres cellules solaires.

*Introduction*

*Générale*

## *Introduction Générale*

Des films minces tels que le sélénure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS) et le tellure de cadmium sont utilisés dans les cellules solaires. Régissent les améliorations en raison de leur rapport qualité-prix et de leur stabilité [1-2]. Les cellules solaires CIGS, qui ont un rendement actuel de 23.35 %, surpassent les autres technologies à couches minces, grâce à leur stabilité, leurs taux de conversion élevés, leurs faibles coûts de production et leur respect de l'environnement [3-4]. De plus, ils présentent une résilience sous une irradiation plus faible, ce qui suscite l'intérêt des chercheurs photovoltaïques en raison de leurs excellentes caractéristiques optoélectroniques telles qu'un coefficient d'absorption élevé, une bande interdite réglable et une utilisation minimale de matériaux [5]. La bande interdite du CIGS est modifiable en modifiant les concentrations d'indium (In) et de gallium (Ga), directement influencées par la stœchiométrie de l'alliage [6]. À l'inverse, les lacunes en cuivre (Cu) induisent un aspect physique de type dans la configuration chalcopyrite du CIGS [7]. La distorsion du rapport du facteur de réseau ( $c/a$ ) de la structure CIGS et la liaison entre Ga-Se ou In-Se, Cu-Se contribuent à la distorsion tétragonale [8-9]. Cependant, les variations de la composition du CIGS peuvent conduire à des disparités de bande de conduction avec les couches adjacentes, impactant négativement les performances photovoltaïques [10].

Dans les cellules solaires avec CIGS, le film tampon comprend souvent du sulfure de cadmium (CdS), offrant des avantages qui améliorent l'efficacité et la présentation du dispositif [11]. Le CdS, étant un semi-conducteur de type n, facilite le transport des électrons, améliorant ainsi l'efficacité globale [12-13]. La formation d'une hétérojonction prise en sandwich entre le matériau absorbant CIGS de type p et la couche de TCO (oxyde transparent conducteur) crée un chemin de flux d'électrons, réduisant les pertes de recombinaison et améliorant l'efficacité de la collecte des porteurs de charge [14]. De plus, le CdS contribue en tant que matériau de passivation dans la couche absorbante CIGS, réduisant les défauts de surface et les états de piège, diminuant ainsi les pertes de recombinaison à l'interface CIGS/CdS et augmentant la durée de vie du porteur, conduisant à des performances améliorées du dispositif [15-16].

Cependant, le CdS, bien que largement exploité comme matériau tampon pour les absorbeurs CIGS de type p, présente des problèmes inhérents : premièrement, il contient l'élément toxique cadmium, ce qui présente des risques de contamination de l'environnement pendant la production, l'utilisation et l'élimination si les protocoles appropriés ne sont pas respectés [17]. Deuxièmement, son énergie de bande interdite relativement large ( $\sim 2,4$  eV) peut conduire à une réduction du nombre de photons de courtes longueurs d'onde que le

CIGS pourrait mieux absorber. À la lumière de ces défis, les chercheurs explorent des matériaux de couche tampon alternatifs présentant des caractéristiques telles qu'une bande interdite plus élevée, un respect de l'environnement, des propriétés optoélectroniques comparables ou supérieures à celles du CdS et une adéquation aux méthodes de fabrication à faible coût [18]. Les cellules solaires Kieserite, par exemple, manquent de CdS mais présentent généralement des  $V_{oc}$  et un facteur de remplissage (FF) inférieurs à ceux à base de CdS, tout en parvenant à atteindre un courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ) plus élevé en raison de leur bande interdite plus grande [19-20]. Bien que les matériaux semi-conducteurs polycristallins II à VI aient été utilisés comme matériau isolant dans l'amélioration des cellules solaires, l'émergence de la nouvelle couche de carbure de silicium (3C-SiC), qui agit comme une couche guidant la lumière, a fourni de nouveaux et importants avantages en renforçant l'efficacité des cellules solaires [21]. Le carbure de silicium augmente l'absorption de la lumière et la convertit mieux en énergie électrique, en plus de sa bonne stabilité thermique et chimique, ce qui améliore la stabilité des performances de la cellule solaire dans divers environnements de fonctionnement. De fines couches de carbure de silicium offrent également une protection efficace contre les réactions de corrosion et d'oxydation, prolongeant ainsi la durée de vie des cellules et améliorant l'efficacité à long terme.

Dans cette étude, nous proposons une nouvelle approche pour la simulation de cellules solaires utilisant des couches minces de CIGS. Cette méthode intègre une couche tampon de 3C-SiC et utilise des couches de champ de surface arrière (BSF) composées de PEDOT : PSS. Les simulations effectuées à l'aide du simulateur SCAPS-1D révèlent que les hétérostructures ZnO/3C-SiC/CIGS/PEDOT : PSS/Mo présentent une remarquable efficacité de conversion photovoltaïque. De plus, une analyse approfondie explore l'impact de divers paramètres tels que l'épaisseur du CIGS, l'épaisseur du PEDOT : PSS, l'épaisseur du 3C-SiC et la température. Ces études fournissent des informations précieuses sur les relations complexes entre ces variables, mettant en lumière l'importance de la stabilité et de l'efficacité des cellules solaires photovoltaïques. En définitive, cette étude de simulation approfondie enrichit notre compréhension des complexités associées à ces cellules solaires et ouvre de nouvelles perspectives pour la recherche et le développement futurs dans le domaine du photovoltaïque basé sur le CIGS.

**La structure de ce mémoire est la suivante :**

- ❖ **Chapitre I :** Nous allons présenter une étude générale sur les cellules solaires. Nous retracerons l'évolution historique de l'énergie photovoltaïque, exposerons le

fonctionnement fondamental des cellules solaires ainsi que leurs spécificités. Nous aborderons également les diverses technologies utilisées dans le photovoltaïque, ainsi que les avantages et les inconvénients associés à cette forme d'énergie, tout en explorant ses multiples applications.

- ❖ **Chapitre II** : Nous allons explorer l'histoire des cellules solaires à base de CIGS, examinant leur structure cristallographique, leurs propriétés opto-électroniques et les domaines d'application qui en découlent. De plus, nous étudierons l'architecture de ces cellules solaires et les principes fondamentaux qui régissent leur fonctionnement.
- ❖ **Chapitre III** : Nous expliquerons le programme de simulation SCAPS-1D, suivi d'une brève explication de la méthode utilisée pour simuler les cellules solaires à l'aide de ce programme. Nous discuterons ensuite de la structure de la cellule solaire à base de CIGS ainsi que de ses propriétés physiques, des modèles et des paramètres physiques utilisés dans la simulation numérique. Enfin, nous étudierons et interpréterons les résultats de la simulation électrique de cette structure.

## Reference Bibliographies

- [1] Bagheri, B., Poly, L. P., Kottokkaran, R., Sharikadze, S., Reichert, B., Noack, M., & Dalal, V. (2020, June). Electronic Properties of Photovoltaic CdSe Material. In 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) (pp. 0213-0216). IEEE.
- [2] Alzoubi, T., & Moustafa, M. (2020). Simulation analysis of functional MoSe<sub>2</sub> layer for ultra-thin Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> solar cells architecture. *Modern Physics Letters B*, 34(05), 2050065.
- [3] Elbar, M., Tobbeche, S., Chala, S., Saidani, O., Kateb, M. N., & Serdouk, M. R. Effect of Temperature on the Performance of CGS/CIGS Tandem Solar Cell.
- [4] Yousfi, A., Saidani, O., Messai, Z., Zouache, R., Meddah, M., & Belgoumri, Y. (2023). Design and simulation of a triple absorber layer perovskite solar cell for high conversion efficiency. *European Journal OF Physics*, 4, 137-146.
- [5] Ali, A. M., Yusoff, Y., Ali, L. M., Misran, H., Akhtaruzzaman, M., Alghoul, M. A., ... & Amin, N. (2018). Synthesis of sphere-like-crystal CdS powder and thin films using chemical residue in chemical bath deposition (CBD) for thin film solar cell application. *Solar Energy*, 173, 120-125.
- [6] Biplab, S. R. I., Ali, M. H., Moon, M. M. A., Pervez, M. F., Rahman, M. F., & Hossain, J. (2020). Performance enhancement of CIGS-based solar cells by incorporating an ultrathin BaSi<sub>2</sub> BSF layer. *Journal of Computational Electronics*, 19(1), 342-352.
- [7] Chen, Y., Tan, X., Peng, S., Xin, C., Delahoy, A. E., Chin, K. K., & Zhang, C. (2018). The influence of conduction band offset on CdTe solar cells. *Journal of Electronic Materials*, 47, 1201-1207.
- [8] Mufti, N., Amrillah, T., Taufiq, A., Diantoro, M., & Nur, H. (2020). Review of CIGS-based solar cells manufacturing by structural engineering. *Solar energy*, 207, 1146-1157.
- [9] Dharmadasa, I. M. (2009). Fermi level pinning and effects on CuInGaSe<sub>2</sub>-based thin-film solar cells. *Semiconductor science and technology*, 24(5), 055016.
- [10] Fischer, J., Larsen, J. K., Guillot, J., Aida, Y., Eisenbarth, T., Regesch, D., ... & Dale, P. J. (2014). Composition dependent characterization of copper indium diselenide thin film solar cells synthesized from electrodeposited binary selenide precursor stacks. *Solar energy materials and solar cells*, 126, 88-95.



- [11] Friedlmeier, T. M., Jackson, P., Bauer, A., Hariskos, D., Kiowski, O., Wuerz, R., & Powalla, M. (2015). Improved photocurrent in Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> solar cells: from 20.8% to 21.7% efficiency with CdS buffer and 21.0% Cd-free. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(5), 1487-1491.
- [12] Hamri, Y. Z., Bourezig, Y., Medles, M., Ameri, M., Toumi, K., Ameri, I., ... & Voon, C. H. (2019). Improved efficiency of Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> thinfilm solar cells using a buffer layer alternative to CdS. *Solar Energy*, 178, 150-156.
- [13] Munna, F. T., Selvanathan, V., Sobayel, K., Muhammad, G., Asim, N., Amin, N., ... & Akhtaruzzaman, M. (2021). Diluted chemical bath deposition of CdZnS as prospective buffer layer in CIGS solar cell. *Ceramics international*, 47(8), 11003-11009.
- [14] Naghavi, N., Abou-Ras, D., Allsop, N., Barreau, N., Bücheler, S., Ennaoui, A., ... & Törndahl, T. (2010). Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu (In, Ga)(S, Se)<sub>2</sub> based thin film photovoltaics: present status and current developments. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18(6), 411-433.
- [15] Nakada, T. (2012). CIGS-based thin film solar cells and modules: unique material properties. *Electronic Materials Letters*, 8, 179-185.
- [16] Zouache, R., Bouchama, I., Saidani, O., Ghebouli, M. A., Akhtar, M. S., Saeed, M. A., ... & Messaoudi, M. (2024). CGS/CIGS single and triple-junction thin film solar cell: Optimization of CGS/CIGS solar cell at current matching point. *Micro and Nanostructures*, 207812.
- [17] Islam, M. S., Rashid, M. J., Akhtaruzzaman, M., Takashi, S., Kazmi, J., Karim, M. R., ... & Sobayel, K. (2024). Exploration of Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Se as a window layer for CIGS based solar cell with PEDOT: PSS as back surface field layer. *Materials Research Express*, 10(12), 126405.
- [18] Rahman, M. F., Mahmud, N., Alam, I., Ali, M. H., Moon, M. M. A., Kuddus, A., ... & Hossain, M. K. (2023). Design and numerical analysis of CIGS-based solar cell with V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as the BSF layer to enhance photovoltaic performance. *AIP Advances*, 13(4).
- [19] Mabvuer, F. T., Nya, F. T., DzifackKenfack, G. M., & Laref, A. (2023). Lowering cost approach for CIGS-based solar cell through optimizing band gap profile and doping of stacked active Layers— SCAPS modeling. *ACS omega*, 8(4), 3917-3928.
- [20] Zouache, R., Bouchama, I., Saidani, O., Djedoui, L., & Zaidi, E. (2022). Numerical study of high-efficiency CIGS solar cells by inserting a BSF  $\mu$ -Si: H layer. *Journal of Computational Electronics*, 21(6), 1386-1395.
- [21] Belhaj, Y. (2023). New optimized HIT solar cell using wide-bandgap nc-3C-SiC: H as a

window layer. *Modern Physics Letters B*, 37(36), 2350193.

- [22] Nguyen, C. T., Ninh, D. G., Nguyen, T. H., Tanner, P., Streed, E. W., Dinh, T., ... & Dao, D. V. (2023). Photovoltaic Effect-Based Multifunctional Photodetection and Position Sensing Using a 3C-SiC/Si Heterojunction. *ACS Applied Electronic Materials*, 5(12), 6611-6620.

# *Chapitre*

## *I*

## **I.1. Introduction**

Une cellule solaire est un dispositif photovoltaïque destiné à convertir la lumière du soleil en énergie électrique, pour la fournir dans une charge adaptée de manière efficace. L'énergie solaire est l'origine de la formation des réserves d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et des flux d'énergie renouvelable (bois, vent, énergie hydraulique). La conversion de cette énergie en électricité peut être effectuée de manière directe ou indirecte.

Dans le cadre de ce chapitre, nous allons présenter tout d'abord quelques notions de bases indispensables sur le rayonnement solaire, la conversion photovoltaïque. Ensuite, nous décrirons le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales photovoltaïques. Enfin nous décrirons les cellules photovoltaïques en couches minces à base de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>.

## **I.2. Histoire de l'énergie photovoltaïque**

L'énergie photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des capteurs ou à des centrales solaires photovoltaïques. C'est une énergie renouvelable, car le soleil est considéré comme une source inépuisable à l'échelle du temps humain [1].



**Fig.I.1:** Panneaux photovoltaïque [2].

En 1838, l'énergie solaire photovoltaïque apparaît dans l'histoire de l'énergie solaire. Le français Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque pour la première fois. Becquerel expérimentait une batterie électrolytique avec des électrodes de platine et réalisait que, lorsqu'il était exposé au soleil, le courant augmentait. C'était le début de l'énergie solaire

photovoltaïque. L'étape suivante a été franchie en 1873 lorsque l'ingénieur électricien anglais Willoughby Smith a découvert l'effet photovoltaïque dans les solides. Dans ce cas à propos de sélénium. Quelques années plus tard, en 1877, l'anglais William Grylls Adams, professeur de philosophie naturelle au King's Collège de Londres et son élève Richard Evans Day, ont découvert qu'ils exposaient le sélénium à la lumière pour produire de l'électricité. Ils ont ainsi créé la première cellule photovoltaïque au sélénium. En 1953, Calvin Fuller, Gerald Pearson et Daryl Chaplin ont découvert la cellule solaire en silicium. Cette cellule produisait suffisamment d'électricité et était suffisamment efficace pour faire fonctionner de petits appareils électriques. Ces cellules photovoltaïques avaient une grande importance dans l'avenir de l'histoire de l'énergie solaire.

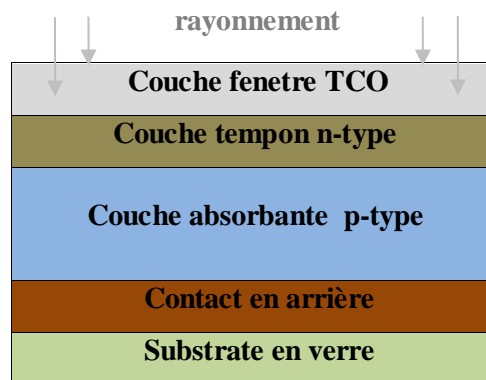
Les premières cellules solaires disponibles dans le commerce ne sont apparues qu'en 1956, même si le coût était encore très élevé pour la plupart des gens jusqu'en 1970 environ, lorsque le prix des cellules solaires a chuté d'environ 80%. Les cellules solaires ont été utilisées dans les satellites américains et soviétiques lancés depuis la fin des années 1950 [3].

### **I.3. Les cellules photovoltaïques**

Une cellule photovoltaïque est un petit générateur de courant continu qui débite une tension de moins d'un volt. L'utilisation industrielle des cellules dans l'énergie photovoltaïque se fait sous la forme de panneaux. Elle est constituée de deux couches de silicium cristallin. Un constituant qui a la propriété d'être semiconducteur, les électrons sont liés aux atomes mais peuvent se détacher et donc circuler avec l'apport d'énergie lumineuse pour ensuite permettre le passage d'un courant comme dans un conducteur électrique [4].

#### **I.3.1. Structure de la cellule solaire photovoltaïque**

Dans la plupart des cas, une cellule solaire à film mince est composée de trois couches principales : la couche absorbante de type p, la couche tampon de type n et la couche d'oxyde conducteur transparent (TCO). Cela peut être observé dans **Fig. I.2** [5].



**Fig. I.2 :** Représentation schématique d'une structure de cellule solaire typique [5].

### I.3.1.1. Couche absorbante

Le cœur des cellules solaires à film mince est souvent désigné sous le nom de couche absorbante, qui est un matériau semi-conducteur. La fonction principale de cette couche est d'absorber le plus grand nombre de photons et d'exciter les électrons dans la bande de conduction pour créer un courant photoélectrique. Pour ce faire, le matériau doit avoir un coefficient d'absorption élevé dans le spectre visible et devrait idéalement être un matériau de type p en raison de sa longue longueur de diffusion des électrons. L'épaisseur de la couche absorbante est généralement comprise entre 1  $\mu\text{m}$  et 3  $\mu\text{m}$ . Il existe plusieurs matériaux avec une bande interdite d'environ 1,5 eV. Cependant, d'autres facteurs tels que la technologie et la stabilité sont également importants. Les méthodes de dépôt varient en fonction du type de matériau absorbant. Certaines des cellules solaires les plus remarquables basées sur des matériaux absorbants sont Si, a-Si, GaAs, CdTe, InP, Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub>, CZTSSe et CIGS, qui ont suscité une attention considérable [5].

### I.3.1.2. Couche tampon

L'hétérojonction est formée entre la couche absorbante CIGS et l'oxyde transparent conducteur (OTC), avec une fine couche d'interface entre eux, dit couche tampon. Cette dénomination provient du fait qu'elle joue deux rôles importants : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice. Du point de vue électrique, la couche tampon permet entre autre d'optimiser l'alignement des bandes entre le CIGS et la couche fenêtre soit une valeur comprise entre 2,4 et 3,2 eV, et de limiter les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. La couche tampon qui généralement déposée par la technique de dépôt par bain

chimique (CBD) permet un recouvrement optimal de la surface de la couche absorbante même pour des épaisseurs très faibles et des surfaces de CIGS à forte rugosité, ce recouvrement permet la formation de la jonction et la passivation de défauts sur toute surface libre de l'absorbeur, il permet également de protéger efficacement la surface de l'absorbeur du dépôt de la couche de ZnO par pulvérisation cathodique [6]. Sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante, soit de l'ordre de  $10^{-3}$  ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )<sup>-1</sup>, en plus Elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints de grains [7].

### **I.3.1.3. Couche de fenêtre**

La couche fenêtre doit être à la fois transparente, afin de laisser suffisamment de lumière à la région de jonction et la couche absorbante du dispositif, et conductrice pour permettre le transport du photo-courant généré au circuit extérieur sans trop de pertes. Cette couche fenêtre est constituée d'oxyde transparent conducteur (TCO), sur lequel une fine grille métallique doublée (Ni-Al) est déposée de façon à réduire la résistance série de la couche fenêtre et de collecter les charges générées par le dispositif. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous-jacente du TCO. Le TCO, généralement utilisé pour les cellules CIGS, est l'oxyde de Zinc (ZnO) déposé par pulvérisation cathodique, mais l'oxyde d'Indium dopé à l'étain (ITO) peut également être rencontré [8].

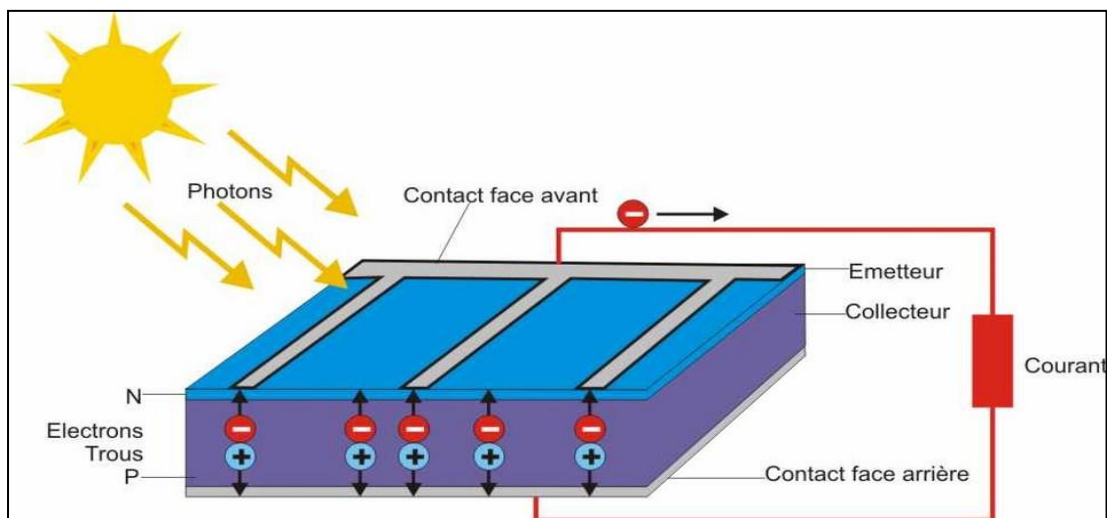
Une bicouche ZnO est souvent utilisée pour le contact frontal transparent. La première couche est une couche mince de ZnO intrinsèque (i-ZnO), qui est typiquement de (50 -100 nm) d'épaisseur et très résistive. Elle sert à limiter la formation de court-circuit dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon [8]. La seconde couche est fréquemment du ZnO dopé à l'Aluminium (ZnO: Al), mais d'autres dopants comme le Bore (ZnO: B) ou le Gallium (ZnO: Ga) existent aussi. L'épaisseur et le dopage de cette couche sont ajustés de façon à combiner transparence et conductivité. La bande interdite de la couche fenêtre doit être aussi élevée et aussi mince que possible afin de maintenir une faible résistance série. Le ZnO et le ZnO: Al ont respectivement des bandes d'environ 3,2 eV et 3,6 à 3,8 eV. [8].

## **I.4. Principes de fonctionnement de la cellule photovoltaïque**

Ce phénomène est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire. En effet, lorsque les photons de la lumière du soleil rentrent en contact avec ces matériaux particuliers, ils transmettent leur énergie aux électrons des semi-conducteurs qui génèrent alors une tension électrique [9].

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé

de semiconducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente, quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $h\nu$  à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [9].



**Fig I.3** : le fonctionnement de la cellule photovoltaïque [9].

### I.5. Les caractéristiques I(V) d'une cellule solaire

Il existe plusieurs paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques qui sont déduits de la caractéristique I(V) montrée dans **Fig. I.4** [10].



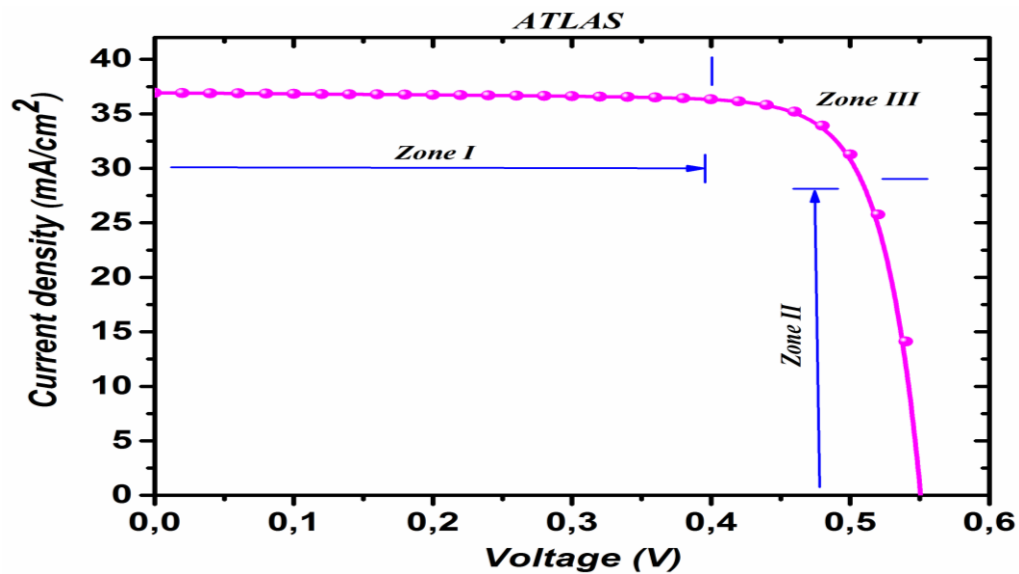


Fig. I.4 : Caractéristique courant -tension d'une cellule solaire [10].

### I.5.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

C'est le courant délivré par un module photovoltaïque en absence de la tension (court-circuit), ( $V=0$ ),  $I = -I_{ph} = I_{cc}$  [10].

$$I_{cc} = I_{ph} / \left[ 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right] \quad (4)$$

$I_{ph}$  : photo-courant, proportionnel à l'irradiance, avec correction selon T.

$R_s$  : résistance série.

$R_{sh}$  : résistance shunt (ou parallèle).

### I.5.2. Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )

C'est la tension aux bornes du module photovoltaïque en circuit ouvert.

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (5)$$

K : constante de Boltzmann.

Q : charge de l'électron.

T : température effective de la cellule [10].

### I.5.3. Facteur de forme (FF)

Il représente le rapporte entre la puissance optimale et la puissance maximale que peut délivrer une cellule [10].

$$FF = \frac{PM}{I_{cc} V_{co}} = \frac{ImVm}{I_{cc} V_{co}} \quad (6)$$

Avec :

$PM$  : Puissance maximale.

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme la plus au moins rectangulaire de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire [10].

#### I.5.4. Rendement $\eta$

C'est le rapport entre la puissance fournie par la cellule et la puissance solaire incidente [10].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = FF I_{cc} V_{co} / P_{inc} \quad (7)$$

$P_{inc}$  : la puissance incidente du rayonnement solaire.

#### I.6. Circuit électrique équivalent

Une cellule photovoltaïque, non éclairée et polarisée par une tension  $V$ , est soumise à une réponse exponentielle se rapprochant de celle d'une diode. La densité de courant  $I$ , suit l'équation de Shockley [11].

$$I = I_s [\exp(V/nKT) - 1] \quad (1)$$

$I_s$ : est la densité de courant de saturation sous polarisation inverse.

$q$  : la charge élémentaire.

$kT$  : l'énergie thermique.

$n$  : le facteur d'idéalité de la diode.

##### A. Cas d'une cellule solaire idéale

Cette même cellule photovoltaïque polarisée sous une tension  $V$  et soumise à un rayonnement est alors le siège d'un courant supplémentaire  $I_{ph}$  et se comporte comme un générateur de courant (cellule solaire idéale, Fig.I.2). Le courant photogénéré  $I_{ph}$  circule dans le sens inverse de la diode. Si bien que l'équation (1) s'en trouve modifiée, Cependant, les équations précédentes ne sont valables que pour des dispositifs idéaux [11].

$$I = I_{ph} - I [\exp(qV/nKT) - 1] \quad (2)$$

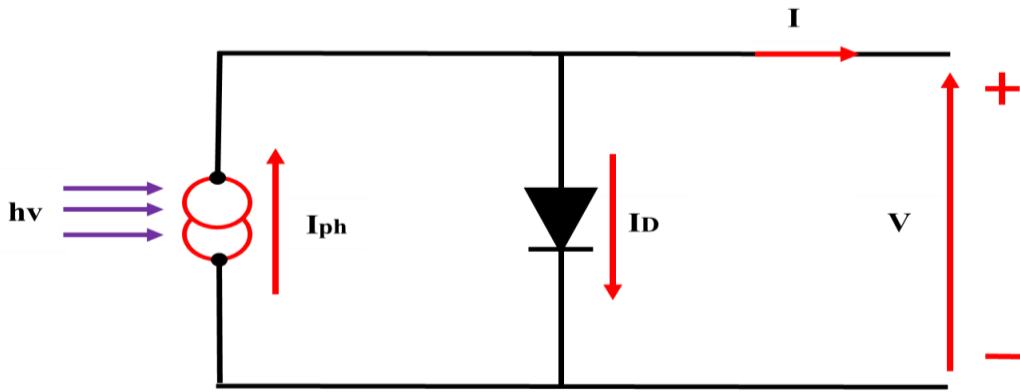


Fig. I.5 : Schéma équivalent d’une cellule solaire idéale [11].

**B. Cas d’une cellule réelle**

Afin de modéliser le fonctionnement réel d’une cellule photovoltaïque inorganique, il est nécessaire de modifier le circuit équivalent en introduisant deux résistances  $R_S$  (résistance série) et  $R_{sh}$  (résistance shunt) que nous allons définir par Fig. I.3 [11].

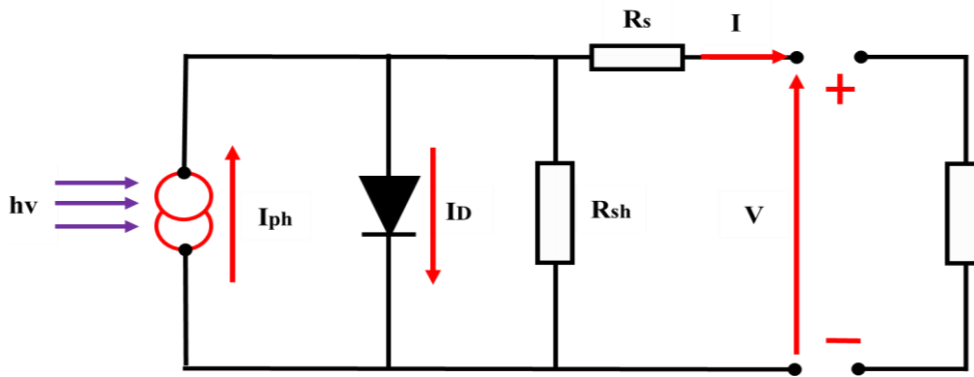


Fig. I.6 : Schéma équivalent d’une cellule solaire réelle [11].

L’équation (3) représente celle de la cellule réelle :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{(V + I.R_S).q}{n.K.T}\right) - 1 \right) - (V + I.R_S)/R_{sh} \tag{3}$$

**I.7. Influence des résistances série  $R_s$  et parallèles  $R_{sh}$**

**I.7.1. Influence de la résistance série  $R_s$**

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semiconducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semiconducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion [11].

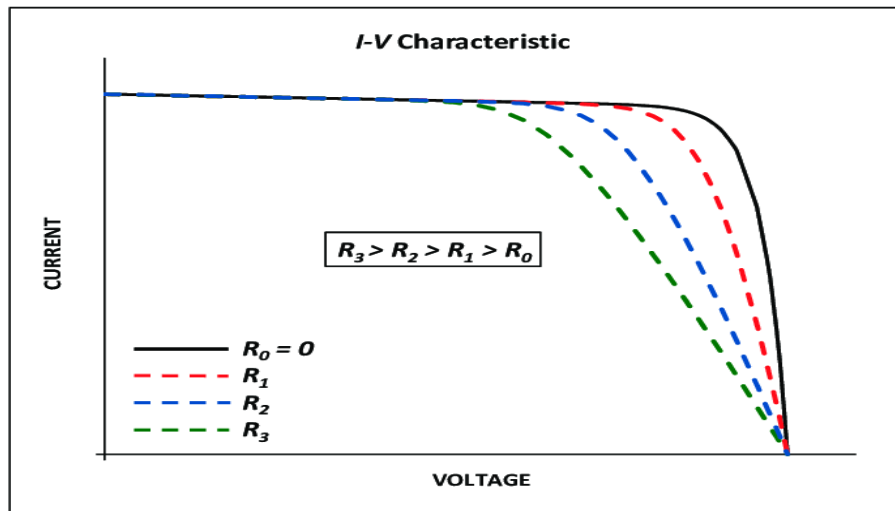


Fig. I.7 : Influence de la résistance série  $R_s$  sur caractéristique  $I(V)$  [12].

### I.7.2. Influence de la résistance parallèle $R_{sh}$

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau, épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace. L'existence de fissures et de défauts de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle  $R_{sh}$  [11].

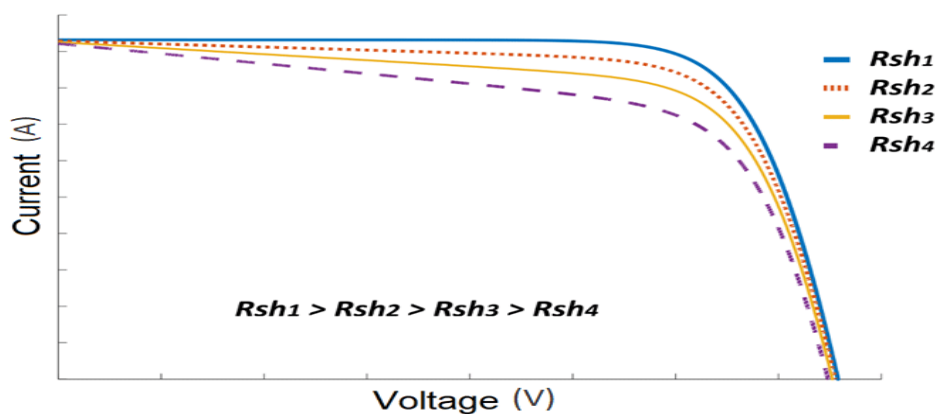


Fig. I.8 : Influence de la résistance parallèle  $R_{sh}$  sur caractéristique  $I(V)$  [13].

### I.8. Les différentes filières photovoltaïques

La conversion photovoltaïque nécessite l'utilisation d'une couche photoconductrice, dite couche absorbante, qui transforme le rayonnement lumineux en paires électron-trou. Par la

suite, ces porteurs créés sont collectés en réalisant une jonction à la surface de cette couche absorbante. Cette jonction peut être soit une homojonction, c'est le cas de la filière classique, soit une hétérojonction ; c'est à dire une jonction avec deux semi-conducteurs différents, soit une jonction Schottky, c'est à dire un contact métal semi-conducteur. Pour le moment, de nombreuses cellules photovoltaïques différentes existent de nos jours. Elles sont classées en trois générations.

- ✓ La première génération rassemble les cellules à base de silicium monocristallin et multicristallin.
- ✓ La deuxième génération rassemble les cellules dites à couches minces.
- ✓ La troisième génération appartient à toutes les autres technologies (les cellules organiques, cellule de Grätzel, cellule à boîtes quantiques, etc.) [14].



**Fig. I.9** : Différentes générations de la cellule solaire [15].

### I.8.1. Cellules solaires de la première génération

L'utilisation du silicium dans la fabrication des modules photovoltaïques repose sur ses propriétés physiques et chimiques uniques, notamment son utilisation extensive dans la microélectronique et sa non-toxicité. De plus, sa structure cristalline est bien adaptée pour créer la jonction p-n unique dans les cellules de première génération. Cependant, le processus de production basé sur les plaquettes de silicium est coûteux en raison de sa consommation énergétique importante et de la nécessité d'un silicium de haute pureté. Ce processus différencie

les cellules monocristallines et polycristallines, les premières offrant une efficacité supérieure mais à un coût de fabrication plus élevé par rapport aux dernières [16].

### **I.8.2. Cellules solaires de la deuxième génération**

Le prix trop élevé du kWc de la technologie photovoltaïque de la première génération était et reste encore plus cher que celui des énergies fossiles (3.5\$/Wc). C'est pour cette raison qu'un autre axe de recherche s'est créé à partir des années 1980, avec un objectif prioritaire de réduire le coût de fabrication. Les technologies dites de couches minces reposent sur l'utilisation de matériaux pour lesquels une épaisseur de seulement quelques microns est suffisante à la conversion photovoltaïque, étant donnés leurs coefficients d'absorption des photons très supérieurs à ceux du silicium cristallin ; pour cela plusieurs semi-conducteurs de ce type sont utilisés dans l'industrie [16].

#### ➤ **Le silicium amorphe**

La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia) représentait un Rendement de 14 % (module 5 – 7% stabilisé) L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût. Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat"), par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou polycristalline qui sont réalisées à partir de tranches de silicium.

Les porteurs de charges minoritaires dans les cellules sur couches minces de silicium amorphe ne peuvent pas aller très loin dans le silicium amorphe et donc une structure de jonction p-n comme dans le cristallin ne pourrait, en aucun cas, collecter les porteurs des photons générés dans une très petite couche près de la surface illuminée. D'autre part les couches dopées p et n du silicium amorphe sont très défectueuses et présentent des taux de recombinaison importants. C'est pourquoi on place une zone intrinsèque beaucoup moins défectueuse entre deux couches dopées extrêmement minces. Ces couches dopées créent un champ interne qui doit s'étendre sur toute l'épaisseur de la cellule afin de collecter les porteurs engendrés dans la zone intrinsèque [17].

#### **Les cellules à base de tellure de Cadmium (CdTe)**

Jusqu'à présent, la cellule à base de CdTe (Tellure de Cadmium) est considéré comme l'approche la plus prometteuse pour le photovoltaïque terrestre, du fait de ses propriétés optiques optimales. Elle se caractérise par une bande interdite directe de 1,45 eV parfaitement

adaptée au spectre solaire, en outre son très grand coefficient absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de  $2/\text{Jm}$ , néanmoins les problèmes d'environnement associé à l'utilisation du cadmium ont largement freiné les tentatives de développement dans cette filière [18].

➤ **Chalcopyrite basée sur le CuIIIIV2**

L'émergence des cellules solaires, basées sur les matériaux à structures chalcopyrites, a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$  par Wagner et coll de Bell Téléphone en 1974-1975. Wagner et coll avaient rapporté la préparation d'hétérojonctions p-n  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$  à partir d'un monocristal  $\text{CuInSe}_2$ , dont la conductivité est de type p, sur lequel une couche mince de CdS de 5-10 nm d'épaisseur avait été déposée. La réponse photovoltaïque de ces détecteurs pour une lumière incidente à travers la fenêtre CdS donnait lieu à de très hauts rendements quantiques (70 %) uniformes entre 0.55 et 1.25  $\mu\text{m}$ . Ces hétérojonctions avaient des rendements solaires de l'ordre de 5 %. Les composés ternaires chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement le  $\text{CuGaSe}_2$ , le  $\text{CuInS}_2$ , le  $\text{CuAlSe}_2$  et le  $\text{CuInSe}_2$ . Du fait de leurs grands coefficients d'absorption optique, une épaisseur de 1.5-2  $\mu\text{m}$  est suffisante pour absorber la partie utile du spectre solaire. Le matériau le plus prometteur semble être le  $\text{CuInSe}_2$ , une efficacité de 20 % est obtenue par les cellules solaires à base de ce matériau. Cependant, sa faible bande interdite (1.04 eV) limite la tension du circuit ouvert et donc le rendement de la photopile. Et afin de dépasser ce problème, des travaux portent aujourd'hui sur l'introduction des atomes de Ga, Al ou Te qui se substituent partiellement à l'In, de façon à élargir sensiblement la bande interdite [19].

➤ **Cellules à base cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS)**

Le CIS partage des points communs avec le CdTe : la faible disponibilité de l'indium (une centaine d'années selon Indium Corporation) oriente la recherche à travailler sur la réduction de l'épaisseur de ce composant (2  $\mu\text{m}$  aujourd'hui). Il nécessite également une couche de CdS pour former une jonction p-n. On peut associer une quantité limitée de gallium (CIGS) pour améliorer ses propriétés d'absorption. Il présente le plus fort coefficient d'absorption des semiconducteurs PV. Sa stabilité, son haut rendement par rapport aux autres couches minces (11 – 18 % (max 21,7%)) ainsi que son coût de fabrication relativement peu onéreux permettent à cette technologie de croître rapidement. Les cellules CIGS peuvent être construites sur des supports en plastique, en verre de 1 à 3 mm d'épaisseur, ou sur des feuilles métalliques [20].

### **I.8.3. Cellules solaires de la troisième génération**

De nouvelles cellules sont en développement dans les laboratoires, les cellules organiques et les cellules de CZTS sont en phase de recherche et présentent pour l'instant des rendements relativement faibles. La production des cellules multi jonctions est quant à elle exclusivement réservée aux applications spatiales [17]. L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent beaucoup d'avantages : la possibilité d'être déposée en grande surface, la facilité de fabrication et de manipulation, la possibilité de réaliser ces cellules sur des substrats flexibles, et grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. Elles possèdent en revanche à l'heure actuelle des durées de vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques, et des rendements de conversion plus faible [20].

### **I.9. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque et ses applications**

#### **I.9.1. Les avantages d'énergie solaire photovoltaïque**

- L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme. Ce sont des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance (d'où des frais de maintenance relativement faibles).
- Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.
- En devenant producteur d'électricité avec une installation photovoltaïque, chacun peut améliorer son écobilan, réduire les émissions de Dioxyde de Carbone et préserver les ressources naturelles.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple, des installations éoliennes [21].

#### **I.9.2. Les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque**

Comme nous pouvons citer quelques inconvénients de l'énergie photovoltaïque :



- La source de carburant est diffusée (la lumière du soleil a une énergie relativement de faible densité).
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Le coût initial d'installation est élevé.
- Le rendement horaire ou journalier imprédictible.
- Manque de stockage d'énergie économiquement efficace.
- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [22].

### **I.9.3. Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque**

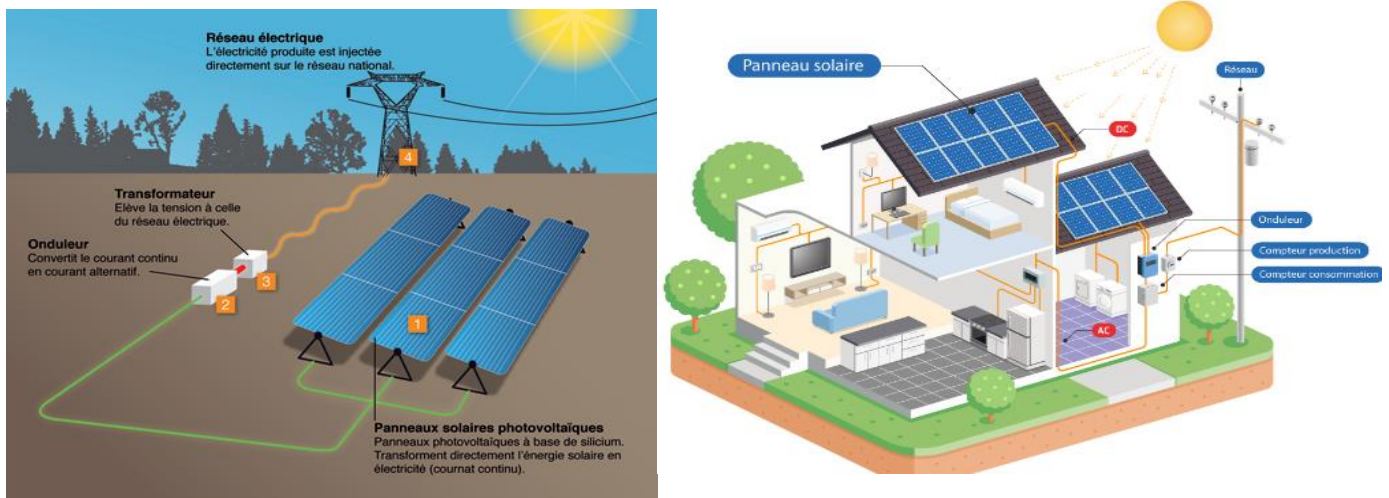
Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque sont nombreuses elles peuvent être divisées en deux catégories :

- Les applications autonomes c'est-à-dire non-raccordées à un réseau électrique comme les satellites artificiels, les appareils portables, les relais de télécommunications, les balises maritime et l'électrification rurale des sites isolés [23].



**Fig. I.10** : quelques applications autonomes de l'énergie solaire photovoltaïque [24.25].

- Les applications raccordées au réseau public de distribution d'électricité comme les systèmes attachés à un bâtiment consommateur, les parcs (centrale) photovoltaïque du sol [23].



**Fig. I.11** : quelques applications raccordées au réseau public de Distribution d'électricité [26.27].

## I.10. Conclusion

Ce chapitre est partagé en deux parties, en premier lieu nous avons présenté un aperçu sur l'historique de l'énergie photovoltaïque, le principe de base de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, l'exploitation de la caractéristique courant-tension de la cellule pour calculer ses différents paramètres physiques ainsi que les différentes filières photovoltaïques en couches minces. En second lieu, nous avons présenté les différentes structures d'une cellule solaire en couches minces réalisée au laboratoire. Cette étude bibliographique nous a permis de spécifier le semiconducteur le plus promoteur pour la fabrication des cellules solaires en couches minces, Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS), sous sa forme chalcopyrite.

## **Référence bibliographique**

- [1] Cours\_Hadadi, Energie solaire photovoltaïque, univ-setif.
- [2] Énergie solaire : l'Inde inaugure la plus grande centrale photovoltaïque actuelle Solstis.
- [3] Zairi Soufiane, Boubiada Slimane, Etude et dimensionnement d'un centrale photovoltaïque, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019/2020.
- [4] Alili Azouaou, Conception et réalisation d'une carte de gestion d'un système photovoltaïque par carte Arduino Due, mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2016/2017.
- [5] Zaouache Rafik, Etude en deux dimensions (2d) des performances de la cellule solaire substrate a base de cigs, mémoire présenté pour obtenir le diplôme de magister, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2014.
- [6] Labadi Ahmed, Etude et simulation d'une cellule solaire en CIGS par Scaps, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2021/2022.
- [7] Souici Fatma-Zohra « Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe<sub>2</sub>). Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009.
- [8] Naïma Touafek , Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn<sub>1-x</sub>GaxSe<sub>2</sub>, Thèse doctorat en sciences en électronique, Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2015.
- [9] Arras Aida, Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si, master en physique, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, 2018.
- [10] Babouri Nadia, Caractérisation des cellules photovoltaïques sous forte concentration en conditions réelles, Université Saad Dahleb de Blida, 2020/2021.
- [11] Djellout Thileli, Makour Sarah, Etude de l'effet de la température et de l'éclairement sur les performances des modules photovoltaïques à base de silicium amorphe, mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2017.
- [12] Effects of the series resistance on the I-V characteristic. | Download Scientific Diagram (researchgate.net).
- [13] Effect of different shunt resistances (Rsh) on the I-V curve of the Download Scientific

Diagram (researchgate.net).

- [14] Labadi Ahmed, Etude et simulation d'une cellule solaire en CIGS par Scaps, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2021/2022.
- [15] S.J. Hou, J., Xi, J., Kampas, F., Bae, S., Fonash, Non-local recombination in tunnel junctions of multijunction amorphous Si alloy solar cells, in: Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 336 (1994) 717–722.
- [16] Le développement de la filière photovoltaïque française, Source : Mission et étude Pricewaterhouse Coopers, état de la filière photovoltaïque en France, 2010.
- [17] Thomas Mambrini, Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, 2014.
- [18] Troudi Ikram, Simulation numérique d'une cellule solaire Tandem (4T) Pérovskite/Si, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2021/2022.
- [19] Daranféd Ouarda, Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , Thèse présentée pour obtenir le diplôme de doctorat en sciences en physique, Université Mentouri de Constantine 1, 2013.
- [20] Kihal Imen, Etude et simulation des cellules solaires photovoltaïques à base de silicium, Université Mohamed Seddik Ben Yahia-Jijel, 2019/2020.
- [21] Khadidja Boala, Faiza M'hamedou, Analyse des performances de la centrale photovoltaïque de 20 MW d'Adrar, Université Adrar, 2021.
- [22] Dari Abdelouhab, Babeker Mansour, Etude d'une installation photovoltaïque pour une habitation domestique, master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021.
- [23] Chellali Hichem, Salama Amina, Etude d'une cellule solaire à base de CIGS ( $\text{ZnS}/\text{CdS}/\text{ZnSe}$ ), mémoire master, Université Blida, 2017/2018.
- [24] Les autres applications autonomes du photovoltaïque (lepanneausolaire.net).
- [25] Centrale photovoltaïque fonctionnement | Groupe Roy Énergie (gre-enr.fr).
- [26] Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque - Recherche (bing.com).
- [27] Panneaux solaires, Autoconsommation photovoltaïque Nergis .

# *Chapitre*

## *II*

## II.1. Introduction

Une cellule solaire en CIGS est constituée par la déposition successive de plusieurs matériaux en couches minces sur un substrat. Dans ce chapitre nous allons présenter les propriétés physiques des semi-conducteurs en CIGS, CdS et ZnO constituant la cellule solaire à base de CIGS. Le rendement de conversion photovoltaïque dans les cellules solaires photovoltaïques en CIGS dépend largement des propriétés des matériaux qui la constituent. La bonne compréhension des matériaux constituant la cellule solaire à base du CIGS est donc nécessaire dans le but d'optimiser cette cellule.

Dans ce chapitre, on tâchera de présenter le CIGS, donner une idée générale sur ces propriétés et leurs éléments de base, puis nous montrerons ce qu'est une couche mince et les techniques de dépôt des couches minces à base de CIGS, ensuite nous décrivons la structure d'une cellule à couche mince CIGS.

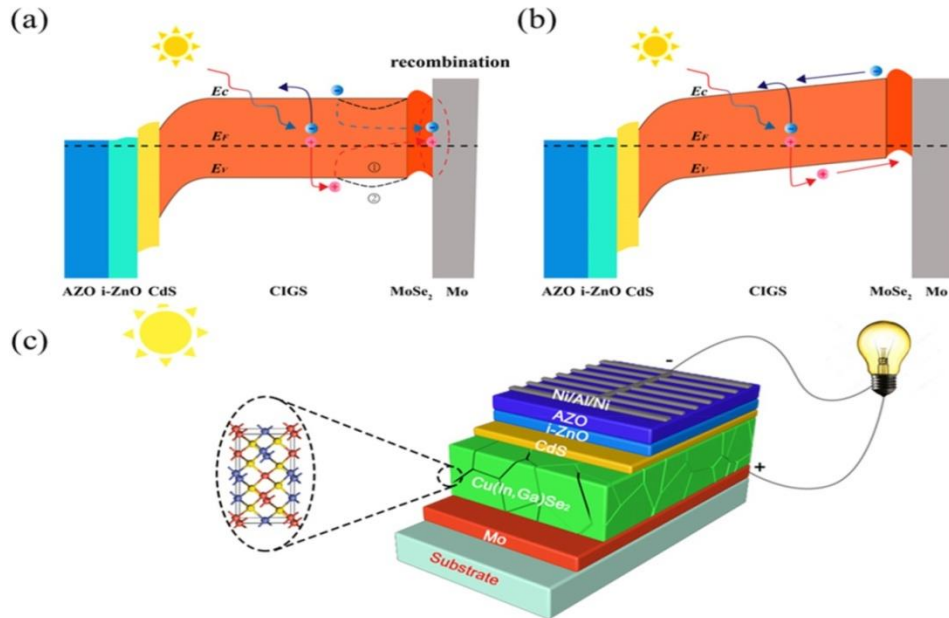
## II.2. L'histoire des cellules solaires à base de CIGS

L'histoire des cellules solaires à films minces de CIGS est marquée par des avancées significatives, stimulées par l'évolution du paysage technologique. Ces cellules solaires à films minces ont trouvé des applications généralisées dans divers domaines, notamment l'aérospatiale, l'équipement électronique, la construction et les secteurs environnementaux. Parmi la myriade de matériaux photovoltaïques (PV), le Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS) se distingue comme un candidat très prometteur, offrant des attributs remarquables tels qu'une stabilité exceptionnelle, une bande interdite ajustable, une résilience à l'annealing thermique et une efficacité de conversion d'énergie accrue [1].

La **fig. II.1** illustre les principes fondamentaux et les structures des cellules solaires à films minces de CIGS, qui ont subi une évolution substantielle depuis leur création en 1975. Notamment, l'efficacité des cellules solaires CIGS a connu une amélioration significative au fil des ans. Ce progrès doit beaucoup à des développements cruciaux tels que l'introduction de la couche tampon de sulfure de cadmium (CdS) par dépôt chimique en solution (CBD) et le perfectionnement du processus en trois étapes [1].

La découverte et la mise en œuvre du processus en trois étapes ont été déterminantes, permettant à l'efficacité des cellules solaires CIGS de dépasser le seuil des 19 %, comme le montre la **fig. II.2**. De nombreux chercheurs ont contribué à cette augmentation d'efficacité, notamment des institutions telles que le Centre de recherche en énergie solaire et hydrogène (ZSW), les Laboratoires fédéraux suisses pour la science des matériaux et de la technologie

(EMPA), le National Renewable Energy Laboratory (NREL) et Solar Frontier. Grâce à des efforts collaboratifs et à des recherches incessantes, l'efficacité des cellules solaires à films minces de CIGS a dépassé le seuil des 20 %, marquant ainsi un exploit remarquable dans le domaine de la technologie des énergies renouvelables [1].

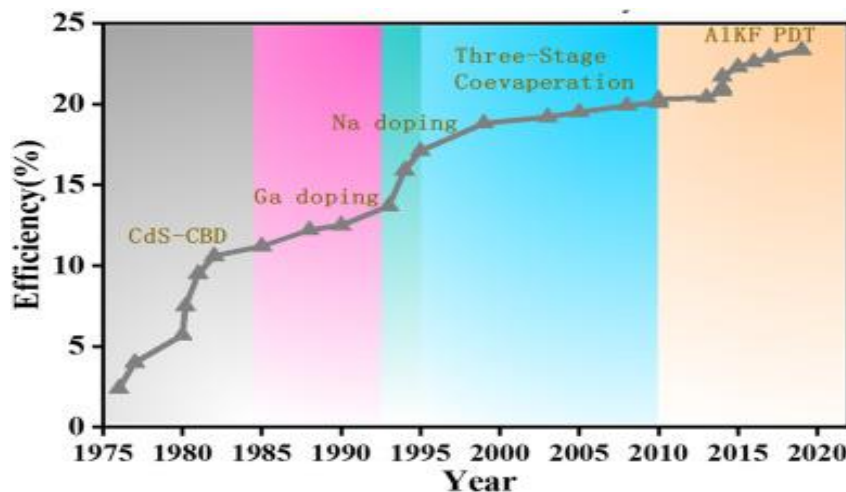


**Fig.II.1** : Graphique de bande d'énergie des cellules solaires à films minces de CIGS [1].

(a) Processus de transfert de charge des cellules solaires à films minces de CIGS.

(b) Processus de transfert de charge de la structure de gradation de Ga.

(c) Structure des cellules solaires à films minces de CIGS.



**Fig.II.2** : Progrès de l'efficacité en laboratoire dans les cellules solaires CIGS de 1975 à 2022 [1].

Depuis que le rôle positif des métaux alcalins pour les cellules solaires CIGS a été démontré, l'efficacité des cellules solaires à films minces certifiées a atteint 23,35 % grâce à des expériences continues. Les éléments métalliques alcalins sont généralement considérés comme un composant significatif dans l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires à films minces de CIGS, tels que le sodium (Na), le potassium (K), le rubidium (Rb) et le césium (Cs) [1]. En 1993, Hedstrom et al ont fait la première observation de la manière dont la diffusion involontaire de Na à partir d'un substrat en verre de soude-craie (SLG) affectait les performances des dispositifs CIGS. Le phénomène a été attribué à l'ajout de sodium, qui a augmenté la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le facteur de remplissage (FF), améliorant ainsi l'efficacité du dispositif. Depuis lors, l'introduction délibérée de métaux alcalins par PDT a été utilisée pour améliorer l'efficacité des cellules, réalisant ainsi des percées successives dans les records d'efficacité des cellules en peu de temps. La percée en efficacité obtenue avec l'ajout de métaux alcalins. La découverte selon laquelle l'efficacité de la cellule atteignait 20,4 % grâce à la PDT de K sur un substrat flexible en 2013 a démontré la performance supérieure de K par rapport à Na. Cela a été suivi de tentatives de dopage avec des métaux alcalins plus lourds. Une efficacité de cellule de 22,6 % a été atteinte par un traitement post-déposition au fluorure de rubidium à haute température en 2016, ainsi que le record du monde actuel de 23,35 % en utilisant un traitement post-déposition au fluorure de césium [1]. Selon le type de métal alcalin utilisé, l'effet dans la couche d'absorbeur varie légèrement, allant de l'augmentation de la concentration de trous et de l'amélioration de la qualité des grains pour les métaux alcalins légers, à la modification de la bande interdite de surface et à la réalisation de modifications de la couche de surface et du tampon pour les métaux alcalins lourds. Avec l'augmentation de la taille des métaux alcalins, il est moins probable que les métaux alcalins plus lourds soient incorporés dans l'intérieur des grains (GI). Plus le rayon ionique est grand, plus il est difficile de migrer à travers VCu et de les remplacer. Comparé au dopage au sodium qui génère des défauts ponctuels, les éléments métalliques alcalins plus lourds ont plus de probabilité de former des composés  $AlkInSe_2$  avec des concentrations approximativement négligeables de rubidium et de césium dans l'intérieur des grains [1].

Il existe un large champ d'applications pour les cellules solaires CIGS. Cette revue présente plusieurs stratégies de dopage pour le sodium, mais se concentre également sur l'exploration des effets positifs du dopage avec différents éléments alcalins sur les cellules CIGS et les mécanismes qui les sous-tendent, et discute de la manière de mettre en valeur les performances des différents métaux alcalins et de leurs effets sur les dispositifs afin d'atteindre une efficacité améliorée des cellules solaires [1].



### II.3. Propriétés du matériau CIGS

Le rendement d'une cellule solaire à base de CIGS est fortement dépendant des propriétés du matériau absorbeur. Comme dans le cas d'autres semi-conducteurs, la structure cristalline du CIGS ainsi que sa composition peuvent fortement influencer sur ses propriétés optiques et électroniques. La bonne compréhension des propriétés physiques de ce matériau est donc nécessaire dans le but d'avoir de très bonnes performances d'un dispositif électronique à base de CIGS [2].

#### II.3.1. Généralités sur les éléments de base du matériau CIGS

La première cellule solaire à base de semi-conducteur a été réalisée en 1876 par l'élaboration d'une couche de sélénium entre deux électrodes. Mais la réalisation des cellules solaires en couches minces à base des matériaux à structures chalcopyrites suite à l'élaboration de cellules photovoltaïques en CuInSe<sub>2</sub>/CdS par S. Wagner et al. en 1974, et ces travaux ont abouti à des rendements de 12% à partir d'un monocristallin de CuInSe<sub>2</sub>. Des paramètres physiques et chimiques des éléments (Cu, In, Ga, Se) utilisés pour l'élaboration des couches CuInSe<sub>2</sub> et Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> sont groupés dans le tableau II.1 [2].

Paramètres	Cu	In	Ga	Se
Masse atomique	63.546	144.82	69.74	78.96
Configuration électronique	[Kr] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	[Kr] 3d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup>	[Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup>	[Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>
Masse volumique à 300 K (g/cm <sup>3</sup> )	8.96	7.31	5.1	4.79
Température de fusion (°C)	1083	156	29.78	217
Température d'ébullition (°C)	2595	2000	2403	688
Conductivité électronique (10 <sup>6</sup> /cm.Ω)	0.596	0.116	0.0678	10 <sup>-12</sup>
Conductivité thermique (W/cm.K)	4.01	0.816	0.0678	0.0204
Potentiel d'ionisation (1 <sup>er</sup> ) (eV)	7.726	7.786	5.999	9.752
Electronégativité de Pauling	1.9	2	1.81	2.4
Rayon atomique (nm)	0.128	0.162	0.161	0.14

**Tab.II.1** : Propriétés physiques et chimiques des éléments Cu, In, Ga et Se [2].

Les deux semi-conducteurs chalcopyrites (CGS et CIGS) appartiennent à la première famille qui est composée d'un élément de la 1ère colonne, d'un élément de la 3ème colonne et d'un élément de la 6ème colonne du tableau périodique des éléments chimiques c'est -à-dire I-III-VI 2 [2].

I	III	VI
	$^{10.81}_{5}B$	$^{15.99}_{8}O$
	$^{26.98}_{13}Al$	$^{32.065}_{16}S$
$^{63.546}_{29}Cu$	$^{69.74}_{31}Ga$	$^{78.96}_{34}Se$
	$^{114.82}_{49}In$	$^{127.60}_{52}Te$

Tab.II.2 : La classification périodique des éléments constituant la famille I-III-VI 2 [2].

### II.3.2. Structure cristalline et différents alliages dérivés du CuInSe<sub>2</sub>

#### II.3.2.1. Structure cristalline

Le CuInSe<sub>2</sub> et le CuGaSe<sub>2</sub> sont des matériaux qui forment l'alliage de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>, appartiennent à la famille I-III-VI<sub>2</sub> qui possède une structure tétragonale de chalcopyrite. Les chalcopyrites basées sur le CuInSe<sub>2</sub> ont une structure cubique zinc blende, également appelée sphalérite comme le ZnSe. Chaque atome de S'est lié tétraédrique ment à deux atomes de Cu et d'In, tandis que chaque atome de Cu ou d'In est entouré par quatre atomes de Se. La longueur de la liaison Cu-Se est de et celle de In-Se est de, ce qui donne une distorsion tétragonale de l'unité de. Dans le cas du CIGS, les sites des atomes du groupe III sont donc occupés par des atomes d'In ou de Ga, dans des proportions dépendant de la composition de l'alliage [3].

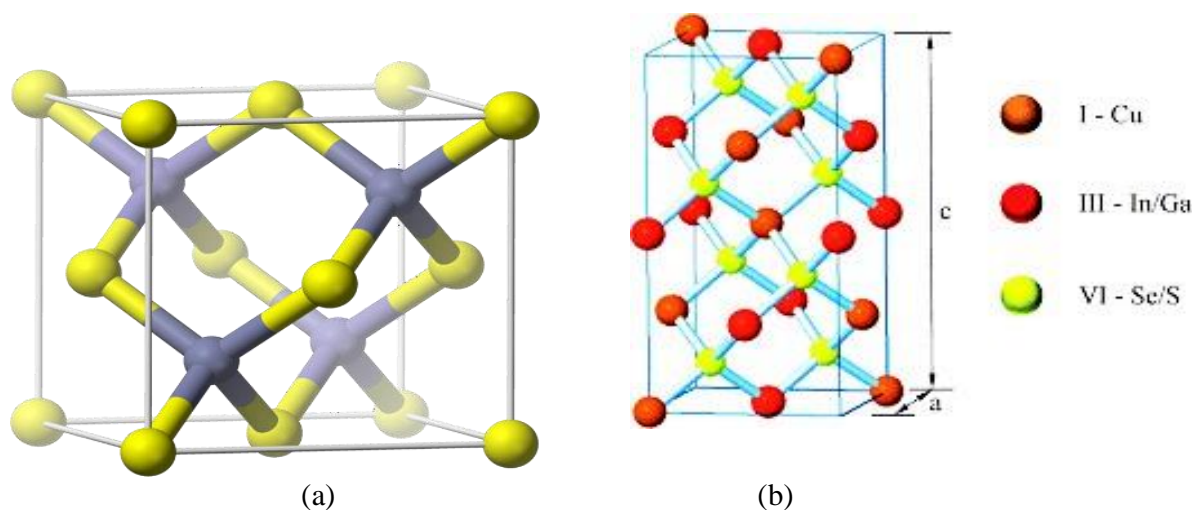
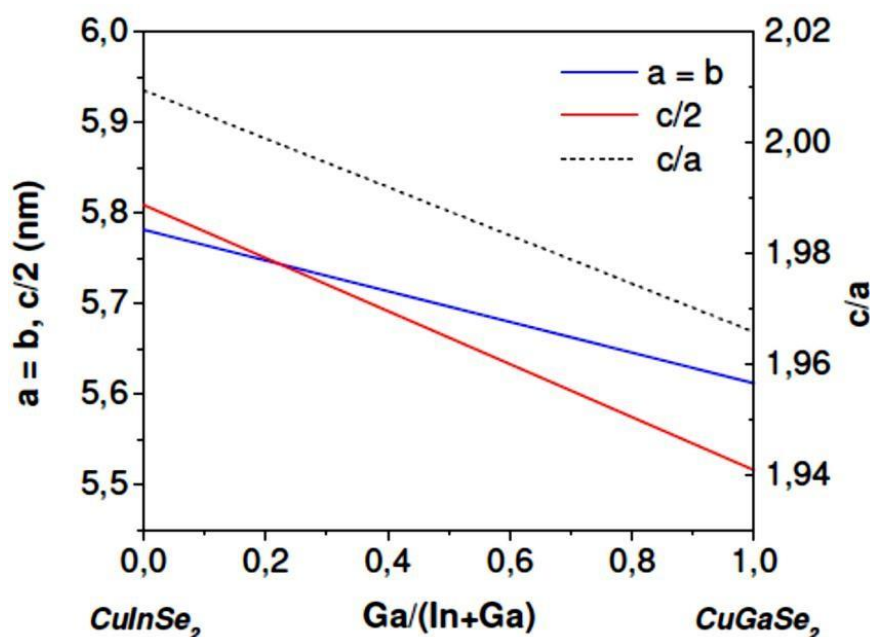


Fig.II.3 : (a) Structure de zinc-blende, (b) Structure de chalcopyrite du CuInSe<sub>2</sub> [3].

### II.3.2.2. Les différents alliages dérivés du $\text{CuInSe}_2$

Les différents alliages dérivés du  $\text{CuInSe}_2$  sont groupés sous le terme  $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$  ou est la composition en Ga représentant le taux d'atomes de gallium qui remplacent les atomes d'indium dans la structure. Les différentes solutions solides quaternaires de type  $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$  ont été caractérisées par de nombreux auteurs. L'évolution des paramètres de mailles suit la loi de Vegard, c'est-à-dire que les paramètres évoluent linéairement entre les valeurs des deux ternaires associés. L'évolution des paramètres de maille du quaternaire  $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$  est représentée sur la **Fig. II.4** [4].



**Fig.II.4** : Evolution des valeurs de paramètres de maille a et c, et du rapport c/a en fonction du rapport  $\text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$  pour  $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$  [4].

Le diagramme présenté sur la **figure (II.5)**, représente l'évolution de la largeur de la bande interdite en fonction du paramètre de maille a pour les éléments  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CuGaSe}_2$ ,  $\text{CuInS}_2$ ,  $\text{CuGaS}_2$ . Ce diagramme montre que la largeur de la bande interdite par exemple de jusqu'à pour les deux composés  $\text{CuInSe}_2$  et  $\text{CuGaS}_2$  respectivement, et même pour le  $\text{CuGaSe}_2$ , ainsi, couvrant la plupart du spectre visible [4].

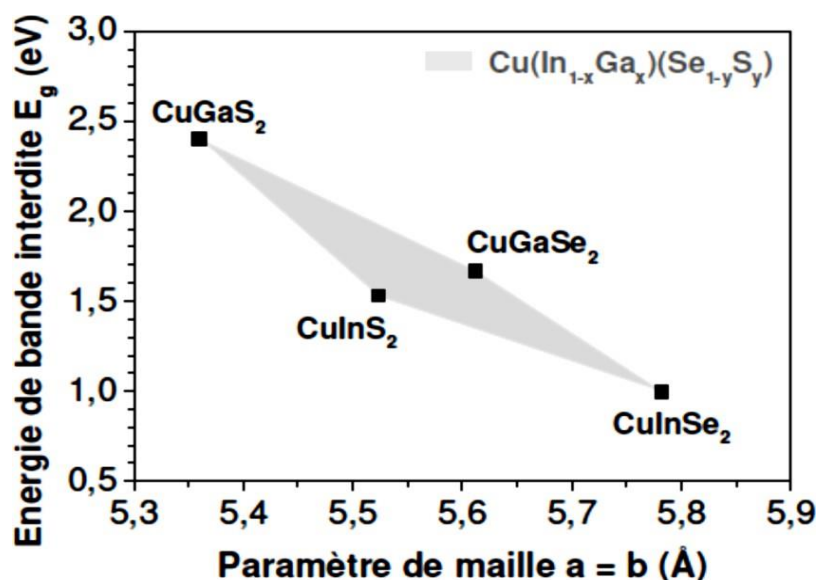


Fig.II.5 : Bande interdite  $E_g$  en fonction de la constante de réseau  $a$  des éléments CuInSe<sub>2</sub>, CuGaSe<sub>2</sub>, CuInS<sub>2</sub> et CuGaS<sub>2</sub> [4].

#### II.4. Propriétés électriques

##### ▪ Dopage

Le CIGS utilisé dans les cellules standard est de type p. Ce dopage est dû à la présence de défauts cristallins générant des états accepteurs (dopage intrinsèque). Dans le cas du CIGS, ces valeurs varient dans de faibles proportions en fonction du taux de Ga. Les niveaux accepteurs sont principalement dus aux lacunes de cuivre (VCu) et d'indium (VIn), ainsi qu'aux substitutions d'indium par le cuivre (CuIn). Cependant le dopage p du CIGS est essentiellement lié aux VCu pour deux raisons. Premièrement, ils génèrent un niveau accepteur très proche (0.03 eV) du maximum de la bande de valence. Deuxièmement, leur énergie de formation est la plus favorable ( $E_f = 0.6\text{eV}$ ). Quand aux défauts générant des niveaux donneurs (InCu et CuIn), ils possèdent une énergie de formation beaucoup élevée que les VCu. C'est donc l'abondance de ce dernier défaut dans le CIGS qui est à l'origine de son dopage p [5].

#### II.5. Propriétés optiques

Si le CIGS est utilisable dans des dispositifs photovoltaïques en couches minces, c'est parce qu'il possède un gap direct. De ce fait, l'absorption des photons ayant une énergie proche du gap ne nécessite pas l'intervention de phonons et il en résulte un coefficient d'absorption très élevé, plus grand que  $10^5\text{cm}^{-1}$  dans le domaine du visible et le proche infrarouge [6]. L'équation de conversion des longueurs d'ondes du spectre solaire en énergie est la suivante :

$$E = \frac{hc}{1.6 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda} \quad (1)$$

Avec

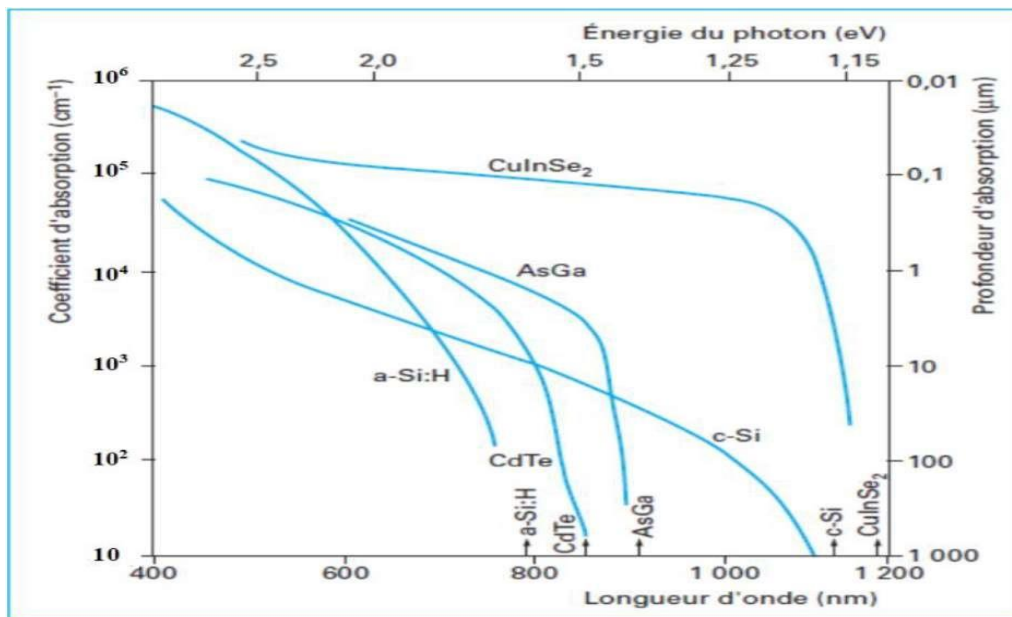
$E$  : l'énergie d'irradiation en eV.

$h$  : la constante de Planck, elle est égale à  $6.62 \times 10^{-34}$  J.s.

$c$  : la vitesse de la lumière dans le vide, elle est égale à  $3 \times 10^8$  m s<sup>-1</sup>.

$\lambda$  : la longueur d'onde incident en m.

La valeur de l'énergie du gap du CuInSe<sub>2</sub> permet d'absorber les photons ayant des longueurs d'onde inférieures à 1192 nm, ce qui indique que la gamme d'absorption de ce ternaire sont située dans la région optimale du spectre solaire [6].

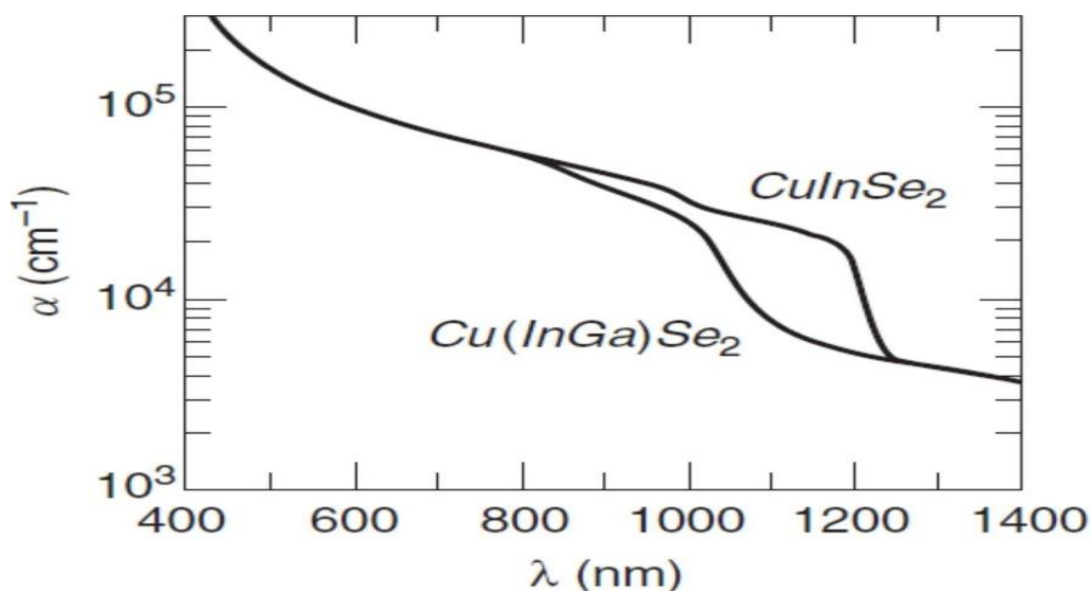


**Fig.II.6** : Coefficient d'absorption des différents matériaux [6].

Rappelons que le CuInSe<sub>2</sub> est un semi-conducteur à gap direct, la relation entre son gap d'énergie  $E_g$  et son coefficient d'absorption  $\alpha$  est la suivante :

$$\alpha = \frac{A(E-E_g)^{\frac{1}{2}}}{E} \quad (2)$$

Avec  $A$ , une constante de proportionnalité qui dépend des densités des états liés à l'absorption de photon,  $E$  l'énergie d'irradiation. La **Fig.II.7** représente le coefficient d'absorption d'une couche mince en CuInGaSe<sub>2</sub> avec  $x \equiv Ga/(In + Ga) = 0$  et 0.3 en fonction de longueur d'onde [6].

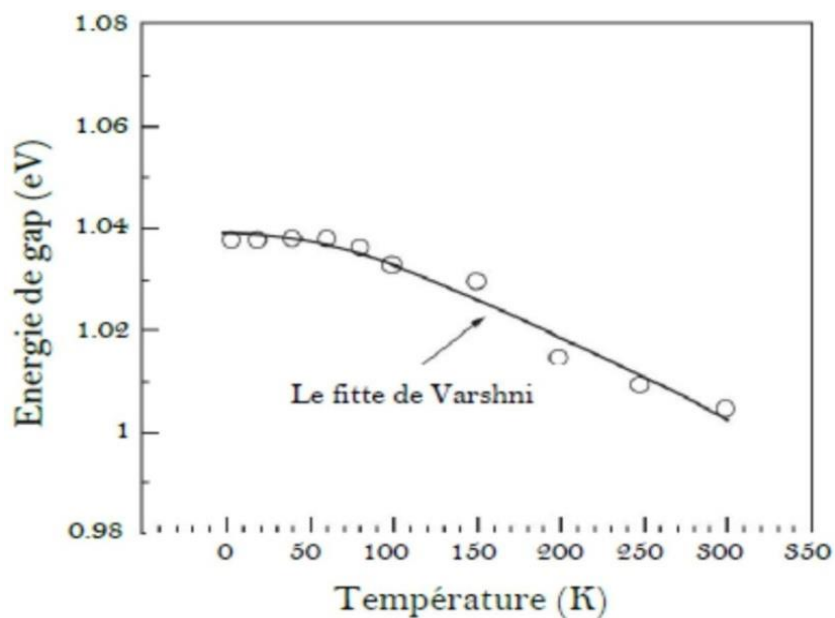


**Fig.II.7 :** Coefficient d'absorption de  $\text{CuInSe}_2$  et  $\text{Cu(InGa)Se}_2$  en fonction de longueur d'onde [6].

Le gap d'énergie de ces semi-conducteurs est également une fonction de la température (**Fig. II.8**), il peut être décrit approximativement par la relation proposée par Varshni :

$$E_g(T) = E_g(0) - \left(\frac{\alpha T^2}{T+\beta}\right) \quad (3)$$

Où  $E_g(0)$  est le gap à 0 K,  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes spécifiques à chaque semiconducteur. Dans le cas du  $\text{CuInSe}_2$ , ils sont respectivement égaux à  $3.6 \times 10^4 \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$  et 350 K [6].



**Fig.II.8:** Variation de l'énergie du gap de  $\text{CuInSe}_2$  en fonction de la température [6].

Notons aussi la relation suivante entre le coefficient d'extinction et l'indice de réfraction :

$$N = n + ik \quad (4)$$

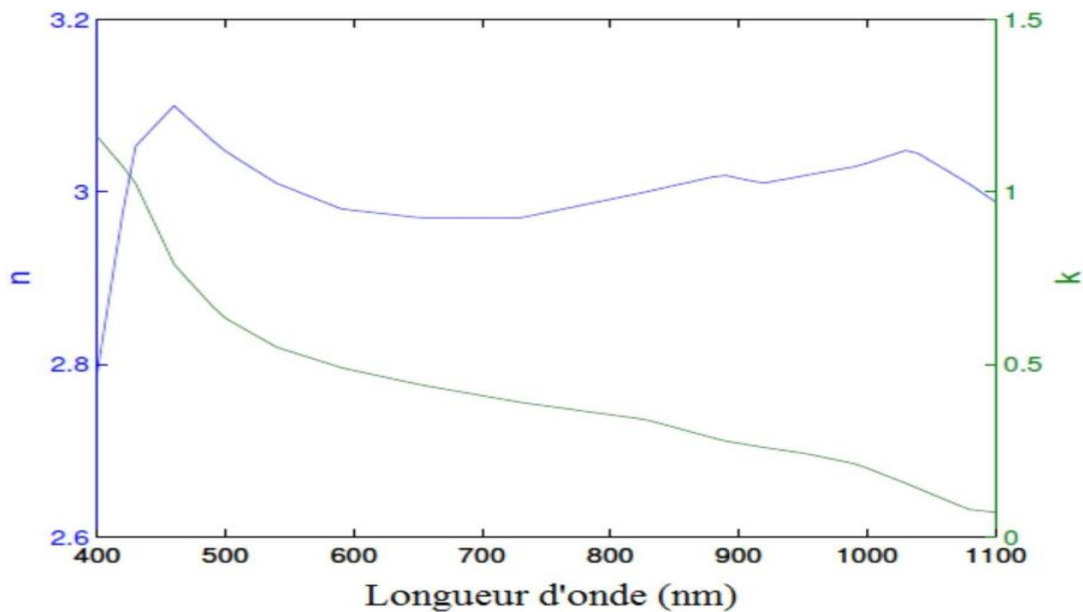
$N$  : représente l'indice optique complexe.

$k$  : est le coefficient d'extinction du matériau traduisant l'absorption du rayonnement par le matériau.

$n$  : est l'indice de réfraction.

C'est le rapport entre la vitesse de propagation de la lumière dans le vide et la vitesse dans le milieu étudié [6]. Le coefficient d'extinction  $k$  est lié au coefficient d'absorption  $\alpha$ , pour chaque longueur d'onde  $\lambda$ , par la relation :

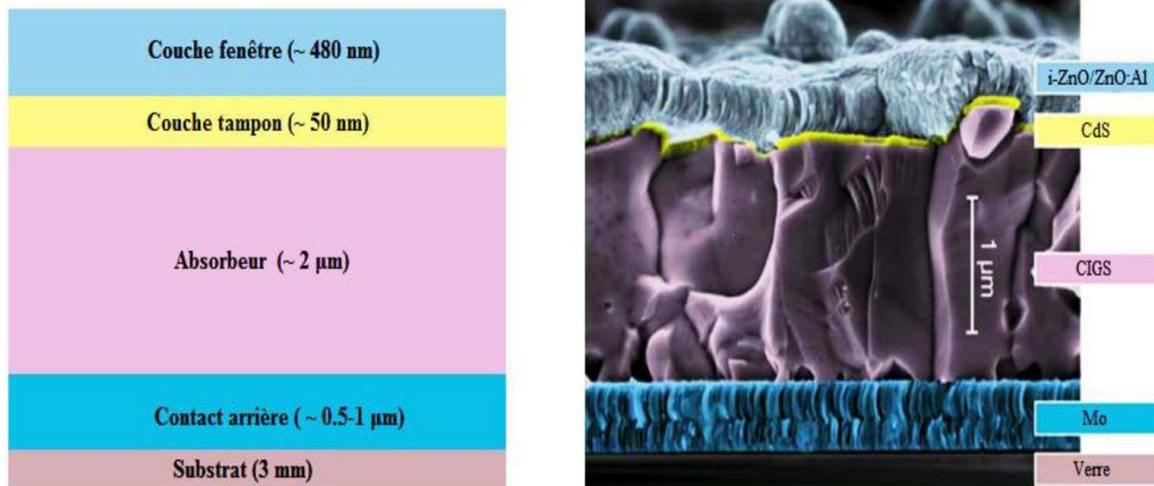
$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (5)$$



**Fig.II.9** : L'évolution de l'indice de réfraction  $n$  et le coefficient d'extinction  $k$  du CIGS en fonction de la longueur d'onde [6].

## II.6. Structure d'une cellule à couche mince CIGS

II Dans sa structure la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. La **Fig. II.10** présente la structure standard d'une cellule à base de Cu (In, Ga) (Se) 2 [7].



**Fig. II.10 :** (a) Schéma de l'empilement typique des cellules solaires à base de CIGS, (b) Image de la tranche d'une cellule en CIGS obtenue par un microscope électronique à balayage (MEB) [7].

### II.6.1 Substrat

Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodo-calcique, qui présente toutes les propriétés requises. Il contient notamment du sodium, qui diffuse vers le CIGS lors de l'étape de recuit. Son effet bénéfique sur le fonctionnement de la cellule a été démontré par de nombreux auteurs [8].

### II.6.2 Contact arrière

Le contact arrière, qui constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque, est un métal déposé sur la partie inférieure de l'absorbeur dont le rôle est de collecter les porteurs à partir de l'absorbeur et de les livrer à la charge externe. Il doit donc, répondre à certains critères chimiques, mécaniques et économiques. De nombreux métaux ont été étudiés comme le Tungstène, le Molybdène, le Chrome, le Tantale, le Manganèse, l'Or, l'Aluminium, l'Argent et le cuivre. Parmi ces métaux, le Molybdène qui est le plus couramment utilisé comme contact arrière des cellules solaires CIGS par les laboratoires de recherche et en industrie, en raison de sa stabilité relative aux températures élevées rencontrées lors du procédé de fabrication du CIGS (de l'ordre de 550 à 600° C), et de sa faible résistance de contact avec le CIGS. Son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm [2].

La méthode de dépôt utilisée est la pulvérisation cathodique. La valeur typique de la résistivité de Mo est de l'ordre  $5 \times 10^{-5}$  cm ou moins. De plus, il ne réagit pas avec le CIGS ou y diffuse. En effet, le Mo peut réagir avec le Se lors du dépôt de CIGS pour former une couche



de quelques nanomètres du MoSe<sub>2</sub>. Par conséquent, la structure CIGS/Mo devient alors CIGS/MoSe<sub>2</sub>/Mo. Le Mo Se<sub>2</sub> est un semi-conducteur possédant un gap de 1,41 eV, il est plus élevé que celui du CIGS est permet ainsi, de diminuer les recombinaisons à l'interface de ces deux couches. De plus, il a pour effet de donner un comportement ohmique à l'hétéro contact CIGS/Mo. Mais le problème posé récemment pour le Mo est sa réflectivité relativement faible qui devient un inconvénient lorsque des absorbeurs avec une épaisseur réduite (< 2 μm) sont utilisés. c.à.d. dans le cas où les photons incidents, avec des énergies plus grandes que la largeur de bande, ne peuvent pas être absorbés dans un seul passage dans l'absorbeur [2].

### **II.6.3 Couche absorbeur**

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe dont la valeur soit de l'ordre de 1.1-1.7 eV. Sa conductivité doit être de type p, et de l'ordre de 1.10<sup>-2</sup> (Ωcm<sup>-1</sup>) [9].

### **II.6.4 Couche tampon**

La couche tampon est un semi-conducteur ayant une conductivité de type n dont le gap doit être supérieur à celui de l'absorbeur. Deux rôles lui sont majoritairement attribués : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice. Du point de vue électrique, cette couche adapte la largeur de la bande interdite entre l'absorbeur et la couche fenêtre et limite les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. Elle permet également de protéger la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de ZnO, qui peut engendrer des défauts à la surface du CIGS. Plusieurs semi-conducteurs de type n dont les bandes interdites sont entre 2.0 et 3.6 eV ont été appliquées comme tampon pour les cellules solaires CIGS [9].

Dans notre travail on utilise la couche tampon 3C-SiC, le 3C-SiC est connu sous le nom de carbure de silicium cubique, est une structure cristalline du carbure de silicium (SiC). C'est l'un des polytypes de SiC, qui sont des variations dans l'arrangement des atomes de silicium et de carbone dans le réseau cristallin. Elle a une large bande interdite d'énergie, ce qui signifie qu'il faut plus d'énergie pour déplacer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction par rapport au silicium. Cette propriété permet aux dispositifs SiC de fonctionner à des températures plus élevées et de gérer des tensions plus élevées, ce qui les rend idéaux pour les applications d'électronique de puissance [9].

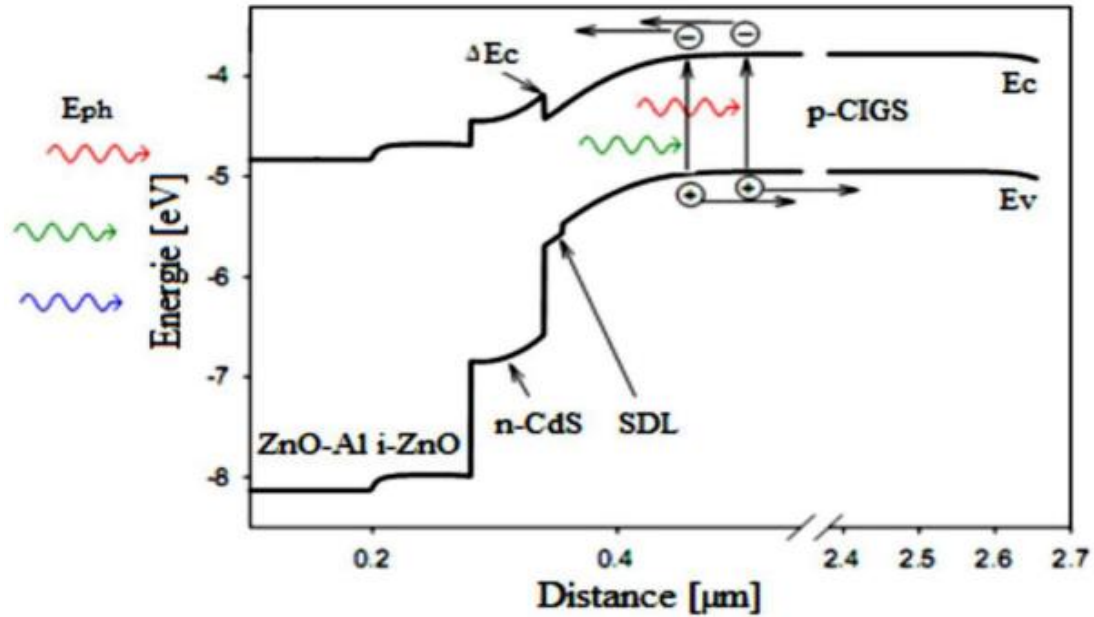
### II.6.5 Couche fenêtre

La couche fenêtre doit être à la fois transparente, afin de laisser suffisamment de lumière à la région de jonction et la couche absorbante du dispositif, et conductrice pour permettre le transport du photo courant généré au circuit extérieur sans trop de pertes. Cette couche fenêtre est constituée d'oxyde transparent conducteur (TCO), sur lequel une fine grille métallique doublée (Ni-Al) est déposée de façon à réduire la résistance série de la couche fenêtre et de collecter les charges générées par le dispositif. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous-jacente du TCO. Le TCO, généralement utilisé pour les cellules CIGS, est l'oxyde de Zinc (ZnO) déposé par pulvérisation cathodique, mais l'oxyde d'Indium dopé à l'étain (ITO) peut également être rencontré. Une bicouche ZnO est souvent utilisée pour le contact frontal transparent [3].

La première couche est une couche mince de ZnO intrinsèque (*i*-ZnO), qui est typiquement de (50 - 100 nm) d'épaisseur et très résistive. Elle sert à limiter la formation de court-circuit dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon. La seconde couche est fréquemment du ZnO dopé à l'Aluminium (ZnO : Al), mais d'autres dopants comme le Bore (ZnO : B) ou le Gallium (ZnO : Ga) existent aussi. L'épaisseur et le dopage de cette couche sont ajustés de façon à combiner transparence et conductivité. La bande interdite de la couche fenêtre doit être aussi élevée et aussi mince que possible afin de maintenir une faible résistance série. Le ZnO et le ZnO : Al ont respectivement des bandes d'environ 3.2 eV et 3.6 à 3.8 eV [3].

### II.6.6 Jonction p-n

La jonction p-n dans les cellules solaires CIGS est formée entre le semi-conducteur type p (CIGS) et le type n. La différence des affinités électroniques des deux matériaux constituant la jonction se traduit par une discontinuité de bande interdite. La courbure de la bande de conduction ou  $\Delta E_c$  (Conduction Band Offset) entre le CIGS et le CdS est par convention positive, ce qui signifie que la bande de conduction de CdS est supérieure à celle de CIGS.



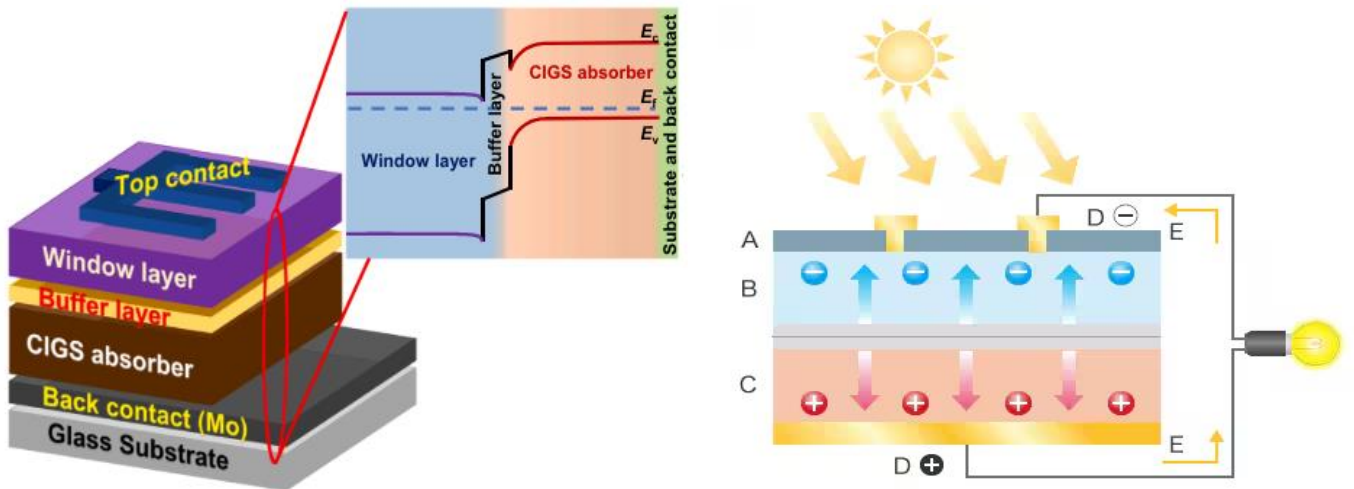
**Fig. II.11:** Structure de bande d'une cellule solaire Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>.

La valeur optimale de la courbure de la bande de conduction est  $\Delta E_c = 0.3$  eV est obtenue pour un gap de CIGS = 1.15 eV. Une courbure de la bande de conduction supérieure à 0.5 eV crée une barrière forte pour les électrons photo-générés limitant ainsi, le transport du courant. En revanche, une courbure de la bande de conduction nulle ou négative conduit à une augmentation de la recombinaison à l'interface, ce qui limite la tension de la cellule. La présence d'une couche de type inversé (type n) identifiée comme étant une couche de défauts de surface ou SDL (Surface Defect Layer) à la surface du matériau CIGS était rapportée par plusieurs auteurs. Elle possède un gap plus large que le CIGS, ce qui permet de réduire la recombinaison à l'interface CdS/CIGS et contribue ainsi à l'amélioration des performances de la cellule [3].

## II.7. Principe de fonctionnement physique d'une cellule solaire en CIGS

L'absorption des photons est réalisée par le CIGS. C'est un composé I-III-VI<sub>2</sub> quicristallise dans la structure chalcopyrite et dont le rapport des éléments III (In/Ga) permet d'ajuster le gap du matériau entre 1.04 eV et 1.68 eV. Son coefficient d'absorption ( $\alpha > 10^5 \text{cm}^{-1}$ ) et son gap direct lui permettent d'absorber la plus grande partie du spectre solaire après quelques micromètres d'épaisseur (2 – 4  $\mu\text{m}$ ). Ce semi-conducteur a un dopage de type P essentiellement lié à la présence de lacunes de cuivre (VCu) et à la présence de sodium. La séparation des charges est réalisée par une hétérojonction entre l'absorbeur CIGS de type P et une couche tampon habituellement à base de sulfure de cadmium (CdS) de type N déposée par bain

chimique. Du point de vue optique, la couche de CdS n'est pas idéale car avec un gap de 2.42 eV elle absorbe une partie des photons de longueur d'onde inférieure à 520 nm qui ainsi ne servent pas à la photo génération des porteurs. Cette jonction reste cependant celle qui permet d'obtenir les meilleurs rendements de conversion des cellules solaires en CIGS [10].



**Fig. II.12** : principe de fonctionnement d'une cellule solaire à base CIGS [11].

La collecte des porteurs préalablement séparés par la jonction P-N est assurée par des contacts conducteurs placés en face avant et arrière de la cellule. En face avant, c'est un oxyde transparent conducteur (TCO) qui permet de collecter les électrons, il est également appelé fenêtre optique car il doit être transparent sur la gamme spectrale utile à l'absorbeur. Ce contact est composé d'une couche d'oxyde de zinc intrinsèque (i-ZnO,  $E_g = 3.3$  eV) de 50 nm. Le contact en face arrière (contact arrière) assure la collecte des porteurs (trous) générés dans l'absorbeur et les injecte dans un circuit extérieur. Cette couche est habituellement constituée de molybdène. C'est une couche qui doit être conductrice, former un contact ohmique avec la couche absorbante, résister aux conditions de dépôt de l'absorbeur (haute température, atmosphère sélénisée) et être mécaniquement stable sur le substrat. Figure II.12 montre la caractéristique  $J$ - $V$  mesurée expérimentalement d'une cellule solaire en CIGS pour différentes compositions  $x=0, 0.24$  et  $0.61$  correspondantes à  $E_g = 1.02, 1.16$  et  $1.4$  eV respectivement. On remarque que  $V_{co}$  augmente et  $J_{cc}$  diminue lorsque  $E_g$  augmente [10].

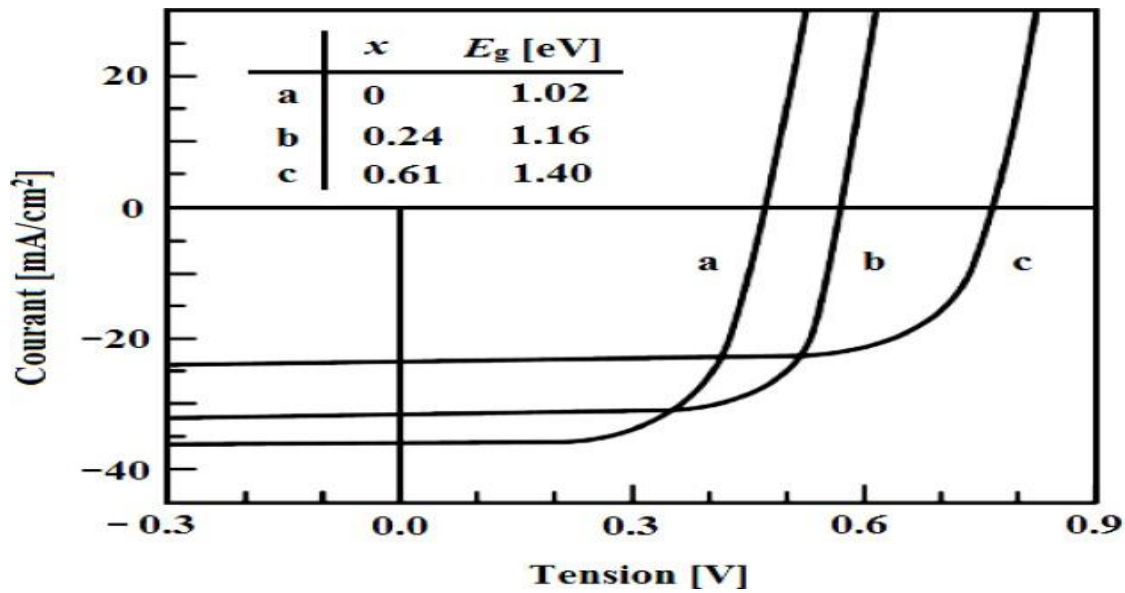


Fig. II.13: Caractéristique J-V mesurée d'une cellule solaire en CIGS pour trois énergies de bande interdite [12].

Le rendement quantique externe obtenu expérimentalement d'une cellule solaire en CIGS avec la variation de la composition Ga est montrée sur la figure (II.13). La réduction des performances avec une augmentation de la composition de Ga peut se justifier du fait de l'augmentation de la bande interdite de l'absorbeur et il y'aura moins de la contribution de photons, qui pénètrent plus profondément et générant le photo courant [13].

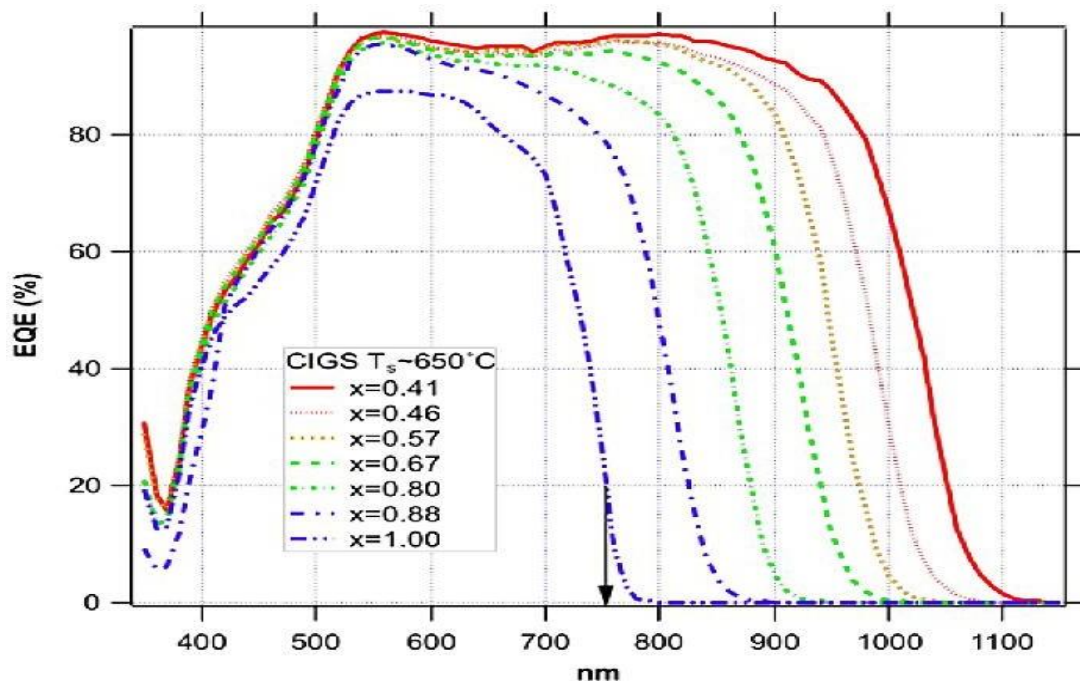


Fig.II.14 : Rendement quantique externe mesuré sur une cellule en CIGS pour différentes proportions x de Ga [13].

**II.8. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré aux cellules solaires à base de matériaux semi-conducteurs de type CIGS, il se compose en deux principales parties, la première consacrée à la description du matériau CIGS, et des propriétés de ses diverses compositions. Ceci est suivi par la deuxième partie on présente la structure d'une cellule à couche mince CIGS. Cette revue bibliographique nous a permis de cerner divers aspects concernant les semi-conducteurs les plus intéressants pour la fabrication de cellules solaires en couches minces, à savoir le di sélénium de cuivre et d'indium  $\text{CuInSe}_2$  et ses alliages avec Ga ( $\text{Cu (In, Ga) Se}_2$ ) sous sa forme chalcopyrite.

## Référence bibliographies

- [1] Advances in CIGS thin film solar cells with emphasis on the alkali element post-deposition treatment - ScienceDirect.
- [2] Afaf Allouche, Simulation des propriétés et performances des cellules photovoltaïques en couches minces à base des matériaux semi-conducteurs CIGS, mémoire master, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi, Bordj, 2020.
- [3] Elbar Mourad, Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco, Thèse d'obtention du diplôme de doctorat LMD en électronique, Université Mohamed Khider, Biskra, 2018.
- [4] A. Duchatelet, Synthèse de couches minces de Cu (In,Ga) Se<sub>2</sub> pour cellules solaires par électrodépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium, Thèse PhD, Université Lille 1, 2012.
- [5] Ben Ali Mourad, Rahmouni Seddik, Simulation et optimisation d'une cellule solaire à base de Cu (In,Ga) Se<sub>2</sub>, mémoire de master, Université Ahmed Draïa, Adrar, 03/30/2018.
- [6] Labadi Ahmed, Etude et simulation d'une cellule solaire en CIGS par scaps, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2021/2022.
- [7] ATEK Mourad, Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS, mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2013.
- [8] Naïma Touafek, Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub> Se<sub>2</sub>, Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri, Constantine, 2015.
- [9] Qu'est-ce que le 3C-SiC ? - Abrasifs supérieurs du Henan (silicon-carbides.com).
- [10] M. Tomassini, Synthèse de couches minces de molybdène et application au sein des cellules solaires à base de Cu ( In , Ga ) Se<sub>2</sub> co-évaporé, Thèse PhD, Université de Nantes, 2013.
- [11] Sinha, S., Nandi, D. K., Pawar, P. S., Kim, S. H., & Heo, J. (2020). A review on atomic layer deposited buffer layers for Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS) thin film solar cells: Past, present, and future. *Solar Energy*, 209, 515-537 .
- [12] A. Columbus, Design and optimization of copper indium gallium selenide solar cells

for lightweight battlefield application, master's thesis, Nav. Postgrad. Sch.

Monterey, Calif, 2014.

- [13] M. Contreras et al. Improved Energy conversion efficiency in wide-bandgap Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> solar cells preprint, 37th IEEE Photovolt. Spec. Conf. (PVSC 37, no. July, 2011.



*Chapitre*  
*III*

### **III.1. Introduction**

Après nous avons étudié dans les parties précédentes les notions théoriques sur l'effet photovoltaïque (définition et l'historique), nous avons présenté les types des cellules solaires, en suite nous avons décrit le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales.

Puis nous avons abordé les cellules photovoltaïques sur couches minces de silicium et nous avons cité aussi quelques avantages et quelques inconvénients de l'énergie solaires. Dans la 2<sup>ème</sup> partie nous avons étudié les propriétés des cellules solaires à base CIGS. Ensuite nous avons prend en compte la structure d'une cellule solaire à base CIGS et leur principe de fonctionnement. Ceci fera l'objet du chapitre III. Ce chapitre combine des résultats obtenus à partir d'examinassions de l'influence de quelque paramètre sur cellules solaires à base de CIGS à l'aide de SCAPS. Nous représentons ce logiciel, nous donnons quelques notions principales pour cela et nous expliquons par détails comment définir et comment simuler une cellule solaire avec ce logiciel. La simulation permet d'optimiser certains paramètres physiques et géométriques comme, l'épaisseur, la densité de défauts, la variation de la température.

### **III.2. Simulateur SCAPS**

SCAPS-1D "Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension" est un programme de simulation de cellule solaire unidimensionnel développé au département d'électronique et de systèmes d'information (ELIS) de l'université de Gand, Belgique [1].

#### **III.2.1. Utilisation et étape de simulation**

La signification des blocs numérotés de 1 à 6 est expliquée dans le texte. Il ya des panneaux dédiés pour les actions de base :

1. Lancer SCAPS
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée.
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation [2].

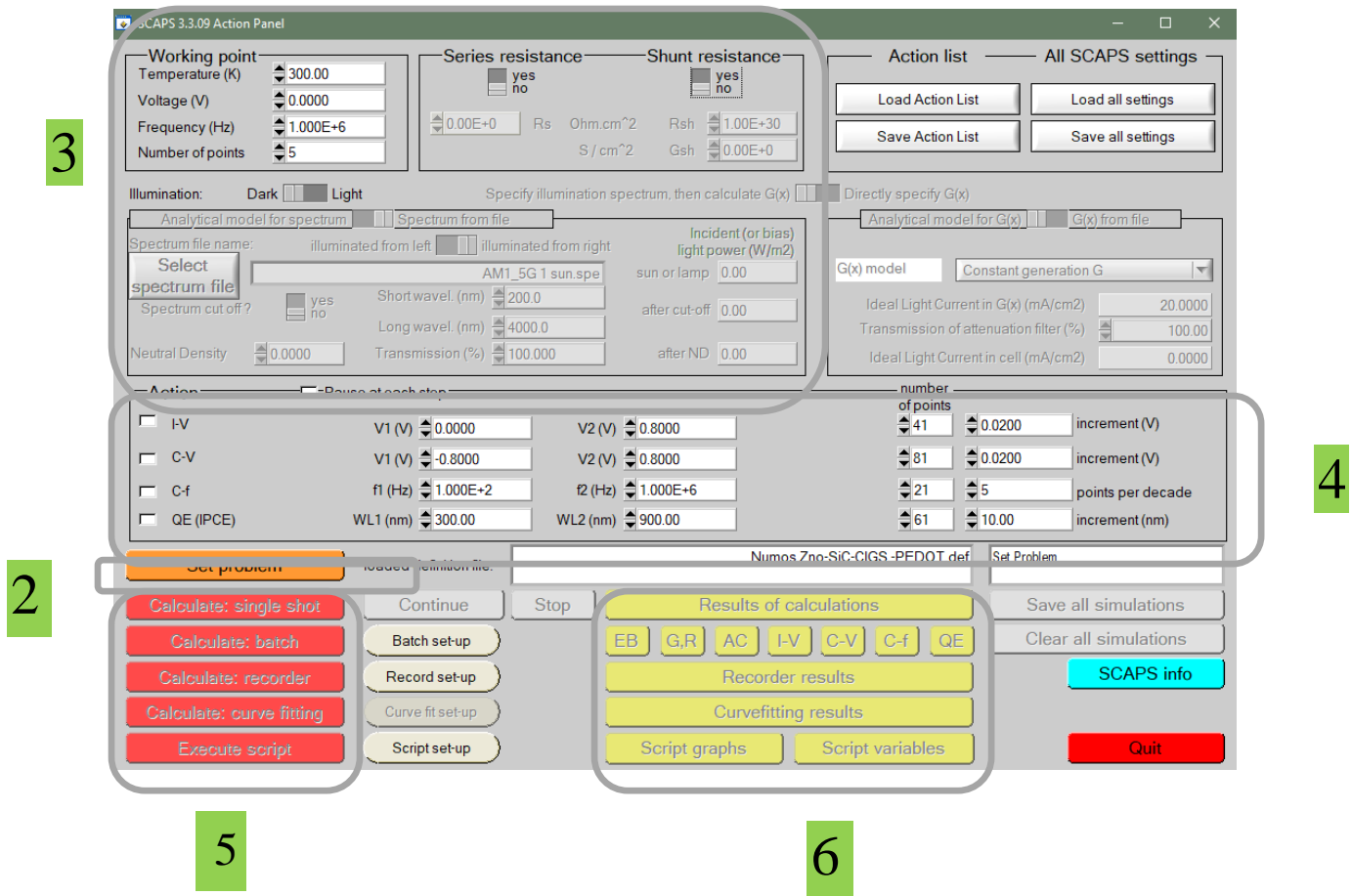


Fig. III. 1 : Fenêtre d'exécution « Action Panel » du logiciel SCAPS.

### III.3. Description de la structure de la cellule solaire à base CIGS

#### III.3.1. Description de la structure

Le dispositif SCAPS constitue un outil précieux pour simuler le comportement d'une cellule solaire ZnO/3C SiC/CIGS/PEDOT : PSS/Mo. Cependant, avant de se lancer dans le processus de simulation, il est crucial pour bien comprendre la composition de la structure des cellules solaires. Il s'agit d'identifier chaque couche de matériau et en effectuant les ajustements nécessaires. La structure de cellule solaire comprend plusieurs couches, chacune avec des propriétés et des fonctions spécifiques. Premièrement, il y a la fenêtre de dépôt de ZnO, qui est dopé à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Cette couche constitue un élément crucial pour faciliter le transport des électrons. Vient ensuite la couche dopante 3C-SiC, également dopée à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , qui joue un rôle dans l'amélioration de conductivité de la cellule solaire. Vient ensuite la couche d'absorption CIGS, dopée à  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , qui absorbe la lumière solaire entrante et génère des porteurs de charge électrique. Enfin, il y a le Couche PEDOT, également dopée à  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , qui sert de couche de transport de trous. La formation du p-n La jonction, un aspect clé du

fonctionnement des cellules solaires, se produit au sein de la couche d'absorption CIGS et du 3C-SiC couche tampon. Cette jonction est essentielle pour séparer les porteurs de charge et générer un courant électrique. Courant lorsqu'il est exposé à la lumière du soleil. De plus, la couche de molybdène sert de contact arrière, contribuant à l'extraction efficace des porteurs de charge générés. Une fois les matériaux et les couches identifiés, ils sont intégrés dans le simulateur SCAPS. Cela implique la saisie de données spécifiques paramètres et dimensions pour chaque couche, tels que la concentration et l'épaisseur du dopage. Ces les paramètres s'apparentent aux commandes d'un véhicule, permettant aux utilisateurs d'affiner la simulation en fonction des spécifications souhaitées. Les simulations ont été réalisées sous éclairage AM1.5G et à une température ambiante de 300 K.

Front contact	n-ZnO	$10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (0.05 $\mu\text{m}$ )
Buffer layer	n-3C-SiC	$10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (0.05 $\mu\text{m}$ )
Absorber layer	p-CIGS	$10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (0.5 $\mu\text{m}$ )
BSF	p-PEDOT:PSS	$10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (0.1 $\mu\text{m}$ )
Back contact	Mo	(0.2 $\mu\text{m}$ )

**Fig. III.2** : Structure de référence d'une cellule solaire Substrat à base de CIGS.

### III.3.2. Modèles et paramètres de simulation

Le tableau suivant résume les paramètres des contacts avant et arrière et les paramètres physiques et géométriques des différentes couches constituant notre cellule, ces paramètres que nous les avons supposés comme des paramètres de la cellule de référence. Le logiciel SCAPS effectue la simulation des dispositifs en sections distinctes, comprenant différents panneaux permettant aux utilisateurs d'ajuster les paramètres et d'évaluer les résultats. Les équations différentielles de Poisson (III.1) ainsi que les équations de continuité pour les trous (III.2) et les électrons (III.3) sont résolus dans le cadre théorique sous-jacent de ce programme.

$$\frac{d}{dx} \left( \varepsilon(x) \frac{d\psi}{dx} \right) = q [p(x) - n(x) + N_d^+(x) - N_a^-(x) + P_t(x) - n_t(x)] \quad (\text{III.1})$$

$$-\frac{1}{j} \frac{dj_p}{\partial x} + R_p(x) - G(x) \quad (\text{III.2})$$

$$-\frac{1}{j} \frac{dj_n}{\partial x} + R_n(x) - G(x) \quad (\text{III.3})$$

Parameters	3C-SIC	CIGS	PEDOT PSS	ZnO
Épaisseur (μm)	0.05	0.5	0.1	0.02
Affinité des électrons (eV)	4.2	4.5	3.4	4.6
Bande gap (eV)	2.3	1.2	1.6	3.3
Relative Permittivity $\epsilon_r$	9.72	13.6	3	9
Densité defective NC (cm <sup>-3</sup> )	$1 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{18}$	$2 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{19}$
Densité defective Nv (cm <sup>-3</sup> )	$5 \times 10^{20}$	$2.2 \times 10^{18}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{19}$
Mobilité d'électrons (cm <sup>2</sup> /VS)	900	100	$4.5 \times 10^{-2}$	100
Mobilité des trous (cm <sup>2</sup> /VS)	40	25	$4.5 \times 10^{-3}$	50
Densité d'accepteur (cm <sup>-3</sup> )	0	$1 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{18}$	0
Densité de donneur (cm <sup>-3</sup> )	$1 \times 10^{20}$	0	0	$1 \times 10^{18}$
Densité de défaut (cm <sup>-3</sup> )	$1 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{14}$

Tab III.1 : Propriétés des différentes couches.

### III.3.3. Diagramme de bande d'énergie

Pour comprendre le comportement et garantir la fiabilité de tout dispositif à semi-conducteurs, il est essentiel de se référer au diagramme de bande dérivé de sa configuration. Dans cette étude, le diagramme de bande de la structure simulée a été généré en utilisant SCAPS, comme illustré dans la figure III.3. Un bon alignement des bandes a été observé entre la couche absorbante de CIGS et le champ de surface arrière en PEDOT. Après l'ajout d'une mince couche de BSF en PEDOT, une pente ascendante a été créée vers la surface, repoussant ainsi les électrons loin de celle-ci, comme illustré dans la figure III.3. Le champ électrique intégré créé du côté arrière s'oppose au déplacement des porteurs minoritaires vers la surface arrière, caractérisée par une vitesse de recombinaison élevée. Par conséquent, les électrons sont réfléchis loin de la surface arrière, réduisant ainsi au minimum la recombinaison.

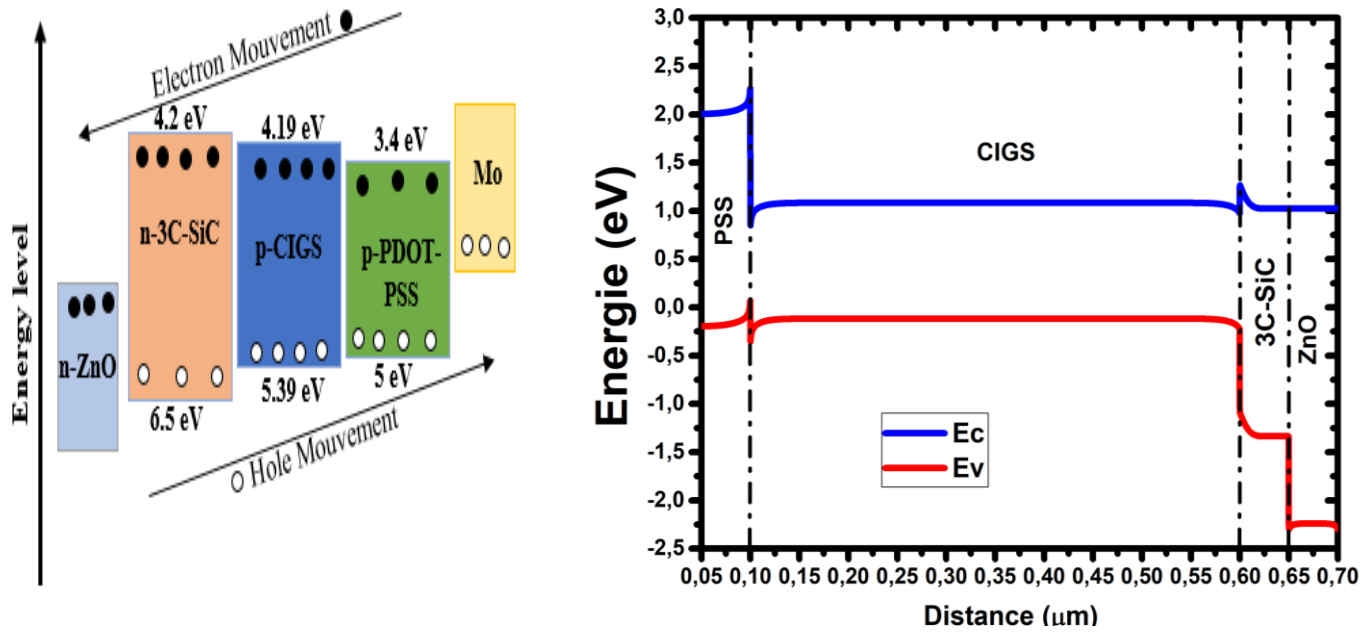


Fig. III.3: Diagramme des bandes d'énergie.

### III.3.4. Effet de l'épaisseur de la couche de CIGS

L'influence de la modification de l'épaisseur de l'absorbeur, en particulier de la couche CIGS, sur la caractéristique JV (tension actuelle) est illustrée à la Fig. III.4. Ce qui est remarquable, c'est que les courbes maintiennent une constante forme sur différentes valeurs d'épaisseur de CIGS, tandis qu'il y a une augmentation notable du JCC (courant de court-circuit) en tant que l'épaisseur de CIGS augmente. Ce phénomène se produit car l'augmentation efficace de l'épaisseur de la couche CIGS agrandit le volume du matériau absorbant.

Par conséquent, cette expansion facilite une plus grande absorption des photons, ce qui entraîne une production de courant accrue. Cependant, parallèlement à cette augmentation courante, il y a une diminution simultanée des  $V_{co}$ . Cette baisse des  $V_{co}$  est une conséquence de l'épaississement Couche CIGS. Alors que plus de photons sont absorbés en raison de l'épaisseur accrue, plus l'épaisseur est grande. L'absorbeur implique également un chemin plus long à parcourir pour les porteurs de charge avant d'atteindre les électrodes. Ce trajet plus long introduit une résistance supplémentaire, ce qui à son tour diminue la tension de sortie.

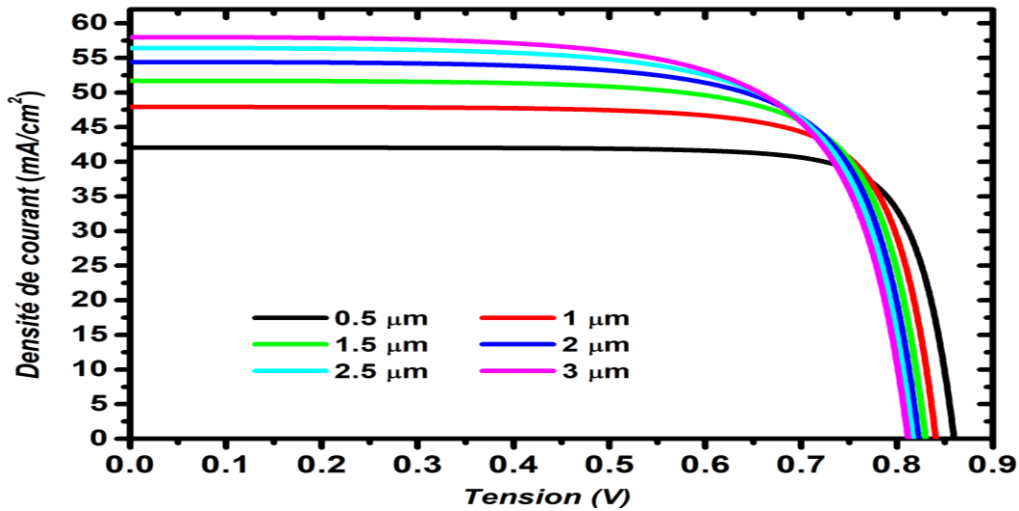


Fig. III.4 : Influence de l'épaisseur de l'absorbeur CIGS sur la caractéristique J-V.

La variation des performances des cellules en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur est illustrée à la Fig. III.5. Il est évident que l'efficacité maximale atteinte est de 33 % lorsque l'épaisseur de la couche CIGS est de 3 µm. Cependant, l'efficacité diminue notablement à mesure que l'épaisseur de la couche CIGS diminue. À travers une gamme de couches CIGS épaisseurs de 0,5 µm à 3 µm, le rendement fluctue de 29% à 33%, tandis que le facteur de remplissage évolue de 70% à 82%. Cette observation souligne l'importance de sélectionner un absorbeur optimal épaisseur pour atteindre des efficacités électriques maximales. Dans ce contexte, il est impératif d'opter pour une épaisseur dépassant 3 µm. Ce choix garantit que la cellule solaire peut efficacement capturer et convertir les incidents la lumière du soleil en énergie électrique, maximisant sa performance globale.

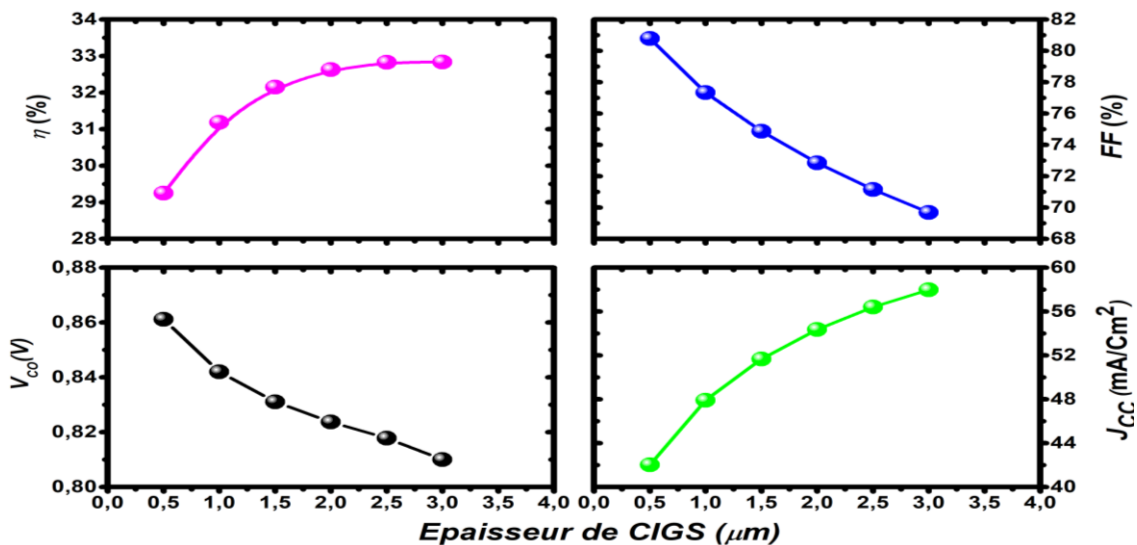


Fig. III.5 : Influence de l'épaisseur de la couche absorbante  $d$ (CIGS) sur les performances de la cellule solaire à base de CIGS.

### III.3.5. Effet de l'épaisseur de la couche de PEDOT : PSS

La figure III.6 semble démontrer l'impact de la variation de l'épaisseur de la couche PEDOT : PSS sur les performances de la cellule solaire. En ajustant l'épaisseur de cette couche dans une plage de 0.1 à 0.6  $\mu\text{m}$ , plusieurs paramètres clés des performances cellulaires montrent des changements significatifs. Notamment, on observe une augmentation de l'efficacité ( $\eta$ ), de la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), du facteur de remplissage (FF) et du courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ). Cette amélioration des performances peut être attribuée au rôle de la couche PEDOT : PSS en tant que couche de champ de surface arrière (BSF) dans la structure des cellules solaires. En augmentant l'épaisseur de cette couche, plusieurs effets positifs sont observés. Premièrement, cela contribue à améliorer le support de l'extraction et de la collecte de charges, ce qui entraîne une augmentation du courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ) comme montre la figure III.7. En effet, une couche BSF plus épaisse aide à réduire les pertes de recombinaison et la génération de photo courant. De plus, la couche plus épaisse de PEDOT : PSS agit également pour améliorer la passivation de la surface arrière de la cellule solaire. Cela se traduit par une réduction des pertes de recombinaison de surface, ce qui contribue à augmenter la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) de la cellule. En résumé, l'ajustement de l'épaisseur de la couche PEDOT : PSS peut jouer un rôle crucial dans l'optimisation des performances des cellules solaires.

De plus, le FF qui représente l'efficacité de la cellule à convertir la lumière en électricité, connaît également une amélioration avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche PEDOT : PSS. Cette amélioration indique une réduction de pertes résistives au sein de la cellule, conduisant à une utilisation plus efficace des porteurs de charge générés.

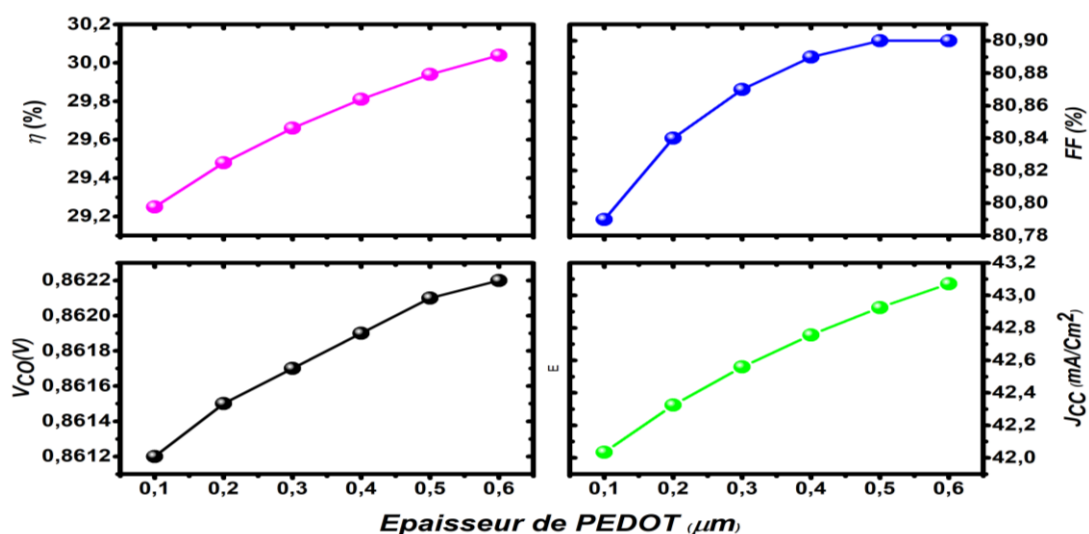


Fig. III.6 : Effet de l'épaisseur de la couche de PEDOT-PSS (BSF).



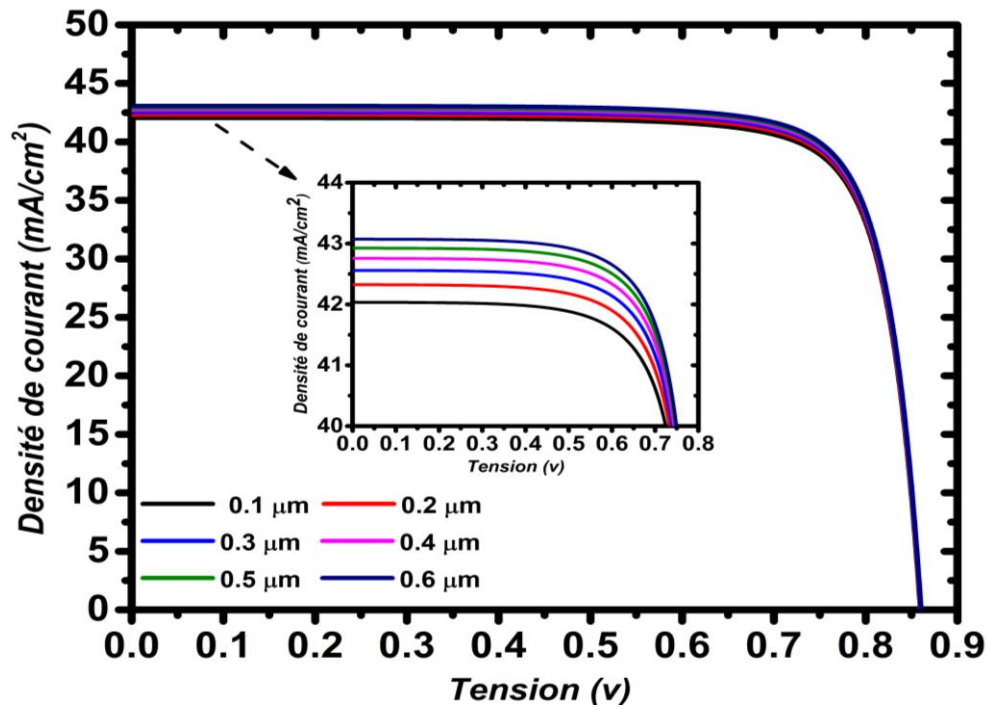


Fig. III.7 : Influence de l'épaisseur de la couche PEDOT-PSS sur la caractéristique J-V.

### III.3.6. Effet de l'épaisseur de la couche de 3C\_SiC

L'impact de la variation de l'épaisseur de la couche tampon 3C-SiC sur les performances des cellules est représenté. À mesure que l'épaisseur de la couche de 3C-SiC est ajustée sur une plage de 0.5 à 3 µm, plusieurs modifications significatives des paramètres clés des performances cellulaires deviennent apparentes. Premièrement, on observe une diminution du  $\eta$ , qui représente la capacité de la cellule solaire à convertir la lumière incidente en énergie électrique utilisable. Cette diminution de l'efficacité indique qu'à mesure que l'épaisseur de la couche 3C-SiC augmente, les performances globales de la cellule diminuent. Cela pourrait être dû à une absorption ou une réflexion accrue de la lumière incidente dans la couche tampon plus épaisse, ce qui entraînerait une absorption réduite de la lumière par les couches actives de la cellule solaire. De plus, une diminution est constatée dans le  $J_{cc}$ .  $J_{cc}$  représente le courant maximum pouvant être généré par la cellule solaire lorsqu'elle est court-circuitée. La diminution de  $J_{cc}$  avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de 3C-SiC suggère que des couches tampons plus épaisses peuvent entraver le flux de porteurs de charge, entraînant une réduction de la génération de courant dans la cellule. De plus, un aplatissement est observé dans le  $V_{co}$  et le FF.  $V_{co}$  représente la tension maximale pouvant être obtenue de la cellule solaire lorsqu'aucun courant ne circule, tandis que FF représente l'efficacité de la cellule à convertir cette tension en puissance utile. L'aplatissement de  $V_{co}$  et FF indique que l'augmentation de

l'épaisseur de la couche de 3C-SiC n'a pas d'impact significatif sur ces paramètres dans la plage étudié.

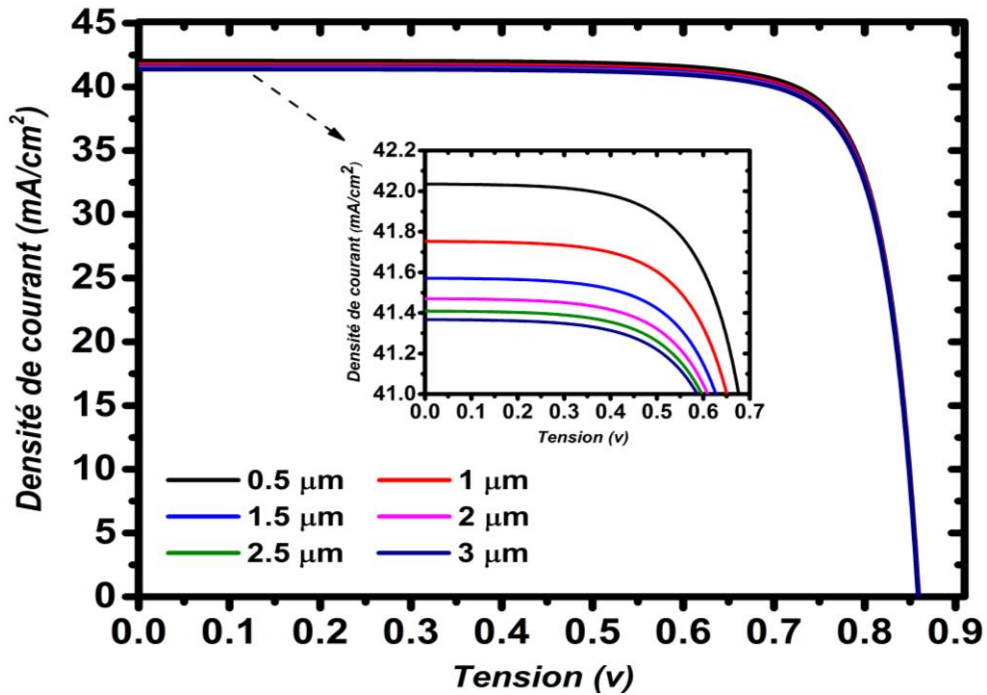


Fig. III.8 : Influence de l'épaisseur de la couche buffer  $d(3C\_SiC)$  sur la caractéristique J-V.

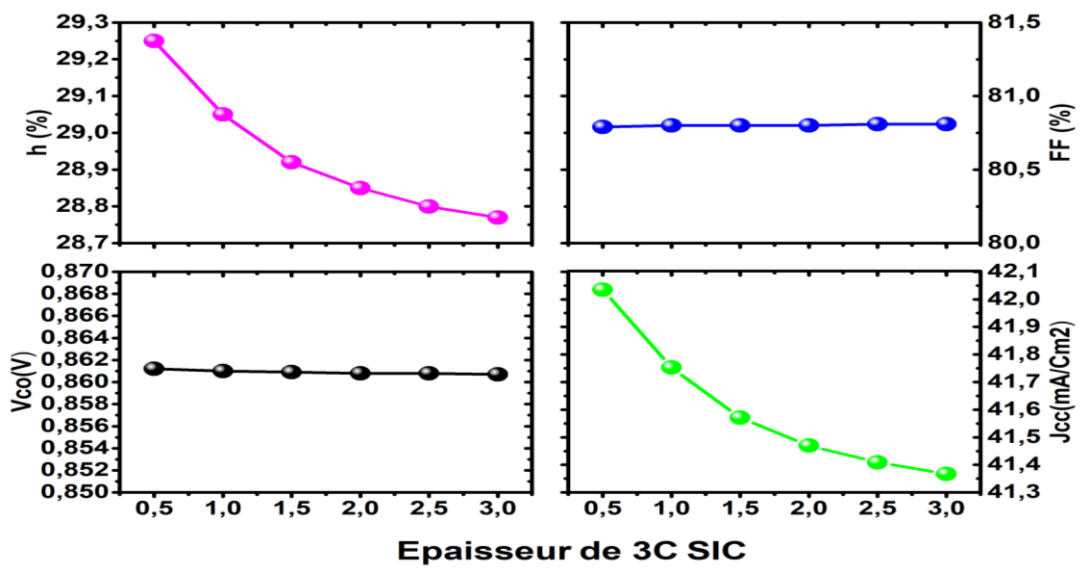


Fig. III.9 : Influence de l'épaisseur de la couche buffer  $d(3C\_SiC)$  sur les performances de la cellule solaire à base de CIGS.

### III.3.7. Effet des défauts de la couche de CIGS

La figure III.10 montre une baisse du  $J_{cc}$ , du  $V_{co}$ , du FF et du  $\eta$  lorsque ces défauts sont présents. La présence de défauts dans la couche absorbante (CIGS), entraîne une recombinaison accrue des porteurs de charge, agissant comme des pièges de charge qui entravent leur contribution au photo courant, réduisant ainsi le  $J_{CC}$  global. De plus, ces défauts peuvent perturber le mouvement des porteurs de charge, entraînant une diminution du  $V_{co}$  de 0.93v à 0.65 v et du FF de 85% à 65%. La mobilité réduite des porteurs de charge peut également augmenter les pertes de résistance de  $10^{13}$  à  $10^{18}$ , diminuant ainsi les performances globales de l'appareil.

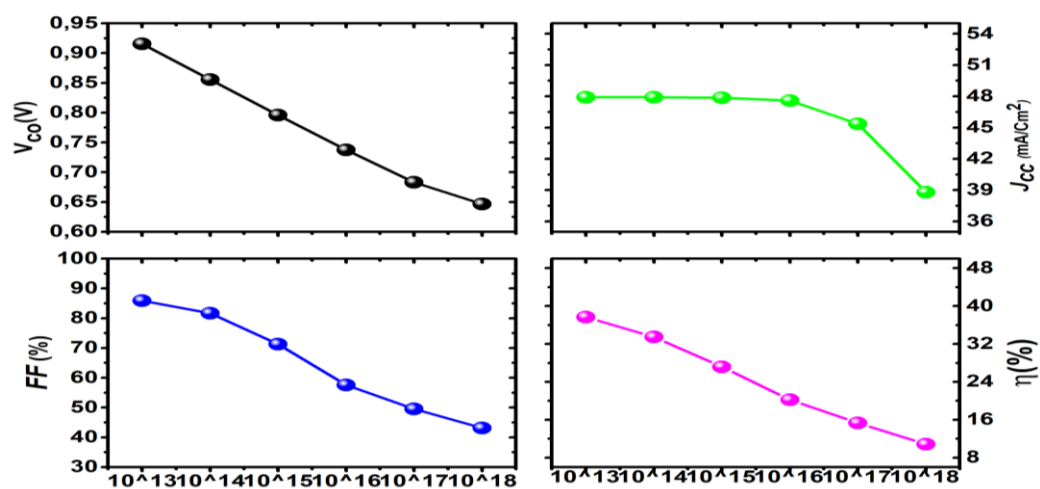


Fig. III.10 : Effet des défauts de la cellule solaire à base de CIGS.

### III.3.8. Effet de la température sur les performances des cellules solaires

Parmi les facteurs essentiels qui influent sur les performances des cellules solaires, il est crucial de mettre en avant l'analyse de l'impact de la température de fonctionnement sur la cellule solaire à base de CIGS. L'étude du comportement des cellules solaires en fonction de la température ( $T$ ) revêt une importance particulière, compte tenu du fait que, dans les applications terrestres, elles sont souvent exposées à des températures comprises entre  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $288\text{ K}$ ) et  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $323\text{ K}$ ), voire plus élevées dans les environnements spatiaux et les systèmes à concentration. La performance d'une cellule solaire est étroitement corrélée à la température, car ses paramètres de performance tels que  $V_{co}$ ,  $J_{cc}$ , FF et  $\eta$  varient en fonction de celle-ci. La figure III.11 illustre l'évolution de la caractéristique J-V en fonction de la température. Nous observons une diminution de  $V_{co}$  avec l'augmentation de la température, principalement en raison de la dépendance directe de  $V_{co}$  au courant de saturation, lequel décroît rapidement avec la température.

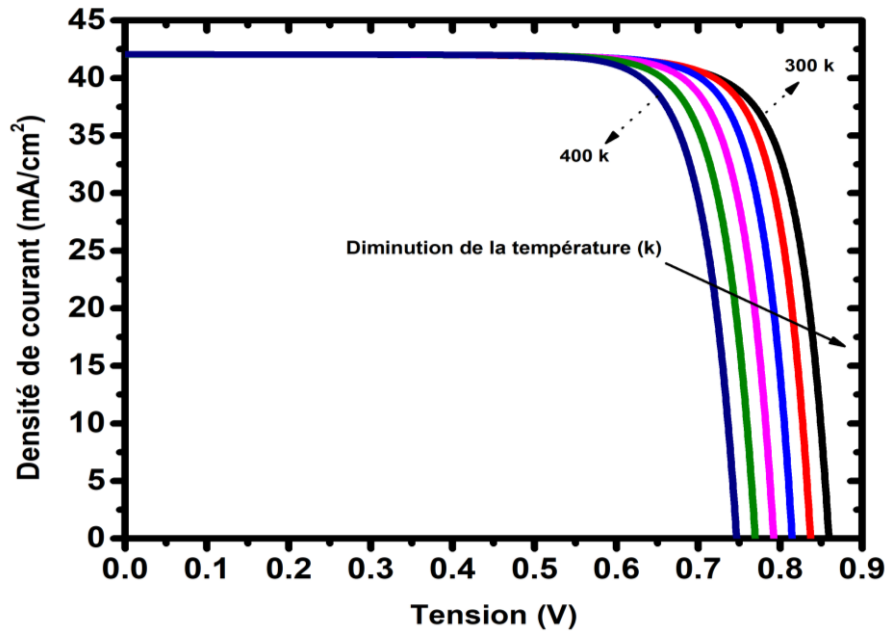


Fig. III.11: Effet de la température sur la caractéristique J-V.

Selon la figure III.12, en détaillant ces résultats, pour une plage de température de travail s'étendant de 300 K à 400 K, nous avons observé une réduction de la tension en circuit ouvert de 0.86V à 0.74V, ainsi qu'une baisse du rendement électrique de 29% à 25%. En revanche, le courant demeure stable.

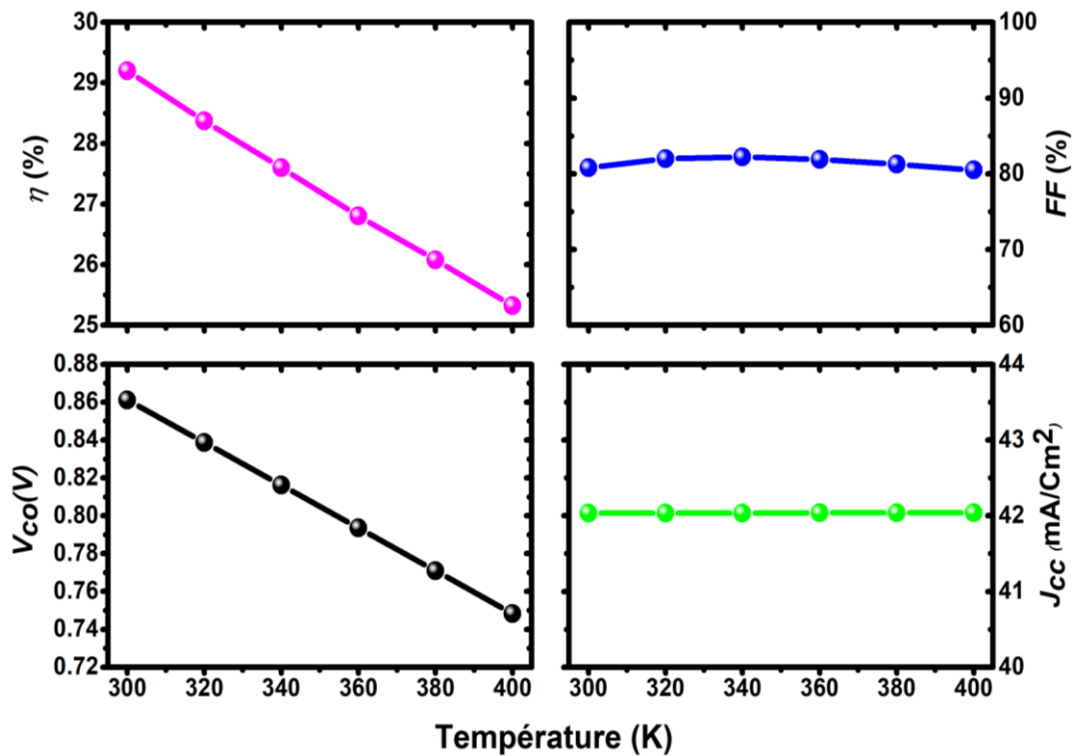
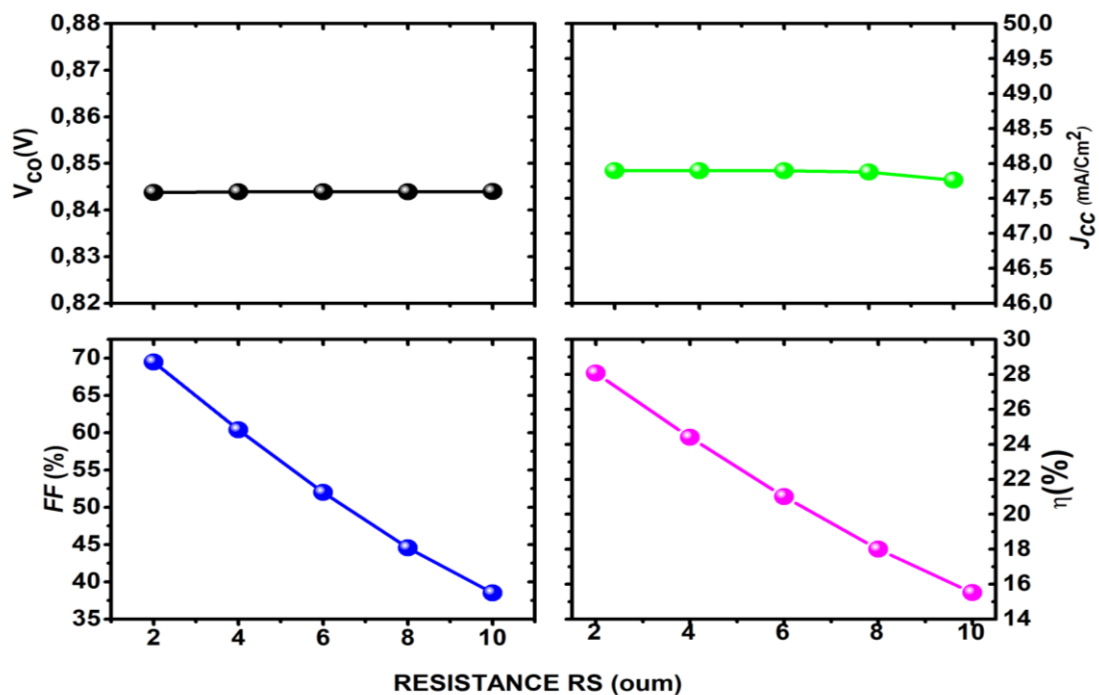


Fig. III.12 : L'impact de la température sur les performances de la cellule étudiée.

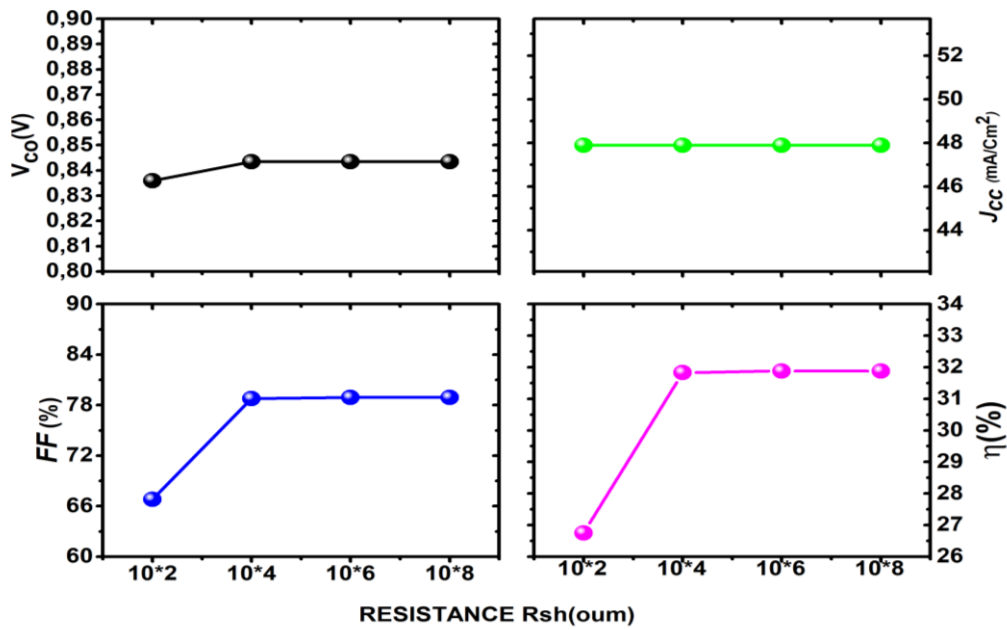
### III.3.9. Effet de la résistance série et shunt sur les performances des cellules solaires

La figure III.13 explique les variations des résistances en série ( $R_s$ ), on observe une diminution de  $J_{cc}$ , FF et  $\eta$  pour les  $R_s$  allant de 2 à 10  $\Omega\text{-cm}^2$ . Selon la loi d'Ohm, une augmentation de  $R_s$  entraîne une chute de tension élevée aux bornes de  $R_s$  pour un courant donné. Étant donné que  $J_{cc}$  est essentiellement le courant produit par la cellule solaire dans des circonstances de court-circuit, une chute de tension accrue aux bornes de  $R_s$  réduit la tension effective disponible pour générer du courant, ce qui indique une réduction de  $J_{cc}$ .



**Fig. III.13 :** Influence de la résistance série sur les performances des cellules solaires.

Sur la figure III.14, on observe une augmentation de la teneur en  $V_{co}$ , FF et  $\eta$  pour  $R_{sh}$  allant de  $10^2$  à  $10^8 \Omega\text{-cm}^2$ . La résistance du shunt fournit une voie alternative le long de laquelle le courant circule, ce qui réduit l'amplitude du courant de fuite. Cette réduction de la chute de tension aux bornes de  $R_{sh}$  contribue à une augmentation de la  $V_{co}$ . Une  $R_{sh}$  élevée minimise les pertes de tension dues aux courants de fuite, ce qui entraîne une tension plus élevée aux bornes de la cellule solaire. Cette réduction des pertes améliore le FF et par conséquent le  $\eta$ . Il est important de noter que le  $J_{cc}$  n'est pas affecté par le  $R_{sh}$ . Le  $J_{cc}$  est principalement influencé par des problèmes tels que l'absorption de la lumière, la production de porteurs de charge et l'efficacité de la collecte, qui ne sont généralement pas directement affectés par les changements du  $R_{sh}$ .



**Fig. III.14 :** Influence de la résistance shunt sur les performances des cellules solaires.

Nos résultats de simulation sont présentés dans le Tableau 2 et **Fig. III.15**. Ce dernier illustre que nos efforts ont abouti à une efficacité de 32,83%, marquant une amélioration significative de 40,18% par rapport à l'efficacité de référence de 23,42% obtenue en incorporant du  $\mu\text{-Si:H}$  (BSF) dans une cellule CIGS conventionnelle [7]. Il est évident que les cellules avec un BSF (PEDOT : PSS) présentent de meilleures performances par rapport à la cellule de base avec du 3C-SiC comme couche tampon. Dans le Tableau 2, les principaux résultats sont présentés aux côtés d'autres cellules solaires CIGS rapportées. En effet, nous avons développé une structure novatrice révolutionnaire pour une cellule solaire CIGS. Ces résultats simulés sont prometteurs pour les expérimentateurs visant à améliorer les performances de leurs cellules.

No	Type de recherche	Couches Tampon/absorbeur	Couche BSF	$\eta$ sans BSF (%)	$\eta$ avec BSF (%)	Amélioration de $\eta$ (%)	Ref
1	Expérimental	Si/Si	ZnS	6.40	11.02	72.19	[3]
2	Expérimental	CdS/CIGS	MoSe <sub>2</sub>	9.00	14.00	55.55	[4]
3	Théorique	CdS/CdTe	SnS	17.40	21.83	25.45	[5]
4	Théorique	CdS/CIGS	Si	16.39	21.30	29.96	[6]
5	Théorique	CdS/CIGS	$\mu$ c-Si: H	19.80	23.42	18.28	[7]
6	Théorique	3C-SiC/CIGS	PEDOT : PSS	29.25	32.18	10.25	[*]

[\*] Notre travail

Tab III.2 : Ce travail comparé à d'autres cellules solaires.

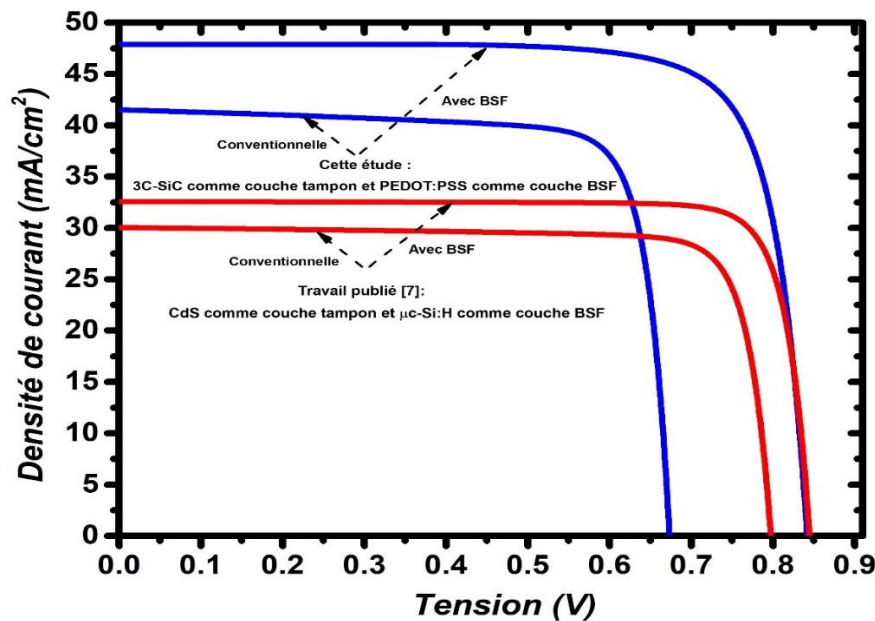


Fig. III.15: Caractéristiques J-V pour la cellule solaire CIGS avec et sans couche BSF en comparaison avec [7].

### III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté les résultats de simulations numériques des caractéristiques électriques de la structure des cellules solaires composées ZnO/3C SiC/CIGS/PEDOT : PSS/Mo, réalisées à l'aide du logiciel de simulation SCAPS-1D. Nous avons examiné l'impact de plusieurs paramètres : l'épaisseur de la couche CIGS, l'épaisseur des couches 3C-SiC et PEDOT : PSS, les défauts de la couche CIGS, la température, ainsi que la résistance série et la résistance shunt, sur les caractéristiques électriques I-V. Nous avons également analysé les paramètres  $V_{co}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$ . Les résultats de cette approche de simulation ont démontré un  $V_{co}$  optimal de 0.86 V, un  $J_{cc}$  de 58 mA/cm<sup>2</sup>, un FF de 82%, et un rendement global de 33%.

### **Référence bibliographique**

- [1] Bennia Imen, Derradj Sarra, Simulation numérique et optimisation des performances d'une cellule solaire à pérovskite, mémoire master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [2] Hamza Asma, Simulation numérique d'une cellule solaire Tandem empilée mécaniquement Pérovskite/CIGS, mémoire master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2022.
- [3] Yang, X., Chen, B., Chen, J., Zhang, Y., Liu, W., Sun, Y.:(2018). ZnS thin film functionalized as back surface field in Si solar cells: Mater. Sci. Semicond. Process.
- [4] Kohara, N., Nishiwaki, S., Hashimoto, Y., Negami, T., Wada, T. (2001). Electrical properties of the Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>/MoSe<sub>2</sub>/Mo structure: Sol. Energy Mater. Sol.
- [5] Benabbas, S., Rouabah, Z., Bouarissa, N., Chelali, N. (2016). The role of back surface field SnS layer in improvement of efficiency of CdTe thin film solar cells: Optik.
- [6] Heriche, H., Rouabah, Z., Bouarissa, N. (2017). New ultra thin CIGS structure solar cells using SCAPS simulation program: International Journal of Hydrogen Energy.
- [7] Zouache, R., Bouchama, I., Saidani, O., Djedoui, L., & Zaidi, E. (2022). Numerical study of high-efficiency CIGS solar cells by inserting a BSF  $\mu$ c-Si: H layer. Journal of Computational Electronics, 21(6), 1386-1395.



*Conclusion*

*Générale*

## *Conclusion générale*

Dans ce travail, nous introduisons une nouvelle stratégie pour simuler des cellules solaires à base de CIGS, incorporant une couche tampon 3C-SiC et employant des couches de champ de surface arrière (BSF) constituées de PEDOT : PSS. Utilisant le simulateur SCAPS-1D, ces simulations révèlent que les hétérostructures constituées de ZnO/3C-SiC/CIGS/PEDOT : PSS/Mo démontrent une efficacité de photo conversion impressionnante. En outre, une analyse détaillée explore l'influence de divers facteurs tels que l'épaisseur du CIGS, l'épaisseur du PEDOT : PSS, l'épaisseur du 3C-SiC et la température. Ces études fournissent des informations pertinentes sur les relations complexes entre ces variables, mettant en lumière l'impact de la stabilité et de l'efficacité des cellules solaires photovoltaïques (PSC). En fin de compte, cette étude de simulation complète améliore notre compréhension des complexités associées à ces cellules solaires et présente des pistes prometteuses pour la recherche et le développement futurs dans le domaine photovoltaïque basé sur CIGS. Pour simuler les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à l'aide du logiciel Scaps-1D, la première étape consiste à définir la structure de la cellule solaire. Cela implique la spécification des différentes régions de la cellule, ainsi que des électrodes et du dopage associés. Une fois cette étape franchie, nous procédons à la définition des paramètres des matériaux utilisés dans la cellule solaire, ainsi que des modèles physiques qui décrivent son fonctionnement. L'optimisation des épaisseurs, des défauts, de la température, de la résistance série et shunt de la cellule solaire à base de CIGS avec une structure ZnO/3C-SiC/CIGS/PEDOT : PSS/Mo a abouti à une série de résultats significatifs :

- Avec une épaisseur de 3  $\mu\text{m}$  pour la couche CIGS, les paramètres photovoltaïques sont les suivants : un courant de court-circuit  $J_{cc}$  de 56.40  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , une tension à vide  $V_{co}$  de 0.81 V, un facteur de forme FF de 71.16% et un rendement  $\eta$  de 32.83%.
- Pour la couche de 3C-SiC avec une épaisseur de 0.5  $\mu\text{m}$ , les paramètres photovoltaïques obtenus sont : un courant de court-circuit  $J_{cc}$  42.03  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , une tension à vide  $V_{co}$  de 0.86 V, un facteur de forme FF de 80.79 % et un rendement  $\eta$  de 29.25 %.
- Une couche de PEDOT : PSS avec une épaisseur de 0.6  $\mu\text{m}$  affiche les paramètres photovoltaïques suivants : un courant de court-circuit  $J_{cc}$  de 43.07  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , une tension à vide  $V_{co}$  de 0.86 V, un facteur de forme FF de 80.90 % et un rendement  $\eta$  de 30.04%.

- Pour la cellule solaire ZnO/3C-SiC/CIGS/PEDOT : PSS/Mo à une température de 300 K, les paramètres photovoltaïques sont les suivants : un courant de court-circuit  $J_{cc}$  de 42.03 mA/ cm<sup>2</sup>, une tension à vide  $V_{co}$  de 0.86 V, un facteur de forme FF de 80.79 % et un rendement  $\eta$  de 29.25 %.
- Enfin, pour la même cellule solaire avec une résistance série de 2  $\Omega$ - cm<sup>2</sup> les paramètres photovoltaïques sont : un courant de court-circuit  $J_{cc}$  de 47.55 mA/ cm<sup>2</sup>, une tension à vide  $V_{co}$  de 0.845 V, un facteur de forme FF de 70 % et un rendement  $\eta$  de 28.30 %. et une résistance shunt de 10<sup>4</sup> $\Omega$ -cm<sup>2</sup>, les paramètres photovoltaïques sont : un courant de court-circuit  $J_{cc}$  de 48 mA/ cm<sup>2</sup>, une tension à vide  $V_{co}$  de 0.845 V, un facteur de forme FF de 78.13 % et un rendement  $\eta$  de 31.80 %.

Ce travail ouvre la voie au développement de nouvelles structures novatrices et efficaces pour les cellules solaires à base de CIGS, promettant des performances améliorées et une rentabilité accrue. En se projetant vers l'avenir, notre orientation future englobe la simulation et la modélisation des cellules photovoltaïques, avec une focalisation particulière sur l'intégration des joints de grains et des défauts profonds dans la couche absorbante CIGS grâce à l'utilisation de SILVACO/Atlas en deux dimensions.