

IV-1. Introduction

Après avoir présenté les généralités indispensables à l'étude des cellules photovoltaïques en couches minces, nous allons maintenant déterminer les caractéristiques des cellules à base de Cu(In,Ga)Se_2 CIGS dans une structure choisie.

La résolution des trois équations fondamentales qui régissent le comportement des porteurs de charges nous a permis de calculer la caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire ainsi que le rendement de la cellule CIGS. La résolution analytique étant compliquée et pratiquement impossible, nous avons recours à la résolution numérique qui nécessite un grand nombre d'itérations.

Le simulateur SCAPS-1D permet la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique. Ceci nous a permis d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Les simulateurs existants sur le marché, en peut citer : SCAPS, SILVACO, PC1D,...etc, ont le même principe de fonctionnement.

Ils résolvent les équations différentielles qui régissent le fonctionnement des dispositifs électroniques par des méthodes numériques (éléments finis, moindre carré, méthode de Monte Carlo, etc.).

Dans notre étude nous avons modélisé une structure de cellule solaire en couches minces, réalisée à base de la couche absorbante $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$ (CIGS) et nous avons simulé ses paramètres physiques et électriques par le logiciel unidimensionnel appelé SCAPS. Pour cela nous essayons de choisir un modèle de la structure selon la littérature et nous essayons d'exécuter des exemples expérimentaux réels pour calibrer notre logiciel et établir un code de calcul spécifique aux structures étudiées. puis on va essayer d'exploiter nos résultats simulés et présentés dans le chapitre III pour étudier deux structures proposées à base des deux buffers ZnTe et ZnS et la fenêtre optique ZnO.

IV-1.1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou cellule solaire ou encore photopile est un composant électronique capable de fournir de l'énergie électrique s'il est éclairé convenablement.

Le principe général est le suivant : l'absorption des photons d'énergie suffisant ($E > E_g$) dans le semi-conducteur (couche absorbante) génère des paires électrons-trous. Ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne (jonction PN) et collectées entre une grille face avant et un contact ohmique réalisé face arrière de la cellule puis débitées dans la charge. La cellule photovoltaïque constitue ainsi un générateur électrique élémentaire. La figure IV-1 présente le schéma simplifié d'une photopile à base de CIGS.

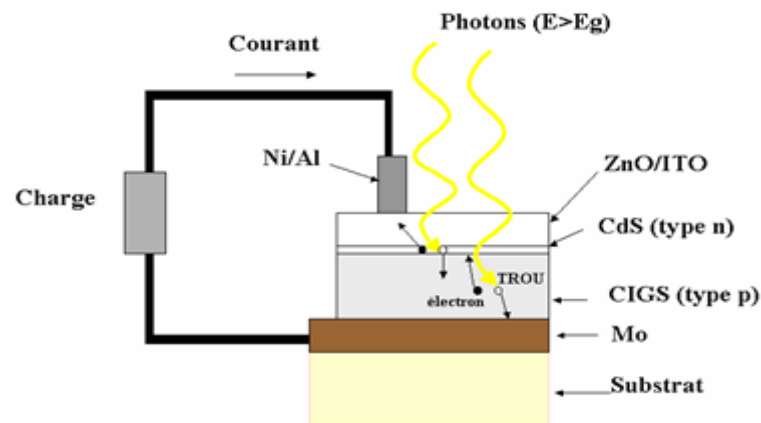


Figure IV-1: Schéma simplifié d'une photopile à base de CIGS sous éclairage [1].

IV-2. Présentation du logiciel de simulation numérique SCAPS

IV-2.1. Introduction

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel: Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve[1-3].

Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV) (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe à peu près 50 MB d'espace sur le disque.

SCAPS est originellement développé pour les structures de cellules de famille CuInSe₂ et CdTe. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si).

IV-2.2. Notions de base

SCAPS s'ouvre avec l'icone 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la figure IV-2.

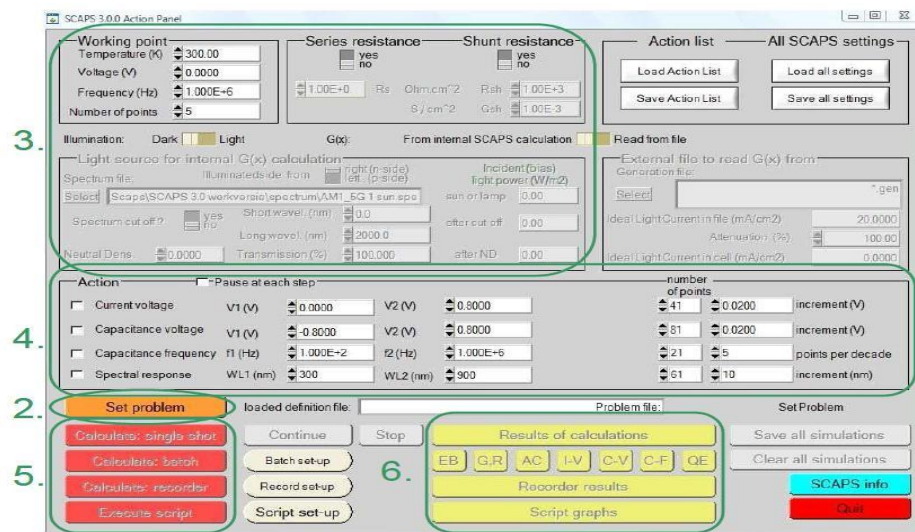


Figure IV-2 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

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 (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation.

Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit.

IV-2.3. Définir le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. Ceci implique :

- **La température T** : Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS: $N_c(T)$, $N_v(T)$, les vitesses thermiques, le voltage thermique kT et tous leurs dérivés sont les seuls variables qui ont une dépendance thermique explicite ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T , les paramètres du matériau correspondant.

Working point	
Temperature (K)	300.00
Voltage (V)	0.0000
Frequency (Hz)	1.000E+6
Number of points	5

Figure IV-3 : Points de fonctionnement (points de travail).

- **Le voltage V** : il ne concerne pas les simulations I-V et C-V. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation C-f et $QE(\lambda)$. SCAPS commence toujours à 0 V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.
- **La fréquence f** : elle ne concerne pas les simulations I-V, $QE(\lambda)$ et C-f. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée.
- **L'illumination** : elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour $QE(\lambda)$, elle détermine les conditions de polarisation de la lumière.

Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination one Sun ($= 1000 \text{ W/m}^2$) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre.

IV-2.4. Les courbes I-V

La figure IV-4 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairement. La couleur de la dernière courbe calculée est indiquée (lorsque le graphe est trop encombré, on clique CLEAR ALL GRAPHS dans le panneau d'action). Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe.

Si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, un panneau pop-up apparaîtra, avec des informations concernant le graphe, la courbe ainsi que le point cliqué.

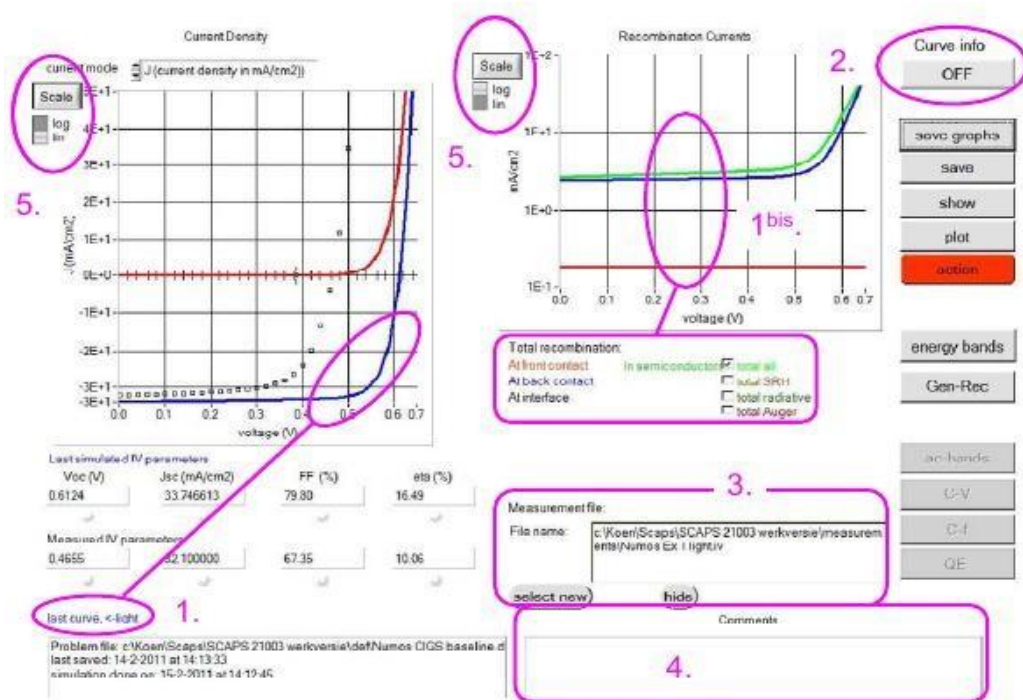


Figure IV-4 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairement.

Le bouton SCALE aide à changer la gamme et l'échelle des axes. Si on appuie sur le bouton CTRL et on sélectionne une aire rectangulaire dans un graphe, celui-ci fera un zoom intérieur (agrandissant) dans la zone sélectionnée. L'appui sur le bouton CTRL accompagné d'un clic droit donnera un zoom extérieur (Zoom out).

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

IV-3. Résultats de la simulation en SCAPS

IV-3.1. Introduction

Dans le but d'optimiser une conception spécifique d'une structure d'hétérojonction Fenêtre/Buffer/Absorbeur_CIGS, nous devons analyser et interpréter les résultats pour déterminer les performances du dispositif tels que l'épaisseur optimale de l'absorbeur CIGS. Dans notre travail nous allons calculer la caractéristique $I(V)$ pour les couches Tampons ZnTe et ZnS et pour la fenêtre optique ZnO et voir les effets de ces derniers sur les performances de la cellule CIGS.

Pour cela, dans notre simulation, nous avons fait varier les paramètres de l'épaisseur de CIGS tout en gardant constants les autres paramètres des couches. Les résultats obtenus dans cette opération sont présentés dans la section qui suit.

IV-3.2. Paramètres de la structure étudiée

Notre travail permet la modélisation des cellules solaires hétérojonctions à base des composés quaternaires $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ en couches minces sous illumination, avec x représente la concentration de l'atome de Ga dans l'alliage, elle est variée dans la gamme de 0 et 1.

La cellule simulée contient respectivement les couches suivantes: La couche fenêtre optique à base de ZnO de conductivité de type n fortement dopée, suivi par une couche Tampon ZnS (ou de ZnTe) de type n et enfin la couche absorbante CIGS de type p. Le schéma de la cellule typique introduit au simulateur est donné par la figure IV-5 et la figure IV-6. Les paramètres de base (Baseline) pour les différentes couches sont illustrés dans le Tableau (IV-1).

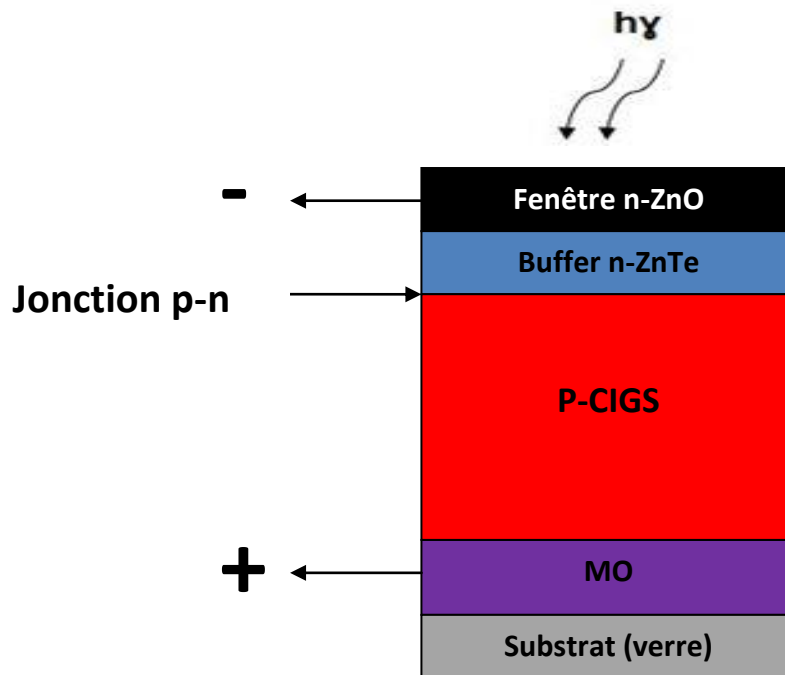


Figure IV-5 : Structure de la cellule solaire à hétérojonction (n-ZnO/n-ZnTe/p-CIGS) étudiée.

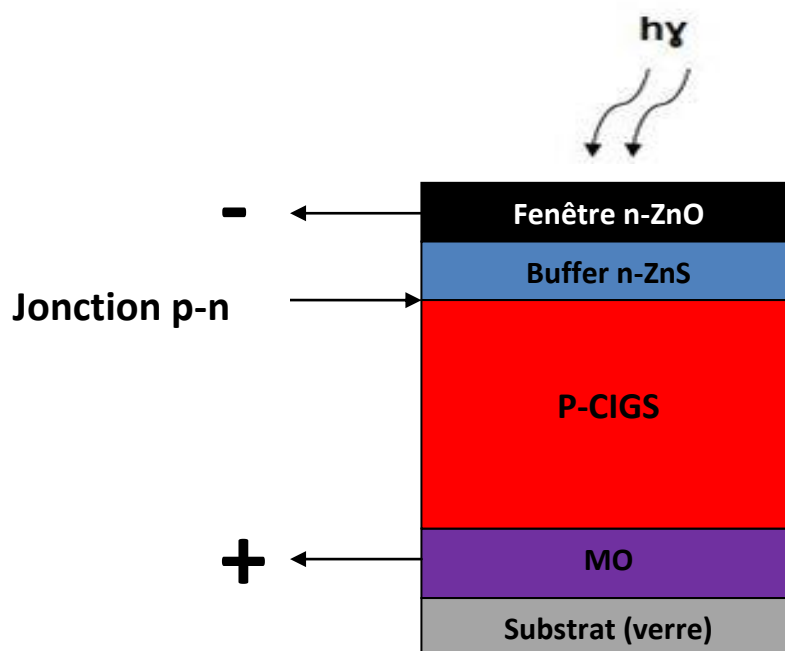


Figure IV-6 : Structure de la cellule solaire à hétérojonction (n-ZnO/n-ZnS/p-CIGS) étudiée.

Tableau IV-1 : Paramètres des différentes couches des deux structures étudiées.

Propriétés générales de dispositif				
	surface frontal		Surface arrière	
Φ_b (eV)	0 eV		0.9 eV	
S_e (cm/s)	10^7 cm/s		10^7 cm/s	
S_t (cm/s)	10^7 cm/s		10^7 cm/s	
Réfectivité	0.1		0.8	
Propriétés des différentes couches				
	ZnO:Al	ZnTe	ZnS	CIGS
Épaisseur	200 nm	100 nm	100 nm	3000 nm
Constante diélectrique	9	10	10	13.6
Mobilité d'électrons	$100\text{ cm}^2/\text{Vs}$	$100\text{ cm}^2/\text{Vs}$	$100\text{ cm}^2/\text{Vs}$	$100\text{ cm}^2/\text{Vs}$
Mobilité de trous	$25\text{ cm}^2/\text{Vs}$	$25\text{ cm}^2/\text{Vs}$	$25\text{ cm}^2/\text{Vs}$	$25\text{ cm}^2/\text{Vs}$
Bande de gap	3.219 eV	2.484 eV	2.017	1.12 eV
Densité d'effective NC	$2.22 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$	$2.22 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$	$2.22 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$	$2.22 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$
Densité d'effective NV	$1.78 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$	$1.78 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$	$1.78 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$	$1.78 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$
Affinité des électrons	4 eV	3.8 eV	3.8 eV	4.1 eV
Les densités de dopage	$N_D = 10^{18}\text{ cm}^{-3}$	$(N_D)= 10^{17}\text{ cm}^{-3}$	$N_D)= 10^{17}\text{ cm}^{-3}$	$N_A =2 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$
Défauts Gaussiens				
Défauts de densités	$N_{DG} = 10^{17}\text{ cm}^{-3}$	$N_{AG} = 10^{18}\text{ cm}^{-3}$	$N_{AG} = 10^{18}\text{ cm}^{-3}$	$N_{DG} = 10^{14}\text{ cm}^{-3}$
La deviation standard	0.1eV	0.1eV	0.1eV	0.1eV
Cross-section electrons	$1.2 \times 10^{-12}\text{ cm}^2$	10^{-17} cm^2	10^{-17} cm^2	$5.3 \times 10^{-13}\text{ cm}^2$
Cross-section trous	10^{-17} cm^2	$9.8 \times 10^{-13}\text{ cm}^2$	$9.8 \times 10^{-13}\text{ cm}^2$	10^{-18} cm^2

IV-4. Détermination de l'épaisseur optimale de l'absorbeur p-CIGS

On appelle les propriétés géométriques d'une couche mince tout ce qui concerne la largeur, la longueur et l'épaisseur de la couche concernée. Dans notre cas, on va déterminer l'influence de l'épaisseur de la couche p-CIGS sur les performances des deux structures. La gamme de variation est de **0.5 à 3 μm** . Les épaisseurs des autres couches restent inchangées.

Les figures IV-7, IV-8 présentent la variation du courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de la cellule solaire avec des couches tampon ZnTe ensuite ZnS en fonction de l'épaisseur p-CIGS.

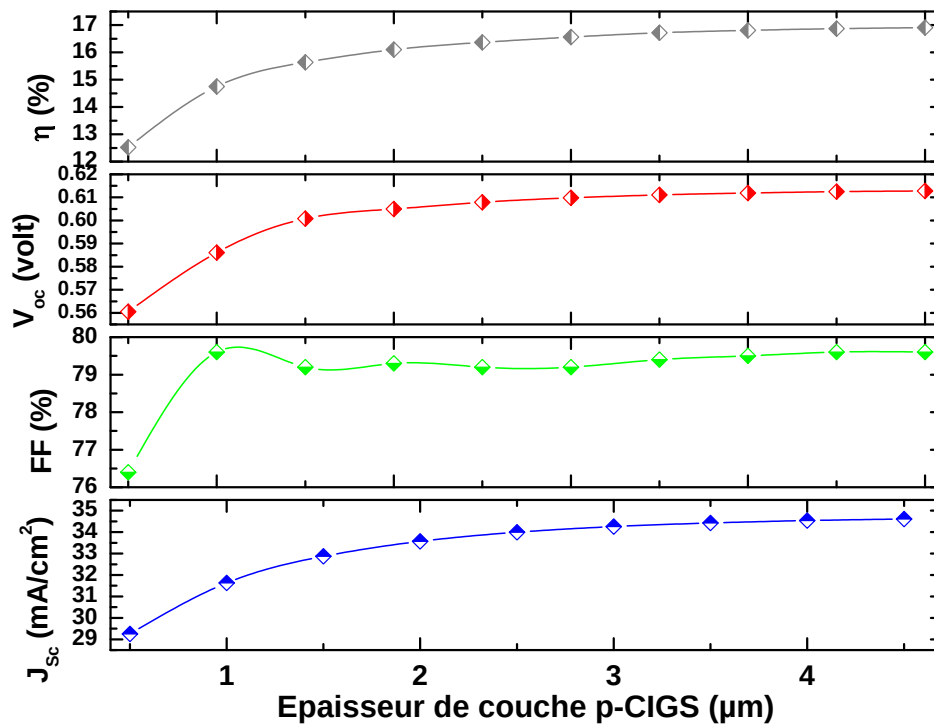


Figure IV-7 : Performances de la cellule solaire avec la couche tampon ZnTe en fonction de l'épaisseur p-CIGS.

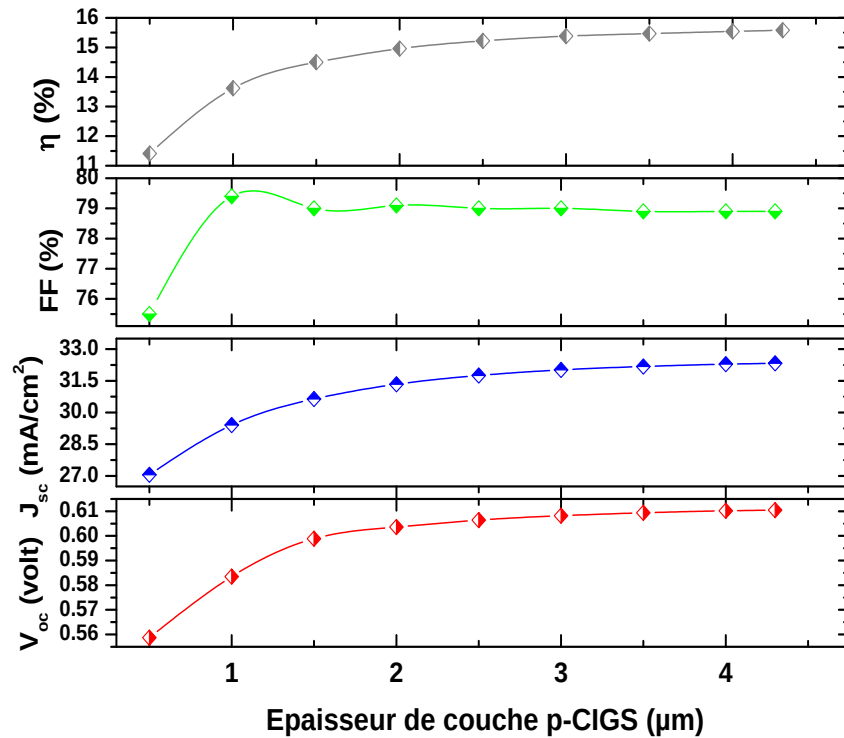


Figure IV-8: Performances de la cellule solaire avec la couche tampon ZnS en fonction de l'épaisseur p-CIGS.

D'après les figures **IV-7**, **IV-8** l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante a une influence positive le long de l'échelle de la variation des paramètres de la cellule solaire à base de CIGS. On voit aussi, une augmentation rapide du rendement à partir de l'épaisseur **0.5 μm à 2 μm** pour les deux couches ZnS et ZnTe. L'augmentation va continuer lentement entre **2 μm et 3.5 μm** jusqu'à la limite de la convergence. Ce qui donne l'épaisseur optimale de l'absorbeur CIGS qui est égale à **2 μm** .

Le courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert augmentent jusqu'à l'épaisseur de **3.5 μm** prenant les valeurs de V_{oc} (volt) et J_{sc} (mA/cm^2) à **0.615 volt, 34.5 mA/cm^2** et à **0.615 volt, 79.5 mA/cm^2** pour ZnTe, ZnS, respectivement. Cette amélioration est due quantitativement à l'augmentation des charges photo-générés par l'augmentation de l'épaisseur et donc du volume de l'absorbeur.

Alors la valeur optimale de l'épaisseur de l'absorbeur **p-CIGS** = 2 μm avec des couches tampons ZnTe et de ZnS.

IV-5 Conclusion

Dans ce travail nous avons étudié les performances des cellules solaires CIGS pour les deux couches buffers: ZnTe et ZnS. Les paramètres d'entrées des deux couches buffers: ZnTe et ZnS et de la couche fenêtre ZnO sont tirées de ceux calculées dans le chapitre III.

Dans le but de concevoir une meilleure structure, on a fait une série des calculs pour les deux hétérojonctions ZnO/ZnTe/CIGS et ZnO/ZnS/CIGS par SCAPS-1D. La détermination de l'épaisseur optimale de l'absorbeur conduit au meilleurs paramètres photovoltaïques. A cet effet, nous avons simulé les paramètres électriques de sortie de la structure, tels que: le courant de court-circuit, la tension de circuit-ouvert, le facteur de forme et le rendement de conversion. Après la simulation des deux hétérojonctions ZnO/ZnTe/CIGS et ZnO/ZnS/CIGS, on a trouvé des bons résultats avec des rendements meilleurs comparables à ceux publiés dans la littérature pour la cellule ZnO/CdS/CIGS.

On a vu aussi, qu'une augmentation rapide du rendement à partir de l'épaisseur 0.5 μm à 2 μm a été trouvé pour les deux couches ZnS et ZnTe. L'augmentation va continuer lentement entre 2 μm et 3.5 μm jusqu'à la limite de la convergence. Ce qui donne l'épaisseur optimale de l'absorbeur CIGS égale à 2 μm , le meilleur rendement trouvé dans ce cas dépasse 16%. Ces résultats nous a donné une bonne information sur la possibilité d'utiliser les deux composés ZnS et ZnTe, comme des buffers pour des cellules solaires à hauts rendements.

IV-6. Références

- [1] Mohammed Ouled Ali, "propriétés optoélectroniques du semi-conducteur Cu(In,Ga)Se_2 appliquée aux cellules photovoltaïques", Mémoire de magister à l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique, Oran, 2010.
- [2] A. Niemegeers, M. Burgelman, " Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solarcells, Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference", Washington DC, 1996, pp.901-904.
- [3] D. Schmid, M. Ruckh, and H. W. Schock, Sol. Energy Mat. Sol. Cells, vol. 281 (1996) 41-42.