



OPTIMISATION DE L'ABSORBEUR D'UNE CELLULE SOLAIRE CIGS A L'AIDE DU SIMULATEUR SCAPS-1D

Zineb BENBOUZID¹, Wassila Leila RAHAL^{2,3*}, Djaaffar RACHED⁴, Wafà BENSTAALI^{4,5},
Noureddine HASSINI^{1,2}

¹Laboratoire d'Élaboration et Caractérisation Physico Mécanique et Métallurgie des Matériaux, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université de Mostaganem.

²Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, Université de Mostaganem.

³Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements, U.S.T.O.M.B., Oran.

⁴Laboratoire de Physique des plasmas, Matériaux Conducteurs et leurs Applications. U.S.T.O.M.B. Oran

⁵Faculté des Sciences et de la technologie, Université de Mostaganem.

*leila.rahal@univ-mosta.dz

Résumé - Dans cet article, un travail d'optimisation numérique d'une cellule solaire à couches minces CIGS a été réalisé en utilisant le simulateur SCAPS-1D. Nous nous sommes intéressés à l'étude des différents paramètres de l'absorbeur qui contribuent à l'amélioration de la performance de la cellule, tel que la densité de dopage, l'épaisseur et l'énergie de gap. Une compréhension des différents phénomènes de conduction et de collecte est également accomplie. Un rendement de conversion de 21.73% a pu être atteint pour une densité de dopage de la couche active de 10^{16} cm^{-3} , une épaisseur de $3.5 \mu\text{m}$ et une énergie de gap de 1.3 eV.

Mots-clés : Cellule solaire, CIGS, Absorbeur, paramètres photovoltaïques, optimisation, SCAPS-1D.

Abstract - In this article, a numerical optimization work of a CIGS thin-film solar cell was carried out using the SCAPS-1D simulator. We are interested in the study of the different parameters of the absorber which contribute to the improvement of the performance of the cell, such as the doping density, the thickness and the gap energy. An understanding of the different phenomena of conduction and collection is also accomplished. A conversion efficiency of 21.73% could be achieved for a doping density of the active layer of 10^{16} cm^{-3} , a thickness of $3.5 \mu\text{m}$ and gap energy of 1.3 eV.

Keywords: Solar cell, CIGS, Absorber, photovoltaic parameters, optimization, SCAPS-1D.

1. Introduction

Les cellules solaires en couches minces à base d'absorbeurs de type diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium CIGS représentent une technologie d'avenir à haut rendement de conversion d'énergie grâce à leur coût réduit, leurs modules flexibles et leur rendement de conversion énergétique supérieur à 22% [1][2]. Un rendement record de 23.35% a été atteint en 2019 [3]. L'absorbeur est un semi-conducteur de type p, d'une épaisseur variant de 1 à $4 \mu\text{m}$ [4] [5] [6].

Pour produire ce type de cellule à l'échelle industrielle, il est nécessaire de réduire l'épaisseur de cette couche, principalement pour minimiser le coût de la cellule, car l'indium et le

gallium sont des éléments rares et de moins en moins disponibles.

La largeur de la bande interdite du CIGS varie généralement de 1.2 à 1.45 eV. Cette valeur est calculée en fonction du taux de gallium, x ($x=\text{Ga}/\text{In}$) selon l'équation (1) :

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

2. Présentation de la cellule étudiée

La cellule solaire étudiée, représentée sur la figure 1, est constituée d'une couche absorbante (CIGS) de type p déposée sur un substrat de verre revêtu de molybdène (Mo). Un émetteur de type n à base de CdS est déposée par la suite et enfin une couche fenêtre en ZnO. Les paramètres de toutes ces couches sont résumés dans le tableau 1.

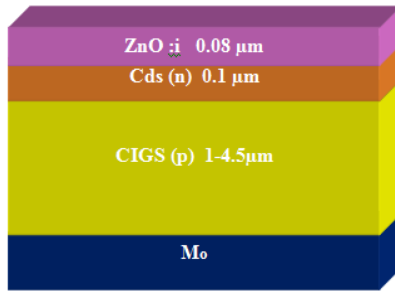


Figure 1. Structure schématique de la cellule solaire CIGS étudiée

Tableau 1. Paramètres de la cellule solaire CIGS à 300K.

Paramètres	CIGS (p)	Cds (n)	ZnO (i)
d (μm)	3.5	0.1	0.08
E_g (eV)	1.2	2.45	3.4
χ (eV)	4.5	4.45	4.55
ϵ	10	10	10
N_c (cm^{-3})	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{18}$
N_v (cm^{-3})	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	$9 \cdot 10^{18}$
V_{th} (cm/s)	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
μ_n (cm^2/Vs)	100	50	50
μ_p (cm^2/Vs)	25	20	20
N_D (cm^{-3})	0	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{17}$
N_A (cm^{-3})	$2 \cdot 10^{16}$	0	0
N_t (cm^{-3})	10^{16}	10^{18}	10^{14}

Avec :

d : Epaisseur de la couche,

E_g : Energie du gap,

χ : Affinité électronique,

ϵ : permittivité électrique du matériau,

$N_{C,V}$: Densité d'états effective dans la BC, BV.

V_{th} : vitesse thermique des électrons et des trous,

$\mu_{n,p}$: Mobilité des électrons et des trous,

N_D : Densité de dopage des donneurs,

N_A : Densité de dopage des accepteurs,

N_t : Densité de défauts.

3. Résultats et discussions

Afin d'optimiser la cellule présentée, nous avons étudié l'effet de 3 paramètres de la couche CIGS: l'épaisseur, la densité de dopage et l'énergie du gap sur la performance de la cellule. La simulation a été réalisée à l'aide du logiciel SCAPS-1D, en variant un seul paramètre et en

gardant les autres paramètres constants, puis en fixant le paramètre étudié à sa valeur optimale pour les simulations suivantes.

3.1. Effet de l'épaisseur de l'absorbant sur la performance de la cellule

Nous avons fait varier l'épaisseur de l'absorbant de $1\mu\text{m}$ à $4\mu\text{m}$ et nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques (la densité de courant de court-circuit J_{sc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η) en fonction de l'épaisseur. Les graphes obtenus sont représentés sur la Figure 2. Nous pouvons observer que lorsque l'épaisseur de la couche CIGS augmente, tous les paramètres photovoltaïques augmentent, puis se stabilisent à partir d'une épaisseur de $3.5\mu\text{m}$. Il n'est donc pas nécessaire d'élaborer des absorbeurs au-delà de $3.5\mu\text{m}$ d'épaisseur. Pour comprendre ces résultats, nous avons tracé, le taux de recombinaisons au niveau de la couche active (Figure 3) ainsi que le rendement quantique externe de la cellule (Figure 4) pour les deux épaisseurs extrêmes de l'absorbant ($d = 0.5\mu\text{m}$ et $d = 3.5\mu\text{m}$). D'après les courbes obtenues, nous remarquons, que le taux de recombinaisons est plus faible au niveau de l'interface CIGS/CdS lorsque l'épaisseur de la couche active augmente. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que l'augmentation du volume de la couche active va permettre d'absorber plus de photons et de générer ainsi plus de porteurs de charge.

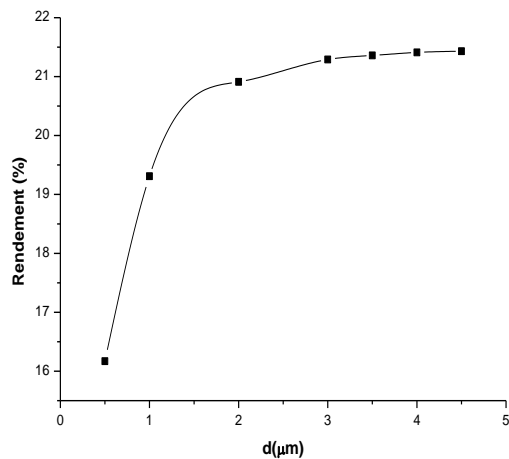
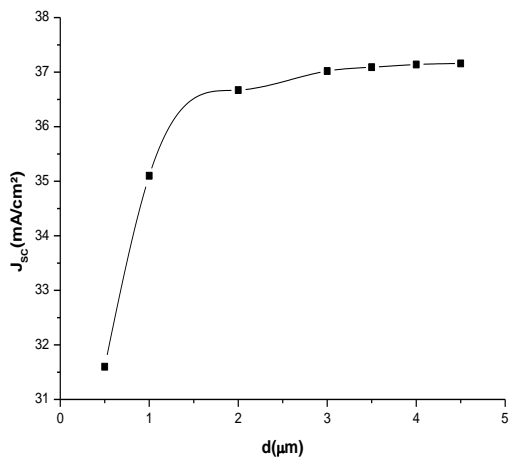


Figure 2. Influence de l'épaisseur de la couche CIGS sur les paramètres PV de la cellule.

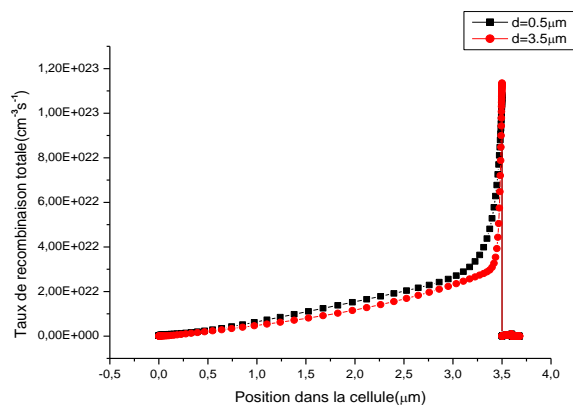
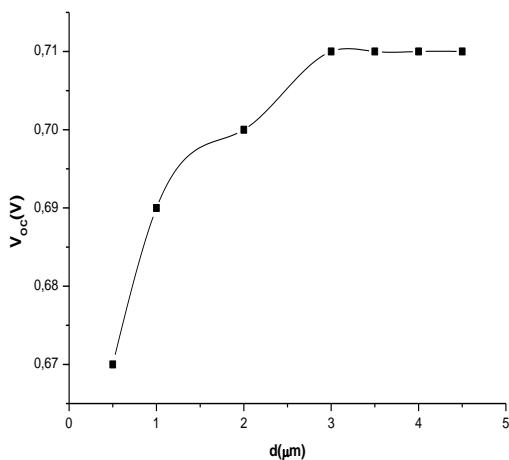
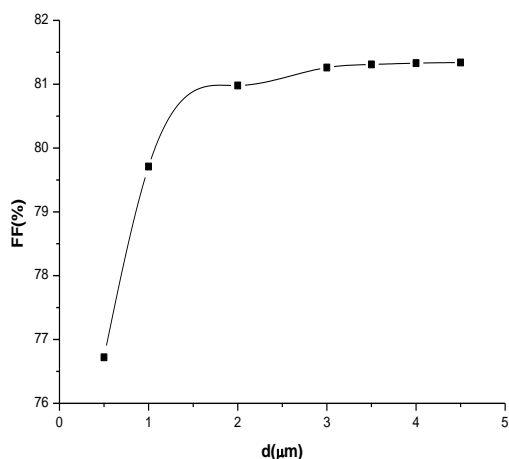


Figure 3. Taux de recombinaison à l'interface de la couche CIGS/CdS pour une épaisseur de l'absorbeur $d = 0.5 \mu\text{m}$ et $d = 3.5 \mu\text{m}$.



Nous remarquons également à partir de la figure 4, que le rendement quantique de la cellule est meilleur pour une forte épaisseur de la couche active et avoisine les 100% dans la gamme du visible (courbe bleue), indiquant une meilleure absorption des rayonnements solaires. C'est pour cette raison que le rendement en puissance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur.

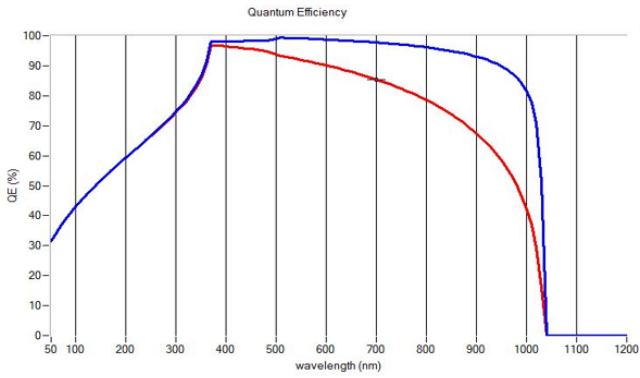


Figure 4. Rendement quantique de la cellule pour deux valeurs d'épaisseurs de la couche active CIGS (Rouge pour $d=0.5\mu\text{m}$ et Bleu pour $d=3.5\mu\text{m}$)

3.2. Effet du dopage de l'absorbeur CIGS sur la performance de la cellule

Nous avons fait varier la densité de dopage de l'absorbeur N_A de 10^{12} à 10^{16}cm^{-3} [7] en fixant l'épaisseur à $3.5\mu\text{m}$ et nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction de la densité de dopage (Figure 5).

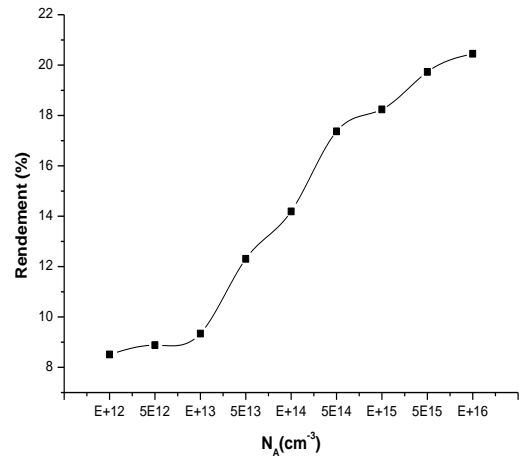
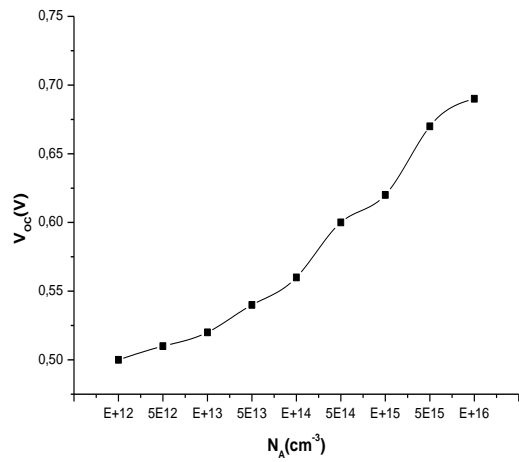
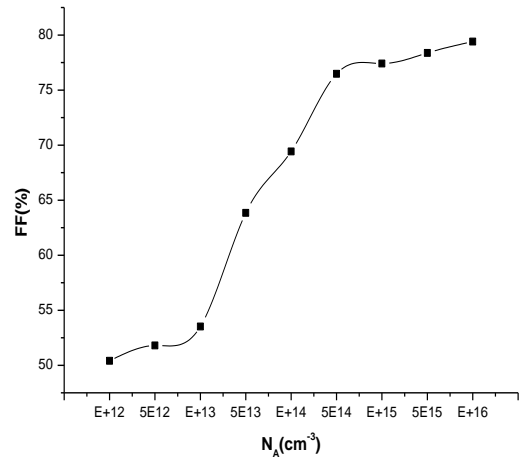
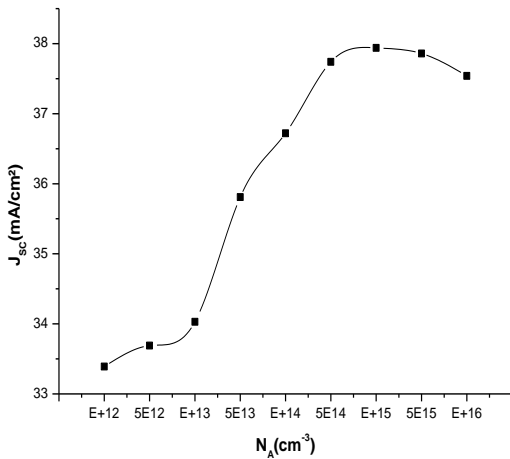


Figure 5. Variation des paramètres PV en fonction de la densité de dopage N_A de la couche active .

Nous pouvons constater que lorsque N_A passe de 10^{12} à 10^{16} cm^{-3} , le rendement de conversion augmente rapidement de 8.51% à 22.45%. Cela indique que le dopage de la couche absorbante a un effet important sur l'efficacité de la cellule. Cela est dû au fait que l'augmentation du dopage engendre un fort champ électrique au niveau de la jonction CIGS/CdS. Pour confirmer cela, nous avons tracé sur la Figure 6, l'intensité du champ électrique en fonction de la position dans la cellule pour deux valeurs de dopage, et nous pouvons constater que le champ électrique augmente considérablement au niveau de la face arrière de la cellule, lorsque le dopage augmente, ce qui facilite la séparation et la collecte des porteurs photogénérés améliorant ainsi la performance de la cellule.

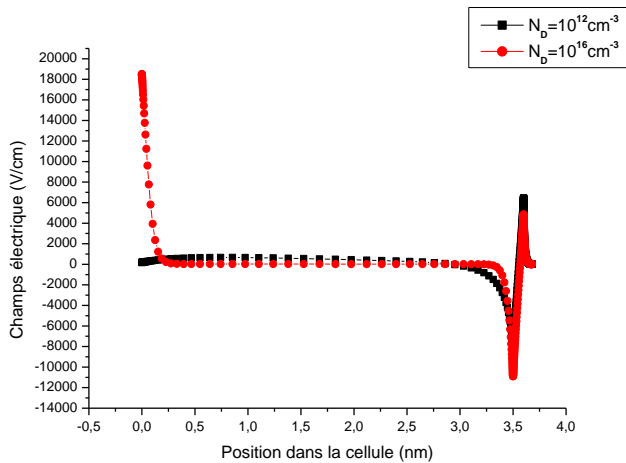
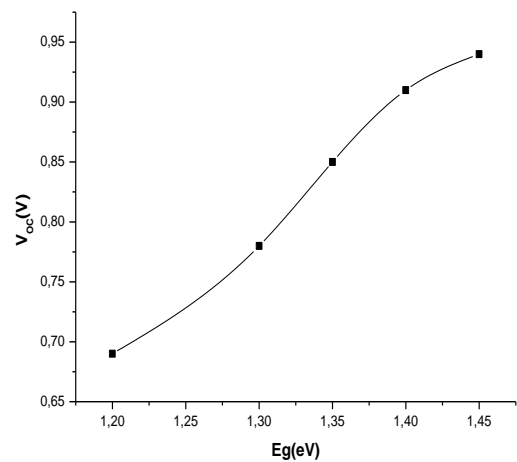
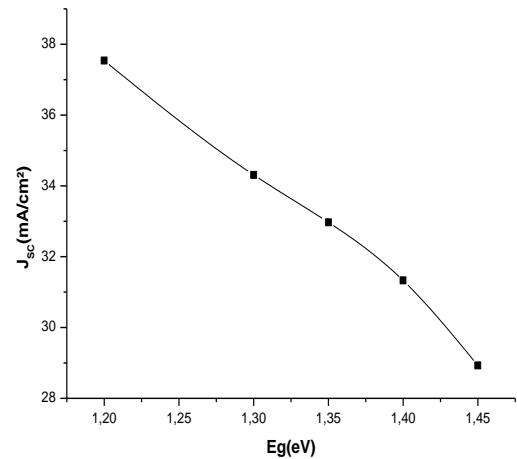


Figure 6. Intensité du champ électrique en fonction de la position dans la cellule pour deux valeurs de dopage de la couche CIGS.

3.3. Effet du gap de la couche CIGS sur la performance de la cellule

Nous fixons l'épaisseur de la couche CIGS à 3.5 μm et son dopage à 10^{16} cm^{-3} et nous varions le gap de 1.2 à 1.45 eV [8]. Nous remarquons à partir de la figure 7, que l'accroissement du gap de 1.2 eV à 1.45 eV génère une augmentation du V_{OC} qui passe de 0.69 V à 0.94 V, une diminution du J_{SC} de 37.54 mA/cm^2 jusqu'à 28.93 mA/cm^2 ainsi qu'une diminution du FF de 79.41% à 72.16 %, le rendement de conversion

augmente quant à lui jusqu'à un gap de 1.35eV et atteint un maximum de 21.73%, au-delà de cette valeur, le rendement diminue de nouveau. Ces résultats indiquent que le choix du gap du CIGS est très important. Lorsqu'il est faible le champ électrique induit au niveau de la CdS/CIGS n'est pas suffisant pour une meilleure séparation des charge, et lorsqu'il est important, l'absorption est réduite dans les longueurs d'ondes supérieures à 850 nm, comme nous pouvons le constater sur le figure 8.



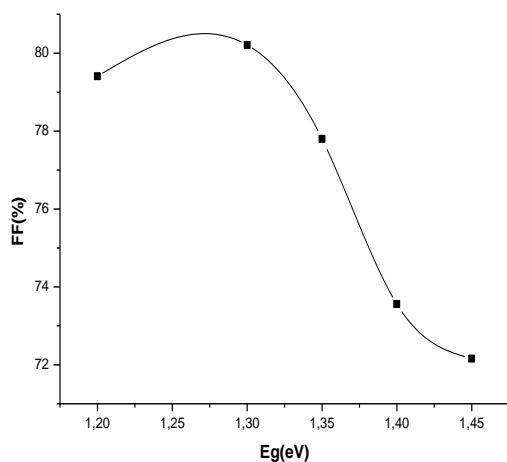
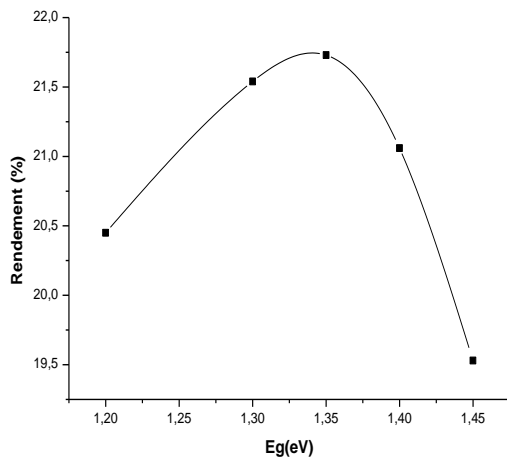


Figure 7. Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du gap de la couche CIGS.

Le rendement quantique externe de la cellule, représenté sur la figure 8, est caractéristique des cellules solaires à base de CIGS [9]. Il est plus faible lorsque l'énergie de gap augmente et avoisine les 100% avec un maximum situé vers les longueurs d'ondes de 550 nm [10].

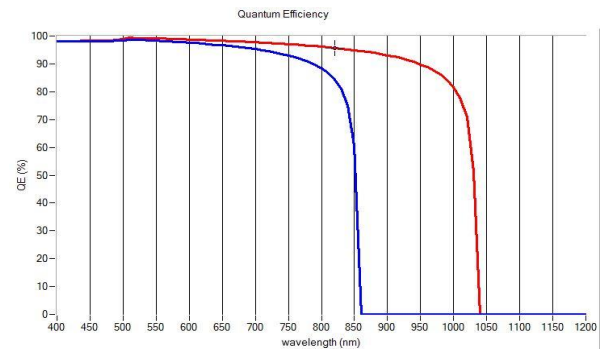


Figure 8. Rendement quantique de la cellule étudiée pour pour $E_g=1.35$ eV (rouge) et $E_g=1.45$ eV (bleu).

4. Conclusion

A l'issue de ce travail, nous avons optimisé la couche active d'une cellule solaire à base de diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ à l'aide du simulateur SCAPS-1D. Une densité de dopage de 10^{16} cm^{-3} , une épaisseur de $3.5 \mu\text{m}$ et une énergie de gap de 1.3 eV nous ont permis d'atteindre un rendement de conversion de 21.73% . Ce rendement rentre dans la gamme établie expérimentalement pour les cellules solaires à base de chalcopyrites mais reste inférieur au rendement record établi par la firme *Solar Frontier* en 2019 [3]. Cependant, la performance de la cellule peut être nettement améliorée après l'optimisation de l'émetteur à base de CdS et de la couche fenêtre à base de ZnO.

Remerciements

Nous remercions Pr. M.Burgelman de l'université de Gent de nous avoir autorisé à utiliser le logiciel SCAPS-1D.

Références

- [1] P. Jackson, R. Wuerz, D. Hariskos, E. Lotter, W. Witte, M. Powalla, "Effects of heavy alkali elements in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells with efficiencies up to 22.6% ," *Physica Status Solidi*, vol. 10, no. 8, pp. 583–586, (2016)
- [2] M. Asaduzzaman, M. Hasan, and A. N. Bahar, "An investigation into the effects of band gap and doping concentration on $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cell efficiency" *Springer Plus*, vol. 5, no. 1, p 578 , (2016)

- [3] M. Nakamura, K. Yamaguchi, Y. Kimoto, Y. Yasaki, T. Kato and H. Sugimoto, "Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ Thin-Film Solar Cell With Record Efficiency of 23.35%", *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, pp. 1863-1867, (2019).
- [4] A. O. Pudov, A. Kanevce, H. A. Al-Thani, J. R. Sites, and F. S. Hasoon, "Secondary barriers in CdS–CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ solar cells," *Journal of Applied Physics*, vol. 97, no. 6, 064901 pages, (2005).
- [5] A. Chadel, B. Benyoucef, M. Chadel "Numerical analysis of the effect graded Zn(O,S) on the performance of the graded CIGS based solar cells by SCAPS-1D" *International Journal Nanoelectronics and Materials*, vol 9, no 1-7, pp 103-110, (2016).
- [6] J. Pettersson, T. Torndahl, C. Platzer-Bjorkman, A. Hultqvist, M. Edoff, "The Influence of Absorber Thickness on Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells With Different Buffer Layers" *IEEE Journal Of Photovoltaics*, Vol. 3, no. 4, pp 1376-1382, (2013).
- [7] S. Dabbabi, T. Ben Nasr, N. Kamoun-Turki, "Parameter's optimization of CIGS solar cell using 2D physical modelling", *Results in Physics*, Volume 7, p 4020-4024, (2017).
- [8] A. V. Mudryi *et al.*, "Structural and optical properties of thin films of Cu(In,Ga)Se₂ semiconductor compounds", *Journal of Applied Spectroscopy*, Vol. 77, No. 3, pp 371–377, (2010).
- [9] H. Ullah, B. Marí and H. N. Cui, "Investigation on the Effect of Gallium on the Efficiency of CIGS Solar Cells through Dedicated Software", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 448, p 1497, (2014).
- [10] M. P. Paranthaman, W. Wong-Ng, R. N. Bhattacharya, «Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells», *Springer Series in Materials Science*, p 279, (2016).