



Full Length Research Paper

Etude de l'influence du dopage CIGS sur les paramètres électriques macroscopiques de la cellule solaire traité au fluorure de potassium

Djimba NIANE*, Ibrahima Wade¹, Aliou Diedhiou², Moustapha Dieng¹ Département de Physique, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal² Laboratoire des Semi-conducteurs et de l'Energie Solaire, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

Received April 2024 – Accepted June 2024

*Corresponding author. djimbabn@gmail.com

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé:

Dans ce travail, l'hétérojonction composée d'une couche d'oxyde conducteur transparent (OTC) ZnO de type n, d'une couche tampon CdS de type n et d'une couche d'absorbant à base de Cu(In,Ga)Se₂ dopée p, est étudiée sous l'influence du taux de dopage de l'absorbant CIGS avec différentes épaisseurs de fluorure de potassium (KF) mise dans l'interface CIGS/CdS. Cette étude a été faite en variant à l'aide d'un logiciel de simulation pour les couches minces dénommé SCAPS-1D afin de déterminer l'épaisseur optimale. Nous avons pris trois épaisseurs 20nm, 25nm et 30nm de KF et le dopage de la couche de CIGS a été varié en vue de trouver les dopages optimaux pour une meilleure performance de la cellule. Les résultats ont montré que pour des épaisseurs de 20 nm, 25nm et 30nm de KF, les dopages adéquats de l'absorbant CIGS doivent être $4,80.10^{16}cm^{-3}$, $3,80.10^{16}cm^{-3}$ et $2,33.10^{16}cm^{-3}$ correspondant à des rendements de conversions maximales de 23,62%, 23,32% et 23,02% respectivement.

Mots : Cellule solaire – CIGS– KF- taux de dopage- Paramètres macroscopiques électriques- SCAPS-1D**Cite this article:**

Djimba NIANE, Ibrahima Wade, Aliou Diedhiou, Moustapha Dieng. (2024). Etude de l'influence du dopage CIGS sur les paramètres électriques macroscopiques de la cellule solaire traité au fluorure de potassium des propriétés géotechniques. Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 6(1), pp. 101-107. ISSN 2630-1164.

1. Introduction

Durant ces dernières décennies, les cellules solaires à base de CIGS ont été largement étudiées et des progrès significatifs ont été réalisés conduisant à un développement croissant de cette technologie. Divers rendements record ont été reportés dans la littérature durant ces dernières années : 22,7% [1], 23,3%, [2] et 23,6% [3]. L'utilisation du fluorure de potassium a joué un rôle déterminant dans l'optimisation de l'efficacité de la cellule solaire. Des études sur l'effet bénéfique du fluorure de potassium sur la génération et la recombinaison des porteurs dans ce type de cellule, ont été déjà publiées [4,5,6,7,8]. Dans ce travail, une étude par simulation numérique de l'influence du taux de dopage de la couche absorbante CIGS traité au fluorure de potassium est faite sur les paramètres macroscopiques de la photopile.

2. Matériels et méthodes

La plupart des études faites sur les cellules solaires à base de CIGS sont expérimentales au détriment de la recherche théorique qui reste toujours insuffisante. Cependant, le calcul demeure une méthode simple, économique et il nous épargne l'effort et le temps pour optimiser les paramètres des cellules solaires en couches minces.

Dans ce papier, l'étude de l'influence du fluorure de potassium sur les paramètres macroscopiques électriques de la cellule solaire à base de CIGS est faite avec le logiciel SCAPS-1D. C'est un logiciel qui procède à la résolution des équations fondamentales des semi-conducteurs [9,10].

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = q(R - G) + q \frac{\partial n}{\partial t} \quad [\text{Eq. 2}]$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = q(R - G) + q \frac{\partial p}{\partial t} \quad [\text{Eq. 3}]$$

Où ϵ est la constante diélectrique, ϕ le potentiel électrostatique, n et p les concentrations des porteurs libres N_{D^+} et N_{A^-} sont les densités des accepteurs et donneurs ionisés. J_n et J_p les densités de courants des électrons et des trous, R le taux de recombinaison et G le taux de génération électron-trou.

La couche de KF utilisée dans ce travail à un band gap de 1,5eV tirée à partir des données expérimentales fournies dans les travaux d'O'Bryan et Skinner, citées par Mott et Gurney, son affinité électronique 4.14 eV et sa constante diélectrique 6,05 eV [11]. Elle est mise entre la couche absorbante CIGS et celle tampon CdS. La structure de l'hétérojonction n-ZnO/n-CdS/p-CIGS configurée au niveau du logiciel est représentée dans la Figure 1.

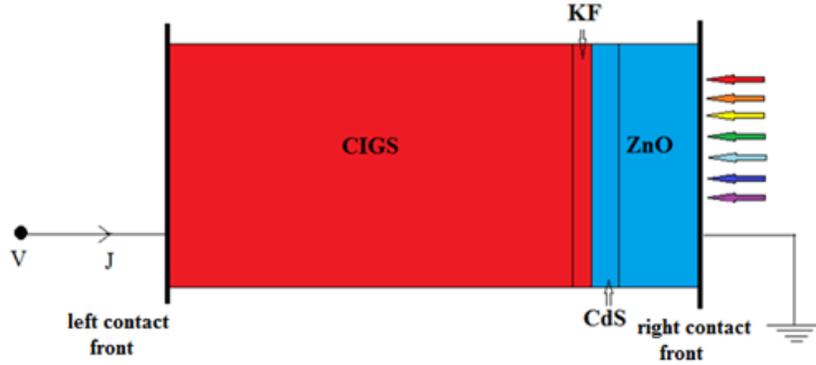


Figure 1: Structure d'une hétérojonction n-ZnO/n-CdS/p-CIGS.

Les paramètres de base des quatre couches de la cellule utilisés dans la simulation sont présentés dans le tableau 1 :

Tableau 1: Les paramètres de base des différentes couches de la cellule utilisés dans la simulation : (a) et (d) désignent les états accepteurs et donneurs respectivement

Propriétés des couches					
	CIGS	KF	CdS	ZnO	Al-ZnO
W (μm)	2,5	-	0,05	0,05	0,2
Eg (eV)	1,2	1,5	2,4	3,3	3,6
χ (eV)	4,5	4,17	4,2	4,45	4,45
ε/ε₀	13,6	6,05	10	9	9
$N_c (cm^{-3})$	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$
$N_v (cm^{-3})$	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$
$\mu_n (cm/s)$	100	100	100	100	100
$\mu_p (cm/s)$	25	25	25	25	25
$N_{dopage} (cm^{-3})$	- (a)	$1 \cdot 10^{12}$ (a)	$1 \cdot 10^{18}$ (d)	$1 \cdot 10^{18}$ (d)	$1 \cdot 10^{20}$ (d)

3. Résultats et Discussions

Le paramètre le plus important d'une cellule solaire est son rendement η . Il est défini comme le rapport de la puissance maximale (électrique) sur la puissance délivrée par la cellule de la densité de puissance irradiée par la source lumineuse. Les paramètres caractéristiques des cellules qui sont habituellement utilisés en plus pour décrire la performance de la cellule sont la tension en circuit ouvert (V_{CO}), la densité de courant en court-circuit (J_{CC}) et le facteur de forme (FF).

Les caractéristiques densités de courant-tension (J-V) des cellules solaires sous éclairage peuvent être décrites par l'équation phénoménologique de la diode [12].

$$J(V) = J_0 \left(e^{\frac{q(V - R_s J)}{kT}} - 1 \right) + \frac{V - R_s J}{R_p} - J_{ph} \quad [\text{Eq. 4}]$$

où J est la densité de courant, V est la tension de polarisation appliquée, J_0 est un pré-facteur nommé densité de courant de saturation, q est la charge de l'électron, R_s et R_p sont les résistances séries et parallèles respectivement, A est le facteur idéal de la diode, kT est la constante de Boltzmann multiplié par la température absolue, et J_{ph} est le courant généré par la lumière.

L'équation de la diode (3) contient des photocourants de polarisation indépendant, elle est idéale par exemple lorsque les longueurs de diffusion des porteurs

minoritaires sont très petites. En l'absence de résistance série et shunts (c.-à-d. $R_s=0$ et $R_p = \infty$), l'équation de la diode se simplifie

$$J(V) = J_0(e^{\frac{qV}{AkT}} - 1) - J_{ph} \quad [Eq. 5]$$

Ainsi, les expressions suivantes pour le courant de court-circuit J_{CC} ($V = 0$) et la tension en circuit ouvert V_{CO} ($J_{CC} = 0$) sont obtenues :

$$J_{CC} = - J_{ph} \quad [Eq. 6]$$

$$V_{CO} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1\right) \quad [Eq. 7]$$

Le rendement de la cellule est calculé à partir de la densité maximale de puissance délivrée par la cellule ($J_m V_m$) par rapport à la densité de puissance irradiée P_s :

$$\eta = \frac{J_m V_m}{P_s} = \frac{J_{CC} V_{CO} FF}{P_s} \quad [Eq. 8]$$

où le facteur de forme FF est défini comme :

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{CC} V_{CO}} \quad [Eq. 9]$$

Les paramètres électriques dérivés de la caractéristique I-V pour différents dopages de la couche de CIGS et pour chaque épaisseur prise de KF sont représentées au niveau des tableaux 1, 2 et 3 respectivement. Nous notons dans le tableau 1 et 2 respectivement que pour des dopages $N_b=10^{15}cm^{-3}$ et $N_b=10^{16}cm^{-3}$, les paramètres électriques de sorties varient très faiblement avec les épaisseurs de KF prises respectivement. Ceci montre que pour des dopages compris entre $[10^{15}cm^{-3}, 10^{16}cm^{-3}]$, la diffusion du potassium agit fortement dans la recombinaison des porteurs.

Par contre pour un dopage de CIGS maximum $N_b=10^{17}cm^{-3}$, comme le montre le tableau V-3, l'augmentation de l'épaisseur de la couche de KF a entraîné une diminution du rendement de conversion de la cellule. Le rendement est passé de 22,85% à 18,04%, soit une perte de 4,81%.

Tableau 2 : Paramètres électriques de sorties pour un dopage de CIGS $N_b=10^{15}cm^{-3}$

	Vco(V)	Jcc (mA.cm ⁻²)	FF (%)	η(%)
20nm de KF	0.642460	38.10580155	81.5021	20.8368
25nm de KF	0.642594	38.10281882	81.4287	20.8207
30nm de KF	0.642771	38.09995229	81.3353	20.8010

Tableau 3 : Paramètres électriques de sorties pour un dopage de CIGS $N_b=10^{16}cm^{-3}$

	Vco(V)	Jcc (mA.cm ⁻²)	FF (%)	η(%)
20nm de KF	0.707321905	36.89719751	83.9576	22.6452
25nm de KF	0.707529910	36.88520095	83.8945	22.6208
30nm de KF	0.707826407	36.86728696	83.7975	22.5837

Tableau 4 : Paramètres électriques de sorties pour un dopage de CIGS $N_b=10^{17}cm^{-3}$

	Vco(V)	Jcc (mA.cm ⁻²)	FF (%)	η(%)
20nm de KF	0.775250	35.75022066	78.9457	22.8493
25nm de KF	0.782015	35.72228745	70.5682	20.5867
30nm de KF	0.789779	35.70102689	61.2557	18.0367

3.1. Densité de courant de court-circuit

La figure 2 représente l'évolution de la densité de courant de court-circuit en fonction du taux de dopage de CIGS pour 20nm, 25nm et 30nm de KF.

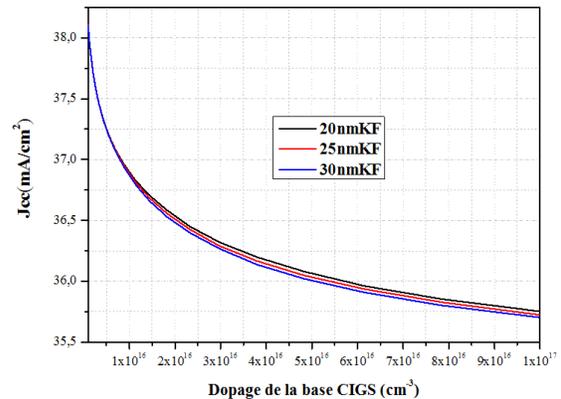


Figure 2 : Densité de courant de court-circuit en fonction du dopage de la couche de CIGS pour 20nm, 25nm et 30nm respectivement

Nous remarquons une diminution de la densité de courant de court-circuit avec le dopage de la base CIGS. La diminution s'accroît avec les forts dopages de CIGS. Ce résultat est en accord avec ceux trouvés expérimentalement dans la littérature. En effet, l'augmentation du dopage de type p du CIGS entraîne une augmentation de la concentration des impuretés induisant la création d'états profonds au niveau de la structure de bande. Ces états profonds permettent de piéger les porteurs minoritaires (électrons) causant ainsi une diminution de leur coefficient de diffusion. Etant donné que la densité de courant est fortement liée à la diffusion des porteurs minoritaires et que cette diffusion devient de plus en plus faible avec l'accroissement du dopage de CIGS ; donc par conséquent il y'aura une diminution de la densité de courant. En outre, nous notons que pour des dopages inférieurs à 10^{16}cm^{-3} , on note que l'augmentation de l'épaisseur de la couche de KF n'influe pas sur la densité de courant de court-circuit. Alors que lorsque le dopage est supérieur à 10^{16}cm^{-3} , la valeur de la densité de courant baisse de façon croissante avec les échantillons de KF.

3.2. Tension de circuit-ouvert

La figure 3 montre la variation de la tension de circuit-ouvert en fonction du taux de dopage de CIGS pour 20nm, 25nm et 30nm de KF.

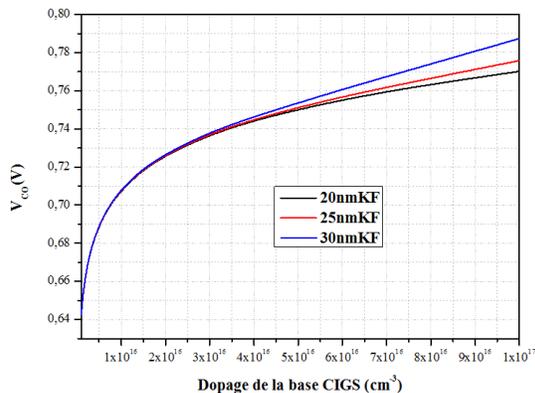


Figure 3 : Tension de circuit ouvert en fonction du dopage de la couche de CIGS pour 20nm, 25nm et 30nm de KF respectivement

Nous pouvons constater que la tension de circuit ouvert augmente avec le dopage CIGS, mais aussi avec l'épaisseur de la couche de KF. Cependant, l'augmentation de la tension de circuit ouvert en fonction de la teneur de KF commence à être visible lorsque le dopage du CIGS est supérieur à 4.10^{16}cm^{-3} . En effet, la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire dépend fortement de l'accumulation de charges de part et d'autre de la jonction. Les forts dopages de la base provoquent une traversée de flux de porteurs faible au niveau de la jonction, par conséquent il en découle une tension de circuit ouvert plus élevée due à une accumulation de charge au niveau de la

cellule. La constance de la tension de circuit ouvert en fonction de la teneur en KF pour des dopages inférieurs à 4.10^{16}cm^{-3} peut être due à la diffusion du potassium au niveau de la couche de CIGS qui passive la jonction en permettant d'augmenter le flux de porteurs qui traversent la jonction.

3.3. Puissance maximale de la cellule

La caractéristique P-V de la cellule solaire pour différentes épaisseurs de KF et dopages de CIGS respectivement, est représentée aux niveaux des figures 4, 5 et 6. Elle permet entre autres de déterminer la puissance de la cellule en chaque point. De plus, l'allure de la caractéristique P-V passe par un maximum correspondant à la puissance maximale de la cellule. Cette puissance n'est rien d'autre que le compromis entre la tension maximale et le courant maximum de la cellule solaire.

Comme nous l'avons constaté au niveau des mesures I-V, la caractéristique P-V présente les mêmes observations de la faiblesse de l'influence de l'épaisseur de la couche de KF pour des dopages compris entre $[10^{15}\text{cm}^{-3}, 10^{16}\text{cm}^{-3}]$ alors que pour des dopages supérieurs la valeur de la puissance maximale diminue avec l'épaisseur de la couche de KF. Le tableau 5 présente les différentes valeurs de la puissance maximale déduites des caractéristiques P-V pour différentes épaisseurs et dopages de CIGS.

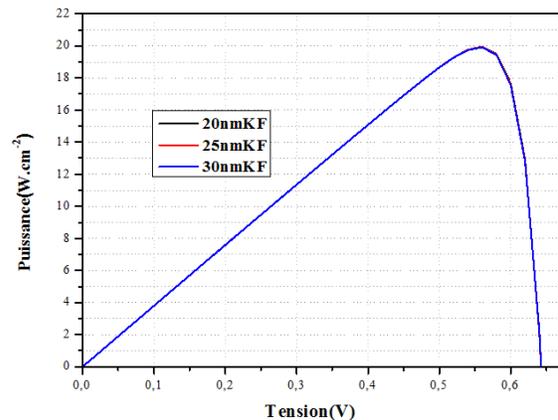


Figure 4: Caractéristique P-V pour différentes épaisseurs de KF pour un dopage de CIGS $N_b=10^{15}\text{cm}^{-3}$.

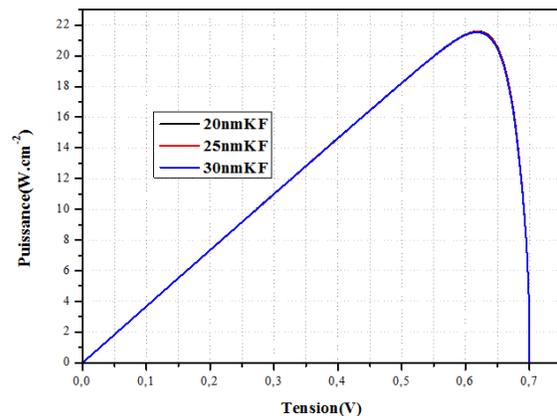


Figure 5 : Caractéristique P-V pour différentes épaisseurs de KF pour un dopage de CIGS $N_b=10^{16}\text{cm}^{-3}$.

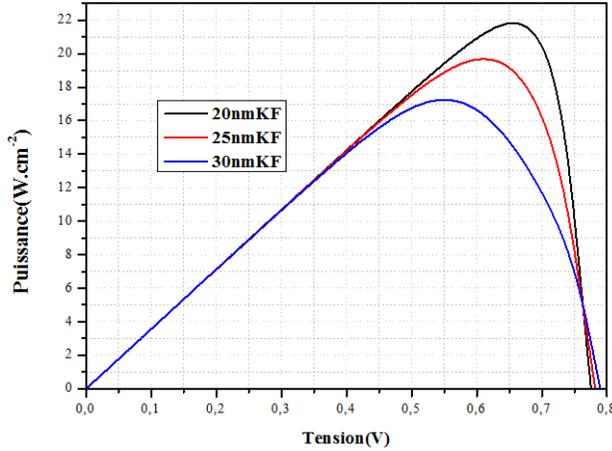


Figure 6 : Caractéristique P-V pour différentes épaisseurs de KF pour un dopage de CIGS $Nb=10^{17}cm^{-3}$.

Tableau 5: les différentes valeurs de la puissance maximale déduites des caractéristiques P-V pour différents épaisseurs et dopages de CIGS

	$Nb=10^{15}cm^{-3}$	$Nb=10^{16}cm^{-3}$	$Nb=10^{17}cm^{-3}$
20nm de KF	$P_m=19,9528(mW/cm^2)$	$P_m=21,8938(mW/cm^2)$	$P_m=21,8800(mW/cm^2)$
25nm de KF	$P_m=19,9375(mW/cm^2)$	$P_m=21,6613(mW/cm^2)$	$P_m=19,7134(mW/cm^2)$
30nm de KF	$P_m=19,9186(mW/cm^2)$	$P_m=21,6257(mW/cm^2)$	$P_m=17,2716(mW/cm^2)$

La puissance maximale en fonction du dopage de CIGS pour les différentes épaisseurs prises est représentée sur la figure 7. Le profil de la puissance atteste les résultats trouvés à partir des caractéristiques P-V. nous notons une diminution de la puissance au fort dopage qui devient plus accentuer avec l'épaisseur 30nm de KF. Cela est dû aux pertes observées avec la densité de courant.

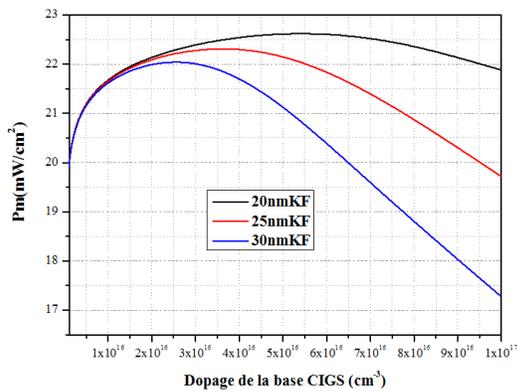


Figure 7 : Puissance maximale en fonction du dopage de la couche de CIGS pour 20nm, 25nm et 30nm de KF respectivement.

3.4. Facteur de Forme

Sur la figure 8, est représentée la variation du facteur de forme en fonction du dopage de la couche de CIGS pour les différentes épaisseurs.

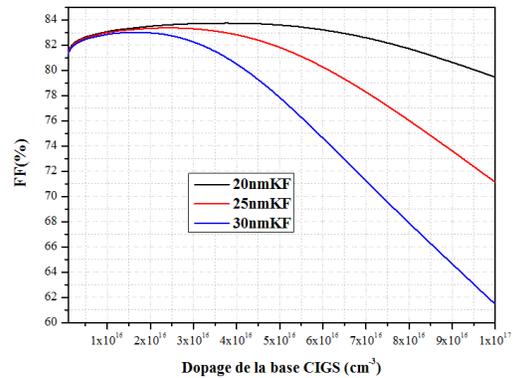


Figure 8 : facteur de forme en fonction du dopage de la couche de CIGS pour 20nm, 25nm et 30nm de KF respectivement.

Le profil du FF montre une diminution avec les forts taux dopage de la couche de CIGS qui est plus prononcée avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de potassium. La diminution du facteur de forme est fortement causée par la réduction de la puissance au point de puissance maximale.

3.5. Rendement de conversion (η)

Sur la figure 9, est représentée l'évolution du rendement de conversion maximale de la cellule solaire en fonction du dopage de la couche CIGS pour les différentes épaisseurs prises.

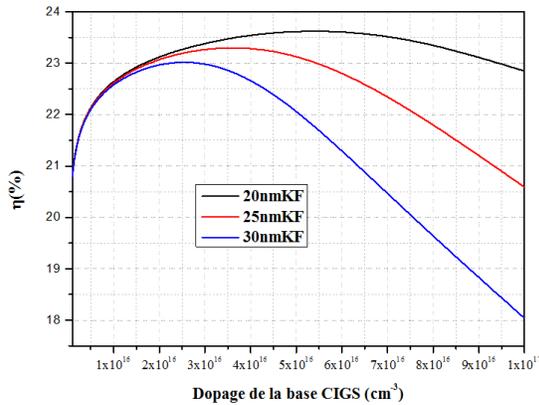


Figure 9 : Rendement de conversion en fonction du dopage de la couche de CIGS pour 20nm, 25nm et 30nm de KF respectivement.

Le constat que nous avons fait au niveau de la figure 9 montre d'une part que le rendement de la cellule augmente en fonction du dopage de la couche de CIGS lorsque ce dernier est compris dans l'intervalle [10^{15}cm^{-3} , 10^{16}cm^{-3}] indépendamment de l'augmentation de la couche de KF. D'autre part, lorsque le dopage est supérieur à 10^{16}cm^{-3} le rendement continue à augmenter jusqu'à un maximum qui se déplace de manière décroissante avec l'accroissement

de l'épaisseur de la couche de KF dans l'interface CIGS/CdS. Cela laisse supposer qu'il faut trouver un compromis entre le dopage de la couche de CIGS et la quantité de KF. En effet, la diffusion de la couche de KF dans le CIGS permet d'augmenter la concentration des trous au niveau de la base. Si cette dernière est en excès, cela peut accroître les impuretés au sein du matériau. Par conséquent, il découle une augmentation des recombinaisons qui diminuera le rendement de conversion pour les forts dopages de la couche de CIGS. Ceci est plus confirmé par les épaisseurs 25nm et 30 nm alors que l'épaisseur 20 nm montre une diminution du rendement moins remarquable due au grand rayon du potassium qui entraîne une faible diffusivité. De plus, nous rappelons que dans la littérature le dopage du CIGS utilisé dans l'élaboration de ce type de cellules solaires est 2.10^{16}cm^{-3} , donc ce qui correspondrait à une utilisation de 30nm de KF pour maximiser le rendement de conversion. Cependant, l'épaisseur 20nm reste la meilleure teneur de KF à utiliser pour une meilleure optimisation de l'efficacité de la cellule.

Les maximums de rendements trouvés correspondant à des dopages maximums sont résumés dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6: Rendement de conversion maximale correspondant à des dopages maximums de CIGS pour les différentes épaisseurs de KF prises

	Dopage maximum (cm^{-3})	$\eta_{\text{max}}(\%)$
20nm de KF	$4,80.10^{16}$	23,62
25nm de KF	$3,80.10^{16}$	23,32
30nm de KF	$2,33.10^{16}$	23,02

4. Conclusion

Dans ce travail nous avons étudié l'influence du dopage de la couche de CIGS sur les paramètres électriques sous la présence de trois échantillons de KF à savoir 20nm, 25nm et 30nm. Les résultats obtenus ont montré que l'épaisseur 20nm de KF avec un rendement de 23,62% correspond au meilleur échantillon pour une bonne passivation de l'interface par conséquence une meilleure efficacité de la photopile.

REFERENCES

- [1] Philip Jackson, Roland Wuerz, Dimitrios Hariskos, Erwin Lotter, Wolfram Witte, and Michael Powalla, "Effects of heavy alkali elements in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with efficiencies up to 22.6%" *Phys. Status Solidi RRL* 10, No. 8, 583–586 (2016).
- [2] 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%," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, pp. 1863-1867, Nov. 2019.
- [3] Keller, J., Kiselman, K., Donzel-Gargand, O. and al. High-concentration silver alloying and steep back-contact gallium

grading enabling copper indium gallium selenide solar cell with 23.6 per cent efficiency. *Nat Energy* (2024)

- [4] Djimba Niane*, Alain K. Ehemba, Salif Cissé, Ousmane Diagne, Moustapha Dieng "Influence of the Doping Rate of the CIGSe Layer on the Recombination-generation Mechanisms with 25 nm Incorporation of a KF Layer on a CIGSe Solar Cell", *American Journal of Energy Research*, 2018, Vol. 6, No. 1, pp.30-34.

- [5] Djimba Niane*, Ousmane Diagne, Alain K. Ehemba, Mouhamadou M. Soce, Moustapha Dieng "Generation and Recombination of a CIGSe Solar Cell under the Influence of the Thickness of a Potassium Fluoride (KF) Layer", *American Journal of Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 6, No. 2, pp.26-30.

- [6] Djimba Niane*, Ibrahima Wade, Ousmane Diagne, Mouhamadou M.Socé, Moustapha Dieng, "Determination of Electrical Parameters of a CIGS-Based Solar Cell under the Influence of a KF Layer from Impedance Spectroscopy", *American Journal of Energy Research*, 2018, Vol. 6, No. 2, 42-46.

- [7] Djimba Niane1, 2, Ousmane Diagne 1, 2, Demba Diallo 1, 2, Gerome Sambou 1, 2, Moustapha Dieng 1, 2, "Study of the Influence of the Content of a Potassium Fluoride Layer on the Capacitance and Conductance of a CIGS Thin-Film Solar Cell", *American Journal of Energy Engineering* 2018; 6(4): 38-43.

- [8] Djimba Niane, Mouhamadou M. Soce, Jean Jude Domingo, Ousmane Diagne & Moustapha Dieng, "Influence

of the Thickness of a Layer of Potassium Fluoride Incorporated in the CIGS/CdS Interface on the Macroscopic Electrical Parameters of the Solar Cell", *Applied Physics Research*, Vol. 11, No. 1 (2019) 1-7.

[9] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells", *Thin Solid Films* 361/362 (2000) pp.527–532.

[10] M. Burgelman, K. Decock, S. Khelifi and A. Abass, "Advanced electrical simulation of thin film solar cells", *Thin Solid Films*, 535 (2013) 296-30.

[11] N.F. Mott & R.W. Gurney, "Electronic processes in Ionic crystals", Dover, New York 1964 pp:274

[12] M. D. Archer. "The past and present. In: Clean electricity from photovoltaics, ed. by M. D. Archer and R. Hill, pp". 1–32, London: Imperial College Press, 2001