

Optimisation des paramètres photovoltaïques du CIGS à l'aide du simulateur AMPS-1D

Sampson Oladapo OYEDELE^{1,2*}, Boko AKA¹ et Bernabé MARÍ SOUCASE²

¹ *Université Nangui Abrogoua, UFR des Sciences Fondamentales et Appliquées (SFA),
02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire*

² *Universitat Politècnica de València, Departament de Física Aplicada-IDF, Camí de Vera, s/n,
46022 València, Spain*

* Correspondance, courriel : oyesamson2000@gmail.com

Résumé

Le Silicium Indium de Gallium et Cuivre (CIGS) dans sa structure chalcopyrite possède des propriétés électriques et électroniques intéressantes. Notre étude a porté sur la concentration de dopage des différentes couches constituant le CIGS et les effets des contacts avant et arrière sur les performances photovoltaïques de la cellule solaire. Nous avons fait la simulation de la variation de la concentration de dopage des différentes couches constituant le CIGS à l'aide d'AMPS-1D. Les effets du dopage des différentes couches constituant la cellule solaire à base de CIGS sur les paramètres photovoltaïques tel que le rendement (η) la tension de circuit ouvert (V_{co}) et la densité de court-circuit (J_{sc}) ont été étudiés. L'augmentation de la concentration de dopage des couches a un effet sur les performances des cellules solaires. Le plus grand rendement a été obtenu lorsqu'on a augmenté la concentration de dopage de la couche absorber. L'augmentation des conditions aux limites du contact avant diminue le rendement des cellules photovoltaïques tandis que l'augmentation des conditions aux limites du contact arrière l'augmente.

Mots-clés : *simulation numérique, cellule solaire CIGS, AMPS-1D, dopage, rendement.*

Abstract

Optimization of photovoltaic parameters solar cell based on CIGS with AMPS-1D

Copper indium gallium (di) selenide (CIGS) in its chalcopyrite structure has electrical and electronic properties. Our study focused on the doping of the various layers constituting the CIGS and the effects of the front and back contacts on the photovoltaic performance of the solar cell. We simulated the variation of the doping concentration of the various layers constituting the CIGS using AMPS-1D. The effects of the doping of the various layers of the CIGS solar cell on the photovoltaic parameters such as the efficiency (η) open circuit voltage (V_{co}) and the court circuit density (J_{sc}) have been analyzed. The increase in the doping of the layers has an effect on the performance of the solar cells. The greatest efficiency was obtained when the doping of the absorbed layer is height. The increase in the boundary conditions of the front contact decreases the efficiency of the photovoltaic cells while the increase in boundary conditions of the back contact increases.

Keywords : *numerical simulation, CIGS solar cell, AMPS-1D, doping, efficiency.*

1. Introduction

Les effets nuisibles des énergies fossiles sur notre environnement (émanation de CO₂, réchauffement de la planète, etc.) ont suscité une plus grande prise de conscience entraînant la conférence de PARIS [1]. Cette conférence a pris des mesures audacieuses entre autres supprimer d'ici au 31 Décembre 2020 toutes les subventions directes ou indirectes aux énergies fossiles pour les rediriger vers la recherche et le développement de technologies verte et d'énergies renouvelables dont l'énergie photovoltaïque. Dans le domaine de la conversion photovoltaïque diverses filières et technologies se partagent le marché. La filière des couches minces dont fait partie le polycristallin CIGS (le silicium d'Indium de Gallium et de Cuivre) occupe une place de choix. Le rendement à l'échelle du laboratoire du CIGS est de 22,3 % [2] représentant l'un des rendements les plus élevés des piles solaires. Le CIGS dans sa structure chalcopyrite possède des propriétés électroniques et électriques intéressantes. Il a une bande interdite directe et un coefficient d'absorption élevé. Cependant la complexité de sa structure due à la présence d'une hétérojonction rend la compréhension des phénomènes plus difficiles que dans le silicium d'où la nécessité d'entreprendre des études fondamentales. Plusieurs mesures expérimentales ont été effectuées pour obtenir des informations sur le fonctionnement interne des cellules. Mais l'interprétation de ces mesures est souvent différente en raison du manque de modèle précis [3]. La modélisation numérique apparait donc comme une nécessité pour la description réelle de ces dispositifs et l'utilisation de simulateur outre l'avantage qu'elle permet d'éviter de fabriquer plusieurs prototypes permet de calculer aussi les paramètres internes tels que les taux de recombinaison et les taux de dopage. Dans ce travail, nous utiliserons le simulateur numérique AMPS-1D [4] pour étudier les effets du dopage des différentes couches de la cellule solaire à base de CIGS et aussi pour étudier les effets des contacts avant et arrière sur les cellules solaires.

2. Méthodologie

2-1. Structure de la cellule et paramètre de simulation

La structure de base d'une cellule solaire à couche mince CIGS (Cu (In, Ga) Se₂) est constituée de plusieurs couches représentée sur la **Figure 1**. Le substrat le plus commun est un verre de silicate sodocalcique. Ce dernier est recouvert sur un côté de molybdène (Mo) servant de contact arrière métallique. L'hétérojonction est formée entre les semi-conducteurs CIGS et ZnO, avec une double couche d'interface constituée de CdS et de i-ZnO et le diagramme de bande d'énergie est donné à la **Figure 2**. Le CIGS a un dopage de type p provenant de défauts intrinsèques, alors que le ZnO est de type n grâce à l'incorporation d'aluminium (Al). Ce dopage asymétrique est à l'origine de la région de charge d'espace qui s'étend davantage dans le CIGS que dans le ZnO. La couche de CIGS sert d'absorbeur avec une énergie de bande interdite allant de 1,02 eV pour le CuInSe₂(CIS) à 1,65 eV pour le CuGaSe₂(CGS).

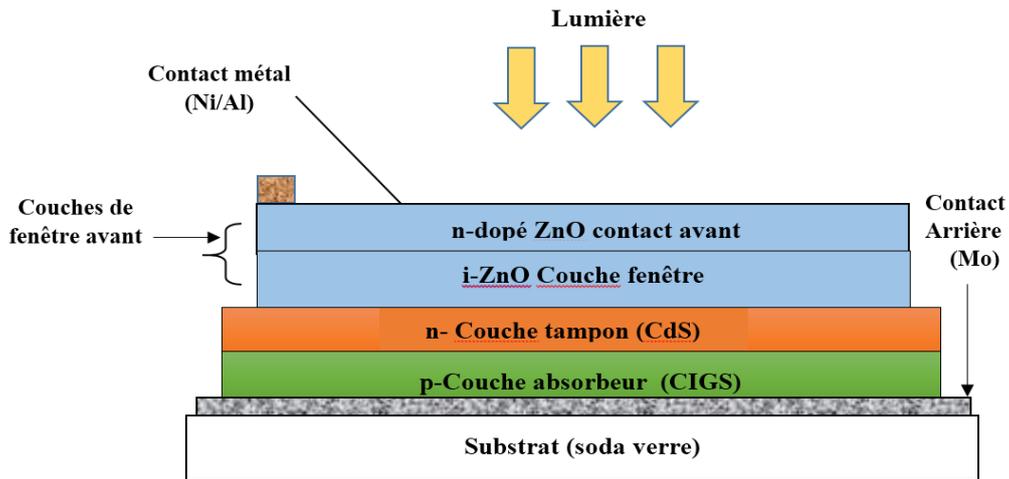


Figure 1 : Structure de couche d'une cellule solaire à couche mince $Cu(In,Ga)Se_2$

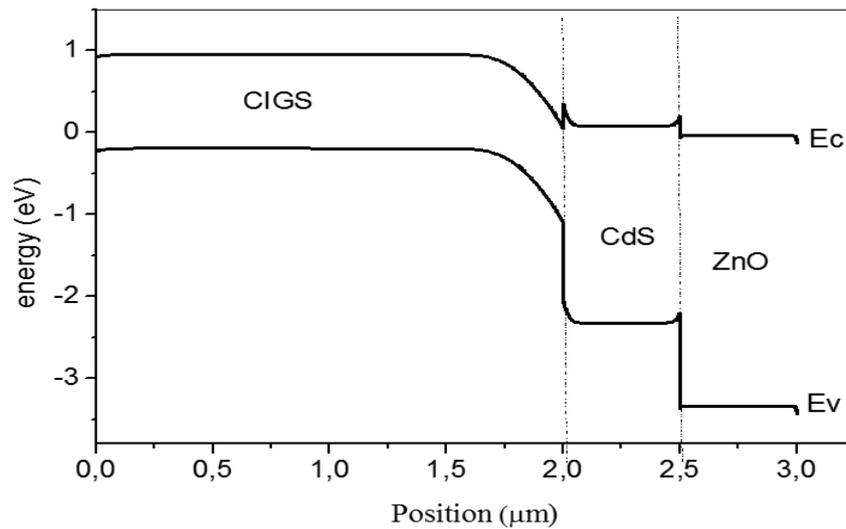


Figure 2 : Diagramme de bande d'énergie d'une cellule solaire CIGS

Les contacts avant et arrière constituent les électrodes positives (+) et négatives (-) chargée de collecter le courant. Les paramètres des matériaux en ZnO, CdS et CIGS utilisés dans la simulation de la cellule solaire représentés dans les **Tableaux 1a, 1b et 1c** sont issus de la littérature et des études expérimentales [5, 6]. L'utilisation d'AMPS-1D nécessite les paramètres d'illumination des cellules. Les coefficients d'absorption du CIGS, CdS et ZnO ont été tirés respectivement des références [7 - 9] :

Tableau 1a : Propriété Générale de la cellule

	Unités	Avant	Arrière
Condition limite $\Phi_b (E_c - E_f)$	eV	Varie	Varie
Vitesse de recombinaison en surface des électrons S_e	cm.s ⁻¹	10 ⁷	10 ⁷
Vitesse de recombinaison du trou en surface S_h	cm.s ⁻¹	10 ⁷	10 ⁷
Coefficient de réflectivité R_f		0.05	0.8

Tableau 1b : Paramètres des matériaux en ZnO, CdS et CIGS utilisés dans la simulation de la cellule solaire

Paramètres	Unités	p-CIGS	n-CdS	n-ZnO
Energie de gap (EG)	[eV]	Varie de 1.06 à 1.7	2.42	3.3
Affinité électronique (CHI)	[eV]	Varie de 3.47 à 4.60	4.4	4.2
Épaisseur (W)	[nm]	2500	50	150
Permittivité (EPS)		13.6	10	9
Mobilité des électrons (MUN)	[cm ² / Vs]	100	100	100
Mobilité de trou (MUP)	[cm ² / Vs]	25	25	25
Densité effective des états dans la bande de conduction (NC)	[cm ⁻³]	1.2×10^{18}	1.2×10^{18}	2.2×10^{18}
Densité effective des états dans la bande de valence (NV)	[cm ⁻³]	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
Densité effective de l'accepteur(NA)	[cm ⁻³]	2.0×10^{17}	0	0
Densité effective du donneur (ND)	[cm ⁻³]	0	2.1×10^{17}	2.0×10^{19}

Tableau 1c : Paramètres de la densité de défauts des matériaux en ZnO, CdS et CIGS

	Unités	ZnO	CdS	CIGS
N _{DG} , N _{AG}	(cm ⁻³)	D : 10^{17}	A : 10^{18}	D : 10^{14}
E _A , E _D	(eV)	Milieu du gap	Milieu du gap	Milieu du gap
W _G	(eV)	0.1	0.1	0.1
σ _n	(cm ²)	10^{-12}	10^{-17}	2×10^{-16}
σ _p	(cm ²)	10^{-15}	10^{-13}	2×10^{-15}

2-2. Principe de la simulation

Les paramètres de la simulation sont introduits dans AMPS-1D qui est un logiciel de simulation numérique des cellules solaire (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional AMPS-1D) et il a une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque. Il a été développé par le groupe du Professeur Stephen Fonash de l'université de Pennsylvanie [4]. Il a été conçu pour être un outil informatique très général et polyvalent de simulation pour l'analyse de microélectroniques et structures photoniques. Son principe de base est de résoudre l'équation de poisson et les équations de continuité soumis à des conditions aux limites associées des électrons libres et des trous à l'aide de Newton-Raphson. Il est mis gracieusement à la disposition des chercheurs sur demande aux auteurs. AMPS-1D diffère des autres logiciels d'analyse tel que SCAPS car il possède en plus d'autres caractéristiques. AMPS est le seul programme disponible qui incorpore toute la physique suivante [4] :

- Un traitement du contact qui permet à l'émission thermomique et la recombinaison d'avoir lieu aux contacts du dispositif ;
- Un modèle très généralisé d'état de la bande interdite d'intervalle qui s'adapte à n'importe quelle densité de distribution des états dans la couche ou à l'interface et traite les deux recombinaisons : bande à bande et Shockley-Read-Hall (SRH) ;
- La statistique complète de Fermi-Dirac et pas seulement celle de Boltzmann ;
- La mobilité des porteurs qui peut varier avec la position, les affinités des électrons et des trous qui peuvent varier avec la position, La capacité de calculer les caractéristiques du dispositif sous tension directe et inverse aussi bien qu'avec ou sans illumination ;

- La capacité d'analyser des structures du dispositif fabriqué en utilisant des matériaux à un cristal seul, poly-cristallin, ou amorphes ou tous les trois à la fois ;
- La possibilité d'étudier les cellules multicouches (facilité donc de simuler les cellules tandem).

Le panneau d'action d'AMPS-1D est représenté ci-dessous (*Figure 3*):

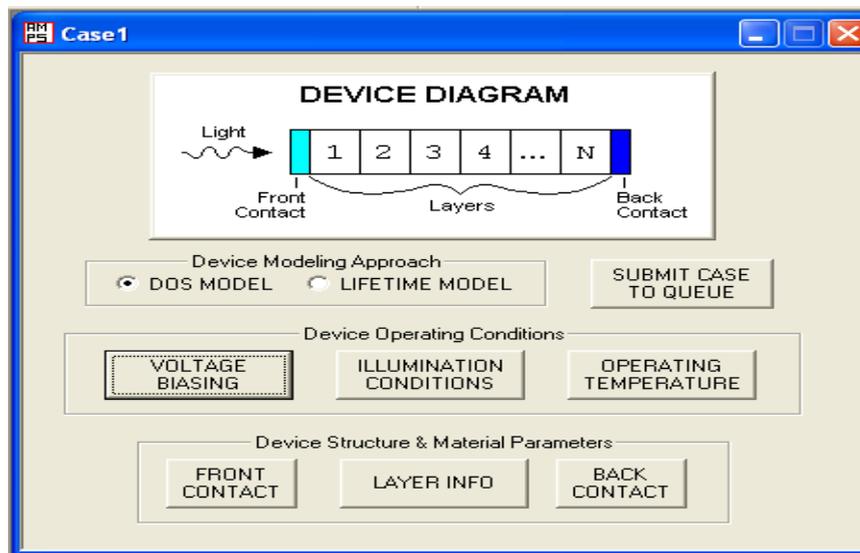
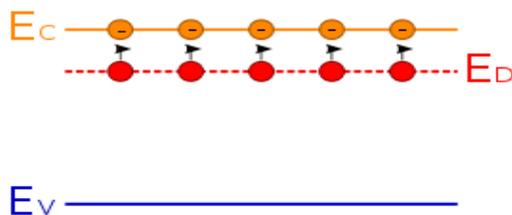


Figure 3 : Panneau d'action d'AMPS-1D

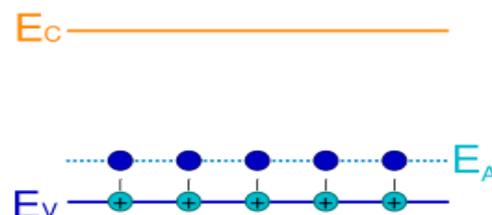
3. Résultats et discussion

Les propriétés des semi-conducteurs sont en grande partie régies par la quantité de porteurs de charge qu'ils contiennent. Ces porteurs sont les électrons ou les trous. Le dopage d'un matériau consiste à introduire des impuretés. Il existe deux types de dopage :

- * le dopage de type N, qui consiste à produire un excès d'électrons, qui sont négativement chargés ;
- * le dopage de type P, qui consiste à produire un déficit d'électrons, par conséquent un excès de trous, reconnus comme positivement chargés ;
- * Le dopage provoque la naissance de nouveaux niveaux accepteurs et donneurs d'électrons dans la structure de bande du matériau dopé. Ces niveaux apparaissent dans le gap, entre la bande de conduction et la bande de valence.



Dopage N



Dopage P

Le CIGS est du type p et ce dopage est dû à la présence de défaut cristallin générant des états accepteurs.

3-1. Effet de la variation du dopage des couches ZnO, CdS et CIGS sur le rendement

Afin d'étudier l'effet de la concentration de dopage des couches, nous calculons les paramètres photovoltaïques pour des valeurs de concentrations de dopages comprise entre 10^{15} et 10^{19} cm^{-3} , d'une couche tout en maintenant constante les concentrations de dopages des autres couches. La **Figure 4** montre l'effet de la concentration en dopage des différentes couches (ZnO, CdS, CIGS) sur le rendement (η) de la cellule solaire à base CIGS.

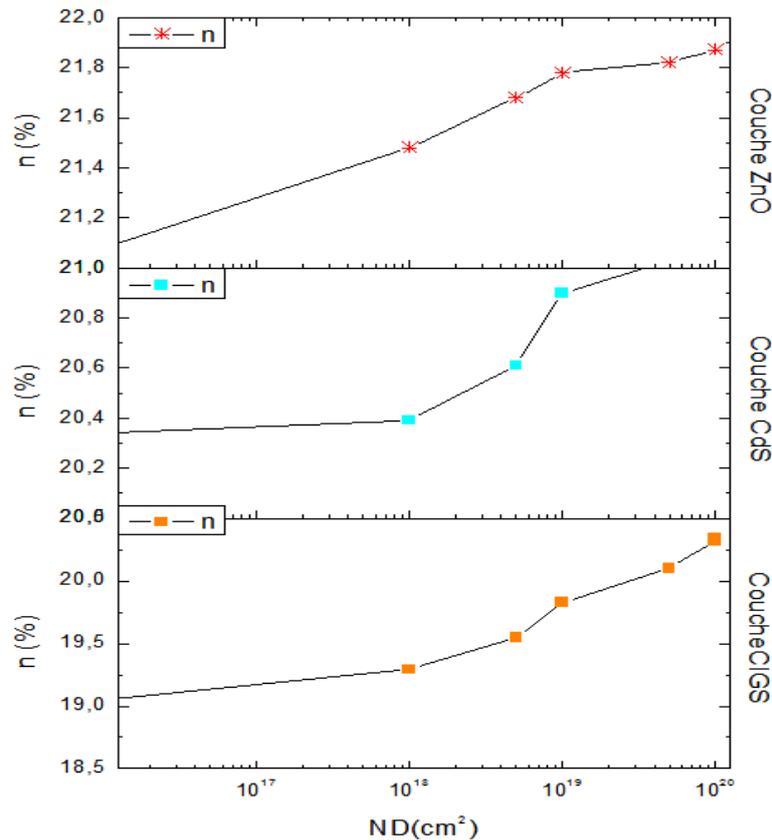


Figure 4 : Effet de la variation des concentrations de différentes couches sur le rendement

En variant la couche de concentration de dopage de la couche ZnO de 10^{16} à 10^{20} cm^{-3} , le rendement augmente de 21 % à 21,9 % soit une augmentation de 4 %. Lorsque la concentration de dopage de la couche CdS varie de 10^{16} cm^{-3} à 10^{18} cm^{-3} , le rendement est pratiquement constant et lorsque la concentration de dopage varie de 10^{18} cm^{-3} à 10^{20} cm^{-3} , le rendement augmente de 19,4 % à 21 % soit une augmentation de 3 %. En variant la concentration de dopage de la couche CIGS de 10^{16} à 10^{19} cm^{-3} , le rendement augmente de 19,1 % à 20,4 % soit une augmentation de 7 %.

3-2. Effet de la variation du dopage des couches ZnO, CdS et CIGS sur la tension de circuit ouvert

La **Figure 5** montre les effets de la variation de concentration des différentes couches (ZnO, CdS, CIGS, etc.) sur la tension de circuit ouvert (V_{oc}) de la cellule solaire.

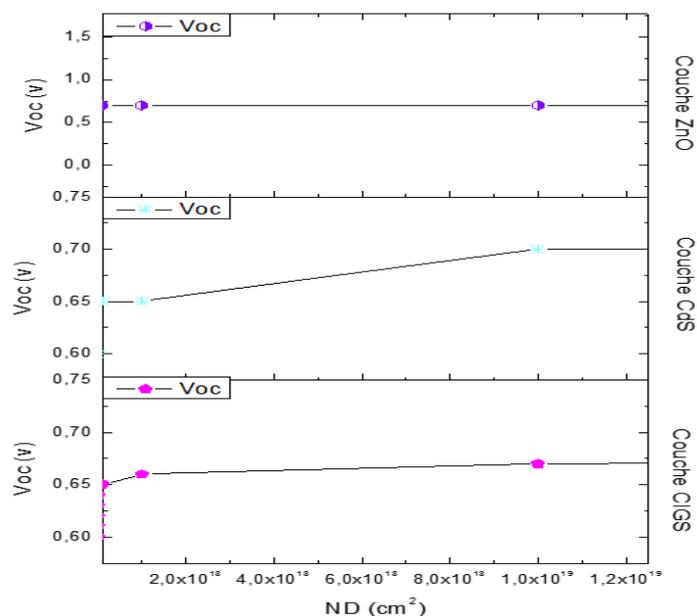


Figure 5 : Effet de la variation des concentrations de différentes couches sur la tension de circuit ouvert V_{oc}

Lorsque la concentration de dopage de la couche ZnO varie de 10^{16} à 10^{19} cm^{-3} , la tension V_{oc} reste pratiquement constant et la tension V_{oc} passe de 0,66 V à 0,69 V pour une concentration de dopage de CdS variant de 10^{16} cm^{-3} à 10^{19} cm^{-3} . Lorsque la concentration du dopage de la couche CIGS varie de 10^{16} cm^{-3} à 10^{19} cm^{-3} , la tension de circuit ouvert (V_{oc}) varie très faiblement. La variation du dopage des couches a peu d'effet sur la tension de circuit ouvert (V_{oc}).

3-3. Effet de la variation du dopage des couches ZnO, CdS et CIGS sur la densité de courant

La **Figure 6** montre les effets de la variation de concentration des différentes couches sur la densité de court-circuit (J_{sc}).

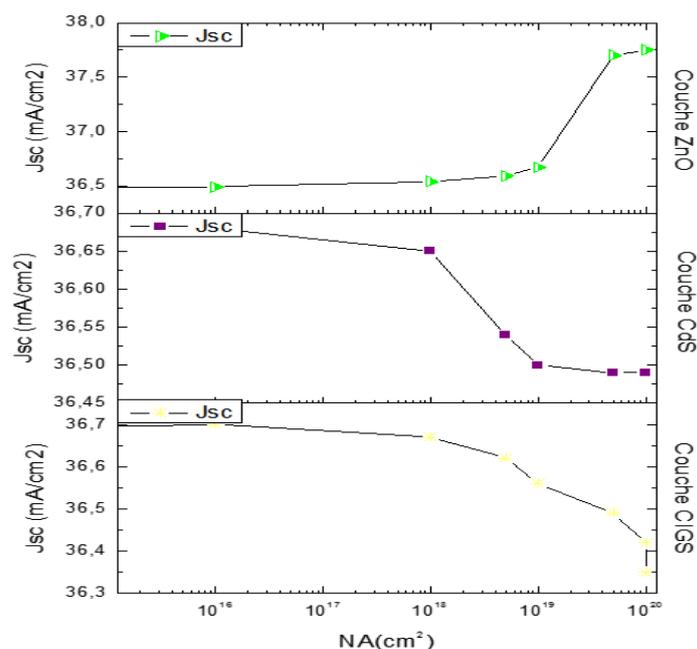


Figure 6 : Effet de la variation des concentrations de différentes couches sur la densité de court-circuit

Pour les concentrations de dopage allant de 10^{15} cm^{-3} à 10^{18} cm^{-3} de la couche ZnO, la densité de courant est pratiquement constante et pour une variation allant de 10^{18} à 10^{20} cm^{-3} , la densité augmente de $36,6 \text{ mA / cm}^2$ à $37,8 \text{ mA / cm}^2$ soit une augmentation de 4 %. Pour une augmentation de dopage de la couche CdS allant de 10^{15} à 10^{19} cm^{-3} , la densité de courant décroît de $36,68 \text{ mA / cm}^2$ à $36,46 \text{ mA / cm}^2$ soit une baisse de 3 %. La densité de courant décroît de $36,69 \text{ mA / cm}^2$ à $36,3 \text{ mA / cm}^2$ soit une baisse de 1 % pour une augmentation de dopage de la couche CIGS allant de 10^{16} à 10^{19} cm^{-3} .

3-4. Effet des couches avant et arrière sur les paramètres photovoltaïques

Une caractéristique d'AMPS-1D est de faire varier les conditions aux limites données par E_C-E_F .

3-4-1. Effet des couches avant

Dans la simulation, l'analyse est faite en variant les conditions aux limites du contact avant de 0 eV à $0,7 \text{ eV}$ en maintenant constant les conditions aux limites du contact arrière à $1,5 \text{ eV}$. La **Figure 7** nous montre les effets du contact avant sur les paramètres photovoltaïques.

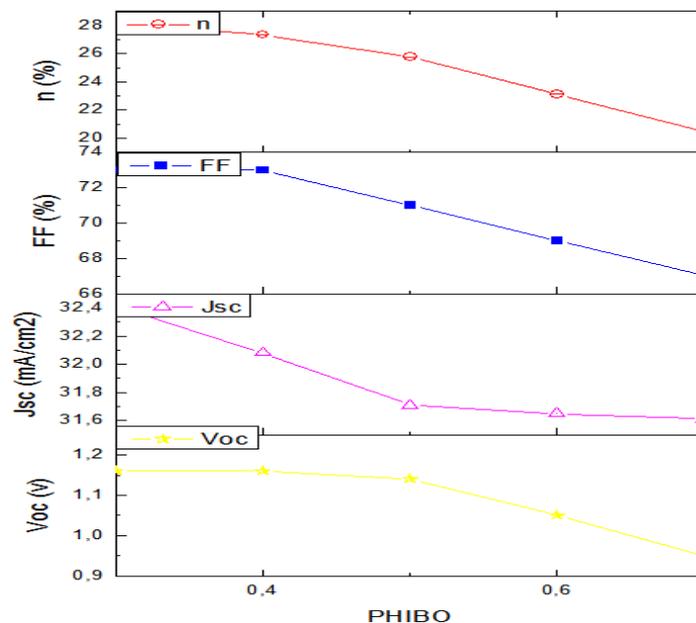


Figure 7 : Effet du contact avant sur les paramètres photovoltaïques

Lorsque les conditions aux limites varient de 0 eV à $0,7 \text{ eV}$, le rendement augmente de 20 % à 21 % soit une augmentation de 5 %. La tension de circuit ouvert Voc augmente de 0 V à $0,7 \text{ V}$ soit une augmentation de 70 % pour une variation de condition aux limites variant de 0 à $0,7 \text{ eV}$. Lorsque les conditions aux limites varient de 0 à 5 eV , la densité de courant de court-circuit décroît de $32,3 \text{ mA / cm}^2$ à $31,7 \text{ mA / cm}^2$ soit une baisse de 2 %.

3-4-2. Effet des couches arrière

Dans la simulation, l'analyse est faite en variant les conditions aux limites du contact avant de 0 eV à $1,5 \text{ eV}$ et en maintenant constant les conditions aux limites du contact arrière à $1,2 \text{ eV}$. La **Figure 8** laisse entrevoir les effets du contact avant sur les paramètres photovoltaïques.

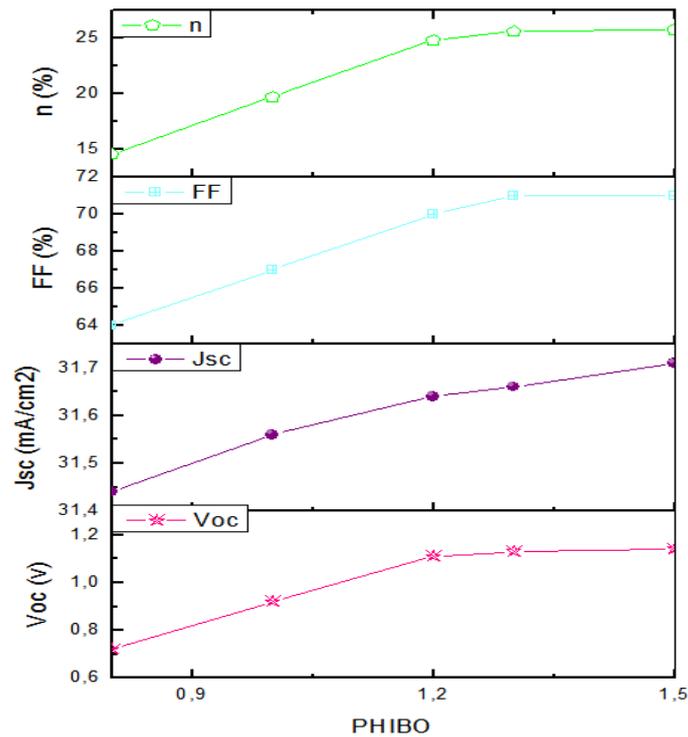


Figure 8 : Effet du contact arrière sur les paramètres photovoltaïques

Lorsque les conditions aux limites varient de 0 eV à 1,2 eV, le rendement augmente de 15 % à 25 % soit une augmentation de 67 % et de 1,2 eV à 1,5 eV, le rendement demeure pratiquement constant. La tension de circuit ouvert V_{oc} augmente de 0,65 V à 1,1 V soit une augmentation de 69 % pour une variation de condition aux limites variant de 0 à 1,2 eV. La tension demeure pratiquement constante pour une variation des conditions aux limites allant de 1,1 V à 1,5 V. Le contact arrière a donc des effets sur les performances photovoltaïques de la cellule solaire.

4. Conclusion

Une optimisation des paramètres d'une cellule solaire est nécessaire pour obtenir un bon rendement. Dans ce travail, nous avons effectué une simulation numérique d'une cellule solaire en couches minces et à hétérojonction à base de ZnO / CdS / CIGS / Mo en utilisant le simulateur AMPS-1D. La simulation numérique nous a permis d'étudier les sensibilités des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire aux dopages des couches ZnO et CdS de type n et CIGS de type p. Le plus grand rendement est obtenu lorsqu'on augmente le dopage de la couche absorbeur CIGS et cela est dû au fait que l'augmentation du dopage de la couche absorbeur améliore la collection des porteurs photogénérés conduisant ainsi à l'augmentation du rendement électrique. La simulation a montré que l'augmentation des conditions limites du contact arrière augmente le rendement de la cellule solaire.

Références

- [1] - Résolution sur la conférence de Paris sur le climat (COP 21) www.jugendparlament.lu/files/2015/07/Résolution_COP21.pdf, Fichier PDF
- [2] - <http://www.PV-magazine.com> (accessed 15.05 16 at 11h36 A.M.)
- [3] - M. BENOSMAN, « Modélisation des cellules solaires en couches minces de type Cu (In, Ga) (S, Se)₂ en vue de minimisation des pertes affectant les performances photovoltaïques » soutenue le 10 Juin 2009 à l'Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, Algérie
- [4] - AMPS-1D, Manual for windows 95 / NT, The Electronic Materials and Processing Research Laboratory at the Pennsylvania State University, University Park, PA 16802
- [5] - M. MOSTEFAOUI, H. MAZARI, S. KHELIFI, A. BOURAIOU, R. DABOU, Simulation of High Efficiency CIGS solar cells with SCAPS-1D software, *Energy Procedia*, 74 (2015) 736 - 744
- [6] - J. SONG, S. S. LI, C. H. HUANG, O. D. CRISALLE and T. J. ANDERSON, Device modeling and simulation of the performance of Cu (In_{1-x}Ga_x) Se₂ solar cells, *Solid State Electronics*, 48 (2004) 73 - 79
- [7] - P. D. PAULSON, R. W. BIRKMIRE, W. N. SHAFARMAN, Optical characterization of CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ alloy thin films by spectroscopic ellipsometry, *J. Appl. Phys.*, 94 (2003) 879 - 888
- [8] - S. ADACHI, Optical constants of crystalline and amorphous semiconductors". Ed. Springer, (1999) 502 - 506 p.
- [9] - S. ADACHI, Optical constants of crystalline and amorphous semiconductors. Ed. Springer, (1999) 426 - 428 p.