

Étude de l'effet du taux de dopage et de l'épaisseur des couches antireflets sur les paramètres électriques des photopiles au silicium

Papa Mass Seck¹, Sada Traore^{1,2}, Moussa Camara^{1,3}, Thiar Diop⁴, Moustapha Thiame^{1*}

¹Laboratoire de Chimie et de Physique des Matériaux (LCPM), Université Assane Seck de Ziguinchor, Diabir, BP 523 – Ziguinchor – Sénégal,

²Laboratory of Semiconductors and Solar Energy, Physics Department, Faculty of Science and Technology, Cheikh Anta Diop University, Dakar, Senegal

³Faculté des Sciences, Université Gamal Abdel Nasser de Conakry, Conakry, République de Guinée

(*) mthiame@univ-zig.sn

INFO SUR L'ARTICLE

Historique de l'article:

Reçu le : 12 mars 2024

Réçu en format révisé le : 17 août 2025

Accepté le : 04 octobre 2025

Mots-Clés : Taux de dopage, Epaisseur optimal, Couche antireflet, Paramètres électriques optimaux

Keywords : Doping rate, Optimal thickness, Anti-reflective layer, Optimal electrical parameters

RESUME

Cette étude vise à optimiser l'efficacité des cellules solaires de type Si(n)/Si(p) par une ingénierie précise de la couche Antireflet (ARC). Nous avons analysé l'influence de deux paramètres cruciaux : l'épaisseur et le taux de dopage sur les propriétés électriques et optiques de trois matériaux ARC sélectionnés : ZnO, SnO₂ et Al_{0.3}Ga_{0.7}As. La méthodologie d'optimisation a révélé que la performance du dispositif repose sur un équilibre délicat. D'une part, l'augmentation du taux de dopage a un impact positivement dominant sur les propriétés électriques en augmentant la conductivité et en réduisant la résistance série (Rs), améliorant ainsi le FF et le rendement. D'autre part, l'augmentation de l'épaisseur est limitée par un optimum strict ; au-delà de ce point, elle influence négativement les performances en perturbant l'effet antireflet (chute de Jsc) et en augmentant Rs (chute de FF et Voc).

La comparaison des matériaux a clairement désigné le ZnO comme la couche ARC la plus performante. L'optimisation a permis au dispositif Si(n)/Si(p) d'atteindre le meilleur rendement ($\eta_{\max} \approx 29,20\%$) pour le ZnO à une épaisseur de 124 nm et un taux de dopage de $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

ABSTRACT

This study aims to optimize the efficiency of Si(n)/Si(p)-type solar cells through the precise engineering of the Anti-Reflection Coating (ARC). We analyzed the influence of two crucial parameters: thickness and doping concentration on the electrical and optical properties of three selected ARC materials: ZnO, SnO₂, and Al_{0.3}Ga_{0.7}As. The optimization methodology revealed that device performance relies on a critical balance.

On one hand, increasing the doping concentration has a positively dominant impact on electrical properties by boosting conductivity and reducing series resistance (Rs), thereby improving the FF and efficiency. On the other hand, increasing the thickness is constrained by a strict optimum; beyond this point, it negatively affects performance by disrupting the anti-reflection effect (drop in Jsc) and increasing Rs (drop in FF and Voc).

Material comparison clearly identified ZnO as the most performing ARC layer. The optimization allowed the Si(n)/Si(p) device to achieve the best efficiency ($\eta_{\max} \approx 29.20\%$) for ZnO at a thickness of 124 nm and a doping concentration of $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

1. Introduction

La transition énergétique mondiale place la conversion photovoltaïque au cœur des stratégies de recherche et développement [1]. Les cellules solaires au silicium dominant encore largement le marché grâce à leur maturité technologique, leur fiabilité et leur coût compétitif [2]. Cependant, leur rendement reste limité par divers facteurs électriques et optiques, dont l'optimisation demeure un enjeu majeur [3-8]. Deux paramètres se révèlent particulièrement déterminants : le taux de dopage des régions actives et l'épaisseur des couches antireflets (ARC). Concernant le dopage, une quantité insuffisante réduit la conductivité et la tension en circuit ouvert (Voc), tandis qu'un excès favorise les recombinaisons Auger, diminuant la durée de vie des porteurs minoritaires [9-11]. Plusieurs travaux rapportent ainsi l'existence d'une plage optimale de dopage permettant de maximiser les performances globales [12,13]. Parallèlement, les couches antireflets jouent un rôle central dans la gestion optique en réduisant les pertes par réflexion. Cependant, l'influence de l'épaisseur n'est que peu étudiée de manière systématique pour certains matériaux prometteurs, tels que le SnO₂, le ZnO et l'Al_{0.3}Ga_{0.7}As [14-16]. Ces matériaux ont été sélectionnés en raison de leurs larges bandes interdites, assurant une bonne transparence dans le visible, de leur stabilité atmosphérique et de leur résistance aux hautes températures [17-19]. L'étude de ces matériaux est d'autant plus cruciale pour le contexte ouest-africain (Sénégal), caractérisé par un ensoleillement intense et des dépôts de poussière.

Le présent travail vise à modéliser et analyser l'influence du taux de dopage et de l'épaisseur de ces trois couches antireflets (SnO₂, ZnO et Al_{0.3}Ga_{0.7}As) sur les paramètres électriques fondamentaux (Voc, Jsc, FF et rendement) des photopiles au silicium Si(n)/Si(p). L'étude repose sur des simulations numériques paramétriques réalisées avec le logiciel SCAPS-1D, un outil reconnu et largement utilisé dans l'optimisation des structures photovoltaïques, y compris les cellules à base de Silicium et les hétérojonctions [20,22]. Pour atteindre l'objectif d'une efficacité maximale, nous avons adopté une stratégie d'optimisation séquentielle des paramètres critiques du dispositif. Notre approche d'optimisation paramétrique séquentielle, ciblant l'épaisseur et le taux de dopage des couches, est une méthode standard et efficace pour maximiser l'efficacité, comme l'illustrent des études similaires sur d'autres structures modélisées sous SCAPS-1D, telles que les cellules à pérovskite (CsSnI₃) [23] ou les cellules à base de nitrure (InGaN) [24]. Les résultats obtenus permettent d'identifier les conditions optimales et de comparer l'efficacité relative des différents matériaux ARC en vue d'améliorer la performance des cellules au silicium.

2. Présentation du logiciel de simulation et de la photopile

Pour l'étude de l'effet des couches antireflets (CAR) sur la performance de notre cellule solaire à simple jonction de

type Si(p)/Si(n), nous avons utilisé le logiciel SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension).

Développé au laboratoire ELIS (Electronics and Information Systems) de l'Université de Gand, en Belgique, SCAPS-1D est un puissant outil de simulation numérique unidimensionnelle (1D). Son objectif est de modéliser le comportement électrique et optique des cellules solaires en résolvant les équations fondamentales des semi-conducteurs.

Le SCAPS-1D permet de simuler des structures complexes composées d'un nombre défini de couches (jusqu'à sept couches intermédiaires, en plus des contacts avant et arrière), en tenant compte de : de différents profils de dopage, de distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs dans le volume et aux interfaces et un spectre de lumière arbitraire (généralement AM1.5G). Dans le cadre de ce travail, nous avons appliqué ce logiciel pour modéliser et analyser l'influence du taux de dopage et de l'épaisseur des couches antireflets (Al_{0.3}Ga_{0.7}As, SnO₂ et ZnO) sur les caractéristiques de la photopile au silicium de structure Si(n)/Si(p) comme indiqué sur la figure 1.

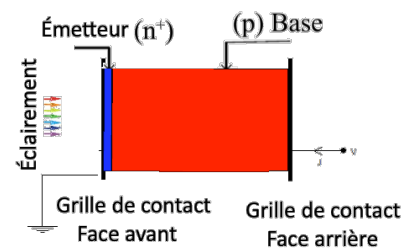


Figure 1 : Schéma de la photopile

Les paramètres de silicium utilisés dans la simulation sont résumés dans le tableau 1.

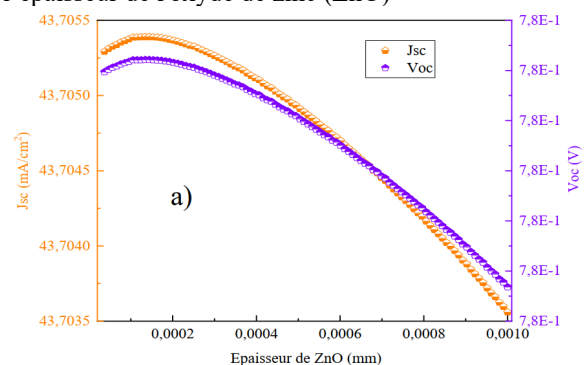
Tableau 1 : Valeurs des paramètres du silicium

Paramètres	Si(n)	Si(p)
Dopage (cm ⁻³)	10 ¹⁸	10 ¹⁷
Épaisseur (μm)	1	300

3. Résultats et discussion

3.1 Effet de l'épaisseur de ZnO₂

La Figure 2 représente l'évolution des paramètres électriques d'une cellule solaire au silicium en fonction de l'épaisseur de l'oxyde de zinc (ZnO)



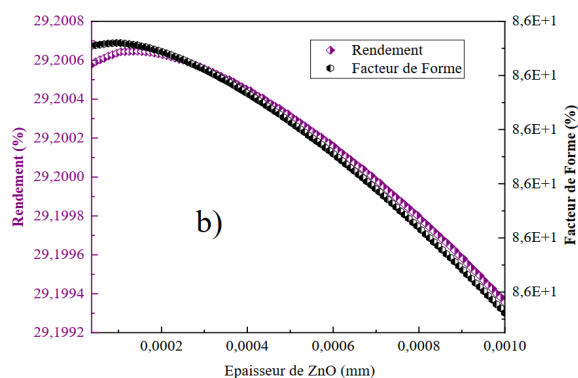


Figure 2 : Profils de Voc et Jsc en fonction de l'épaisseur de ZnO (a) ; du rendement et du facteur de forme en fonction de l'épaisseur (b).

Nous observons dans les deux graphiques a) et b) que tous les paramètres électriques (rendement, facteur de forme, courant de court-circuit (Jsc), et tension à circuit ouvert (Voc)) suivent une tendance similaire : ils augmentent initialement pour atteindre un maximum autour d'une épaisseur de ZnO d'environ $1,24 \cdot 10^{-4}$ mm. Au-delà de cette épaisseur optimale, tous les paramètres, diminuent progressivement. La diminution de Voc est due à une diminution du flux lumineux transmis. En effet, une couche de fenêtre trop épaisse absorbe une partie des photons avant qu'ils n'atteignent le matériau absorbant, réduisant la densité de porteurs et donc Voc. Le courant de court-circuit diminue aussi avec l'augmentation de l'épaisseur de ZnO. Ce phénomène montre que l'augmentation de l'épaisseur de ZnO allonge le temps de parcours des porteurs de charge pour atteindre les contacts. Ce temps accru favorise une augmentation de la recombinaison des porteurs au sein de l'épaisseur et se traduit par une augmentation de la résistance série. Ces facteurs combinés ralentissent le transport des charges et réduisent le Jsc. La diminution combinée de Jsc et Voc se traduit logiquement par une diminution du rendement. Le Facteur de Forme (FF) diminue également, car l'augmentation de la résistance série, induite par l'épaisseur accrue de ZnO, dégrade la forme de la courbe I-V

3.2 Effet du dopage de ZnO

Sur la figure 3 illustrent l'influence du dopage de la couche antireflet ZnO sur les performances d'une cellule solaire Si(n)/Si(p).

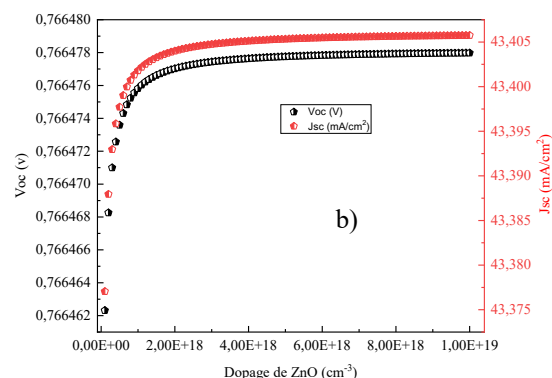
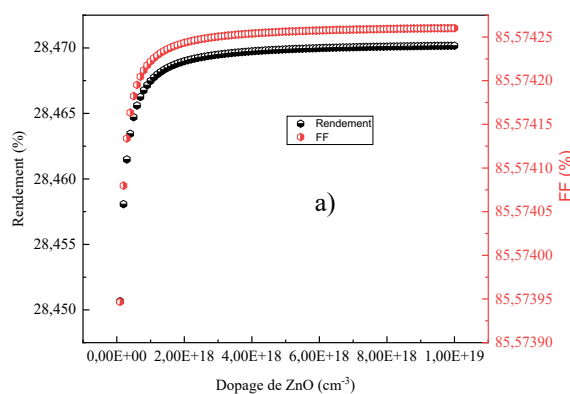
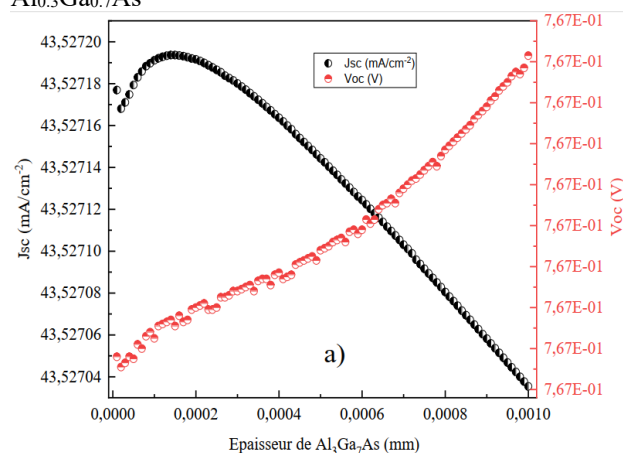


Figure 3 : Profils du rendement et du facteur de forme (a), de la tension en circuit ouvert et du courant de court-circuit (b), en fonction du dopage de ZnO.

Le dopage de la couche ZnO améliore l'ensemble des performances électriques (Voc, Jsc, FF, et η) jusqu'à une concentration optimale de $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, valeur à partir de laquelle elles se stabilisent. Cette amélioration est principalement d'ordre électrique. En effet, un dopage modéré augmente la conductivité du ZnO, ce qui se traduit par une diminution de la résistance série (R_s). Cette baisse de R_s facilite grandement la collection des porteurs, réduit la recombinaison, et augmente ainsi le courant de court-circuit (Jsc) et le Facteur de Forme (FF). De plus, la réduction de la recombinaison, découlant de la meilleure qualité électrique et d'un transport plus efficace, contribue également à l'augmentation de la tension à circuit ouvert (Voc). Au-delà de la concentration optimale, les performances se dégradent en raison de phénomènes parasites. Un dopage excessif crée une forte concentration de porteurs libres, ce qui augmente l'absorption parasite dans le ZnO (couche antireflet) et réduit le flux de photons atteignant le matériau absorbant. Parallèlement, cet excès induit des défauts cristallins qui agissent comme des sites de recombinaison additionnels, limitant ainsi les performances.

3.3 Effet de l'épaisseur de $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$

La figure 4. suivante représente en (a) l'évolution du courant de court-circuit (Jsc), de la tension en circuit ouvert (Voc) et en (b) celle du rendement et du facteur de forme (FF) en fonction de l'épaisseur de la couche $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$



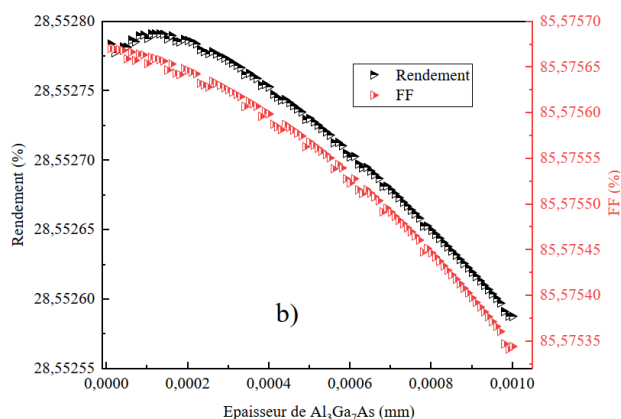


Figure 4 : Profil des paramètres J_{sc} et V_{oc} (a), rendement et FF (b), en fonction de l'épaisseur de $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

Nous observons que la V_{oc} augmente progressivement avec l'épaisseur de $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Cette augmentation est due à l'amélioration de la passivation de l'interface et à l'établissement de la barrière de potentiel par cette couche, réduisant ainsi les recombinaisons des porteurs. Parallèlement, le J_{sc} diminue de manière significative. Ce phénomène est principalement causé par l'absorption optique par l'épaisseur croissante de $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, qui empêche les photons d'atteindre la couche absorbante principale.

La J_{sc} et le FF atteignent leur maximum pour une très faible épaisseur (autour de 0,0001 mm), après quoi ils diminuent fortement. La diminution du courant J_{sc} et du FF (ce dernier étant affecté par une résistance série accrue dans la couche épaisse) se traduit par la chute rapide du rendement (η) à mesure que l'épaisseur d' $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ augmente.

3.4 Effet du dopage de $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$

La figure 5 suivante présente une variation du rendement, du facteur de forme, du V_{oc} et de J_{sc} en fonction de l'épaisseur de $\text{Al}_3\text{Ga}_7\text{As}$.

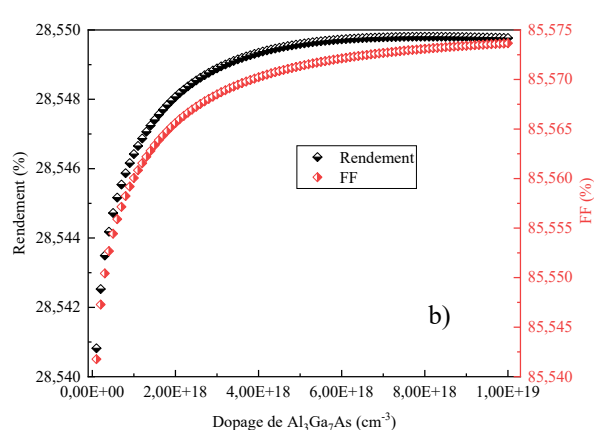
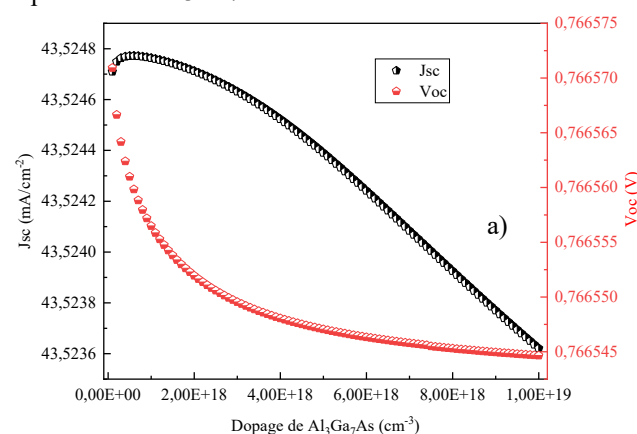


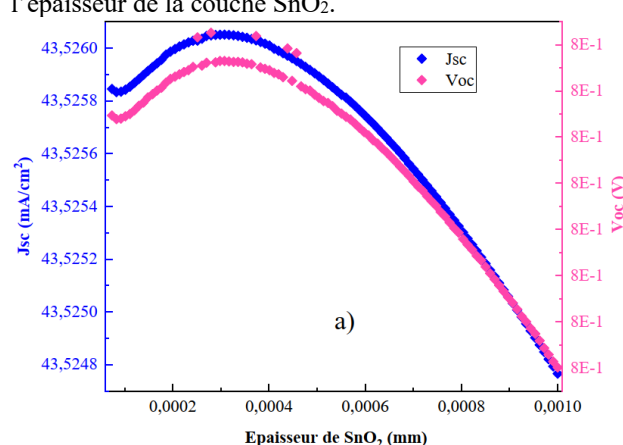
Figure 5 : Profils de V_{oc} et J_{sc} en fonction du taux de dopage de $\text{Al}_3\text{Ga}_7\text{As}$ (a) ; Rendement et FF en fonction du taux de dopage de $\text{Al}_3\text{Ga}_7\text{As}$ (b).

Nous constatons que le facteur de forme (FF) et le rendement (η) augmentent fortement avec l'augmentation du dopage de la couche antireflet jusqu'à environ $4.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, valeur à partir de laquelle, ils deviennent constants. Cette augmentation est due à l'amélioration de la conductivité de la couche antireflet, ce qui réduit la résistance série de la cellule.

Pour le V_{oc} et le J_{sc} , nous remarquons une diminution progressive pour les taux de dopage élevés. Cette baisse est liée à l'augmentation des mécanismes de recombinaison (tels que la recombinaison Auger) dans la couche dopée, favorisée par la forte concentration de porteurs de charge introduite par le dopage. En effet, les pertes de courant et de tension dues à la recombinaison limitent les performances aux très forts dopages.

3.5 Effet de l'épaisseur de SnO_2

Sur la figure 6 est représentée en (a) la variation du courant de court-circuit, de la tension à circuit ouvert et en (b) celle du facteur de forme et du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche SnO_2 .



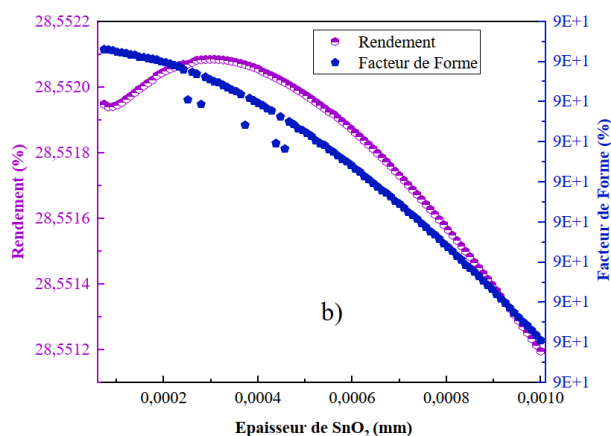


Figure 6 : Profils de Voc et Jsc en fonction de l'épaisseur de SnO₂ (a) ; Profil du Rendement et de FF en fonction de l'épaisseur de SnO₂ (b).

L'analyse de la figure 6 révèle que tous les paramètres électriques augmentent jusqu'à une épaisseur optimale de $2,704.10^{-4}$ mm, puis diminuent progressivement.

L'augmentation initiale de Jsc et du η est due à l'optimisation de l'épaisseur pour la réduction de la réflexion à la surface, permettant une transmission maximale des photons vers la couche absorbante de la cellule (principe d'interférence optique).

La chute de Jsc au-delà de cette épaisseur optimale est dû à l'augmentation de la réflexion de la lumière favorisant l'absorption parasite dans le SnO₂ et réduisant la quantité de porteurs de charge photogénérés. La diminution de FF et Voc est due à l'augmentation de l'épaisseur ce qui accroît la résistance série (Rs) de la cellule, entraînant la dégradation de l'efficacité électrique globale.

3.6 Effet du taux de dopage de SnO₂

Sur la figure 7 suivante, nous avons tracé la variation du courant de court-circuit, de la tension à circuit ouvert, du rendement et du facteur de forme en fonction du dopage de SnO₂.

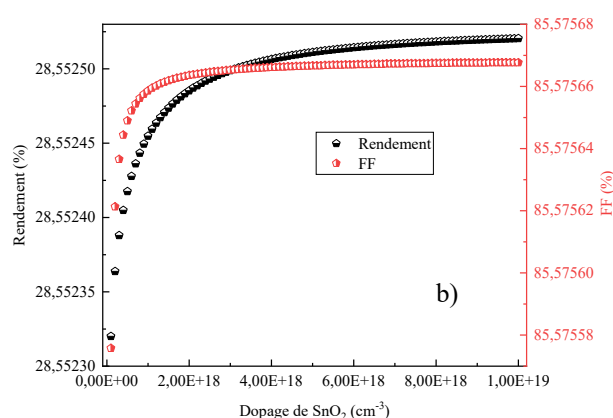
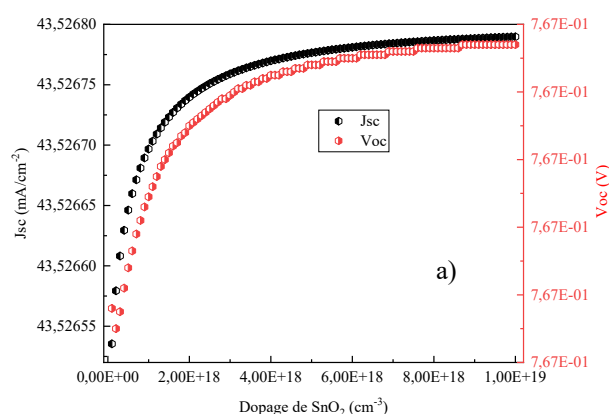


Figure 7 : Profils du courant de court-circuit et de la tension à circuit ouvert (a) ; du rendement et du facteur de forme (b), en fonction du dopage de SnO₂

L'analyse de la figure 7 montre une amélioration pour tous les paramètres électriques de la cellule, avec une augmentation rapide de Jsc, Voc, FF, et η jusqu'à un taux de dopage de SnO₂ d'environ 3.10^{18} cm⁻³, au-delà duquel ils atteignent un plateau de saturation. Cette tendance est principalement due à l'amélioration de la conductivité électrique de la couche de SnO₂. En effet, en augmentant le dopage de SnO₂, la puissance de sortie de la cellule augmente en parallèle, cela est dû à l'augmentation de la conductivité de la couche antireflet. L'augmentation de Jsc s'explique par le fait que le processus de transport de charge s'accélère en augmentant la conductivité. Ceci va entraîner une augmentation du rendement et du facteur de forme.

Dans le tableau 2 suivant sont énumérées les valeurs optimales de l'épaisseur et du dopage de la couche antireflet.

Tableau 2 : Valeurs optimales de l'épaisseur et du dopage des couches antireflets.

Paramètres	Couches anti réfléchissantes		
	Al ₃ Ga ₇ As	SnO ₂	ZnO
Dopage (cm ³)	4.10^{18}	3.10^{18}	2.10^{18}
Épaisseur (nm)	100	270	124,6

La simulation faite avec ces valeurs nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs optimales obtenues avec les paramètres optimaux.

Paramètres	Valeurs optimales des cellules		
	Al ₃ Ga ₇ As(n) Si(n)Si(p)	SnO ₂ (n)Si(n) Si(p)	ZnO(n)Si(n) Si(p)
Voc (V)	0,7665	0,7665	0,7809
Jsc (mA/cm ²)	43,524523	43,527717	43,705735
FF (%)	85,57	85,58	85,56
η (%)	28,55	28,55	29,20

Ce tableau nous confirme que le matériau ZnO présente la meilleure couche antireflet dans le contexte de notre étude. ZnO/Si(n)/Si(p) a permis d'obtenir le meilleur rendement ($\eta_{\max} \approx 29,20$ %), atteint à une épaisseur optimale de

1,24.10⁻⁴ mm (124 nm) et un taux de dopage de 2.10¹⁸ cm⁻³. Les valeurs optimales des paramètres électriques et géométriques déterminées dans cette étude sont en bonne corrélation avec les ordres de grandeur et les tendances observées dans la littérature [14, 20].

En définitive, cette étude a démontré que la modélisation sous SCAPS-1D est un outil prédictif fiable pour l'ingénierie des couches anti-reflet et des jonctions de cellules solaires, s'alignant sur l'approche validée pour une large gamme de matériaux photovoltaïques [14, 20, 23, 24].

4. Conclusion

Notre étude a porté sur l'optimisation des paramètres clés (épaisseur et taux de dopage) de différentes couches Antireflet (ARC) afin d'améliorer l'efficacité d'une cellule solaire de type Si(n)/Si(p). Les résultats obtenus mettent en lumière l'importance cruciale de l'équilibre entre les propriétés optiques (maximisation du courant) et électriques (minimisation de la résistance) de l'ARC.

L'analyse de la variation des paramètres a confirmé deux tendances fondamentales :

- Impact du Dopage : L'augmentation du dopage influence positivement les propriétés électriques de l'ARC en augmentant sa conductivité, ce qui se traduit par une réduction de la résistance série (Rs) et une amélioration conséquente du Facteur de Forme (FF) et du rendement.
- Impact de l'Épaisseur : L'augmentation de l'épaisseur au-delà de l'optimum influence négativement les performances. Elle perturbe l'effet antireflet (augmentant la réflexion et l'absorption parasite), ce qui réduit Jsc, et accroît la résistance série, ce qui dégrade FF et Voc.

La comparaison des performances entre les différents matériaux a clairement désigné le ZnO comme la couche Antireflet la plus performante. Le ZnO a permis d'obtenir le meilleur rendement ($\eta_{\max} \approx 29,20\%$) à une épaisseur de 124 nm et un taux de dopage optimal de 2.10¹⁸ cm⁻³. Ces paramètres, plus petits que ceux des autres matériaux testés, minimisent à la fois les pertes par absorption et la résistance série.

Cette optimisation des couches ARC est un levier essentiel pour obtenir des cellules solaires plus performantes, soulignant la nécessité d'intégrer à la fois l'ingénierie optique et l'ingénierie électrique pour repousser les limites théoriques de l'efficacité photovoltaïque.

Remerciements

Nos remerciements à l'endroit de Professeur Marc Burgelman, Université de Gand, Belgique, pour avoir fourni le logiciel de simulation SCAPS.

Références bibliographiques

- [1] REN21, Renewables 2024 Global Status Report, 2024.
- [2] Márquez, C. R. (2025) Solar-Grade Silicon in the Energy Transition: A Strategic Commodity for the Global Photovoltaic Market. *Commodities*, 4(3), 18. <https://doi.org/10.3390/commodities4030018>

- [3] Sene, M., Samoura, A., Diouf, S., Diao, A. and Mbow, C. (2023) Electrical Modeling of a Silicon Photovoltaic Solar Cell: Comparative Study of Models Characterizing the Photovoltaic Solar Cell. *Open Journal of Applied Sciences*, 13, 1787-1795.

doi: [10.4236/ojapps.2023.1310141](https://doi.org/10.4236/ojapps.2023.1310141).

- [4] Sow, O. , Ba, M. , El Moujtaba, M. , Traore, Y. , Sow, E. , Sarr, C. , Diop, M. and Sissoko, G. (2020) Electrical Parameters Determination from Base Thickness Optimization in a Silicon Solar Cell under Influence of the Irradiation Energy Flow of Charged Particles. *Energy and Power Engineering*, 12, 1-15.

doi: [10.4236/epe.2020.121001](https://doi.org/10.4236/epe.2020.121001).

- [5] Traore, S., Diedhiou, A., Sambou, A. and Camara, M. (2024) Study of the Electrical Parameters of a Silicon Solar Cell (n+/p/p+) under the Effect of Temperature by Optimization of the Base Thickness and the Doping Rate. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 12, 15-23. <https://doi.org/10.4236/msce.2024.1211002>

- [6] Sadio, O. , Kouyaté, M. , Traoré, P. and Barro, F. (2023) Determination of the Electrical Parameters of a Solar Cell in Steady State. *Open Journal of Applied Sciences*, 13, 1834-1843.

doi: [10.4236/ojapps.2023.1310144](https://doi.org/10.4236/ojapps.2023.1310144).

- [7] Nordseth, Ø. , Kumar, R. , Bergum, K. , Fara, L. , Foss, S. , Haug, H. , Drăgan, F. , Crăciunescu, D. , Sterian, P. , Chilibon, I. , Vasiliu, C. , Baschir, L. , Savastru, D. , Monakhov, E. and Svensson, B. (2017) Optical Analysis of a ZnO/Cu₂O Subcell in a Silicon-Based Tandem Heterojunction Solar Cell. *Green and Sustainable Chemistry*, 7, 57-69. doi: [10.4236/gsc.2017.71005](https://doi.org/10.4236/gsc.2017.71005).

- [8] Gill, V. K., Juneja, S., Dixit, S. K., Vashista, S, and Kumar, S. (2024). Structural and optical properties of phosphorous doped nanocrystalline silicon deposited using a VHF PECVD process for silicon heterojunction solar cells and optimization of a simple p-n junction cell using SCAP-1D tool. *Royal society of chemistry*, 14 , 23873-23885. DOI : [10.1039/D4RA02429J](https://doi.org/10.1039/D4RA02429J)

- [9] A. Cuevas, "The Effect of Doping on the Recombination Lifetime of Silicon," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 57, pp. 277–290, 1999.

- [10] W. Shockley and W. T. Read. (1952) Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons, *Physical Review*, vol. 87, pp. 835–842. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.87.835>

- [11] Bushick, K. and Kioupakis, E. (2023) Strain effects on Auger–Meitner recombination in silicon", *Applied Physics Letters*, vol. 123, n° 26. <https://doi.org/10.1063/5.0176950>

- [12] Thiame, M., Camara, M., Lemrabott, H., Cheikh, M. L., Gueye, S and Gregoire Sissoko, G. (2023). Étude a 3d de la photopile au silicium polycristallin : optimisation du taux de dopage en fonction de l'épaisseur de la base. *International Journal of Advanced Research*, 11(12), 311-322. <https://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/17989>

- [13] A. Richter, M. Hermle, and S. W. Glunz. (2012). Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells, *Phys. Rev. B*, vol. 86, Art. no. 165202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.165202>
- [14] Hwang, S. T., Kim, S., Cheun, H., Lee, H., Lee, B., Hwang, T., Lee, S., Yoon, W., Lee, H.M and Park, B. (2016) Bandgap grading and $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ heterojunction emitter for highly. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 155, 264–272.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.06.009>
- [15] Mridha, S and Basak, D. (2006) Effect of thickness on the structural, electrical and optical properties of ZnO films. *Materials Research Bulletin*, 42, 875–882. DOI: [10.1016/j.materresbull.2006.08.019](https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2006.08.019)
- [16] Mathiazhagan, G., Seeber, A., Gengenbach, T., Mastroianni, S., Vak, D., Chesman, Anthony SR. A., Gao, M., Angmo, D and Hinsch, A. (2020). Improving the Stability of Ambient Processed, SnO_2 -Based, Perovskite Solar Cells by the UV-Treatment of Sub-Cells. *RRL Solar*, 4, 2000262. <https://doi.org/10.1002/solr.202000262>
- [17] Ozgur, U., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Dogan, S., ... & Morkoç, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 041301. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
- [18] Majumder, S., Krishnanunni, R. A and Ravindran, S. (2023) Optimization of p-i-n GaAs/AlGaAs Heterojunction Nanowire Solar Cell for Improved Optical and Electrical Properties. (2023) *Journal of the Optical Society of America B*, 40(10), 2684-2695. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.492196>
- [19] K. lagha-menouer . (2011) Étude et réalisation d’une cellule solaire multicouches du type Si-SiO₂-SnO₂-ZnO par APCVD”, Thèse Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [20] Wahari, I and Halidou, I.(2025) SCAPS-1D Numerical Simulation of Homojunction and Heterojunction ZnO/Si Solar Cells. *Asian Journal of Physical and Chemical Sciences*, 13(3), 55-67. DOI: [10.9734/ajopacs/2025/v13i3251](https://doi.org/10.9734/ajopacs/2025/v13i3251)
- [21] Burgelman, M., Nollet, P and Degrave, N. (2000) Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. *Thin Solid Films*. volume 361-362, 527-532. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00825-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00825-1)
- [22] Bachiri, B and Rahmoun, K. (2022) Numerical simulation of perovskite solar cell with porous silicon layer. *Desalination and Water Treatment*. 279, 136-139. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.29098>
- [23] Park, H.-J., Son, H., & Jeong, B.-S. (2024). SCAPS-1D Simulation for Device Optimization to Improve Efficiency in Lead-Free CsSnI_3 Perovskite Solar Cells. *Inorganics*, 12(4), 123. <https://doi.org/10.3390/inorganics12040123>.
- [24] Abboudi, H., Belaid, W., En-nadir, R., Ez-zejjari, I., Zouini, M., Sali, A., & El Ghazi, H. (2025). Optimization of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ P-I-N Solar Cells: Achieving 21% Efficiency Through SCAPS-1D Modeling. *Crystals*, 15(7), 633. <https://doi.org/10.3390/cryst15070633>