DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v7i1.861 Rev. Energ. Ren. Vol.7 (2004)13-21

Le Rôle de la Couche Fenêtre dans les Performances d'une Cellule Solaire GaAs.

Samira Khelifi et Abderrahmane Belghachi

Laboratoire de Physique des Dispositifs à Semiconducteurs, Centre Universitaire de Béchar
BP N° 417, (08000) Béchar, Algérie Fax: 049 81 52 44
E-mail : samira_khelifi@yahoo.fr

Résumé – *De nos jours les cellules solaires à couches minces sont de plus en plus utilisées essentiellement à raison de leur faible coût. Durant ces dernières décennies les performances de ces cellules ont été nettement améliorées. Dans le présent travail, on a simulé une cellule solaire de type GaAs à l'aide d'un nouveau logiciel (SCAPS) afin d'analyser certains paramètres. En particulier les propriétés de la couche fenêtre (épaisseur, dopage, ...) jouent un rôle primordial dans les performances de la cellule, et afin de les optimiser, on a étudié leur influence sur les grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire. Dans le but de mettre en évidence l'importance de la déposition d'une couche fenêtre du type $Ga_{1-x}Al_xAs$ sur les cellules solaires au GaAs, une comparaison entre deux cellules, l'une sans couche fenêtre, l'autre avec une couche fenêtre, a été faite. La déposition d'une couche antireflet montre une amélioration importante s'ajoute aux avantages de la couche fenêtre. Le rendement énergétique enregistré est passé de 15.68% dans une cellule au GaAs à 23.67% pour une cellule $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ avec une couche antireflet double du type MgF_2-ZnS. Les résultats obtenus sont en très bon accord avec les résultats expérimentaux publiés.*

Abstract – *Nowadays, thin film solar cells are increasingly used essentially because of their low cost. The performance of such a solar cells has known a remarkable improvement during the last decencies. This paper reports on a simulation of a GaAs solar cell using a newly developed software (SCAPS). The properties of the top layer in a solar cell (thickness, doping,...) in particular, play a crucial role in its performances, in order to optimise them we analysed their influence on the photovoltaic parameters of the cell. To demonstrate the importance of the deposition of a window layer $Ga_{1-x}Al_xAl$ on the top of a GaAs solar cell we carried out a comparison of performances between a cell with a window and a conventional GaAs cell (without window). Covering the cell surface with an antireflection layer show a further considerable improvement to the performance of the cell. The energetic efficiency of the cell inreases from 15.68% of a conventional GaAs cell to 23.67% for a new $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ cell with a double-layer antireflection coating of the type MgF_2-ZnS. The obtained results were in a very good agreement with the reported experimental data.*

Mots clés : Cellule solaire –- Hétérojonction – Rendement – Couche fenêtre – Couche antireflet – SCAPS.

1. INTRODUCTION

Durant les dernières années, les cellules solaires à base de l'arséniure de gallium ont été largement utilisées, plus particulièrement aux applications spatiales, et ce à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace. Ce pendant, un problème important s'opposait au développement des piles solaires au GaAs, à savoir celui de la vitesse de recombinaison en surface. C'est la raison pour laquelle le rendement réalisé pour les premiers cellules solaires était seulement de l'ordre de 10% [1,2]. Ce problème a été résolu partiellement grâce à la croissance d'une couche de $Ga_{1-x}Al_xAs$ sur la surface du GaAs [3]. Les deux matériaux ayant des paramètres cristallins voisins, peu de défauts et de centres de recombinaison peuvent exister à l'interface entre les deux semiconducteurs [4]. C'est ainsi que le rendement des cellules au GaAs a dépassé la première fois 20% vers la fin des années 70, quand Woodall et Hovel ont fabriqué des cellules aux hétérostructures avec un rendement de 22% [5]. De nos jours, ces cellules solaires ont atteints des rendements de l'ordre de 20-25%[6].

La cellule solaire que l'on a étudiée, est une structure n-i-p : $Ga_{1-x}Al_xAs$(n)-GaAs(n)-GaAs(i)-GaAs(p), très efficace pour la conversion photovoltaïque, et cela pour deux raisons: (a)- la réduction de la résistance série et de la vitesse de recombinaison en surface attribuée à l'utilisation de l'hétérojonction en face avant. (b)- l'augmentation du photocourant par la séparation des paires électron-trou créés dans la région intrinsèque grâce au champ électrique interne existant dans cette région. Pour cela on a utilisé un logiciel de simulation numérique unidimensionnel appelé SCAPS-1D (**S**olar Cell **C**apacitance **S**imulator in one Dimension), développé au laboratoire ELIS (**E**lectronics and **I**nformation **S**ystems) de l'université de Gent, Belgique [7].

SCAPS est un logiciel à application sur Windows. Il a été développé pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires à hétérojonction et à couches minces. Il a été extensivement, testé sur des cellules solaires à base de CdTe et $Cu(In,Ga)Se_2$ par M.Burgelman et al. Les résultats simulés et mesurés ont été en très bon accord [7], [8]. Au laboratoire LPDS nous l'avons utilisé pour la première fois sur des piles solaires à base de $Ga_{1-x}Al_xAs$/GaAs. Avec SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires ainsi que les contactes avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés, dans le volume et aux interfaces pour un spectre de lumière arbitraire.

En principe, n'importe quel programme numérique capable de résoudre les équations de base des semiconducteurs peut être employé pour modéliser les piles solaires à couches minces. Parmi ces programmes de simulation, on cite : PC-1D qui a été développé en 1985 (première version) et 1988 deuxième version [9], ADEPTF[10] et AMPS[11]. Les équations de base sont l'équation de Poisson, reliant la charge au potentiel électrostatique, et les équations de continuité pour les électrons et les trous. Cependant, plusieurs options additionnelles doivent être réunies dans le programme quand on veut simuler des piles solaires à couches minces. Il devrait être capable de prendre en compte la présence de plusieurs couches dans la cellule; le phénomène de recombinaison à l'interface des couches, introduit par les discontinuités dans les bandes d'énergie (E_c et E_v). Il devrait aussi, traiter correctement le problème de recombinaison et les centres de génération-recombinaisons dans les états profonds dans le volume des couches. Il devrait être aussi capable de calculer et simuler des mesures électro-optiques effectuées généralement sur les piles solaires à couches minces, non seulement la caractéristique I(V), mais également la réponse spectrale et les mesures de capacité C(V) et C(f). En fin, il devrait fournir la convergence au moins pour les structures les plus communes des cellules à couches minces. Toutes ces options sont mis en application dans le programme de simulation SCAPS [8].

2. PRESENTATION DE LA STRUCTURE

La structure adaptée est composée essentiellement d'une cellule n-i-p à base de GaAs sur laquelle est déposée une couche fenêtre $Ga_{0.2}Al_{0.8}As$ de type n. Entre le substrat et la cellule on a inséré une couche BSF (**B**ack **S**urface **F**ield) dopée p^+, qui a pour rôle, la création d'un champ électrique retardeur en face arrière, qui permet d'abaisser la valeur effective de la vitesse de recombinaison et par conséquent d'améliorer les caractéristiques électriques de la cellule. Un schéma de la structure est illustré dans la figure 1. Le tableau 1 regroupe les paramètres physiques utilisés dans la simulation. Pour les paramètres fixes tels que ceux de l'émetteur, la couche intrinsèque, la base et la couche BSF, le choix de ces valeurs a été pris sur le modèle de quelques structures de laboratoires [12,13]. Les couches fenêtres ayant une fraction molaire élevée souffre du problème d'oxydation. Cependant, pour assurer un bon contact métallique sur cette couche, deux options différentes ont été développés [14]. L'une consiste à ouvrir une fenêtre dans la couche $Ga_{1-x}Al_xAs$ et le contact métallique est effectué directement sur le GaAs. La deuxième option la plus réussite consiste à déposer une couche GaAs fortement dopée sur la

fenêtre et seulement sous les grilles métalliques, alors que la couche antireflet couvre le reste de la surface ; cette couche est dite « cap layer ».

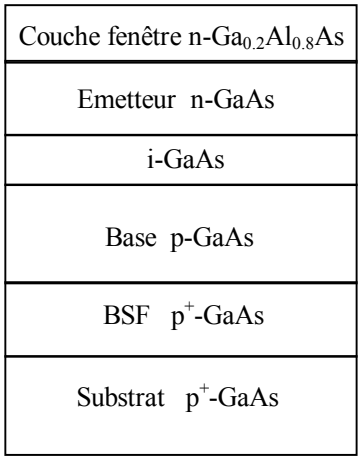

Fig. 1: Structure de la cellule solaire

Tableau 1: Paramètres physiques utilisés dans la simulation.

Fenêtre $Ga_{0.2}Al_{0.8}As$	Emetteur	Zone intrinsèque	Base	Couche BSF
$x_F = 0.01\text{-}0.4\mu m$	$x_j = 0.2\mu m$	$W_i = 0.1\mu m$	$x_B = 2\mu m$	$x = 0.2\mu m$
$n = 10^{14}\text{-}10^{19} cm^{-3}$	$n = 5.10^{18} cm^{-3}$		$p = 3.10^{17} cm^{-3}$	$p = 3.10^{18} cm^{-3}$

Notons que la structure a été étudiée sous spectre solaire AM1.5, avec $P=100mW/cm^2$, et à température ambiante T=300°K. Les mesures des paramètres photovoltaiques ont été effectuées dans le cas d'une résistance série nulle et une résistance shunt infiniment grande.

3. RESULTATS DE LA SIMULATION

3.1. L'effet de l'épaisseur de la couche fenêtre

Sur la figure 2, est représenté le rendement et le facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre.

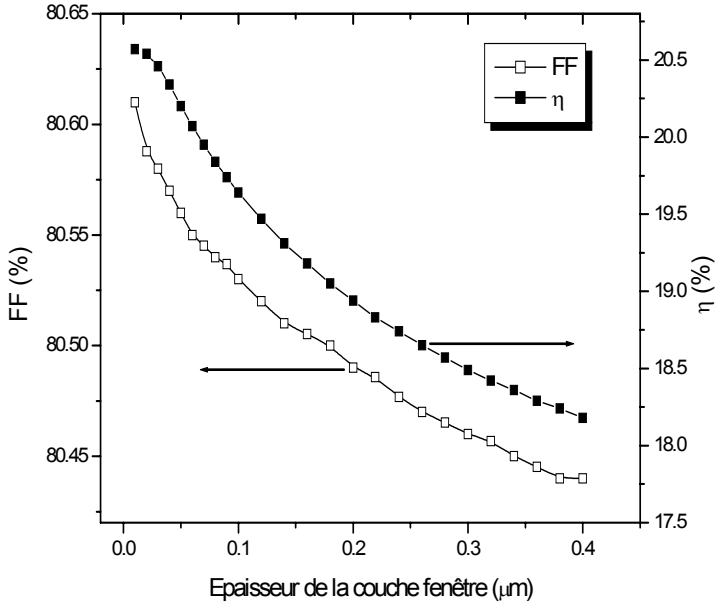

Fig. 2: Rendement et facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche fenêtre

Le facteur de forme est peu influencé, par contre le rendement subit une diminution de 20.57%pour x_F = 0.01µm à 18.2% pour x_F = 0.40µm. Pour le GaAs et à cause de la vitesse de recombinaison en surface élevée, qui est de l'ordre de 10^6cm/s [15], l'épaisseur de la couche fenêtre doit être réduite à quelques centièmes de micron. La composition $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ a une largeur de bande interdite approximativement de 2.09 eV donc seul les radiations du spectre solaire de longueurs d'onde inférieures ou égales à λ = 0.6 µm sont absorbées. Fig. 2 L'effet de l'épaisseur de la couche fenêtre sur le facteur de forme et le rendement.

Le taux de génération optique est donc faible dans toute l'épaisseur du composé ternaire particulièrement si cette dernière est très mince. Par contre, à l'interface, les radiations non absorbées rencontrent le GaAs, et celles dont les longueurs d'onde sont inférieures à λ = 0.86 µm vont être absorbées dans la base. D'autre part les couches à forte composition en aluminium devront être protégées du milieu ambiant afin d'éviter l'oxydation. En plus, l'épaisseur globale de la face avant étant nettement plus importante que dans l'homostructure, la résistance série de la pile solaire aura une valeur plus faible [16].

L'effet de l'épaisseur de la couche fenêtre sur la réponse spectrale est représenté sur la figure 3. On remarque que pour des longueurs d'onde au-dessous de 0.5µm, la réponse spectrale diminue sensiblement avec l'augmentation de l'épaisseur, ce phénomène peut être attribué à l'absorption de la lumière dans cette couche.

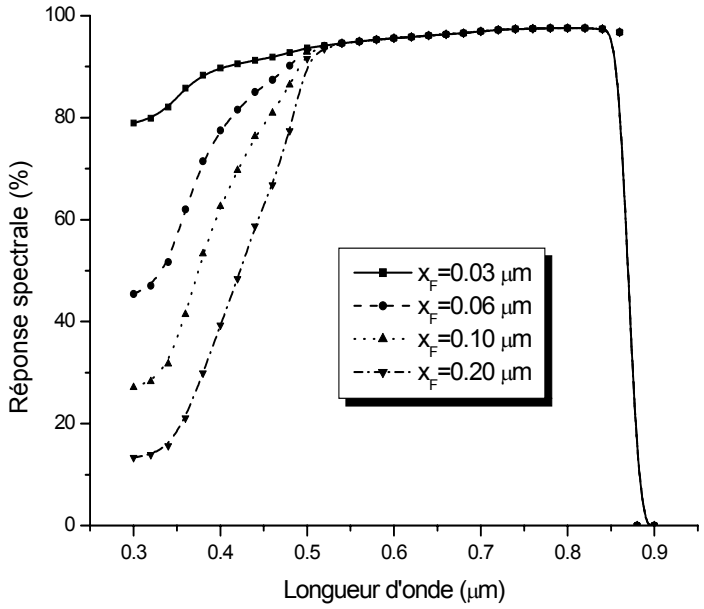

Fig. 3: L'effet de l'épaisseur de la couche fenêtre sur la réponse spectrale

3.2. L'effet du dopage de la couche fenêtre

Sur la figure 4, on a représenté l'effet du dopage de la couche fenêtre sur le facteur de forme et le rendement. Le facteur de forme augmente légèrement lorsque le dopage augmente. Le rendement aussi subit une légère augmentation pour un dopage entre 10^{14} et 10^{18} cm^{-3}, puis diminue légèrement lorsque $N \geq 10^{19}$ cm^{-3}. Cette augmentation est Insignifiante du fait que l'effet de la résistance série n'est pas considéré dans cette simulation, car l'augmentation du dopage de la couche fenêtre réduit considérablement sa résistance. D'autre part lorsque le dopage de la couche fenêtre augmente, on parvient à diminuer la barrière de potentiel dans l'hétérojonction $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$, et augmenter la zone de charge d'espace dans la base d'où une amélioration de la collecte des porteurs photogénérés.

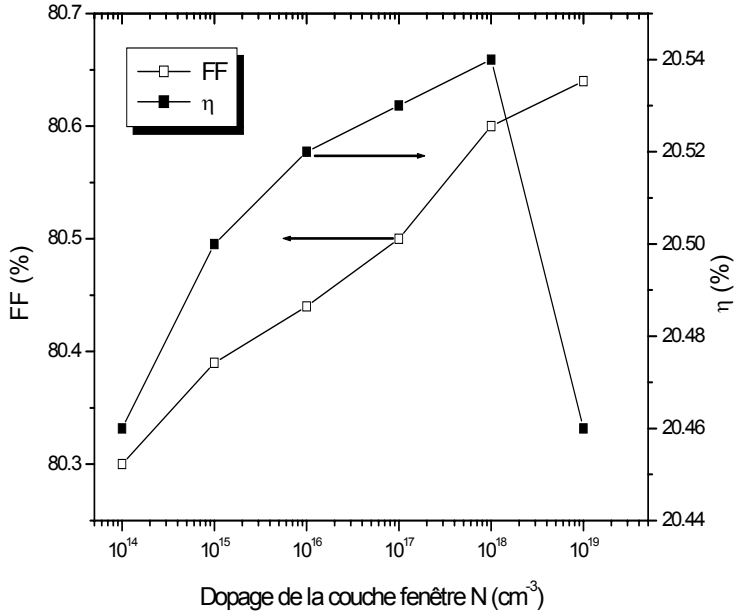

Fig. 4: L'effet du dopage de la fenêtre sur le rendement et le facteur de forme

3.3 Comparaison entre la cellule solaire à homojonction et celle à hétérojonction

Afin de visualiser l'importance de la couche fenêtre $Ga_{1-x}Al_xAs$ dans les cellules solaires au GaAs, on a fait une étude comparative entre deux cellules, avec et sans couche fenêtre. Sur la figure 5, est représentée la caractéristique J(V) pour ces deux cellules. On remarque que la cellule GaAs donne un courant de court circuit plus important ainsi qu'un meilleur facteur de forme lorsque la couche fenêtre est présente.

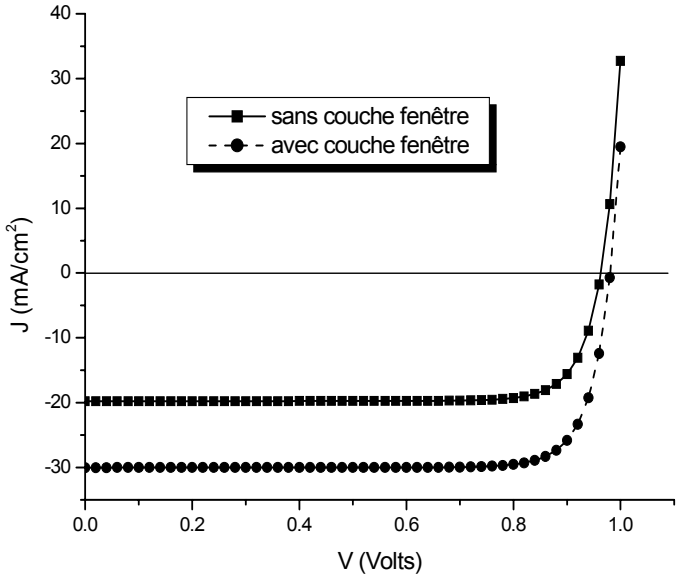

Fig. 5: Caractéristique J(V) des deux cellules : à homojonction et à hétérojonction (x_F=0.02µm).

Les grandeurs photovoltaïques des deux cellules sont données dans le tableau comparatif 2. D'après ce tableau, on remarque que les grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire à hétérojonction sont nettement meilleures que celles à homojonction. L'amélioration est enregistrée surtout dans le courant de court circuit et le rendement de conversion. Avec l'utilisation d'une couche fenêtre de type $Ga_{0.2}Al_{0.8}As$, on augmente le photocourant de 19.77 à 30 mA/cm^2 et le rendement de 15.7 à 24.35%.

Tableau 2: Grandeurs photovoltaïques des deux cellules: sans et avec la couche fenêtre.

Grandeurs photovoltaïques	Cellule sans fenêtre	Cellule avec fenêtre
V_{co} (Volts)	0.963	0.98
J_{cc} (mA/cm^2)	19.774	30.016
FF (%)	82.28	82.7
η (%)	15.68	24.35

Sur la figure 6, est représentée la réponse spectrale des deux cellules. On remarque l'importance de la couche fenêtre sur la réponse spectrale, elle est presque transparente pour la majeure partie du spectre solaire. La réponse spectrale de la cellule solaire à l'hétérojonction $Ga_{0.2}A_{0.8}As/GaAs$ est considérablement élevée par rapport à celle de l'homojonction GaAs. La contribution de la couche fenêtre dans la génération de photo-porteurs est insignifiante car $Ga_{0.2}A_{0.8}As/GaAs$ est à bande interdite indirecte (2.09eV). Les radiations de longueur d'onde inférieure à 0.59μm sont absorbées, mais seuls celles de longueur d'onde inférieure à 0.49μm, correspondant à la largeur de la bande interdite direct (2.5eV), sont fortement absorbées. En outre, la perte des photoporteurs par la recombinaison en surface dans le cas de la cellule à homojonction, conduit à une diminution de la réponse spectrale quand l'énergie des photons augmente à cause du coefficient d'absorption du GaAs très élevé. Les rendements élevés des cellules solaires à hétérojonction comparées aux cellules à homojonction à base du GaAs, sont généralement attribués aux réductions de la résistance série et de la vitesse de recombinaison en surface [4]. Du fait que les paramètres des deux matériaux sont très proches l'interface $Ga_{1-x}Al_xA$-GaAs doit présenter peu de défauts correspondant à vitesse de recombinaison de l'ordre de 10^4cm/s [15].

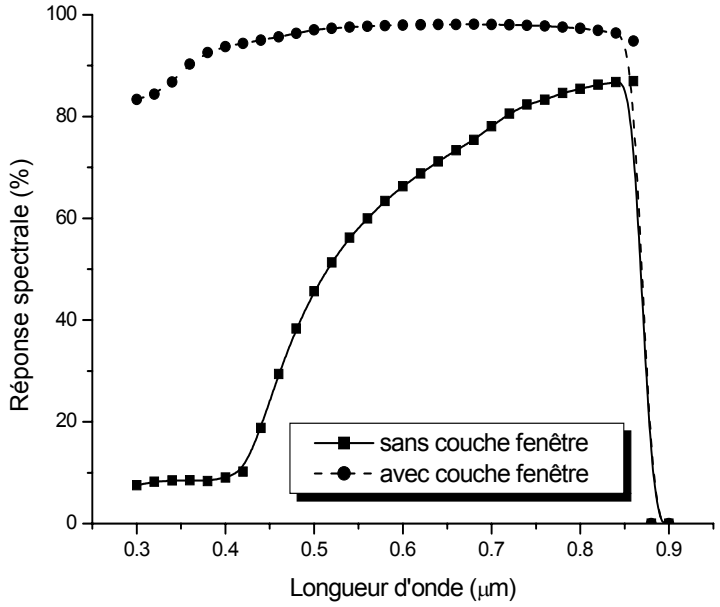

Fig. 6: La réponse spectrale des deux cellules : à homojonction et à hétérojonction (x_F=0.02μm).

3.4. L'effet de la couche antireflet

On a négligé dans les résultats précédents, l'effet de la réflectivité dans la couche fenêtre, qui peut réduire le rendement de collecte de la cellule solaire, lorsqu'il est très important. Le coefficient de réflexion du matériau $Ga_{1-x}Al_xAs$ varie en fonction de la fraction molaire x.

Afin de minimiser les pertes par réflexion, on utilise dans la plupart des cas une couche antireflet. Cependant, la couche antireflet doit satisfaire à plusieurs exigences :

- Elle doit entraîner une réflexion minimale de l'onde incidente, pour la totalité du spectre solaire.
- Elle doit présenter une bonne tenue mécanique aux contraintes du milieu ambiant.
- Sa technologie doit se révéler relativement peu coûteuse.

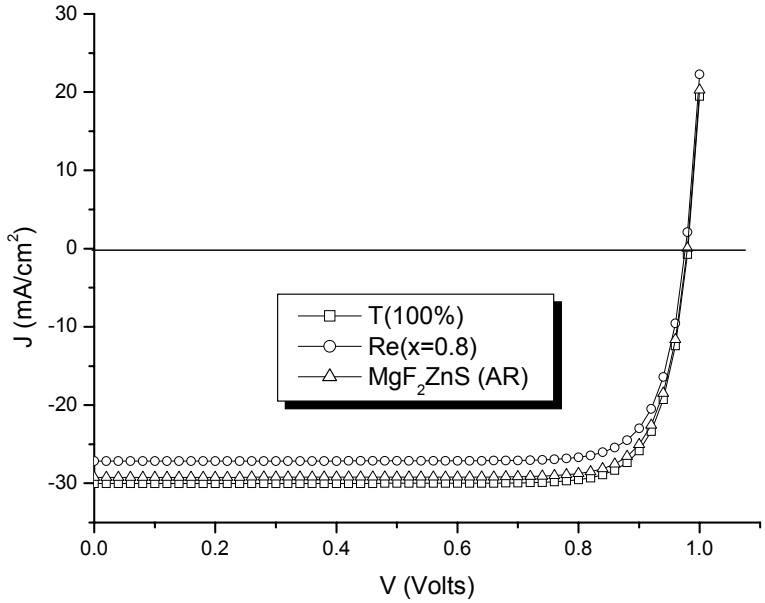

Fig. 7: Caractéristique J(V) de la cellule

On a tracé la courbe J(V), représentée sur la figure 7 pour les trois cas différents: cas d'une transmission du spectre solaire totale (taux de transmission T=100%), cas de pertes par réflexion sur la fenêtre $Ga_{0.2}Al_{0.8}As$, et le cas d'une couche antireflet double du type MgF_2-ZnS déposée sur la fenêtre.

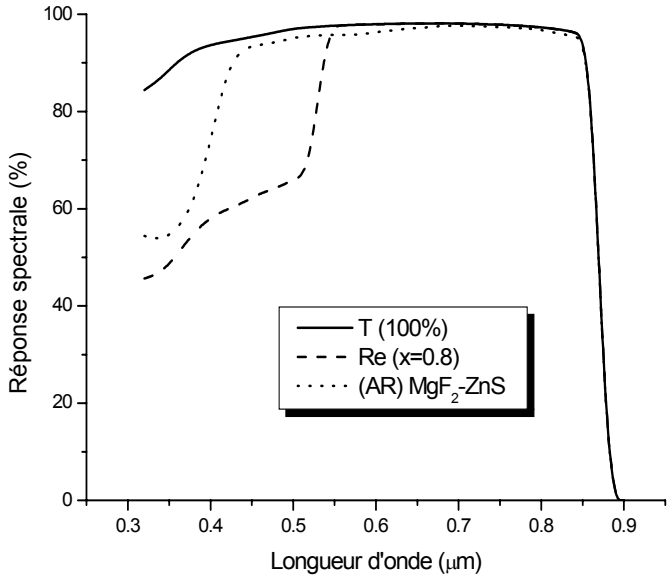

Fig. 8: La réponse spectrale de la cellule

Notons que pour le cas de la couche antireflet, on a négligé l'effet d'absorption dans cette couche. On remarque l'importance des pertes par réflexion sur la caractéristique J(V), et le rôle de la couche antireflet. Sur la figure 8, on a représenté la réponse spectrale.

Les pertes par réflexion sont dominantes dans la région des longueurs d'onde entre 0.3 et 0.52µm, avec une couche antireflet double MgF_2-ZnS, on améliore ainsi la réponse spectrale dans cette région de longueur d'onde. Elle atteint une valeur élevée (> 97%) dans l'intervalle du spectre solaire de 0.6-0.9µm. Dans le tableau 3, sont regroupé les grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire, dans les trois cas simulés, et ceux mesurés à l'institut ISE (Institute for Solar Energy Systems) de Fraunhofer (Allemagne), afin de faire une étude comparative. Les pertes par réflexion sur la couche $Ga_{0.2}Al_{0.8}As$ diminuent le photocourant de 30.016mA/cm^2 dans le cas d'une transmission totale du spectre solaire à 27.143mA/cm^2 et le rendement de 24.35 à 21.88%. L'utilisation d'une couche antireflet double tel que MgF_2-ZnS permet de diminuer les effets de pertes par réflexion et c'est ce qui est bien montré dans le tableau 3, on remarque que le photocourant s'élève à 29.22mA/cm^2 et le rendement à 23.67%. Les résultats de cette simulation sont en bon accord avec ceux mesurés à l'institut ISE (Allemagne).

Tableau 3: Grandeurs photovoltaïques d'une cellule: sans et avec la couche antireflet, mesurés dans l'institut ISE (Allemagne) [12].

Grandeurs photovoltaïques	Transmission totale	Réflexion	AR(MgF2-ZnS)	Mesurés [12]
V_{co} (Volts)	0.9809	0.977	0.98	1.038
J_{cc} (mA/cm^2)	30.016	27.143	29.22	27.1
FF (%)	82.7	82.5	82.7	82.9
η (%)	24.35	21.88	23.67	23.3

4- CONCLUSION

Dans ce travail on a étudié l'effet de la couche fenêtre du type $Ga_{1-x}Al_xAs$ (x=0.8) sur les performances de la cellule photovoltaïque à base du GaAs. On a trouvé que la meilleure structure doit avoir une couche fenêtre mince, et un dopage de l'ordre 10^{18} cm^{-3}. Les cellules solaires à base d'hétérojonction, en particulier le $Ga_{1-x}Al_xAs$/GaAs, donnent des rendements et des réponses spectrales beaucoup nettement meilleures que celles à homojonction. Cela est attribué à la réduction de la résistance série et de la vitesse de recombinaison en surface.

Le rôle de la couche antireflet est très important, elle est utilisée pour minimiser les pertes par réflexion. Le rendement énergétique obtenu pour la cellule à homojonction (sans couche fenêtre) est de l'ordre de 15.68%. Pour la cellule à hétérojonction et dans le cas de pertes par réflexion, on a enregistré un rendement de 21.88%, et de 23.67% avec une couche antireflet double du type MgF_2-ZnS. Ce dernier se compare très bien avec les résultats expérimentaux publiés [12,17, 18].

Remerciements: Nous remercions le Pr. Marc Burgelman, de l'université de Gent, Belgique, pour le privilège qui nous a accordé en nous permettant d'utiliser le logiciel SCAPS, et de le tester sur les cellules solaires à base des matériaux III-V. Nous le remercions aussi pour son aide précieux pendant la simulation numérique et ses conseils judicieux**.**

REFERENCES

[1] S. C. Tsaur et al., "*Theoretical and experimental results for GaAs solar cells*", in proceedings of the fourth international symposium on GaAs and related compounds, conference series N°17, The Institute of Physics, London, U.K.,(1972),pp.156.

[2] C. Hardingham and S. P. Wood., "*High efficiency GaAs solar Arrays in Space*", GEC review., Vol.13, N°3 (1998), pp.163-171.

[3] J. J. Liou and W. W. Wong, "*Comparison and optimization of the performance of Si and GaAs solar cells*", Solar Energy Mater. Solar Cells, **28** (1992), pp. 9-28.
[4] J. M. Woodall and H. J. Hovel, "*High efficiency $Ga_{1-x}Al_xAs$-GaAs solar cells*", Appl.Phys.Lett., Vol.21, N°8 (1972), pp.379-381.
[5] M. E. Klausmeier-Brown, (1995) "*Status, Prospects and Economics of Terrestrial Single Junction GaAs Concentrator Cells*" , in: "Solar Cells and their Applications", Wiley, New York.
[6] K. Barnham, J. Barnes, G. Haarpainter, J. Nelson, M. Paxman, T. Foxon and J. Roberts, "*Quantum-Well Solar Cells*" , Materials Research Society Bulletin, Pittsburg, (1993), pp.51-55.
[7] A. Niemegeers and M. Burgelman, "*Effects of the Au/CdTe back contact on I(V) and C(V) characteristics of Au/CdTe/CdS/TCO solar cells*", J.Appl.Phys.,Vol.81,N°6 (1997), pp.2881-2886.
[8] M. Burgelman, P. Nollet and S. Degrave, "*Modelling polyristalline semiconductor solar cells*", Thin Solid Films., 362-361(2000),pp.527-532.
[9] P. A. Basore et al., "*PC-1D version 2: Enhanced numerical solar cell modelling*"., IEEE Photovoltaic Speialists Conf., (1988), 389.
[10] Y. Lee, J. Gray, Proc.12th Euro.Photovoltai Sol.Energy.Conf., Amesterdam. The Netherlands, April 1994., Stephens, UK:1561-1564.
[11] P. McElhany and J. Arch, Appl.Phys., (1988), 64:1254.
[12] A. W. Bett, F. Dimroth, G. Stollwerck, and O. V. Sulima, "*III-V compounds for solar cell applications*", Appl.Phys.Materials.Science & Processing., **A**69 (1999), pp.119-129.
[13] S. P. Tobin, S. M. Vernon, C. Bajgar, S. J. Wojtczuk, M. R. Melloch, A. Keshavarzi, T. B. Stellwag, S. Venkatensan, M. S. Lundstrom and K. A. Emery, "*Assessment of MOCVD- and MBE-Grown GaAs for High-Efficiency solar cell applications*", IEEE.Trans.Electron.Dev., Vol.37,N°2 (1990), pp.469-476.
[14] Antonio Luque "*Compound Semiconductor Solar Cells*", Adam Hilger, Bristol, UK. (1989)
[15] A. Laugier et J. A. Roger, "*Les Photopiles Solaires- Du matériau au dispositif, du dispositif aux applications*", Tech et Doc, Paris (1981).
[16] M. Orgeret, "Les Piles Solaires- Le composant et ses applications-", Masson, Paris (1985).
[17] Geraldo L.Araújo, "*Compound Semiconductor Solar Cells*", in "Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration", Adam Hilger, Bristol, UK (1989).
[18] M. A. Green, E. Lorenzo, H. N. Post, H. W. Schock, K. Zweibel and P. A. Lynn, "Progress in photovoltaics : Research and applications", Wiley., Vol.10, N°5 (2002), pp.355-360.