

Effets des excitons sur le rendement quantique de la cellule solaire CdS/CdTe par le modèle de la fonction diélectrique

Oumar Absatou Niasse^{1*}, Babacar Mbengue¹,
By A. BA¹, Abdoulaye M. Ndiaye² et Issakha Youm¹

¹ Laboratoire des Semi-Conducteurs et d'Energie Solaire, Département de Physique,
Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

² Laboratoire d'Electronique, Informatique, Télécommunication et Energie Renouvelable,
Université Gaston Berger, Saint Louis, Sénégal

(reçu le 10 Juin 2009 – accepté le 25 Septembre 2009)

Résumé - Le rendement quantique de la cellule solaire CdS/CdTe est étudié par simulation numérique à travers cet article. Les calculs font appel aux coefficients d'absorption ε et imaginaire ε de la fonction diélectrique ε . L'effet des excitons plus présent dans la bande ultraviolette a permis d'expliquer l'allure du front d'absorption du CdS dans le rendement quantique de la cellule solaire CdS/CdTe. Une étude comparative des résultats théoriques avec des mesures expérimentales relevées sur deux cellules solaires CdS/CdTe a permis de tester le modèle étudié dans la bande allant de 1,1 eV à 5,7 eV. Les résultats ont permis de remonter aux paramètres réels de la cellule solaire n-CdS/p-CdTe.

Abstract - The quantum efficiency 'QE' of an n-CdS/p-CdTe solar cell numerically computed is reviewed in this paper. The calculations are performed using absorption coefficient expressions derived from the complex dielectric function $\varepsilon(E)$ measured by S. Adachi from spectroscopic ellipsometry in the photon energy range 1.1 – 5.7 eV at room temperature. The analysis of quantum efficiency is based on the electronic energy band structure of CdS and CdTe. The investigations include excitons effects on QE through transitions near the fundamental absorption edges of both CdS ($E_0 = 2.48$ eV) and CdTe ($E_0 = 1.58$ eV) in the ultra violet and infrared regions. The theoretical results will be compared to that from experimental spectral responses of two CdS/CdTe solar cells in order to understand their behaviour and to know the limits of the model used for the computer simulations.

Mots clés: Cellule solaire – Rendement quantique – Excitons – Coefficient d'adsorption – Bande d'énergie – Simulation.

1. INTRODUCTION

Dans ce travail, nous avons étudié un modèle théorique de calcul du rendement quantique des cellules solaires CdS/CdTe. Plusieurs études ont montré une grande reproductibilité de leurs propriétés fondamentales [1-6]. Cependant, la connaissance théorique des cristaux réels et le comportement des dispositifs restent encore limités du fait de la complexité des interactions électroniques de base qui sont modifiées par les défauts cristallins, le dopage, les porteurs de charges libres et les excitations élémentaires.

Les semi-conducteurs étant classés en composés à bande interdite directe et à bande indirecte, leur coefficient d'absorption est rarement conforme aux prédictions des théories de base, alors que c'est un paramètre indispensable à l'étude des propriétés optiques et électriques des matériaux.

* basba@ucad.sn omaraniassse@yahoo.fr babacarmbengue@yahoo.fr iyoum@yahoo.fr

2. HYPOTHESES DE CALCUL

- Le modèle est appliqué à une cellule CdS/CdTe, dont les calculs du rendement quantique sont rapportés par Donnelly *et al.* [9]
- Le semi-conducteur CdTe est la zone active de l'hétérojonction CdS/CdTe où, est générée la majorité des porteurs minoritaires excédentaires. Le CdS, l'émetteur joue le rôle de fenêtre, avec une épaisseur beaucoup plus petite que celle du CdTe.
- Le rendement quantique est fonction des coefficients d'absorption du CdTe et du CdS. Ces derniers sont calculés dans les deux cas de figure avec et sans excitons. Ce qui nous permettra de proposer des courbes de réponses spectrales avec et sans l'effet des excitons.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Rendement quantique

L'étude du rendement quantique normalisé de la cellule par le modèle de la fonction diélectrique s'est faite en tenant compte d'une part de l'absence des excitons et d'autre part de la présence des excitons.

Le rendement quantique, représenté à la figure 1 où seule la transition fondamentale est prise en compte, couvre une bande de longueurs d'onde allant de l'ultra violet (200 nm) à l'infrarouge (1100 nm).

Ce rendement inférieur à 10 % pour des longueurs d'onde en dessous de 400 nm, augmente jusqu'à 60 % de 400 nm à 520 nm pour atteindre sa valeur maximale (80 %) à 780 nm.

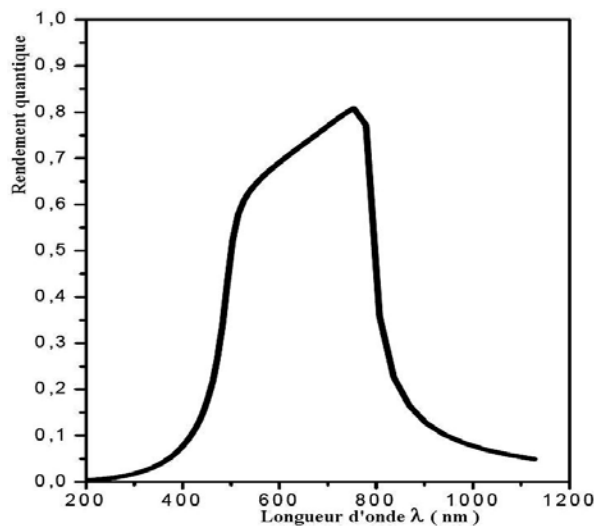


Fig. 1: Rendement quantique du CdTe ou seule la transition fondamentale au gap E_0

Au delà de 850 nm correspondant à la longueur d'onde du gap du CdTe, on note que le rendement quantique diminue progressivement pour atteindre une valeur de 5 % à 1100 nm loin du gap du CdTe.

Toutefois, il est perceptible, à travers le modèle de la méthode de la fonction diélectrique, que la transition fondamentale permet déjà d'avoir un bon recouvrement de la bande spectrale du matériau CdTe.

Le rendement quantique correspondant présente des valeurs appréciables (60 à 80%) entre les longueurs d'onde des gaps du CdS (515 nm) et du CdTe (840 nm).

Le rendement quantique est calculé par la suite en tenant compte de la contribution de l'ensemble des transitions dans le CdTe, y compris celles liées aux excitons. La présence des excitons a été confirmée expérimentalement dans le CdS et le CdTe par plusieurs études dont celle de Thomas *et al.* [15].

Nous utilisons les paramètres optiques résultant de la contribution globale de l'ensemble des transitions et nous en déduisons le coefficient d'absorption α_{Cd} . En fait, il est aussi possible d'étudier la contribution de chaque transition, pour évaluer son degré d'influence sur le rendement quantique.

Pour cela, nous définissons, les rendements quantiques suivants relatifs aux différentes contributions par les termes:

Q_{CdTe0} , le rendement quantique lorsque la transition fondamentale à E_0 est seule prise en compte;

$Q_{CdTe1} = Q_{CdTe0} + Q_{CdTe0x}$, le rendement quantique résultant de la transition à E_0 et de la première contribution des excitons en E_{0x} ;

$Q_{CdTe2} = Q_{CdTe0} + Q_{CdTe1ex}$, le rendement quantique résultant de la transition fondamentale E_0 et des transitions des excitons en E_1 ;

$Q_{CdTe3} = Q_{CdTe0} + Q_{CdTe2x}$, le rendement quantique résultant de la transition fondamentale E_0 et des transitions des excitons en E_{1x} .

Nous obtenons sur cette base, une série de courbes reportées sur la figure 2.

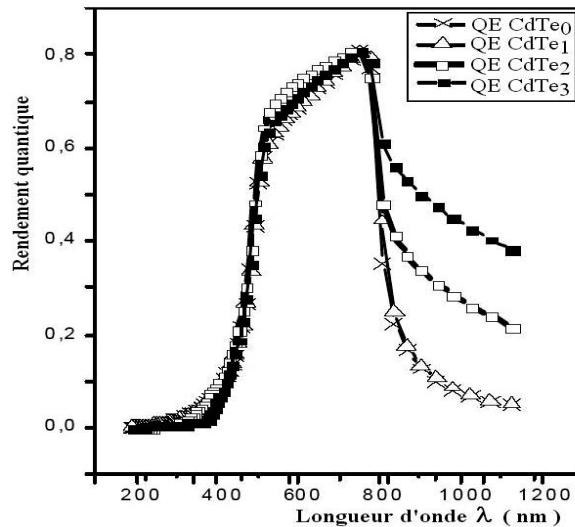


Fig. 2: Rendement quantique de la base CdTe calculé à partir des différentes transitions au sein du matériau CdTe

La densité des états de joints permet de déterminer principalement la contribution des bandes intermédiaires pour la partie imaginaire $\varepsilon_2(E)$ de la fonction diélectrique.

L'analyse de cette figure montre que l'influence des excitons dans le tellure de cadmium est presque inexistante aux courtes longueurs d'onde. Elle est faible dans le spectre du visible où les transitions au gap E_1 semblent être responsables de la légère augmentation notée.

Par contre, au-delà de 800 nm, nous observons une influence progressive des excitons qui participent de l'ordre de 30 % dans le rendement quantique de la photopile sur une largeur de bande allant de 800 nm à 1100 nm. L'étude détaillée de la contribution des excitons montre que les transitions en E_1 et E_{1x} mettent en évidence l'apport non négligeable des excitons responsables des absorptions dans la zone de l'infra rouge.

Donc, les excitons agissent différemment sur le rendement quantique, ce qui pourrait être dû à la différence entre leur niveau d'énergie et leur contribution qui est très importante aux grandes longueurs d'onde.

Pour mieux illustrer les effets des excitons, une simulation sur les caractéristiques telles que l'épaisseur des couches de l'émetteur et de la base des semi-conducteurs est faite sur le rendement quantique de la cellule solaire CdS/CdTe. Pour chaque grandeur considérée de la cellule, nous maintenons constants les autres paramètres avant de faire varier la variable choisie afin de voir son influence propre sur le rendement quantique.

3.2 Influence de l'épaisseur de la base

La base de la cellule est le CdTe qui est la partie la plus active du dispositif. Comme nous avons eu à le préciser, c'est dans cette partie de la cellule que se crée la majorité des porteurs minoritaires, responsables du courant photovoltaïque dans la cellule. Donc il est important de pouvoir, prévoir l'épaisseur du CdTe qui donnerait le meilleur rendement de la cellule lors de la fabrication.

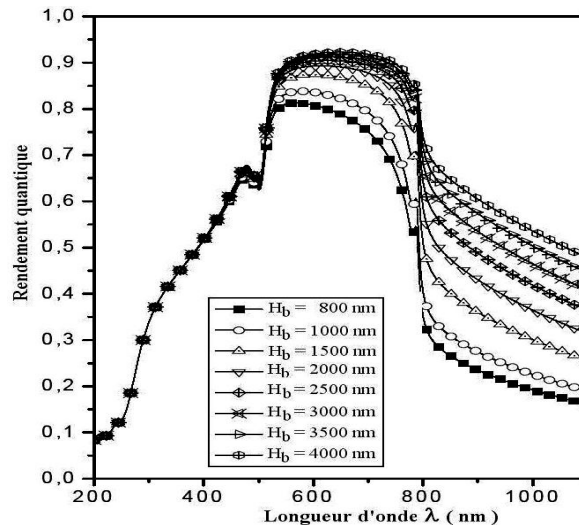


Fig. 3: Variation du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour différentes épaisseurs de base

C'est dans cette optique, que nous jugeons utile d'étudier l'influence de l'épaisseur de la base sur le rendement quantique pour différentes longueurs d'onde. Les calculs sont reportés sur la figure 3 pour différentes épaisseurs de base H_b en fonction de la longueur d'onde et de l'énergie des photons.

Pour les longueurs d'onde inférieures à 500 nm, l'épaisseur de la base n'a aucune influence sur le rendement quantique de la cellule dont l'épaisseur de la couche fenêtre a été fixée à 100 nm pour les besoins des calculs.

Pour toutes les épaisseurs de base, le pic qui apparaît à 500 nm proche du gap du CdS indique l'influence des transitions des excitons dans ce matériau. Dans la gamme des longueurs d'onde comprises entre les seuils d'absorption des deux matériaux (1,5 – 2,5 eV), les rendements quantiques augmentent au fur et à mesure que la longueur d'onde de l'éclairement monochromatique et l'épaisseur de la base augmentent.

Cette augmentation s'explique par une génération de plus en plus uniforme de porteurs qui ne peut avoir lieu qu'à des longueurs d'onde de plus en plus grandes, lorsque l'épaisseur de la base augmente. En dessous du gap du CdTe, on note aussi une absorption de la cellule et le rendement quantique correspondant découle des transitions des excitons près du seuil du CdTe.

Par conséquent l'influence des excitons semble bien être accentuée dans les cellules de plus en plus épaisses du fait du volume plus important de la base conduisant donc à un plus grand nombre d'excitons dans cette partie de la cellule.

3.3 Influence de l'épaisseur de l'émetteur

L'émetteur CdS constitue la couche appelée fenêtre dans l'hétérojonction et cette dénomination fait référence à la propriété de transparence de la couche de CdS [2]. Cette propriété de transparence devrait dépendre de l'épaisseur de la couche CdS, c'est pourquoi nous avons jugé utile de voir le comportement de la cellule avec la variation de l'épaisseur de cette couche.

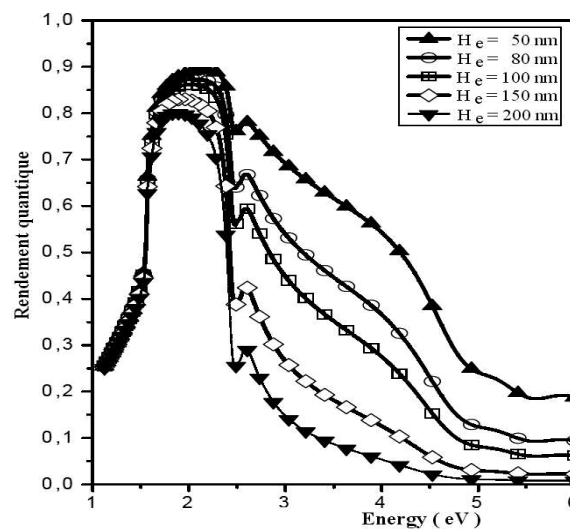


Fig. 4: Rendement quantique en fonction de l'énergie pour différentes épaisseurs de l'émetteur

A la figure 4, nous avons représenté le rendement quantique de la base en fonction de la longueur d'onde et de l'énergie de la lumière incidente pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

Pour des énergies incidentes faibles dans le voisinage du gap du CdTe, aucune variation du rendement quantique n'est notée par rapport à l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur. Dans la zone d'absorption de la cellule (1,5 eV – 2,5 eV), le rendement quantique de la base diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur, ce qui montre l'effet réducteur de l'épaisseur de l'émetteur sur le photocourant total.

Pour une épaisseur d'émetteur fixée, le rendement quantique augmente jusqu'à une valeur limite pour ensuite décroître au-delà des énergies supérieures au seuil du CdS qui est de 2,42 eV.

Au-dessus de ce seuil, l'effet de l'épaisseur devient très appréciable, car on constate que la réponse de la cellule devient de plus en plus importante si l'épaisseur de l'émetteur augmente. On constate que la valeur maximale du rendement quantique diminue au fur et à mesure que l'épaisseur de l'émetteur devient grande.

On note aussi un déplacement de ce maximum vers les courtes longueurs d'onde lorsque l'épaisseur diminue. L'influence des excitons pourrait expliquer le pic qui apparaît à 2,5 eV et l'absorptivité importante de la cellule dans la zone de l'ultra-violet, qui décroît cependant avec l'augmentation de l'épaisseur.

Cette diminution du rendement quantique est en fait liée au fait que plus l'épaisseur de l'émetteur est grande, plus la couche devient opaque par rapport à la lumière incidente donc ne laisse pas passer assez de photons pour générer suffisamment de porteurs dans la base. Par conséquent, la cellule est d'autant plus performante que l'épaisseur de l'émetteur est petite d'où le nom de couche fenêtre attribuée à la couche de CdS.

Les études de Kumazawa *et al.* [14] ont abouti à la même conclusion en étudiant toujours l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension de circuit-ouvert et sur le courant de court-circuit d'une cellule CdS/CdTe.

Ils ont pu indiquer dans leurs calculs que pour des épaisseurs de CdS inférieures à 40 nm, la tension de circuit-ouvert devient faible (600mV). Les meilleures valeurs de courant de court circuit [24 – 26,5 mA] et de tension de circuit-ouvert [750 – 825 mV] s'obtiennent pour des épaisseurs allant de 60 à 75 nm.

3.4 Etude comparative avec des résultats expérimentaux

La méthode de la fonction diélectrique a permis de calculer le rendement quantique de la cellule solaire CdS/CdTe et d'étudier l'influence de divers paramètres sur les performances de la cellule.

Pour jauger la fiabilité du modèle de la fonction diélectrique avec nos résultats, nous nous sommes intéressés aux mesures expérimentales réalisées sur deux cellules solaires CdS/CdTe fabriquées par A. Ndiaye² dans le cadre des travaux de recherches menées sur les couches minces au Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire de la Faculté des Sciences et Techniques de Dakar sous la conduite du professeur I. Youm. [13].

Dans ses études, il a eu à réaliser deux hétérojonctions CdS/CdTe, par évaporation sous vide de poudre pure à 99,999 % de CdTe (2µm) sur du substrat de verre recouvert de SnO₂ sur lequel a été déposée une couche mince de CdS d'épaisseur 150 nm par la méthode de dépôt chimique en solution (cellule n°1).

Cette même opération est reprise pour fabriquer une hétérojonction dont la couche de CdS est cette fois ci de 190 nm, nous la notons cellule n°2.

Grandeurs physiques des cellules synthétisées au Laser

Cellule N°1

Epaisseur du CdTe = 2 μm

Epaisseur du CdS = 150 nm

Cellule N°2

Epaisseur du CdTe = 2 μm

Epaisseur du CdS = 190 nm

Les mesures de rendement quantique ont été effectuées à l'obscurité et sous éclairage continu dans les conditions AM 1,5 avec un flux de photons de puissance 100 mW/cm² à l'aide d'une lampe spectrale calibrée ORIEL.

Nous nous sommes intéressés sur la figure 5 aux courbes expérimentales de rendement quantique relevée à l'obscurité sur ces deux cellules.

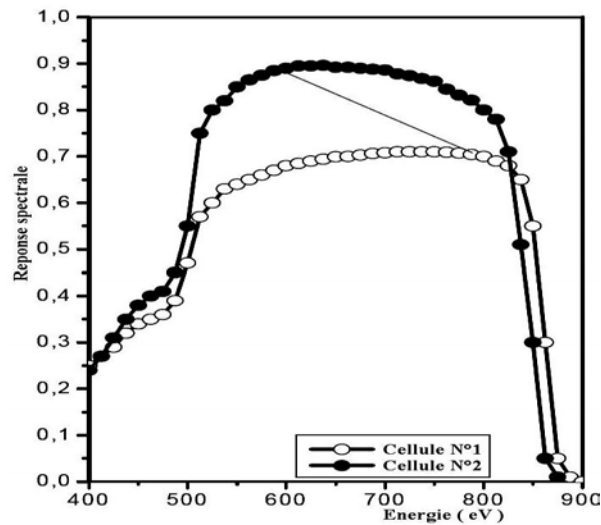


Fig. 5: Réponses spectrales à l'obscurité des cellules N°1 et N°2 [13]

Ces courbes laissent apparaître des rendements appréciables pour des longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 900 nm. En plus, nous remarquons que le rendement quantique de la cellule N°2 est plus élevé que celui de la cellule N°1 qui a une épaisseur d'émetteur plus faible alors que l'on devrait s'attendre à la situation inverse.

On observe aussi dans la cellule N°1 que le seuil d'absorption du CdTe est décalé vers des longueurs d'onde légèrement plus grandes que celles observées dans la cellule N°2. Cela semble indiquer que l'absorbeur qu'est le CdTe a un gap plus petit dans la cellule N°1; cela pourrait être dû au recuit que les couches déposées ont subi durant la fabrication des cellules solaires.

Ces interprétations ont été mentionnées dans [13] où l'on précise que le recuit donne naissance à une couche de CdS_{1-x}Te_x et de CdTe_{1-y}S_y au niveau de l'interface CdS/CdTe, due à une interdiffusion de soufre dans la couche de CdTe et de tellure dans la couche

de CdS. La première conséquence de la formation de cette 'solution solide' $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x/\text{CdTe}_{1-y}\text{S}_y$ est la diminution de l'épaisseur de la couche de CdS, la deuxième étant le déplacement de l'interface métallique vers la couche de CdTe, améliorant ainsi les caractéristiques électriques et photovoltaïques de la jonction.

Un autre avantage de la formation de la couche $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x/\text{CdTe}_{1-y}\text{S}_y$ est l'augmentation de la photoactivité du CdTe vers les longueurs d'onde plus élevées à cause de la diminution de son gap induite par la formation de cette 'solution solide'[10].

Pour remonter aux paramètres réels des cellules, nous avons reproduit les courbes de réponse spectrale expérimentale et théorique des cellules N°1 et N°2 respectivement sur les figures 6 et 7.

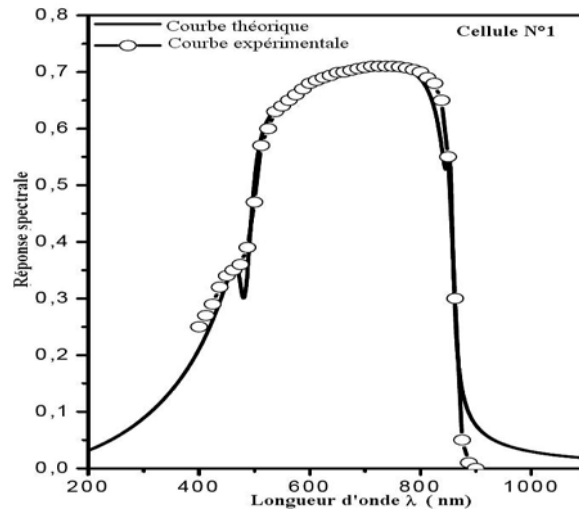


Fig. 6 : Courbes expérimentales (cellule n°1) et théorique (nos calculs) de rendements quantiques

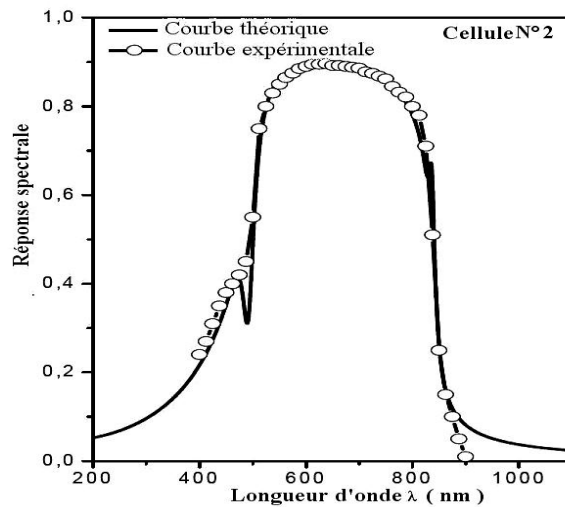


Fig. 7: Courbes expérimentales (cellule n°2) et théorique (nos calculs) de rendements quantiques

Les paramètres utilisés dans les calculs et qui permettent d'avoir un meilleur accord entre les courbes théoriques et expérimentales sont reportés dans le **tableau 1**.

Tableau 1: Valeurs des paramètres utilisés dans les calculs théoriques pour un meilleur accord avec les courbes expérimentales

Grandeurs physiques	Nos résultats		Résultats de S. Adachi	
	Cellule	Cell. N°1	Cell. N°2	Cell. N°2
E_{gCdTe} (eV)		1,46	1,49	1,58
E_{gCdS} (eV)		2,56	2,55	2,48

L'analyse des courbes sur les figures 6 et 7 laisse apparaître un bon accord entre les résultats expérimentaux et nos résultats théoriques. Cet accord est obtenu dans l'intervalle des longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 900 nm qui recouvrent un peu plus le spectre du visible. Toutefois, notre étude théorique permet de présenter des résultats au-delà de cet intervalle. Nos courbes s'étendent de l'UltraViolet à l'infrarouge.

Dans le cas de la cellule N°1 (Fig. 6), le rendement maximal est de 70 % au niveau du seuil d'absorption du CdTe (vers 800 nm) alors qu'il est de 90 % pour la cellule N°2 (Fig. 7), pour des longueurs d'ondes voisines de 600 nm.

L'analyse des courbes expérimentales à travers notre étude théorique nous a permis de voir que la cellule n°1 ayant une épaisseur d'émetteur plus faible (65 nm), a un rendement quantique découlant principalement de la contribution de la base, alors que pour la cellule n°2, d'épaisseur d'émetteur plus grande (100 nm), la réponse spectrale semble provenir aussi bien de l'émetteur que de la base.

Ces considérations peuvent expliquer le rendement plus grand relevé sur la cellule n°2 et le déplacement du maximum de la réponse spectrale vers les courtes longueurs d'onde.

On pourrait aussi faire intervenir la contribution de la zone de charge d'espace (ZCE), mais celle-ci telle que posée théoriquement par les hypothèses de calcul du rendement quantique de la ZCE pourrait ne pas donner le résultat réel car la miscibilité du CdS et du CdTe entraîne une interdiffusion qui affecte très certainement les coefficients d'absorption des deux matériaux.

Une correction est donc nécessaire sur les coefficients d'absorption des deux matériaux qui deviennent $\alpha_{CdS_{1-x}Te_x}$ et $\alpha_{CdTe_{1-y}S_y}$ pour avoir un meilleur accord dans cette largeur de bande [10-12]. Néanmoins, le très bon accord obtenu dans le spectre visible avec les résultats expérimentaux montre que le modèle de la fonction diélectrique est un modèle intéressant pour la détermination des paramètres optiques tels que les coefficients d'absorption des matériaux CdS et CdTe de l'hétérojonction.

Par ailleurs, les accords entre les courbes théoriques et expérimentales ont permis de remonter aux gaps des différents matériaux.

A titre d'exemple, S. Adachi *et al.* [7, 8] ont obtenu des résultats expérimentaux sur $\varepsilon(E)$ en réalisant des mesures ellipsométriques sur la bande d'énergie (1,1 – 5,6 eV).

Dans ses calculs théoriques, le gap du CdTe qui est proposé par S. Adachi est de 1,58 eV, alors que pour un bon accord avec les valeurs expérimentales, le gap a été fixé à 1,46 eV pour la cellule N°1 et 1,49 eV pour la cellule N°2.

Pour le CdS, les valeurs qui sont prises dans les calculs sont 2,56 eV pour les cellules N°1 et N°2 à la place de 2,48 eV proposée par S. Adachi [7, 8]. D'autre part, le pic à 500 nm proche du gap du CdS est dû, selon nos études théoriques, aux transitions des excitons au niveau du gap E_0 du CdS.

Ce pic semble apparaître sur la courbe expérimentale et constitue alors une preuve de l'influence des excitons dans le matériau CdS. En outre, aucune absorption provenant des transitions des excitons n'est notée au-delà du gap du CdTe dans les deux cellules.

Cela semble indiqué que la contribution des états excitoniques dans la gamme des longueurs d'onde supérieures à 800 nm, pourrait ne pas avoir un effet aussi important sur le rendement quantique de la base: les mesures expérimentales ne montrent pas de phénomènes d'absorption des cellules dans cet intervalle et provenant des excitons.

Cependant les interprétations données sur les résultats théoriques et expérimentaux donnent des indications sur le compromis qu'il faut adopter entre les valeurs théoriques et réelles des paramètres de la cellule solaire. Il a été observé que les calculs de simulation numérique ont donné des résultats allant dans le sens de l'observation expérimentale des propriétés photovoltaïques des cellules CdS/CdTe.

4. CONCLUSION

Le modèle de la fonction diélectrique, appliqué à la cellule solaire CdS/CdTe montre que le rendement quantique de la cellule CdS/CdTe résulte de la contribution des photoporteurs que sont les trous et les électrons, mais aussi des excitons.

Des résultats forts intéressants sont obtenus à partir d'un modèle de la fonction diélectrique, qui met en jeu les coefficients d'absorptions des semi-conducteurs CdS et CdTe.

Dans leur expression, figure une composante relative aux énergies de bande des différentes transitions du matériau dont les transitions liées aux excitons. Pour vérifier la validité des résultats obtenus, une étude comparative a été menée avec des résultats expérimentaux obtenus sur deux cellules solaires CdS/CdTe [13].

Les courbes de rendements quantiques obtenues sur ces deux cellules ont été examinées sur la base des résultats théoriques qui ont permis d'estimer de manière satisfaisante les paramètres géométriques des deux cellules à savoir, les épaisseurs de l'émetteur et de la base. En plus, à partir des courbes théoriques et expérimentales, il a été possible de remonter aux gaps des semi-conducteurs CdS et CdTe.

NOMENCLATURE

CdS: Sulfure de cadmium

CdTe: Tellurure Cadmium

QE : Quantum efficiency

$\epsilon(E)$: Coefficient diélectrique

$\alpha(E)$: Coefficient d'absorption

λ : Longueur d'onde

E : Energie
 Q_{CdTe0} : Rendement quantique
 SnO_2 : Dioxyde d'étain
 ZCE: Zone de charge d'espace

REFERENCES

- [1] M. Burgelman, P. Nollet and S. Degrave, '*Electronic Behaviour of Thin-Film CdTe Solar Cells*', Applied Physics A: Materials Sciences and Processing, Vol. 69, N°2, pp. 149 – 153, 1999.
- [2] V.P. Singh, D.L. Linam, D.W. Dils, J.C. McClure and G.B. Lush, '*Electro-Optical Characterization and Modeling of Thin Film CdS-CdTe Heterojunction Solar Cells*', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 63, N°4, pp. 445 – 466, 2000.
- [3] S.Zh. Karazhanov, Y. Zhang, A. Mascarenhas and S. Deb, '*The Effect of Excitons on CdTe Solar Cells*', Journal of Applied Physics, Vol. 87, N°2, pp. 8786 – 8792, 2000.
- [4] A.E. Rakhshani, '*Heterojunction Properties of Electrodeposited CdTe-CdS Solar Cells*', Journal of Applied Physics, Vol. 90, N°8, pp. 4265 – 4271, 2001.
- [5] G. Agostinelli, D.L. Bätzner and M. Burgelman, '*A theoretical model for the front region of cadmium telluride solar cells*', Thin Solid Films, Vol. 431-432, pp. 407 – 413, 2003.
- [6] T.L. Chu and S.S. Chu, '*Thin Film II-VI Photovoltaics*', Solid-State Electronics, Vol. 38, N°3, pp. 533- 549, 1995.
- [7] S. Adachi, T. Kimura and N. Suzuki, '*Optical Properties of CdTe: Experiment and Modelling*', Journal of Applied Physics, Vol. 74, N°5, pp. 3435 – 3441, 1993.
- [8] S. Ninomiya and S. Adachi, '*Optical Properties of Cubic and Hexagonal CdSe*', Journal of Applied Physics, Vol. 78, N°2, pp. 1183 – 1190, 1995.
- [9] J. P. Donnelly and A.G. Milnes, '*The Photovoltaic Characteristics of p-n Ge-Si and Ge-GaAs Heterojunctions*', International Journal of Electronics, Vol. 20, N°4, pp. 295 – 310, 1966.
- [10] D.W. Lane, K.D. Rogers, J.D. Painter, D.A. Wood and M. E. Ozsan, '*Structural Dynamics in CdS-CdTe Thin Films*', Thin Solid films, Vol. 361-362, pp. 1 – 8, 2000
- [11] X. Wu, R.G. Dhere, D.S. Albin, T.A. Gessert, C. DeHart, J.C. Keane, A. Duda, T.J. Coutts, S. Asher, D.H. Levi, H.R. Moutinho, Y. Yan, T. Moriarty, S. Johnston, K. Emery and P. Sheldon, '*High-Efficiency CTO/ZTO/CdS/CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells*', National Renewable Energy Laboratory, 'NREL', NCPV Program Review Meeting, Lakewood, Colorado, 14 – 17 October 2001.
- [12] D.W. Lane, '*A Review of the Optical Band Gap of Thin Film CdS_xTe_{1-x}* ', Solar Energy Materials and Solar Cells', Vol. 90, N°9, pp. 1169 – 1175, 2006.
- [13] A. Ndiaye, Thèse, UC AD, Dakar, 2000.

- 14] S. Kumazawa, S. Shibutani, T. Nishio, T. Aramato, H. Higuchi, T. Arita, A. HanaFusa, K. Omura, M. Murozono and H. Takakura, '*15.1 % Highly Efficient thin Film CdS/CdTe Solar Cell*', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 49, N°1-4, pp. 205 – 212, 1997.
- [15] D.G. Thomas and J.J. Hopfield, '*Exciton Spectrum of Cadmium Sulfide*', Physical Review, Vol. 116, N°3, pp. 573 – 582, 1959.