

Etude numérique de la cellule photovoltaïque organique MPP/ZnPc

S. Bouchekouf*, B. Marir et M. Benabbas-Marir

Département d'Electronique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université des Frères Mentouri, Constantine, Algérie

(reçu le 27 Avril 2008 – accepté le 21 Juin 2009)

Résumé - Dans le domaine des nouvelles technologies pour l'énergie, le solaire photovoltaïque organique est en train de devenir un axe de développement industriellement important. Dans ce contexte, une recherche de base est indispensable pour valider et démontrer l'intérêt d'une filière plastique par un abaissement décisif des coûts. Cette étude utilise une méthode de calcul du photocourant délivré par la cellule solaire organique bicouche MPP/ZnPc à partir des équations de continuité et des courants par analogie aux phénomènes de transport des charges, selon le modèle d'une hétérojonction n/p. La génération principale du photocourant est localisée dans la zone active, une région très fine par rapport aux épaisseurs des couches, donneur et accepteur. Donc les excitons ne peuvent se dissocier qu'à l'interface MPP/ZnPc, alors que la zone d'absorption est considérablement plus grande que la longueur de diffusion. Les caractéristiques de cette structure sont calculées par la simulation de l'équation I-V, sous l'illumination AM1.5. L'insertion de la couche composite C₆₀ et ZnPc à l'interface de MPP et ZnPc permet d'améliorer les performances de la cellule par une augmentation du photocourant de la valeur 2.6 mA/cm² à 5.3 mA/cm² et le rendement passe de 0.72 % à 1.49 %.

Abstract - In the field of new technologies for energy, the organics photovoltaic solar is becoming an axis of industrially significant development. In this context, a basic research is essential to validate and show the advantage of a plastic die by a decisive lowering of the costs. This investigation uses a method of calculation the photocurrent delivered by the organic solar cell double-layered MPP/ZnPc applying the equations of continuities and the currents by analogy to the phenomena of transport of the loads according to the model of a heterojunction n/p. The principal generation of the photocurrent is localized in the active zone, a very fine area by contribution with the thicknesses of the donor layers and acceptor. Thus let us that the excitons dissociate only in the MPP/ZnPc interface, whereas the zone of absorption is considerably larger than the diffusion length. The characteristics of this structure are calculated by the simulation of equation I/V, under illumination AM1.5. Insertion of the composite layer C₆₀ and ZnPc in the interface of MPP and ZnPc makes it possible to improve the performances of the cell by an increase in the photocurrent of the value 2.6 mA/cm² to 5.3 mA/cm² and the conversion efficiency η passes from 0,72 % to 1,49 %.

Mots clés: Cellule solaire organique - Structure MPP/ZnPc - Photocourant - Equation de continuité.

1. INTRODUCTION

L'électronique moléculaire est un domaine se développant rapidement et les matériaux conducteurs organiques ont été employés comme milieu actif dans les dispositifs optoélectroniques, tels que les diodes lumineuses (LED), les transistors à effet de champ, des sondes, des lasers, des photodiodes et les cellules solaires.

* bouchekoufs@yahoo.fr

Les cellules solaires organiques ont attiré une attention significative, en raison de leur particularité à être mises en œuvre par la promesse de la fabrication peu coûteuse et de la grande variété de fonctionnalité des matériaux organiques [1-6].

Les performances d'une cellule solaire dépendent des couches minces entre les électrodes. Au cours des deux dernières décennies, deux types de cellules solaires organiques ont été intensivement étudiés: celles qui utilisent une seule couche (monocouche) et celles construites avec un empilement de deux couches organiques (bicouches).

Nous proposons dans cet article, contrairement à la littérature où les résultats sont seulement expérimentaux, une méthode de simulation basée sur la résolution des équations de courants (continuité) pour une hétérostructure solaire organique à base de pigment méthyle perylène (MPP) et le phthalocyanine de zinc (ZnPc) avec comme structure ITO/MPP/ZnPc/Au.

Ces derniers ont une bonne stabilité thermique, de hauts coefficients d'absorption ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$), et une conductivité électrique suffisante, bien que l'épaisseur de la couche utile de génération de charge dans les cellules organiques soit beaucoup plus fine que celle des cellules inorganiques, les rendements de conversion de puissance appréciables peuvent être atteints grâce aux forts coefficients d'absorption.

Le phthalocyanine de zinc (ZnPc) est de type p (donneur d'électrons) et le pigment méthyle perylène (MPP) de type n (accepteur d'électrons).

2. DESCRIPTION ET MECANISMES DE GENERATION DANS LES CELLULES ORGANIQUES

Le procédé photovoltaïque actuellement admis est l'absorption d'un photon par la couche organique active qui génère un exciton (au lieu des porteurs libres dans le cas inorganiques) qui diffuse à travers le matériau [7]. Dans le cas où la longueur de diffusion de l'exciton est suffisamment grande pour rencontrer un champ interne, la séparation des charges peut avoir lieu. Trous et électrons sont ensuite collectés aux électrodes (respectivement à l'anode et à la cathode) suivant le champ interne de la cellule.

Nous allons dans ce qui suit décrire les diverses architectures rencontrées dans les cellules photovoltaïques organiques et leurs mécanismes propres.

2.1 Structure monocouche (Schottky)

Les cellules photovoltaïques organiques décrites comme étant de type Schottky avec un rendement de 0.7 % sous AM1, se présentent sous la forme métal / organique / métal ou ITO / organique / métal [8].

Dans ce type de structures, les propriétés de la cellule sont fortement liées aux électrodes. De plus, cette structure présente un faible facteur de forme FF. Pour améliorer le rendement, il y a une réalisation d'une structure monocouche dopé en pentacène dopé (iode ou brome) avec $\eta = 2.4\%$ [9].

Afin d'augmenter le rendement global d'une cellule photovoltaïque monocouche, il a été réalisé une structure monocouche dopée. Une diode photovoltaïque basée sur une structure Schottky a été réalisée avec du pentacène dopé (iode ou brome) [9]. La structure bicouche s'avère donc nécessaire pour l'amélioration des performances.

2.2 Structure bicouche (hétérojonction)

La structure d'une cellule bicouche est représentée sur la figure 1. Pour se placer dans le cas d'une hétérojonction de type PN, les électrodes sont choisies de telle sorte que l'on obtienne des contacts ohmiques avec les films organiques. L'ITO est souvent utilisé comme électrode semi transparente, car d'une part, il présente une transmittance de plus de 85 % dans le visible et d'autre part il présente un contact ohmique avec certains matériaux transporteurs de trous (MPc, PTCDAs...) [10].

L'électrode arrière est constituée de métaux comme Al, Ag ou d'alliage Mg:Ag... qui permettent d'obtenir un contact ohmique avec les matériaux de type n [11].

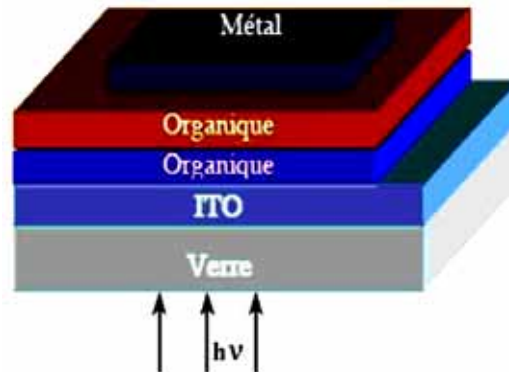


Fig. 1: Configuration de la structure d'une cellule PV bicouche [12]

2.2.1 Principes physiques d'une cellule solaire organique

Dans les structures à hétérojonction, la conception et la collecte des charges photo induites suivent le processus suivant, où les matériaux donneur et accepteur développent une interface capable de séparer les charges.

1- Absorption photonique.

2- Génération des excitons.

3- Diffusion de l'exciton: L'exciton diffuse vers l'interface entre les matériaux organiques. Si les excitons sont générés à une distance inférieure à $L_{D_{exc}}$ (appelée longueur de diffusion des excitons), ils peuvent diffuser jusqu'à l'interface, sinon ils se recombinent.

4- Séparation des charges: La dissociation de l'exciton se fait à l'interface entre les deux matériaux. Si la durée de vie de l'excitation est suffisante pour que l'exciton rencontre un champ interne, il apparaît une séparation du trou et de l'électron.

5- Transport des charges vers les électrodes.

6- Collecte des charges aux électrodes.

2.2.2 Structures bicouches à base de petites molécules

Les études plus récentes d'une cellule fabriquée à partir de perylène (MPP) et du phtalocyanine (ZnPc) avec comme structure Au / MPP / ZnPc / Al [14] montrent que la

génération de porteurs apparaît seulement au niveau d'une très fine région de la couche active.

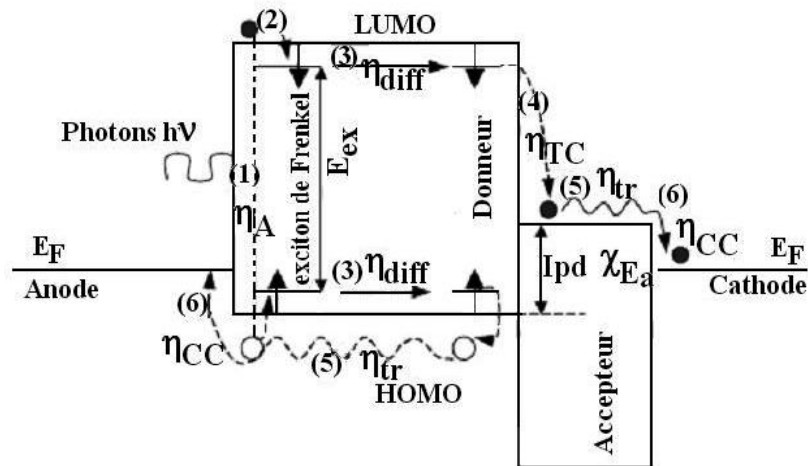


Fig. 2: Mécanismes de la génération de photoporteurs dans une hétérojonction organique [13]

L'insertion d'une couche composée d'un mélange de C_{60} et de ZnPc (1:1) entre le ZnPc et MPP permet d'atteindre un rendement de 1.05 % sous les conditions AM1.5 [5].

2.2.3 Hétérojonction à base de polymère et C_{60}

La première cellule solaire organique polymère est une architecture alliant le C_{60} et un polymère comme le PPP (polyparaphénylène) [15], le PPV (para-phénylènevinylène) [16]. Le C_{60} (Buckminsterfullerène) est un composé organique moléculaire assimilable à un semi-conducteur intrinsèque à gap direct [17, 18]. Ces cellules présentent des rendements très faibles.

2.2.4 Hétérojonction tout polymère

Dans les structures en réseaux interpénétrés, la couche composite est un mélange de deux éléments polymères donneurs/accepteurs. Cette technologie améliore les performances des cellules solaires organiques bicouches.

▪ Exemple de matériaux utilisés

- Donneur: le P3HT (poly (3-hexylthiophène), le MEH-PPV (poly (2-methoxy-5(2'-ethyl-hexyloxy)-p-phénylènevinylène) [19], le MDMO-PPV (poly (2-methoxy-5-dodecyloxy-p-phenylene vinylène) [20].

- Accepteur: le C_{60} , le [6-6]-phenyl C_{61} butyric acid methyl ester (PCBM), le C61 [21].

▪ Rendements atteints

- 3,3 % composite: MDMO-PPV/ PCBM (2002).

- 5 % composite: P3HT/PCBM (2005/2006).

3. SIMULATION DE LA CELLULE BICOUCHE MPP/ZnPc

Dans notre étude, nous intéressons à une structure bicouche à base de petites molécules décrites au paragraphe 2.2.2.

L'hétérojonction MPP/ZnPc de la cellule organique ITO/MPP/ZnPc/Au présentée sur la figure 3, est une structure donneur/accepteur. Elle permet le transfert efficace des photo-électrons depuis le ZnPc qui joue le rôle de donneur vers l'accepteur le MPP.

Les deux électrodes sont constituées de ITO et d'or, 'Au'. L'ITO souvent présente une électrode semitransparente. L'électrode arrière est constituée d'or, 'Au'. Une couche composée d'un mélange de C₆₀ et de ZnPc (1:1), est insérée entre le MPP et ZnPc pour augmenter le nombre de sites de dissociation des excitons.

La cellule, que nous avons étudiée, est constituée de la structure: substrat/ITO (30 nm)/MPP (20 nm)/ZnPc (220 nm)/Au (40 nm) [22].

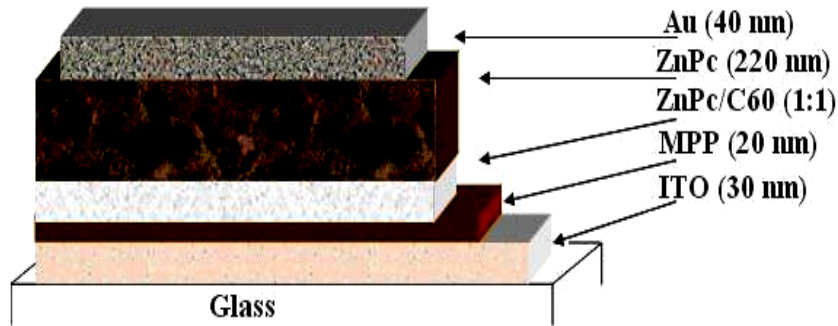


Fig. 3: Structure de la cellule Substrat/ITO/MPP/ZnPc/Au [22]

3.1 Calcul du courant de la cellule MPP/ZnPc

L'absorption pour la structure bicouche, représentée sur la figure 3, s'effectue dans les deux couches. Dans cette configuration, seuls les excitons générés au voisinage de l'interface sont efficaces à la génération du photocourant. Ce photocourant est la somme du courant photogénéré au niveau de donneur et le courant dans l'accepteur.

Pour la simulation du photocourant de la cellule, on utilise la géométrie de la figure 4.

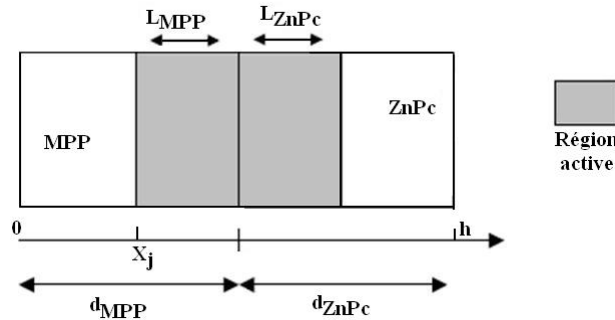


Fig. 4: Modèle géométrique de la structure MPP/ZnPc [22]

Où d_{MPP} , d_{ZnPc} sont les dimensions des couches MPP et ZnPc respectivement et L_{MPP} , L_{ZnPc} , les longueurs de diffusions. Pour le calcul, on prend $L_{MPP} = 1$ nm et $L_{ZnPc} = 5$ nm.

La résolution numérique des équations de continuités et des courants, par la méthode itérative a permis de déterminer la distribution des excitons le long de la cellule et de déduire l'équation qui caractérise le courant pour chaque point de la cellule.

- Equations de continuités

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{q} \cdot \text{div}(J_n) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} + \frac{1}{q} \cdot \text{div}(J_p) \quad (2)$$

- Equations des courants

$$J_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + \mu_n \cdot K \cdot T \cdot \frac{\partial n}{\partial x} \quad (3)$$

$$J_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E - \mu_p \cdot K \cdot T \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4)$$

3.1.1 Calcul du courant dans le MPP (n)

Cette couche nous donne un photo-trou (I_p) exprimé par l'équation (7).

- Conditions aux limites

$$S_p \cdot \Delta p = D_p \cdot \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (5)$$

S_p = Vitesse de recombinaison à la surface.

$$\Delta p \Big|_{x=x_j} = 0 \quad (6)$$

$$J_p = \frac{q \alpha_1 L_p \Phi_i (1 - R)}{(\alpha_1^2 L_p^2 - 1)} \times$$

$$\left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha_1 L_p \right) - \exp(-\alpha_1 x_j) \cdot \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \cdot \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \cdot \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} \right] \quad (7)$$

$$L_p = L_{MPP} \quad (8)$$

3.1.2 Calcul du courant dans le ZnPc (p)

Cette zone présente le donneur. Elle nous donne un photo-électron (I_n).

- Conditions aux limites

$$S_n \cdot \Delta_n = D_n \cdot \frac{\partial \Delta_n}{\partial x} \Big|_{x=h} \quad (9)$$

S_p : Vitesse de recombinaison au contact arrière, $h = d_{MPP} + d_{ZnPc}$.

$$\Delta_n \Big|_{x=x_j + L_{MPP} + L_{ZnPc}} = 0 \quad (10)$$

$$J_n = \frac{q Q_i (1-R) \exp(-\alpha_1 (x_j + L_{MPP})) \exp(-\alpha_2 L_{ZnPc}) \alpha_2 L_n}{(\alpha_2^2 L_n^2 - 1)} \left[\alpha_2 L_n - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left(\cosh\left(\frac{x_b}{L_n}\right) \exp(-\alpha_2 x_b) \right) + \sinh\left(\frac{x_b}{L_n}\right) + \alpha_2 L_n \exp(-\alpha_2 x_b)}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{x_b}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{x_b}{L_n}\right)} \right] \quad (11)$$

$$L_n = L_{ZnPc} \quad (12)$$

$$x_b = h - (x_j + L_{MPP} + L_{ZnPc}) \quad (13)$$

3.1.3 Courant dans la zone active (I_g)

Les excitons générés dans la zone active (au voisinage de l'interface) sont efficaces au niveau de la dissociation (production des charges), donc, le photocourant dans cette zone est:

$$J_g = q \cdot \Phi_i (1-R) \exp(-\alpha_1 x_j) \times \left[(1 - \exp(-\alpha_1 \cdot L_{MPP})) + \exp(-\alpha_1 \cdot L_{MPP}) (1 - \exp(-\alpha_2 \cdot L_{ZnPc})) \right] \quad (14)$$

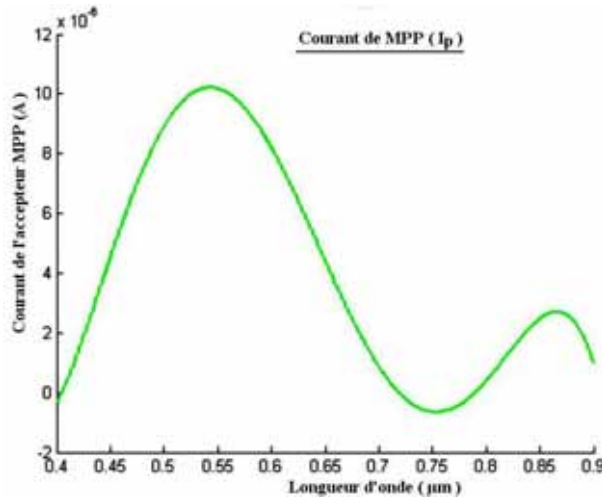


Fig. 5: Variation du courant de la couche MPP en fonction de la longueur d'onde

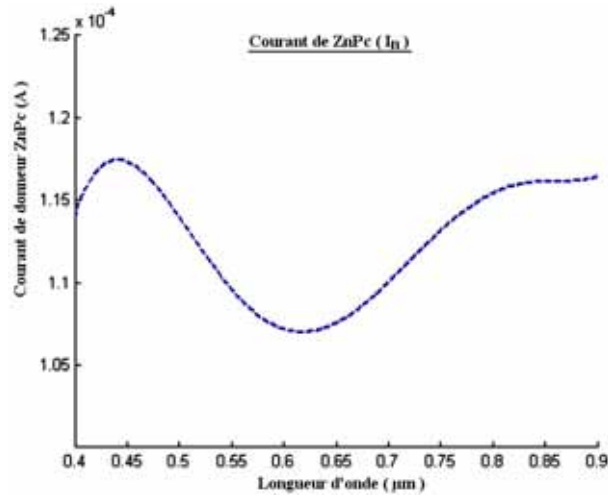


Fig. 6: Variation du courant de la couche ZnPc en fonction de la longueur d'onde

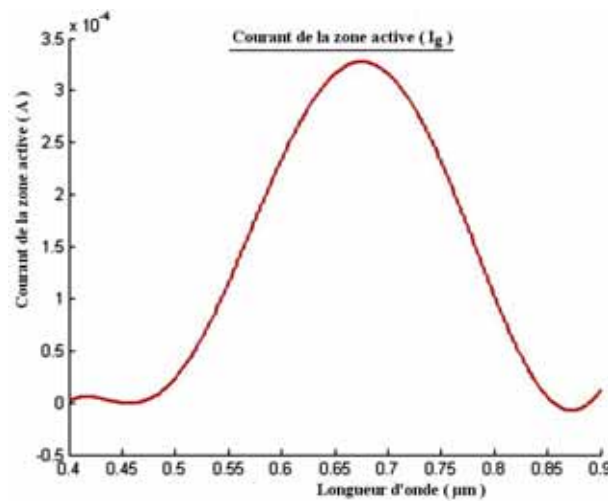


Fig. 7: Variation du courant de la zone active en fonction de la longueur d'onde

La figure 7 montre des valeurs intéressantes du photocourant dans la zone active. Ce photocourant est considérable par rapport aux photocourants des couches MPP et ZnPc (Fig. 5) et (Fig. 6), il est de l'ordre du mA sur une couche d'épaisseur de 6 nm.

Comparant au courant dans la région ZnPc, ce dernier est comparable, mais l'épaisseur de cette couche est aussi plus grande (220 nm). Le photocourant de la zone active balaie l'intervalle de 500-800 nm et le maximum est autour de 700 nm.

Ces résultats nous affirment que la génération principale du photocourant est localisée dans la zone active, une région très fine par rapport aux épaisseurs des couches donneur et accepteur. Donc, les excitons générés dans la zone active (au voisinage de l'interface) sont efficaces au niveau de la dissociation (production du photocourant).

3.2 Caractéristique I(V)

Le circuit électrique équivalent est donné par la figure 8, où :

$$R_S = R_{Au} + R_{ZnPc} + R_{MPP} + R_{ITO}$$

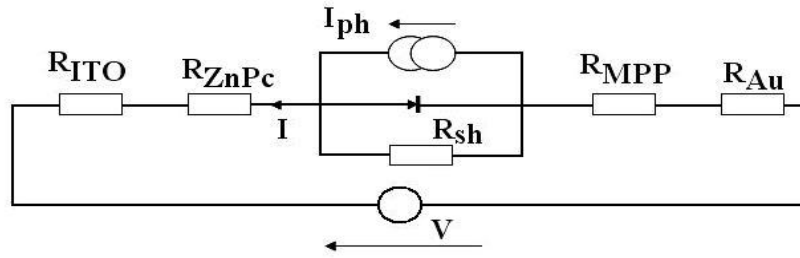


Fig. 8: Circuit électrique de la cellule MPP/ZnPc [22]

D'après ce circuit équivalent, nous avons déduit l'équation caractéristique I(V) de la cellule:

$$I(V) = I_{ph} - I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_S \cdot I}{U_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_S \cdot I}{R_{sh}} \quad (15)$$

La figure 9 représente la caractéristique I(V). Le rendement et le facteur de forme sont donnés en **Tableau 1**.

Tableau 1: Caractéristiques de la structure bicouche MPP/ZnPc

I_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (mV)	η (%)	FF (%)
2.6	266.2	0.72	51.71

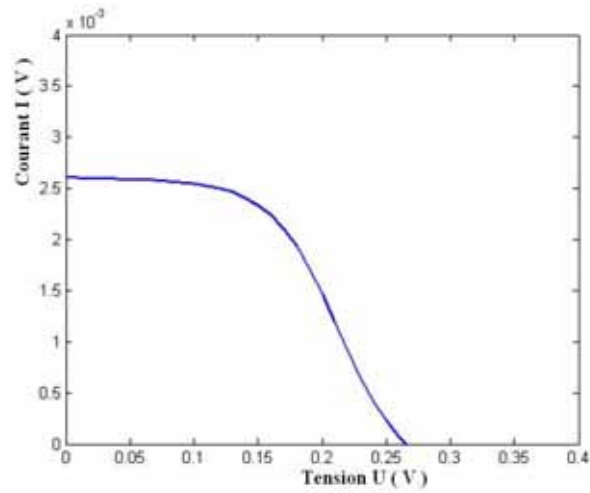


Fig. 9: Caractéristique I(V) pour la structure MPP/ZnPc

3.2 Insertion de la couche composite ZnPc/C₆₀

Pour une amélioration des performances de la cellule bicouche MPP/ZnPc, il faut une augmentation de l'épaisseur de la zone interfaciale pour pallier au problème des recombinaisons dues à la non dissociation des excitons créés loin de l'interface de l'hétérojonction.

Pour cette raison, une couche composée d'un mélange de C₆₀ et de ZnPc (1:1) est insérée entre le ZnPc et le MPP d'épaisseur de 30 nm.

La valeur du photocourant calculé passe de 2.6 mA à 5.3 mA [22]. La figure 10 représente la caractéristique I(V) de cette structure améliorée et une comparaison avec des résultats expérimentaux [22].

Le **Tableau 2** résume les caractéristiques de cette structure.

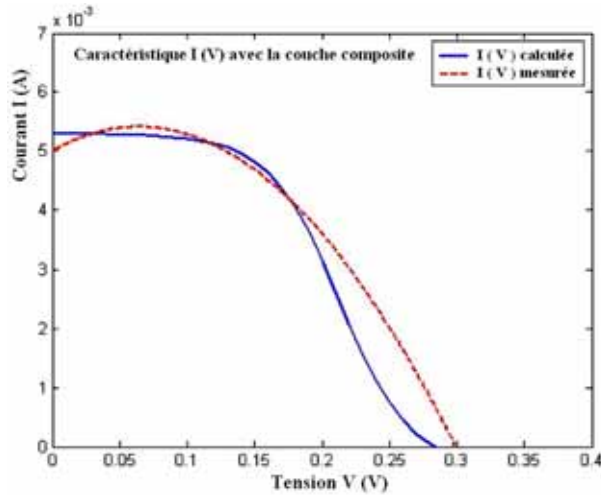


Fig. 10: Caractéristique I(V) pour la structure MPP/ZnPc contenant la couche composite ZnPc/C₆₀ (1:1)

Tableau 2: Performances de la structure bicouche MPP/ZnPc avec la couche composite ZnPc/C₆₀

I_{sc} (mA/cm ²)	V_{co} (mV)	η (%)	FF (%)
5.3	286.5	1.49	49.31

4. CONCLUSION

Jusqu'à présent, les résultats obtenus pour des cellules solaires organiques sont, soit expérimentaux, soit basés sur des relevés statistiques à partir des réponses spectrales des cellules.

Nous avons élaboré un modèle numérique basé sur la résolution des équations de continuités, qui a donné des résultats en bon accord avec la littérature et qui a permis, en outre une meilleure maîtrise des performances des cellules organiques, en vue de leur amélioration.

NOMENCLATURE

$D_n = (\mu_n \cdot K \cdot T) / q$, Constante de diffusion des électrons μ_n : Mobilité des électrons $\Delta n = n - n_e$, Densité des excitons générés, n_e : Densité à l'équilibre τ_n : Durée de vie des porteurs minoritaires de la région p (les électrons) G_n : Taux de génération des électrons $\Phi_i(\lambda)$: Flux des photons incidents par cm^{-2} par s^{-1} par unité de longueur d'onde R : Coefficient de réflexion. L_n : Longueur de diffusion des électrons α_1 : Coefficient d'absorption dans le MPP x_b : Epaisseur de la couche ZnPc I : Courant J : Densité de courant V_{oc} : Tension à circuit ouvert η : Rendement	$D_p = (\mu_p \cdot K \cdot T) / q$, Constante de diffusion des trous μ_p : Mobilité des trous $\Delta p = p - p_e$, Densité des trous générés, p_e : Densité à l'équilibre. τ_p : Durée de vie des porteurs minoritaires de la région n (les trous) G_p : Taux de génération des trous S_p : Vitesse de recombinaison des trous à la surface S_n : Vitesse de recombinaison des électrons au contact arrière α_2 : coefficient d'absorption dans le ZnPc L_p : Longueur de diffusion des électrons I_{CC} : Courant de court-circuit V : Tension FF : Facteur de forme
---	---

REFERENCES

- [1] R.H. Friend, R.W. Gymer, A.B. Holmes, J.H. Burroughes, R.N. Marks, C. Taliani, D.D.C. Bradley, D.A. Dos Santos, J.L. Brédas, M. Lögdlund and W.R. Salaneck, '*Electroluminescence in Conjugated Polymers*', Nature, Vol. 397, pp. 121 – 128, 1999.
- [2] C.D. Dimitrakopoulos and P.R.L. Malenfant, '*Organic Thin Film Transistors for Large Area Electronics*', Advanced Materials, Vol. 14, N°2, pp. 99 – 117, 2002.
- [3] A. Guiseppi-Elie, G.G. Wallace and T. Matsue, in: T.A. Skotheim, R.L. Elsenbaumer, J.R. Reynolds (Eds.), '*Handbook of Conducting Polymers*', Second Ed., Marcel Dekker, Inc., New York, 1998.
- [4] N. Tessler, '*Lasers Based on Semiconducting Organic Materials*', Advanced Materials, Vol. 11, N°5, pp. 363 – 370, 1999.
- [5] P. Peumans, A. Yakimov and S.R. Forrest, '*Small Molecule Weight Organic Thin-Film Photodetectors and Solar Cells*', Journal of Applied Physics, Vol. 93, N°7, pp. 3693 – 3723, 2003.
- [6] A.J. Mozer and N.S. Sariciftci, '*Conjugated Polymer Photovoltaic Devices and Materials*', Comptes Rendus Chimie, Vol. 9, N°5-6, pp. 568 – 577, 2006.
- [7] B.J. Landi, R.P. Raffaele, S.L. Castro and S.G. Bailey, '*Single Wall Carbon Nanotube-Polymer Solar Cells*', Prog in Photovolt: Research Applied, Vol. 13, pp. 165 – 172, 2005.
- [8] A.K. Ghosh and T.J. Feng, '*Cyanine Organic Solar Cells*', Journal of Applied Physics, Vol. 49, N°12, pp. 5982 – 5989, 1978.

- [9] J.H. Schön, Ch. Kloc, E. Bucher and B. Batlogg, 'Efficient Organic Photovoltaic Diodes Based on Doped Pentacene', *Nature*, Vol. 403, pp. 408 – 410, 2000.
- [10] C.W. Tang, 'Two-Layer Organic Photovoltaic Cell', *Applied Physics Letters*, Vol. 48, N°2, pp. 183 - 185, 1986.
- [11] K. Seki, N. Hayashi, H. Oji, E. Ito, Y. Ouchi and H. Ishii, 'Electronic Structure of Organic/Metal Interfaces', *Thin Solid Films*, Vol. 393, N°1-2, pp. 298 – 303, 2001.
- [12] M. Oukachmih, 'Les Cellules Photovoltaïques à Base de Matériaux Organiques Discotiques', Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, France 2003.
- [13] B. Brousse, 'Réalisation et Caractérisation de Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues par Dépôt Physique', Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Sciences, Technologie, Santé, Université de Limoges, France, 2004.
- [14] J. Rostalski and D. Meissner, 'Photocurrent Spectroscopy for the Investigation of Charge Carrier Generation and Transport Mechanism in Organic p/n-Junction Solar Cells', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 63, N°1, pp. 37 - 47, 2000.
- [15] J. Rostalski and D. Meissner, 'Monochromatic versus Solar Efficiencies of Organic Solar Cells', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 61, N°1, pp. 87- 95, 2000.
- [16] J.J.M. Halls, K. Pichler, R.H. Friend, S.C. Moratti and A.B. Holmes, 'Exciton Dissociation at a Poly(p-phenylenevinylene)/C₆₀ Heterojunction', *Synthetic Metals*, Vol. 77, N°1-3, pp. 277 – 280, 1996.
- [17] S.B. Lee, P.K. Khabibullaev, A.A. Zakhidov, S. Morita and K. Yoshino, 'Photovoltaic Properties of C₆₀/PPP Heterojunction: Molecular D-A Photocell', *Synthetic Metals*, Vol. 71, N°1-3, pp. 2247 – 2248, 1995. Proceedings of the International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM'94).
- [18] H. Jin, Y-B. Hou, X-G. Meng, Y. Li, Q. Shi and F. Teng, 'Enhanced Photovoltaic Properties of Polymer-Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells by Thermal Annealing', *Solid State Communications*, Vol. 142, N°3, pp. 181 – 184, 2007.
- [19] H. Jin, Y-B. Hou, X-G. Meng and F. Teng, 'Electric Field-Induced Quenching of Photoluminescence in the MEH-PPV: C60 Composite Thin Film', *Chemical Physics Letters*, Vol. 443, N°4-6, pp. 374 – 377, 2007.
- [20] M. Onada and K. Tada, 'Photovoltaic Effects of MDOPPV/PPy Layer', *Thin Solid Films*, Vol. 393, N°1-2, pp. 284 – 290, 2001.
- [21] S. Bertho, I. Haeldermans, A. Swinnen, W. Moons, T. Martens, L. Lutsen, D. Vanderzande, J. Manca, A. Senes and A. Bonfiglio, 'Influence of Thermal Ageing on the Stability of Polymer Bulk Heterojunction Solar Cells', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 91, N°5, pp. 385 – 389, 2007.
- [22] D. Meissner and J. Rostalski, 'Highly Efficient Molecular Organic Solar Cells', Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, U.K, Vol. 3, 1 – 5 May 2000.