

## Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin

W.C. Benmoussa\*, S. Amara et A. Zerga

Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables, 'U.R.M.E.R'  
Faculté des Sciences, Université Abou Bekr Belkaïd, B.P. 119, Tlemcen, Algérie

**Résumé** - L'optimisation du rendement de conversion des cellules photovoltaïques est basée sur la compréhension et le développement du concept du dispositif. Toutefois, il existe des outils de caractérisation permettant de comprendre non seulement le fonctionnement des cellules mais aussi et surtout maîtriser les paramètres limitatifs des performances de celles-ci. Notre travail présenté porte sur l'étude des performances des cellules solaires et sur l'analyse d'une méthode numérique permettant l'extraction des paramètres des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire. Pour un fonctionnement donné, l'étude du rendement de conversion d'énergie maximale  $\eta_M$  une cellule solaire nécessite un modèle analytique complet de son fonctionnement. Le modèle à une exponentielle prévoit une augmentation de  $V_{co}$ , dès que le facteur de qualité augmente ou le courant de saturation diminue. Ceci mène à des grandes valeurs de  $V_{co}$  incompatibles avec la physique du dispositif. De ce fait, une recherche de nouvelles structures ne doit pas porter uniquement sur l'amélioration de  $I_0$  des cellules solaires idéales, mais sur les conditions d'une amélioration de  $V_{co}$  avec des facteurs de qualité supérieure à l'unité. Ceci montre l'intérêt d'utiliser le modèle à deux exponentielles afin de pouvoir différencier les deux phénomènes, la diffusion et de la recombinaison en zone de charge d'espace dans la simulation du fonctionnement de la cellule solaire en fonction des paramètres de la caractéristique courant tension (résistances série et parallèle  $R_s$  et  $R_{sh}$ , facteur de qualité de la diode  $n$ , le photocourant  $I_{ph}$  et les courants de saturation  $I_{01}$  et  $I_{02}$ ).

### 1. INTRODUCTION

La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les dispositifs capables d'effectuer cette transformation sont appelés cellules solaires. Leurs rendements étaient relativement très faibles, ce qui a donné motivation à l'étude des facteurs limitatifs du rendement de conversion [1]

### 2. PERFORMANCE DE LA CELLULE

#### 2.1 Le courant de court-circuit $I_{cc}$

Il définit la quantité des paires électron-trou créé  $G$  et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous ( $L_n$  et  $L_p$ ) respectivement.

$$I_{ph} = q G (L_n + L_p) \quad (1)$$

#### 2.2 La tension en circuit ouvert $V_{co}$

C'est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité ( $I = 0$ ) fournit un courant égal au courant de court circuit  $I_{cc}$ . Elle est obtenue à partir de l'équation:

$$V_{co} = \frac{k T}{q} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2)$$

$I_0$  courant de saturation de la diode.

---

\* [w\\_cherif\\_b@yahoo.fr](mailto:w_cherif_b@yahoo.fr) - [zerga@iness.c-strasbourg.fr](mailto:zerga@iness.c-strasbourg.fr)

### 2.3 Le facteur de forme FF

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit:

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (3)$$

Chacune de ces grandeurs ( $V_M$ ,  $I_M$ ,  $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ ) est représentée sur la figure 1 [4].

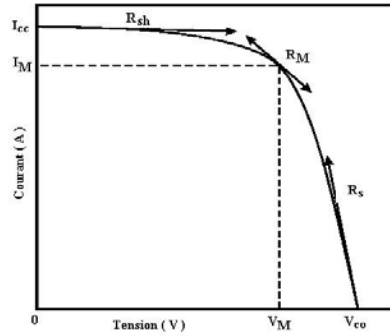


Fig. 1: Points et valeurs remarquables de la caractéristique courant - tension.

### 2.4 Le rendement de conversion d'énergie $\eta$

C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire incident.

$$\eta_M = FF \cdot \frac{I_{cc} \cdot V_{co}}{P_o} = \frac{I_M \cdot V_M}{P_o} \quad (4)$$

### 2.5 Modèle à exponentielle simple (SEM), cas réel [2, 3]

Ce modèle est le plus courant et est utilisé par de nombreux auteurs pour obtenir des valeurs de certains paramètres de la caractéristique courant - tension d'une cellule solaire par des méthodes d'approximations. La caractéristique courant - tension est représentée par l'équation:

$$I = I_{ph} - \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} - I_s \cdot \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + R_s \cdot I)}{n k} \right] - 1 \right\} \quad (5)$$

Le circuit équivalent correspondant est schématisé sur la figure 2.

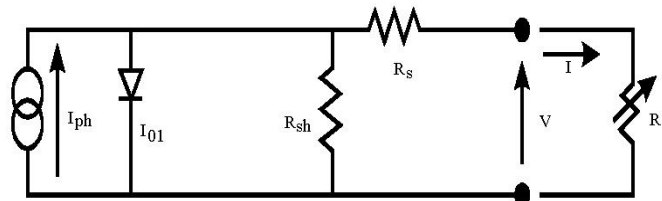


Fig. 2: Photopile décrite par le modèle à exponentielle simple (SEM)

### Facteur de qualité n

Le facteur de qualité, permet de superposer les deux caractéristiques expérimentale et théorique.

### 2.5 Modèle à exponentielles doubles (DEM) [5-7]

L'expression de la caractéristique courant - tension sous éclairage s'écrit:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + R_s I)}{n k T} \right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + R_s I)}{k T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (6)$$

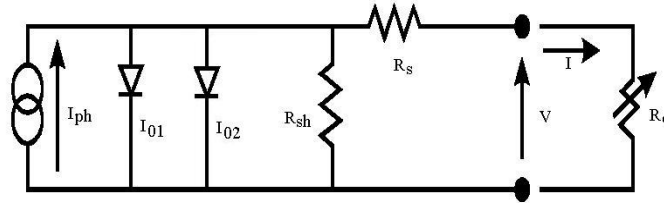


Fig. 3: Circuit électrique équivalent d'une photopile (DEM)

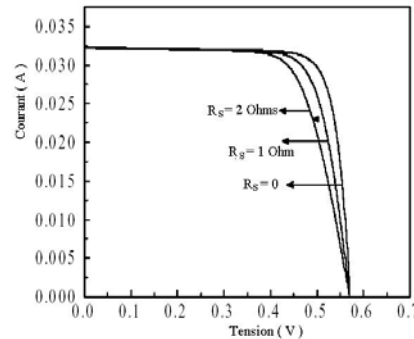
$I_{ph}$  étant le photocourant du aux photons incidents, les deux termes exponentiels représentent séparément le courant de saturation de diffusion ( $I_{01}$ ) et le courant de saturation génération recombinaison ( $I_{02}$ ), respectivement. Le dernier terme de l'équation reflète les pertes par résistance shunt, appelé courant de fuite.

### 3. INFLUENCE DES PARAMETRES SUR LES DEUX MODELES

#### 3.1 Influence des paramètres sur le SEM

##### a- Influence de la résistance série $R_s$

La résistance série  $R_s$  influe légèrement sur la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  qui diminue à partir d'une certaine valeur de  $R_s$ .


 Fig. 4: Influence de  $R_s$  sur le modèle à une exponentielle

$$V = \frac{n k T}{q} \log \left\{ 1 + \frac{I_{ph} - I}{I_0} \right\} - R_s \cdot I \quad (7)$$

##### b- Influence de la résistance shunt $R_{sh}$

L'existence de fissures et de défauts de structure complexe devient le siège de phénomène physique assimilable à une résistance shunt, qui apparaît en parallèle sur le schéma électrique. Cette résistance shunt est liée directement aux processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs. La figure 5 montre que cette influence se traduit par une soustraction du photocourant. Outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire de fuite

$$\text{donné par: } I^* = \frac{V^*}{R_{sh}} \quad (8)$$

En effet,

$$I = I_{ph} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q (V + R_s I)}{n k T} \right] - 1 \right\} \quad (9)$$

**c- Influence du photocourant**

Le photocourant  $I_{ph}$  d'une photopile solaire définit la quantité des paires électron-trou créé traversant la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous ( $L_n$  et  $L_p$ ) respectivement:

$$I_{ph} = q G (L_n + L_p) \tag{10}$$

D'après la figure 6, nous remarquons que  $I_{ph}$  influe surtout sur le courant de court-circuit, et non sur la tension de circuit ouvert.

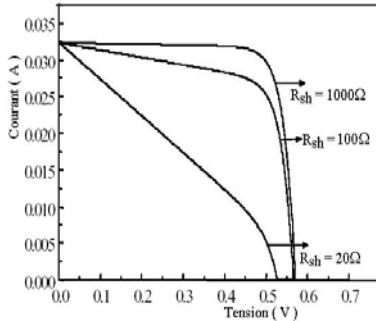


Fig. 5: Influence de  $R_{sh}$  sur le modèle à une exponentielle

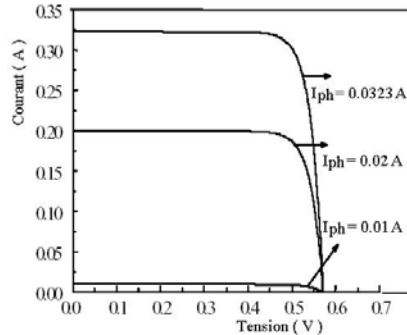


Fig. 6: Influence de  $I_{ph}$  sur le modèle à une exponentielle

Les figures 7-a et 7-b montrent que la tension en circuit ouvert peut être augmentée par une augmentation du facteur de qualité de la diode. Par ailleurs, il est montré que l'augmentation de  $n$  conduit à une dégradation de l'efficacité de la cellule. Le maintien de la valeur de  $I_0$  conduit à des valeurs du rendement  $\eta$  et de la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  bien trop grandes et non réalisables avec le matériau et les structures considérées.

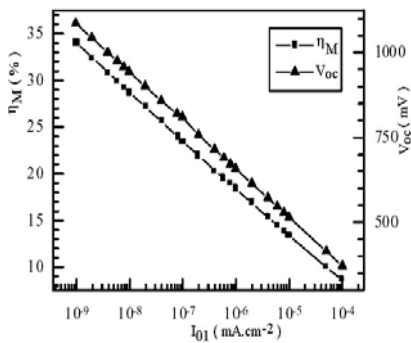


Fig. 7-a: Influence de  $I_{01}$  sur le rendement (SEM) et sur  $V_{co}$

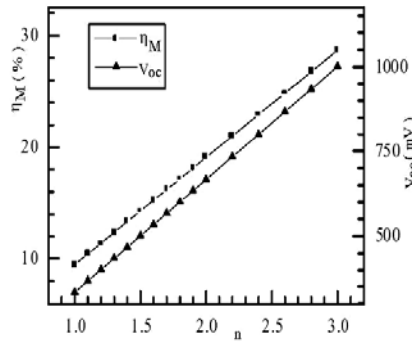


Fig. 7-b: Influence de  $n$  sur le rendement (SEM) et sur  $V_{co}$

**3.2 Influence des paramètres sur le DEM**

**a- Influence des résistances série et parallèle  $R_s$  et  $R_{sh}$**

D'après les figures 8 et 9 respectivement, nous constatons que lorsque  $R_s$  diminue la caractéristique courant - tension augmente, contrairement à la résistance shunt  $R_{sh}$  qui augmente

lorsque la caractéristique courant - tension augmente. Ceci peut être aussi constaté à partir de l'équation (2).

Nous remarquons aussi que les résistances série  $R_s$ , shunt  $R_{sh}$  et le photocourant  $I_{ph}$  influent de la même façon sur la caractéristique courant - tension pour les deux modèles étudiés.

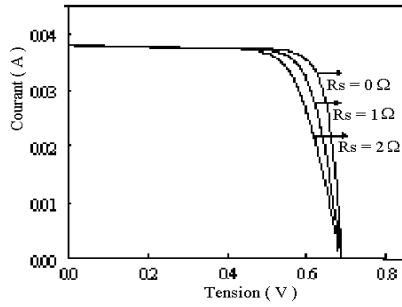


Fig. 8: Influence de  $R_s$  sur le modèle à deux exponentielles

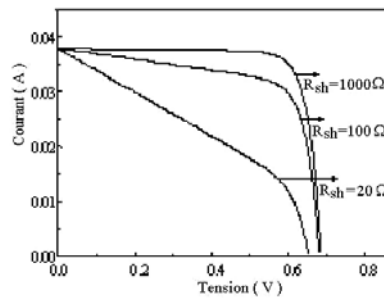


Fig. 9: Influence de  $R_{sh}$  sur le modèle à deux exponentielles

**b- Influence de  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  et  $n$**

D'après les figures 10 à 12, nous remarquons que pour un facteur de qualité  $n$  donné, l'influence du courant de diffusion  $I_{02}$  est prépondérante devant celle du courant de recombinaison  $I_{01}$ . Et pour une grande valeur du facteur de qualité de la diode, de grandes valeurs du rendement  $\eta$  peuvent être obtenues avec une cellule solaire caractérisée par un courant de recombinaison  $I_{01}$  important et un courant de diffusion  $I_{02}$  faible de l'ordre de  $10^{-13}$  A/cm<sup>2</sup>.

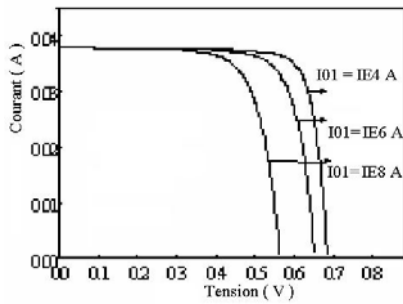


Fig. 10: Influence de  $I_{01}$  sur la caractéristique I-V selon le modèle DEM

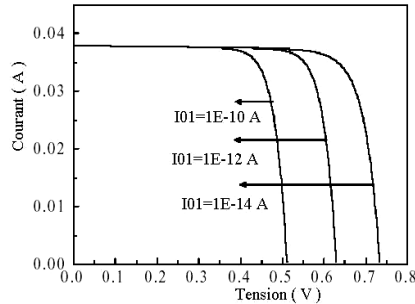


Fig. 11: Influence de  $I_{02}$  sur la caractéristique I-V selon le modèle DEM

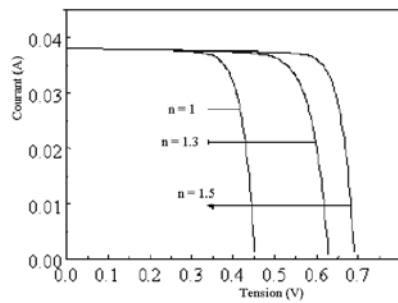


Fig. 12: Influence de  $n$  sur la caractéristique I-V selon le modèle DEM

Nous constatons aussi que pour un courant de recombinaison  $I_{01}=10^{-9} \text{ A.cm}^{-2}$  et un courant de diffusion  $I_{02}=10^{-13} \text{ A.cm}^{-2}$ , le rendement  $\eta$  et la tension  $V_{co}$  atteignent leurs valeurs maximales pour un facteur de qualité supérieur à 1.8 (Fig. 13).

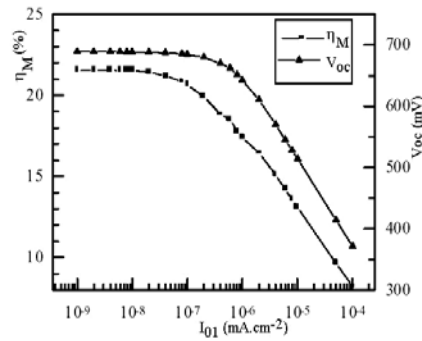


Fig. 13: Influence de  $I_{01}$  sur le rendement et sur la tension  $V_{co}$  (DEM)

Et encore, nous remarquons que pour des faibles valeurs du facteur de qualité  $n$  de la diode, l'influence du courant de recombinaison  $I_{01}$  est très forte. Au delà de  $n = 1.8$ , le phénomène est inversé et le courant de diffusion  $I_{02}$  a une influence importante, tandis que celle du courant de recombinaison  $I_{01}$  est plus faible. Donc lorsque le facteur de qualité  $n$  augmente la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  augmente.

#### 4. CONCLUSION

La conclusion unanime à faire est que le modèle à deux exponentielles de la caractéristique I-V est le modèle le plus adapté pour une bonne compréhension des phénomènes physiques intervenant dans chaque région du dispositif (émetteur, base et région de charge d'espace), ainsi que pour une simulation adéquate du fonctionnement des cellules solaires.

En perspectives à cette étude, une caractérisation généralisée pour tous les dispositifs à semi-conducteurs (diodes, cellules solaires, transistors,...) doit être réalisée.

#### REFERENCES

- [1] F. Therez, 'Les Cellules Photovoltaïques au Silicium et à l'Arséniure de Galium : Modèles de Fonctionnement, Expérimentation et Application aux Générateurs sous Concentration', Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle, LAAS, Toulouse 1984.
- [2] K. Boulahouata, 'Modélisation d'une Cellule Solaire avec Etude Expérimentale', Mémoire de Fin d'Etudes (DES en Physique), Université de Tlemcen, 1998.
- [3] I. Mekkaoui-Alaoui, 'Etude Comparative des Méthodes de Détermination des Paramètres de Caractérisation I(V) des Photopiles Solaires', Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle, Université de Montpellier, 1984.
- [4] P. Ashburn, D.V. Morgan and M.J. Howes, 'A theoretical and Experimental Study of Recombination in Silicon n-p Junction', Solid - State Electronics, Vol. 18, pp. 569 - 577, 1977.
- [5] M. Wolf, G.T Noel and R.J. Stirn, 'Investigation of the Double Exponential in the Current-Voltage Characteristics of Silicon Solar Cells', IEEE Transaction on Electron Devices, ED, Vol. 24, N°4, pp. 419 - 428, 1977.
- [6] R.N. Hall, 'Review Paper: Silicon Photovoltaic Cells', Solid - State Electronics, Vol. 24, N°7, pp. 595 - 616, 1981.
- [7] A. Zerga, B. Benyoucef and J.P. Charles, 'Insufficiencies of the Single Exponential Model and Efficiency of the Double Exponential Model in the Optimization of Solar Cells Efficiency', Active and Passive Electronic Components, Vol. 21, pp. 265 - 278, 1998.