



Modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire sensibilisée par colorant

M. Belarbi[#], A. Benyoucef, B. Benyoucef

*Unité de Recherche Matériaux et Énergies Renouvelables, Département de Physique
Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen, BP:119, Tlemcen 13000, Algérie.

[#]b.moussaab@outlook.fr

abdellah.benyoucef@mail.univ-tlemcen.dz

boumediene.benyoucef@mail.univ-tlemcen.dz

Résumé— Les cellules solaires sensibilisées par colorant (CSSC) ont gagné ces dernières décennies une place importante parmi les technologies photovoltaïques grâce à leur faible coût de mise en œuvre et leur rendement qui devient de plus en plus performant. Les données expérimentales pour ce genre de cellules se sont enrichies et accumulées rapidement, vu l'engouement pour cette nouvelle technologie. Le présent travail consiste à présenter un modèle électrique qui relie les paramètres des matériaux de la cellule aux performances de la cellule. La cellule sera modélisée comme un « milieu effectif pseudo-homogène » se composant d'un semi-conducteur de TiO_2 nano-poreux, de colorant absorbant de lumière et d'électrolyte. Le champ électrique macroscopique, qui résulte d'une distribution déséquilibrée des porteurs de charge sous illumination, sera calculé avec l'équation de Poisson. Les limites avant et arrière de la cellule seront modélisées comme un contact ohmique métal-semi-conducteur et comme une électrode redox via l'équation de courant-tension, respectivement. Les résultats numériques obtenus donnent une idée plus précise du mécanisme de fonctionnement de la CSSC.

Mots clés— CSSC, TiO_2 , Modélisation électrique, Caractéristiques I-V.

I. INTRODUCTION

Les cellules solaires sensibilisées par colorant (CSSC) ont gagné un intérêt raisonnable au cours de ces dernières années dans la recherche ainsi que dans l'industrie [1]. Leur rendement actuel est de plus de 10% avec des coûts de production nettement inférieurs comparés aux cellules solaires classiques à jonction P-N. Cependant, non seulement les problèmes technologiques (stabilité à long terme) doivent être résolus, mais aussi la physique des dispositifs de ce type de cellules n'est pas encore assurée en détail. Ainsi il y a donc un besoin pour une modélisation appropriée pour plus de développement et d'optimisation.

Le présent travail, traite essentiellement la modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire sensibilisée par colorant, cette modélisation se fait grâce à la résolution des équations qui régissent le comportement physique et chimique des porteurs de charges à l'intérieur de la cellule.

Le modèle électrique qui sera présenté permettra de connaître les propriétés internes de la cellule tel que les densités de porteurs de charge, le champ électrique macroscopique dans la cellule, la densité de courant ainsi que l'obtention de la caractéristique courant-tension. Par le biais de ces calculs, une connaissance plus approfondie des mécanismes de fonctionnement pourra être obtenue.

II. PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE MODÉLISATION D'UNE CSSC

A. Principe de fonctionnement d'une CSSC

L'absorption de la lumière par le colorant ("Fig. 1,") est suivie d'une injection d'électrons dans la bande de conduction du semi-conducteur, les électrons injectés sont diffusés à l'électrode avant, ce qui donne naissance à un courant externe.

Pour compléter le circuit, le colorant doit être réduit à nouveau, ce résultat est obtenu par le transfert d'électrons à partir des espèces redox en solution qui à son tour va être réduit à la contre-électrode.

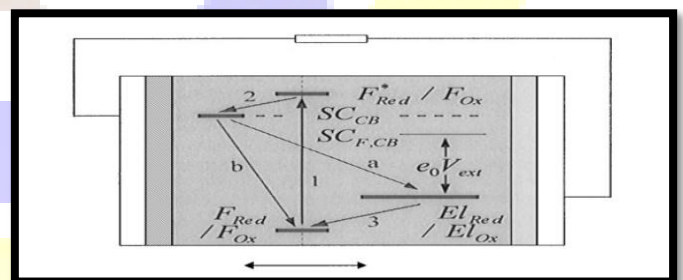


Fig. 1. Principe d'une cellule solaire sensibilisée par colorant

B. Description du modèle

La cellule est modélisée comme un milieu effectif pseudo-homogène d'épaisseur d . Le milieu pseudo-homogène est constitué d'un semi-conducteur nanoporeux TiO_2 , d'un colorant et de l'électrolyte redox, qui sont entremêlés [2]. Les particules électro-actives (les électrons e^- injectés dans la couche nanoporeuse TiO_2 après absorption de la lumière par le colorant, la réduction et l'oxydation de l'électrolyte redox El_{Red} et El_{Ox} , et le cation chargé positivement Kat^+)



sont impliquées dans le processus de déplacements selon différents coefficients effectifs de transport. Les équations de la continuité de transport sont appliquées à tous les porteurs de charge mobiles.

$$\frac{1}{e_0} \frac{dj_c}{dx} = 0 \quad (7)$$

B.1 Equations de continuité

L'équation de continuité est donnée par :

$$\pm \frac{1}{e_0} \frac{dj}{dx} = G(x) - R(x) \quad (1)$$

Avec :

- j est la densité de courant électrique pour les quatre particules électro-actives.
- Le signe - correspond à des particules chargées négativement e^- , I^- ,
- Le signe + pour les cations positifs.
- G est le taux de génération de la particule concernée tel que pour les électrons il est donné par la relation suivante :

$$G_e(x) = \int_{800 \text{ nm}}^{300 \text{ nm}} \alpha(\lambda) \phi(\lambda) e^{\alpha(\lambda)x} d\lambda \quad (2)$$

Où :

- $\alpha(\lambda)$ représente le coefficient d'absorption spectrale [3].
- $\phi(\lambda)$ représente l'irradiance solaire [AM1.5 spectre solaire global, diminué par le facteur de réflexion et d'absorption de la vitre avant TCO (oxydes conducteurs transparents)].
- R est le taux de relaxation donné par la relation suivante :

$$R_e = \frac{n_e - n_{eq}}{\tau_e} \quad (3)$$

Tel que :

- n_e est la densité des électrons
- n_{eq} est la densité à l'état d'équilibre
- τ_e représente la durée de vie moyenne des électrons

On a :

$$\frac{1}{e_0} \frac{dj_e}{dx} = \frac{n_e(x) - n_{eq}(x)}{\tau_e} - \int_{800 \text{ nm}}^{300 \text{ nm}} \alpha(\lambda) \phi(\lambda) e^{\alpha(\lambda)x} d\lambda \quad (4)$$

$$\frac{1}{e_0} \frac{dj_{I^-}}{dx} = \frac{3}{2} G_e - \frac{3}{2} R_e = -\frac{3}{2e_0} \frac{dj_e}{dx} \quad (5)$$

$$\frac{1}{e_0} \frac{dj_{I_3^-}}{dx} = \frac{1}{2} R_e - \frac{1}{2} G_e = -\frac{1}{2e_0} \frac{dj_e}{dx} \quad (6)$$

B.2 Equations de transport

Les équations de transport pour les quatre particules électro-actives :

$$\frac{1}{e_0} j_e = D_e \frac{dn_e}{dx} + \mu_e n_e E \quad (8)$$

$$\frac{1}{e_0} j_{I^-} = D_{I^-} \frac{dn_{I^-}}{dx} + \mu_{I^-} n_{I^-} E \quad (9)$$

$$\frac{1}{e_0} j_{I_3^-} = D_{I_3^-} \frac{dn_{I_3^-}}{dx} + \mu_{I_3^-} n_{I_3^-} E \quad (10)$$

$$\frac{1}{e_0} j_c = -D_c \frac{dn_c}{dx} + \mu_c n_c E \quad (11)$$

Avec :

- D est la constante de diffusion (m^2/s).
- μ représente la mobilité (m^2/Vs).
- T est la température (K).

B.3 Equation de Poisson

Le champ électrique E est lié à la densité de porteurs de charges par l'équation de Poisson :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{e_0}{\epsilon \epsilon_0} [n_c(x) - n_e(x) - n_{I^-}(x) - n_{I_3^-}(x)] \quad (12)$$

Avec :

- e_0 représente la charge élémentaire.
- ϵ représente la constante diélectrique.
- ϵ_0 est la permittivité.
- x est la position dans le milieu effectif.
- n(x) est la densité pour les différentes particules électro-actives selon x.

B.4 Conditions aux limites

Les 4 équations de continuité, 4 équations de transport, et l'équation de Poisson forment un système couplé d'équations différentielles non linéaires, les conditions aux limites nécessaires sont décrites comme suit :

$$\int_0^d n_c(x) dx = \int_0^d n_c^0 dx = n_c^0 d \quad (13)$$

$$\int_0^d \left(n_{I_3^-} + \frac{1}{3} n_{I^-} \right) dx = \left(n_{I_3^-}^0 + \frac{1}{3} n_{I^-}^0 \right) d \quad (14)$$



III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

$$E(x=0) = 0 \quad (15)$$

$$j_{I^-}(0) = 0 \quad (16)$$

$$j_{I_3^-}(0) = 0 \quad (17)$$

$$j_e(d) = 0 \quad (18)$$

$$j(d) = j_0 \left\{ \frac{n_{I^-}(d)}{n_{I^-}^{CO}(d)} e^{(1-\beta)\frac{e_0}{kT}U_{pt}} - \frac{n_{I_{eq}^-}(d)}{n_{I_{eq}^-}^{CO}(d)} e^{-\beta\frac{e_0}{kT}U_{pt}} \right\} \quad (19)$$

$$j_g = j_0 \left\{ \sqrt{\frac{n_{I_3^-}(d)n_{I_3^-}^{CO}(d)}{n_{I_3^-}^{CO}(d)n_{I_3^-}(d)}}} e^{(1-\beta)\frac{e_0}{kT}U_{pt}} - \frac{n_{I_{eq}^-}(d)}{n_{I_{eq}^-}^{CO}(d)} e^{-\beta\frac{e_0}{kT}U_{pt}} \right\} \quad (20)$$

Avec:

- U_{pt} est la surtension.
- $n_{I^-}^{CO}$ est la densité de l'iodure en circuit ouvert.
- β représente le paramètre de symétrie.
- $n_{I_{eq}^-}(d)$ est la densité à l'équilibre à $x = d$.
- $n_{I_3^-}^{CO}(d)$ est la densité du tri-iodure en circuit ouvert.

B.5 Circuit équivalent

Le circuit équivalent utilisé ("Fig. 2,") comporte une R_{TCO} qui est la résistance série en raison des couches TCO (oxydes conducteurs transparents). Une R_p (résistance parallèle) qui résume les résistances shunt dues aux fuites internes dans la cellule, et la résistance extérieure R_{ext} qui représente le paramètre de charges.

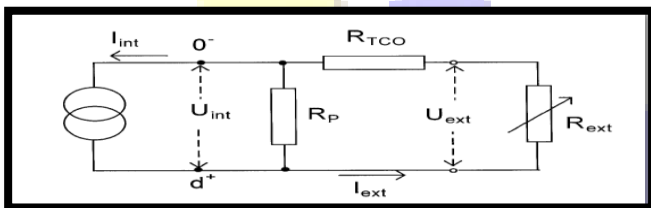


Fig. 2. Circuit équivalent utilisé pour modéliser une CSSC

Le courant interne I_{int} est déterminé en multipliant la densité de courant à $x=0$ par la surface de la cellule A

Le courant externe I_{ext} est obtenu à partir de I_{int} , selon les lois de Kirchhoff:

$$I_{ext} = \left(\frac{R_p}{R_{ext} + R_{TCO} + R_p} \right) I_{int} \quad (21)$$

En faisant varier R_{ext} , la caractéristique courant-tension est obtenue.

A. Méthode de résolution

En utilisant les équations et conditions aux limites suivantes (4, 8-11, 12, 13, 14, 15, 18) on aura un système complexe de 6 équations différentielles non-linéaires.

La résolution de ce système est obtenue en implantant la méthode de Newton-Raphson en Matlab.

L'ensemble d'équations différentielles est remplacé par des équations à différences finies sur un maillage approprié de points qui s'étend sur l'intervalle $[0, d]$. Pour obtenir la caractéristique courant-tension, le programme est lancé dans la condition de circuit ouvert avec les valeurs d'équilibre, ensuite la résistance extérieure est variée.

B. Résultats

B.1 Caractéristique I-V

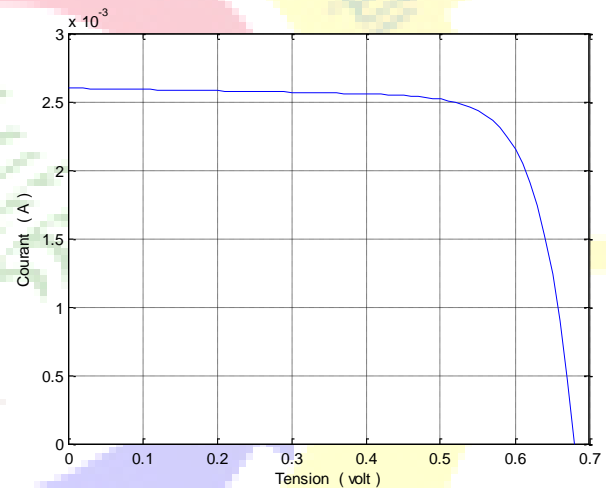


Fig. 3 Caractéristique I-V obtenue à partir de la modélisation d'une CSSC

La caractéristique (I-V) ("Fig. 2,") nous montre que la cellule solaire est une source de courant constante pour des faibles valeurs de la tension avec un courant approximativement égal au courant de court-circuit I_{cc} . Avec l'augmentation de la tension, le courant commence à diminuer exponentiellement jusqu'à la valeur zéro où la tension est égale à la tension de circuit ouvert V_{co} .

B.2 Champ électrique

Le champ électrique interne macroscopique est relativement faible dans les conditions normales (CO). La chute de potentiel correspondant est inférieure à 1 mV ("Fig. 4,"). Cela confirme que le transport de charge se produit principalement



par diffusion [4]. $E(d)$ doit être égal à zéro pour des raisons de neutralité de charge. Cela se traduit par une forte baisse du champ électrique au voisinage de $x = d$ pour une cellule en fonctionnement.

ce qui nous donne une tension plus élevée. Ainsi des valeurs moins élevées de k_e signifie moins de recombinaison donc des rendements plus élevés.

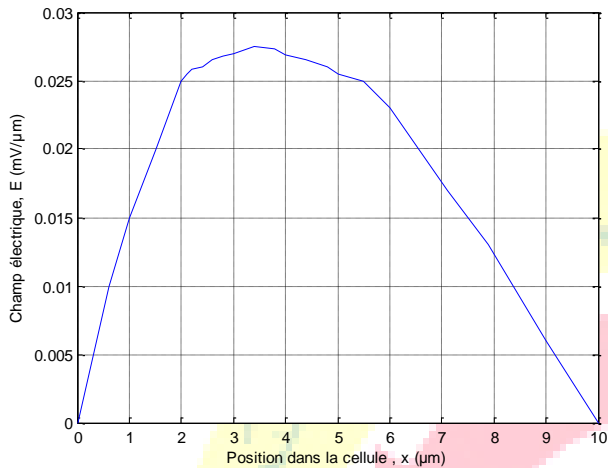


Fig. 4 Champ électrique en fonction de la position x .

B.3 Influence de la constante de relaxation k_e sur la caractéristique $I-V$

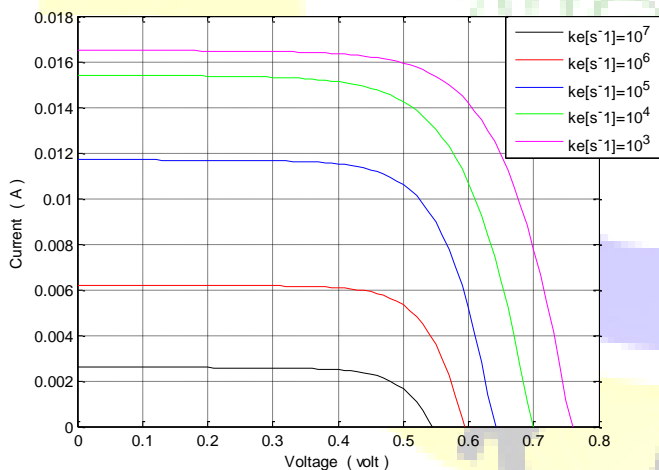


Fig. 5 Caractéristique $I-V$ pour différentes valeurs de constante de relaxation $k_e [s^{-1}]$

La constante de relaxation des électrons k_e détermine le courant d'obscurité et influe donc sur la tension en circuit ouvert, c'est à dire plus la constante de relaxation des électrons est élevée, plus la concentration en électrons dans la bande de conduction de TiO_2 est élevée. Une concentration plus élevée d'électrons signifie un haut niveau de quasi-Fermi

B.4 Influence de la R_{TCO} sur la caractéristique $I-V$

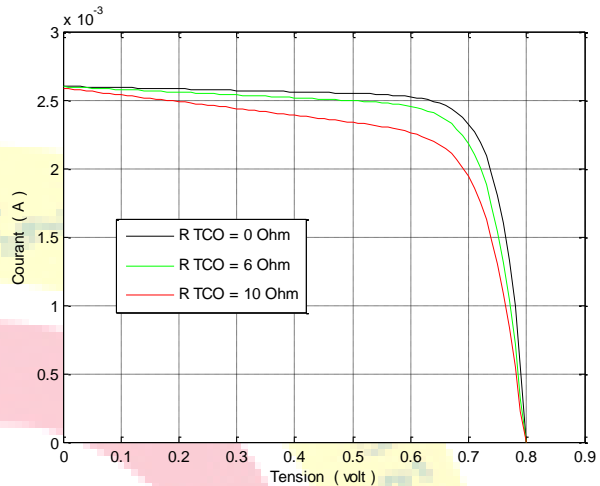


Fig. 6 Influence de la R_{TCO} sur la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire sensibilisée par colorant

La résistance R_{TCO} a une forte influence sur le facteur de remplissage de la courbe $I-V$ (Fig.6).

Lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit (I_{cc}), ce qui va limiter le rendement de conversion.

IV. CONCLUSIONS

La modélisation d'une cellule solaire est l'outil performant qui nous permettra par simulation, de lier les caractéristiques photovoltaïques de cette cellule avec les propriétés internes du matériau et la technologie de fabrication en vue d'améliorer les performances de la cellule.

La compréhension des mécanismes physiques et chimiques se déroulant à l'intérieur des CSSC est un sujet d'actualité qui n'a pas livré tous ses secrets.

Un modèle simplifié électrique de la cellule solaire sensibilisée par colorant a été présenté, il nous permet d'obtenir la caractéristique courant-tension de la cellule à partir de ses paramètres intrinsèques.

La modélisation électrique des CSSC est d'une importance cruciale pour avancer dans la compréhension des mécanismes internes qui régissent le comportement de la cellule.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



REFERENCES

- [1] Physique des semi-conducteurs, école polytechnique universitaire de Marseille.
- [2] G. Smestad, C. Bignozzi, R. Argazzi Solar Energy Mater. 32 (1994), p. 259
- [3] J. Ferber, J. Luther, Proceedings International Symposium on Opt. Mat. Techn. for En. Eff. and Sol. En. Conv., L. Klehr (Ed.), DGS-Sonnenenvgie Volags-GmbH, münchen 1997, p. 288-293, to appear also in a special issue of Solar Energy Mater., 1998.
- [4] N. Papageorgiou, M. Grätzel, P. Infelta, Solar Energy Mater. (1996) 1481.
- [5] Grätzel, M., 1991. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye sensitized colloidal TiO₂ films. Nature 353, 737-739.
- [6] G. Smestad, C. Bignozzi, R. Argazzi Solar Energy Mater. 32 (1994), p. 259
- [7] L. Andrade, J. M. Sousa, H. Aguilar Ribeiro, A. Mendes Phenomenological Modeling of Dye-sensitized Solar Cells under Transient Conditions Solar Energy, Vol.85 n° 5, pp.781-793, 2011,
- [8] Feliciani, C.; Di Muzio, M.; Mohammad Pour, S.; Tiziana; Amerio, P.; Toto, P.; Coscione, G.; Proietto, G.; Amerio, P.; Ferber, J.; Stangl, R.; Luther, J. An electrical model of the dye-sensitized solar cell Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 53, Issues 1-2, 12 May 1998, Pages 29-54. M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [9] N. Papageorgiou, W.F. Maier, M. Grätzel, J. Electrochem. Soc. 144 (3) (1997).
- [10] N. Papageorgiou, Y. Athanassov, M. Armand, P. Bonhote, H. Pettersson, A. Azam, M. Grätzel J. Electrochem. Soc., 143 (1996), p. 3099

