

Modélisation des propriétés électriques et caractérisation des panneaux photovoltaïques

Tarik Mrabti¹, Mostafa El Ouariachi¹, Belkassem Tidhaf³,
Kamal Kassmi¹, Elhassane Chadli² et Khalil Kassmi^{1*}

¹ Laboratoire 'LEPAS', Département de Physique
Faculté des Sciences, Université Mohamed Premier, Oujda, Maroc

² Laboratoire 'LES', Département de Physique
Faculté des Sciences, Université Mohamed Premier, Oujda, Maroc

³ Ecole Nationale des Sciences Appliquées, 'ENSA', Université Mohamed Premier, Oujda, Maroc

(reçu le 15 Janvier 2009 – accepté le 21 Mars 2009)

Résumé - Dans ce papier, nous analysons la modélisation dans le logiciel 'Pspice' et la caractérisation électrique des panneaux photovoltaïques (PV) actuellement commercialisés. En tenant compte des caractéristiques électriques fournies par le fournisseur, nous déduisons, à partir du simulateur 'Pspice', les grandeurs électriques optimales du panneau PV (courant, tension et puissance) en fonction des conditions météorologiques (éclairage, température,...). Dans le cas du panneau SP75, nous avons déduit, à partir de l'analyse des résultats de sa caractérisation électrique que ses grandeurs électriques optimales sont inférieures de 15 % par rapport à celles déduites par les caractéristiques électriques fournies par le fabricant. Nous avons montré que les différents paramètres électriques du panneau PV nécessitent un réajustement qui est alors nécessaire pour optimiser le fonctionnement des panneaux PV dans un système PV muni d'une commande MPPT.

Abstract - In this paper we have analyzed the modeling in Pspice simulator and the electrical characterization of photovoltaic (PV) panels currently commercialized. By taking account the electrical characteristics provided by the manufacturer, we have deduced from Pspice simulator, the optimal electrical quantities of the PV panel (current, voltage and power) as a function of meteorological condition (solar energy, temperature,...). In the case of the panel SP75, we have deduced from the analysis of the results of its electrical characterization that its optimal electrical quantities are lower by 15 % as compared to those deduced by electrical characteristics provided by the manufacturer. We have showed that the different electrical parameters of the PV panel necessitate a readjustment that is necessary to optimize the functioning of PV panel in a PV system provided by some MPPT command.

Mots clés: Energie photovoltaïque - Panneaux photovoltaïques - Caractérisation électrique - Modélisation fine des caractéristiques électriques - Simulateur Pspice - Grandeurs électriques optimales.

1. INTRODUCTION

Actuellement, les sources d'énergie et l'augmentation néfaste de l'effet de serre sont des problèmes d'actualité. Ils ont poussé les scientifiques à avoir recours à de nouvelles énergies renouvelables, non polluantes. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie photovoltaïque (PV) dont l'énergie électrique est produite par des panneaux

* khkassmi@yahoo.fr

photovoltaïques [1-4]. Le problème majeur de la production d'énergie électrique par cette technique est le fonctionnement optimal des panneaux (modules) PV.

La modélisation et la caractérisation électriques des panneaux actuellement commercialisés sont nécessaires afin d'optimiser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques [4-7] utilisant ces panneaux PV. Ceci peut réduire d'une manière considérable le coût de l'installation PV et augmenter le rendement des générateurs PV.

Dans cet article, nous analysons dans le logiciel 'Pspice', le fonctionnement électrique des modules photovoltaïques, SP75 [8] en fonction des conditions météorologiques (éclairage, ..). En se basant sur les résultats obtenus, nous proposons une méthodologie qui permet de suivre le fonctionnement optimal des générateurs PV au cours de leur exploitation dans une installation photovoltaïque [1-3, 9-11]. Ensuite, nous caractérisons et modélisons les propriétés électriques des panneaux PV SP75 installés au laboratoire.

2. MODELISATION ET CARACTERISATION ELECTRIQUES DES PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES EN TENANT COMPTE DES CARACTERISTIQUES DU FOURNISSEUR

2.1 Symbolisation du module PV (SP75)

Nous avons symbolisé dans Pspice le schéma électrique du générateur PV 'SP75' qui est formé de 36 cellules en série (Fig. 1) [11].

Comme le montre la figure 1, une cellule PV est formée par le courant du court circuit (I_{cc}), la diode (D), les résistances de fuite (R_{sh}) et série (R_s). A partir de la comparaison des résultats de simulations et ceux fournis par le fabricant, nous avons déduit les différents paramètres de la diode (Fig. 2) et ceux de la cellule PV:

- la résistance série: $R_s = 10 \text{ m}\Omega$,
- la résistance shunt: $R_{sh} = 1 \text{ M}\Omega$,
- la dépendance du courant de court-circuit (I_{cc}) avec l'éclairement ($L_e \text{ (W/m}^2\text{)}$):

$$I_{cc} = 0.005 \times L_e - 0.013 \quad (1)$$

- Caractéristiques de la diode: courant de saturation = 10^{-10} A ,...

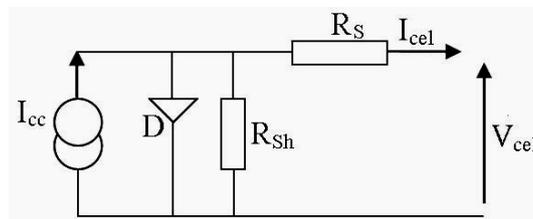
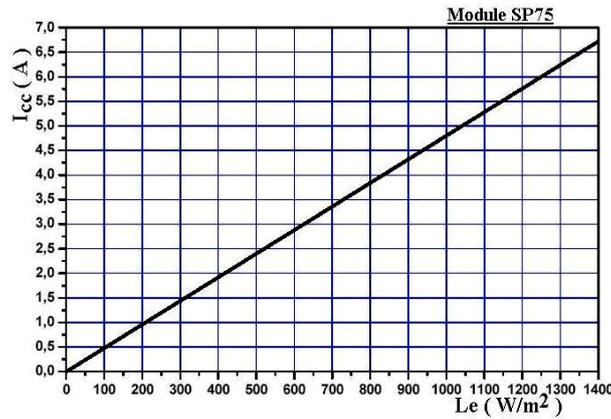


Fig. 1: Schéma électrique d'une cellule Photovoltaïque [11]

Sur la figure 2, est représentée l'évolution typique du courant I_{cc} {Eq. (1)} en fonction de l'éclairement. Cette caractéristique montre que nous pouvons déduire l'intensité de l'éclairement par une simple mesure du courant de court-circuit (I_{cc}).

Fig. 2: Variation du courant de court-circuit I_{cc} avec l'éclairement

2.2 Simulation des propriétés électriques du panneau SP75

Nous avons implanté le panneau SP75 complet par son schéma équivalent dans Pspice (Fig. 1), puis nous avons extrait les différentes caractéristiques courant - tension et puissance - tension en fonction de l'éclairement et de la charge (résistance).

Sur les figures 3 et 4, sont représentées les caractéristiques typiques courant - tension et puissance - tension en fonction de l'éclairement. Il apparaît que:

- le courant du court-circuit (courant lorsque la tension est nulle) augmente avec l'intensité de l'éclairement,
- la tension du circuit ouvert (tension lorsque le courant est nul) augmente légèrement avec l'éclairement,
- le panneau PV fournit une puissance maximale (P_{max}) qui est très sensible à l'éclairement. Ce point de puissance maximale (PPM) correspond à une tension V_{opt} , un courant I_{opt} et donc une résistance optimale R_{opt} ($R_{opt} = V_{opt} / I_{opt}$) du module et du générateur PV.

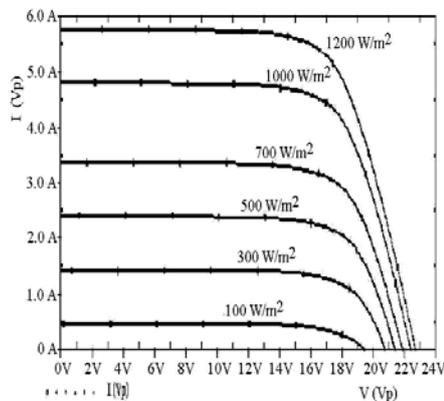


Fig. 3: Simulation des caractéristiques courant - tension du module en fonction de l'éclairement

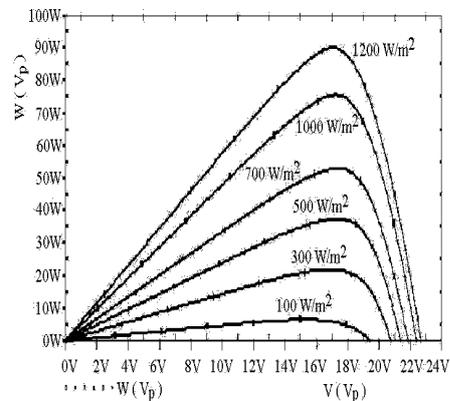


Fig. 4: Simulation des caractéristiques puissance - tension du module en fonction de l'éclairement

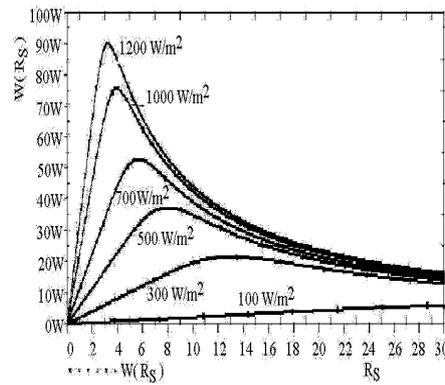


Fig. 5: Simulation de l'influence de la charge sur la puissance fournie par le module en fonction de l'éclairement

Sur la figure 5, nous avons représenté l'influence de la charge et de l'éclairement sur la puissance fournie par le panneau. Il apparaît que le panneau PV est très sensible à cette résistance, et la puissance fournie par le panneau est maximale pour une résistance optimale R_{opt} , dépendant de l'éclairement.

La comparaison de l'ensemble des résultats obtenus dans Pspice à ceux fournis par le constructeur montre un accord très acceptable. Donc, le module SP75 peut être symbolisé par l'association de 36 cellules PV de la figure 1, en tenant compte des paramètres de la figure 2 et ceux fixés dans le paragraphe suivant.

2.3 Simulation des conditions optimales du panneau SP75

A partir, des caractéristiques 3 et 4, nous avons tracé sur les figures 6 à 9, les variations des caractéristiques optimales (V_{opt} , I_{opt} , R_{opt} et P_{max}) du panneau SP 75 avec l'éclairement. Lorsque l'éclairement varie de 300 à 1200 W/m^2 , la puissance maximale P_{max} (résistance R_{opt}) varie de 15 W (12Ω) à 85 W (3Ω). Aussi, lorsque l'éclairement est supérieur à 400 W/m^2 , la tension optimale varie très peu avec l'éclairement et elle est de l'ordre de 17.2 V.

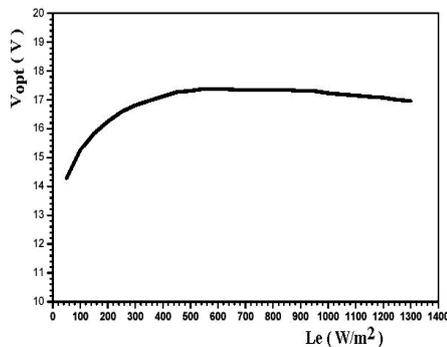


Fig. 6: Simulation de la tension du module en fonction de l'éclairement

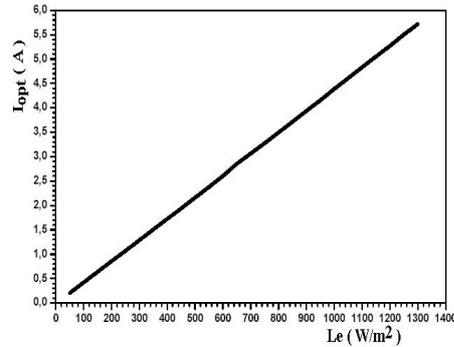


Fig. 7: Simulation du courant du module en fonction de l'éclairement

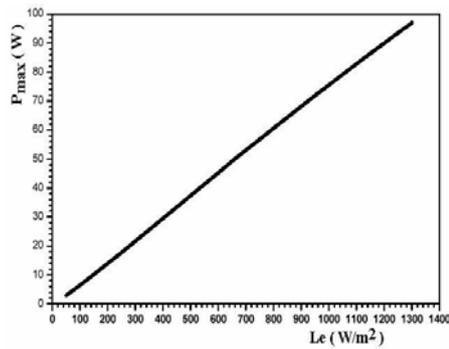


Fig. 8: Simulation de la puissance du module en fonction de l'éclairement

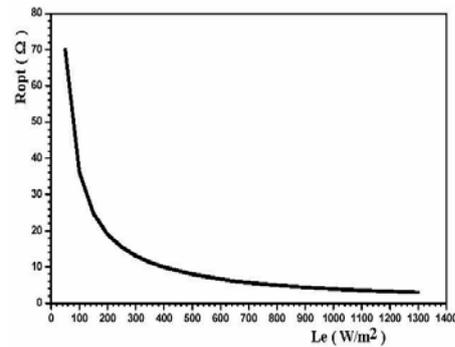


Fig. 9: Simulation de la résistance du module en fonction de l'éclairement

A partir des caractéristiques électriques des figures 6 à 9, nous pouvons déduire les caractéristiques correspondantes à plusieurs modules en série ou en parallèle.

Les résultats obtenus dans cette partie, montrent que pour une application PV, le fonctionnement du générateur PV à sa puissance maximale est nécessaire afin d'extraire, pour un éclairement donné, le maximum de puissance du générateur PV.

Pour un générateur PV SP 75, aux cours de son fonctionnement, nous pouvons déduire ses grandeurs électriques optimales (V_{opt} , I_{opt} , R_{opt} et P_{max}) à partir de la mesure du courant de court-circuit, de la relation (1) et la symbolisation du panneau PV dans Pspice.

Sur la figure 10, nous avons représenté les variations du courant optimal I_{opt} avec le courant du court-circuit I_{cc} . Il apparaît que le courant I_{opt} varie linéairement avec le courant I_{cc} suivant la relation:

$$I_{opt} = -0.02466 + 0.91888 \times I_{cc} \quad (2)$$

Cette dernière relation montre qu'on peut déduire le fonctionnement optimal d'un générateur PV en mesurant le courant du court-circuit.

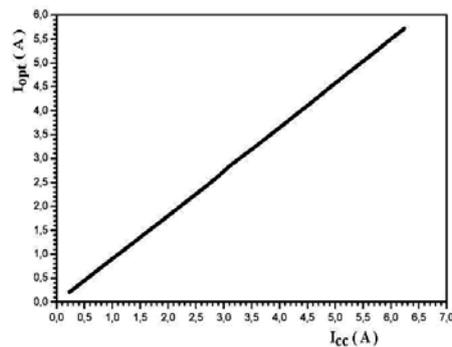


Fig. 10: Simulation de la variation du courant optimal avec le courant I_{cc}

2.4 Caractérisations électriques des modules SP75

2.4.1 Procédures expérimentales

Les panneaux (ou modules) PV SP75 qui font l'objet de notre étude expérimentale, sont présentés sur la figure 11. Un panneau [8] est constitué de 36 cellules monocristallin et peut fournir dans les conditions standard de test (éclairage de 1000 W/m^2 , température de 25°C , spectre AM1.5) une puissance crête de 75 W et un courant de 4.41 A sous une tension 17 V . Ces panneaux et les systèmes PV conçus sont caractérisés à partir du banc de mesures mis en place au laboratoire (Fig. 12).



Fig. 11: Panneaux photovoltaïques SP75 installés à la Faculté des Sciences d'Oujda



Fig. 12: Banc de mesure pour caractériser panneaux et systèmes PV

2.4.2 Caractéristiques électriques d'un module SP75

Nous avons caractérisé les panneaux SP 75 de la figure 11, au cours d'une journée où l'intensité de l'éclairage est de l'ordre de 701 W/m^2 et la température de l'ordre de 25°C .

Sur la figure 13, nous avons représenté les caractéristiques typiques courant - tension et puissance - tension obtenues. Sur ces mêmes figures, nous représentons les caractéristiques simulées dans Pspice en tenant compte des paramètres obtenus à partir des caractéristiques électriques fournies par le fournisseur. La comparaison entre les deux caractéristiques montre un très bon accord pour les tensions inférieures à 16 V et un désaccord pour les tensions supérieures à 16 V . Ce désaccord est dû essentiel à l'augmentation du courant de la diode de la cellule PV de la figure 1.

Ceci se traduit par la dégradation de la puissance électrique et notamment la puissance maximale (point PPM). Nous pensons que les panneaux installés au Laboratoire ont subi des dégradations au niveau de cette diode.

Pour tenir compte du désaccord entre l'expérience et la simulation (Fig. 13), nous avons réajusté les paramètres électriques de la diode de la cellule PV, en particulier le courant de saturation, et simulé les caractéristiques courant - tension, puissance - tension et puissance - résistance. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 14 à 15. Il apparaît d'une part un très bon accord entre l'expérience et la simulation, et d'autre part que la puissance maximale fournie par le générateur est de l'ordre de 48 W et la résistance optimale de l'ordre de 5Ω .

L'ensemble des résultats obtenus dans cette partie montrent que les caractéristiques électriques des panneaux commercialisés sont différentes à celles fournies par le fournisseur. Selon les résultats de la modélisation des caractéristiques électriques de ces panneaux, ces différences sont dues aux fuites de la diode dans la cellule PV (Fig. 1).

Dans les installations PV muni des commandes MPPT analogique ou numériques [1-7, 9-10], la connaissance des grandeurs électriques optimales des panneaux est indispensable afin de poursuivre le point de puissance maximale (PPM) en fonction des conditions météorologiques (éclairagements, températures,...) et de la charge.

Dans la partie suivante, nous analysons dans Pspice le fonctionnement optimal des panneaux SP75 en tenant compte du réajustement des paramètres obtenus à partir des caractéristiques électriques fournis par le fournisseur, et de la symbolisation des panneaux dans Pspice.

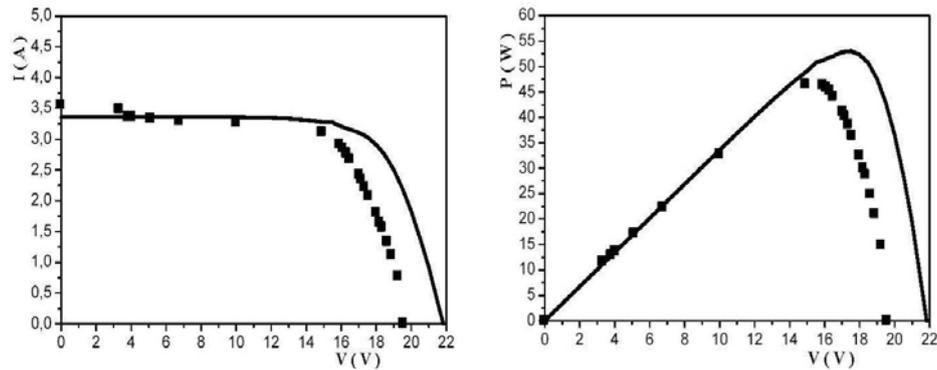


Fig. 13: Caractéristiques courant - tension et puissance - tension expérimentales (■) et simulées dans Pspice (—) en tenant compte des paramètres obtenus à partir des caractéristiques électriques du fournisseur
 $T : 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $Le = 701 \text{ W/m}^2$

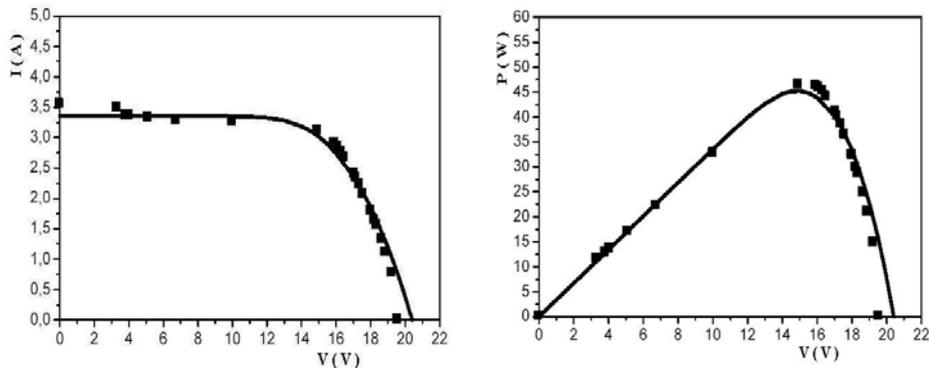


Fig. 14: Caractéristiques courant - tension et puissances - tensions expérimentales (■) et simulées dans Pspice (—) en tenant compte du réajustement des paramètres obtenus à partir des caractéristiques électriques du fournisseur
 $T : 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $Le = 701 \text{ W/m}^2$

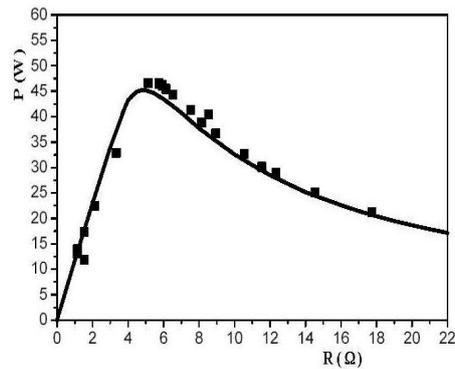


Fig. 15: Caractéristiques puissance - résistance expérimentales (■) et simulées dans Pspice (—) en tenant compte du réajustement des paramètres obtenus à partir des caractéristiques électriques fournies par le fournisseur
T: 25 °C, $Le = 701 \text{ W/m}^2$

2.4.3 Caractéristiques électriques du panneau SP75 après réajustement des paramètres de la cellule photovoltaïque

Dans le paragraphe précédent, nous avons conclu qu'un réajustement des paramètres électriques déduits à partir des caractéristiques électriques fournies par le fournisseur s'avère nécessaire pour modéliser les caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques. En tenant compte de ce réajustement des paramètres, nous avons simulé les caractéristiques optimales (V_{opt} , I_{opt} , R_{opt} et P_{max}) du module SP75 en fonction de l'éclairement.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 16. Il apparaît une dégradation de la tension optimale et de la puissance maximale. Pour évaluer ces dégradations par rapport aux résultats obtenus en tenant compte des paramètres obtenus à partir des caractéristiques fournies par le fournisseur, nous avons tracé sur la figure 17 la variation relative de chaque paramètre optimal (V_{opt} , I_{opt} , R_{opt} et P_{max}) en fonction de l'éclairement.

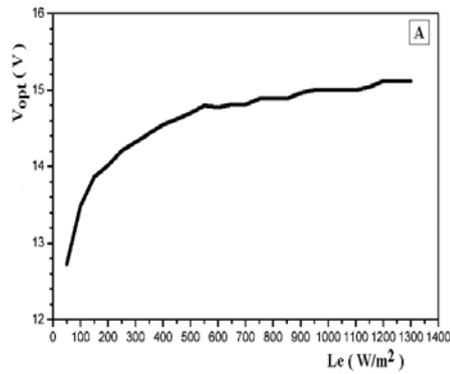
Il apparaît qu'en tenant compte des paramètres réajustés:

- la tension V_{opt} diminue de 13 % à 15 %, lorsque l'éclairement varie de 100 W/m^2 à 1300 W/m^2 .
- le courant I_{opt} varie très peu avec l'éclairement. Lorsque l'éclairement varie de 100 W/m^2 à 1300 W/m^2 , la variation est inférieure à 2 %.
- la puissance P_{max} diminue de 13 % à 15 % lorsque l'éclairement varie de 100 W/m^2 à 1300 W/m^2 . Lorsque l'éclairement est supérieur à 600 W/m^2 , la diminution dépend très peu de l'éclairement et elle est de l'ordre de 15 %.
- la résistance R_{opt} diminue de 17 % à 7 % lorsque l'éclairement varie de 100 W/m^2 à 1300 W/m^2 . Lorsque l'éclairement est de l'ordre de 1000 W/m^2 , la diminution est de l'ordre de 10 %.

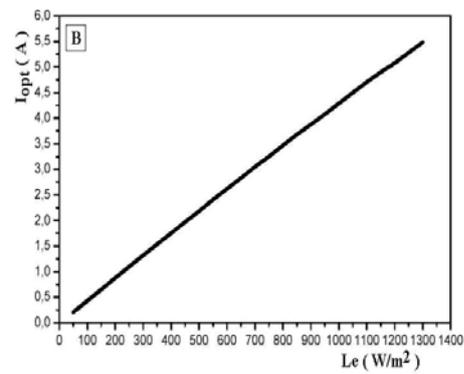
Par ailleurs, nous avons tracé sur la figure 18, l'évolution du courant optimal (I_{opt}) en fonction du courant du court-circuit (I_{cc}). Il apparaît un comportement linéaire suivant la relation:

$$I_{opt} = 0.06214 + 0.87862 \times I_{cc} \quad (3)$$

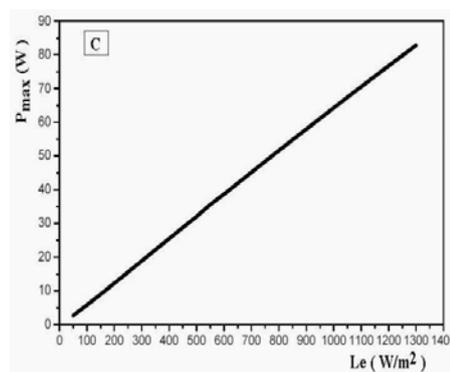
Nous pouvons ainsi conclure que cette équation est pratiquement similaire à celle obtenue en tenant compte des paramètres obtenus à partir des caractéristiques électriques fournies par le fournisseur {Eq (1)}.



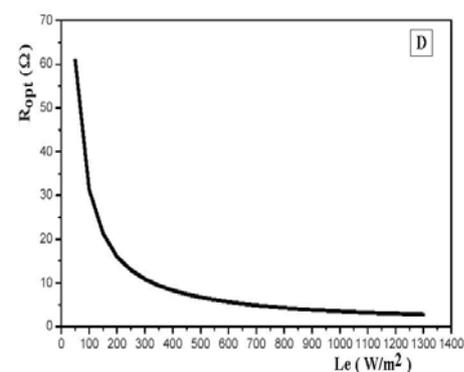
a- Tension optimale



b- Courant optimal



c- Puissance optimale



d- Résistance optimale

Fig. 16: Simulation de l'influence de l'éclairement sur les grandeurs électriques du panneau PV SP75 en tenant compte du réajustement des paramètres électriques déduits à partir des caractéristiques électriques fournies par le fournisseur

4. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons analysé dans le logiciel Pspice et caractérisé le fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques SP75. Les résultats obtenus montrent que la symbolisation du générateur PV dans Pspice permet de déterminer le fonctionnement électrique optimal du générateur PV en fonction de la charge et des conditions radiométriques (éclairagements,...).

Aussi, la mesure du courant de court-circuit du générateur PV permet de déduire, à un instant donné, l'intensité de l'éclairagement et les caractéristiques optimales du générateur PV, tels que: courant, tension et puissance.

A partir de la caractérisation électrique des panneaux SP75, nous avons montré que les caractéristiques électriques obtenues ne peuvent être modélisées par les paramètres électriques déduits à partir des caractéristiques électriques fournies par le fournisseur.

En tenant compte du réajustement de ces paramètres, nous avons constaté une dégradation des performances électriques optimales des panneaux. Cette dégradation peut atteindre environ 15 %.

Remerciements

Ce travail entre dans le cadre:

- du Programme Thématique d'Appui à la Recherche Scientifique (PROTARS III), N°D43/06.
- de la Coopération Marocco - Belge, 'Commission Universitaire Institutionnelle', CUI – Oujda 2008 - 2012, (Activité Eau et Environnement / Sous - Activité Energies Renouvelables
- du Programme Global de Recherche de l'Université Mohammed Premier d'Oujda, PGR.

REFERENCES

- [1] Z.M. Salameh, F. Dagher and W.A. Lynch, 'Step-down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems', Solar Energy, Vol. 46, N°5, pp. 279 - 282, 1991.
- [2] M.F. Shraif, 'Optimisation et Mesure de Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque en Energie Electrique', Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 2002.
- [3] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, 'Caractérisation des Panneaux Photovoltaïques. Conception et Optimisation d'un Système Photovoltaïque pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire', Energies Renouvelables, Edité par l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la culture, Bureau de l'UNESCO à Rabat. Bureau Multi pays pour le Maghreb, Les énergies renouvelables au Maroc, Le débat est lancé. ISBN9954_8068_2_2, pp. 87 - 110, 2007, Rabat, Maroc.
- [4] T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, F. Olivié and F. Bagui, 'Amélioration du Fonctionnement des Systèmes Photovoltaïques suite aux Brusques Variations des Conditions Météorologiques et de la Charge', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°1, pp. 107 - 117, 2008.
- [5] Z. Salameh and D. Taylor, 'Step-up Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays', Solar Energy, Vol. 44, N°1, pp. 57 – 61, 1990.

- [6] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, '*Conception, Optimisation et Réalisation des Systèmes Photovoltaïques pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire*', Maîtrise de l'Energie dans la Construction et la Rénovation des Bâtiments, Centre d'Etudes Supérieures Industrielles – CESI, 8 Novembre 2007, Rouen, France.
- [7] T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, Ka. Kassmi, F. Olivié, F. Bagui, '*Conception, Modélisation et Réalisation d'un Système Photovoltaïque pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire*', Maîtrise et Management des Risques Industriels, 'M2RI'08', Ecole Nationale des Sciences Appliquées, 24 et 25 Avril 2008, Oujda, Maroc.
- [8] Site Internet Consulté, http://sunwize.com/info_center/pdfs/shell_SP75_PC.pdf.
- [9] A.B.G. Bahgat, N.H. Helwa, G.E. Ahmad and E.T. El Shenawy, '*Maximum Power Point Tracking Controller for PV Systems Using Neural Networks*', Renewable Energy, Vol. 30, N°8, pp. 1257 – 1268, 2005.
- [10] T. Tafticht, K. Agbossou, M.L. Doumbia and A. Chériti, '*An Improved Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Systems*', Renewable Energy, Vol. 33, N°7, pp. 1508 – 1516, 2008.
- [11] S.M. Sze, '*Physics of Semiconductors Devices*', A. Wiley, Interscience Publication, New York, 1981.