

Caractérisation et modélisation fine du fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques

T. Mrabti¹, M. El Ouariachi¹, B. Tidhaf² et K. Kassmi^{1*}

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

² Université Mohamed Premier,
Ecole Nationale des Sciences Appliquées, ENSA, Oujda, Maroc

(reçu le 20 Juin 2009 - accepté le 25 Septembre 2009)

Résumé - Dans ce papier, nous présentons les résultats de la caractérisation et la modélisation fine des caractéristiques électriques courant-tension et puissance-tension des panneaux photovoltaïques (PV). Nous analysons les paramètres électriques des cellules photovoltaïques et les grandeurs électriques optimales des panneaux (tension et puissance) en fonction des variations météorologiques (température, éclairage,...). Les résultats obtenus montrent que les paramètres de la diode des cellules photovoltaïques dépendent de l'éclairement: le courant de saturation augmente avec l'éclairement. Ceci induit une diminution de la tension optimale avec l'éclairement. Lorsque l'éclairement varie de 300 W/m^2 à 900 W/m^2 , la tension optimale diminue de 10.2 %. Ces résultats sont confirmés par les mesures de la régulation manuelle du point de puissance maximale (PPM) durant une journée entière. En tenant compte de l'ensemble des résultats de modélisation, nous avons analysé le comportement électrique de l'association des panneaux en série et en parallèle, ainsi que le vieillissement d'un panneau photovoltaïque. Nous avons montré que la connexion des panneaux photovoltaïque en série (parallèle) améliore (dégrade) les performances optimales d'un panneau, et un panneau photovoltaïque subit un vieillissement de 4 à 5 W par année.

Abstract - In this paper we have presented the results of the characterization and the fine modelling of the electric characteristics current-voltage and power-voltage of the photovoltaic (PV) panels. We have analyzed the electric parameters of PV cells and the optimal electric quantities of PV panels (voltage and power) according to the meteorological variations (Temperature, solar irradiation,...). The obtained results show that the diode parameters of the PV cells depend on solar irradiation: the saturation current increases with solar irradiation. This induces a decrease of the optimal voltage with solar irradiation: when the solar irradiation varies from 300 W/m^2 to 900 W/m^2 , the optimal voltage decreases about 10.2 %. These results are confirmed by the measures of the manual regulation of the maximal power point (MPP) during one day. By taking into account all the modelling results, we have analyzed the electric behavior of the panels association in parallels or in series, as well as the ageing of a PV panel. We have showed that the connection of the PV panels in series (parallels) improves (degrade) the optimal performances of the PV panel, and a PV panel undergoes an ageing from 4 to 5 W by year.

Mots clés: Cellules et panneaux photovoltaïques - Caractérisation électrique - Modélisation fine des caractéristiques électriques - Simulateur Pspice - Point de puissance maximale (PPM) - Vieillissement.

* khkassmi@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque, la modélisation fine du fonctionnement électrique des modules photovoltaïques (PV) est indispensable [1-4]. Ceci permettra d'une part de qualifier le processus technologique de réalisation des cellules PV, et d'autre part, d'analyser le fonctionnement optimal, ainsi que le vieillissement des modules photovoltaïques.

Cette dernière étude est nécessaire afin de concevoir et de réaliser les systèmes photovoltaïques adéquats permettant la poursuite du point de puissance maximale (PPM) [4-11]. Actuellement, on trouve dans la littérature, très peu de résultats concernant la modélisation fine du fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques en fonction des conditions météorologiques (éclairage, température,...).

Dans ce papier, nous analysons dans le simulateur Pspice, le fonctionnement électrique des modules photovoltaïques au silicium actuellement commercialisés (SP 75,...) en fonction de l'éclairage et de la température. Plus particulièrement, nous étudions le modèle électrique, le point de puissance maximale et le vieillissement des modules photovoltaïques.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1 Symbolisation de la cellule photovoltaïque

Nous avons symbolisé dans Pspice, le schéma électrique du générateur PV SP 75 qui est formé de 36 cellules en série (Fig. 1). Comme le montre la figure 1, une cellule photovoltaïque est formée par le générateur de courant I_{CC} (courant de court-circuit), la diode (D), la résistance de fuite (R_{Sh}), et la résistance série (R_S). Le courant de la diode dépend des paramètres technologiques (dimensions de la jonction PN, dopage, mobilités des porteurs,...) et de la température (T) suivant l'expression:

$$I_D = I_S(T) \times \exp\left(-\frac{q \times V_D}{K_B \times T}\right) \quad (1)$$

où: V_D est la tension aux bornes de la diode; q la charge de l'électron libre et K_B la constante de Boltzmann.

A partir de la comparaison des résultats de simulation à ceux fournis par le fabricant, nous avons déduit les différents paramètres de la diode et de la cellule photovoltaïque (R_S et R_{Sh}), et la dépendance du courant de court-circuit (I_{CC}) avec l'éclairage (Le).

$$I_{CC} = 0.00481 \times Le - 0.0125 \quad (2)$$

2.2 Caractérisation et modélisation électriques des modules photovoltaïques

2.2.1 Procédures expérimentales

Les panneaux (ou modules) photovoltaïques SP75 qui ont fait l'objet de notre étude expérimentale, sont représentés sur la figure 2. Un panneau 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 de 17.2 V .

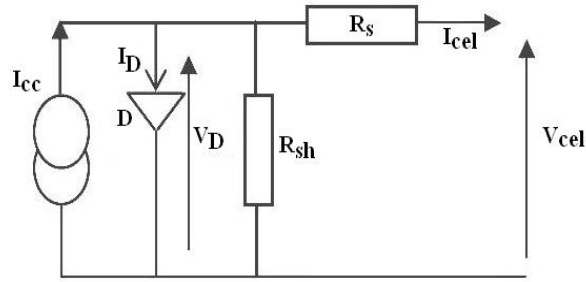


Fig. 1: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Ces panneaux et les systèmes PV conçus sont caractérisés à partir du banc de mesures mis en place au laboratoire (Fig. 3).



Fig. 2: Panneaux photovoltaïques SP75 installés à la Faculté des Sciences d'Oujda



Fig. 3: Banc de mesure mis en place pour caractériser les panneaux et les systèmes photovoltaïques

2.2.2 Caractérisation et modélisation électriques des modules

Nous avons caractérisé le module SP 75 pendant une journée où l'intensité de l'éclairage varie de 300 W/m^2 à 900 W/m^2 et la température de l'ordre de 22°C – 25°C . Sur la figure 4, nous avons représenté les caractéristiques typiques courant-tension et puissance-tension obtenues.

Sur les mêmes figures, nous avons représenté les caractéristiques simulées dans Pspice en fixant les paramètres de la diode (courant de saturations,...) qui permet d'avoir un bon accord entre l'expérience et la simulation.

A partir des caractéristiques de la figure 4, nous avons représenté sur les figures 5 et 6, les variations du courant de saturation (I_S) de la diode (D) et de la tension optimale

(V_{opt}) du panneau en fonction de l'éclairement. Il apparaît que pour cette température 20 - 25°C:

- le courant (I_S) augmente linéairement avec l'éclairement.
- la tension optimale V_{opt} diminue linéairement avec l'éclairement. Lorsque l'éclairement varie de 300 à 900 W/m^2 , la tension optimale varie de 14.8 V à 13.2 V (soit une diminution de 11 %).

La comparaison entre ces résultats à ceux déjà publiés dans la littérature, montre d'une part des valeurs des paramètres de la cellule différentes à celles fixées lors de la modélisation des caractéristiques courant-tension fournies par le fabricant ($I_S = 10^{-10}$ A et $V_{opt} = 17.2$ V), et d'autre part la forte dépendance de ces paramètres (I_S, V_{opt}, \dots) avec l'éclairement.

Dans la plupart des travaux de la littérature, on suppose que le courant de saturation de la diode et la tension dépendent très peu de l'éclairement. En tenant compte de ces suppositions, nous avons montré dans Pspice que lorsque l'éclairement varie de 1 000 W/m^2 à 500 W/m^2 , la tension V_{opt} subit une légère diminution (< à 2 %).

Lorsque l'éclairement est de l'ordre de 300 W/m^2 , cette diminution peut atteindre 5 %. Dans ce travail, et à partir de la modélisation des caractéristiques courant-tension, nous avons déduit un comportement différent: lorsque l'éclairement diminue, la tension V_{opt} augmente d'une manière considérable.

En conséquence, lors de la régulation de la puissance fournie par les panneaux PV à partir des commandes MPPT, il est nécessaire de tenir compte de cette forte dépendance avec l'éclairement.

Afin de valider l'ensemble de ces résultats obtenus dans ce paragraphe, nous analysons dans le paragraphe suivant la régulation manuelle de la puissance fournie par le panneau ainsi que la modélisation des performances électriques obtenus ($V_{opt}, I_{opt}, P_{opt}, \dots$) en fonction de l'éclairement.

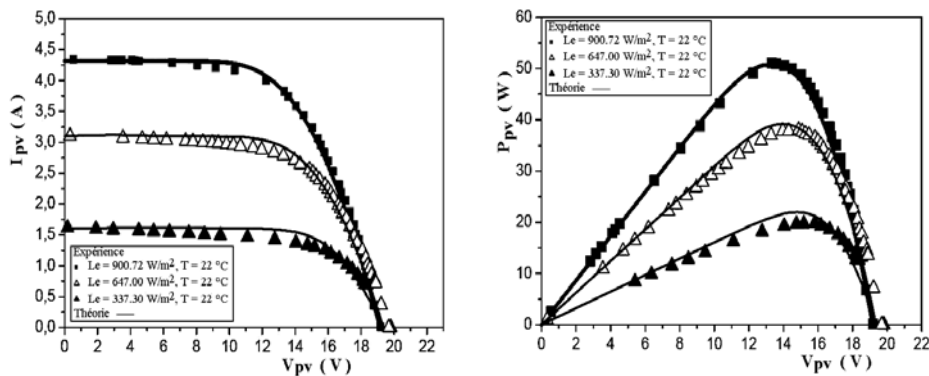


Fig. 4: Caractéristiques courant-tension et puissance-tension expérimentales (■, △, ▲) et simulées dans Pspice (—). 23/03/2009, T: 22 – 25 °C

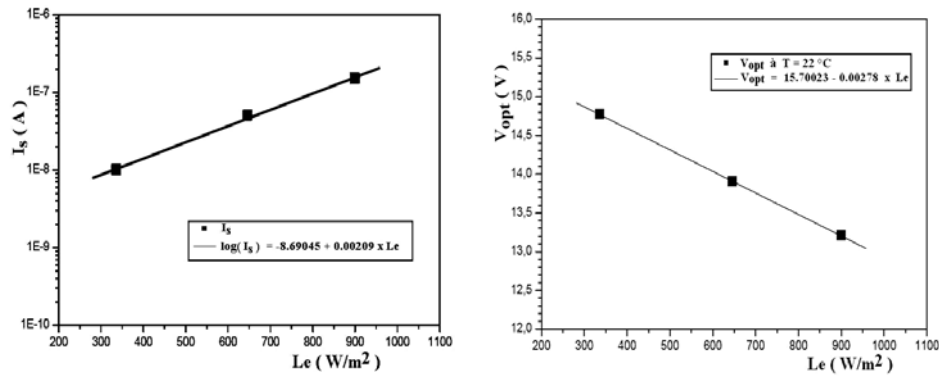


Fig. 5: Variation du courant de saturation (I_S) et de la tension optimale (V_{opt}) en fonction de l'éclairement. 23/03/2009, T: 22 – 25 °C.

2.2.3 Modélisations de la régulation de la puissance fournie par les modules photovoltaïques

Afin de valider les résultats obtenus dans le paragraphe précédent, nous avons régulé manuellement la puissance fournie par le panneau PV à partir du système de la figure 6.

Ce système est formé par:

- un panneau PV (SP75),
- un convertisseur Boost dimensionné pour qu'il fonctionne en régime continue à une fréquence de 10 kHz [2, 4, 5, 9-11],
- une charge résistive de 50 Ω ,
- une commande formée par un oscillateur qui génère un signal en dent de scie de fréquence 10 kHz, un comparateur et un générateur de tension continue variable. La comparaison entre le signal en dent de scie et la tension continue génère un signal carré de rapport cyclique (α) variable.

En variant le rapport cyclique α , nous avons analysé la régulation de la puissance optimale fournie par le module pendant une journée où la température est de 20°C-25°C et l'éclairement variant de 250 W/m^2 à 900 W/m^2 .

Les caractéristiques électriques optimales obtenues (V_{opt} , I_{opt} , P_{opt} , ...) sont représentées sur la figure 7. Sur les mêmes caractéristiques, nous avons reporté les caractéristiques simulées dans Pspice en fonction de l'éclairement et de la température (paragraphe précédent).

Il est à noter qu'au cours de notre régulation manuelle, l'équipement de mesure dont nous disposons régule la puissance maximale du panneau PV autour d'une tension V_{opt} qui varie dans une plage de tension de 0.8 V. Les tracés de la figure 7 tiennent compte de l'effet de cette plage sur le courant I_{opt} et la puissance P_{opt} .

L'ensemble des résultats obtenus dans ce paragraphe montre que lorsque la température varie de 20 à 25 °C, les résultats expérimentaux sont proches des résultats simulés.

Nous remarquons clairement la dépendance de la tension V_{opt} avec l'éclairement: lorsque l'éclairement augmente, la tension V_{opt} diminue. Ces résultats valident donc ceux trouvés dans le paragraphe précédent. En conséquence, lors de la régulation du fonctionnement des modules photovoltaïques par les commandes MPPT, il est nécessaire de tenir compte de la variation de la tension optimale V_{opt} avec l'éclairement.

Pour s'assurer du bon fonctionnement du convertisseur DC/DC, nous avons représenté sur la figure 8, les valeurs du rapport cyclique optimal (α_{opt}) du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur, ainsi que le rendement du convertisseur en fonction de l'éclairement.

Sur les mêmes tracés, nous avons représenté les valeurs obtenues dans le simulateur Pspice. Il apparaît un très bon accord entre l'expérience et la simulation. Ceci montre donc le bon fonctionnement du système de la figure 6.

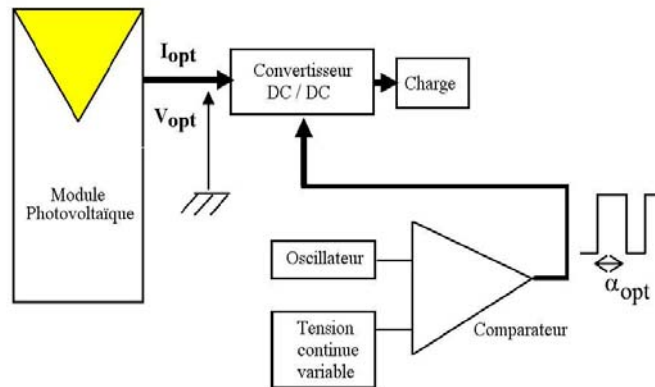
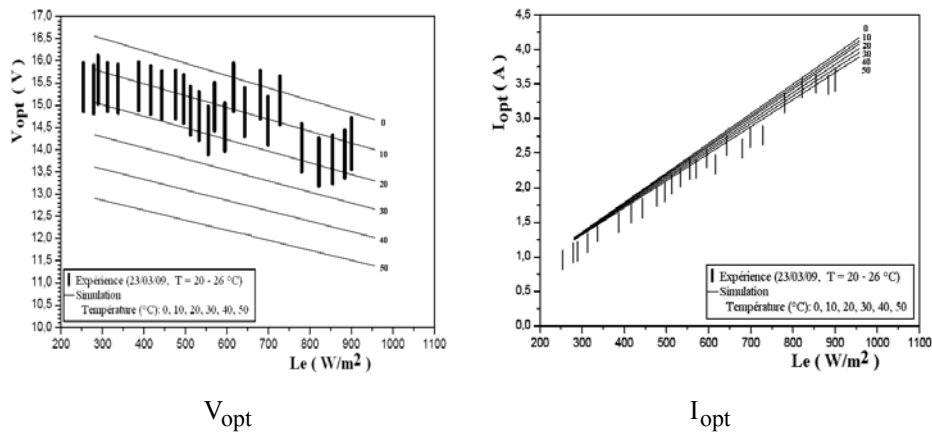


Fig. 6: Régulation manuelle de la puissance fournie par le module photovoltaïque



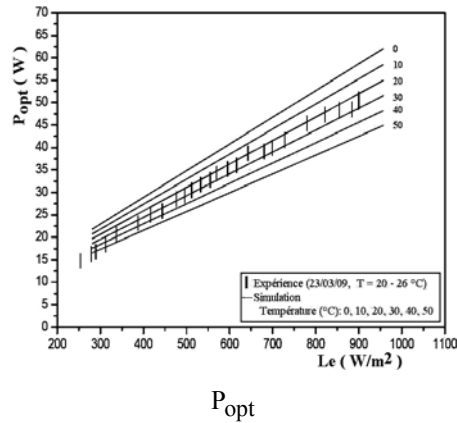


Fig. 7: Grandeurs électriques optimales (V_{opt} , I_{opt} et P_{opt}) expérimentales (|) et simulées dans Pspice (—). 23/03/2009, T: 22-25°C

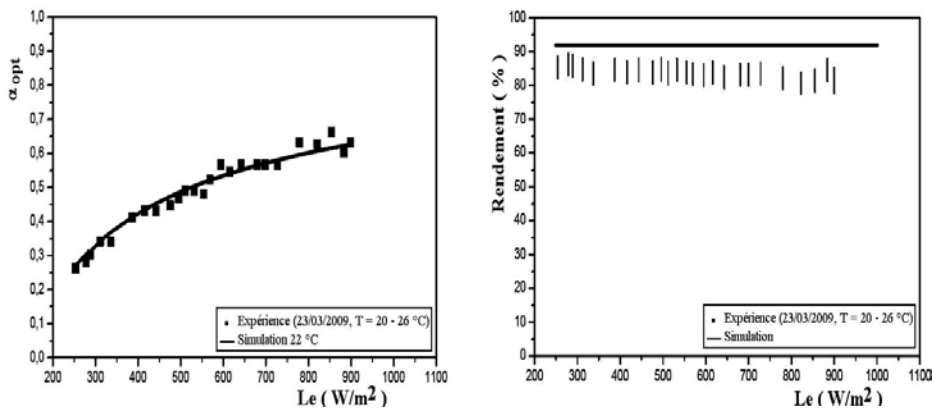


Fig. 8: Rapport cyclique et rendement optimaux expérimentaux (■, |) et simulés dans Pspice (—). 23/03/2009. T: 22 - 25°C.

2.2.4 Analyse du fonctionnement des modules en parallèle et en série

Dans une installation photovoltaïque, les panneaux sont associés en parallèle et en série. Dans une telle installation, en parallèle ou en série, il est indispensable de connaître le comportement optimal d'un module. Dans notre cas, nous avons analysé les caractéristiques courant-tension et puissance-tension de deux ou trois panneaux associés, soit en parallèle, soit en série. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 9 et 10.

Il apparaît que la puissance optimale est nettement importante, lors de l'association des modules en série. Lorsque deux modules sont associés en série, l'amélioration peut atteindre 8 %. Afin de déduire le comportement d'un panneau lors d'une association en parallèle ou en série de panneaux, nous avons déduit à partir des caractéristiques des figures 9 et 10, les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un seul module (Fig. 11 et 12).

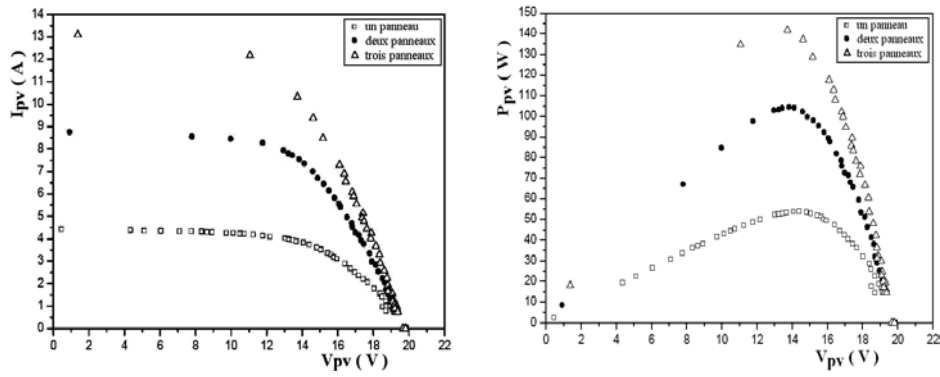


Fig. 9: Caractéristiques courant-tension et puissance-tension expérimentales de un, deux et trois modules montés en parallèle. 01/04/2009, T: 22 – 25 °C, $L_e = 917 \text{ W/m}^2$

Il apparaît que le courant du court-circuit (I_{CC}) du panneau n'est pas affecté par l'association des panneaux. Aussi, nous avons vérifié que la tension optimale V_{opt} d'un seul panneau suit les variations analysées dans le paragraphe précédent.

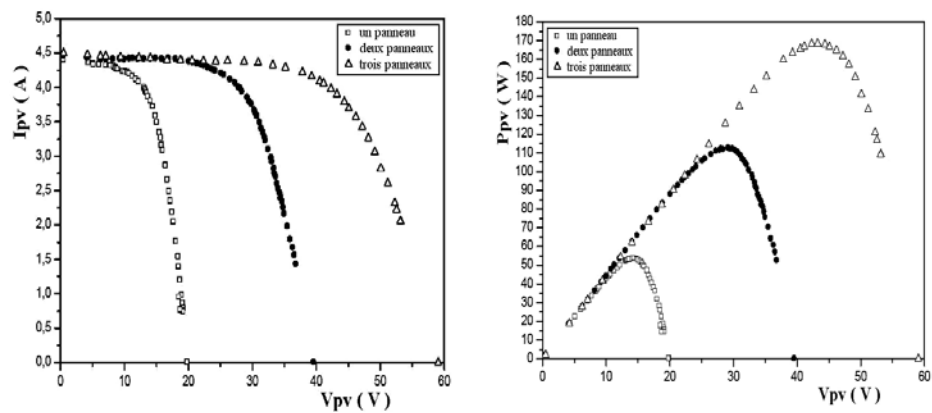


Fig. 10: Caractéristiques courant-tension et puissance-tension expérimentales de un, deux et trois modules montés en série. 01/04/2009, T: 22 – 25 °C, $L_e = 917 \text{ W/m}^2$

A partir des caractéristiques des figures 11 et 12, nous avons déduit et représenté sur la figure 13, l'évolution des pertes (amélioration) relatives de la puissance optimale d'un panneau, lors de l'association des panneaux en parallèle (série).

Il apparaît que la mise en série des panneaux améliore la puissance optimale d'un panneau, par contre la mise en parallèle dégrade cette puissance optimale en particulier, lors de l'association d'un grand nombre de modules aux faibles éclairagements ($< 550 \text{ W/m}^2$).

Puisque le courant de court-circuit n'est pas affecté par l'association des modules, nous avons attribué les différents comportements obtenus au courant de fuite de la diode des cellules PV: l'association en série (parallèle) des modules diminue (favorise) les courants de fuite de la diode.

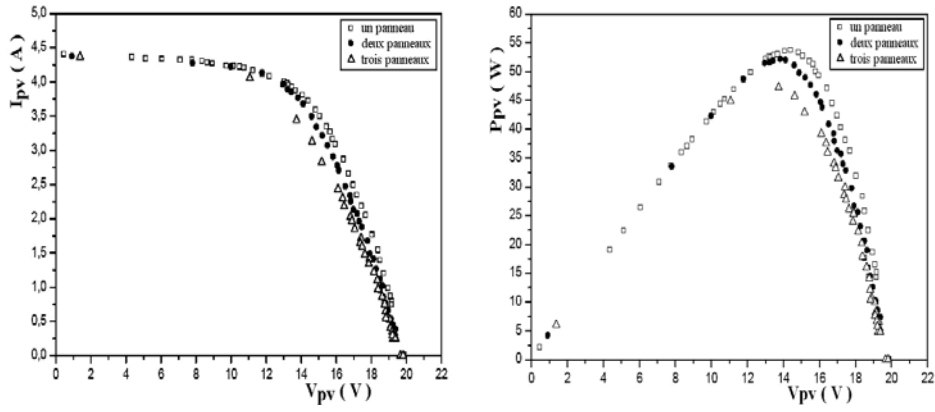


Fig. 11: Caractéristiques courant-tension et puissance-tension expérimentales d'un module, déduites des caractéristiques de la figure 9 (01/04/2009, T: 22 – 25 °C, $Le = 917 \text{ W/m}^2$)

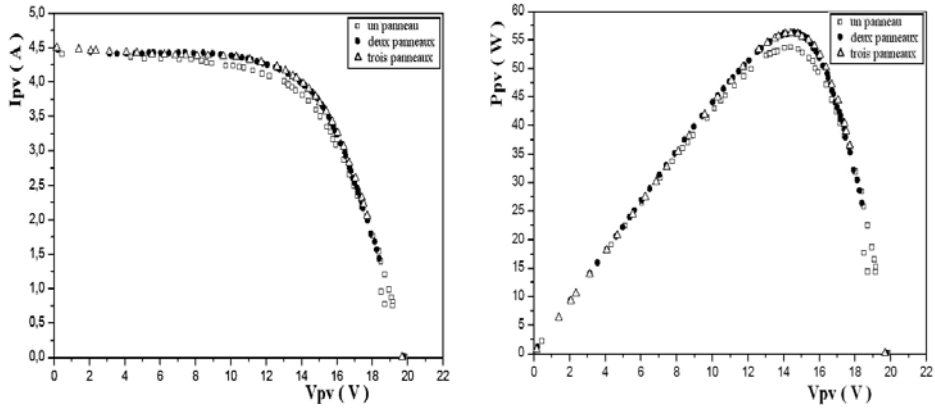


Fig. 12: Caractéristiques courant-tension et puissance-tension expérimentales d'un module, déduites des caractéristiques de la figure 10 (01/04/2009, T: 22 – 25 °C, $Le = 917 \text{ W/m}^2$)

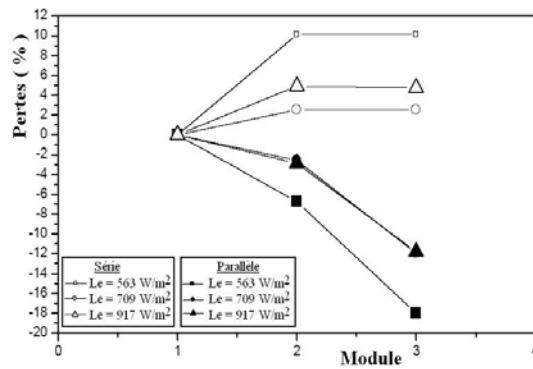


Fig. 13: Pertes (amélioration) de la puissance optimale d'un module, lors l'association des modules en parallèle (série) en fonction de l'éclairement. 03/2009, T: 22 – 25 °C

2.3 Vieillessement des modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques subissent des vieillissements lors de leur fonctionnement. Nous avons analysé qualitativement le vieillissement des modules qui ont fait l'objet de nos études. Nous avons modélisé dans Pspice, les caractéristiques électriques courant-tension et puissance-tension fournies par le fabricant (en 2005) et notamment celles de la figure 4 (en 2009).

Sur la figure 14, nous avons représenté les caractéristiques simulées et celles expérimentales. Nous pouvons ainsi déduire que les caractéristiques expérimentales se modélisent par des paramètres différents que ceux obtenus lors de la modélisation des caractéristiques fournies par le fabricant. Ce désaccord pourrait s'interpréter en terme de vieillissement des modules lors de leur fonctionnement.

Sur la figure 15, nous avons représenté la dégradation de la tension V_{opt} , le courant I_{opt} et la puissance P_{opt} optimaux. Nous pouvons ainsi conclure que la puissance P_{opt} se dégrade de 25 % après cinq années de fonctionnement (soit 5 % ou 4 W par année).

Puisque le courant du court-circuit n'est pas dégradé après plusieurs années de fonctionnement des modules, alors comme dans le cas des associations des modules en parallèle ou en série, nous avons attribué qualitativement le vieillissement des modules aux dégradations de la diode de la cellule PV. Le courant de ces dernières a la tendance d'augmenter et par conséquent dégrader les performances électriques des cellules PV.

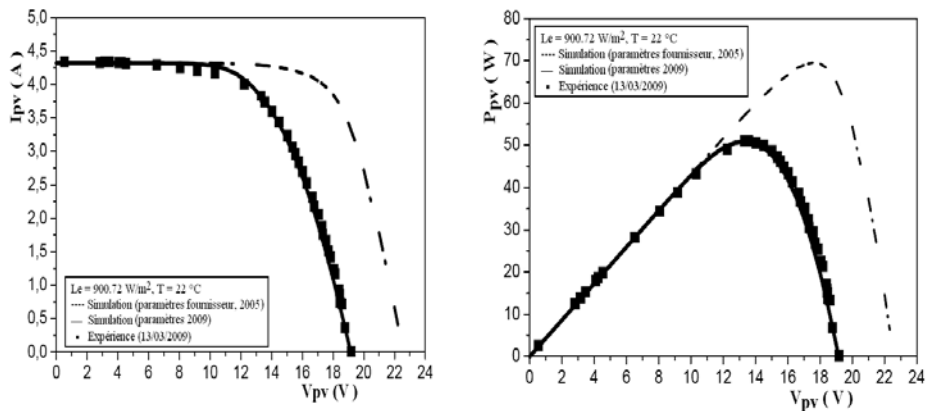


Fig. 14: Caractéristiques courant-tension et puissance-tension expérimentales et simulées en tenant compte des caractéristiques expérimentales et celles fournies par le fabricant

3. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons analysé dans Pspice et caractérisé le fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques. Les résultats obtenus montrent que:

- la symbolisation du générateur PV dans Pspice permet de déterminer le fonctionnement électrique optimal du générateur PV en fonction des conditions météorologiques (éclairage, température,...),

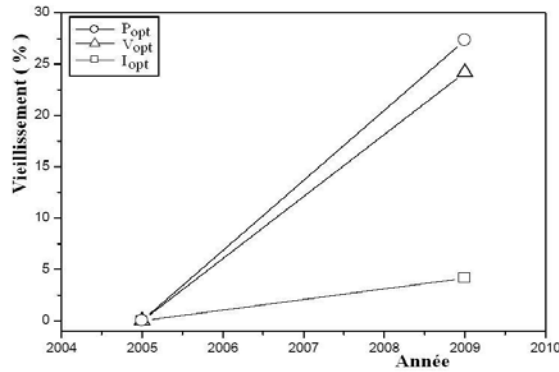


Fig. 15: Dégradation de la tension V_{opt} , du courant I_{opt} et puissance P_{opt} optimaux en fonction des années

- le modèle des modules dépend de l'éclairement. Lorsque l'éclairement varie de 300 W/m^2 à 1000 W/m^2 , le courant de saturation de la diode de la cellule PV augmente d'une décade. En tenant compte de ces variations, la tension optimale V_{opt} des modules PV varie de 14.8 V à 13 V . Ces résultats montrent bien que la diminution de la tension optimale avec l'éclairement.
- la mise en parallèle (série) des modules induit des pertes (amélioration) des performances des panneaux. Dans le cas de deux modules en parallèle (en série), les pertes (améliorations) de la puissance est de l'ordre de 3 %, (5 %) pour un éclairement de 950 W/m^2 . Ces pertes et augmentation sont importantes pour les faibles éclaircements (300 W/m^2).
- En tenant compte des paramètres électriques fournis par le fabricant des modules PV, nous avons déduit le vieillissement des panneaux de 25 % après 5 années de fonctionnement (soit 4 à 5 W/année).

Nous avons attribué qualitativement les pertes et les améliorations de la puissance électrique des modules aux fuites des diodes des cellules PV: l'augmentation (diminution) des fuites favorise les pertes (améliorations) des performances électriques.

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).

REFERENCES

- [1] R. Gules, J. de Pellegrin Pacheco, H.L. Hey and J. Imhoff, 'A Maximum Power Point Tracking System with Parallel Connection for PV Stand-Alone Applications', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, N°7, pp. 2674 – 2683, 2008.

- [2] M. El Ouariachi, T. Mrabti, B. Tidhaf, KA. Kassmi and K. Kassmi, 'Regulation of the Electric Power Provided by the Panels of the Photovoltaic System', International Journal of Physical Sciences, Vol. 4, N°5, pp. 294 - 309, 2009.
- [3] A. Woyte, V. Van Thong, R. Belmans and J. Nijs, 'Voltage Fluctuations on Distribution Level Introduced by Photovoltaic Systems', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, N°1, pp. 202 – 209, March 2006.
- [4] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivie, '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', Rouen, France, 8 Novembre 2007.
- [5] K. Kassmi, M. Hamdaoui and F. Olivie, 'Characterization of the Photovoltaic Panels. Design and Optimization of a Photovoltaic System for a Better Exploitation of Solar Energy', Renewable Energies, United Nations for Education, Science and Culture, Office of UNESCO in Rabat, Bureau Multi Country for the Maghreb, Renewable Energies in Morocco. The debate is launched. ISBN9954_8068_2_2, pp. 87 - 110, Rabat, Morocco, 2007.
- [6] M.F. Shraif, 'Optimisation et Mesure de Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque en Energie Electrique', Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2002.
- [7] Z.M. Salameh, F. Dagher and W.A. Lynch, 'Step-Down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems', Solar Energy, Vol. 46, N°4, pp. 279 - 282, 1991.
- [8] 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.
- [9] T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, F. Olivie et F. Bagui, 'Conception, Modélisation et Réalisation d'un Système Photovoltaïque de Moyenne Puissance', Revue des Energies renouvelables, Vol. 11, N°4, pp. 567 - 575, 2008.
- [10] T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, Ka. Kassmi and F. Bagui, 'Regulation of the Electric Power of the Photovoltaic Generators with DC-DC Converter (Buck Type) and MPPT Command', International Conference on Multimedia Computing and Systems, 'ICMCS'09', Ouarzazate, Morocco, April 02-04, 2009.
- [11] M. El Ouariachi, T. Mrabti, K. Kassmi, Ka. Kassmi and F. Bagui 'Regulation of the Electric Power Provided by the Panels of the Photovoltaic Systems', International Conference on Multimedia Computing and Systems, 'ICMCS'09', Ouarzazate, Morocco, – April 02-04, 2009.