

Etude de la technique d'optimisation sur le système de pompage photovoltaïque au fil de soleil

H. Mabrouk ^{1*}, S. Mebrouk ¹, A.B.H. Adamou-Mitiche ² et M. Saraoui ^{1†}

¹ Département d'Electrotechnique, Université de Béchar
B.P. 417, 08000 Béchar, Algeria

² Département des Sciences et Technologie, Université Ziane Achour
B.P. 3117, Route Moudjbara, Djelfa, Algeria

(reçu le 14 Février 2014 – accepté le 30 Décembre 2014)

Résumé - L'étude théorique de la photopile est basée sur une représentation à une diode de la photopile. Les effets de la température, de l'irradiation sur la photopile sont étudiés, en particulier, sur les grandeurs, telles que le courant de court-circuit I_{sc} , la tension de circuit ouvert V_{oc} . Selon les caractéristiques de la charge, qui est une pompe centrifuge entraînée par un moteur à courant continu 'moto-pompe', et les conditions de fonctionnement (température, irradiation), nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance maximale potentielle du générateur et celle réellement transférée au moto-pompe. Afin d'extraire à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer au moto-pompe, on utilise un étage d'adaptation composé d'un hacheur boost. La modélisation, puis la simulation du système (générateur photovoltaïque, hacheur boost, de même que l'algorithme MPPT) est ensuite effectuée grâce au logiciel Matlab/Simulink.

Abstract – The theoretical study of the solar cell is based on one diode representation. The temperature and irradiance effects on the solar cell are studied, particularly on the short circuit current I_{sc} , the open circuit voltage V_{oc} . Depending on the load (DC motor pump) direct current, and the operating conditions (temperature, irradiance), we can found a highly gap between the potential peak power and the real power transferred to the moto-pump. A maximum power point tracker (MPPT) based on a boost converter is used for extracting the maximum power from the solar photovoltaic generator. The modelling and simulation of the system (photovoltaic generator, boost converter and MPPT algorithm,.) is then made with Matlab/Simulink software.

Mots clés: Générateur photovoltaïque - Moto-pompe - Hacheur boost - MPPT.

1. INTRODUCTION

Le système photovoltaïque de pompage le plus courant, selon l'état de l'art actuel, fonctionne au fil du soleil, tel que le stockage s'effectue indirectement sous forme d'eau dans un réservoir. Cette solution est plus économique et très appréciée de point de vue environnemental en raison de l'élimination de la batterie et son circuit de charge.

Dans le but d'améliorer le rendement du générateur photovoltaïque, 'PV' autrement dit maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur, plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité du système photovoltaïque étaient appliqués [1], et des techniques étaient suivies pour avoir une bonne adaptation et un rendement élevé. Parmi ces techniques, on trouve la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale ou Maximum Power Point Tracker, MPPT, [2].

* mabrouk.enp10@yahoo.fr

† serrmed@gmail.com

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés par l’obtention d’une meilleure adaptation entre les parties qui constituent un système de pompage photovoltaïque. En général, dans les pompes entraînées par des moteurs DC, la courbe de fonctionnement optimal de l’ensemble moteur-pompe est loin de celle correspondant à la puissance maximale du générateur, ce qui diminue le rendement d’utilisation. Le rapprochement des deux courbes est donc nécessaire.

On a d’abord caractérisé le générateur photovoltaïque, puis modélisé la pompe centrifuge et le moteur DC. On a remarqué que la courbe du moteur est loin de coïncider avec les points correspondants à la puissance maximale du générateur PV. Pour cela, on a présenté une technique d’optimisation pour adapter les deux parties afin d’augmenter les performances du système de pompage.

2. MODELISATION DU SYSTEME

Le système étudié est constitué par le générateur PV, le convertisseur DC-DC (hacheur de type survolteur) et le moteur-pompe. Le convertisseur DC-DC est commandé par une stratégie de recherche du point de puissance maximale MPPT. La figure 1 présente le synoptique de l’ensemble du système:

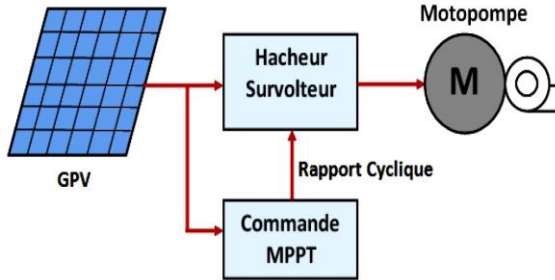


Fig. 1: Schéma synoptique du système PV contrôlé par MPPT

La commande MPPT délivre l’action de contrôle appropriée afin de suivre le point de puissance maximale à chaque instant. Ce contrôle, dans le cas d’un transformateur DC, agit directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC.

2.1 Modèle du module photovoltaïque

Le circuit électrique équivalent d’une cellule PV est tracé sur la figure 2. C’est le modèle avec une diode unique. [3, 4].

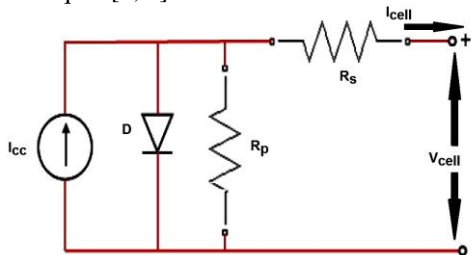


Fig. 2: Circuit équivalent d’une cellule réelle

Les équations suivantes montrent le modèle mathématique d’un module photovoltaïque, [5-7]

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{q(V + IR_s)/AkT} - 1 \right) - V + IR_s / R_p \tag{1}$$

I_{ph} - Photo-courant; K_0 - Coefficient de température de courant de court-circuit; E_G - 1.1eV; I_s - Courant de saturation; A - Facteur d'idéalité de la diode; $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C; R_s - Résistance série; R_p - Résistance shunt; V_{oc} - Tension en circuit ouvert; I_{sc} - Courant de court-circuit.

2.1.1 Influence de la température

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$ et pour différents températures.

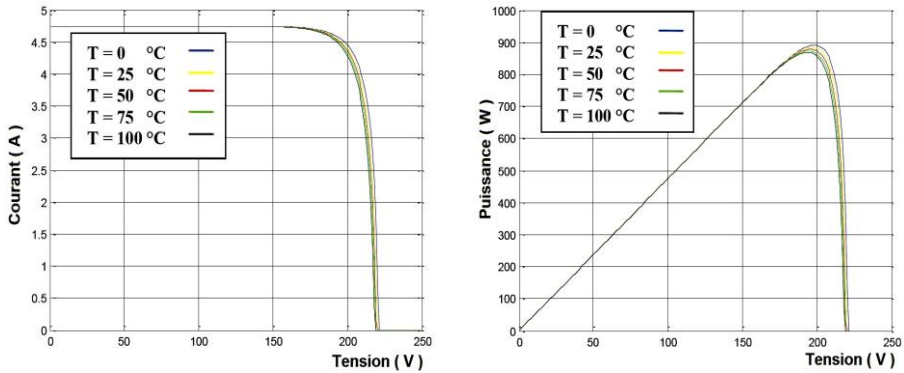


Fig. 3: Influence de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ à $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$

2.1.2 Influence du rayonnement

Nous avons fait varier le niveau d'ensoleillement E pour une température constante ($T_{ref} = 25^\circ\text{C}$) et tracer les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ associées:

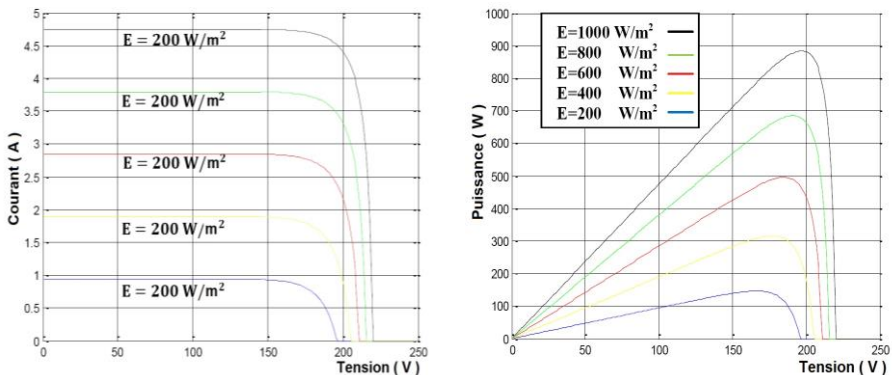


Fig. 4: Influence de l'éclairement sur les Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ à $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$

2.2 Modélisation du hacheur boost

Les hacheurs élévateurs de tension, sont fréquemment utilisés dans des applications photovoltaïques, en particulier dans le pompage photovoltaïque. La modélisation du hacheur survolteur est obtenue par l’application de lois fondamentales régissant le fonctionnement du système. Un convertisseur élévateur est un convertisseur de puissance avec une tension de sortie DC supérieure à sa tension d’entrée DC.

Les composants fondamentaux du mode de commutation d’alimentation sont les deux interrupteurs statiques en semi-conducteurs, soit une diode D et un transistor Q de type MOSFET, IGBT ou BJT, un condensateur réel à l’entrée $R // C$ pour transformer le GPV en une source de tension et un condensateur réel à sa sortie $R_1 // C_1$ afin de transposer la charge à une source de tension [8].

Le schéma de base est illustré par la figure 5.

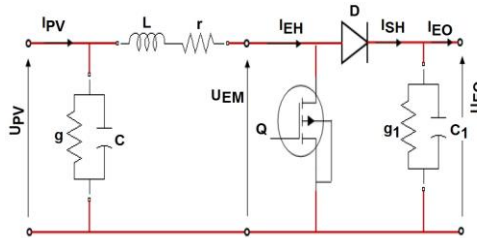


Fig. 5: Schéma de fonctionnement d’un hacheur survolteur

Le principe de base de fonctionnement du hacheur survolteur se résume en deux états distincts:

- Lorsque le transistor Q est à l’état fermé T_{ON} , le courant dans l’inductance (L, r) augmente et l’énergie sera stockée dans l’inductance;
- Lorsque le transistor Q est à l’état ouvert T_{OFF} , le courant continue à traverser l’inductance à travers la diode D.

La période de commutation T et le rapport cycle α variable sont définis par les relations suivantes:

$$\begin{cases} T = t_{ON} + t_{OFF} \\ \alpha = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \end{cases} \tag{2}$$

Les grandeurs électriques moyennes d’entrée / sortie du hacheur sont liées par la relation suivante:

$$\frac{U_{SH}}{U_{EH}} = \frac{i_{EH}}{i_{SH}} = \frac{1}{1 - \alpha} \tag{3}$$

2.3 MPPT ‘P & O’ basé sur le hacheur survolteur

Aujourd’hui, un certain nombre d’algorithmes MPPT sont proposés dans la littérature, y compris le ‘P&O’ [9], la méthode de la tension à vide, la méthode du courant de court-circuit, l’algorithme de conductance incrémental et la méthode du réseau de neuraux artificiels.

L’algorithme MPPT ‘P&O’ est le plus couramment utilisé dans les produits commerciaux photovoltaïques [10]. L’algorithme P&O est détaillé par les figures 6 et 7.

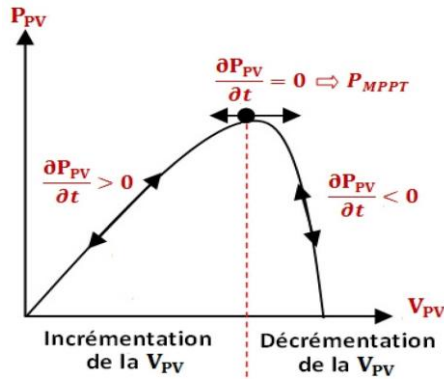


Fig. 6: Caractéristique PPV (V_{PV}) [11]

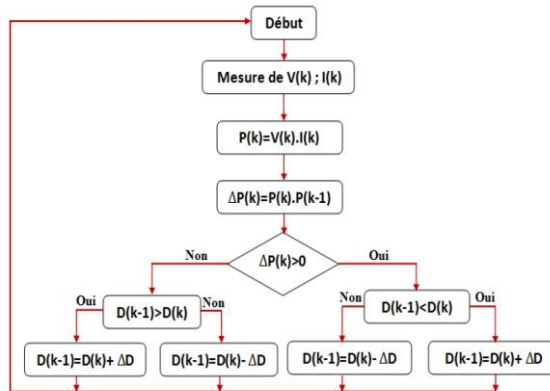


Fig. 7: Organigramme de l’algorithme ‘Perturbation et Observation’ (P&O)

Cette figure montre l’organigramme de l’algorithme de la P&O, tel qu’il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

2.4 Modélisation de groupe moteur-pompe

Le rendement du moteur DC, qui est dans la plage de 80 – 84 % pour une large gamme de vitesse a mené les industriels, en particulier dans le domaine de l’énergie solaire à l’utiliser comme un élément primordial dans les systèmes de pompage PV pour les faibles puissances [12]. L’équation de tension est approximative donnée par:

$$V_a = R_a I_a + k_e \omega \tag{4}$$

Avec, V_a , la tension de l’induit, R_a , la résistance de l’induit, I_a , le courant de l’induit, k_e , la constante de la f.e.m. du moteur et ω , la vitesse de rotation.

Les équations mécaniques sont:

$$T_m = T_r \tag{5}$$

$$T_m = k_e I_a \tag{6}$$

$$T_r = A_c \omega^2 \tag{7}$$

La charge appliquée sur l’arbre du moteur est une pompe centrifuge construite pour répondre à des conditions précises de fonctionnement (débit Q à élever à une hauteur H). Le modèle de la pompe centrifuge utilisé est identifié par l’expression de Peleinder et Petermain [13].

$$H = a_a \omega^2 - a_1 \omega Q - a_2 Q^2 \tag{8}$$

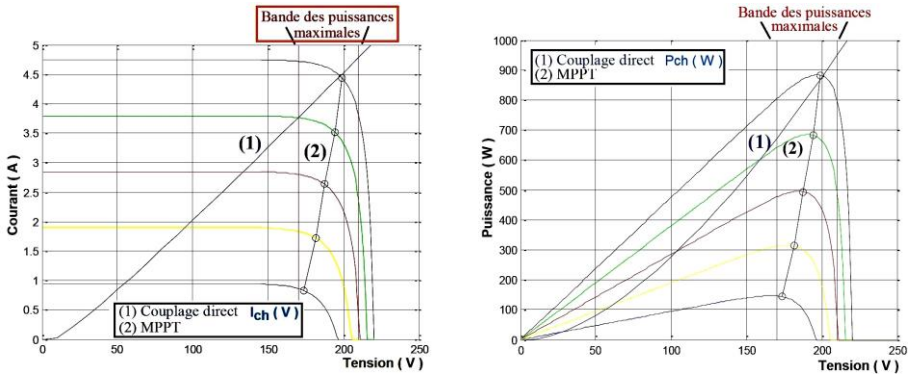
La caractéristique de la canalisation est donnée par l’équation suivante:

$$H = H_s + K_{fr} Q^2 \tag{9}$$

3. RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSION

3.1 Couplage direct du moteur DC au générateur PV

Le point de fonctionnement du système est obtenu par l’intersection des caractéristiques $I(V)$ du générateur et celle du groupe moteur-pompe (I_{ch}) [14-16]. Le système photovoltaïque doit fonctionner dans la zone représentative appelée ‘*bande des puissances maximales*’.



a- $T = 25^\circ\text{C}$ et $E = 200$ à 1000 W/m^2 **b-** $T = 25^\circ\text{C}$ et $E = 200$ à 1000 W/m^2

Fig. 8: Caractéristiques du système de pompage
a- Caractéristique $I(V)$, **b-** Caractéristique $P(V)$ (sans optimisation)

La figure 8 montre les allures de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ du système photovoltaïque en couplage direct pour une température constante ($T = 25^\circ(\text{V})$) où on remarque que le moteur fonctionne difficilement pour les faibles éclaircissements.

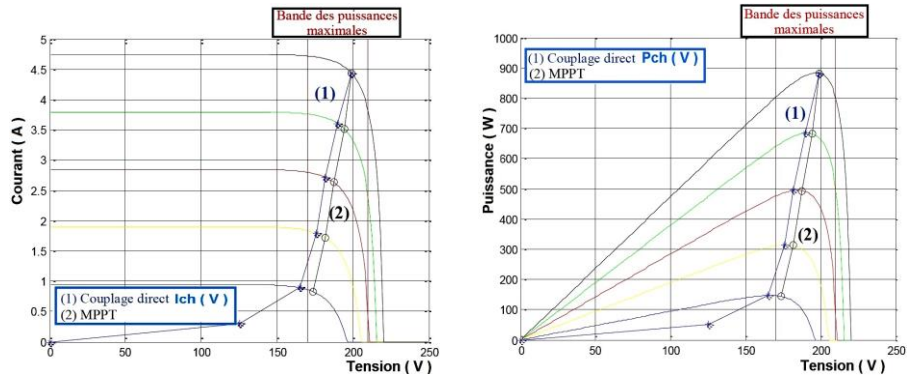
3.2 Technique d’optimisation

Le but de l’optimisation est d’améliorer le rendement du moteur qui va fonctionner à la périphérie des points optimaux du fonctionnement du générateur photovoltaïque, donc la caractéristique $I_{ch}(V)$ doit glisser vers la bande des puissances maximales du GPV qui se situe entre $[17.0 \text{ V}, 21.0 \text{ V}]$ pour une température $T = 25^\circ(\text{V})$ et un éclaircissement variant entre 200 W/m^2 et 1000 W/m^2 .

La figure 9a- représente les caractéristiques $I(V)$ du générateur PV et de la charge pour le couplage avec la technique MPPT. Le fonctionnement du système est amélioré par l’utilisation de cette technique, où le moteur DC est alimenté par des tensions plus

proches aux valeurs nominales. L'effet de la technique MPPT par rapport au couplage direct est très clair pour les faibles valeurs de l'éclairement.

La tension d'alimentation est augmentée d'une valeur aussi faible que $\cong 60\text{V}$ pour le couplage direct, à une valeur de $\cong 164\text{V}$ par suite de l'optimisation. Cette augmentation est accompagnée d'un accroissement de la puissance générée. La figure 9b- illustre les puissances optimisées pour la technique d'optimisation utilisée.



a- $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 200$ à 1000 W/m^2 **b-** $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 200$ à 1000 W/m^2

Fig. 9 Caractéristiques du système de pompage
a- Caractéristique $I(V)$, **b-** Caractéristique $P(V)$ (avec optimisation)

Comme le rendement calculé est défini par le rapport entre la puissance obtenue à la sortie du convertisseur DC-DC et la puissance maximale disponible. Le rendement est de 100 % pour la technique MPPT vraie, par contre le couplage direct est caractérisé par un faible rendement spécialement pour les faibles valeurs d'éclairement.

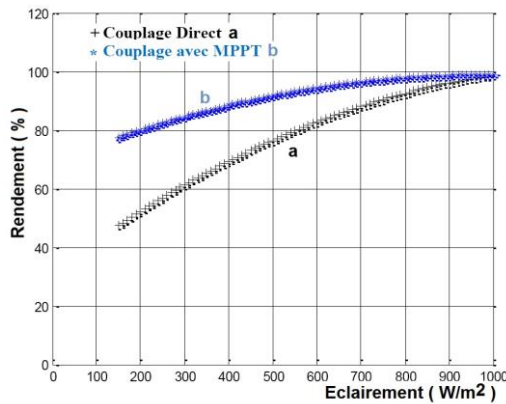


Fig. 10: Courbes des rendements du système pour le couplage direct et la technique d'optimisation

A titre d'exemple pour $E = 150\text{ W/m}^2$, le rendement est de 43 %. Mais pour $E = 900\text{ W/m}^2$ et plus, les valeurs du rendement seront proches. Ce rapprochement prouve la bonne adaptation entre le groupe moto-pompe et le générateur pour le couplage direct à des forts éclaircements (Fig. 10).

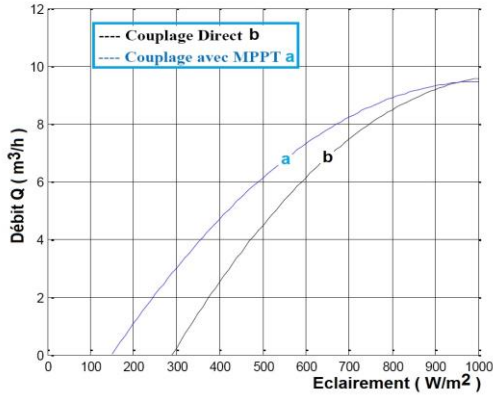


Fig. 11: Courbes des quantités d’eau du système de pompage PV

La figure 11 donne les allures des débits, en couplage direct et avec la technique du MPPT en fonction de l’éclairement. Dans le cas du couplage direct, le système ne commence à délivrer de l’eau qu’à un éclairement de 300 W/m², par conséquent la maximisation de puissance force la pompe à fournir de l’eau à partir de 150 W/m², où la valeur récupérée par rapport au couplage direct et de 1.5 m³/s. La quantité d’eau gagnée pendant une demi-journée est de 9.39 m³.

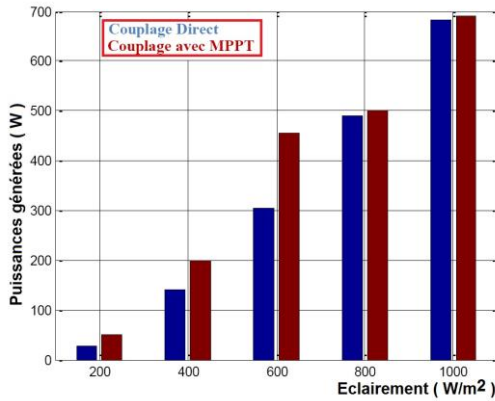


Fig. 12: Puissances générées pour le couplage direct et la technique d’optimisation

La figure 12 présente les valeurs des puissances débitées dans les deux cas. Une perte de puissance de 52 % de la puissance maximale pour un ensoleillement de 300 W/m² est atteinte par la technique d’optimisation.

4. ANNEXE

Table A1: Caractéristiques du module photovoltaïque BP SX 150S
(T = 25°C, E = 1000 W/m²)

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale, P_{max} (W)	150
Courant de court-circuit, I_{sc} (A)	4.75
Tension de circuit ouvert, V_{oc} (V)	43.5

Coefficient de température	0.065
'Courant de court-circuit', K_i (%/°C)	± 0.015
Coefficient de température	160
'Tension de circuit ouvert', K_v (mV/°C)	± 20
Coefficient de température	0.5
'Puissance', K_p (%/°C)	± 0.05
Courant optimal à P_{max} (A)	4.35
Tension optimale à P_{max} (V)	34.5
NOCT, (°C)	47 ± 2 °C
Puissance de crête minimale, P_c (W)	140
Résistance série, R_s (Ω)	0.55
Résistance parallèle, R_p (Ω)	470

Table A2: Caractéristiques du moteur DC

Paramètres	Valeurs
Puissance, P_m (W)	690
Vitesse nominale, w_r (tr/mn)	3000
Tension d'alimentation, U (V)	200 – 220
Courant nominal, I (A)	4.8
Résistance par phase, R_a (Ω)	1
Inductance par phase, L_a (mH)	5
Constante de la f.e.m., K_e (V/rd/s)	0.47

Table A3: Caractéristiques de la pompe centrifuge

Paramètres	Valeurs
Hauteur minimale, (m)	11
Débit max., Q_m (l/mn)	175
Vitesse d'entraînement nominale, (tr/mn)	2840

5. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté les principales caractéristiques d'un système photovoltaïque permettant le pompage de l'eau au fil de soleil. Un générateur photovoltaïque débitant sur un convertisseur électronique de puissance dépitant le point optimal de fonctionnement est présenté. Ce papier montre bien, que le hacheur survolteur permet la poursuite de la puissance optimale délivrée par le générateur PV en fonction de l'ensoleillement. Le modèle électrique du système, est simulé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink pour différents éclairagements solaires, et l'influence des paramètres, éclairagement et température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ est présentée. L'amélioration proposée dans ce travail restent toujours simple, facile pour la réalisation pratique, et donne des puissances proches aux puissances idéales. Le modèle montre que l'optimisation est importante aux bas éclairagements.

REFERENCES

- [1] L. Glasner, 'Advantage of Boost vs. Buck Topology for Maximum Power Point Tracker in Photovoltaic Systems', Nineteenth Convention of Electrical and Engineers in Israel, IEEE 1996, pp. 355 – 358, 1996.

- [2] E. Mujadi, 'PV Water Pumping With a Peck-Power Tracker Using a Simple Six Step Square-Wave Inverter', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, N°3, pp. 714 – 721, May/June 1997.
- [3] L. Wu, Z. Zhao and J. Liu 'A Single-Stage Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Modified MPPT Method and Reactive Power Compensation', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, N°4, pp. 881 - 886, 2007.
- [4] S. Liu and R.A. Dougal, 'Dynamic Multiphysics Model for Solar Array', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, N°2, pp. 285 – 294, June 2002.
- [5] F.M. Gonzalez-longatt, 'Model of Photovoltaic Module in MatlabTM', in 2DO Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingenieria Electrica, Electronica y computacion, 'II Cibelec, 2005', pp. 1 – 5, 2005.
- [6] H.L. Tsai, C.S. Tu and Y.J. Su, 'Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink', Proceedings of the Congress on Engineering and Computer Sciences, WCECS 2008, October 22-24, San Francisco, 2008.
- [7] N. Pandiarjan, R. Ramaparabha and R. Muthu, 'Application of Circuit Model for Photovoltaic Energy Conversion System', International Journal of Photoenergy, Vol. 2012 , pp. 1 - 14, 2012.
- [8] M.A. Khalfa, 'Commande Vectorielle d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil', CIFA 2008, pp. 434 – 441, 3-5 Septembre 2008, Bucarest, Roumanie, 2000.
- [9] C. Hua and J. Latin, 'An On-Line MPPT Algorithm for Rapidly Changing Illuminations of Solar Arrays', Renewable Energy, Vol. 28, N°7, pp. 1129 - 1142, 2003.
- [10] K. Chomsuwan, P. Prisuwan and V. Monyakul, 'Photovoltaic Grid-Connected Inverter Using Two-Switch Buck Boost Converter', in Conference Record 2002 IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1527 - 1530, May 2002.
- [11] A.B.G. Bahgat, N.H. Helwab, G.E. Ahmad and T. El Shenwyb, 'Maximum Power Point Tracking Controller for PV Systems Using Neural Networks', Renewable Energy, Vol. 30, N°8, pp. 1257 – 1268, 2005.
- [12] B. Azoui et M. Chabane, 'Expérimentation d'un Moteur à Aimants Permanents Sans Balais Collecteur dans un Système de Pompage Photovoltaïque', ICEL 2000, U.S.T.Oran, Algeria, pp. 378 - 383, 2000.
- [13] D. Weiner and A. Levinson, 'An Optimal Operation Design of a Photovoltaic D.C Motor Coupled Water Pumping System', Electric Machines and Power Systems, Vol. 24, N°3, pp. 277 – 288, 1996.
- [14] J. Applebaum, 'The Quality of Load Matching in a Direct Coupling Photovoltaic System', IEEE Transaction On Energy Conversion, Vol. EC-2, N°4, pp. 534 – 541, 1987. .
- [15] S.M. Alghuwinem, 'Steady-State Performance of DC Motors Supplied from Photovoltaic Generators with Step-Up Converter', IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 7, N°2, pp. 267 – 272, 1992.
- [16] A. Moussi et A. Saadi, 'Etude Comparative entre les Techniques d'Optimisation des Systèmes de Pompage Photovoltaïque', LARHYSS Journal, N°01, pp. 158 - 168, Mai 2002.