

## OPTIMISATION D'UN SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Reçu le 15/01/2005 – Accepté le 03/09/2007

### Résumé

L'exploitation des potentiels énergétiques (solaire) pour la production de l'électricité s'avère être rentable dans les régions isolées, là où l'extension du réseau électrique conventionnel serait impossible et onéreuse.

Nous procédons dans cet article à une modélisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil qui comprend un générateur PV avec un convertisseur électronique de puissance permettant une poursuite du point de fonctionnement optimum; l'ensemble alimentant un moteur à courant continu accouplé à une pompe centrifuge (déversant dans un bassin à partir d'un puit).

**Mots clés:** Énergie solaire, panneaux photovoltaïques, pompage, modélisation, optimisation.

### Abstract

The exploitation of the solar energy for producing electricity proves to be profitable in the isolated areas, where the extension of the conventional electrical supply network would be impossible and expensive.

In this article, we study a model of a photovoltaic pumping system which includes a photovoltaic generator coupled to a centrifugal pump through an electronic power converter tracking of the optimum working point; the unit supplying a D.C. current motor.

**Keywords:** Solar energy, photovoltaic panels, pumping, modeling, optimization.

R. CHENNI<sup>1</sup>  
L. ZAROUB<sup>1</sup>  
E. MATAGNE<sup>2</sup>  
T. KERBACHE<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Département d'Electronique  
Faculté des Sciences de  
l'Ingénieur - Université  
Mentouri Constantine – Algérie

<sup>2</sup> LEI UCL Louvain –La-neuve  
Belgique

<sup>3</sup> Département de Physique  
Faculté des Sciences Exactes-  
Université Mentouri  
Constantine - Algérie

Dans le cadre de l'optimisation du générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire  $I-V$  du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est fait appel à la technique de conversion : Hacheur qui selon le rapport cyclique approcherait le point optimal de fonctionnement du système.

### 1. MODELE ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE REELLE:

Le modèle électrique réel d'une cellule solaire se compose d'une diode, de deux résistances et d'un générateur de courant [1], [2] et [3]. La relation entre la tension  $V$  (Volts) et le courant  $I$  (Ampères) est donnée par la formule (figure 1).

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp\left(\frac{V + R_s I}{A}\right) - 1 \right\} - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}}\right) \quad (1)$$

avec  $A = \frac{n \cdot K \cdot T}{q}$  où  $q$  est la charge de l'électron ( $1.9 \cdot 10^{-19}$  coul),  $n$  le facteur de qualité de la diode et  $K$  la constante de Boltzmann. ( $1.08 \cdot 10^{23}$ ).  $R_s$  et  $R_{sh}$  sont les résistances série et parallèle d'une cellule photovoltaïque.

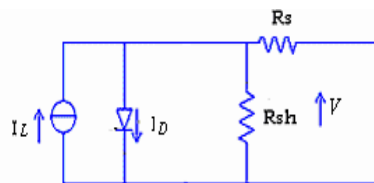


Figure 1 : Modèle réel d'une cellule photovoltaïque.

### ملخص

إن أستغلال القدرات الطاقوية الشمسية لتوليد الكهرباء أثبت مردوبيته في المناطق النائية حيث الكثافة السكانية الضعيفة والطلب إلى الطاقة محدود و مكلف.

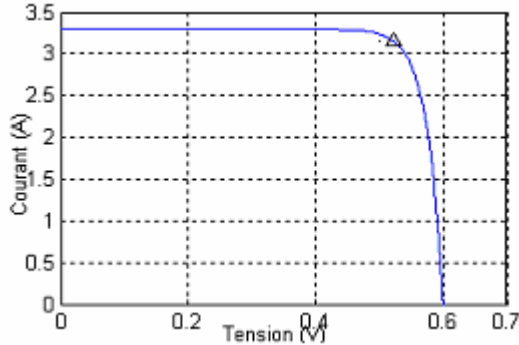
الهدف من هذا العمل هو إبراز كيفية إستغلال الطاقة الشمسية وتمثيل نظام ضخ المياه تزامنا مع ضهور الأطاءة الشمسية. المحطة المدروسة تحتوي على مولد كهرو ضوئى مقرون بمحول الكتروني للتوتر يسمح متابعة النقطة القصوى للإستطاعة. الكل يغدي محرك تيار مستمر مقرون بمضخة ذات طرد مركزي.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الشمسية، مولد كهرو ضوئى، ضخ المياه، تصميم و نمذجة.

$I_L$ ,  $I_0$  et  $I$  sont le courant photonique, le courant inverse de saturation de la diode et le courant de fonctionnement, qui dépendent du rayonnement solaire incident et de la température des cellules. E. Matagne [4] propose le modèle à quatre paramètres qui néglige la résistance shunt, puisque elle est très grande comparée à la résistance série.

Avec cette supposition l'équation (1) peut être réécrite :

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left( \frac{V + R_s I}{A} \right) - 1 \right\} \quad (2)$$



**Figure 2 :** Caractéristique  $I$ - $V$  d'une cellule PV.

Pour décrire la caractéristique  $I$ - $V$  du générateur photovoltaïque qui contient plusieurs modules connectés en série et en parallèle (figure 2), il faut:

$$I_g = N_p \cdot I \text{ et } V_g = n_s \cdot N_s \cdot V,$$

où  $n_s$ ,  $N_s$ ,  $N_p$  sont le nombre de cellules en série dans un module et de modules en série et en parallèle dans le générateur ( $n_s = 36$ ).

Les caractéristiques du module:

$$P_{\text{crête}} = 53 \text{ W}, V_{oc} = 20.78 \text{ V}, I = 3.5 \text{ A}, E = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ à } 25^\circ\text{C}.$$

La charge nominale étant de 700W, nous prévoyons un générateur photovoltaïque de puissance  $P_g = 900 \text{ Wc}$  comprenant ( $N_s = 02$ ) modules en série et sept ( $N_p = 07$ ) modules en parallèle.

La puissance du générateur photovoltaïque est égale à :

$$P_g = V_g \cdot I_g \quad (3)$$

et la puissance maximale est obtenue pour :

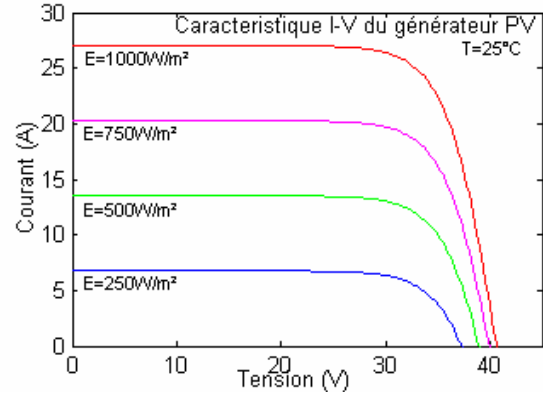
$$\frac{\partial P_g}{\partial V_g} = \frac{\partial I_g}{\partial V_g} V_g + I_g = 0 \quad (4)$$

$$I_{mg} + \frac{(I_{mg} - I_L - I_0) \left[ \ln \left( \frac{I_L - I_{mg}}{I_0} + 1 \right) - \frac{I_{mg} R_s}{A} \right]}{1 + (I_L + I_{mg} + I_0) \frac{R_s}{A}} = 0 \quad (5)$$

Les caractéristiques de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque sont déterminées par la méthode de Newton Raphson à partir des relations citées précédemment et en utilisant le logiciel Matlab 6p5.

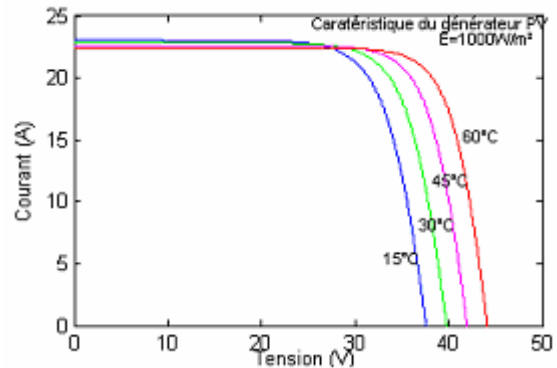
## 2. INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT ET DE LA TEMPÉRATURE SUR LA CARACTÉRISTIQUE $I$ - $V$

Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque dépendent de l'éclairement et de la température de jonction au niveau de la surface exposée, le courant de fonctionnement du générateur augmente de façon proportionnelle quand l'éclairement augmente (figure 3).



**Figure 3 :** Influence de l'éclairement sur  $I$ - $V$ .

Le comportement de la caractéristique  $I$ - $V$  d'un générateur PV en fonction de la température est complexe; lorsque la température augmente, la tension du générateur diminue, (pour une augmentation de  $15^\circ\text{C}$ ,  $V_{oc}$  diminue de 5V), inversement le courant augmente (figure 4).



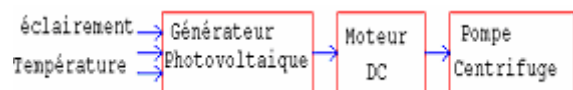
**Figure 4 :** Influence de la température sur  $I$ - $V$ .

## 3. COUPLAGE DIRECT DU MOTEUR CC AU GÉNÉRATEUR PV.

Les conditions de couplage seront

$$V_{ch} \leq V_{oc} \text{ et } I_{ch} \leq I_{cc} \quad (6)$$

Où,  $V_{ch}$ ,  $I_{ch}$  représentent respectivement la tension et le courant du groupe motopompe en régime nominal  $V_{oc}$ ,  $I_{cc}$  représentent respectivement la tension en circuit ouvert et le courant de court circuit du générateur PV (figure 5).



**Figure 5 :** Couplage direct.

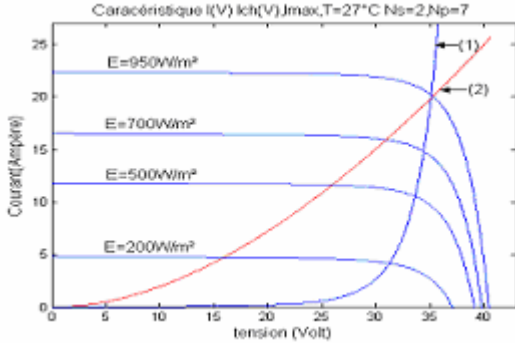
Si le courant et la tension du générateur sont égaux à l'intensité et la tension du moteur (figure 6), alors nous pouvons écrire,

$$V_{ch} = V_g \quad (7)$$

$$I_{ch} = I_g \quad (8)$$

$$C_{ch} = C_r \quad (9)$$

Avec  $V_g$  et  $I_g$  la tension et le courant du générateur photovoltaïque.

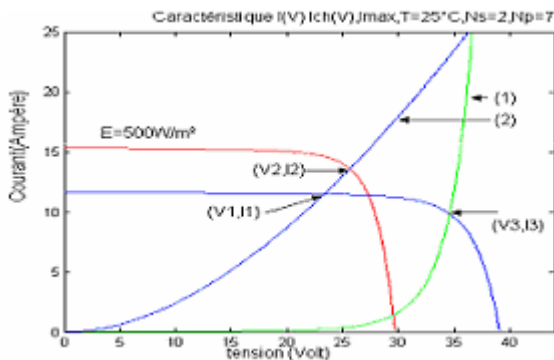


**Figure 6 :** Courbes I-V, (1)  $I_{max}$ -V. (2) Charge (motopompe).

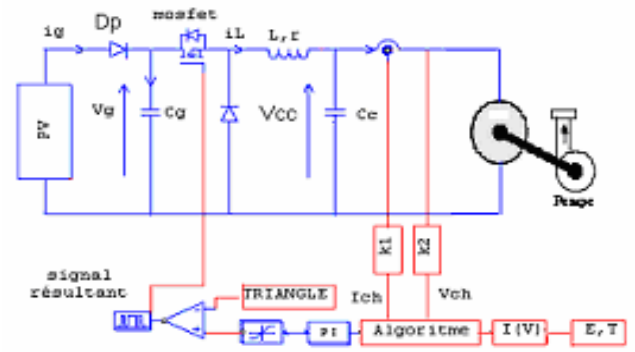
#### 4. COUPLAGE A TRAVERS UN CONVERTISSEUR

Si le groupe motopompe est couplé directement au générateur photovoltaïque, le point de fonctionnement du groupe motopompe est  $(V_1, I_1)$ . En intercalant entre le générateur et la charge, un convertisseur DC-DC qui consiste en un traqueur de puissance maximale (MPPT) plus un régulateur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui va pister le point de fonctionnement maximal du générateur photovoltaïque, on optimisera le fonctionnement de notre générateur et le couple moteur commence à augmenter de manière significative même à des niveaux bas de rayonnements.

Cela se traduit par un glissement du point de fonctionnement  $(V_1, I_1)$  vers le point de fonctionnement  $(V_2, I_2)$  où la tension et le courant sont plus grands. Le point  $(V_3, I_3)$  correspond au point de fonctionnement optimal du générateur avant optimisation (figure7).



**Figure 7 :** I-V avant et après optimisation.  
(1)  $I_{max}$ -V, (2) Charge.



**Figure 8 :** Schéma synoptique du modèle.

Le convertisseur DC-DC est un régulateur de conversion de puissance [5] inséré entre le générateur solaire et l'induit du moteur et qui fonctionne en modulation de largeur d'impulsion (MLI). Le rapport cyclique  $\rho$  ( $0 \leq \rho \leq 1$ ) donne le ratio de la tension du générateur à la tension aux bornes de la charge (figure 8).

La fréquence de hachage est suffisamment grande pour minimiser l'ondulation du courant, alors

$$V_{ch} = \rho \cdot V_g \quad (10)$$

$$I_{ch} = \frac{1}{\rho} \cdot I_g \quad (11)$$

La charge étant un moteur DC à flux constant couplé à une pompe centrifuge et dont les caractéristiques électriques sont les suivantes [5]:

$$V_n=32V, \quad I_n=22A, \quad P_n=700W, \quad R_a=0.24\Omega.$$

En négligeant la réaction d'induit et le phénomène de commutation, la tension du moteur sera égale à :

$$V_{mot} = R_a I_{mot} + L_a \frac{dI_{mot}}{dt} + k_e \cdot \omega \quad (12)$$

et le couple du moteur

$$C_{mot} = k_{mot} \cdot I_{mot} \quad (13)$$

La pompe centrifuge oppose un couple résistant

$$C_r = k_r \omega^2 + C_s \quad (14)$$

$k_e$  [V/rad.s<sup>-1</sup>],  $k_m$  [Nm/Ampère] et  $k_r$  [(Nm/rad.s<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>] sont des coefficients de proportionnalité, D'autre part nous avons l'équation mécanique

$$J_{mot} \frac{d\omega}{dt} = C_{mot} - C_r \quad (15)$$

Avec  $J_m$ , le moment d'inertie du groupe.

L'expression de la hauteur manométrique totale est donnée par :

$$h = a_0 \omega_r^2 - a_1 \omega_r Q - a_2 Q^2 \quad (16)$$

Avec  $a_0, a_1, a_2$ , coefficients donnés par le constructeur [6],

$a_0 = 4.923410^{-4} \text{ m}/(\text{rad}/\text{sec})^2,$   
 $a_1 = 1.5826.10^{-5} \text{ m}/(\text{rad}/\text{sec})(\text{m}^3/\text{h})$  et  
 $a_2 = -18144 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{sec})^2.$

La caractéristique du puits h (Q) :

$$h = h_s + k_{fr} \cdot Q^2 \quad (17)$$

Q: le débit de l'eau (m<sup>3</sup>/sec).

Le fonctionnement pour un rapport cyclique donné n'est pas constant, la tension d'alimentation varie lorsque l'éclairage varie, ce qui nous oblige à asservir la tension du générateur à une référence donnée.

Pour pouvoir s'adapter aux variations de l'éclairage et fonctionner au maximum de puissance, une seconde boucle de régulation est nécessaire afin de générer cette référence de tension du générateur. Elle sera obtenue par l'algorithme (A) dont les étapes sont les suivantes :

- L'information instantanée de l'éclairage et de la température détermine la puissance maximale du panneau.
- La détermination du point de fonctionnement  $I_{ch}, V_{ch}, P_{ch}$  et la comparaison de celui-ci au point optimal de puissance du générateur PV. On intègre dans le circuit un régulateur correcteur (PI) pour corriger le signal de référence (à hauteur de 3 % de sa valeur référentielle), et à la fin, on compare ce dernier avec un signal triangulaire.

**5. INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LE POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMAL : [7]**

En négligeant les pertes de puissance dues au couple statique  $C_s$ , (3% de la puissance nominale du moteur), pour un éclairage de 400W/m<sup>2</sup>, le gain en puissance est de 44% après optimisation (figure 9), il sera de 18% à 700W/m<sup>2</sup>.

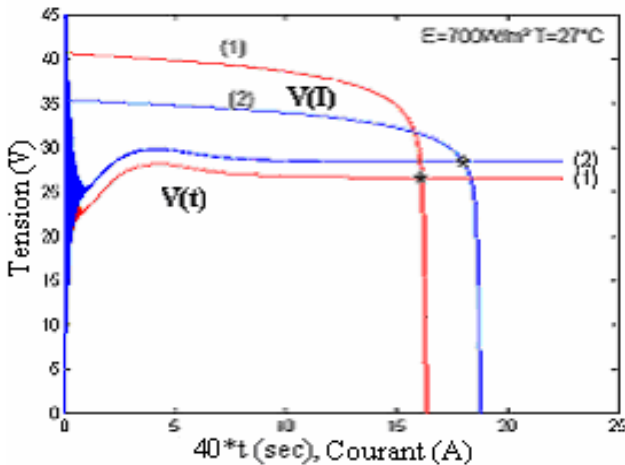


Figure 9 : Courbes V-I et V<sub>ch</sub>(t) à 700 W/m<sup>2</sup>. (1) sans, (2) avec optimisation.

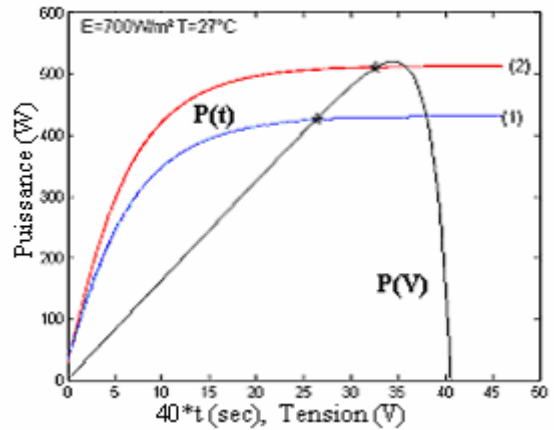


Figure 10 : P-V et P<sub>ch</sub>(t) à 700 W/m<sup>2</sup>. (1) sans, (2) avec optimisation.

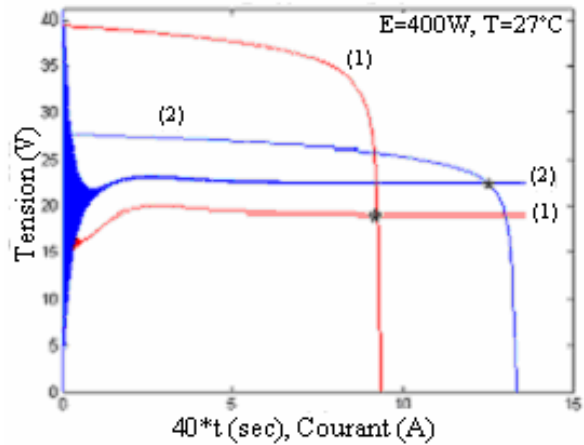


Figure 11 : Courbes I-V et I<sub>ch</sub>(t) à 400 W/m<sup>2</sup>. (1), (2) sans et avec optimisation.

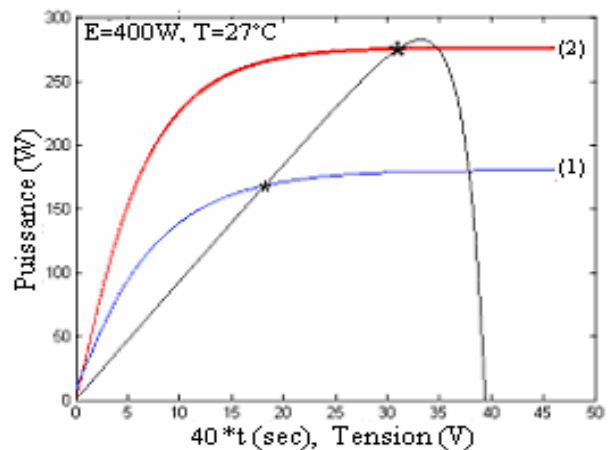


Figure 12 : P-V et P<sub>ch</sub>(t) à 400 W/m<sup>2</sup>. (1), (2) sans et avec optimisation.

## 6. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMAL :

Pour un éclairement constant de  $700\text{W/m}^2$ , une variation positive de  $7^\circ\text{C}$  à  $27^\circ\text{C}$ , entraîne 8% de pertes en puissance.

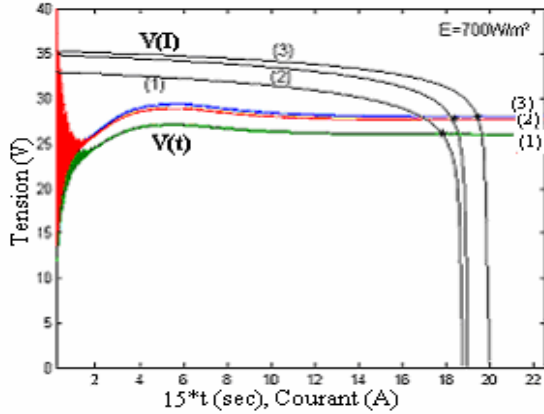


Figure 13 : Courbes  $I$ - $V$  et  $I_{ch}$  ( $t$ ) après optimisation  
(1)  $T=47^\circ\text{C}$ , (2)  $27^\circ\text{C}$ , (3)  $T=7^\circ\text{C}$ .

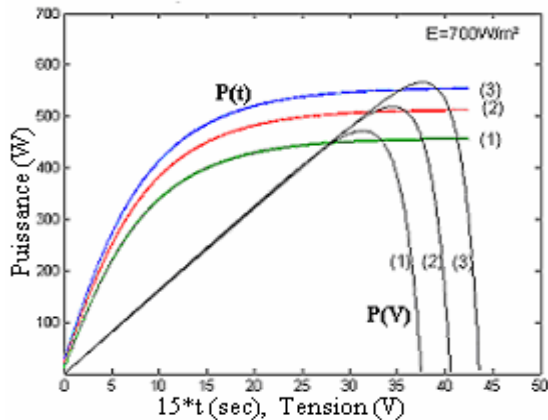


Figure 14 :  $P$ - $V$  et  $P_{ch}$  ( $t$ ) après optimisation.  
(1)  $T=47^\circ\text{C}$ , (2)  $27^\circ\text{C}$ , (3)  $T=7^\circ\text{C}$ .

Nous avons tracé les deux processus dynamique  $V$ - $t$  et statique  $V$ - $I$  sur le même graphique pour montrer l'effet de l'optimisation sur les courbes  $V$ - $t$  coïncidant avec le point optimal de fonctionnement du générateur PV.

## 5- ETUDE EN REGIME PERMANENT (AVEC ET SANS OPTIMISATION):

À partir des équations (12), (13) et (14), les termes contenant les dérivées tendant vers zéro, on obtient la caractéristique électrique du moteur:

$$V_{mot} = R_a I_{mot} + \left( k_e \sqrt{\frac{k_{mot}}{k_r}} \right) \cdot \sqrt{I_{mot}} \quad (18)$$

Le système d'optimisation améliore le rendement du moteur qui va travailler autour du point optimal de fonctionnement du générateur, la caractéristique de puissance de charge du moteur va glisser vers la bande des

puissances maximales du générateur, qui se situe entre 30 et 36V, pour un éclairement variant entre 350 et  $1025\text{W/m}^2$ .

La caractéristique hydraulique  $Q$ - $V$  est concentrée autour des points de fonctionnement de tension optimale sus-cités. Sans optimisation, le système met beaucoup de temps pour fonctionner, et le débit est médiocre.

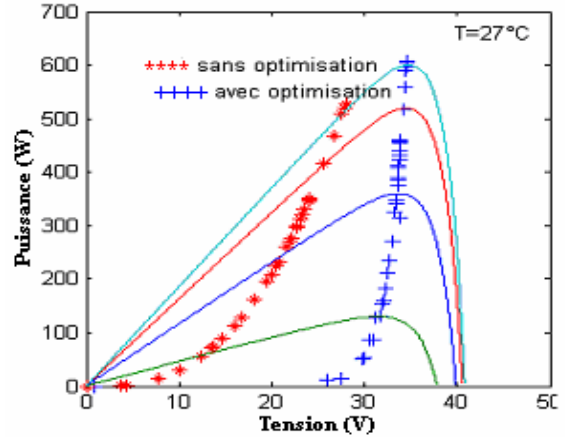


Figure 15 : Courbes  $P$ - $V$  et  $P_{ch}$ - $V$ .

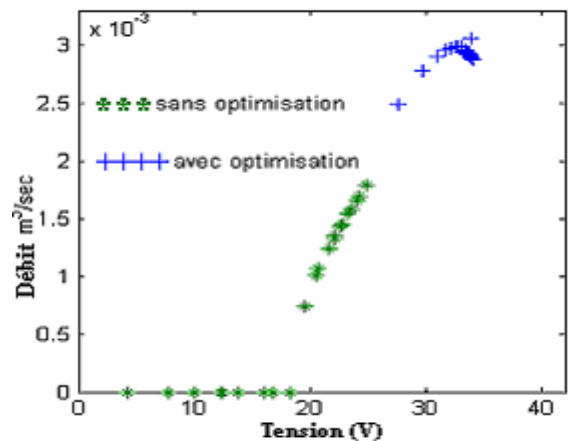


Figure 16 : Caractéristique  $Q$ - $V$  sans et avec optimisation.

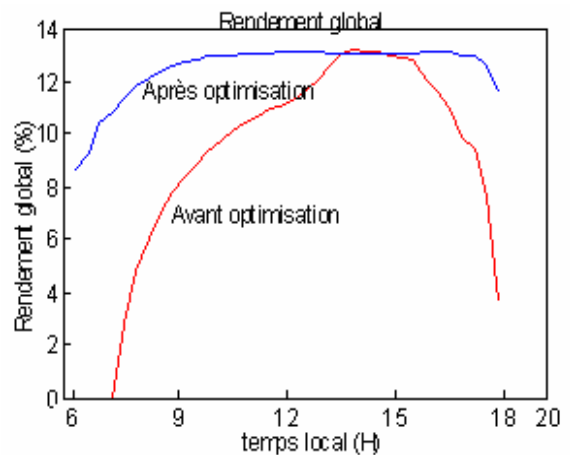


Figure 17 : Rendement global du système avant et après optimisation

Le rendement du groupe motopompe étant lié à la puissance du générateur, au débit et à la hauteur du puits, l'optimisation améliore ce rendement lors des bas éclairagements, il sera du même ordre de grandeur que celui du générateur photovoltaïque.

### CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté les principales caractéristiques d'un système photovoltaïque permettant le pompage de l'eau avec de l'énergie solaire. Un générateur photovoltaïque débitant sur un convertisseur électronique de puissance dépitant le point optimal de fonctionnement est présenté.

Le modèle électrique du système, est simulé à l'aide du logiciel MATLAB 6p5 pour différents éclairagements et températures solaires, et l'influence des paramètres éclairagement et température sur les caractéristiques  $I-V$  et  $P-V$  est présentée.

Le modèle montre que l'optimisation est plus importante aux bas éclairagements. Inversement à la température qui abaisse le point optimal de fonctionnement.

### REFERENCES

- [1] R. Chenni, M. Makhlouf, T. Kerbache and A. Bouzid. A detailed modeling method for photovoltaic cells". Energy Elsevier. In Press, corrected proof, Available online 15 February 2007.
- [2] J. A. Gow & al Manning "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol. 146, no. 2, pp.193-200, March 1999.
- [3] Duzat R. «Analytic and experimental investigation of a photovoltaic pumping system», PhD thesis, Oldenburg University 2000.
- [4] E. Matagne, R. Chenni, R. El Bachtiri. « A photovoltaic cell model based on nominal data only ». Int Conf on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Setubal, Portugal, 12-14<sup>th</sup> April 2007.
- [5] M.F. Mimouni, M.N. Mansouri, B. Benghanem. Vectorial command of an asynchronous motor fed by a photovoltaic generator. Renewable Energy Elsevier 29, 433-442. 2004.
- [6] A. Hamidat, A. Hadj Arab, F.chenlo and M.A. Abella. Performances costs of the centrifugal and displacement pumps. pp1951-1954. WREC, 1998.
- [7] R. Chenni & al «Comparative study of photovoltaic pumping system using a permanent magnet synchronous motor and an asynchronous motor» Rev. Energ. Ren. (CDER). Vol. 9, pp17 – 28, 2006.