

Simulation du Couplage Directe d'un moteur à Courant Continue à un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Agricole

Bouadi Abed*, LOUNIS Mourad**, BEN MEZIANE Meriem*

* LAMOSI, Faculté de Physique – USTO MB abed_bou@yahoo.fr

** LAAR, Faculté de Physique – USTO MB loumou2000@yahoo.fr

** Université Djilali Bounaama – Khemis Miliana

Résumé – Dans cet article, le comportement du système de pompage solaire sera analysé par des simulations. Pour mieux comprendre certains régimes propres au système et surtout le moteur à courant continu à aimant permanent, nous allons montrer à priori les résultats de simulation de l'ensemble moteur-pompe-circuit hydraulique tout en alimentant directement le moteur à partir d'une tension continue fixe, puis nous associons à cet ensemble un générateur solaire qui alimente directement, le moteur d'entraînement de la pompe.

Mots clés – Photovoltaïques, Pompage agricole, Moteur à courant continue.

1. Introduction

Le modèle global de notre système de pompage solaire est la combinaison ou l'association des différentes modélisations des éléments qui le constituent à savoir

- Les panneaux photovoltaïques (GPV).
- Le moteur à courant continu à aimant permanent (MCCAP).
- La pompe centrifuge.
- Le circuit hydraulique.

Chacun de ces éléments constitutifs du système de pompage solaire a été programmé sous l'environnement "Matlab & Simulink". Globalement, le système de pompage solaire a des entrées fluctuantes qui sont les variables météorologiques à savoir l'ensoleillement E et la température ambiante T. Sa sortie est le débit d'eau pompée Q.

La figure qui suit montre le schéma bloc développé pour la simulation du système de pompage solaire.

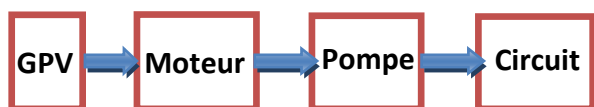


Fig.1 Système de pompage couplé directement à la source solaire.

Comme l'indique le schéma de la figure ci-dessus, le panneau photovoltaïque délivre une

tension continue suite à un appel de courant du moteur. Celui-ci sera transmis à son tour au générateur solaire et tout ça en fonction de l'ensoleillement disponible et de la température des cellules. Le moteur à CC transforme la tension d'alimentation à ses bornes en une vitesse de rotation et un couple électromagnétique qui dépendent du couple résistant à son arbre en un appel de courant du panneau photovoltaïque.

Finalement, en fonction de la vitesse de rotation du moteur, la pompe soulève l'eau à la hauteur imposée par le biais du circuit hydraulique avec un débit Q. En fonction de ce dernier et de la hauteur géodésique, le circuit hydraulique renvoie une hauteur manométrique totale à la pompe qui la transforme à son tour en un couple résistant imposé sur l'arbre du moteur.

Le passage des entrées vers la sortie passe par l'écriture de plusieurs équations différentielles ; ainsi, l'estimation de la sortie en fonction des entrées n'est pas évidente. Le modèle du système régi par ces différentes équations sera destiné à la visualisation ou l'analyse des régimes transitoires qui ne dépassent pas quelques secondes. Pour estimer la quantité d'eau pompée en fonction de l'ensoleillement disponible, il est conseillé d'utiliser d'autres modèles simplifiés.

2. Simulation de fonctionnement du groupe (MCCAP-Pompe)

Pour mieux comprendre le comportement du système de pompage lors de l'utilisation de l'énergie solaire, nous allons d'abord montrer certains phénomènes propres au système et ceci lors de l'alimentation directe du moteur à partir d'une source de tension continue fixe puis à partir du GPV.

2.1. Alimentation du groupe moteur-pompe par une tension continue fixe

On alimente notre système avec une tension continue de 180 V pour montrer le comportement du moteur.

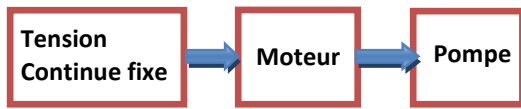


Fig.2 Système de pompage couplé à la source continue fixe.

2.1.1. Modélisation du moteur à aimant permanent

Modèle électrique équivalent de l'induit :

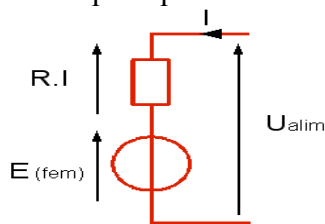


Fig.3 Modèle électrique de l'induit.

La modélisation du moteur est réalisable à partir des équations de base de la machine à courant continu [2].

Equation électrique du moteur	Equation mécanique du moteur
$U = RI + L \frac{di}{dt} + E \quad (1)$	$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (4)$
$E = K_e * \Omega \quad (2)$	Le rendement
$C_{em} = K_t * I \quad (3)$	$\eta = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance fournie}} = \frac{P_U}{P_F} \quad (5)$

2.1.2. Résultats de simulation du moteur à aimant permanent

Les Figures 5 et 6 représentent la variation du courant et du couple électromagnétique du moteur en fonction du temps.

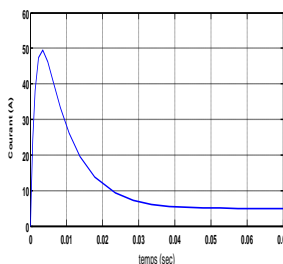


Fig.5 Variation du courant du moteur

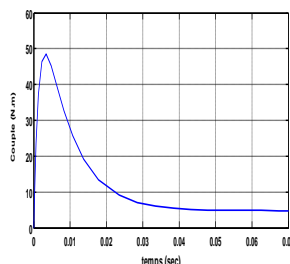


Fig.6 Variation du couple

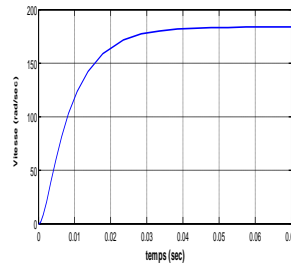


Fig.7 Variation de la vitesse

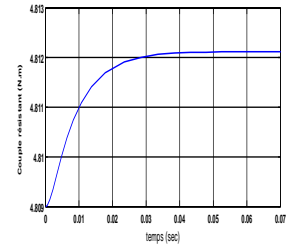


Fig.8 Variation du couple résistant

On remarque sur la Figure 5, au démarrage, un fort appel de courant (à peu près 9 fois le courant nominal).

La Figure 6 montre que le couple est proportionnel au courant, donc important au démarrage. Les Figures 7 et 8 représentent la variation de la vitesse et le couple résistant du moteur en fonction du temps. Au démarrage la vitesse de rotation et la f.é.m. sont nulles. Le couple résistant est proportionnel à la vitesse.

2.1.3. Résultats de simulation de la pompe centrifuge

La charge appliquée sur l'arbre du moteur est une pompe centrifuge conçue 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 Plaindre et Petermann [1].

$$C_r = K_r \cdot \omega^2 + C_s \quad (6)$$

Au démarrage, le couple est limité au couple de frottement, (qui devient plus important en rotation).

La pompe requiert une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit de départ non nul [6]. Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r qui est de la forme :

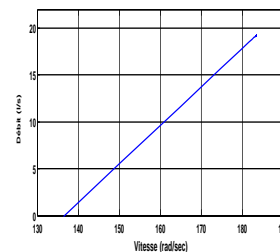


Fig.9 Caractéristiques débit – vitesse

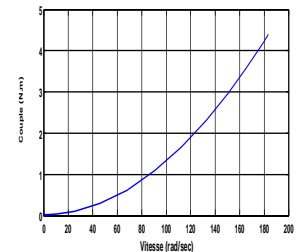


Fig.10 Caractéristique couple – vitesse

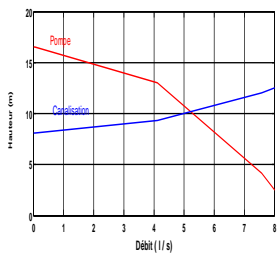


Fig.11 Caractéristiques de la pompe $H_m(Q)$ et de la canalisation

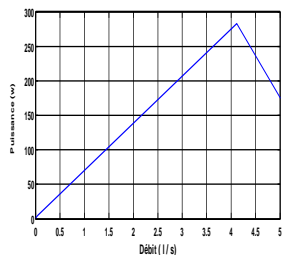


Fig.12 Caractéristique de la puissance hydraulique

Nous remarquons dans la Figure 9 que le débit de cette pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois une vitesse minimale de 136 rad/s pour une H_m de 16m est requise pour obtenir un débit.

La Figure 10 montre que le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de cette vitesse. Comme la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur, le moteur devra avoir une grande vitesse pour assurer un bon débit.

La courbe $H_m(Q)$ indiquée sur la figure 11 est une parabole. Le point de rencontre de la courbe $H_m(Q)$ avec l'axe des ordonnées est le point à débit nul. On l'appelle point à vanne fermée ou encore point de barbotage [4].

Le point de fonctionnement de la pompe est le point d'intersection des deux courbes (figure 11).

La courbe de la figure 12, des puissances absorbées pour les différents débits peut présenter un maximum dans la plage utilisable. Cette dernière forme de courbe permet d'éviter une surcharge du moteur si les conditions d'utilisation de la pompe sont appelées à varier.

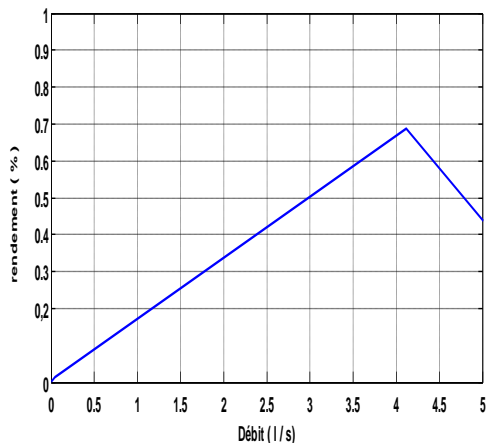


Fig.13 Caractéristique de rendement.

La Figure 13 montre que généralement que le rendement de la pompe ne dépasse pas les 70 %.

2.2. Alimentation du groupe motopompe par le GPV

2.2.1 Le couplage direct : Ce couplage est illustré dans la figure 14 L'énergie solaire est convertie en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. Le courant continu produit par les panneaux solaires va actionner directement le groupe moteur pompe. Les panneaux solaires sont des éléments statiques, la seule partie en mouvement du système est le groupe moteur-pompe.

L'éclairement est variable de la valeur minimale jusqu' à la valeur maximale de $1000W/m^2$.

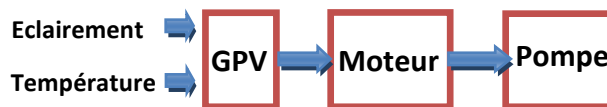


Fig.14 Couplage direct d'un système de pompage photovoltaïque

2.2.2. Modélisation de la cellule solaire :

Le modèle électrique réel d'une cellule solaire se compose d'une diode, deux résistances et un générateur de courant [5].

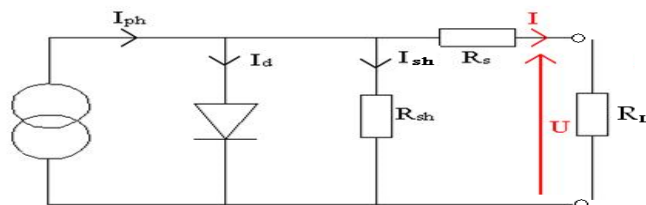


Fig.15 Modèle électrique de la cellule

Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à la diode et aux effets de bord de la jonction [8].

Dans ces conditions l'expression générale du courant donnée par :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (7)$$

Le courant d'obscurité I_D est donné par :

$$I_D = I_s [\exp((V + R_s I)q/kT) - 1] \quad (8)$$

$$I_{sh} = (V + R_s I)/R_{sh} \quad (9)$$

En pratique $R_{sh} \gg R_s$ donc on peut négliger I_{sh} et conséquence :

$$I = I_{ph} - I_s [\exp((V + R_s I)q/kT) - 1] \quad (10)$$

En circuit ouvert le courant est nul donc :

$$I = 0, V_{co} \approx \left(\frac{kT}{q}\right) \log[(I_{cc} + I_s)/I_s] \approx kT/q \log I_{cc}/I_s \quad (11)$$

La puissance fournie par cette pile s'écrit sous la forme :

$$P = VI = V \left[I_{ph} - I_s [\exp((V + R_s I)q/kT) - 1] \right] \quad (12)$$

Le maximum de la puissance fournie correspond à la tension V_m et un courant I_m qui se déduit de la relation $\frac{dP}{dV} = 0$. La résistance de charge R_L permettant d'utiliser la puissance maximale est :

$$R_L = V_m/I_m \quad (13)$$

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser R_s de telle sorte que R_{sh} soit très important.

Le photo-courant I_{ph} varie avec l'irradiance, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence :

$$I(V) = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{U_t}\right) - 1 \right] \quad (14)$$

2.2.3. Simulation : Les résultats de la simulation d'un module photovoltaïque sont montrés sur les figures suivantes (Figure 16, Figure 17).

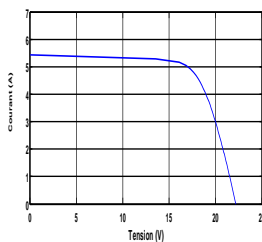


Fig.16 Caractéristique Courant-Tension

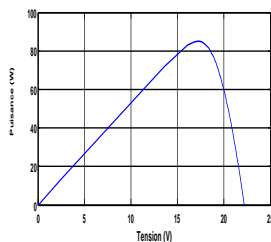


Fig.17 Caractéristique Puissance-Tension

2.2.3.1. Effet de l'ensoleillement et de la température sur les caractéristiques Puissance – Tension et Courant – Tension d'un module PV

Deux principaux paramètres influents sur le fonctionnement du générateur, ce sont l'éclairement et la température [9]. Les Figures 18 et 19 représentent les caractéristiques I_{pv} (V_{pv}) et P (V_{pv}) pour diverses valeurs d'éclairement (E) et de température de jonction d'un module (T).

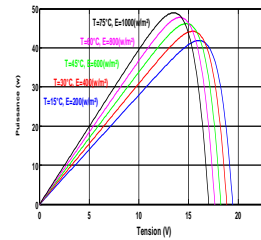


Fig.18 Variation de la caractéristique Puissance-Tension

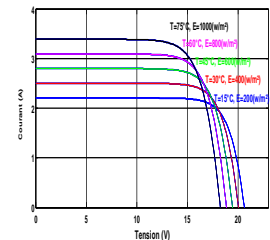


Fig.19 Variation de la caractéristique Courant-Tension

2.2.3.2. Le rendement et la quantité d'eau du système en couplage direct

$$\eta_h = \frac{Ph}{Pe} = \frac{\rho.g.Q.H.m}{E.Ns.Np.S} \quad (15)$$

Q : La quantité d'eau et est donnée selon [1] par la relation suivante :

$$Q = \begin{cases} 0 & \text{si } E < Et \\ \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(E-c)}}{2a} & \text{si } E > Et \end{cases} \quad (16)$$

$E_t = 1000 \text{ W/m}^2$; a , b et c constantes.

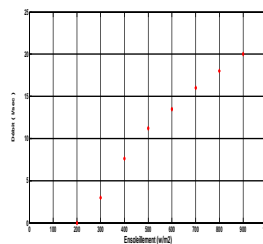


Fig.20 Débit en couplage direct

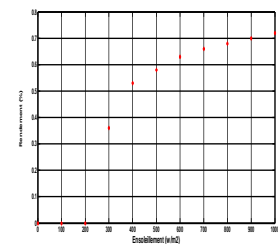


Fig.21 Rendement en couplage direct

La figure 21 représente les variations du rendement en fonction de l'éclairement. D'après ces résultats, le système fonctionne dans la zone 3 seulement pour des valeurs d'éclairement élevées où le débit est maximal et peut atteindre environ $10.5 \text{ (m}^3/\text{s)}$. Sur la figure

21, nous remarquons que pour des faibles valeurs d'éclaircement, les points de fonctionnement s'éloignent de la puissance optimale. Le système fonctionne alors sur la zone 1, où le rendement faible, de l'ordre de 32 %. Pour le couplage direct, le système moteur pompe ne fonctionne qu'à partir de 300W/m². Au rayonnement solaire de 700W/m², nous atteignons une performance qui nous permet un débit optimal d'eau pour un rendement maximal. Le moteur fonctionne en mode nominal.

3. Conclusion

Nous avons présenté les principales caractéristiques d'un système photovoltaïque permettant le pompage de l'eau avec de l'énergie solaire. Le couplage direct, présente la simplicité, le coût faible et la possibilité de bonnes performances. Les résultats sont très satisfaisants. Même pour de faibles valeurs d'ensoleillement, on a une valeur minimale du débit. Le rendement du groupe moteur-pompe est acceptable pour des valeurs minimales d'ensoleillement et il est excellent pour des valeurs plus importantes [7].

Nomenclature

K_p : coefficients de proportionnalité [(Nm/rad.s⁻¹)²]; C_s : le couple statique, très petit.
 I : Courant fourni par la cellule [A]; V : Tension à la borne de la cellule [V]
 I_{ph} : Photo courant [A], proportionnel à l'irradiance F , avec correction selon T ;
 I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A];
 R_s : Résistance série [W]; R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [W];
 q : Charge de l'électron = 1,602. 10⁻¹⁹ [Coulomb]; k : Constante de Boltzmann = 1,38. 10⁻²³ [J/K];
 A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2;
 T : Température effective de la cellule [Kelvin]; R : Résistance des enroulements de l'induit [Ω];
 E : Force électromotrice induite [V]; U : Tension d'alimentation de l'induit [V].

4. Références

[1] R. CHENI, L. ZAROUR, E. MATAGNE, T. KERBACHE, "Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque", article de science et technologie B-N°26, décembre (2007), 49-54.
[2] B. Azoui, M. Chabane. "Expérimentation D'un Moteur A Aimants Permanents Sans Balais Collecteur Dans Un Système De Pompage Photovoltaïque", ICEL`2000, U.S.T.Oran, Algeria, pp:378-383.

[3] A. Betka, A. Moussi and B. Azoui, "Optimum design of photovoltaic pumping system", UPEC99, Leicester UK, 1999.
[4] P. Bigot, "meca-flu v": les pompes Cours CIRA 1ère année, p3
[5] D. Saheb-Koussa ; M. Haddadi, "Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans l'environnement « Matlab »", 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007.
[6] A. MOUSSI, A. SAAFI "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque", LARHYSS Journal, N°01, Mai 2002 d'Ottawa/EIER/CREPA.
[7] El Y. Chachoua-Harmim, A. Harmim et A. Mammeri, "Expérimentation d'un système de pompage photovoltaïque avec un générateur refroidi par ruissellement d'eau et équipé d'un réflecteur plan", *Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 63 - 68*.
[8] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays"; IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009.
[9] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. Ruppert F "MODELING AND CIRCUIT-BASED SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS"; Brazilian Journal of Power Electronics, 2009 vol. 14, no.1, pp 35—45, ISSN 1414-8862.