

## Commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque au fil du soleil

A. Meflah<sup>1\*</sup> et T. Allaoui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables  
Université Abou bakr Belkaïd, B.P. 119, Tlemcen, Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie Electrique, Département des Sciences et de Technologie  
Université Ibn Khaldoun, Zaaroura, 14000, Tiaret, Algérie

(reçu le 03 Novembre 2011- accepté le 29 Septembre 2012)

**Résumé** - L'objectif de ce mémoire est d'assurer une commande vectorielle associée à une électropompe asynchrone immergée. La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque, un bus PV, un filtre PV connecté à un hacheur survolteur, un bus DC et un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone couplée à une pompe centrifuge. L'objectif de ce système consiste à assurer un fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque pour diverses conditions climatiques. L'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge a été effectuée moyennant le convertisseur DC/DC.

**Abstract** - The objective of this thesis is to provide a vector control combined with an electric asynchronous motor. The configuration of this system includes a photovoltaic generator, a PV bus, a PV filter connected to a boost converter, a DC bus and a voltage inverter fed induction machine coupled to a centrifugal pump. The objective of this system is to ensure operation at maximum power of PV system for various climatic conditions. The matching between the photovoltaic generator and the load was determined by the DC / DC converter.

**Mots clés:** Photovoltaïque - Contrôle MPPT - Machine asynchrone – Hacheur - Onduleur.

### 1. INTRODUCTION

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque.

Le système de pompage PV est généralement composé d'un générateur PV, d'un convertisseur d'énergie, d'un moteur et d'une pompe.

La machine asynchrone occupe un domaine très important dans l'industrie et les transports. Elle est appréciée pour sa robustesse, son faible coût d'achat et d'entretien. Sa commande est par contre plus difficile à réaliser que pour d'autres machines électriques.

De nombreuses stratégies ont été développées pour en faire une machine qui dépasse les autres, même dans les systèmes commandés.

En général, la commande de la machine asynchrone se divise en deux classes:

- Commande de faible coût et faible performance (par exemple la commande V/f).
- Commande à haute performance avec un coût raisonnable, par exemple CVFO (commande vectorielle par flux orienté) qui assure une dynamique élevée.

---

\* walid.aissa@yahoo.fr

La commande vectorielle est apparue avec les travaux de Blaschke [1]. Elle n'a cependant pas eu tout de suite un grand essor, car les régulations, à l'époque, reposaient sur des composants analogiques, l'implantation de la commande était alors difficile.

Avec l'avènement des microcontrôleurs et des dispositifs permettant le traitement du signal (DSP), il est devenu possible de réaliser une telle commande à un coût raisonnable.

Nous commençons, par une modélisation de tous les sous-systèmes en vue de la commande de la machine. Ensuite, nous expliquerons le principe de la CVFO.

Enfin, des résultats de simulation établis en boucle fermée sont présentés, permettent d'illustrer la validité et les performances de la commande étudiée.

## 2. MODELISATION DU SYSTEME

Le système de pompage est l'association d'un ensemble de sous-systèmes interconnectés qui sont: le générateur photovoltaïque, le hacheur adaptateur, d'impédance 'MPPT', l'onduleur de tension, le moteur à induction à cage et la pompe centrifuge associée à une canalisation de refoulement.

La figure 1 schématise le synoptique d'un tel système.

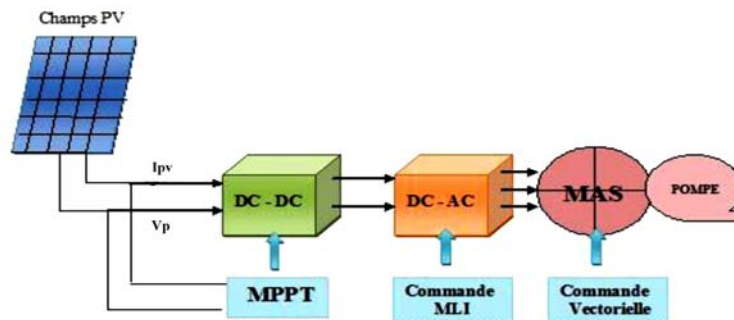


Fig. 1: Synoptique du système

### 2.1 Modèle du générateur photovoltaïque 'GPV'

Le GPV présente une caractéristique courant/tension très fortement non linéaire qui résulte directement du comportement des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de sa réalisation. Les études effectuées par les spécialistes des divers domaines d'application ont conduit au développement de nombreux modèles de générateurs.

Soit un 'GPV' constitué de  $N_{bp}$  branches en parallèles et chaque branche composée de  $N_{ms}$  modules en série comportant à leur tour  $N_{cs}$  cellules en série [2].

Le fonctionnement de ce générateur est modélisé par l'expression analytique approchée suivante:

$$I_p = N_{bp} \times \left[ I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V_p}{V_T \times N_{cs} \times N_{ms}}} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

$$I_{ph} = q \times g \times (L_n + L_p) \quad (2)$$

$$V_T = \frac{n \times K_B \times T}{q} \quad (3)$$

Avec:  $I_{ph}$ , le photo-courant de la cellule (A).  $E$ , l'éclairement solaire global ( $W/m^2$ ).  $I_s$ , le courant de saturation inverse de la diode (A).  $V_T$ : le potentiel thermodynamique d'une cellule (V).  $I_p$ , le courant fourni par le GPV (A).  $L_n$ , la Longueur de diffusion des électrons (m).  $L_p$ , la longueur de diffusion des trous (m).  $g$ , le taux de génération-recombinaison ( $m^3/s$ ).  $V_p$ , la tension de sortie aux bornes du GPV (V).  $n$ , le facteur d'idéalité de la photopile.  $T$ , la Température en K.  $K_B$ , la constante de Boltzmann =  $38 \times 10^{-23}$  J/K.  $q$ , la charge d'un électron =  $1.6 \times 10^{-19}$  C.

Le générateur photovoltaïque utilisé dans ce système est composé de huit (08) modules, type 'Shell SP75', dont les caractéristiques, sont présentées au **Tableau 1**.

## 2.2 Modèle du hacheur survolteur

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 (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  $R1//C1$  afin de transposer la charge à une source de tension [3].

Le schéma de base est illustré par la figure 2.

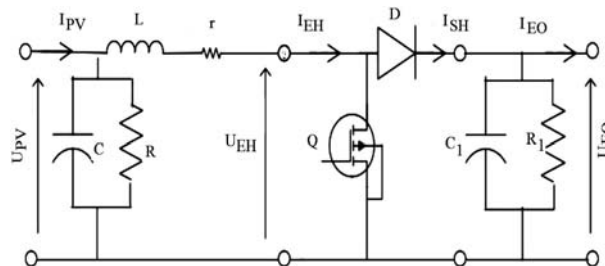


Fig. 2: Le schéma de base d'un hacheur survolteur

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 variable  $\alpha$  sont définis par les relations suivantes:

$$\begin{cases} T = t_{ON} + t_{OFF} \\ \alpha = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \end{cases} \quad (4)$$

### 2.3 La commande de poursuite MPPT P&O

Plusieurs d'algorithmes 'MPPT' ont été proposés dans la littérature, y compris le P&O (Perturbation et Observation), 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 PV [4]. L'algorithme 'P&O' est détaillé dans la figure 3.

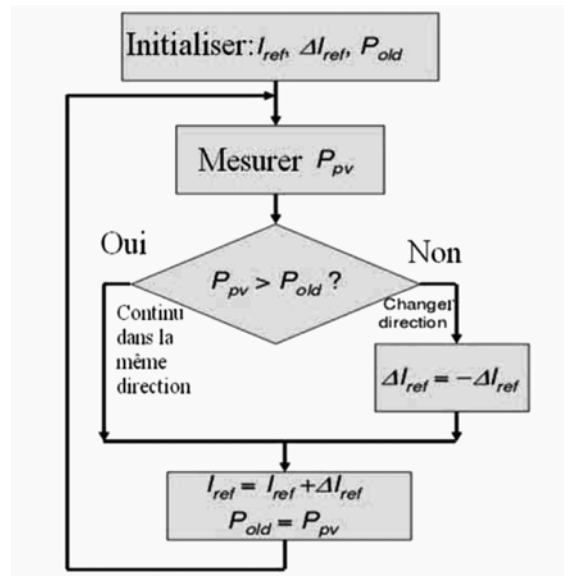


Fig. 3: Algorithme 'MPPT P&O'

### 2.4 Modèle de l'onduleur MLI

L'onduleur triphasé est constitué de trois bras indépendants, comprend chacune deux interrupteurs. Chaque interrupteur est composé d'un transistor (IGBT, MOSFET,...) et d'une diode montée en antiparallèle. Pour éviter de soumettre la sortie du GPV à des surtensions provenant de l'onduleur, on insère entre ces deux éléments un condensateur [5].

La tension aux bornes du condensateur est égale à  $V_p$ , son courant  $i_c$  a pour expression:

$$i_c = C \times \frac{dv_p}{dt} \tag{5}$$

En exploitant la loi des nœuds, on aura:

$$i_c = i_p - i_{e0} \tag{6}$$

La relation qui relie le courant d'entrée et les courants de sortie de l'onduleur est donnée par l'expression suivante:

$$i_{e0} = i_a \times C_1 + i_b \times C_2 + i_c \times C_3 \tag{7}$$

Les interrupteurs de chaque bras de l'onduleur sont complémentaires. Il en est de même pour les signaux associés de commande, [5]. On peut donc écrire:

$$C_4 = 1 - C_1 \qquad C_5 = 1 - C_2 \qquad C_6 = 1 - C_3 \tag{8}$$

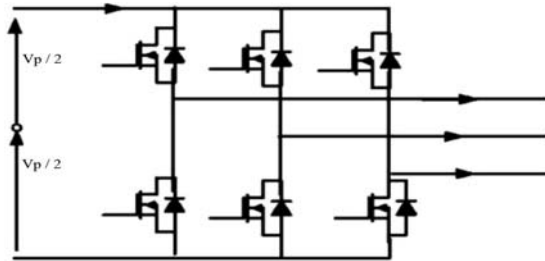


Fig. 4: Onduleur de tension MLI

### 2.5 Modèle du moteur à induction

Le moteur à induction est modélisé, selon le schéma équivalent conventionnel (Fig. 5):

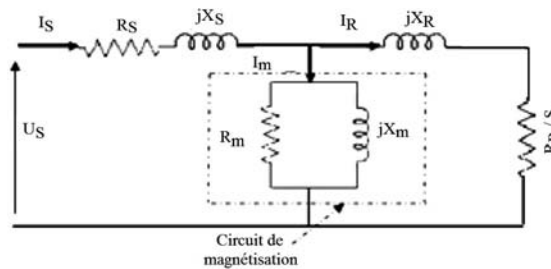


Fig. 5: Schéma équivalent du moteur à induction

Avec:  $I_s$ , le courant primaire (A).  $I_r$ , le courant secondaire (A).  $I_m$ : le courant de magnétisation (A).  $R_{st}$ , la résistance d'une phase statorique du moteur ( $\Omega$ ).  $R_r$ , la résistance d'une phase rotorique ( $\Omega$ ).  $R_m$ , la résistance de magnétisation ( $\Omega$ ).  $X_s$ , la réactance de fuites d'une phase statorique ( $\Omega$ ).  $X_r$ , la réactance de fuites d'une phase rotorique ( $\Omega$ ).  $X_m$ , la réactance de magnétisation ( $\Omega$ ).

Les forces induites dans les enroulements primaires et secondaires ont comme expressions:

$$\begin{cases} E_S = N_S \times f_S \times \Phi \\ E_R = N_R \times f_R \times \Phi \end{cases} \quad (9)$$

avec,  $\Phi$ , le flux magnétique (Weber).  $N_S$  et  $N_R$ , le nombre de spires des enroulements primaire et secondaire.  $f_S$  et  $f_R$ , les fréquences des enroulements primaire et secondaire.

On en déduit:

$$\frac{E_S}{E_R} = \frac{1}{g} \times a_E \quad (10)$$

avec,  $f_R = g \times f_S$ , et  $a_E$  qui représente le rapport de transformation des tensions.

Les forces magnétomotrices sont données par:

$$\begin{cases} F_S = N_S \times I_S \\ F_R = N_R \times I_R \end{cases} \quad (11)$$

## 2.6 Modèle de la pompe centrifuge

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur.

$$C_r = K_{ch} \times \omega^2 \quad (12)$$

avec,  $K_{ch}$ , qui désigne la constante de proportionnalité et  $\omega$ , la vitesse de rotation du moteur.

Connaissant les performances d'une pompe centrifuge ( $Q$ ,  $H$  et  $P$ ) pour la vitesse  $N$ , les lois de similitude permettent de déterminer les performances ( $Q'$ ,  $H'$  et  $P'$ ) pour une vitesse  $N'$  en utilisant les relations suivantes:

$$Q' = Q ; H' = H , P' = P \quad (13)$$

avec,  $Q$  et  $Q'$ , les débits correspondants respectivement à la vitesse  $N$  et  $N'$ ,  $H$  et  $H'$ , les hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse  $N$  et  $N'$ ,  $P$  et  $P'$  sont les puissances du moteur correspondant respectivement à la vitesse  $N$  et  $N'$ .

## 3. LA COMMANDE VECTORIELLE CVFO

Le principe de cette commande est de réduire l'équation de couple électromagnétique de la machine afin d'être comparable à celle d'une machine à courant continu.

Le couple en régime transitoire s'exprime dans le repère ( $d, q$ ) comme un produit croisé de courants ou de flux:

$$C_e = p \times \frac{M}{L_r} \times (\varphi_{dr} \times i_{qs} - \varphi_{qr} \times i_{ds}) \quad (14)$$

On s'aperçoit que si l'on élimine le deuxième produit ( $\varphi_{qr}, i_{ds}$ ), alors le couple ressemblerait fort à celui d'une machine à courant continu. Il suffit, pour ce faire, d'orienter le repère ( $d, q$ ) de manière à annuler la composante de flux en quadrature.

C'est-à-dire, il faut choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct ( $d$ ) et donc d'avoir  $\varphi_{qr} = 0$ . Ainsi  $\varphi_r = \varphi_{qr}$  uniquement (Fig. 6).

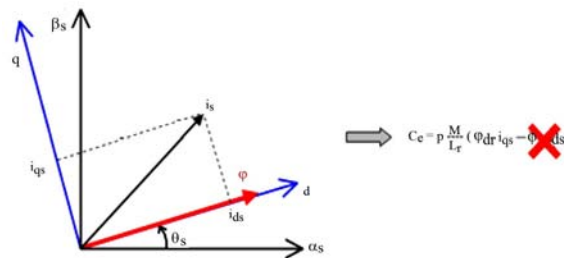


Fig. 6: Principe du contrôle vectoriel

Le couple s'écrit alors:

$$C_e = p \times \frac{M}{L_r} \times (\varphi_{dr} \times i_{qs}) \quad (15)$$

Il convient de régler le flux en agissant sur la composante  $i_{ds}$  du courant statorique et on règle le couple en agissant sur la composante  $i_{qs}$ .

On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une 'MCC'. Une stratégie consiste à laisser la composante  $i_{ds}$  constante. C'est-à-dire, il faudrait fixer sa référence de manière à imposer un flux nominal dans la machine. Le régulateur du courant  $i_{ds}^*$  s'occupe de maintenir le courant  $i_{ds}$  constant et égal à la référence  $i_{ds}^*$  ( $i_{ds} = i_{ds}^*$  référence).

Le flux étant constant dans la machine, on peut imposer des variations de couple en agissant sur le courant  $i_{qs}$ .

Si l'on veut accélérer la machine, donc augmenter sa vitesse. On impose une référence courant  $i_{qs}^*$  positive. Le régulateur du courant  $i_{qs}$  va imposer ce courant de référence à la machine. [6]

On peut également automatiser le pilotage de cette référence de courant  $i_{qs}^*$  en la connectant à la sortie d'un régulateur de vitesse. C'est ce dernier qui pilotera le couple de référence (et donc  $i_{qs}^*$ ), puisqu'il agira au mieux de manière à asservir la vitesse à une vitesse de consigne  $\Omega^*$ .

La figure 7 résume cette régulation puisqu'elle représente le schéma de contrôle vectoriel de la machine asynchrone avec une régulation de vitesse et la régulation des deux courants  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ .

Ces deux courants sont régulés par deux boucles de courants dont les sorties sont les tensions de références  $v_{ds}^*$  et  $v_{qs}^*$  dans le repère (d, q).

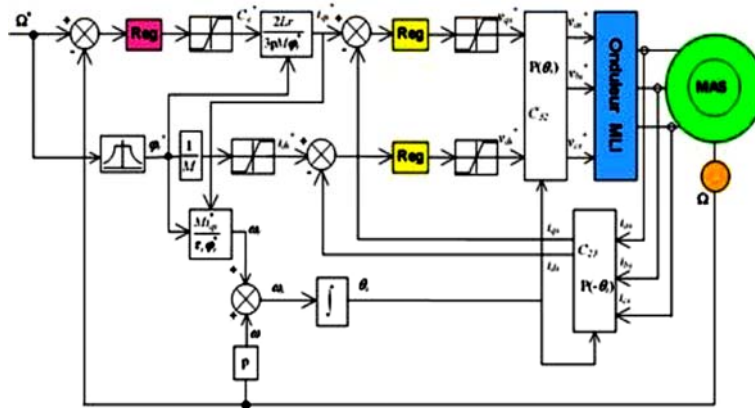


Fig. 7: Schéma de régulation de vitesse de la MAS en CVFO

#### 4. RESULTATS DE SIMULATION

Dans le cadre de cette application, le choix des valeurs a été fixé.

**Tableau 1:** Caractéristiques électriques du GPV 'Shell SP 75'

Paramètres électriques du module dans les conditions standards Eclairement $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , Température cellule $T = 25^\circ\text{C}$	
Puissance crête maximale, $P_m$	75 W
Tension maximale, $V_m$	17 V
Courant Maximal, $I_m$	4.4 A
Tension de circuit ouvert, $V_{co}$	21.7 V
Courant de court-circuit, $I_{cc}$	4.8 A

**Tableau 2:** Caractéristiques moteur asynchrone '3 HP Drive'

Tension	$V = 75 \text{ W}$
Résistances statoriques du moteur	$R_s = 0.01485 \Omega$
Résistances statoriques du moteur	$R_r = 0.00929 \Omega$
Inductances propres d'un enroulement du stator	$L_s = 0.3027 \text{ mH}$
Inductances propres d'un enroulement du rotor	$L_r = 0.3027 \text{ mH}$
Inductance propre	$L_m = 0.3027 \text{ mH}$
Nombre de paires de pôles du moteur	$P = 2$

**Tableau 3:** Caractéristiques de la pompe centrifuge

Performances de la pompe à une vitesse de 2900 tr/min
Débit maximale: $Q_{max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ ; Relevage maximale: $H_r = 80 \text{ m}$ ; Puissance moteur: $P_m = 14 \text{ kW}$



Toutes les simulations sont effectuées dans l'environnement Matlab 7.10. Les résultats sont illustrés, respectivement, par les figures suivantes:

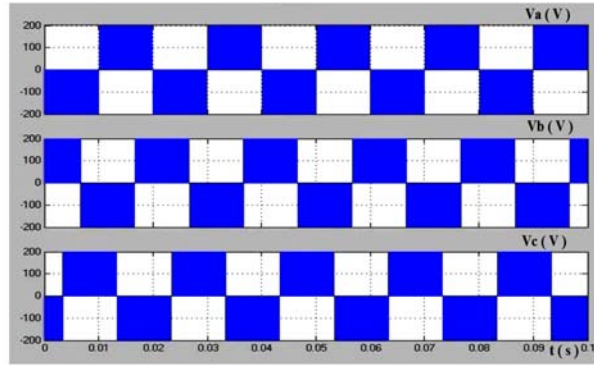


Fig. 8: Tension composée de l'onduleur MLI

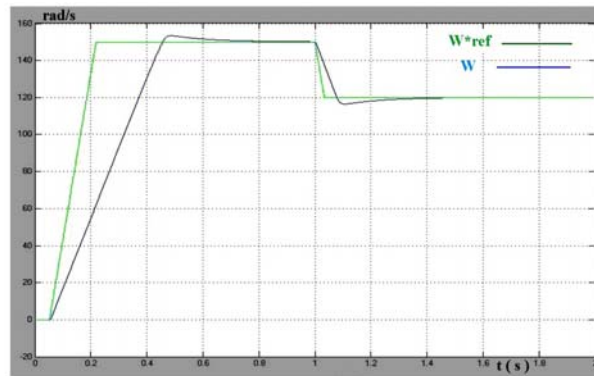


Fig. 9: Vitesse du rotor ' $\omega$ ' et sa référence

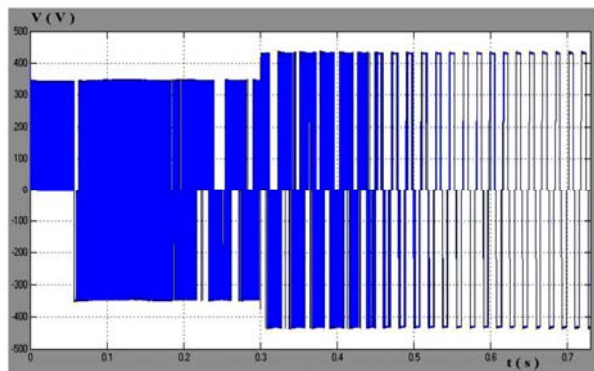


Fig. 10: Tension sortie de l'onduleur

Les résultats de simulations qui sont présentés, montrent bien:

- La poursuite en vitesse est satisfaisante. En effet, il n'y a pas de dépassement.

- L'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, afin d'exploiter la vitesse optimale en vue d'obtenir le débit maximal disponible.
- La tension composée de sortie de l'onduleur MLI varie entre -400 et 400 volts et le temps de régime transitoire ne dépasse pas 0.3 s.
- La stratégie de commande CVFO a servi ici comme une solution pour contrôler le débit et la hauteur manométrique de la station de pompage.

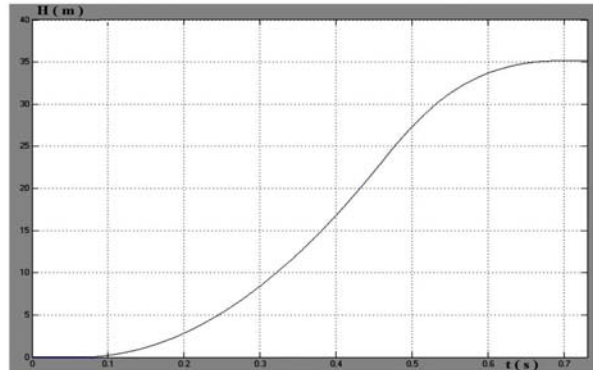


Fig. 11: Hauteur manométrique de la pompe  $H(t)$

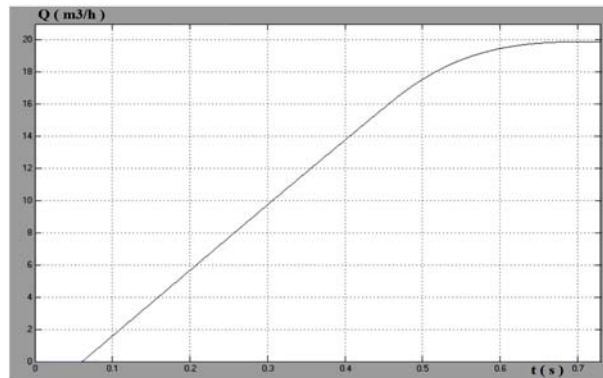


Fig. 12: Débit de la pompe  $Q(t)$

## 5. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons étudié et modélisé les différents éléments qui constituent un système complexe, celui d'un motopompe asynchrone alimenté par générateur PV à travers un hacheur et un onduleur. Ce papier montre bien que le modèle du panneau photovoltaïque, basé sur son circuit équivalent est non linéaire. En effet, il est en fonction des conditions météorologiques et de sa charge.

Nous avons choisi pour cette étude, l'algorithme P&O pour déterminer la puissance de la source ainsi que son sens de variation. Puisque le modèle du système global est fortement non linéaire, on fait appel à une technique de commande robuste et plus précisément la CVFO. Les résultats de simulation ont montré qu'il est possible de régler convenablement l'adaptation MPPT, les courants statoriques et la vitesse, quel que soit

le type de découplage proposé. La stratégie de commande vectorielle par flux orienté CVFO a servi ici comme une solution pour contrôler le débit et la hauteur manométrique totale de la station de pompage photovoltaïque.

## REFERENCES

- [1] L. Baghli, '*Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques*', Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 1999.
- [2] M. Simoes and F. Farret, '*Renewable Energy Systems*', Publié par CRC Press, ISBN 0849320313, 2004.
- [3] M.A. Khalfa, '*Commande Vectorielle d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil*', CIFA'2008, pp 434 – 441, Bucarest, Roumanie, 3 au 5 Septembre 2008.
- [4] K. Chomsuwan, P. Prisuwanna and V. Monyakul, '*Photovoltaic Grid-Connected Inverter using Two-Switch Buck Boost Converter*', in Proceedings of the 29<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002, pp. 1527 - 1530, May 2002.
- [5] M.F. Mimouni, M.N. Mansouri, B. Benganem and M. Annabi, '*Vectorial Command of an Asynchronous Motor Fed by a Photovoltaic Generator*', Renewable Energy, Vol. 29, N°3, pp. 433 – 442, 2004.
- [6] L. Baghli, '*Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone*', Institut Universitaire de Formation des Maîtres de Lorraine, Université Henri Poincaré, Nancy, 2005.