

Modèle d'un système Moto-Pompe destiné aux applications Photovoltaïques

M. Yaichi M.K. Fellah A. Mammeri

Résumé: Le milieu saharien par sa nature aride et la disponibilité d'un immense solaire peut rendre l'application du pompage de l'eau par l'intermédiaire des pompes solaires photovoltaïques, comme une opération très importante dans les domaines agricoles et industriels.

Pour ce type de systèmes, et pour améliorer leurs performances, une étude théorique basée sur des tests expérimentaux est nécessaire. Dans ce papier, le système à modéliser est constitué d'un moteur asynchrone couplé à une pompe centrifuge immergée de type SPA afin d'obtenir un débit pompé et un rendement fonction de la fréquence de la tension statorique pour une hauteur de pompage donnée, en utilisant la HMT (hauteur manométrique totale) estimée dans la première partie du déroulement de notre expérience. Le résultat a été très satisfaisant.

Ensuite, nous avons utilisé ce modèle pour un moteur asynchrone alimenté en tension, commandé vectoriellement, et régulé en vitesse par un régulateur PI. Le but de cette modélisation et cette simulation du fonctionnement des systèmes de pompage est d'aider à comprendre les critères de conception et de dimensionnement d'une station de pompage afin d'en déduire et d'estimer la quantité d'eau pompée et choisir la pompe convenable.

Mots clés: Moto-pompe solaire photovoltaïque, Modélisation, Commande vectorielle, Performances.

I. INTRODUCTION

Les énergies renouvelables sont une réalité quotidienne au service du développement et de l'environnement; Le phénomène de sécheresse qui a sévi sur les pays du Maghreb arabe en général et dans les zones semi-arides et arides pluviales, en particulier au début des années 1980 [02], a favorisé le pompage d'eau comme étant l'un des moyens efficaces de prévention active pour l'irrigation des terrains agricoles, l'adduction en eau potable des populations.

Pendant la journée, la vitesse de moteur asynchrone dépend de la valeur d'éclairement appliquée sur les panneaux solaires pour extraire la puissance maximale.

M. Yaichi, Equipe Pompage Photovoltaïque, Division Photovoltaïque, Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien URER/MS Adrar, Algérie.
Email : yaichi_mohammed@yahoo.fr

M.K. Fellah, Laboratoire ICEPS (Intelligent Control and Electrical Power Systems), Département Electrotechnique, Université Djillali Liabès de Sidi-Bel-Abbès, Algérie.

A. Mammeri, Equipe Pompage Photovoltaïque, Division Photovoltaïque, Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien URER/MS Adrar, Algérie.

Cette dernière, est obtenue par augmentation ou diminution de la fréquence statorique du moteur asynchrone, par l'insertion d'un dispositif *MPPT* (maximum power point tracker), induisant une amélioration globale du rendement du système [04]. En plus, le débit et le rendement de la moto-pompe pour une hauteur manométrique totale (*HMT*) (si on considère que le diamètre de roue est fixe) dépendent de la vitesse de rotation. celle-ci est liée à la fréquence statorique.

Le coût des systèmes photovoltaïques est très élevé. L'objectif principal de notre travail, sur la base de résultats expérimentaux obtenus en utilisant le banc d'essai développé et étudié en détail en [09], est l'étude des performances d'un système pompage par la quantification du débit et du rendement exacte.

La modélisation d'un système quelconque est indispensable lorsque nous souhaitons étudier ses performances. Pour notre projet, le système à modéliser est une moto-pompe centrifuge immergée *SP5A7* (vitesse nominale de $2870 \text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ pour une fréquence industrielle égale à 50Hz). Sa caractéristique est donnée en annexe (figure 06) [05].

II. SYSTEME POMPAGE SOLAIRE

La structure de pompage est équipée d'un moteur asynchrone entraînant une pompe centrifuge immergée. L'ensemble est alimenté par un générateur photovoltaïque (*GPV*) à travers un convertisseur statique (onduleur). Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie [03].

Il est important de choisir une pompe dont le rendement sera optimum à la hauteur manométrique et à la vitesse de rotation prévue. Pour choisir correctement cette pompe, il faut utiliser la courbe caractéristique du constructeur, donnant le débit en fonction de la hauteur manométrique totale (*HMT*), pour différentes vitesses de rotation, ainsi que les rendements de pompage et les puissances absorbées aux différents régimes [06].

Selon les travaux de recherche précédents, nous constatons que les chercheurs appliquent la loi de similitude pour déterminer le débit lors d'un fonctionnement à une vitesse différente (ils considèrent que l'électropompe fonctionne toujours au point de fonctionnement optimal). Par exemple, pour une vitesse donnée, la pompe fonctionne au point de fonctionnement optimal. Si l'éclairement diminue, cela entraîne une diminution de la vitesse. La *HMT* reste fixe et la pompe ne fonctionne pas à l'optimum. Donc, à la nouvelle vitesse, le débit est plus faible que le débit pompé

correspondant au point optimal. Par conséquent, l'évaluation et l'amélioration des performances d'un système pompage sont nécessaires pour un choix optimal de la moto-pompe.

III- MODELISATION DU SYSTEME MOTO-POMPE

Le modèle théorique du moteur asynchrone existe. Pour obtenir un modèle de la pompe, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques débit-fréquence (Q , $fré$) en fonction du couple et de la vitesse. Pour cela, il faut disposer d'un banc d'essais mécaniques.

Pour la quasi-totalité des pompes, il n'est pas possible de séparer le moteur de la pompe parce qu'ils forment un bloc unique compacte [01]. Pour ces raisons, nous avons opté d'utiliser un modèle empirique du système complet moteur-pompe dont les paramètres se mesurent sur un banc d'essai, construit, pour ce but, par l'équipe « électronique du système » de l'unité de recherche.

III.1- Banc d'essai expérimental

Pour le banc d'essais, nous utilisons la loi $\frac{V}{f}$ constant et nous obtenons, pour chaque fréquence, le débit pompé en fonction de la HMT . Simultanément, nous mesurons la puissance consommée. Ensuite, nous calculons la puissance hydraulique. Elle est donnée par la relation :

$$P_{hyd} = \frac{\rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q}{3600} \quad (1)$$

Où: P_{hyd} ; Energie hydraulique de la pompe, exprimée en W ;

ρ : Densité de l'eau (égale à $1000 \text{ Kg} / \text{m}^3$) ;

g : Constante de gravité (égale à $9,81 \text{ m} / \text{s}^2$) ;

Q : Débit (m^3 / h) .

Le rendement du système de pompage est

$$\text{donné par : } \eta = \frac{P_{hyd}}{P_e} \quad (2)$$

Avec P_e : Puissance électrique d'entrée, mesurée en W .

Les résultats, pour les fréquences 20Hz et 38Hz par exemple, sont montrés dans le tableau 01.

III.2- Traitement et analyse des données obtenues

Selon le rapport d'activité de notre projet (partie (I), 2009), le puits où la pompe sera installée possède les caractéristiques suivantes:

Le niveau statique: $N_s = 8.3 \text{ m}$; le rabattement :

$R = 5.2 \text{ m}$ et le diamètre: $D = 1.50 \text{ m}$.

La HMT sera alors calculée en utilisant l'expression :

$$HMT = H_g + \Delta p_c \quad (3)$$

H_g : Hauteur géométrique ;

$$H_g = N_s + R = 8.3 + 5.2 = 13.5 \text{ m} ;$$

Δp_c : Pertes de charge ; $\Delta p_c = 1.45 \text{ m}$.

La HMT est alors:

$$HMT = 14.95 \text{ m} \approx 15 \text{ m} \quad (4)$$

L'objectif est, donc, d'élaborer un modèle mathématique, qui simule n'importe quel point de fonctionnement (détermination du débit et du rendement) pour la $HMT = 15 \text{ m}$, en fonction de la fréquence de la tension d'entrée.

En utilisant la loi de similitude, nous pouvons prévoir le fonctionnement de la pompe centrifuge en se basant sur sa caractéristique d'origine, c'est à dire, celle qui est généralement connue ou sur les résultats obtenus expérimentalement. Pour cela, un ensemble de formules peut être utilisé, à savoir [07]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{et} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^2 \quad (5)$$

Avec: Q_1 et H_1 ; sont, respectivement, le débit et la HMT correspondants à la vitesse N_1 . Q_2 et H_2 , sont ceux correspondants à la vitesse N_2 .

Cette procédure est montrée dans la figure 01.

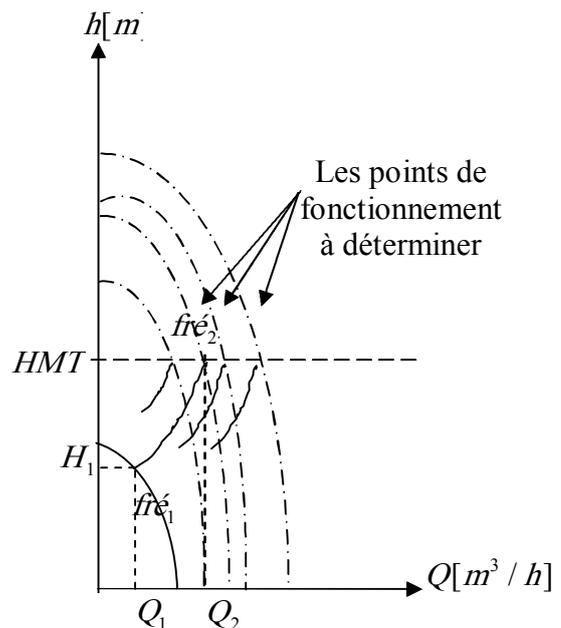


Figure 01. relation $HMT = f(Q)$ d'une pompe

Pour $H_2 = HMT = 15 \text{ m}$, et connaissant les données pour $fré_1$ (Q_1, H_1), nous aurons la relation de

la fréquence statorique $fré_2$ (ou bien la vitesse rotorique) et Q_2 comme suite.

$$fré_2 = \sqrt{\frac{15}{H_1}} (fré_1)^2 \quad \text{et} \quad Q_2 = \sqrt{\frac{15}{H_1}} Q_1 \quad (6)$$

De cette manière, nous avons le trio (Q, P_{hy}, η) pour une fréquence $fré$ et pour $HMT = 15 \text{ m}$.

Avec :

$$y_0 = -445.65141; A_1 = 90.52122; B_1 = 544.45166; A_2 = 443.44147; B_2 = 5.78246$$

Nous remarquons que l'augmentation de la fréquence statorique entraîne une augmentation du débit de l'eau à la sortie de la pompe.

Par analogie, la figure 03 montre les nuages des points obtenus expérimentalement pour le rendement ainsi que la courbe obtenue par lissage.

P_s (Kg/cm ²)	HMT (m)	t(s)/ v=10l	Q (m ³ /h)	P_{hy} (w)	P_a (W)	η (%)
20Hz*~*24.5V						
0,15	1,5	13,55	2,656826568	11,0701107	96	0,115313653
0,2	2	14,97	2,404809619	13,36005344	96	0,139167223
0,4	4	19,44	1,851851852	20,57613169	96	0,214334705
0,5	5	25,9	1,38996139	19,30501931	96	0,201093951
0,6	6	58,68	0,613496933	10,22494888	88	0,116192601
0,7	7	cc	0	0	80	0
38Hz*~*44.9V						
0,2	2	6,92	5,202312139	28,9017341	336	0,086017066
0,3	3	7,21	4,993065187	41,60887656	344	0,120956037
0,5	5	7,29	4,938271605	68,58710562	344	0,199381121
0,7	7	7,99	4,50563204	87,60951189	352	0,248890659
0,9	9	8,56	4,205607477	105,1401869	360	0,292056075
1	10	8,78	4,10022779	113,8952164	360	0,316375601
1,2	12	9,51	3,785488959	126,1829653	360	0,350508237
1,5	15	10,76	3,345724907	139,4052045	360	0,387236679
1,7	17	13,29	2,7088803612	127,9157261	352	0,363396949
2	20	20,95	1,718377088	95,46539379	312	0,305978826
2,2	22	34,1	1,055718475	64,51612903	272	0,237191651
2,5	25	cc	0	0	216	0

Tableau 01. Résultats expérimentaux

(*)cc : désigne l'état de court-circuit (vanne est complètement fermée).

Après avoir introduit les caractéristiques de chaque point de fonctionnement de la pompe dans le logiciel 'ORIGINELAB', celui-ci nous a permis de faire le lissage de ces caractéristiques. Cela aboutit aux courbes qui montrent l'évolution du débit et du rendement en fonction de la fréquence statorique.

La figure 02 montre les nuages des points obtenus expérimentalement et le lissage (interpolation) en utilisant le modèle à deux exponentielles. Le modèle obtenu donnant le débit est une équation exponentielle. La formule développée s'écrit comme suit :

$$Q = y_0 + A_1(1 - \exp(-fré / B_1)) + A_2(1 - \exp(-fré / B_2)) \quad (7)$$

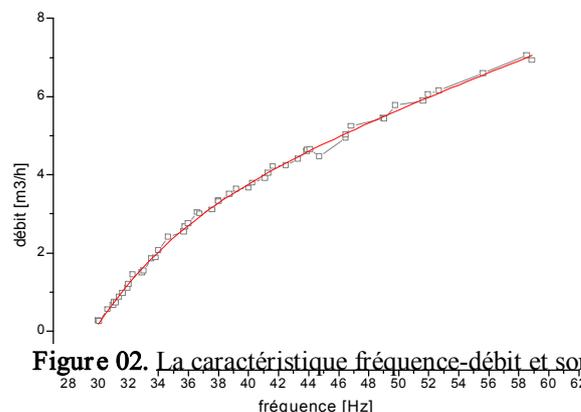


Figure 02. La caractéristique fréquence-débit et son lissage

La formule de rendement trouvée:

$$\eta = y_0 + A \left[\frac{1}{1 + \exp(-(\text{fré} - B + C_1 / 2) / C_2)} \right] \left[\frac{1 - 1}{1 + \exp(-(\text{fré} - B - C_1 / 2) / C_3)} \right]$$

Avec :

$$y_0 = -0.1395; B = 49.02358; A = 0.62023;$$

$$C_1 = 37.06438; C_2 = 1.32951; C_3 = 24.28222$$

D'après la figure 03, nous pouvons dire que notre système fonctionne d'une façon optimale à une fréquence d'environ 38Hz, où le rendement est maximum.

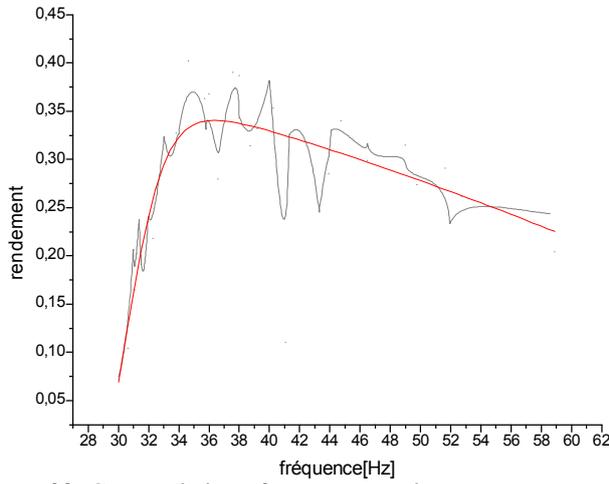


Figure 03. Caractéristique fréquence-rendement et son lissage

Pour valider les résultats obtenus, la comparaison entre les N valeurs des données mesurées M_i et calculées C_i se fait en utilisant la valeur du coefficient de régression R-carrée (R^2), définit comme suit [01] :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - M_i)^2}{\left(\sum_{i=1}^N (M_i)^2 \right) - \frac{\left(\sum_{i=1}^N M_i \right)^2}{N}} \quad (9)$$

Dans le tableau 02, nous avons calculé la valeur de R^2 pour chaque modèle (Débit/fréq et Rendement/fréq), les équations (7) et (8) ajustent très bien les valeurs expérimentales selon ce qu'indiquent les valeurs obtenues du R^2 .

	Modèle Débit/Fréq	Modèle Rendement/Fréq
R^2	0.9991	0.9803

Tableau 02. Valeurs du coefficient de regression R^2

IV- VALIDATION DU MODELE DE LA POMPE

Nous appliquons ensuite la commande vectorielle basée sur une alimentation par un onduleur de tension à 8 niveaux à MLI triangulo-sinusoidale. Cet ensemble peut-être considéré comme un convertisseur à $U/f = \text{constant}$ amélioré. Il est expliqué dans [08].

IV.1- Modélisation de la machine asynchrone (MAS) et sa commande:

Le couple électromagnétique développé par la machine s'exprime en fonction du flux rotorique et du courant statorique par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (10)$$

Le couple résistant C_r imposé par la pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur [04].

$$C_r = K_{ch} \Omega^2 \quad (11)$$

Avec : K_{ch} constante de proportionnalité.

Pour la machine asynchrone, le principe d'orientation consiste à aligner le flux rotorique sur l'axe direct du repère de Park.

$$\text{Donc : } \phi_{qr} = 0 \text{ et } \phi_{dr} = \phi_r \quad (12)$$

La commande en vitesse du moteur asynchrone entraînant la pompe centrifuge permet de contrôler son débit. Bien entendu, la boucle de régulation de la vitesse nécessite la connaissance de la vitesse de référence. Il est alors impératif de déterminer une relation explicite de la vitesse de consigne en fonction de l'ensoleillement [04]. Dans cet article, nous considérons que les valeurs de la vitesse de référence sont des valeurs optimales correspondants à l'éclaircissement.

La figure 04 donne une vue schématique d'un entraînement à vitesse variable utilisant le principe de la commande vectorielle. Pour assurer la régulation des grandeurs, nous utilisons les régulateurs de type PI.

Nous essayons les tests de poursuite. Au début, la vitesse vaut $w_{ref} = 142.24 \text{ rad} / s$, puis la vitesse est amenée à $w_{ref} = 352.78 \text{ rad} / s$ en 1s ensuite à $w_{ref} = 254 \text{ rad} / s$ en 2s et enfin, la vitesse atteint $w_{ref} = 267.25 \text{ rad} / s$ en 4s.

VI.2- Résultats de simulation et interprétations

Les réponses pour la commande vectorielle sont représentées dans la figure 05.

Les résultats de simulation illustrés par les figures précédentes montrent l'évolution de la vitesse, du courant statorique et du flux magnétique, donc le débit et le couple résistant imposé par la quantité d'eau pompée. Le couple électromagnétique compense instantanément cette sollicitation du couple résistant avec des

ondulations relativement importantes à cause des harmoniques existant dans la tension et le courant. Le flux suit convenablement sa référence et la vitesse répond sans dépassement au démarrage et lors du changement de la vitesse avec un temps de réponse court.

Les figures montrent que le flux et le couple sont découplés. D'autre part, le flux est constant en régime permanent $\phi_r = 1Wb$.

La machine est donc gérée par la loi $\frac{V}{f}$ constant, ce qui montre l'efficacité de la boucle de régulation de vitesse. La variation de la vitesse (augmentation ou diminution) fait changer le point de fonctionnement. La pompe ne fonctionne pas toujours à un point de fonctionnement optimal.

Ce modèle nous donne la quantité d'eau pompée exacte durant une journée et les moments où le système de pompage fonctionne d'une façon optimale. Le système de pompage est alors dimensionné pour un rendement optimal durant une durée très longue.

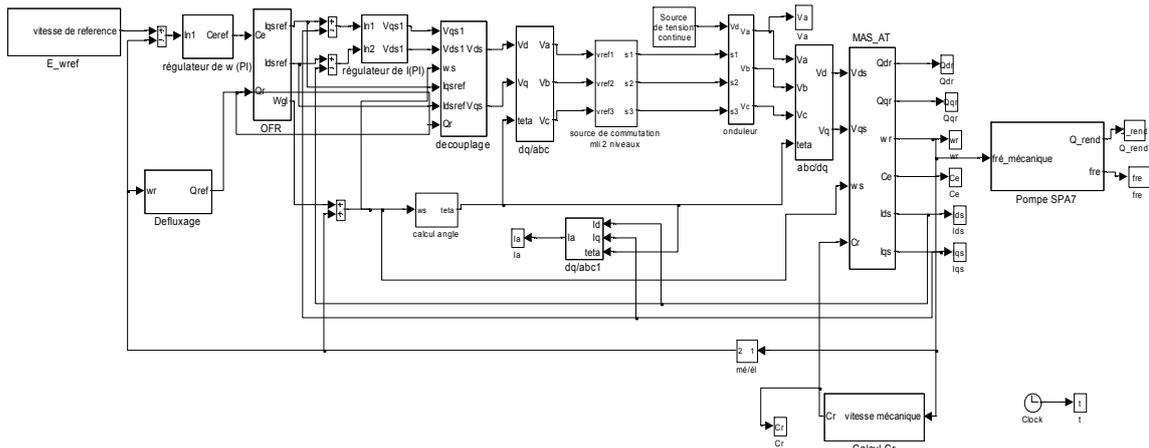


Figure 04. Schéma de simulation d'une MAS couplée à une pompe centrifuge et contrôlée par la commande vectorielle

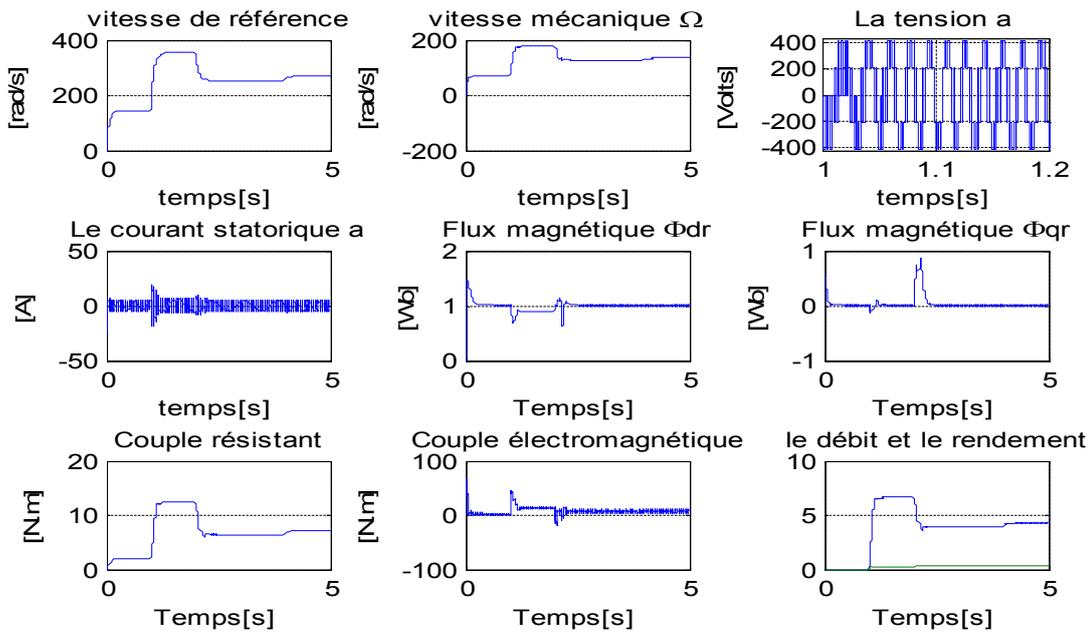


Figure 05. Comportement de la pompe selon la variation de l'éclaircement

V- CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons développé un modèle empirique du système complet de la moto-pompe *SP5A7* dont les paramètres se mesurent sur un banc d'essais, construit pour la caractérisation d'une pompe par l'équipe « électronique de système » de notre unité de recherche. Nous avons élaboré un modèle mathématique des différents paramètres d'une pompe, à savoir le modèle du débit, puis celui du rendement. Les corrélations proposées sur quelques essais effectués sont des équations à deux exponentielles avec un coefficient de détermination $R^2 \approx 0.99$. Ensuite, nous avons validé ces modèles en utilisant la commande vectorielle pour voir le comportement de la pompe lors de la variation de l'éclairement. La simulation montre que les résultats de la poursuite de la vitesse de référence (c'est à dire l'éclairement) coïncident avec ceux acquis dans la partie expérimentale.

Ce modèle de l'ensemble moteur-pompe permet d'obtenir le point de fonctionnement du système et d'estimer le débit d'eau pompée sous n'importe quel niveau d'éclairement, c'est-à-dire la quantité d'eau pompée et le rendement de système.

A partir des données d'estimation, et pour une journée typique, nous pouvons quantifier le débit moyen journalier pour un système déterminé selon les besoins énergétiques. En conséquence, nous avons dimensionné la pompe afin d'imposer et/ou maximiser la durée de fonctionnement optimale journalière de l'électropompe qui convient à notre installation (la vitesse est réglée en fonction de l'éclairement de manière à garantir un bon rendement toute la journée).

Dans la perspective d'un développement ultérieur du système, les axes suivants seront abordés en particulier :

- Etude complète du système de pompage photovoltaïque en introduisant un générateur photovoltaïque par l'application de la *MPPT*;

- L'approche qui sera développée est la simulation du modèle mathématique devant permettre de recueillir en sortie du système toutes les caractéristiques électriques, hydrauliques et les paramètres nécessaires à l'évaluation des performances en introduisant comme paramètres d'entrées les profils des principales grandeurs météorologiques, telles que la température et le rayonnement. Donc, cela permettra l'application des données réelles du site d'Adrar sur lequel est installé le système, ce qui impose de trouver une relation explicite entre l'éclairement et la vitesse de référence.

VI. Annexe

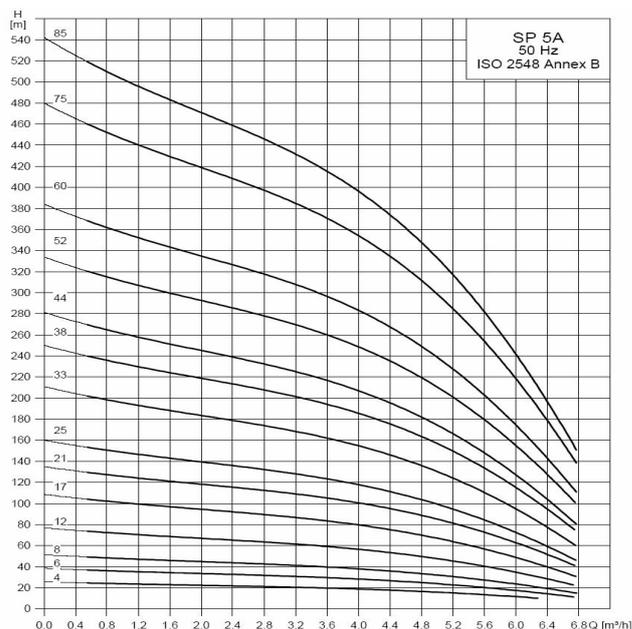


Fig.6. Caractéristique (Q, H) des pompes *SP5A* pour une fréquence industrielle égale à 50 Hz

VII. REFERENCES

- [01] : **A. Hadj Arab, F. Chenlo, E. Lorenzo et A. Hamidat** "Modélisation du système Moteur-pompe" Revue des énergies renouvelables, Numéro spécial, Tome 2, Tlemcen 23-24 novembre 1999.
- [02] : **M. El Amrani, Z. Chattou** "Attitudes et comportements des agriculteurs en matière de gestion des eaux d'irrigation : cas des réserves hydriques souterraines dans la région de Sais" Conférence Internationale sur les politiques d'irrigation : considérations micro et macro-économiques, Agadir du 15 au 17 juin 2002.
- [03] : **J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B.S. Sy** "Pompage Photovoltaïque" IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA. ISBN 2-89481-006-7, Canada 1998.
- [04] : **M.N. Mansouri, N. Ghanmi et M.F Mimouni** "Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal" Revue des énergies renouvelables, Volume 11, Numéro 1, Mars 2008.
- [05] : Catalogue de la moto-pompe GRUNDFOS de type *SP* et *SPA* "submersible pumps *SP, SPA*".
- [06] : **C. Castellanet (1992)** L'irrigation villageoise: Gérer les petits périmètres irrigués au Sahel "Le choix des groupes motopompes" GRET, 368 p, 17 Mars 1992.
- [07] : **C. Ramel, J.M. Chartrain** "Le pompage à la ferme" Encyclopédie Agricole Pratique, Paris 1984.
- [08] : **A. Meroufel** "Commande découplée d'une machine asynchrone sans capteur mécanique" Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Sidi Bel Abbès, 2004.
- [09] : **S. Chikhi, F. Chikhi, M.D. Draou, A. Mehdaoui et A. Mammeri** "Réalisation d'un banc d'essai pour la caractérisation des électropompes solaires triphasées par variation de fréquence" Revue des énergies renouvelables, Volume 10, Numéro 4, Décembre 2007.