

Etude de performance d'un système de pompage photovoltaïque autonome couplé directement.

A. Harkani ⁽¹⁾, H. Fihri Fassi ¹ and A. El Aissaoui ²

1. *Laboratoire, d'Ingénierie Mécanique, Management Industriel et innovation FST, Settat 26000, Maroc*

2. *Laboratoire de machines agricoles, INRA, Settat 26000, Maroc)*

Résumé:

Depuis quelques décennies, les systèmes de pompage photovoltaïques ont connus une forte croissance, puisqu'ils présentent une solution environnementale importante comme alternatif aux solutions énergétiques basés sur les combustibles. L'étude de la performance du système de pompage photovoltaïque autonome confronté au comportement réel de l'irradiation est l'objectif de ce travail. Le système de pompage photovoltaïque étudié se compose d'un générateur, un convertisseur MPPT / DC-DC, et une pompe à moteur DC à diaphragme connectée à des orifices calibrés (Débit / Pression), simulant un petit réseau d'irrigation goutte à goutte, monté en parallèle pour varier le point de fonctionnement de la pompe à l'éclairement varié en temps opportun. Les résultats ont montré que la variation journalière de l'irradiance solaire influence considérablement sur le comportement et le fonctionnement de la pompe, par conséquent les performances du système PV autonome sont affectées car il y a une inadéquation entre les charges du générateur PV et la pompe DC. Les tendances de l'efficacité hydraulique ont montré une dispersion variable en fonction du changement d'irradiance et de l'instabilité du système hydraulique. Un procédé de gestion des performances hydrauliques est proposé pour améliorer l'efficacité du système et la stabilité de la pression en tant qu'exigences pour assurer l'uniformité de la distribution de l'eau dans le réseau d'irrigation goutte-à-goutte fourni par un système de pompage PV autonome.

Mots clés : Autonome, système de pompage photovoltaïque, Performances, irradiance, efficacité, MPPT, pompe DC

1 Introduction

La production agricole dans les pays en voie de développement est principalement basée sur les précipitations pour la production agricole annuelle et sur les eaux souterraines pour l'irrigation des cultures maraîchères. Au Maroc, l'agriculture à petite échelle est dominante (environ 90%) et nécessite des solutions technologiques significatives pour améliorer sa subsistance. Au cours des dernières décennies, les systèmes de production agricole sont les plus vulnérables à l'augmentation des prix de l'énergie (carburant et électricité) et, par conséquent, les coûts finaux des produits agricoles sont influencés. Selon la hausse subséquente du prix du carburant, les agriculteurs ont transformé leurs systèmes de pompage d'irrigation à base de diesel aux systèmes fonctionnant par du butane pour propulser les moteurs à essence. Le butane est une énergie à faible coût soutenue par le gouvernement. Il y a environ plus de 100 000 ha irrigués avec du butane (MEMSD, 2014). La consommation de ce dernier dans l'agriculture est estimée à environ 800 ktep par an (CCCC, 2014). Comme alternative, la promotion de l'utilisation d'énergie alternative devient importante en fonction de l'irradiance moyenne existante au Maroc (environ 2,253 kWh / (m² * an)) (GIZ, 2011). Le gouvernement marocain a lancé un programme national de pompage photovoltaïque en 2013 pour promouvoir le pompage de l'irrigation pour les petites exploitations, représentant 90% de la population active (MAPM, 2013). Reça et al. (2016) ont montré que l'irrigation goutte-à-goutte est potentiellement la principale méthode d'utilisation des systèmes de pompage PV en

fonction des avantages de l'économie d'énergie et d'eau pour les systèmes agricoles durables. La performance des systèmes de pompage PV dépend principalement de sa conception. Le dimensionnement est considéré comme une première étape qui pourrait conduire à la fiabilité du système et à sa rentabilité (Renu et al. 2016). Le dimensionnement robuste conduit à des systèmes de pompage PV autonomes fiables et abordables pour l'irrigation. Cependant, des connaissances sur l'adaptation des cultures, des sols et des systèmes d'irrigation sont nécessaires (Firatoglu et al. 2004, Glasnovic et al. 2007, Gad et al. 2011). L'adaptation des panneaux PV aux exigences de la pompe ne peut être satisfaite sans l'intégration d'une conversion d'énergie DC-AC ou DC-DC robuste pour les performances des systèmes de pompage. De nombreuses recherches ont traité les dispositifs MPPT intégrant les performances de PVWPS (Sefriti et al. 2015). Akhirio et al. (2009) ont simulé les performances PVWPS en utilisant deux algorithmes MPPT d'IncCond et P & O sur Matlab / Simulink. Ils ont trouvé que l'efficacité du PVWPS peut être améliorée de 35% en utilisant la technologie MPPT et que le système a valorisé plus de 99% de l'énergie du panneau photovoltaïque pour satisfaire plus de 87% des besoins en eau. Khan et al. (2012) ont étudié les performances de PVWPS autonomes basées sur un convertisseur continu-continu couplé à une pompe à courant continu. L'efficacité du système a été améliorée en intégrant un contrôleur en boucle fermée avec un convertisseur abaisseur DC-DC pour augmenter sa production de pompage journalier. Essam et al. (2016) ont développé un PVWPS autonome basé sur le stockage d'énergie des batteries pour entraîner la motopompe BLDC. Ils ont proposé une stratégie de contrôle intégrée basée sur l'utilisation de MPPT, le contrôle de vitesse et le courant d'hystérésis pour l'optimisation de charge / décharge du moteur et des batteries BLDC afin d'améliorer l'efficacité globale du système. D'autres études sont réalisées sur l'aspect hydraulique pour améliorer l'efficacité PVWPS en utilisant des pompes centrifuges et des pompes à déplacement positif. Les pompes centrifuges sont caractérisées pour fonctionner efficacement aux basses pressions (moins de 100m) et aux exigences de débit élevé. Il représente l'équipement de pompage le plus utilisé pour soulever jusqu'à 90% de l'eau à l'échelle internationale (Guiqiang et al. 2017, Levon et al., 2015). Selon la loi d'affinité, l'efficacité de la pompe centrifuge dépend de sa vitesse de rotation pour offrir un faible rendement à bas régime. La faible performance des pompes centrifuges est un problème réel de PVWPS autonome qui provoque une instabilité hydraulique de l'irrigation goutte-à-goutte connectée à une isolation faible et variable (Walski, 2003, Chandel, 2015).

Au cours des dernières années, l'utilisation de pompes à courant continu a été encouragée pour améliorer les performances des systèmes d'irrigation à base de PV. En fait, l'émergence des technologies des moteurs sans balais à courant continu et des pompes volumétriques a amélioré la rentabilité en réduisant le taux de maintenance et en utilisant efficacement les pompes à courant continu dans l'irrigation agricole PV. Par rapport aux pompes centrifuges, les pompes à déplacement positif sont caractérisées pour fonctionner efficacement à haute pression (plus de 100 m) et à faible débit. Mais, il ne peut pas être approprié d'être associé directement aux panneaux photovoltaïques sans liaison adéquate entre l'énergie photovoltaïque et la charge du réseau d'irrigation. Les pompes à déplacement positif ne sont utilisées que pour les applications à basse tension continue (24 à 48 V) pour fournir de petits débits quotidiens (jusqu'à 5 m³ / jour). Protogeropoulos et al., (2000) et Kashyap et al. (2013) ont déclaré que d'autres améliorations sont nécessaires pour que les PVWPS autonomes satisfassent la demande en eau pour les petits systèmes d'irrigation goutte à goutte en contrôlant le changement de pression en raison de la variation quotidienne de l'insolation. Hamidat et al. (2004) ont étudié la performance de PVWPS en utilisant des pompes centrifuges et à déplacement positif. Ils ont utilisé une pompe centrifuge à plusieurs étages couplée à un moteur à courant alternatif et un onduleur triphasé. La seconde pompe est couplée à un convertisseur DC / DC actionnant un moteur BLDC. Ils ont montré que la

pompe à déplacement positif avait un rendement de 45% par rapport à l'efficacité de la pompe centrifuge qui n'atteignait que 14%. Dans une autre étude, Hamidat et al. (2009) ont comparé les performances PVWPS de la simulation de pompes à déplacements positifs et centrifuges en utilisant un programme informatique pour différents sites caractérisés par des conditions atmosphériques différentes (climat saharien et pluviométrie en été).

Une comparaison entre les performances électriques et hydrauliques des pompes centrifuges et volumétriques a montré une meilleure efficacité, moins de pertes d'énergie et un volume d'eau élevé pompé par la pompe volumétrique. Naresh et al. (2012) ont simulé un PVWPS en utilisant MATLAB / Simulink. Ils ont utilisé un MPPT et un moteur à aimant permanent (PMDC) pour montrer que les moteurs PMDC sont techniquement et économiquement efficaces par rapport aux moteurs à courant alternatif en termes de débit d'eau.

Cet article a pour but d'étudier les performances d'un PVWPS autonome basé sur une pompe volumétrique à courant continu confrontée au problème actuel de surmonter l'instabilité hydraulique du réseau d'irrigation goutte-à-goutte. L'étude d'un PVWPS autonome basée sur une pompe à courant continu est importante afin de trouver une meilleure adéquation entre le potentiel de pression d'une pompe volumétrique pour un réseau hydraulique (montée de buses parallèles pour simuler des conduites d'irrigation à la goutte à goutte). Le schéma parallèle simule le comportement de fonctionnement d'un petit système d'irrigation goutte à goutte qui nécessite une pression de fonctionnement constante et une meilleure uniformité de distribution.

2. Matériels ET Méthodes:

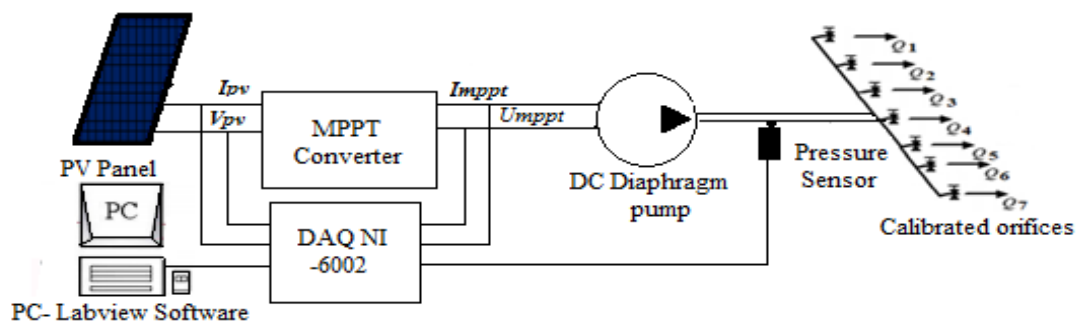


Figure 1: banc d'essai d'un système de pompage photovoltaïque à courant continu.

La configuration expérimentale utilisée pour tester le système de pompage PV couplé directement est présenté à la Fig. 1. Panneau PV (Module Monocristallin Silicon, SharpTM 175W), un contrôleur MPPT (Victron Blue Solar 48/24/12 V), une pompe à diaphragme DC (FLOJET, 12V DC, 144W) et une ramification hydraulique de sept orifices calibrés identiques (Albuz, 11004, 1,3 L / min à 3 bars) montés en parallèle pour simuler les sorties d'un réseau d'irrigation connecté et évaluer le débit en référence à potentiel de pression créé par la pompe à l'aide d'orifices modèles hydrauliques : $Q = K * P_x$.

3. Equations

Des capteurs de tension et de courant (ACS712) ont été installés aux points amont et aval du convertisseur MPPT pour évaluer la puissance électrique aux deux niveaux en utilisant les équations 1 et 2 :

$$\begin{aligned} PPV &= V_{pv} * I_{pv} ; \\ P_{mppt} &= V_{mppt} * I_{mppt} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_{pv} &= (a * V_{s1}) + b ; \\ I_{mppt} &= (a' * V_{s2}) + b \end{aligned} \quad (2)$$

Les capteurs de courant ont été étalonnés à l'aide d'une source de batterie au plomb acide alimentant un circuit de lampes automobiles montées en parallèle (12 VCC, 55 Watt). Le modèle d'étalonnage est présenté dans l'équation 3.

$$Y = 14.333x - 36.149 \quad (3)$$

La pression du capteur est calculée sur la base du modèle d'étalonnage suivant:

$$Y = 0.3427x^2 - 2.6075x + 4.918 \quad (4)$$

Pour évaluer la sortie des orifices de débit, un modèle hydraulique (Eq.5) pris expérimentalement par calibration:

$$Q \text{ (L/min)} = K * P^X \text{ (bar)}; \quad (0.4759 < X < 0.5745) \quad (5)$$

Une ramification hydraulique de sept caractéristiques d'orifices calibrés identiques a été présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1: Paramètres hydrauliques des orifices (test expérimental)

Nombre d'orifices	K	X
Orifice 1	1.1557	0.5006
Orifice 2	1.1718	0.5186
Orifice 3	0.5778	0.5384
Orifice 4	0.968	0.5745
Orifice 5	1.1576	0.5053
Orifice 6	1.1369	0.5042
Orifice 7	0,7663	0.4759

4. Résultats et Discussions

Le Maroc est situé à 34 ° 0 '47 N; -6 ° 49 '57 O sur la longitude et la latitude avec le rayonnement solaire global annuel est d'environ 2.253 kWh / (m² * année) (GIZ, 2011). Une variation des radiations solaires globales à 25 mai 2017 a été présentée dans fig.2.

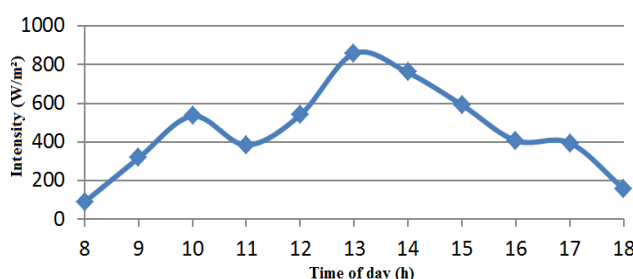


Figure 2 : Courbe de Rayonnement journalière 25-05-2017

L'intensité solaire maximale enregistrée était de $858 \text{ W} / \text{m}^2$. À 11h l'intensité de l'environnement diminue en raison d'apparition des nuages. Cela affecte simplement la performance de la charge connectée dans le circuit, c'est-à-dire la pompe à moteur.

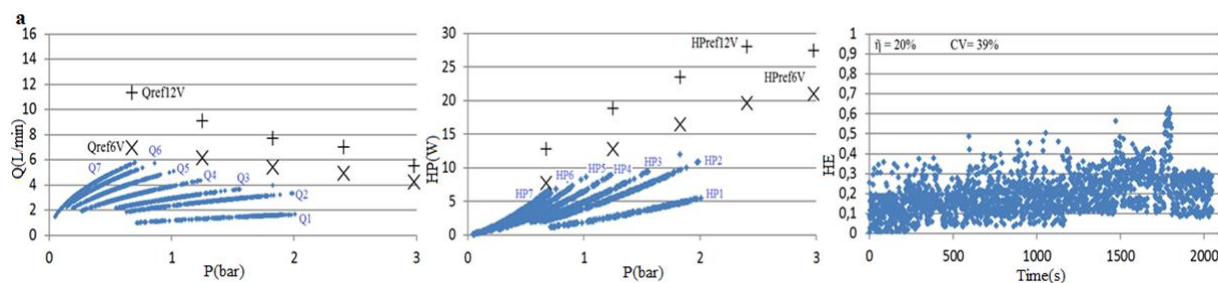
La performance du PVWPS est étudiée en surveillant le comportement de la pompe en fonction de l'irradiation solaire sur trois heures importantes (8h, 12h et 18h).

La figure 3a montre la réponse de la pompe par rapport à la faible irradiation (8 heures) de $100 \text{ W} / \text{m}^2$. Sept comportements d'écoulement sont présentés en référence au nombre d'orifices engagés pour déplacer le point de fonctionnement de la pompe. Une diminution du débit entraîne une augmentation de la pression. Ce déplacement montre qu'il est possible de faire fonctionner la pompe non seulement pour satisfaire l'exigence de fonctionnement de l'orifice autour d'une pression de fonctionnement stable et prédéfinie (exigence réseau d'un système d'irrigation goutte à goutte) mais aussi pour satisfaire les meilleures conditions de performance. En effet, l'adaptation entre le nombre d'orifices engagés et l'éclairement énergétique réel est nécessaire pour actionner la pompe autour de ses meilleures performances. Lorsque la pression est satisfaite, une meilleure performance est corrélée avec une partie engagée du réseau hydraulique (nombre d'orifices engagés).

Les courbes caractéristiques, débit / pression [$Q = f(P)$] et puissance / pression hydraulique [$Ph = f(P)$] ne convergent pas avec les courbes de référence de la pompe car l'irradiation solaire est faible le matin. Le deuxième graphique (Fig.3a / 08.am) illustre le comportement variable des puissances hydrauliques en raison de la variation du débit et de la pression induite par la variation du nombre d'orifices activés. Ceci rend possible le contrôle du point de fonctionnement de la pompe et la prédiction de sa convergence pour le meilleur rendement et / ou pour la satisfaction de la pression de fonctionnement requise pour la meilleure distribution d'uniformité du système d'irrigation goutte-à-goutte connecté. Le graphique trois (Fig.3a / 08.am) montre l'efficacité globale du système variant de 1 à 63% (moyenne de 20%). Cette dispersion de l'efficacité est due au comportement du système autonome car toute capacité est réglée pour réguler et stabiliser le comportement instantané du flux / de la pression influencé par le changement de l'irradiation solaire.

A midi, le système a montré de meilleures performances hydrauliques, puisque la pompe a atteint le débit maximum en fonction des caractéristiques de pression (16 L / min contre 4,6 bar) (Fig. 3e).

La performance du système à 18 heures (Fig.3k) a montré un comportement similaire à 8 heures. Ceci est pratiquement dû à l'absence d'éclairement incident ($160 \text{ W} / \text{m}^2$). Le troisième graphe (figure 3k) montre une efficacité variant de 3% et 65% avec une moyenne de 20%. Cette différence de comportement débit / pression a été induite principalement par l'alternance lumière du soleil / ombre.



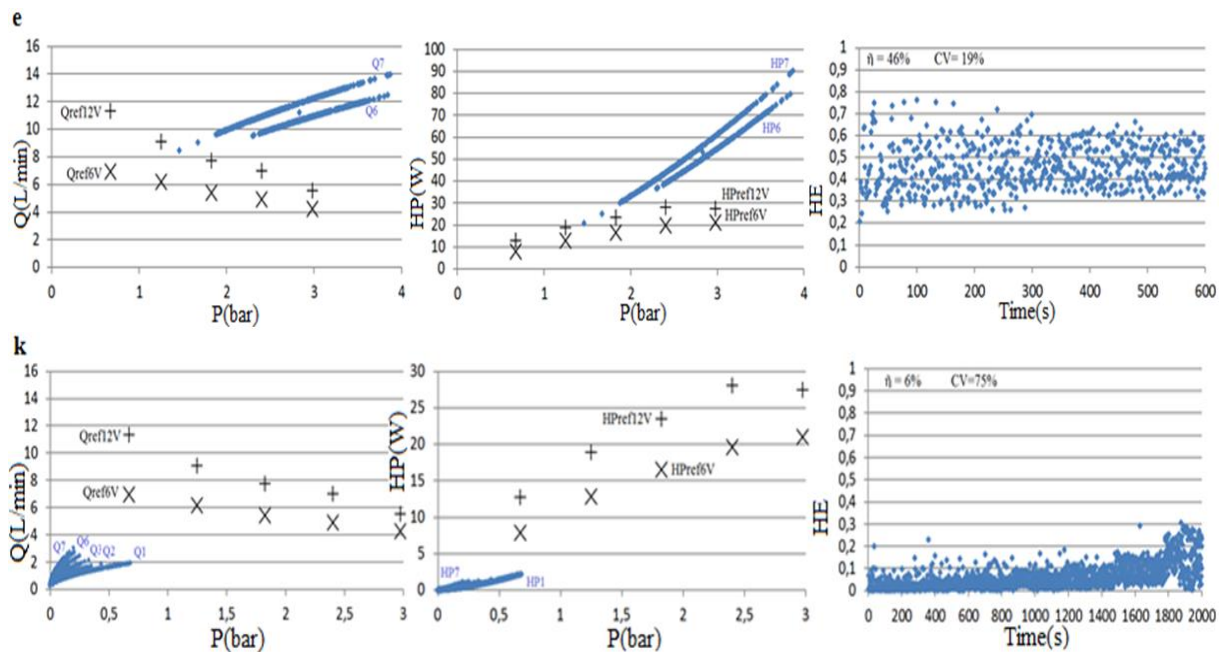


Figure 3: Performances de PVWPS à 8h, 12h et 18h.

Tableau 2: Performances journalières de PVWPS en fonction du changement d'irradiance et de la partie des orifices activés (résultats des tests expérimentaux)

Temps	Ensoleillement (W/m ²)	Orifices engages	Rendement hydraulique moyen % (CV %)	Pression moyenne Bar (CV %)	Débit moyen L/min (CV %)
08. am	90	7	13 (47)	00.33 (34)	03.84 (19)
		6	16 (35)	00.42 (23)	03.91 (12)
		5	18 (16)	00.52 (24)	03.55 (13)
		4	19 (35)	00.66 (24)	03.07 (13)
		3	22 (30)	00.93 (21)	02.78 (11)
		2	29 (29)	01.26 (21)	02.60 (11)
		1	22 (28)	01.45 (21)	01.38 (11)
12. am	540	7	44 (22)	00.38 (15)	11.46 (08)
		6	47 (15)	02.99 (10)	10.90 (05)
06. pm	158	7	02 (76)	00.05 (56)	01.37 (31)
		6	03 (72)	00.06 (54)	01.34 (29)
		5	03 (63)	00.08 (48)	01.30 (26)
		4	04 (52)	00.12 (41)	01.23 (22)
		3	05 (52)	00.16 (44)	01.10 (23)
		2	09 (41)	00.26 (35)	01.16 (19)
		1	14 (43)	00.35 (41)	01.33 (23)

Selon la réponse du système de pompage pour chaque configuration du nombre d'orifices activés, une dispersion significative en termes d'efficacité est représentée (Tabl.2). Il y a une influence négative de la variation de l'irradiation sur la performance de la pompe pour un PVWPS autonome si le point de fonctionnement de la pompe reste statique. En fait, le point de fonctionnement de la pompe doit être réglé pour maintenir des performances hydrauliques et une stabilité de pression élevées. L'adaptation du point de fonctionnement de la pompe à l'aide des orifices d'allumage / extinction est importante pour valoriser efficacement l'irradiance réelle au niveau amont afin de l'adapter adéquatement à une partie d'un réseau d'irrigation goutte à goutte connecté (nombre d'orifices activés).

5. Conclusion

Les performances d'un PVWPS autonome sont surveillées en fonction de l'éclairement solaire variable et du point de fonctionnement hydraulique variable de la connexion pompe / orifices. La partie du réseau hydraulique (nombre d'orifices activés) peut être simulée par un modèle hydraulique équivalent d'un nombre défini d'orifices calibrés. Le modèle équivalent d'un circuit hydraulique donné peut être pris expérimentalement comme cela a été fait dans ce travail pour établir un diagramme de performance de la pompe en référence à l'éclairement incident et au réglage de la pression au niveau aval.

6. Références

- Akihiro Oi, T., Anwari, M., Taufik, M. 2009. Modeling and simulation of photovoltaic water pumping system. In Proc. Third Asia International Conference on Modelling & Simulation. 978-0-7695-3648-4/09 \$25.00
- Arafat Khan, Md. T., Md. Rishad, A., Ibne Ahmed, S., and Islam Khan, S. 2012. Design and performance analysis of water pumping using solar PV. In Proc. 2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), Dhaka, Bangladesh, 5-7 Jan. 2012
- Chandel, S.S., Nagaraju Naik, M., Chandel, R. 2015. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49 1084–1099
- Essam, E. A., Zaki, A.M., El-sotouhy. M.M. 2017. Design and control of a standalone PV water pumping system. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. JESIT-96; No. of Pages 16
- Firatoglu, Z. A., and Yesilata, B. 2004. New approaches on the optimization of directly coupled PV pumping systems. *SolEnergy*, 77:81–93.
- Gad, H.E., and Safya, M. 2011. Using photovoltaic array for solar water pumping in Toshka region. In Proc. the fifteenth international water technology conference. IWTC15. Egypt.
- Giz, Aderee. 2011. Étude du potentiel de développement de l'énergie photovoltaïque dans les régions de Meknès-Tafilalet, Oriental et Souss-Massa-Drâa.
- Glasnovic, Z., and Margeta, J. 2007. A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *Sol Energy*, 81:904–16.
- Guiqiang, L., Yi J., Akram, M.W., Xiao C. 2017. Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79 (2017) 440–458
- Hamidat, A., Benyoucef, B., and Hartani, T. 2003. Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions. *Renewable Energy* 28 1081–1096
- Hamidat, A., Benyoucef, B. 2008. Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems. *RenewEnergy*, 33:933–42
- Kashyap, M., Chanana, S., Jai Singh, A. 2013. SOLAR POWERED PMDC MOTOR DRIVE. Conference on Advances in Communication and Control Systems (CAC2S)
- Kolhe, M., Joshi, J. C., and Kothari, D. P. 2004. Performance Analysis of a Directly Coupled Photovoltaic Water-Pumping System. *IEEE Transactions on energy conversion*, VOL. 19, NO. 3
- Levon, G., Valery, V., Zoja, R. 2015. PLC-based pressure control in multi-pump applications. *Electrical, Control and Communication Engineering*
- Naresh, B., Madhu, P., Prasad, K.R.K. 2012. Analysis of Dc solar water pump and generalized photovoltaic model using Matlab/Simulink. In Proc. of the Intl. Conf. on Advances in Computer, Electronics and Electrical Engineering, 978-981-07-1847-3
- Odeh, I., Yohanis, Y.G., and Norton, B. 2006. Economic viability of photovoltaic water pumping systems. *Solar Energy*, 80 850–860

Protopogopoulos, C., and Pearce, S. 2000. Laboratory evaluation and system sizing charts for a 'second generation' direct PV-powered, low cost submersible solar pump. *Solar Energy*, Vol. 68, No. 5, pp. 453_474

Reca, J., Torrente, C., Lopez-Luque , R., and Martínez, J. 2016. Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. *Renewable Energy*, 85 (2016) 1143e1154

Renu. Birinchi, B., Basudev, P., Sastry , O.S., Atul, K., and Bangar M. 2017. Optimum sizing and performance modeling of solar photovoltaic (SPV) water pumps for different climatic conditions. *Solar Energy*, 155 (2017) 1326–1338

Sefriti, B., and Boumhidi, I. 2015. Neural network incremental conductance MPPT algorithm for photovoltaic water pumping system. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 978-1-4799-7560-0/15/\$31

Walski, T., Zimmerman, K., Dudinyak, M., and Dileepkumar, P. 2003. Some surprises in estimating the efficiency of variable-speed pumps with the pump affinity laws. In *Proc. World Water & Environmental Resources Congress*

7. Nomenclature

AC	: Courant Alternatif.
BLDC	: Courant continu sans balai.
CCCC	: Centre de compétences pour le changement climatique
DC	: Courant Direct.
HP(W)	: Puissance Hydraulique
HE	: Rendement hydraulique
Imppt	: Courant de sortie MPPT.
IncCond	: Conductance incrémentale.
I _{pv}	: Courant Photovoltaïque.
Ktep/ Koe	: kilotonne d'équivalent pétrole.
MAPM	: Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime.
MEMSD	: Ministère de l'Énergie, des Mines et du Développement durable.
MPPT	: Suiveur du point de puissance maximum
P(bar)	: Pression
P&O	: Perturber et Observer.
PMDC	: Courant continu à aimant permanent
PV	: Photovoltaïque
PVWPS	: Système de pompage Photovoltaïque
PWM	: Modulation de largeur d'impulsion
Q(L/min)	: Débit
Q _n	: Courbe de débit pour n orifices ON
U _{mppt}	: Tension de sortie MPPT
V _{pv}	: Tension photovoltaïque