HAL open science

Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque pour les communautés rurales des pays en voie de développement

Simon Meunier

To cite this version:

Simon Meunier. Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque pour les communautés rurales des pays en voie de développement. Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Électrique, May 2017, Arras, France. hal-01629662

HAL Id: hal-01629662

https://hal.science/hal-01629662v1

Submitted on 6 Nov 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque pour les communautés rurales des pays en voie de développement

Simon MEUNIER

GeePs | Group of electrical engineering - Paris, UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06
3 & 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon 91192 Gif-sur-Yvette CEDEX, France
simon.meunier@geeps.centralesupelec.fr

RÉSUMÉ – Dans les communautés rurales des pays en voie de développement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont une solution intéressante pour remplacer les pompes à main et ainsi accélérer le développement socio-économique. Un nouveau type de moteur qui pourrait être particulièrement adapté au pompage photovoltaïque est en cours de développement. Le couplage entre ce moteur et une pompe à piston est ici considéré pour la première fois. Cet ensemble moteur-pompe à piston permet de faire passer l'eau d'une source à un réservoir. Le système constitué par la source, le réservoir et l'association moteur-pompe est tout d'abord modélisé. Une première optimisation visant à déterminer les valeurs des paramètres de l'ensemble moteur-pompe pour lesquelles le débit entrant dans le réservoir est maximum est ensuite réalisée. Ce travail préliminaire sera par la suite complété par une modélisation détaillée des différents éléments, ainsi que par la prise en compte des aspects socio-économiques et environnementaux liés à la mise en place des systèmes de pompage motorisés dans les communautés rurales.

ABSTRACT – In rural communities of developing countries, photovoltaic pumping systems are an interesting solution to replace hand pumps and therefore accelerate socio-economic development. A new type of motor that could be particularly adapted to photovoltaic water pumping is under development. The coupling between this motor and a piston pump is here considered for the first time. This motor-piston pump combination allows to move water from a source to a storage tank. The system composed of the source, the tank, the motor and the pump is first modelled. An optimisation is then undertaken in order to determine the values of the parameters of the motor-pump combination for which the flow rate entering the reservoir is maximum. This preliminary work will then be completed by more detailed models of the different elements, and by the consideration of socio-economic and environmental aspects related to the introduction of motorised pumping systems in rural communities.

MOTS-CLÉS – Pompage photovoltaïque, pompe à piston, moteur, accès à l'eau, communautés rurales, modélisation, optimisation

1. Introduction

Dans les communautés rurales des pays en voie de développement, l'eau est très souvent collectée à l'aide de pompes à main [1]. L'utilisation de ces systèmes nécessite du temps et un effort physique important de la part des usagers. L'introduction de systèmes de pompage motorisés peut permettre de diminuer la pénibilité de la collecte d'eau et de libérer du temps pour d'autres activités. Parmi les différentes alternatives, le pompage photovoltaïque (PV) est déjà compétitif économiquement et constitue une solution prometteuse [2]–[4].

Deux systèmes sont généralement utilisés pour convertir l'énergie solaire en énergie mécanique utilisable par une pompe. Il s'agit d'une part des moteurs à courant continu et d'autre part des moteurs à courant alternatif qui sont connectés aux modules PV par l'intermédiaire d'un onduleur [5, 6]. Cependant, ces systèmes nécessitent un entretien régulier et la maintenance n'est que très rarement effectuée dans les zones isolées à cause de l'absence de techniciens qualifiés [7]. Pour remédier à ce problème, un « moteur solaire » ne comportant pas de pièce d'usure est en cours de développement [8, 9]. Notre moteur solaire consiste en l'association d'une source photovoltaïque, de transistors photovoltaïques (TPV), d'un obturateur mécanique et d'une machine à reluctance variable réputée pour sa simplicité et sa robustesse. Un TPV est une cellule photovoltaïque conventionnelle utilisée comme un transistor de puissance à commutation optique. La commutation est obtenue grâce à un obturateur connecté au rotor de la machine, qui tourne devant les TPVs. Grâce à une géométrie et un calage angulaire judicieux de l'obturateur, les TPVs contrôlent le courant généré par la source photovoltaïque externe dans les phases de la machine assurant ainsi son autopilotage.

Les précédents travaux ne prenaient en compte que le moteur, dans des conditions idéales d'éclairement et sans sa charge mécanique. Afin d'aller vers une optimisation du système, le couplage entre ce moteur et une pompe à piston est considéré ici comme une première étape. La pompe à piston est très présente dans les systèmes de pompage dans les pays émergents [1, 10]. L'ensemble moteur-pompe à piston permet d'acheminer l'eau depuis une source vers un réservoir. La

méthodologie développée pour une pompe à piston pourra aussi être transposée à d'autres pompes telles que la pompe centrifuge.

Dans la partie 2, nous étudions le fonctionnement du système complet. Dans la partie 3, nous présentons une première optimisation visant à déterminer les valeurs des paramètres du système de pompage pour lesquelles le débit fourni par celui-ci est maximal.

2. Modélisation

Le système considéré est représenté sur la figure 1 et il est divisé en deux sous-systèmes. Le sous-système hydraulique est constitué de la source d'eau, du réservoir d'eau et du tuyau qui les relie (en bleu sur la figure). Le sous-système électromécanique correspond au système de pompage et il est constitué du moteur solaire, du réducteur, de la bielle-manivelle et de la pompe à piston (en rouge sur la figure).

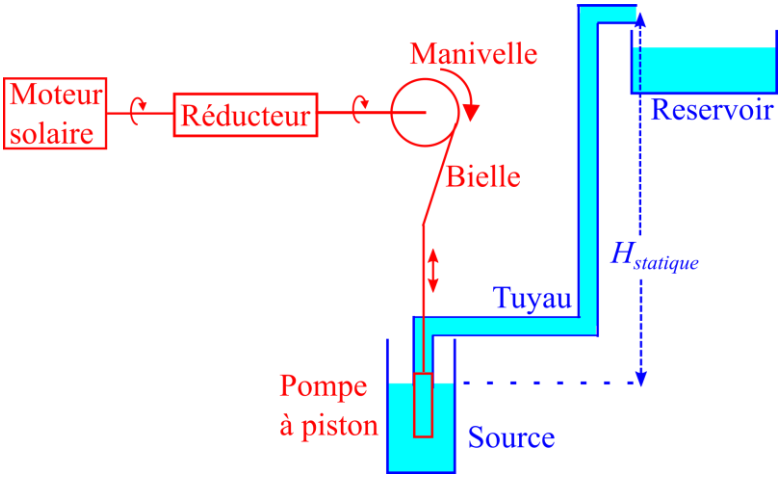


Figure 1 : Schéma du système.

2.1 Modèle hydraulique

Afin que l'eau puisse être transportée depuis la source vers le réservoir, une colonne d'eau doit être formée entre ces deux éléments. La hauteur de cette colonne d'eau est appelée hauteur statique et notée $H_{statique}$. Elle est donnée par :

$$H_{statique} = h_{réservoir} - h_{source} \tag{1}$$

où $h_{réservoir}$ est la hauteur de la sortie du tuyau au niveau du réservoir et h_{source} la hauteur de la surface de l'eau dans la source. Dans le cadre de cette étude, il est supposé que la hauteur de la surface de l'eau dans la source reste constante. Par conséquent la hauteur statique ne varie pas. S'il n'y a pas de frictions, la pression qu'il faut fournir à l'eau dans la source pour arriver au réservoir est appelée pression statique. Notée $P_{statique}$, elle s'écrit :

$$P_{statique} = \rho_{eau}\, g\, H_{statique} \tag{2}$$

où ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau et g est l'accélération de la pesanteur. À cause des frictions dans le tuyau, la pression nécessaire pour faire passer l'eau de la source au réservoir est supérieure à la pression statique. Les frictions sont dues aux frottements entre l'eau et le tuyau (associés à la pression $P_{frottements}$) et aux différents raccords (associés à la pression $P_{raccords}$). La pression supplémentaire qui doit être transmise à l'eau à cause des frictions est qualifiée de pression dynamique $P_{dynamique}$ et est égale à :

$$P_{dynamique} = P_{raccords} + P_{frottements} \tag{3}$$

$P_{frottements}$ est donnée par [11] :

$$P_{frottements} = \frac{f_{tuyau-eau} L_{tuyau}}{D_{tuyau}} \frac{{v_{eau}}^2\, \rho_{eau}}{2} \tag{4}$$

où L_{tuyau} correspond à la longueur du tuyau, D_{tuyau} au diamètre du tuyau, $f_{tuyau-eau}$ au coefficient de frottement entre le tuyau et l'eau et v_{eau} à la vitesse de l'eau dans le tuyau. v_{eau} est reliée au débit Q_H dans le tuyau par :

$$v_{eau} = \frac{Q_H}{\pi \left(\frac{D_{tuyau}}{2}\right)^2} \tag{5}$$

Le coefficient de frottement entre le tuyau et l'eau dépend de la valeur du nombre de Reynolds *Re* associé à l'écoulement de l'eau dans le tuyau. Le nombre de Reynolds est donné par :

$$Re = \frac{v_{eau}\, D_{tuyau}}{visc_{eau}} \tag{6}$$

où $visc_{eau}$ est la viscosité cinématique de l'eau. Les équations permettant de calculer le coefficient de frottement entre le tuyau et l'eau pour différentes valeurs du nombre de Reynolds sont dans le document [12].

La pression $P_{raccords}$ provient des différents raccords disposés le long du tuyau : valves, coudes, courbures, tés, expansions, contractions, entrée et sortie du tuyau. Chacun de ces éléments possède un coefficient *K* qui varie en fonction des paramètres du raccord. Les valeurs de *K* peuvent être trouvées dans le document [12]. Dans un système présentant *N* raccords, la pression supplémentaire $P_{raccords}$ qui doit être transmise à l'eau est régie par [11] :

$$P_{raccords} = \left(\sum_{i=1}^{N} K_i\right) \frac{{v_{eau}}^2\, \rho_{eau}}{2} \tag{7}$$

La pression dynamique peut être considérée comme une hauteur supplémentaire $H_{dynamique}$ qui doit être parcourue par l'eau. Cette hauteur est donnée par :

$$H_{dynamique} = \frac{P_{dynamique}}{\rho_{eau}\, g} \tag{8}$$

La pression totale P_H qui doit être transmise à l'eau dans la source pour parvenir jusqu'au réservoir s'écrit :

$$P_H = P_{statique} + P_{dynamique} \tag{9}$$

Cette pression totale correspond à une hauteur H_H égale à :

$$H_H = \frac{P_H}{\rho_{eau}\, g} \tag{10}$$

La hauteur H_H est communément appelée la hauteur manométrique totale. Elle est aussi donnée par la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique. Étant donné que la hauteur dynamique dépend du débit, la hauteur manométrique totale varie donc aussi en fonction du débit.

Sur la figure 2, la variation de la hauteur manométrique totale en fonction du débit est représentée pour $H_{statique}$ = 10 m, L_{tuyau} = 300 m et D_{tuyau} = 0,08 m. Il est aussi considéré pour cet exemple que le tuyau est en plastique, que trois coudes filetés de 90° sont disposés le long du tuyau, que l'entrée du tuyau est de type réentrant et qu'en sortie du tuyau l'eau se décharge dans l'air. Cela correspond à la configuration présentée sur la figure 1. Ces valeurs et cette configuration ont été choisies suite à l'observation et à l'analyse d'installations de pompage dans des communautés rurales de la province de Boulemane au Maroc en février 2017.

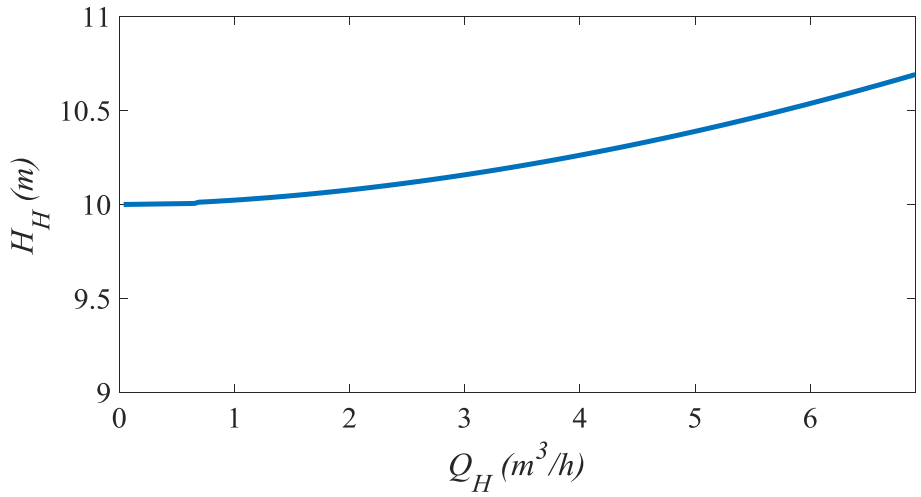


Figure 2 : Hauteur manométrique totale H_H en fonction du débit Q_H.

2.2 Modèle électromécanique

La figure 3 présente les principales grandeurs qui interviennent dans le modèle électromécanique.

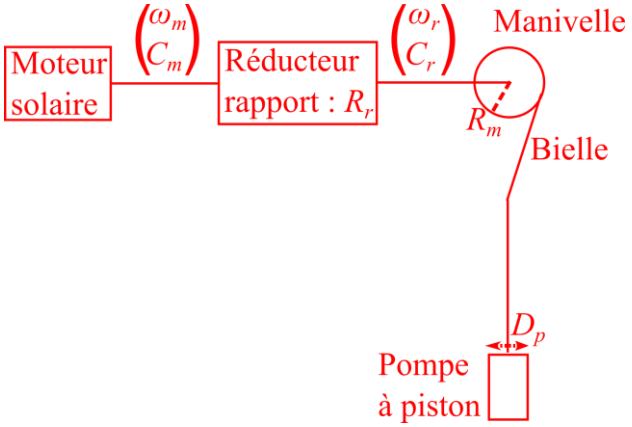


Figure 3 Grandeurs utilisées pour le modèle électromécanique

Le moteur est caractérisé par une courbe couple-vitesse reliant la vitesse de rotation de l'arbre du moteur ω_m au couple mécanique sur cet arbre C_m. La vitesse de rotation de l'arbre en sortie du réducteur ω_r s'écrit :

$$\omega_r = \frac{\omega_m}{R_r} \tag{11}$$

où R_r est le rapport de réduction du réducteur.

Le système bielle-manivelle permet de transformer le mouvement de rotation de l'arbre de sortie du réducteur en un mouvement de translation. Un demi-tour de l'arbre correspond à un déplacement du piston égal au double du rayon de la manivelle. L'eau n'est pompée que lorsque le piston est en phase ascendante. Le volume d'eau pompé lors de la phase ascendante dans le cas d'un piston circulaire est donné par :

$$V_{pompé_ascendant} = 2\, R_m\, \pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 \tag{12}$$

où D_p est le diamètre du piston et R_m est le rayon de la manivelle. Dans le cadre de cette étude, il est supposé que le diamètre du piston est égal au diamètre du tuyau. Le débit moyen délivré par le système de pompage est donc :

$$Q_{EM} = \frac{V_{pompé_ascendant}}{T_r} \tag{13}$$

où T_r est la période de rotation de l'arbre de sortie du réducteur. Cette période est égale à $\frac{2\pi}{\omega_r}$. En combinant les équations (11)-(13), on obtient :

$$Q_{EM} = \frac{R_m \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 \omega_m}{R_r} \tag{14}$$

Le moteur fournit une puissance $C_m\omega_m$ au système de pompage. En tenant compte des pertes dans la transmission, la puissance qui est transmise à l'eau, $W_{transmise_eau}$ s'écrit :

$$W_{transmise_eau} = C_m\, \omega_m\, \eta_r\, \eta_{bm}\, \eta_p \tag{15}$$

où η_r est le rendement du réducteur, η_{bm} le rendement du système bielle-manivelle et η_p le rendement de la pompe. Dans le cadre de notre étude, ces rendements sont considérés constants. La puissance transmise à l'eau est aussi égale à :

$$W_{transmise_eau} = P_{EM} Q_{EM} \tag{16}$$

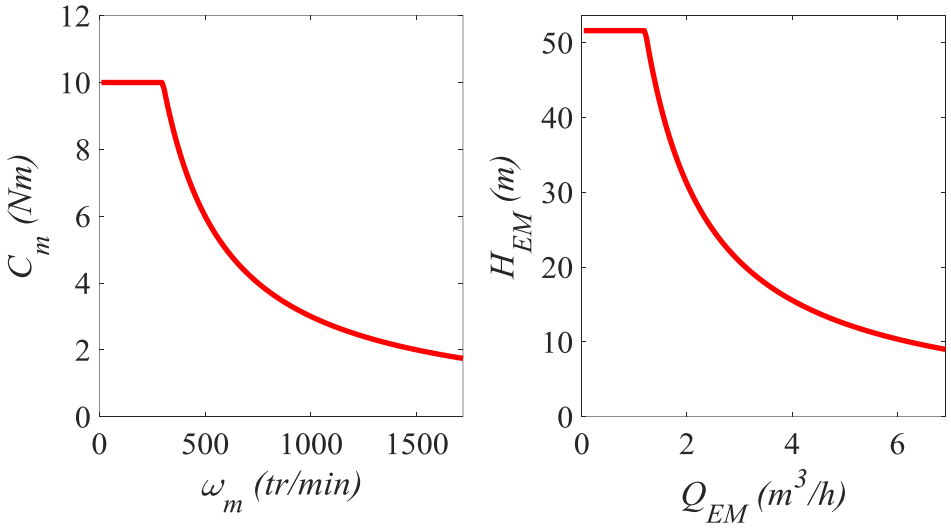
où P_{EM} est la pression en sortie de la pompe. Cette pression peut générer une colonne d'eau de hauteur H_{EM} donnée par :

$$H_{EM} = \frac{P_{EM}}{\rho_{eau}\, g} \tag{17}$$

En combinant les équations (14)-(17), on obtient :

$$H_{EM} = \frac{C_m\, \eta_r\, \eta_{bm}\, \eta_p\, R_r}{\rho_{eau}\, g\, R_m \left(\frac{D_p}{2}\right)^2} \tag{18}$$

Sur la figure 4b est présenté un exemple de courbe (Q_{EM}, H_{EM}). Cette courbe a été obtenue à partir de la courbe (ω_m, C_m) de la figure 4a. La courbe (ω_m, C_m) est donnée par le modèle numérique détaillé du moteur solaire et correspond à une irradiance de 1000 W/m^2. Les valeurs considérées pour la courbe (Q_{EM}, H_{EM}) sont les suivantes : η_r = 0,9, $\eta_{bm}\eta_p$ = 0,6, R_r = 21, R_m = 0,14 m et D_p = 0,08 m.



(4a) **(4b)**

Figure 4 : (a) Couple sur l'arbre C_m en fonction de la vitesse de l'arbre ω_m pour le moteur solaire (b) Hauteur générée par le système de pompage H_{EM} en fonction du débit délivré Q_{EM}.

2.3 Point de fonctionnement

Lorsque le sous-système électromécanique est associé au sous-système hydraulique, le système complet opère au point de fonctionnement (Q, H) donné par l'intersection de la courbe (Q_H, H_H) avec la courbe (Q_{EM}, H_{EM}).

En traçant sur le même graphique les courbes (Q_H, H_H) et (Q_{EM}, H_{EM}) des figures 2 et 4b respectivement, la figure 5 est obtenue. L'intersection de ces deux courbes correspond au point de fonctionnement du système formé par le sous-système hydraulique décrit dans l'exemple de la partie 2.1 et par le sous-système électromécanique présenté dans l'exemple de la partie 2.2. Le débit et la hauteur au point de fonctionnement valent respectivement : Q = 5,9 m^3/h et H = 10,5 m.

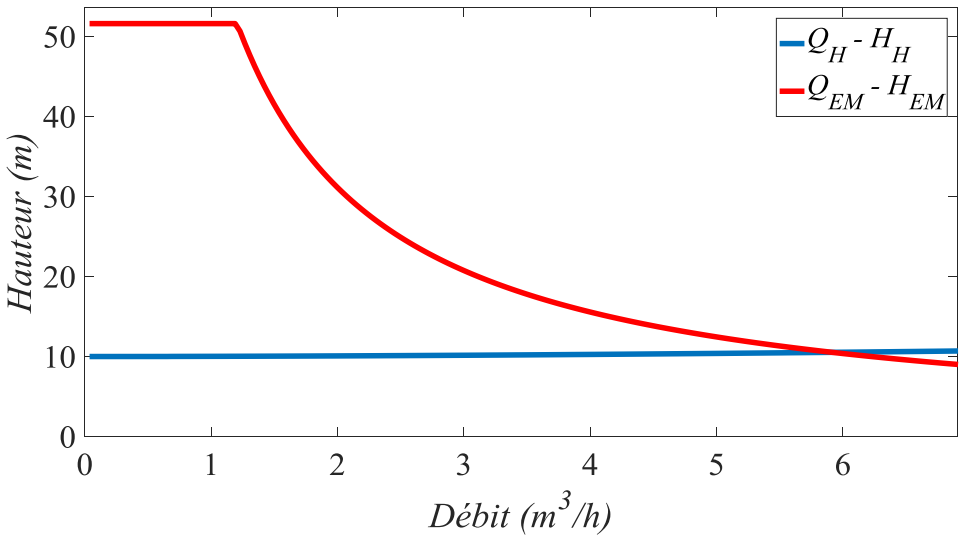


Figure 5 : Point de fonctionnement du système.

3. Optimisation

Dans le cadre de cette optimisation, nous cherchons à maximiser le débit d'eau qui entre dans le réservoir. Le débit au point de fonctionnement est donc la fonction-objectif de l'optimisation. Trois variables sont utilisées pour cette optimisation : le rapport de réduction du réducteur R_r, le rayon de la manivelle R_m et le diamètre du piston D_p. Dans le tableau 1, les valeurs minimales x_{min} et maximales x_{max} que peuvent prendre ces variables ainsi que les valeurs de départ x_0 des variables sont précisées. L'optimisation a été réalisée en utilisant la méthode SQP. En appliquant cette optimisation à l'exemple de la partie 2, nous obtenons une valeur maximale du débit au point de fonctionnement de 6,2 m^3/h. La hauteur au point de fonctionnement correspondante est 10,03 m. Dans le tableau 1, les valeurs des variables x_{opt} pour lesquelles le débit au point de fonctionnement est maximum sont données.

Tableau 1. Plage de variation des variables, valeurs de départ des variables et valeurs au point optimal

Variable	x_{min}	x_{max}	x_0	x_{opt}
R_r	20	60	20	39
R_m	0,07 m	0,15 m	0,07 m	0,11 m
D_p	0,03 m	0,15 m	0,03 m	0,15 m

Lorsque nous comparons les résultats de l'optimisation (Q = 6,2 m^3/h et H = 10,03 m) avec ceux de l'exemple de la partie 2 (Q = 5,9 m^3/h et H = 10,5 m), il apparait que le débit au point de fonctionnement a augmenté de 0.3 m^3/h et que la hauteur correspondante a diminué de 0.47 m. La diminution de cette hauteur est synonyme d'une atténuation des pertes par friction dans les tuyaux. Cela provient du fait que l'optimisation tend à augmenter le diamètre du piston qui est pris égal au diamètre du tuyau. Par ailleurs une première étude de sensibilité (non montrée ici) a été réalisée, elle démontre que la valeur du débit optimal dépend principalement du diamètre du piston.

4. Conclusion

Dans cet article, une station de pompage utilisant un moteur solaire couplé à une pompe à piston a été modélisée. Une première optimisation ayant pour objectif de maximiser le débit fourni par le système de pompage a été réalisée. Concernant le travail futur, dans un premier temps le modèle sera complété en prenant notamment en compte la dynamique du système de pompage. Une pompe centrifuge et une pompe hélicoïdale seront aussi modélisées afin de comparer leurs performances. Dans un second temps, nous considérerons dans notre modèle les aspects socio-économiques et environnementaux liés à la mise en place du système dans les communautés rurales. Enfin, le modèle sera validé expérimentalement en étudiant les conséquences de la mise en place d'un système de pompage dans une communauté rurale d'un pays en voie de développement.

Remerciements

Ce travail est supporté par une subvention publique accordée par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme « Investissement d'Avenir », à travers le projet « IDI 2016 » financé par l'IDEX Paris-Saclay, ANR-11-IDEX-0003-02

Références

[1] WaterAid, "Handpumps Technical Brief," 2013.
Available at: http://www.wateraidamerica.org/sites/default/files/attachments/Handpumps.pdf.

[2] S. S. Chandel, M. Nagaraju Naik, and R. Chandel, "Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 1084–1099, Sep. 2015.

[3] T. Pullenkav, M. Blunck, N. Ghose, and I. M. Luehr, "Solar water pumping for irrigation - Opportunities in Bihar, India," Report from the Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and the Indo-German Energy Programme (IGEN), 2013.
Available at: http://igen-re.in/files/giz__2013__report_solar_water_pumping_for_irrigation_in_bihar.pdf.

[4] D. M. Mendes, L. Paglietti, and D. Jackson, "Zambia: Irrigation market brief," Report from the FAO Investment Center, 2014. Available at: http://www.fao.org/3/a-i4157e.pdf

[5] A. A. Ghoneim, "Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 11–12, pp. 1449–1463, Jul. 2006.

[6] V. C. Sontake and V. R. Kalamkar, "Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1038–1067, Jun. 2016.

[7] S. Benbelkacem, M. Belhocine, A. Bellarbi, N. Zenati-Henda, M. Tadjine, "Augmented reality for photovoltaic pumping systems maintenance tasks," *Renewable Energy*, vol. 55, pp. 428–437, Jul. 2013.

[8] L. Quéval, A. Coty, L. Vido, R. Gottkehaskamp, B. Multon, "A Switched Reluctance Motor Drive using Photovoltaic Transistors: Principle, Prototype, Experimental and Numerical Results," in *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2015, pp. 369–374.

[9] A. Coty, "Moteur solaire sans entretien," [Technical Report] SAUREA, 2014.
Available at: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01076057/

[10] Z. Girma, "Techno-economic analysis of photovoltaic pumping system for rural water supply in Ethiopia," *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 277–295, Mar. 2017.

[11] H. Vogelesang, "Energy consumption in pumps – friction losses," *World Pumps*, vol. 2008, no. 499, pp. 20–24, 2008.

[12] B. R. Munson, D. F. Young, and T. H. Okiishi, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, pp. 430-445, 5th ed. Wiley, 2006.