

Performances et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie

Abderrahmane Hamidat, Amar Hadj Arab et Mohamed Tahar Boukadoum

Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Bouzaréah, Alger

Résumé - L'alimentation en eau potable et d'irrigation reste toujours le souci quotidien des populations des régions enclavées et sahariennes. Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution bien adaptée pour ces régions. En effet, la majorité de ces régions sont très ensoleillées et l'eau est disponible dans des nappes souterraines peu profondes. Dans cet article, nous avons déterminé les performances électriques, hydrauliques et les coûts des systèmes de pompage disponibles sur le marché algérien. La modélisation et la simulation de fonctionnement des systèmes de pompage photovoltaïque ont été effectuées en se basant sur l'expérimentation.

Abstract - The water supply remains always the daily concern of the populations of the remote and saharan areas. The water pumping using photovoltaic solar energy is a well adapted solution for these areas. Indeed, the majority of these areas are very sunny and water is available in not a very deep underground water-level. In this paper, we have determined the electric, hydraulic performances and the costs of the systems of pumping available in the Algerian market. However, the modelling and the simulation of operation of the photovoltaic pumping systems were carried out while being based on the experimentation.

Mots clés: Modélisation - Pompage photovoltaïque - Simulation - Irrigation.

1. INTRODUCTION

Le potentiel énergétique solaire en Algérie est très important, la moyenne annuelle de l'éclairement solaire sur une surface inclinée est environ 7 kWh/m²/jour [1]. L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non polluante, et son utilisation offre un approvisionnement en énergie inépuisable. Etant donné que l'approvisionnement en eau pour les besoins domestiques et d'irrigation reste le souci quotidien des habitants des zones enclavées et sahariennes, les systèmes de pompage photovoltaïque sont particulièrement bien adaptés pour l'alimentation en eau à partir des puits ou des forages.

Plusieurs systèmes de pompage sont installés en Algérie surtout pour l'alimentation en eau potable. Ces installations ont été effectuées par les opérateurs publiques et privés afin de contribuer au développement socio-économique de ces régions. Dans ce travail, nous proposons une étude sur les performances électriques et hydrauliques, ainsi qu'une analyse économique comparative entre les systèmes de pompage photovoltaïque qui existent sur le marché algérien.

2. PRESENTATION ET MODELISATION

2.1 Présentation

Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque et un sous-système de pompage. Ces systèmes fonctionnent au fil du soleil sans stockage électrochimique. L'eau ainsi pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir pour des utilisations ultérieures. Ce type de stockage de l'eau est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans des batteries.

- Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules photovoltaïques reliés en série et en parallèle selon la puissance requise.

- Le sous-système de pompage est composé d'un groupe moteur-pompe et un conditionneur d'énergie. Le groupe moteur-pompe peut être disposé de différentes manières selon la profondeur du puits. Dans les puits classiques peu profonds, le groupe peut être de surface ou immergé. Par contre pour les puits profonds et les puits-forages, le moteur et la pompe sont exclusivement de type immergé [2-4]. Le système de conditionnement de puissance a pour rôle principal d'optimiser le transfert de la puissance entre le générateur photovoltaïque et le groupe moteur-pompe. Le système de conditionnement de puissance peut être un convertisseur dc/ac pour un moteur à courant alternatif ou un convertisseur dc/dc pour un moteur à courant continu [5].

2.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque [6-9]. Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la caractéristique courant-tension. Dans ce travail, nous avons retenu un modèle analytique qui donne de très bonnes précisions. La caractéristique I-V de ce modèle est donnée par l'équation suivante [10]:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{A k T_j} \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (1)$$

avec I_L photocourant (A), I_0 courant de saturation (A), q charge de l'électron (eV), k constante de Boltzmann, A facteur d'idéalité relative au module, T_j température de jonction (K), R_s résistance série (Ω) et R_{sh} résistance shunt (Ω).

2.3 Modélisation du sous-système de pompage

Pour une hauteur manométrique h donnée, le modèle proposé relie directement la puissance électrique utile P en fonction du débit d'eau de la pompe Q . La relation du modèle est défini comme suit [11, 12] :

$$P(Q, h) = a_{0j}(h)Q^3 + a_{1j}(h)Q^2 + a_{2j}(h)Q + a_{3j}(h) \quad (2)$$

avec :

$$a_{ij}(h) = \sum_{j=0}^3 a_{ij} h^j \quad (3)$$

Où a_{ij} sont des constantes à déterminer pour chaque sous-système de pompage.

2.4 Besoins en eau et surface irrigable

Les besoins en eau des cultures par phase végétative, W_{ph} sont fonctions de l'évapotranspiration et de la durée D_{ph} de la phase. Pour le calcul de l'évapotranspiration E_t , nous avons utilisé la méthode de Penman modifiée qui est basée sur les variables climatiques [13-16]. Donc, la relation qui calcule les besoins en eau est donnée comme suit :

$$W_{ph} = Et(\text{phase}) \times D_{ph} \quad (4)$$

Les besoins totaux W_{tot} sont la somme des besoins de chaque phase végétative de la culture. La relation décrivant les besoins totaux est illustrée par la relation suivante :

$$W_{tot} = \sum_{k=1}^4 W_{ph}(k) \quad (5)$$

avec $W_{ph}(k)$ est le besoin végétatif de la phase k [mm], W_{tot} représente les besoins totaux de la culture (mm).

La surface irrigable S_{irr} par un système de pompage est le rapport entre le volume d'eau pompé durant les quatre phases végétatives et les besoins totaux de la culture.

$$S_{irr} = \frac{1}{10} \frac{D_{tot}}{W_{tot}} \quad (6)$$

avec S_{irr} : surface irrigable (ha), D_{tot} : volume d'eau total pompé durant les quatre phases végétatives (m^3).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

En se basant sur les modèles cités dans le paragraphe précédent [17], un programme de simulation des systèmes de pompage photovoltaïque a été élaboré pour le calcul des performances électriques, hydrauliques et agronomiques des systèmes de pompage. Ce programme simule le fonctionnement des systèmes de pompage en fonction de plusieurs paramètres tels que : la hauteur manométrique (hmt), l'éclairement solaire, la puissance du générateur photovoltaïque. Les performances des systèmes de pompage sont calculées pour la ville de Béchar (Sud Algérie) en utilisant un générateur photovoltaïque constitué des modules photovoltaïques UDTs-50. La puissance crête du module photovoltaïque est de 50 W et il est constitué de 36 cellules en silicium monocristallin.

3.1 Performances en eau potable

Deux sous-systèmes de pompage de même puissance (400 W) et de technologie différente ont été testés pour déterminer les performances de l'alimentation en eau potable. Le premier système (SP1) est constitué d'un moteur DC et une pompe volumétrique à cavité progressive (Fig. 1). Le deuxième système (SP2) est constitué d'un moteur alternatif triphasé et une pompe centrifuge multicellulaires (Fig. 2). Les performances sont déterminées en utilisant un générateur photovoltaïque de 300 Wc avec une configuration d'une branche de six modules en série (6s x 1p).

La comparaison des performances en fonction des mois de l'année est donnée pour une hauteur h égale à 10 et 20 m. Pour la hauteur h égale 10 m, les deux moteurs-pompes ont des faibles pertes énergétiques. En effet et pour le SP2, les pertes énergétiques sont inférieures à 5 % pour le mois de juin. Pour le SP1, les pertes énergétiques sont inférieures à 2 % pour le mois de septembre (Fig. 3). Pour la hauteur h égale 20 m, les pertes énergétiques du SP2 dépassent les 15 % pour le mois de mai par contre pour le SP1 la valeur des pertes énergétiques ne dépasse pas les 5 %, valeur enregistrée pour le mois de juin (Fig. 4).

Le volume d'eau pompé illustré dans les figures 5 et 6 confirme les performances meilleures du SP1 par rapport au SP2. Ainsi pour une puissance crête de 300 Wc, la quantité

d'eau pompée par le SP1 par rapport au SP2 est presque le double pour la hauteur h égale à 10 m et elle est le triple pour h égale à 20 m.



Fig. 1: Système de pompage SP1



Fig. 2: Système de pompage SP2

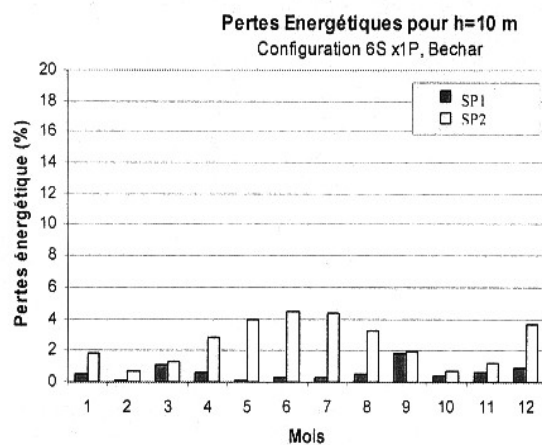


Fig. 3: Pertes énergétiques mensuelles
 $h = 10$ m

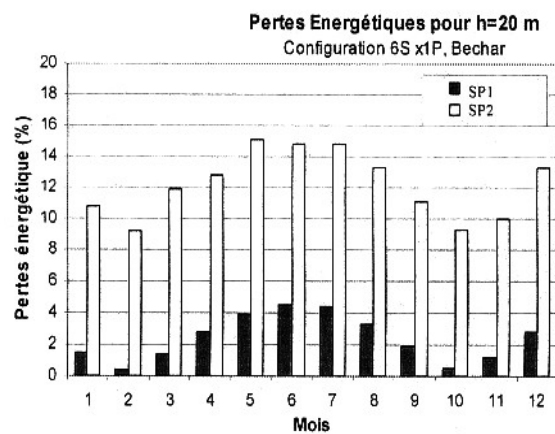


Fig. 4: Pertes énergétiques mensuelles
 $h = 20$ m

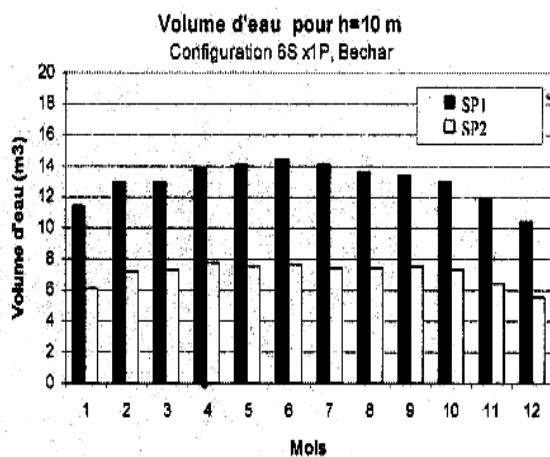


Fig. 5: Volume d'eau pompé mensuel
 $h= 10$ m

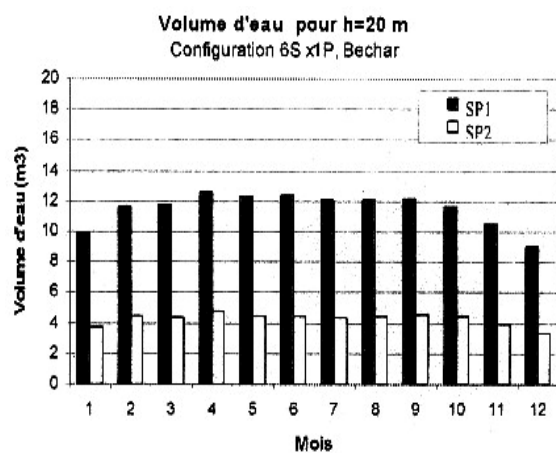


Fig. 6: Volume d'eau pompé mensuel
 $h= 20$ m

3.2 Performances en irrigation

Dans le domaine de l'irrigation, nous avons testé deux systèmes de pompage photovoltaïque. Le premier système (SP3) est constitué d'un moteur alternatif triphasé et une pompe centrifuge multicellulaires (Fig. 7). Le deuxième système (SP4) est un système de surface (Enel Mitidja 32) de fabrication Algérienne. Il est constitué d'un moteur de surface monophasé et une pompe de surface centrifuge monocellulaire (Fig. 8).



Fig. 7: Système de pompage SP3

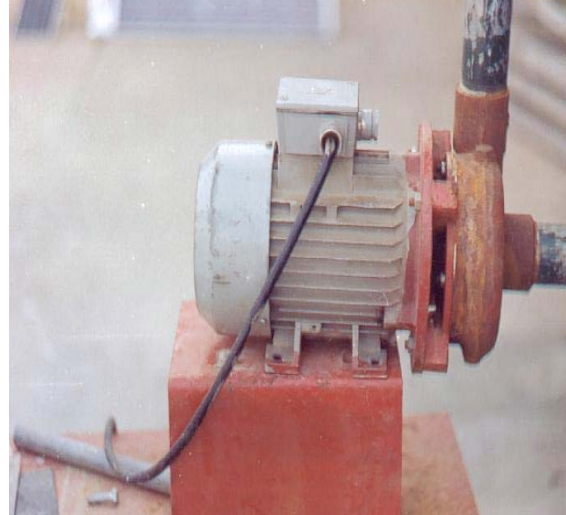


Fig. 8: Système de pompage SP4

Les performances de ces deux systèmes de pompage sont évaluées en fonction de la hauteur totale et une configuration du générateur photovoltaïque (1400 Wc) de quatre branches en parallèle de sept modules en série chacune (7s x 4p). Les résultats obtenus pour le calcul de la surface irrigable par les deux systèmes de pompage ont montré que pour la hauteur h égale à 10 m, le système SP4 offre plus de surface à irriguer par rapport au système SP3 surtout pour la culture du blé (Fig. 9). A l'inverse, le système SP3 présente le meilleur résultat de la surface irrigable pour les hauteurs élevées. La figure 10 illustre la surface irrigable pour une hauteur h égale à 15 m.

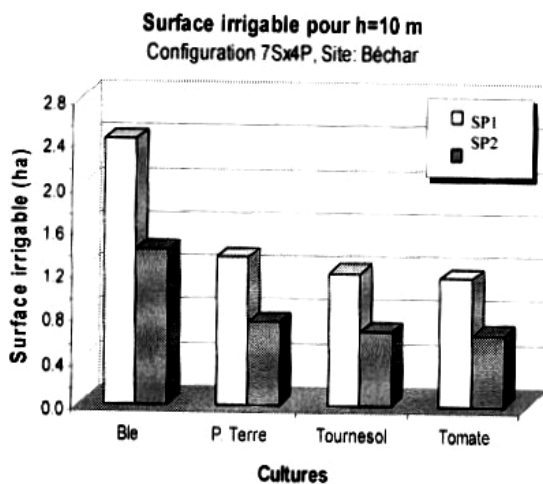


Fig. 9: Surface irrigable par le système de pompage pour $h = 10$ m

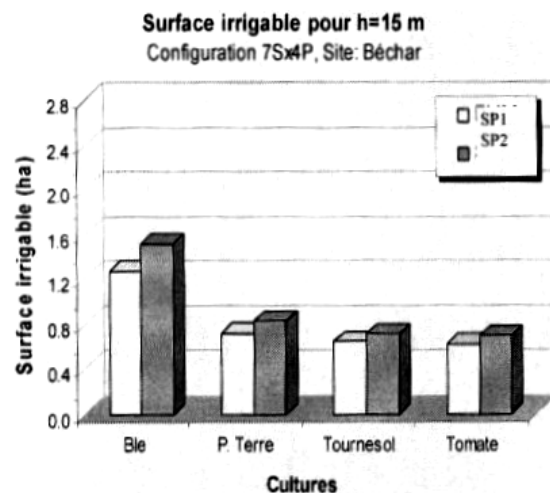


Fig. 10: Surface irrigable par le système de pompage pour $h = 15$ m

4. COUT DES SYSTEMES DE POMPAGE PV

En plus des coûts des différents éléments du système photovoltaïque, la méthode de calcul du coût doit tenir en compte de certains coûts qui sont liés au système tels que : la maintenance et les pièces de rechange [17, 18]. Le coût du système de pompage (SCOL) est donné par la relation suivante :

$$SCOL = [1 + L_T AM] \cdot TCPS + (NMP - 1) CMP + (NINV - 1) CINV \quad (7)$$

avec :

L_T est la durée de vie du système (an),
 AM est le coût de la maintenance par an (%),
 $TCPS$ est le coût total initial du système de pompage (DA),
 NMP est le nombre de moteur-pompe utilisé durant la durée de vie,
 $NINV$ est le nombre de convertisseur utilisé durant la durée de vie,
 CMP et $CINV$ sont respectivement les coûts du moteur-pompe et du convertisseur.

Le coût par unité de volume d'eau pompé (CUWD) d'un système de pompage photovoltaïque est représenté par l'équation suivante :

$$CUWD = \frac{SCOSL}{WDY \cdot L_T} \quad (8)$$

avec: WDY est le volume total d'eau pompée durant la durée de vie (m^3).

Cette méthode de calcul est valable uniquement pour comparer les coûts entre les systèmes de pompage photovoltaïque, car le coût de l'eau calculé ne tient pas en compte de certains paramètres économiques tels que : le taux d'inflation, le taux d'intérêt des banques.

4.1 Hypothèses

Le calcul du coût du mètre cube d'eau pompée est effectué à partir du coût total du système de pompage photovoltaïque en tenant compte de toutes les dépenses nécessaires durant la durée de vie du système. La durée de vie des modules photovoltaïques et les sous-systèmes sont estimés par les constructeurs qui donnent 20 ans pour le générateur photovoltaïque et 10 années pour le sous-système de pompage [19]. Dans le calcul des coûts, nous avons retenu une durée de vie de 10 ans pour le système de pompage photovoltaïque. Cette durée est très raisonnable et le système fonctionnera sans risque de changement un de ces éléments.

Le coût du générateur photovoltaïque est calculé sur la base 600,00 DA le watt crête, c'est le tarif moyen appliqué dans le marché Algérien. Le coût de l'installation du système de pompage photovoltaïque sur un site donné tient en compte tous les coûts relatifs au montage du générateur photovoltaïque et le sous-système de pompage tels que: la structure du générateur, le béton, le câblage, tuyauteries, coudes, salaires, etc.

Le tableau 1 résume les différentes hypothèses adoptées pour le calcul du coût des systèmes de pompage photovoltaïque.

Tableau 1: Hypothèses de calculs des coûts

Hypothèses de calculs	SP1	SP2	SP3	SP4
Puissance crête (Wc)	300	300	1400	1400
Hauteur manométrique totale (m)	10	10	10	10
Durée de vie du système (années)	10	10	10	10
Maintenance annuelle (% du coût de l'installation)	3	2	2	2
Nombre d'électronique/moteur/pompe	1	1	1	1
Coût de l'électronique et moteur/pompe (DA)	349 000	142 000	195 000	125 000
Coût du générateur PV (DA)	180 000	180 000	840 000	840 000
Coût d'installation du système de pompage (DA)	15 000	15 000	45 000	45 000

4.2 Coût et distribution des coûts des systèmes de pompage photovoltaïque

Les résultats de calcul des coûts ont montré que le coût du mètre cube d'eau pompé est très satisfaisant (Tableau 2). En effet, les systèmes SP4 et SP3 avec respectivement 3.66 DA/m³ et 6.99 DA/m³ offrent les coûts de l'eau pompé les moins chères par rapport aux systèmes SP1 et SP2. Ceci est dû à la grande quantité d'eau pompée par les systèmes SP4 et SP3 malgré leurs coût total initial très élevé. Cependant, les coûts des systèmes SP1 et SP2 qui sont respectivement 14,86 et 15,54 DA sont très satisfaisants pour l'alimentation en eau potable.

Tableau 2: Calculs des coûts pour le site de Béchar et h = 10 mètres

Calculs des coûts (Béchar)	SP1	SP2	SP3	SP4
Coût total initial du système de pompage (DA)	544 000	337 000	1 080 000	1 010 000
Coût du système à la fin de la durée de vie (DA)	707 200	404 400	1 296 000	1 212 000
Volume d'eau pompé par an (m ³ /an)	4 758	2 603	18 544	32 967
Coût du mètre cube pompé (DA/m ³)	14,86	15,54	6,99	3,66

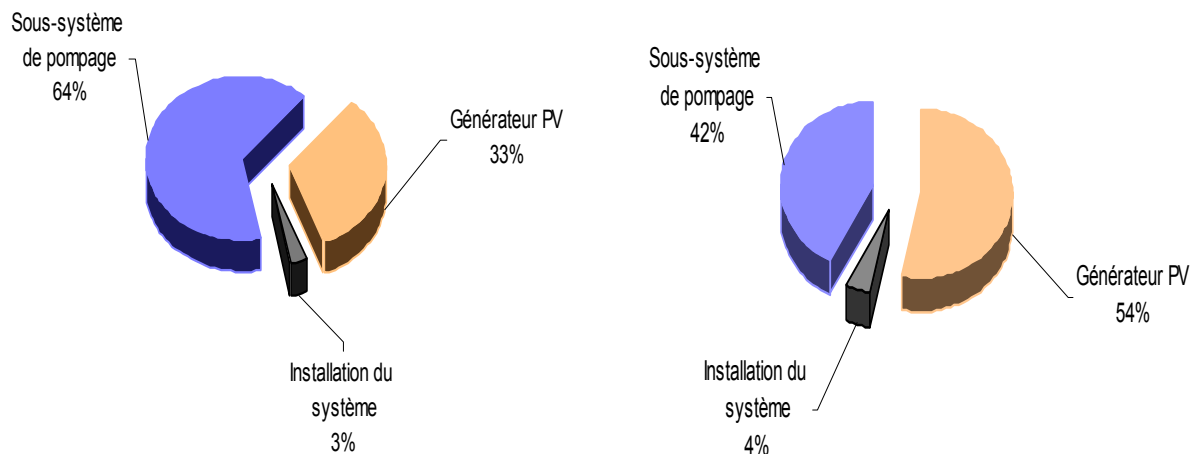
La distribution des coûts pour chaque système est un paramètre très important pour connaître les éléments qui pénalisent le coût total du système. La distribution des coûts pour les deux configurations du générateur photovoltaïque est calculée pour les deux configurations du générateur photovoltaïque.

Générateur photovoltaïque 300 W_c

Le système de pompage SP1 a l'avantage d'avoir un rendement de pompage très élevé mais son sous-système de pompage est trop cher. En effet, la figure 11 montre la très grande part du sous-système de pompage, 64 %, par rapport au générateur photovoltaïque, 33 %. Quant au coût de l'installation est environ 3 % du coût total du système. Le système de pompage SP2 présente une distribution des coûts très classique. La part du générateur photovoltaïque et le sous-système de pompage est respectivement 54 % et 42 %, et enfin la part du coût de l'installation du système est 4 % du coût total du système de pompage.

Générateur photovoltaïque 1400 W_c

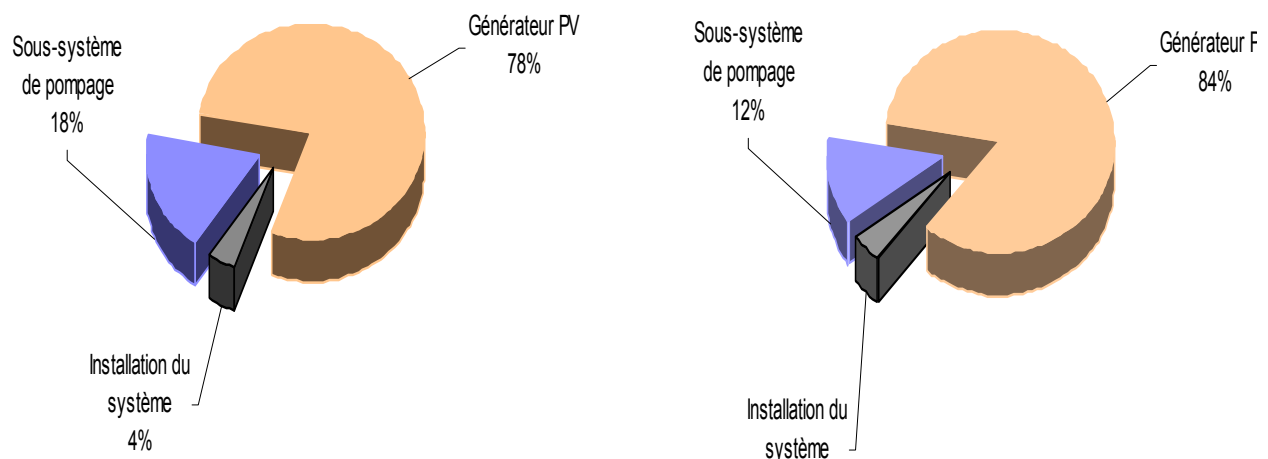
Le système de pompage SP3 présente une distribution très déséquilibrée à cause de la grande taille du générateur photovoltaïque. En effet, le sous-système de pompage représente seulement 18 % du coût total du système contre 78 % pour le générateur photovoltaïque. Le coût de l'installation est environ 4 % du coût total du système. Egalement, le système de pompage SP4 présente une distribution très déséquilibrée à cause de la grande taille du générateur photovoltaïque et aussi à cause du coût bas du moteur pompe SP4. Le générateur photovoltaïque présente 84 % du coût total et le sous-système de pompage présente seulement 12 % du coût total du système et le coût de l'installation est environ 4 % (Fig. 12).



Système de pompage **SP1**

Système de pompage **SP2**

Fig. 11: Distribution des coûts pour le système de pompage
Configuration photovoltaïque 6 S x 1 P (300 W_c)



Système de pompage **SP3**

Système de pompage **SP4**

Fig. 12: Distribution des coûts pour le système de pompage
Configuration photovoltaïque 7 S x 4 P (1400 W_c)

5. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons testé et simulé le fonctionnement des systèmes de pompage pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. L'analyse de résultats, nous a permis de comparer les performances de quatre systèmes de pompage de technologie différente.

Les performances sont comparées en fonction de la hauteur totale, la configuration du générateur et les données géographiques du site. Pour les systèmes destinés pour l'alimentation en eau potable, c'est le système SP1 qui a donné les meilleurs résultats.

Quant aux systèmes destinés pour l'irrigation, les résultats obtenus ont montré que le système de surface SP4 est le plus performant pour les faibles hauteurs manométriques totales, inférieures à 18 mètres. Par contre pour les hauteurs manométriques totales, supérieures à 20 m, c'est le système SP3 qui est le plus performant.

REFERENCES

- [1] A. Maafi, '*A survey on PV activities in Algeria*', Renewable Energy', Vol. 20, pp. 9 - 17, 2000.
- [2] A. Hamidat, '*Perspectives du Pompage PV pour les Grandes et Faibles Profondeurs*', Actes des Journées Nationales d'Etudes Techniques et de Valorisation sur l'Energie Solaire, E.N.A, Alger, 29 - 30 Juin 1996.
- [3] A. Hamidat, M. Belhamel, A. Malek, M.T. Boukadoum and S. Diaf, '*Final Report of the Concerted Action for the Testing and Cost Reduction of PV Water Pumping Systems*', Avicenne Program, Contract AVI-CT94-0004, 1997.
- [4] I.J. Karassik, W.C. Krutzsch, W.H. Fraser and J.P. Messina, '*Pump Handbook*', Second Edition, McGraw-Hill International Editions.
- [5] C. Franx, '*A New Approach to Solar Pump Systems Using Submersible Motors*', Proceedings of the 2nd Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 1038 - 1045, 1979.
- [6] D.S.H. Chan, J.R. Philips and J.C.H. Phang, '*A Comparative Study of Extraction Methods for Solar Cell Model Parameters*', Solid State Electronics, Vol. 29, N°3, pp. 329 - 337, 1986.
- [7] G.H. Hart, '*Residential Photovoltaic System Simulation Electrical Aspect*', IEEE, pp. 281 - 288, 1982.
- [8] M. Buresh, '*Photovoltaic Energy Systems*', McGraw-Hill Book Company. New-York, 1983.
- [9] M. Akbaba, I. Qamber and A. Kamal, '*Matching of Separately Excited DC Motors to Photovoltaic Generators for Maximum Power Output*', Solar Energy, Vol. 63, N°6, pp. 375 - 385, 1998.
- [10] L. Keating, D. Mayer, S. McCarthy and G.T. Wrixon, '*Concerted Action on Computer Modelling and Simulation*', Proceedings of the 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Lisbon, Portugal, pp. 1259 - 1265, 1991.
- [11] A. Hamidat, '*Simulation des Systèmes de Pompage Photovoltaïques Destinés pour l'Alimentation et Eau Potable et pour la Petite Irrigation*', Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2004.
- [12] A. Hamidat, '*Simulation of the Performance and Cost calculations of the Surface Pump*', Renewable Energy, Vol. 18, pp. 383 - 392, 1999.

- [13] A. Hamidat, B. Benyoucef and T. Hartani, '*Small-Scale Irrigation with Photovoltaic Water Pumping System in Sahara Regions*', Renewable Energy, Vol. 28, pp. 1081 - 1096, 2003.
- [14] J. Doorenbos and A.H. Kassam, '*Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*', FAO Irrigation and Drainage Paper, N°24, Second printing, 1981.
- [15] S.B. Shah and R.J. Edling, '*Daily Evapotranspiration Prediction from Louisiana Flooded Rice Field*', Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol. 126, N°1, pp. 8 - 13, Jan-Feb, 2000.
- [16] A. Hamidat, B. Benyoucef and T. Hartani, '*Performance of Photovoltaic Small-Scale Irrigation under Sahara Climate Conditions*', The World Renewable Energy Congress VII. Cologne (Germany), 29 June – 5 July, 2002.
- [17] *Concerted Action for the Testing and Cost Reduction of PV Water Pumping Systems*. Avicenne Programme, Contract AVI-CT94-0004. Final Report, April 1997.
- [18] A. Hamidat, A. Hadj Arab, F. Chenlo and M.A. Abella, '*Performance and Costs of the Centrifugal and Displacement Pumps*', World Renewable Energy Congress V, Florence (Italy), September, 20 - 25, 1998.
- [19] Water Pumping, The Solar Alternative - Photovoltaic Design Assistance Center, Sandia National Laboratories. Albuquerque, NM 87185.