

Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque

Amar Hadj Arab ¹, Mohamed Benghanem ² et Akila Gharbi ¹

¹ Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Bouzaréah, Alger

² Faculté de Génie Electrique, U.S.T.H.B., B.P. 32, El-Alia, Bab-Ezzouar, Alger

Résumé - Ce travail présente deux méthodes de dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque, une méthode analytique et une méthode graphique. Ces méthodes permettent de dimensionner une installation de pompage photovoltaïque pour satisfaire les besoins en eau d'une consommation bien déterminée. Elles sont basées essentiellement sur l'évaluation des besoins d'eau, le calcul de l'énergie hydraulique nécessaire, la détermination de l'énergie solaire disponible et le choix des composants.

Abstract - This work presents two sizing methods of photovoltaic (PV) pumping systems. The first one is analytic and the second one graphic. These methods allow us to size a PV pumping installation in order to satisfy the water needs of a determined consumption. They are based essentially on the water needs evaluation, the calculation of the necessary hydraulic energy, the determination of the available solar energy and the choice of the components.

Mots clés: Photovoltaïque - Pompage - Dimensionnement.

1. INTRODUCTION

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans zones désertiques et semi-désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides et semi-arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage solaire photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent.

Plusieurs travaux sur le dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque (SPPV) ont été publiés [1, 2, 3]. Ces travaux se basent sur la simulation du fonctionnement de chaque composante de ces SPPV. Cependant ces programmes nécessitent des données expérimentales qui ne sont pas faciles à obtenir.

2. METHODE SIMPLE DE DIMENSIONNEMENT

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

- Evaluation des besoins en eau
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire
- Détermination de l'énergie solaire disponible
- Choix des composants.

2.1 Evaluation des besoins en eau

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie.

Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail [4].

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale.

La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journalières et l'autonomie requise du système.

2.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

Une fois définies les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation :

$$E_h = g \rho_a V_a h / 3600 \quad (1)$$

où

E_h : énergie hydraulique (Wh/jour)	h : hauteur totale (m)
V_a : volume d'eau (m ³ /jour)	ρ_a : densité de l'eau (1000 kg/m ³)
g : accélération de la pesanteur (9,81m/s ²)	

Durant le processus de pompage, le niveau d'eau à l'intérieur du puits tend à baisser, jusqu'à ce que la vitesse avec laquelle la régénération du puits arrive à équilibrer la quantité pour que l'on puisse pomper l'eau de nouveau. L'abaissement du niveau d'eau dans le puits dépend d'un certain nombre de facteurs, comme le type et la perméabilité du sol et l'épaisseur de l'aquifère.

La hauteur totale de pompage est la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique :

$$h = h_s + h_d \quad (2)$$

Dans le cas de puits qui présentent des variations importantes du niveau d'eau en fonction du débit, on peut ajouter un terme correctif et cette équation devient :

$$h = h_s + h_d + \left(\frac{h_d - h_s}{Q_p} \right) Q_A \quad (3)$$

où

h_s : niveau statique (m)	Q_p : débit d'essai (m ³ /h)
h_d : niveau dynamique (m)	Q_A : débit apparent (m ³ /h)

La hauteur statique h_s est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel on doit pomper l'eau.

La hauteur dynamique h_d représente les pertes d'eau dans la tuyauterie. La formule de Darcy-Weisbach [6] permet le calcul de la hauteur dynamique :

$$h_d = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

où

f : coefficient de friction des parois de la tuyauterie
 L : longueur de la tuyauterie (m)
 g : accélération de la pesanteur (m/s^2)
 v : vitesse moyenne du fluide (m/s)
 D : diamètre de la tuyauterie (m)

Dans le cas où le système de tuyauterie aurait un autre type d'accessoires (vannes, coudes, té, jonctions, ...), nous pouvons calculer les pertes de charge dans chaque élément additionnel comme :

$$h_d = K_{ac} \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

où K_{ac} est un coefficient dépendant du type d'accessoire. Dans le tableau 1, on donne une série de valeurs de K_{ac} pour différents accessoires.

Tableau 1: Coefficient K_{ac} pour différents types d'accessoires dans la tuyauterie

Accessoire	Coefficient K_{ac}
Jonction du réservoir à tuyauterie connexion au ras de la paroi	0,5
Jonction de tuyauterie au réservoir	1,0
Coude 45°	0,35 à 0,45
Coude 90°	0,50 à 0,75
Tés	1,50 à 2,00
Vannes de contrôle (ouverte)	3,0

Une autre méthode pour tenir compte des accessoires du circuit est d'ajouter à la longueur réelle de la tuyauterie (seulement pour effet de calcul) des longueurs de tubes de même diamètres que le conducteur en étude, capables de causer les mêmes pertes de charge occasionnés par les pièces qu'elles substituent. De cette façon, n'importe quel accessoire peut être substitué par une longueur fictive [7]. En général, on recommande que la hauteur dynamique ne dépasse pas 10 % de la hauteur totale de pompage.

2.3 Détermination de l'énergie solaire disponible

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire.

2.4 Inclinaison du générateur photovoltaïque

L'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire.

2.5 Mois de dimensionnement

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, c'est-à-dire celui dont le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire soit minimum.

Comme idée de principe, à chaque inclinaison β , correspond un mois le plus défavorable. Le mois de dimensionnement à l'inclinaison optimale sera précisément celui qui présente le plus petit rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique. L'irradiation solaire $G_{dm}(\beta)$ et l'énergie hydraulique nécessaire E_h correspondantes à ce mois serviront pour le choix des composantes du système.

2.6 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

La puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque sous les conditions standards de mesure, CSM, (éclairage $G_{ce} = 1000 \text{ W/m}^2$ et température de cellule $T_{c,ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) [8] est :

$$P_p = \eta_g A G_{ce} \quad (6)$$

où

P_p : puissance de sortie sous CSM (W)

η_g : rendement du générateur à la température de référence (25 °C)

A : surface active du générateur (m^2)

G_{ce} : éclairage dans les CSM (1000 W/m^2)

L'énergie électrique journalière, E_e , est donnée par :

$$E_e = \eta_{PV} A G_{dm}(\beta) \quad (7)$$

où

η_{PV} : rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation

$G_{dm}(\beta)$: irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison β ($\text{kWh/m}^2/\text{jour}$).

Le rendement η_{PV} peut être calculé à l'aide de l'expression :

$$\eta_{PV} = F_m \left[1 - \gamma (T_c - T_{c,ref}) \right] \eta_g \quad (8)$$

où F_m : facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximum.

γ : coefficient de température des cellules. γ prend des valeurs entre 0,004 et 0,005 /°C pour des modules au silicium mono et polycristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

T_c : température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.

L'énergie électrique nécessaire est liée avec l'énergie hydraulique par l'expression :

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{MP}} \quad (9)$$

où E_h : énergie hydraulique moyenne mensuelle (kWh)

η_{MP} : rendement du sous-système moteur-pompe.

En substituant les équations (7), (8) et (9) dans (6), nous obtenons pour la puissance crête du générateur :

$$P_p = \frac{G_{ce}}{F_m \left[1 - \gamma (T_c - T_{c,ref}) \right] G_{dm}(\beta)} \frac{E_h}{\eta_{MP}} \quad (10)$$

2.7 Dimensionnement du moteur

Le moteur doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque.

2.8 Dimensionnement de la pompe

Le débit crête Q (m^3/h) est calculé par la relation :

$$Q = \frac{3.6 P_h}{g h} \quad (11)$$

où

P_h : puissance hydraulique nécessaire (W) g : accélération de la pesanteur
($9.81m/s^2$)

h : hauteur manométrique totale (m)

La puissance hydraulique crête (P_h) nécessaire en fonction de la puissance électrique crête fournie par le générateur photovoltaïque (P_e) est donnée par :

$$P_h = P_e \eta_{MB} \quad (12)$$

où η_{MB} : rendement crête du sous-système moteur-pompe.

2.9 Dimensionnement des tuyauteries

Le diamètre des tuyauteries peut être estimé en utilisant des tableaux ou des graphes qui expriment les pertes par frottements en fonction du débit pour chaque diamètre de la tuyauterie.

En pratique, il se présente le problème de fixer la hauteur dynamique h_d pour des considérations économiques. En effet, si nous augmentons le diamètre D de la tuyauterie, h_d diminue. Economiquement parlant, une augmentation de D suppose une augmentation des dépenses d'installation, mais en même temps une diminution des pertes d'énergie.

Le diamètre le plus économique sera celui qui réduit au minimum la somme des coûts de la tuyauterie et de l'énergie perdue par frottements [9]. Il est possible d'obtenir analytiquement les diamètres des tuyauteries de pompage qui s'approximent à ceux qui minimisent les coûts des installations par la formule de Bresse [7] :

$$D = K \sqrt{Q} \quad (13)$$

D : diamètre de la tuyauterie (m)

K : coefficient qui varie de 0,75 à 1,40

Q : débit crête de la pompe (m^3/s)

L'équation de continuité est :

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (14)$$

Choisir la valeur K équivaut à fixer la vitesse moyenne du fluide (v). Enfin en substituant dans l'équation de continuité la valeur de Q prise de la formule de Bresse, nous avons :

$$v = \frac{4}{\pi K^2} \quad (15)$$

Quelque soit la formule employée, les diamètres obtenus diffèrent fréquemment des diamètres commerciaux. Il suffit de prendre la valeur du diamètre commercial le plus proche et d'ajouter les calculs en conséquence.

3. METHODE GRAPHIQUE

En se basant sur les équations intérieures, nous pouvons représenter un diagramme qui nous permet de déterminer d'une manière approximée la taille du générateur photovoltaïque pour une demande connue d'énergie hydraulique pour le mois de dimensionnement. La méthode permet le calcul de la puissance crête à l'aide de tracé de droites dans le diagramme cité, en reliant les différentes valeurs d'énergie hydraulique et électrique avec les valeurs de rendements du sous-système moteur-pompe et l'irradiation moyenne journalière, que nous supposons connues (Fig. 1).

Pour cet exemple, nous supposons: $T_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$, $F_m = 0,9$, $\gamma = 0,005/^\circ\text{C}$.

Le point de départ est l'axe OB, où on choisit la valeur correspondante à l'énergie hydraulique requise (en kWh/jour). Si nous traçons une ligne horizontale qui passe cette valeur, l'intersection avec celle qui correspond au rendement du sous-système moteur-pompe. La projection de ce point d'intersection sur l'axe OC, nous donne la valeur correspondante de l'énergie électrique requise. Si nous prolongeons cette nouvelle valeur vers le haut du diagramme, nous obtiendrons de nouveaux points d'intersection avec les droites qui représentent les différentes valeurs moyennes journalières de l'irradiation. En choisissant la droite appropriée à l'irradiation solaire du mois de dimensionnement, on obtient par projection sur l'axe OA la valeur correspondante de la puissance crête du générateur photovoltaïque. En utilisant aussi un autre diagramme, nous pouvons déterminer graphiquement le débit de la pompe (l/s) à partir de la puissance du générateur (Fig. 2).

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Nous nous proposons de dimensionner une installation de pompage photovoltaïque pour satisfaire les besoins en eau pour la consommation humaine d'un village de cent personnes.

Nous avons fait les suppositions suivantes :

- la consommation moyenne journalière par personne est constante et elle est de 60 litres,
- le rendement moyenne journalier du sous-système moteur-pompe est de 20 %.
- le rendement crête du sous-système moteur-pompe est de 50 %,
- la hauteur totale de pompage est de 8 m,
- $T_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$, $F_m : 0.9$ et $\gamma = 0,005/^\circ\text{C}$.

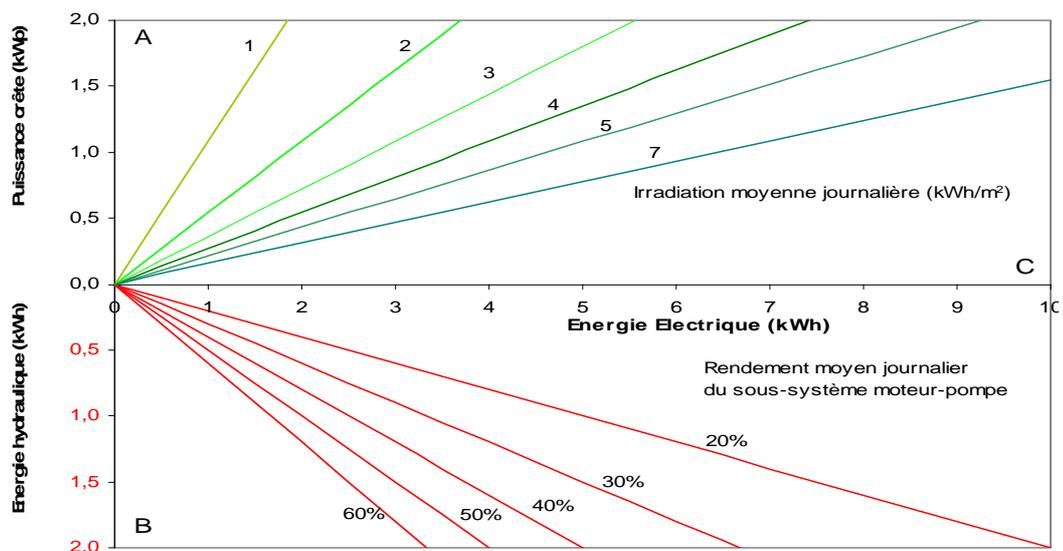


Fig. 1: Diagramme pour déterminer la taille du générateur photovoltaïque nécessaire pour couvrir une demande d'énergie hydraulique

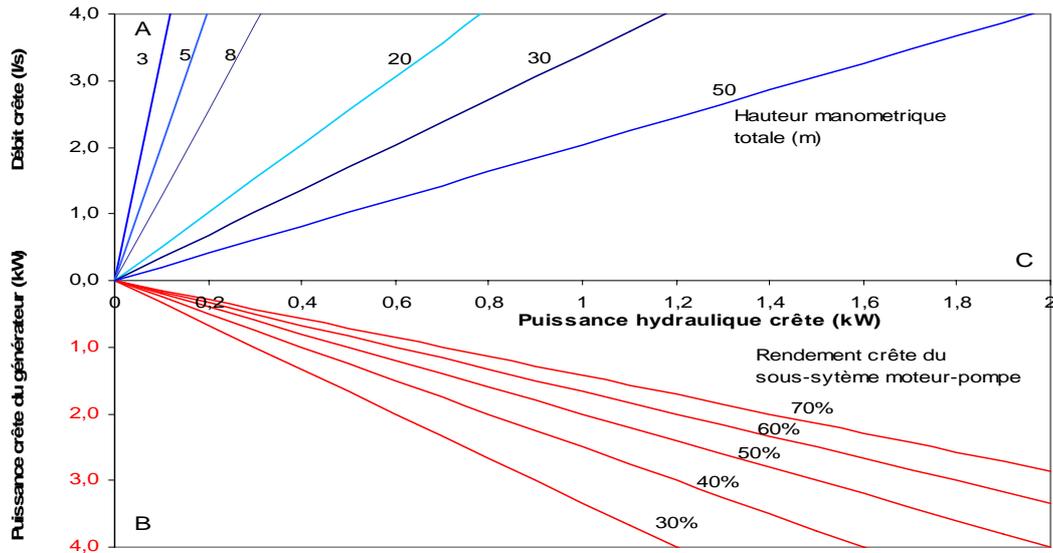


Fig. 2: Diagramme pour déterminer le débit crête de la pompe

La puissance crête du générateur PV et le débit crête de la pompe pour différentes localités sont donnés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Puissance crête du générateur photovoltaïque et débit crête de la pompe

Localité	Alger	Oran	Béchar	Tamanrasset
Latitude (°)	36,72	35,32	31,62	22,4
Mois de dimensionnement	Décembre	Décembre	Décembre	Novembre
Inclinaison β (°)	57	54	53	31
Irradiation solaire				
$G_{dm}(\beta)$ (kWh/m ² /jour)	3,535	3,180	5,343	7,264
Hauteur totale de pompage = 8 m				
Puissance crête P_p (W)	222	247	147	108
Débit crête Q (m ³ /h)	5,1	5,7	3,4	2,5
Hauteur totale de pompage = 15 m				
Puissance crête P_p (W)	417	463	276	203
Débit crête Q (m ³ /h)	9,6	10,6	6,3	4,6

5. CONCLUSION

Il en résulte dans cet exemple que pour les mêmes besoins en eau et hauteurs de pompage, dans les localités du sud (Béchar et Tamanrasset), on nécessite moins de puissance du générateur et une pompe plus petite avec moins de débit que dans celles du nord (Alger et Oran).

Cependant, par rapport au programme de simulation, cette méthode simple de dimensionnement ne tient pas compte de nombreux paramètres comme par exemple la capacité du réservoir, la configuration du générateur et ne détermine pas la probabilité de pertes de charges (PPC).

NOMENCLATURE

ρ : densité de l'eau (1000 kg/m^3)	A : surface active du générateur PV (m^2)
β : inclinaison des modules PV (Deg.)	D : diamètre de la tuyauterie (m)
η_g : rendement du générateur PV à 25°C	f_m : facteur de couplage
η_{PV} : rendement moyen journalier du générateur PV	f : coefficient de friction des parois de la tuyauterie
γ : coefficient de température des cellules Photovoltaïques	G : accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$)
η_{mbp} : rendement du sous-système moteur-pompe	G_{ce} : éclairage dans les CSM (1000 W/m^2)
η_{MB} : rendement crête du sous-système moteur-pompe	$G_{dm}(\beta)$: irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison β ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{jour}$)
h : hauteur manométrique totale (m)	h_s : niveau statique (m)
h_d : niveau dynamique (m)	L : longueur de la tuyauterie (m)
K, K_{ac} : coefficients	Q : débit crête de la pompe (m^3/s)
P_p : puissance de sortie sous CSM (W)	Q_p : débit d'essai (m^3/h)
P_h : puissance hydraulique nécessaire (W)	Q_A : débit apparent (m^3/h)
v : vitesse moyenne du fluide (m/s)	V_a : volume d'eau (m^3/jour)
	T_c : température moyenne journalière des cellules PV

REFERENCES

- [1] A. Hadj Arab, F. Chenlo, K. Mukadam and J.L. Balenzategui, "Performance of PV Water Pumping Systems". Renewable Energy, Vol. 18, N°2, pp. 191-204, 1999.
- [2] A. Hadj Arab, F. Chenlo and M. Benghanem, "Loss-of-load Probabilité of Photovoltaic Water Pumping Systems", Solar Energy, Vol. 76, N°6, pp. 713-723, 2004.
- [3] A. Hamidat, "Simulation of the Performance and Cost Calculations of the Surface Pump", Renewable Energy, Vol. 18, pp. 383-392, 1999.
- [4] M.G. Thomas, "Water Pumping.- The Solar Alternative", Photovoltaic Design Assistance Center, Sandia National Laboratories, NM 8718 5, Albuquerque, 58 p., 1987.
- [5] I. Narvarte, E. Lorenzo and E. Caamaño, "PV Pumping Analytical Design and Characteristics of Boreholes", Solar Energy, Vol. 68, N°1, pp. 49-56, 2000.
- [6] R.V. Giles, "Mecánica de Los Fluidos e Hidráulica", Schaum-McGraw-Hill, Mexico, 273 p., 1970.
- [7] P. Silvestre, "Fundamentos de Hidráulica General", Limusa, Mexico, 381 p., 1983.
- [8] "Handbook on Solar Water Pumping", Intermediate Technology Power & Partners, Reading, 124 p., 1984.
- [9] C. Mataix, "Mecánica de Fluidos y Maquinas hidraulicas", Castillo, Madrid, 582 p., 1970.