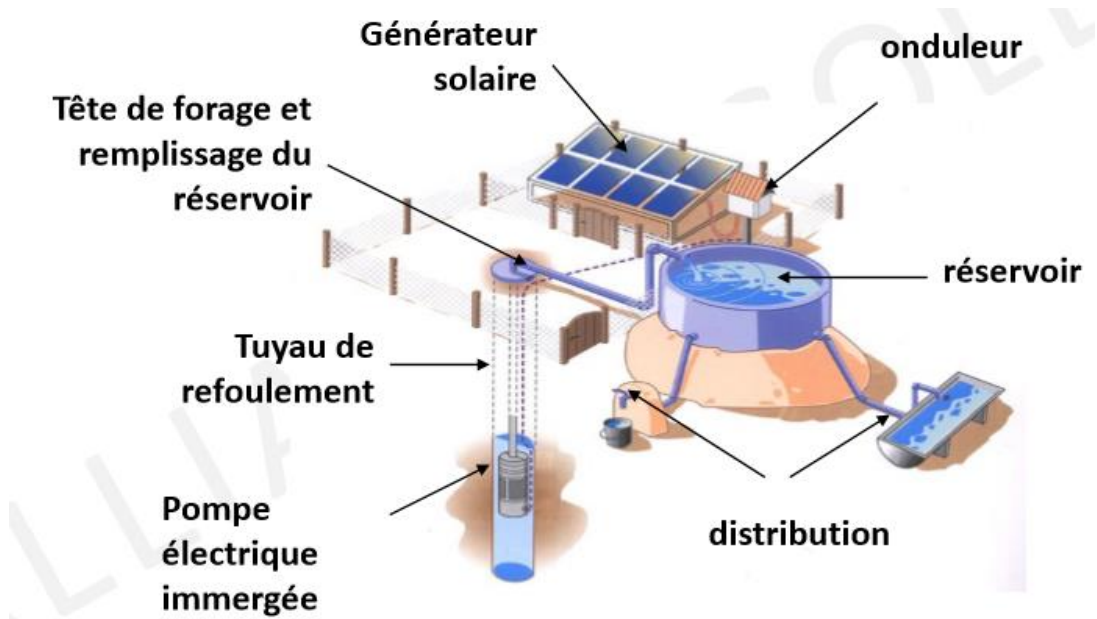


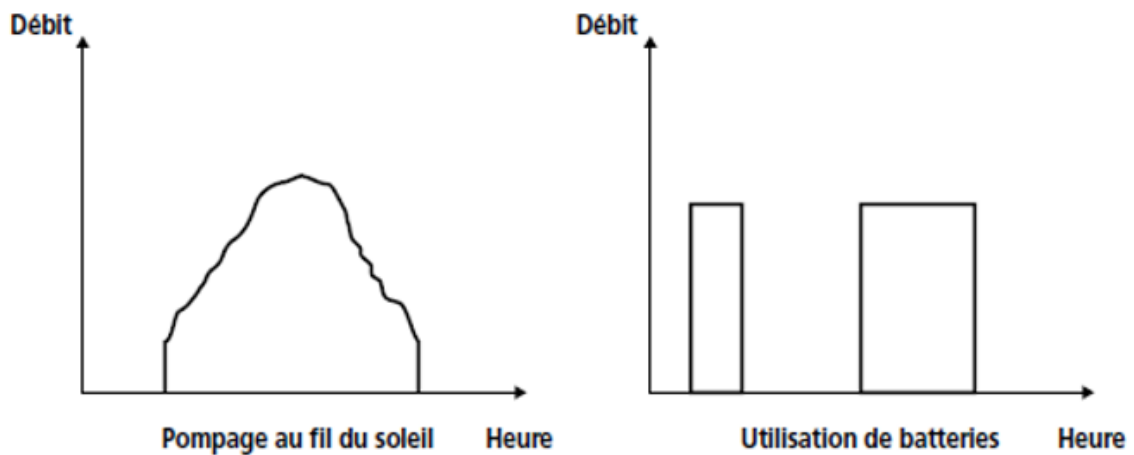
CHAPITRE 3

Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Schéma de principe : Pompage au fil du soleil



Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie



M E T H O D E 1 : Méthode analytique

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.

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.

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. 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 ($1000 \text{ kg}/m^3$)

g : accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m}/s^2$)

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 :

La hauteur totale de pompage (ou hauteur manométrique totale : HMT) est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique :

$$h = \text{HMT} = h_s + h_d \quad (2)$$

où

h_s : niveau statique (m)

h_d : niveau dynamique (m)

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 permet le calcul de la hauteur dynamique :

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

f : coefficient de friction des parois de la tuyauterie

v : vitesse moyenne du fluide (m/s)

L : longueur de la tuyauterie (m)

D : diamètre de la tuyauterie (m)

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

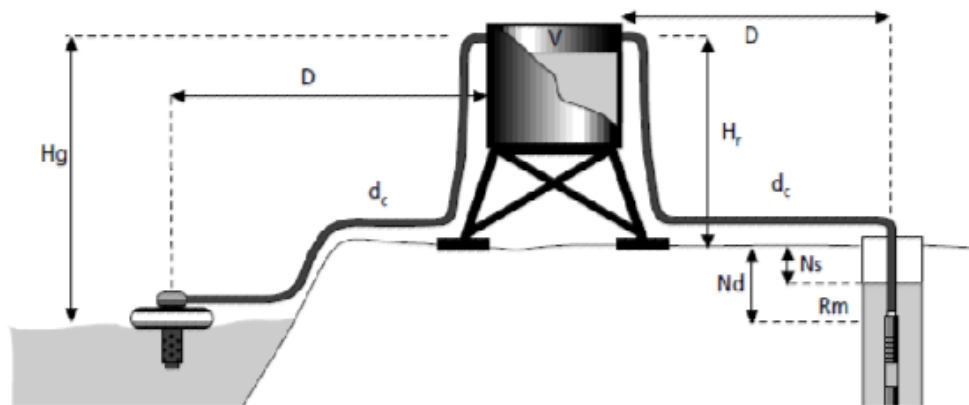
Dans le cas où le système de tuyauterie aurait un autre type d'accessoires (vannes, coudes, tés, jonctions, ...), nous pouvons calculer les pertes de charge dans chaque élément additionnel comme :

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

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



Symbole	Désignation	Unité
Ht	Hauteur géométrique du sol au plan du haut du réservoir	m
Ns	Niveau de la nappe statique (au repos)	m
Nd	Niveau dynamique de la nappe (pour un débit moyen)	m
Rm	Rabatement maximal avant d'arrêter la pompe $Nd - Ns$	m

$$\begin{aligned} \text{HMT} &= H_r + N_d + \text{Pertes de charge} \\ &= H_r + N_s + R_m + \text{Pertes de charge} \end{aligned}$$

- **Pertes de charge :**

Chutes de pression produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Ces pertes sont fonction de la longueur des conduites (**D**), de leur diamètre (**dc**) et du débit de la pompe (**Q**). Elles s'expriment en mètres de colonnes d'eau (mCE)

Le diamètre des conduites est calculé afin que ces pertes de charge correspondent au plus à 10 % de la hauteur manométrique (HMT)

- **Niveau statique**

Le niveau statique (**Ns**) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage.

- **Niveau dynamique**

Le niveau dynamique (**Nd**) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen.

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.

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.

5. Mois de dimensionnement

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 composants du système.

6. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

La puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque sous les conditions standards de mesure, STC, (éclairage $G^* = 1000 \text{ W/m}^2$ et température de cellule $T^* = 25 \text{ °C}$) est :

$$P_{PV}^* = \eta_g^* A G^*$$

où

P_{PV}^* : puissance de sortie sous STC (W)

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

A : surface active du générateur (m^2)

G^* : éclairage dans les STC (1000 W/m^2)

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

$$E_e = \eta_{PV} A H_{Gt}(\beta) \quad (7)$$

où

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

$H_{Gt}(\beta)$: 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 :

$$\eta_{PV} = F_m \left[1 - \gamma (T_c - 25) \right] \eta_g^* \quad (8)$$

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_{MB} : rendement du sous-système moteur-pompe.

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

$$P_p = \frac{G_*}{F_m [1 - \gamma (T_c - T_{c,ref})]} H_{dm}(\beta) \frac{E_h}{\eta_{MB}} \quad (10)$$

7. Dimensionnement du moteur

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

8. Dimensionnement de la pompe

Le débit crête Q (m³/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/s²)

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.

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. Il est possible d'obtenir analytiquement les diamètres des tuyauteries de pompage qui s'approchent à ceux qui minimisent les coûts des installations par la formule de Bresse :

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

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.

M E T H O D E 2 : Méthode graphique

En se basant sur les équations antérieures, 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).

EXEMPLE

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,

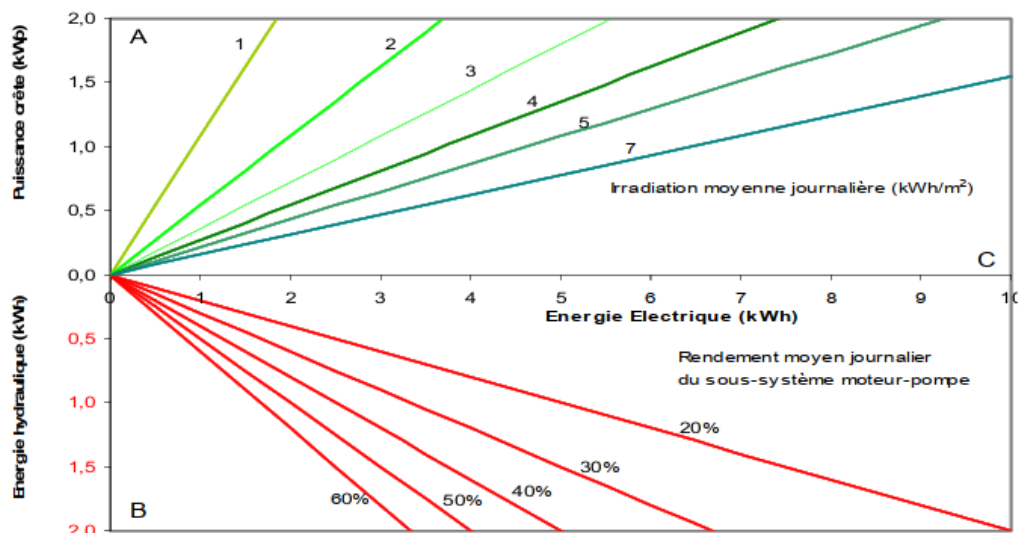


Fig. 1: Diagramme pour déterminer la taille du générateur photovoltaïque nécessaire pour couvrir une demande d'énergie hydraulique

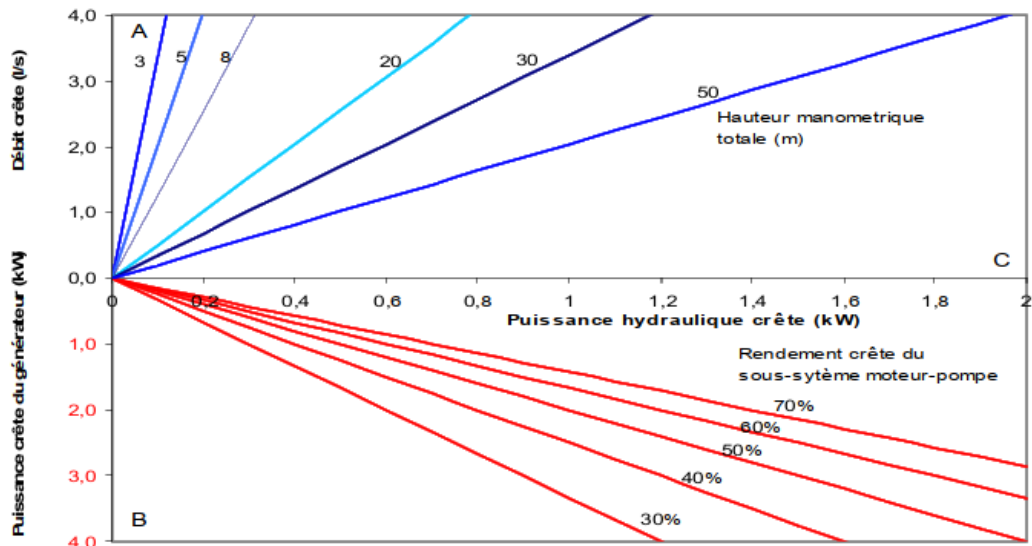


Fig. 2: Diagramme pour déterminer le débit crête de la pompe

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 H_{Gt} (β) (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