

Rentabilité économique des systèmes de pompage photovoltaïques

Belkacem Bouzidi ¹, Ali Malek ¹ et Mourad Haddadi ²

¹ Centre de Développement des Energies Renouvelables,
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

² Ecole Nationale Polytechnique,
10, Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger

(reçu le 30 Mars 2005 - accepté le 30 Juin 2006)

Résumé - Le choix d'un système énergétique doit obéir et respecter certaines règles. Le système énergétique choisi doit démontrer au préalable sa compétitivité vis-à-vis d'autres systèmes pour le même service rendu. Sa crédibilité doit reposer sur des bases économiques et techniques. Le présent article se propose l'analyse par une méthode numérique, de la rentabilité économique d'une installation de pompage photovoltaïque, laquelle est comparée à une autre installation de caractéristiques identiques mais fonctionnant par groupe électrogène. La méthode proposée est basée sur la détermination du coût global actualisé du mètre cube (m^3) d'eau pompée en fonction des besoins exprimés (volume d'eau puisé quotidiennement), des caractéristiques de la source d'eau et du site d'implantation (hauteur manométrique totale, débit maximal, ensoleillement,...). De cette analyse, découlera le choix sur l'investissement à effectuer, car l'analyse des coûts et de la rentabilité est un préalable incontournable avant toute décision d'investissement sur des équipements énergétiques que ce soit en énergie solaire ou en une autre énergie conventionnelle (diesel ou autres). L'opportunité de ce travail est double. Il permet d'avoir une idée précise sur les coûts d'investissement en connaissant les besoins de l'utilisateur et le site d'implantation d'une part, et d'autre part optimiser l'installation photovoltaïque en fonction des divers éléments.

Abstract - The choice of an energy system must obey and comply with certain rules. The selected energy system must show as a preliminary its competitiveness with respect to other systems for the same rendered service. Its credibility must rest on economic and technical bases. This article proposes the analyze by a numerical method, economic profitability of a photovoltaic pumping plant, which is compared with another installation of identical characteristics but functioning by power generating unit. The method suggested is based on the determination of the brought up to date total cost of the cubic meter (m^3) of water pumped according to the expressed needs (volume of water drawn daily), of the characteristics of the source of water and the site of establishment (total head, maximum flow, sunning,...). From this analysis, will rise the choice on the investment to carry out, because the analysis of the costs and profitability is a precondition impossible to circumvent before any decision of investment on energy equipment that it is in solar energy or another conventional energy (diesel or different). This work appropriateness is double. It makes it possible to have a precise idea on the capital costs by knowing the needs for the user and the site of establishment, and on the other hand to optimize the photovoltaic installation according to the various elements.

Mots clés: Système de pompage - Photovoltaïque - Coût global actualisé - Rentabilité - Choix de l'investissement - Méthode numérique.

1. INTRODUCTION

Le choix technique et économique de l'une des formes des énergies renouvelables sur des sites enclavés et éloignés, principalement en zones semi-arides et arides, est tributaire de la connaissance de plusieurs paramètres, à savoir: la puissance électrique requise, le coût d'investissement, et les contraintes d'accès au site d'implantation.

L'analyse économique préalable de l'une de ces formes d'énergies renouvelables revêt une importance capitale, car elle conditionne la compétitivité entre les différentes sources énergétiques envisagées. A cet effet, une méthodologie de calcul des différents coûts

représentatifs des équipements et des matériels de deux systèmes de pompage y est présentée, à des fins de comparaison et présentant des caractéristiques similaires et pour un même service rendu, mais alimentés soit par énergie solaire photovoltaïque 'SPPV' et soit par groupe électrogène 'SPGE'.

Cette analyse permet une évaluation précise et exacte des coûts inhérents à chacune des installations de pompage. Les principaux coûts énumérés sont: le coût d'investissement, le coût de remplacement, les coûts d'entretien et de maintenance, la consommation d'énergie s'il y a lieu, le lieu d'approvisionnement en carburant, [1-3]. Elle permet d'estimer, en outre la meilleure solution énergétique à adopter en terme de coût. Aussi, une étude sur la fiabilité de ce système énergétique s'impose en vue de son implantation sur un site éloigné.

2. CONSIDERATIONS POUR LA CONCEPTION DES SYSTEMES DE POMPAGE

Au vu d'un coût élevé du générateur photovoltaïque, une importance est accordée, quant à leur conception et à leur exploitation optimale du système énergétique, qui permettrait un fonctionnement fiable et économique. A cet effet, la conception du système de pompage doit viser un rendement d'utilisation maximal et cela, par une meilleure adaptation des différents éléments composants le système. Les paramètres à prendre avec précaution sont les besoins en eau de la population, les caractéristiques du point d'exhaure et les paramètres radio métriques du site [3].

L'analyse des besoins et des conditions d'exploitation devra permettre la détermination des caractéristiques techniques du système à installer pour la satisfaction de ces besoins.

Ce système de pompage d'eau est basé sur un modèle dont les équations sont mentionnées ci-après (3-5).

- *Energie électrique de la charge:* E_{elec}

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur pendant une journée est calculée à partir des données de débit et de Hmt requises et est exprimée en Wh. Ce calcul est fonction d'une constante hydraulique (C_H) et est inversement proportionnel au rendement du groupe motopompe utilisé.

$$E_{elec} \text{ (kWh)} = \frac{C_H \times Q \text{ (m}^3/\text{j)} \times \text{Hmt (m)}}{R_p} \quad (1)$$

$$C_H = g \times \rho = \frac{9.81 \text{ (m.s}^{-2}) \times 10^3 \text{ (kg/m}^3)}{3600 \text{ (s/h)}} = 2.725 \text{ (kg.s.h/m}^2) \quad (2)$$

g : accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2); ρ : densité de l'eau (1000 kg/m^3); R_p : Rendement du groupe motopompe (30 à 45 %).

- *Irradiation diffuse et directe sur le plan horizontal:* H_{DFH} , H_{DRH}

Le rayonnement solaire peut être séparé en deux composantes: l'ensoleillement direct, émis par le disque solaire et l'ensoleillement diffus émis par le reste de la voûte céleste. Elles sont données par les relations suivantes (3, 6-8):

$$H_{DFH} = H_{GH} \times \left(1 - \frac{1.13 \times H_{GH}}{H_0} \right) \quad (3)$$

$$H_{DRH} = H_{GH} - H_{DFH} \quad (4)$$

H_0 étant l'irradiation extra terrestre et H_{GH} l'irradiation globale horizontale.

- *Irradiation diffuse et directe sur le plan incliné des modules photovoltaïques*

$$H_{DFI} = \frac{1}{2} H_{DFH} [(1 + \cos\beta) + (A \times (1 - \cos\beta))] \quad (5)$$

$$H_{DRI} = H_{DRH} \times \frac{\sin(h + \beta)}{\sin h} \quad (6)$$

β : angle d'inclinaison; A : albédo du site ou de la région considérée; h : hauteur du soleil; H_{DFI} et H_{DRI} : Irradiations diffuse et directe respectivement.

- *Irradiation globale sur un plan incliné*

$$H_{GI} = H_{DFI} + H_{DRI} \quad (7)$$

- *Taille du générateur photovoltaïque*

La consommation journalière doit correspondre au puisage maximal, c'est-à-dire au besoin maximal en eau pour une journée type la plus défavorable [3, 11].

$$N_{MP} = k \times \frac{E_{elec}}{(H_{GI} \times \eta_m \times \eta_c \times \eta_{mp} \times S_m \times N_{MS})} \quad (8)$$

$$N_{MS} = \frac{U_{ch}}{V_{nom}} \quad (9)$$

U_{ch} : tension nominale de la charge; V_{nom} : tension nominale du module PV; k : facteur; η_m : rendement du module PV; η_c : rendement du convertisseur; η_{mp} : rendement de l'électropompe; S_m : surface du module PV; N_{MS} : nombre de modules PV en série.

3. COUT ET ECONOMIE DES SYSTEMES DE POMPAGE

L'analyse économique des solutions photovoltaïques prend de plus en plus d'importance actuellement, vu que cette technologie a atteint un stade de maturité suffisant pour aborder la compétition avec les autres solutions classiques et prouvées dans ce domaine en zones rurales et isolées. Cette analyse économique est aussi indispensable pour la prise des décisions d'investissement en toute connaissance de cause, afin de comparer les prévisions et la réalité des projets et programmes, de quantifier la rentabilité de l'électricité photovoltaïque pour la collectivité, de motiver les décideurs et les utilisateurs potentiels.

Le calcul du coût d'une pompe doit inclure tous les coûts qui permettront d'assurer sa viabilité sur une certaine période ramenée à une valeur actualisée. Ceci, permet de comparer les coûts sur une base commune avec d'autres options et de trouver ainsi le choix le plus économique. Le principe de base de cette analyse économique consiste à établir les coûts suivants, en valeur actualisée sur la durée de vie du système. L'opération d'actualisation des coûts permet donc de ramener ces frais sur une base commune en leur donnant une valeur actualisée.

Comptant sur un ensoleillement adéquat du site et un amortissement sur 20 ans (durée de vie moyenne d'un générateur PV) [2, 3], on aboutit à un coût global actualisé du kWh ou du mètre cube (m^3) selon la taille de l'installation de pompage solaire. La formulation du coût de l'amortissement et du coût global actualisé est donnée ci-après [3, 9-10]:

$$A = \frac{(t \times I)}{1 - (1 + t)^{-n}} \quad (10)$$

$$CGA_{PV/m^3} = \sum_i \frac{(A_i + E_i)}{V_{ann}} \quad (11)$$

avec: A : amortissement de l'équipement ou du système; I : coût d'investissement; t : taux d'actualisation (%); n : durée de vie effective de l'équipement ou du système; CGA_{PV/m^3} : coût

global actualisé du m³ d'eau pompé par le 'SPPV'; E_i : coût de l'entretien et de la maintenance;
 V_{ann} : volume d'eau puisé annuellement.

Il faudrait ensuite comparer ce coût à ce que coûterait la même énergie provenant d'une autre source énergétique, comme le groupe électrogène 'GE', tout en faisant inclure les autres facteurs de coûts suivants:

- prix actuel du consommable,
- renchérissement du prix du consommable dans les années à venir,
- amortissement et intérêts de l'installation de base.

$$A_{GE} = \frac{(t \times I_{GE})}{[1 - (1 + t)^{-n}]} \quad (12)$$

$$CGA = A_{GE} + C_{car/lub} + C_{ent/mai} \quad (13)$$

$$CGA_{GE/m^3} = \frac{CG}{V_{ann}} \quad (14)$$

avec: A_{GE} : amortissement total du 'SPGE'; $C_{car/lub}$ et $C_{ent/mai}$: coût du carburant et lubrifiant, et coût d'entretien et de maintenance; CGA_{GE/m^3} : coût global actualisé du m³ d'eau pompé par 'SPGE'.

Tous ces montants sont sujets à discussion, mais en les prenant en compte, on peut comparer les diverses énergies d'une manière beaucoup plus précise.

Le choix des équipements alimentés par un système énergétique utilisant une source énergétique renouvelable joue un rôle prédominant sur le dimensionnement d'un tel système et sur sa rentabilité économique. Il se pose alors les problèmes suivants:

- choisir correctement la taille de chacun des éléments composant le système,
- pouvoir optimiser la gestion de l'énergie au sein de ce système,
- rechercher la meilleure configuration qui optimiserait le coût de production,
- comparer entre les divers systèmes énergétiques en ayant des durées de vie différentes ?

Pour être rentable, l'option de l'énergie solaire par la voie photovoltaïque devrait être la moins onéreuse que la faisabilité des systèmes de pompage mécanique alternatifs, tels que le groupe électrogène 'GE' (diesel), éolien ou un autre système électrique. Le pompage par énergie solaire photovoltaïque devra être attirant tant du point de vue fiabilité que rentabilité économique.

La principale particularité pour les régions isolées est le coût de la distribution du combustible, le temps d'interruption causé par le manque de pièces détachées et le manque de personnel qualifié pour la réparation et la maintenance. Ce qui peut entraîner un abandon du système de pompage.

4. ALGORITHME PRINCIPAL

Un algorithme général pour la détermination du coût du mètre cube d'eau pompé par les deux systèmes de pompage étudiés a été élaboré et développé. Vu la taille des groupes électrogènes, nous considérons que pour des puissances inférieures à 2500 Watts, l'option énergie solaire est automatiquement retenue (effet d'échelle). Par contre si la puissance requise est supérieure à 2500 Watts, l'option utilisation d'un groupe électrogène sera retenue avec l'évaluation du coût du m³ d'eau puisée par ce système conventionnel. L'organigramme de cet algorithme de comparaison est constitué principalement de différents blocs et schématisé dans la figure 1.

- Entrées des données (besoins quotidiens en eau, caractéristiques du forage, ..)
- Utilisation des différentes bases de données élaborées (afin de sélectionner les constituants des deux systèmes en fonction des besoins à satisfaire)
- Blocs de calcul pour la détermination de certains paramètres (énergies, irradiation, coûts, ...).

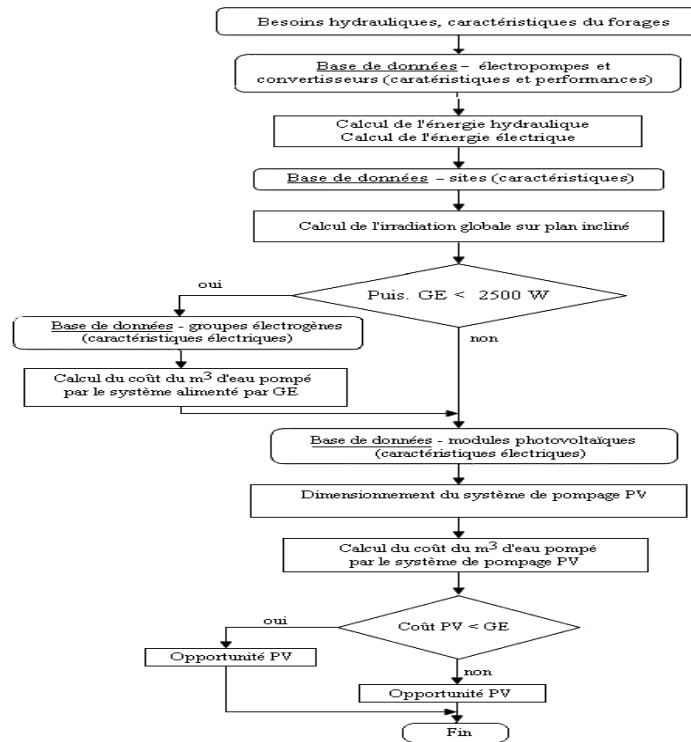


Fig. 1: Algorithme général

En résumé, le fonctionnement général de cet algorithme s'effectue comme suit :

- L'utilisateur introduit les données spécifiques (besoins en eau), en particulier les principaux paramètres hydrauliques, à savoir : le débit d'eau (m^3/j), la hauteur manométrique totale (m) du puits d'exhaure. Grâce aux bases de données élaborées, relatives aux électropompes et aux convertisseurs d'énergie, le programme propose l'électropompe et le convertisseur adéquats du point de vue débit, hauteur manométrique et puissance. Une fois définis ces équipements, le programme calcule l'énergie hydraulique et l'énergie électrique, définissant ainsi la charge.
- Tout en connaissant les caractéristiques du site d'implantation, le programme calcule le dimensionnement du générateur photovoltaïque, et en donne une configuration architecturale.
- Les éléments du système photovoltaïque étant déterminés, le programme calcule donc le coût global actualisé du système de pompage dans sa globalité. Et ensuite, il calcule le coût du mètre cube (m^3) d'eau pompé par ce système.
- De la même manière et si la puissance du groupe électrogène nécessaire est supérieure à 2500 Watts, le coût du m^3 d'eau pompé par ce système est évalué à son tour.
- Après avoir effectué la comparaison des coûts, le programme indique l'opportunité de l'utilisation du système de pompage de l'eau par énergie solaire photovoltaïque.

5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Afin de comparer les deux systèmes énergétiques en fonctionnement, tout en gardant les caractéristiques de la charge identique (forage et électropompe), et pour avoir une idée sur l'évolution des coûts en fonction des paramètres des deux systèmes pouvant influencer immanquablement sur le coût du m^3 d'eau, la même installation de pompage a été sollicitée, mais

en faisant varier le volume d'eau puisé quotidiennement pour chacune des trois (03) hauteurs manométriques totales du puits d'exhaure.

Hauteur totale	20 m		50 m		80 m	
Débit (m^3/j)	10	20	40	60	80	100

Les électropompes utilisées sont intitulées respectivement: SP2A9 – SP3A6 – SP8A12 – SP14A18 du constructeur Grundfos.

5.1 Coûts de l'investissement

Pour le système de pompage par énergie solaire photovoltaïque 'SPPV', les coûts d'investissement varient fortement et de manière proportionnelle à l'énergie demandée.

Le générateur photovoltaïque constitue l'élément de base et représente la part la plus importante dans la structure des coûts. Comme illustré sur les figures 2 et 3, l'investissement du générateur augmente proportionnellement à l'énergie demandée.

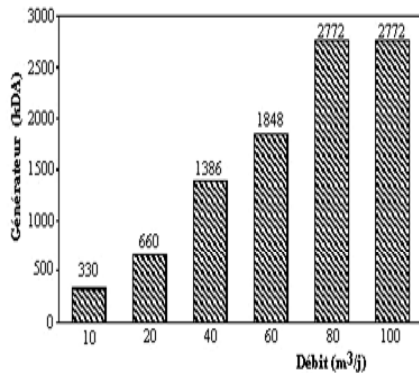


Fig. 2: Coût du générateur photovoltaïque dans un 'SPPV' en fonction du débit (hmt = 50 m)

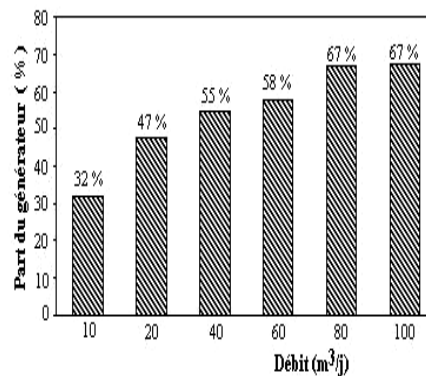


Fig. 3: Pourcentage du coût du générateur dans un 'SPPV' par rapport au coût total des équipements en fonction du débit (hmt = 50 m)

Du point de vue investissement, le coût du générateur constitue le maillon faible de tout le système de production d'électricité. En effet la taille, donc le coût, augmente en fonction de l'énergie à produire, ce qui influence le prix du kWh produit par le système.

5.2 Coûts des systèmes de pompage

En comparant les coûts des deux systèmes de pompage alimentés différemment, Il a été constaté sur les figures 4 à 7, que les systèmes de pompage par énergie solaire photovoltaïque 'SPPV' constituent une part importante dans le coût relatif à l'investissement des équipements par rapport aux autres coûts, comme l'entretien et la maintenance, par contre le coût d'exploitation étant nul. Concernant les systèmes de pompage par groupe électrogène 'SPGE', les coûts de l'entretien et de l'exploitation ne sont pas négligeables par rapport au coût de l'investissement total du système, et cela, pour une hauteur manométrique totale (hmt), un taux d'annuité et un taux d'utilisation constants (50 m, 8 % et 100 % respectivement).

Donc, la structure des coûts du kWh produit par les énergies renouvelables présente une part importante dans les amortissements des investissements et les remplacements, une part nulle dans l'exploitation du système et une très faible part pour les frais d'entretien et de maintenance.

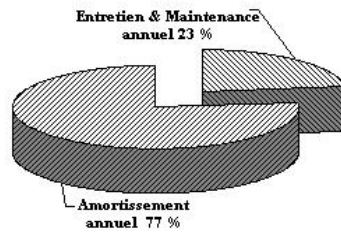


Fig. 4: Part de l'entretien et la maintenance du 'SPPV' par rapport au CGA (débit = 40 m³/j)

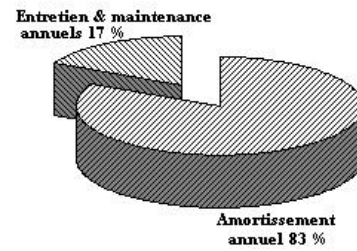


Fig. 5: Part de l'entretien et la maintenance du 'SPPV' par rapport au CGA (débit = 80 m³/j)

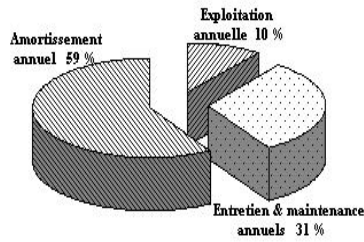


Fig. 6: Part de l'entretien, la maintenance et l'exploitation du 'SPGE' par rapport au CGA (débit = 40 m³/j)

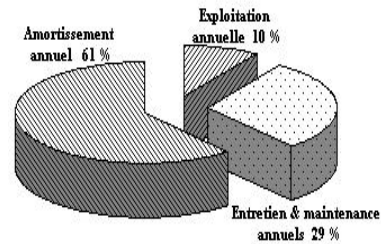


Fig. 7: Part de l'entretien, la maintenance et l'exploitation du 'SPGE' par rapport au CGA (débit = 80 m³/j)

Cette structure est tout à fait différente de celle du kWh produit par des combustibles fossiles où les frais dus à l'amortissement de l'investissement sont faibles, alors que les frais d'exploitation, d'entretien et de maintenance sont prépondérants.

5.3 Coût du watt crête d'un système de pompage par énergie solaire photovoltaïque

Dans un système de pompage photovoltaïque, le coût du watt crête est très significatif. En effet, ce coût est inversement proportionnel au volume d'eau pompé quotidiennement. Il est à noter que le coût du watt crête englobe l'ensemble des éléments de ce système, sauf les infrastructures (forage et réservoir de stockage d'eau).

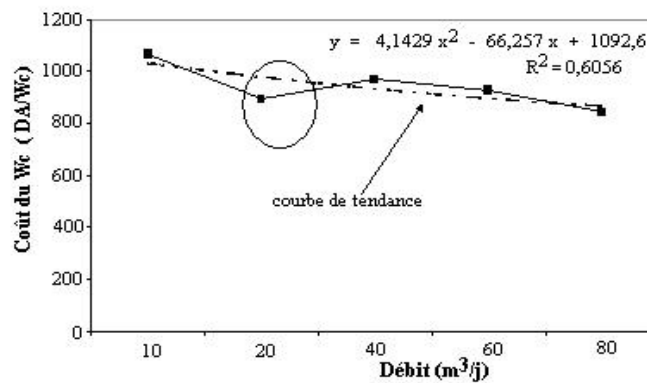


Fig. 8: Coût du watt crête d'un système de pompage photovoltaïque en fonction du débit (hmt = 50 m, taux d'actualisation = 8 %, taux d'utilisation = 100 %)

La figure 8 donne une représentation dans la variation du coût du watt crête pour un volume journalier variable, les autres paramètres, comme la hauteur manométrique totale, le taux d'actualisation, ainsi que le taux d'utilisation restant constants. Il est à remarquer que la courbe ci-dessus est monotone, et que l'équation de cette courbe figure à côté de la courbe de tendance. A titre d'exemple, pour un débit journalier de $10 \text{ m}^3/\text{j}$, le coût watt crête est environ égal à 1.100,00 DA. Par contre, pour un débit journalier de $80 \text{ m}^3/\text{j}$, il est égal à 800,00 DA. Le point d'inflexion (entouré) est dû au changement d'équipements (électropompe) pour satisfaire aux besoins de l'utilisateur.

5.4 Coût du mètre cube d'eau pompée par les deux systèmes

Comme montré précédemment, l'investissement des constituants des systèmes de pompage par énergie photovoltaïque est important et influe négativement sur le coût du mètre cube pompé par ces systèmes. Malgré le fait que le coût du mètre cube d'eau décroît en proportion inverse avec le volume d'eau journalier, il reste assez élevé pour ne pas être compétitif avec les autres sources conventionnelles. D'ailleurs, il peut être remarquer sur les figures 9 à 11, qu'au delà d'une certaine puissance (dans ce cas pour une puissance supérieure à 1500 W et qui peut varier suivant certains paramètres), le coût du mètre cube d'eau pompé par le système de pompage par énergie solaire n'est plus compétitif. Les figures 9 à 11 représentent les variations des coûts du mètre cube d'eau pompé par les deux systèmes en fonction du volume journalier d'eau puisé.

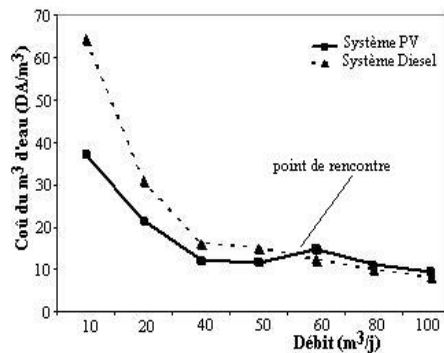


Fig. 9: Coût du m^3 d'eau pompé par les deux systèmes de pompage (hmt = 20 m, taux d'actualisation = 8 %, taux d'utilisation = 100 %)

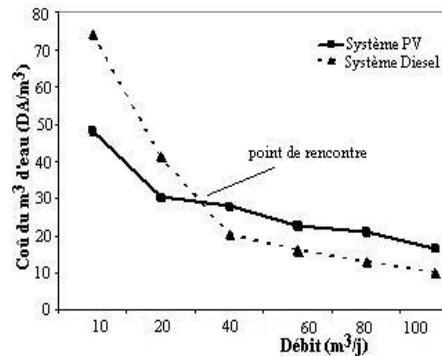


Fig. 10: Coût du m^3 d'eau pompé par les deux systèmes de pompage (hmt = 50 m, taux d'actualisation = 8 %, taux d'utilisation = 100 %)

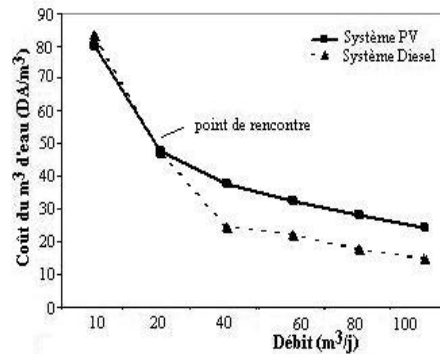


Fig. 11: Coût du m^3 d'eau pompé par les deux systèmes de pompage (hmt = 80 m, taux d'actualisation = 8 %, taux d'utilisation = 100 %)

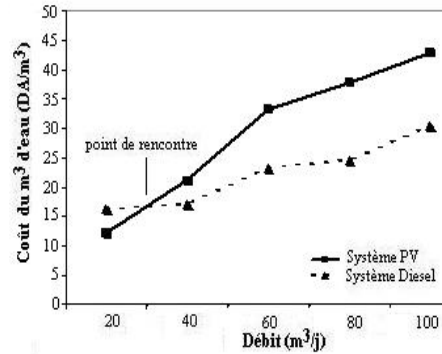


Fig. 12: Coût du m^3 d'eau pompé par les deux systèmes de pompage à hmt variable (débit = $40 \text{ m}^3/\text{j}$, taux d'actualisation = 8 %, taux d'utilisation = 100 %)

5.5 Relation entre la hauteur manométrique totale (hmt) et le coût du m³ d'eau pompé

Contrairement au débit journalier, dont le coût du mètre cube d'eau pompé lui est inversement proportionnel, l'augmentation de la hauteur manométrique totale agit négativement sur le coût du mètre cube d'eau.

Il est à constater sur la figure 12, qu'il n'est pas intéressant du point de vue économique de faire varier la hauteur manométrique totale d'un forage dans le but de garder le même volume journalier. Ce cas pourrait se produire, lorsqu'il y a une mauvaise étude technique du forage (faible taux de régénération), où après une baisse du volume puisé quotidiennement, pour faire face à ces besoins, ou bien lorsque l'utilisateur augmente la hauteur manométrique totale pour compenser une baisse du volume puisé.

5.6 Influence du taux d'utilisation du 'SPPV' sur le coût du m³ d'eau pompé

La différence entre la demande réelle et l'approvisionnement en eau, amoindrit le taux d'utilisation global du système de pompage. Dans ce sens, les systèmes de pompage conventionnels sont plus flexibles. Le nombre d'heures d'ensoleillement pris comme base pour le calcul du dimensionnement des systèmes photovoltaïques et de ses constituants, doit être utilisé d'une manière rationnelle. Le problème est plus ardu dans le cas où l'eau puisée sert à la petite irrigation. Dans les régions arides, la saison d'irrigation des parcelles agricoles ne dure pas plus de 5 mois, et de ce fait, le coût du m³ est supérieur en comparaison des technologies de pompage conventionnel. Dans une telle situation, les systèmes de pompage de l'eau par énergie solaire ne pourront pas offrir des avantages économiques.

La figure 13 montre les effets de la variabilité du taux d'utilisation du système de pompage par énergie solaire photovoltaïque 'SPPV' sur le coût du m³ d'eau à hauteur manométrique totale (débit et taux d'actualisation constants).

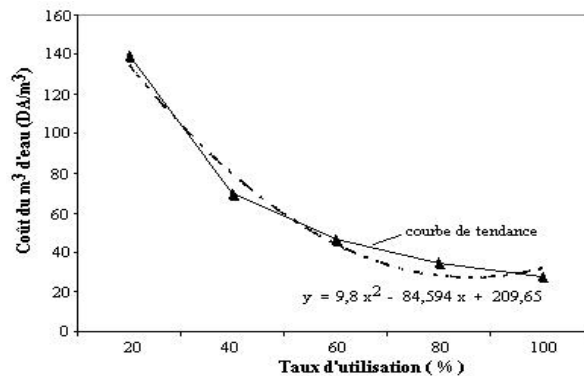


Fig. 13: Coût du m³ d'eau pompé en fonction du taux d'utilisation du 'SPPV'
(hmt = 50 m, débit = 40 m³/j, taux d'actualisation = 8 %)

5.7 Influence du taux d'actualisation sur le coût du m³ d'eau pompé

L'importance des coûts d'amortissement de l'investissement initial rend les filières d'énergies renouvelables plus sensibles au taux d'actualisation (ou annuité) que les solutions classiques plus gourmandes en coûts de fonctionnement.

Choisir des taux d'actualisation faibles revient à privilégier le long terme, comme la production d'électricité par l'énergie solaire photovoltaïque.

La figure 14 illustre la variabilité des coûts du m³ d'eau pompé par les deux systèmes de pompage, en fonction du taux d'actualisation, les autres paramètres, comme la hauteur manométrique totale, le débit, et le taux d'utilisation restant constants.

Le coût du m³ d'eau pompé par le système de pompage par énergie solaire photovoltaïque est plus sensible à la variation du taux d'actualisation.

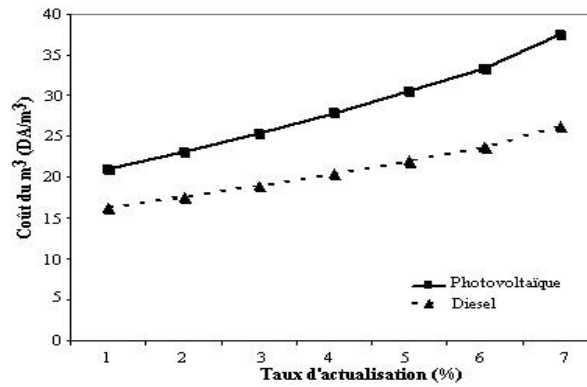


Fig. 14: Coût du m³ d'eau pompé par les deux systèmes de pompage en fonction du taux d'actualisation (hmt = 50 m, débit = 40 m³/j, taux d'utilisation = 100 %)

6. CONCLUSION

Au vu de ces résultats obtenus, les deux systèmes de pompage étudiés présentent des avantages et des inconvénients, qui sont résumés sur le tableau 1. Le système photovoltaïque présente un coût d'investissement important, un entretien très réduit et un faible coût d'exploitation. Par contre, le système avec groupe électrogène présente un coût d'investissement relativement faible, mais un coût d'exploitation, d'entretien et de maintenance relativement important.

Tableau 1: Avantages et inconvénients des deux systèmes de pompage étudiés

	Avantages	Inconvénients
Pompage photovoltaïque	- Faible maintenance - Propre - Pas de carburant - Installation facile - Fiable sur le long terme - Faible coût périodique - Système modulable	- Coût important d'investissement - Le rendement baisse en fonction des irradiances - Sensible au taux d'actualisation - Sensible au taux d'utilisation du système
Pompage diesel	- Coût modéré en capital - Transportable - Installation facile	- Maintenance souvent inadéquate - Durée de vie réduite - Prix du carburant élevé - Fonctionnement journalier limité - Pollution de l'environnement

Ces avantages et inconvénients doivent être pris en considération lorsque un investissement est à effectuer. Lors de notre analyse, des hypothèses sur certains paramètres pouvant varier dans d'importantes proportions ont été apportées. Il s'agit : - des prix variables en fonction de la qualité et de la quantité du matériel; - des coûts des aménagements dépendant du type d'utilisation et des conditions locales; - du choix du matériel conditionnant les performances; - des coûts du carburant et lubrifiant subventionnés. Ces hypothèses influencent d'une manière significative le coût d'exploitation et de ce fait le coût du m³ d'eau pompé.

Le *pompage par énergie solaire photovoltaïque*, ne permet pas forcément d'adapter instantanément le débit en fonction des besoins (variations saisonnières dans les besoins et aussi évolutives dans le temps), présente en sa faveur les avantages certains, comme suit:

- plus fiable que le diesel,
- pas d'approvisionnement en carburant (frais d'exploitation nuls),

- peu d'entretien régulier et obligatoire,
- faible coût de fonctionnement, limité à l'entretien et la réparation.
- du point de vue rentabilité économique et jusqu'à une énergie hydraulique équivalente de l'ordre de 2.000 m⁴, le coût du m³ d'eau pompé par les systèmes de pompage par énergie solaire photovoltaïque est meilleur.

Le *pompage diesel*, quant à lui, permet d'adapter la production aux besoins demandés. Cependant ses contraintes d'utilisation sont grandes, et en particulier:

- un entretien périodique,
- un approvisionnement en carburant,
- un taux de pannes plus élevé,
- une surveillance du système pendant le fonctionnement du groupe électrogène.
- des émissions de gaz à effet de serre.

Les coûts du mètre cube (m³) d'eau pompé dépendent non seulement de la hauteur manométrique totale, mais également d'un certain nombre de paramètres spécifiques au site, qui doivent être pris en considération. Ces paramètres incluent:

- le rendement du système,
- l'irradiation du site,
- le taux d'actualisation,
- la durée de vie des divers constituants du système,
- le taux d'utilisation du système,
- l'étude technique relative à la source d'eau (forage).

REFERENCES

- [1] B. Bouzidi et A. Malek, '*Introduction aux Critères Micro-économiques des Systèmes Photovoltaïques*', SIPE 6, Béchar, 2000.
- [2] B. Bouzidi et Malek, '*Analyse Micro Economique des Systèmes Energétiques – Station de Pompage*', Revue des Energies Renouvelables, ICPEW, Tlemcen, 20-22 Décembre 2003.
- [3] B. Bouzidi, '*Analyse de la Faisabilité et de la Rentabilité Economique des Systèmes de Pompage d'Eau par Energie Solaire Photovoltaïque*', Mémoire de Magister, ENP, Septembre 2004.
- [4] M. Capderou, '*Atlas Solaire de l'Algérie, Aspects Energétiques*', Office des Publications Universitaires, Tome 2, Alger, 1985.
- [5] Y. Jannot, '*Le Rayonnement Solaire*', Janvier 2003.
- [6] J. Duffie and W. Beckmann, '*Solar Geometry of Thermal Processes*', John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1991.
- [7] B. Chabot, '*From Cost to Prices - Economic Analysis of Photovoltaic Energy and Services*', Process in Photovoltaics, Research and Applications, Vol. 5, pp. 55-68, January-February 1998.
- [8] R. Wagdy *et al.*, '*Economic Feasibility of Photovoltaic Systems in the Developing Countries*', Solar & Wind Technologie, Vol. 2, N°1, pp. 9 - 14, 1985.
- [9] M. Buresch, '*Photovoltaic Energy System, Design and installation*'. McGraw-Hill Book Company, NJ, 1983.
- [10] M.G. Thomas, '*Water Pumping - The Solar Alternative*', Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM87185-0753, 1995.