

Energies renouvelables et enjeux du développement: Modélisation du coût de pompage de l'eau: cas des zones arides du Sud tunisien

MBAREK GHZAIEL*, MOHAMED RAZEK JEDAY*, MOHAMED JAOUAD**

Jel classification: Q120, C610

1. Introduction

Pour éviter une trop grande dépendance des autres pays en matière d'apport d'énergie, la Tunisie doit s'intéresser aux énergies renouvelables: éolienne, solaire photovoltaïque, géothermique, etc. Grâce à ces énergies, il est possible à la fois de préserver l'environnement et de développer l'économie locale.

L'augmentation considérable du prix du pétrole au cours de ces dernières années nous pousse à nous interroger de plus en plus sur la nécessité d'exploiter d'autres types d'énergie. Ces énergies alternatives ne sont que les énergies renouvelables; étant non polluantes et inépuisables, elles constituent un moyen de contribuer efficacement au développement durable. Cependant, même si de nombreux atouts s'offrent à la Tunisie pour inciter les gens à utiliser les énergies renouvelables, il existe de multiples contraintes au développement de ces alternatives. D'une part, le développement des énergies renouvelables n'est pas encore ancré dans toutes les mentalités, notamment dans le sud du pays, et il reste un grand travail d'information à effectuer auprès des populations. D'autre part, et c'est le plus important, le problème le plus courant est l'inadéquation entre les coûts de certaines technologies et le

Abstract

Renewable energies have an important place today and yet still a future ahead. Photovoltaic (PV) pumping systems remain the best solution for access to water in dry areas, especially in remote regions. In this paper we shall review modeling of water pumping cost using PV systems in some dry areas i.e. Kébili, Médenine, Gabès and Tozeur in south Tunisia. The goal is the elaboration of a simple and operational model for every site, which allows calculating the production cost of a m³ of pumped water, taking into account only the annual water need and the total manometric height. The model indicates that average pumping cost greatly depends on the amount of water supplied and on the total manometric height for both unconfined aquifer and groundwater. The production cost is on average 542 millimes and 801 millimes, respectively for unconfined aquifer and groundwater, that is to say an average increase of about 47% for the 4 sites of Kébili, Médenine, Gabès and Tozeur.

Keywords: modeling, renewable energies, cost, water pumping, dry area, Tunisia.

Résumé

Les énergies renouvelables trouvent leur place actuellement et ont un avenir certain. Les systèmes de pompage photovoltaïques restent la meilleure solution pour l'accès à l'eau dans les zones arides, surtout dans les sites lointains. Dans cet article, nous allons passer en revue la modélisation du coût de revient de l'eau pompée au moyen des systèmes PV en milieu aride et notamment, dans la région de Kébili, Médenine, Gabès et Tozeur, dans le Sud de la Tunisie. L'objectif est donc l'élaboration d'un modèle pour chaque site, simple et opérationnel, permettant de calculer le coût de revient d'un m³ d'eau pompée, en introduisant seulement le besoin annuel en eau et la hauteur manométrique totale. Le modèle révèle que le coût moyen de pompage dépend largement de la quantité d'eau fournie ainsi que de la hauteur manométrique totale et ce, dans le cas des deux nappes (phréatique et souterraine). Le coût de revient est en moyenne de 542 millimes pour la nappe phréatique et de 801 millimes pour la nappe souterraine, ce qui implique une augmentation moyenne de 47 % pour les 4 sites de Kébili, Médenine, Gabès et Tozeur.

Mots-clés: modélisation, énergies renouvelables, coût, eau pompée, zone aride, Tunisie.

faible niveau du revenu, surtout en milieu rural.

Dans ce travail, nous allons nous pencher sur cet aspect à travers l'étude empirique des coûts de pompage de l'eau, utilisant les énergies renouvelables dans quatre sites en milieu aride, dans le Sud tunisien (Kébili, Médenine, Gabès et Tozeur). Ceci dit, nous essayons d'élaborer un modèle qui servira à l'estimation du coût de revient d'un m³ d'eau pompée par un système photovoltaïque dans chacun des quatre sites étudiés. On désigne par coût de l'eau pompée, le coût de l'eau fournie, c'est-à-dire celui du pompage à partir du point d'eau, en y ajoutant le coût du stockage de l'eau (la quantité pompée en surplus du besoin durant les jours d'été sera stockée pour être consommée durant les jours d'hiver et de mauvais temps, puisque le besoin est supposé constant

durant toute l'année). L'objectif est d'aboutir à un modèle pour chaque site, statistiquement valable et en même temps, simple et facile à maîtriser pour les décideurs.

2. Etat des connaissances et zones d'étude

En Tunisie, comme ailleurs, l'énergie est nécessaire à toute activité humaine et indispensable à la satisfaction des besoins quotidiens. En raison de la croissance démographique importante, le besoin en eau pour la population (consommation directe ou indirecte pour fournir l'alimentation) connaît une expansion considérable. L'accès à l'eau et les moyens à

* Unité de recherche énergétique et environnement, Ecole Nationale des Ingénieurs de Gabès.

** Institut des Régions Arides de Médenine.

mettre en œuvre ont un rôle déterminant. Les énergies renouvelables deviennent de plus en plus intéressantes en tant que solutions adéquates pour le pompage de l'eau dans les sites lointains. A cet égard, il est à souligner que les énergies renouvelables sont des outils de lutte contre la désertification. En effet, cette dernière résulte d'un processus d'aridification du sol qui a comme conséquence la réduction très importante des ressources en eau et en biomasse (Gelle et al., 2004). En Tunisie, notamment dans le Sud, les ressources naturelles demeurent essentielles pour la survie des habitants. L'accès à l'eau et à la biomasse, ainsi que la valorisation des autres ressources naturelles, sont largement conditionnés par la disponibilité d'énergie. Cela lie donc l'accès à l'énergie à la désertification. Or, le faible taux d'électrification, surtout dans les zones rurales lointaines, où vivent encore des citoyens, montre que les énergies ordinaires sont chères et très peu disponibles. Il en va de même pour l'eau car, quelle que soit la zone, des réserves sont disponibles, mais les conditions d'exploitation pour les rendre plus accessibles aux populations ne sont pas souvent aisées. D'où la forte propension des populations à utiliser des techniques très classiques qui ne permettent pas d'assurer un service régulier. C'est dans ce contexte que les énergies renouvelables présentent un très fort potentiel pour les zones arides et semi-arides, non seulement en Tunisie, mais aussi sur le continent.

En effet, par exemple, en matière d'approvisionnement en eau et en énergie des populations vivant dans des zones arides, les options solaires et éoliennes constituent aujourd'hui des solutions pertinentes. Ce sont des solutions pertinentes parce qu'elles ont de très larges disponibilités de ressources et parce qu'elles constituent des vecteurs de développement de l'économie locale. Ainsi, aujourd'hui, beaucoup de régions agricoles vivent de l'agriculture vivrière. L'arrivée de l'énergie leur permet d'intensifier leur agriculture et donc de produire plus de ce dont elles ont besoin. En outre, les coûts des technologies de pompage de l'eau utilisant les énergies renouvelables ne cessent de se réduire (rendement en augmentation et coût de production en diminution) et ce, grâce aux recherches effectuées dans ce domaine et qui reflètent l'importance accordée par les décideurs à l'eau et aux énergies renouvelables.

Dans ce contexte, l'Union Européenne s'est engagée à aider les associés méditerranéens à atteindre leur objectif sur le plan de l'utilisation des énergies renouvelables, soit 20 % en l'an 2010 (Jacovides et al., 2006). Cela explique pourquoi l'eau et les énergies renouvelables figurent parmi les thèmes retenus dans la convention pour la lutte contre la désertification. Toutes ces considérations justifient la nécessité d'encourager la recherche dans ce domaine et la nécessité de diversifier les efforts afin de répondre aux questions concernant la gestion du pompage de l'eau, qui varient et se complexent d'un procédé à l'autre, d'une région à l'autre et d'une année à l'autre.

Plusieurs travaux de recherche ont traité ce sujet. Il est bon de citer à ce propos les travaux de Helikson (Helikson

et al., 1991) portant sur l'utilisation de l'énergie solaire pour le pompage de l'eau d'irrigation. En Jordanie, l'utilisation de l'énergie solaire pour le pompage de l'eau a fait ses preuves (Hrayshat et al., 2004). Il ya lieu aussi de souligner les efforts des chercheurs algériens en matière de dimensionnement et optimisation technico-économique du système d'énergie hybride avec le système de stockage, utilisant des batteries d'accumulation alimentées par des panneaux photovoltaïques (El Khadimi et al., 2004). En contrepartie, les recherches concernant le pompage de l'eau à travers l'énergie photovoltaïque et éolienne sans batteries d'accumulation et avec stockage de l'eau restent encore limitées.

D'autres chercheurs en Algérie (Maouedj et al., 2008) ont travaillé sur les performances du système de pompage photovoltaïque au fil de soleil, mais ils n'ont pas élaboré un modèle pour l'estimation. La recherche dans ce domaine, notamment à Tlemcen et à Bouzaréah en Algérie, a confirmé que le coût de revient de l'eau pompée par les systèmes PV est fonction de la quantité d'eau pompée (Q) et évidemment, de la hauteur manométrique totale (HMT). Selon l'étude technique réalisée dans ces régions en 2006 (Ghzaïel, 2006), la hauteur manométrique totale influe sur la quantité d'eau fournie, lorsque tous les autres paramètres sont égaux. De même, l'énergie électrique qui alimente la pompe, produite par une photopile, varie d'un endroit à l'autre et ce, par rapport à la variation du rayonnement solaire.

En Tunisie, le pompage de l'eau au moyen des énergies renouvelables est un choix stratégique surtout dans les sites lointains. Il suffit de dire que 57 points d'eau ont été équipés par ces systèmes et les projections pour la période 2008-2011 prévoient l'installation de 63 systèmes (Ounalli, 2008.), ce qui incite à approfondir les recherches spécialement dans cette direction.

Notre contribution à cette problématique consiste à mettre au point, pour les intervenants dans la promotion des énergies renouvelables, un modèle de calcul du coût de pompage de l'eau au moyen des énergies solaires photovoltaïques, en nous appuyant exclusivement sur la quantité annuelle d'eau à fournir et la hauteur manométrique totale à n'importe quel endroit des sites étudiés et dans toute situation possible. Ces données permettent aux décideurs de comparer plus facilement les différentes alternatives des systèmes de pompage de l'eau et d'avoir des arguments pour encourager davantage le recours à ces systèmes de pompage, surtout dans les zones arides. Ce travail offre également l'occasion d'approfondir l'aspect économique puisque la technologie du pompage de l'eau est déjà maîtrisée et en progression continue. D'autres objectifs vont être atteints, à savoir la gestion rationnelle de l'eau dans les zones arides et la protection de l'environnement puisque les énergies polluantes vont être remplacées par les énergies renouvelables pour l'accès à l'eau, chaque fois que le coût s'avère raisonnable. Aussi, la connaissance de l'aspect éco-

nomique de ces systèmes de pompage va inciter l'état et les acteurs privés à aménager des forages dans les parcours, favorisant ainsi la promotion des projets d'élevage extensif et un revenu plus ou moins stable pour les agriculteurs; cela déterminera la diminution du taux de chômage et une valorisation plus importante de la main d'œuvre familiale disponible.

Ce travail constitue une première phase d'une étude achevée qui sera traitée successivement, en mettant l'accent sur la modélisation du coût de revient de l'eau pompée par les systèmes éoliens et hybrides (PV-E) et sur l'analyse multicritère, afin d'avancer le choix optimal dans tous les cas de figure. Ce travail va permettre de comparer l'opportunité des différents systèmes de pompage de l'eau moyennant les énergies renouvelables et d'indiquer le choix approprié dans les diverses situations. Les résultats d'une telle optimisation multicritère vont faire l'objet d'une carte des sites potentiels.

3. Méthodologie

Ce travail a eu pour objet les stations de pompage dans les sites lointains du branchement STEG. De plus, d'après les services des CRDA et de l'ANER, la quasi-totalité des stations de pompage photovoltaïques (PV) installées dans ces régions fonctionnent au fil du soleil. C'est pourquoi on a décidé d'étudier le pompage PV au fil du soleil dans ce travail. Les batteries de stockage et d'accumulation d'énergie électrique ne font pas partie de notre enquête. L'énergie sera stockée sous forme d'eau dans des réservoirs d'accumulation. Quatre cents différentes alternatives (une centaine pour chaque site) ont été prises en compte, pour des hauteurs manométriques totales (HMT) allant de 23 à 113 m et pour des quantités d'eau (Q) de 7000 à 52000 m³/an. La latitude de ces sites est égale à 33,42°, 33,35°, 33,88° et 33,92°, respectivement pour Kébili, Médenine, Gabès et Tozeur. Nous avons donc opté pour l'extrapolation de cette étude sur tous les gouvernorats cités, vu qu'on a traité 100 cas pour chaque site, à savoir: l'accès à l'eau pour les nappes phréatiques, les nappes souterraines et pour toute une gamme de besoins annuels. Il est à mentionner que les forages étudiés sont répartis un peu partout dans ces gouvernorats, ce qui justifie davantage l'option choisie vu, en plus, la conformité avec le programme de l'état dans le Sud tunisien. Le besoin en eau est supposé constant durant toute l'année. Par conséquent, dans ce travail, la recherche du modèle a été effectuée sur la base de la quantité annuelle d'eau pompée (fournie) et non pendant le mois le plus défavorable; cela amène à un surdimensionnement et à une perte d'eau pour un besoin constant au cours du temps, permettant une gestion rationnelle de l'eau, surtout dans les sites lointains. Autrement dit, le propriétaire du forage ne pompe que dans la limite de ses besoins. Le surplus de l'eau pompée pendant les journées ensoleillées sera stocké dans un réservoir pour être consommé durant les mois les moins ensoleillés.

Le matériel utilisé durant cette expérimentation est le suivant:

- panneaux solaires de type PQ-40
- pompe centrifuge de type Grundfos
- convertisseur SA-1500.

4. Résultats et discussion

Dans cette étude, on a évalué si le coût perçu face à la profondeur du forage varie selon le niveau de HMT, même en contrôlant l'effet de la quantité d'eau pompée sur le coût. Les données expérimentales sont représentées par 40 mesures pour chaque niveau de profondeur (soit, dix niveaux à un pas de 10 m). L'hypothèse avancée est que le coût du pompage déterminé par rapport à la profondeur serait lié au niveau de HMT, même après avoir contrôlé la quantité d'eau pompée.

D'une manière spécifique, il s'agit de tester si la quantité d'eau pompée (variable continue) et la hauteur manométrique totale (variable discontinue) affectent le coût de pompage dans les différents sites du sud de la Tunisie; ou encore, simplement, de tester si la régression de la variable «Coût de pompage de l'eau» sur la variable «Quantité d'eau pompée» est la même indépendamment du niveau de HMT.

En effet, on combine l'analyse de régression et l'analyse des variances pour créer un modèle qui s'inspire de l'analyse de covariance, en intégrant une composante pour la variable continue (Q) et une autre pour le facteur HMT, de la manière suivante:

$$C_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_1 Q_{ij} + \beta_2 \alpha_i Q_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Où:

i: est l'indice des catégories de la variable discontinue (HMT); $i = 1, 2, \dots, 10$.

j: est l'indice des observations dans chaque catégorie de HMT; $j = 1, 2, \dots, 10$.

C_{ij} : est le coût enregistré pour la quantité d'eau pompée (j) de la catégorie (i).

μ : est la moyenne générale de la variable dépendante « C_{ij} ».

α_i : est l'effet de la hauteur manométrique totale (HMT).

β_1 : est la pente de la relation entre la variable «coût» et la variable «quantité d'eau pompée».

β_2 : est la pente de la relation entre la variable coût et l'interaction entre la quantité d'eau pompée et la hauteur (HMT).

Q_{ij} : La covariable quantité d'eau pompée

Lorsque la covariable n'est pas prise en compte, des différences hautement significatives apparaissent entre les coûts des divers niveaux de hauteur manométrique totale. Les résultats sont rapportés dans le tableau 1 (en annexe) pour les quatre sites ($n = 100$; $\sigma = 10,48$; $P < 0,0001$; $R^2 = 0,814$); ce tableau illustre les moyennes et les moyennes ajustées des coûts des différents niveaux de HMT.

Ensuite, on passe à la réalisation des analyses ANCOVA sur le total des coûts de pompage de l'eau obtenus à tous les

niveaux de HMT, la quantité d'eau fournie servant de covariable. Notre modèle, que nous estimons à travers l'analyse de covariance, reproduit la relation explicitée par la covariable (Q), en ajoutant l'effet HMT et l'interaction entre ces deux variables (HMT et Q), $HMT \cdot Q$.

Les résultats indiquent une différence hautement significative entre les dix niveaux de la hauteur manométrique totale (HMT) à Kébili, ($F_{(3, 96)} = 21,81$; $p < 0,0001$), à Médenine, ($F_{(3, 96)} = 20,39$; $p < 0,0001$), à Gabès ($F_{(3, 96)} = 19,60$; $p < 0,0001$), et à Tozeur ($F_{(3, 96)} = 21,88$; $p < 0,0001$).

Les paramètres estimés du modèle statistique du coût de revient d'un m^3 d'eau pompée au moyen de ces systèmes de pompage photovoltaïques peuvent être récapitulés comme suit:

$$C_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_1 Q_{ij} + \beta_2 \alpha_i Q_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (1')$$

Site 1 Kébili: $CU = 404,3 + 5,76(HMT) - 0,00300Q - 0,0000173 (HMT_Q)$

Site 2 Médenine: $CU = 438,3 + 5,42(HMT) - 0,00307Q - 0,0000156 (HMT_Q)$

Site 3 Gabès: $CU = 450,5 + 5,42(HMT) - 0,00329Q - 0,0000141 (HMT_Q)$

Site 4 Tozeur: $CU = 467,5 + 5,84(HMT) - 0,00308Q - 0,0000166 (HMT_Q)$

Le terme constant (μ) dans le modèle varie de 404.31 à 467.55 en faveur de Kébili et, dans une moindre mesure, de Médenine. L'importance de cette composante dans le modèle montre que la plus grande part des coûts de pompage de l'eau représente un coût fixe qui ne dépend ni de la quantité d'eau pompée ni de la hauteur manométrique totale (HMT) et que ce coût fixe est normalement le coût de stockage des eaux dans des réservoirs d'accumulation. Les résultats de l'estimation font aussi ressortir une différence significative entre les divers niveaux de profondeur (HMT) ($t\text{-stat}_{(96)} = 20,71$ et $p < 0,0001$); $t\text{-stat}_{(96)} = 22,31$ et $p < 0,0001$; $t\text{-stat}_{(96)} = 22,03$ et $p < 0,0001$ et $t\text{-stat}_{(96)} = 23,70$ et $p < 0,0001$, respectivement pour les sites de Kébili, Médenine, Gabès et Tozeur.

Le paramètre (α_i), associé à l'effet du facteur HMT, exprime la différence dans le terme constant du modèle pour chaque pas supplémentaire de HMT. Les résultats de l'analyse révèlent une différence très significative entre les divers niveaux de HMT ($t\text{-stat}_{(96)} = 21,81$ et $p < 0,0001$); $t\text{-stat}_{(96)} = 20,39$; $p < 0,0001$; $t\text{-stat}_{(96)} = 19,60$ et $p < 0,0001$ et $t\text{-stat}_{(96)} = 21,88$ et $p < 0,0001$, respectivement pour les sites de Kébili, Médenine, Gabès et Tozeur. Cette donnée exprime une valeur moyenne de la différence dans le coût estimé lorsque la HMT est théoriquement égale à 0. De plus, il est à signaler que d'après les données à notre disposition, la plus faible valeur de HMT enregistrée est égale à 23 m. Si

on interprète ce coefficient (α_i), on peut dire que en extrapolant la droite de régression à l'origine (0), tous les 10 m supplémentaires de profondeur induisent un coût supplémentaire d'environ 5 millimètres.

En outre, la pente principale de la régression (β_1) estimée, relative à l'effet de la covariable (Q), indique une relation négative entre la variable coût de pompage et les quantités d'eau fournie. Ainsi, β_1 est statistiquement très significatif ($t\text{-stat}_{(96)} = -5,06$ et $p < 0,0001$); $t\text{-stat}_{(96)} = -5,15$ et $p < 0,0001$; $t\text{-stat}_{(96)} = -5,30$ et $p < 0,0001$; $t\text{-stat}_{(96)} = -5,15$ et $p < 0,0001$, respectivement pour les sites de Kébili, Médenine, Gabès et Tozeur. En effet, on peut dire que le coût moyen du pompage diminue d'environ 3 millimètres pour tous les 1000 m^3 supplémentaires d'eau pompée dans les quatre sites.

Ensuite, concernant le terme de l'interaction, les résultats du modèle montrent que la différence dans la pente de la droite de régression pour les différents niveaux de HMT (β_2) est faible en intensité mais que sa significativité statistique est respectée ($t\text{-stat}_{(96)} = -2,16, -1,93, -1,67$ et $-2,05$, selon les sites et ayant P inférieur, respectivement, à 0.03, 0.05, 0.09 et 0.04).

Ces résultats nous ont incités à poursuivre les analyses ANCOVA, en utilisant le même modèle, mais en ajustant la covariable (Q) par sa moyenne et les interactions entre les nouvelles variables comme prédicteurs, au lieu des variables d'origine. Aussi, travailler avec une covariable ajustée à la moyenne aide à interpréter le terme constant du modèle et l'effet de chacune des variables:

$$C_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_1 Q_{\text{ajusté}(ij)} + \beta_2 \alpha_i Q_{\text{ajusté}(ij)} + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Avec:

$Q_{\text{ajusté}}$: est la moyenne générale de la covariable

Le résultat de l'estimation du modèle (2) est rapporté dans le tableau 3, en annexe.

On constate que cette analyse est similaire à l'analyse précédente et que le contenu des tableaux 2 et 3 est le même. Du point de vue statistique, la signification des paramètres du modèle est remarquable (tableau 4, en annexe).

Ainsi, le modèle peut être représenté comme suit pour les principaux sites étudiés:

$$C_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_1 Q_{\text{ajusté}(ij)} + \beta_2 \alpha_i Q_{\text{ajusté}(ij)} + \varepsilon_{ij}$$

Site 1 Kébili: $CU = 315,6 + 5,25 (HMT) - 0,00300 Q_{\text{ajusté}} - 0,0000173 (HMT_Q_{\text{ajusté}})$

Site 2 Médenine: $CU = 347,3 + 4,96 (HMT) - 0,00307 Q_{\text{ajusté}} - 0,0000156 (HMT_Q_{\text{ajusté}})$

Site 3 Gabès: $CU = 353,2 + 5,01 (HMT) - 0,00329 Q_{\text{ajusté}} - 0,0000141 (HMT_Q_{\text{ajusté}})$

Site 4 Tozeur: $CU = 376,4 + 5,35 (HMT) - 0,00308 Q_{\text{ajusté}} - 0,0000166 (HMT_Q_{\text{ajusté}})$

Il est à remarquer que les effets de la covariable (β_1 , la pente de la régression) ainsi que de l'interaction (β_2) restent inchangés dans les deux modèles (1) et (2). Pour ce qui est du terme constant du modèle (μ) et de l'effet du facteur HMT (α_j), les valeurs ne sont pas les mêmes que dans le modèle (1).

On voit que l'effet estimé de la variable HMT est, dans ce cas, égal à 5,25, 4,96, 5,01 et 5,35, respectivement pour Kébili, Médenine, Gabès et Tozeur. Ces valeurs expriment, bien entendu, la différence en termes de coût moyen pour chaque pas supplémentaire de la profondeur lorsque la quantité d'eau pompée est égale à la moyenne (la covariable ou la quantité d'eau ajustée est égale à 0 et la quantité d'eau pompée est égale à sa moyenne). Lorsqu'on raisonne en termes de quantité moyenne, le coût moyen estimé est de 315, 347, 353 et 376 millimes, respectivement pour les sites Kébili, Médenine, Gabès et Tozeur. En effet, on a pu déterminer le coût minimal incompressible, qui est la charge commune à tous niveaux de HMT et quelle que soit la quantité d'eau annuelle à fournir. Ce coût commun varie d'un site à l'autre, puisque, au cours du temps, la répartition de l'énergie solaire varie d'un endroit à l'autre, ce qui affecte la capacité des réservoirs nécessaire pour garantir le stockage de l'eau.

Enfin, l'utilisation du modèle nous permet de dégager quelques constatations d'ordre général sur le comportement du coût de revient d'un m³ d'eau pompée:

Le coût de revient est inversement proportionnel au besoin annuel d'eau et varie linéairement en fonction de la hauteur manométrique totale du forage pour les quatre sites étudiés. Il existe donc un phénomène d'antagonisme pour des variations simultanées de Q et HMT.

Le coût moyen d'un m³ d'eau fournie (la moyenne des 100 cas étudiés pour chaque site) est de 627 millimes, 684 millimes, 694 millimes et 740 millimes, respectivement pour les sites 1, 2, 3 et 4. Ce coût est alors minimal à Kébili et maximal à Tozeur, avec un écart maximal enregistré de 113 millimes, soit une augmentation du coût moyen du pompage de l'eau de 18 %, (tous les autres paramètres étant égaux).

Une augmentation d'un pas de 10 m de HMT augmente le coût unitaire d'une valeur de 52 à 58 millimes pour les 4 sites et ce, pour de faibles HMT (nappe phréatique), soit une augmentation de 10 à 11 % du coût de revient. Cette augmentation représente 5 à 6 % du coût de revient dans le cas des valeurs élevées de HMT (nappe souterraine).

De même, on en déduit que le coût de revient est en moyenne égal à 542 millimes, au niveau de la nappe phréatique, et à 801 millimes, au niveau de la nappe souterraine, soit une augmentation de 47 % pour les 4 sites.

Pour une augmentation de 45000 unités de la quantité d'eau, on passe du besoin annuel en eau minimal au besoin maximal et le coût unitaire diminue, en moyenne, de 32 % pour des HMT inférieures à 50 m (nappe phréatique), et de 25 % au delà de 50 m (nappe souterraine).

Conclusion

Nous avons procédé à la modélisation du coût de revient d'un m³ d'eau pompée par l'énergie solaire photovoltaïque dans quatre sites: Kébili, Médenine, Gabès et Tozeur dans le sud de la Tunisie.

Le modèle élaboré pour chaque site s'est avéré être statistiquement significatif et facile à manipuler pour les intervenants et les chercheurs. Cette étude a montré aussi que le coût de pompage varie non seulement en fonction de la quantité annuelle d'eau pompée et de la hauteur manométrique totale, mais aussi d'un endroit à l'autre. Ainsi, le coût est minimal (627 millimes/m³) à Kébili et maximal (740 millimes) à Tozeur. De même, l'accès à l'eau des nappes souterraines est plus coûteux (plus de 47 %) par rapport aux nappes phréatiques pour ce type de pompage photovoltaïque.

Ces résultats seront consolidés par la modélisation du coût de revient de l'eau pompée par l'éolienne et les systèmes hybrides (PV-E) et ce, afin de parvenir à une analyse multicritère du coût de pompage de l'eau par les différents systèmes, mais en utilisant toutes les énergies renouvelables.

Quant au développement du territoire, ces résultats vont encourager le recours aux énergies renouvelables dans les stratégies de développement durable en milieu aride. De fait, l'élaboration d'un tel modèle permet de connaître à l'avance le coût de revient de l'eau pompée par le PV et par là même, le coût de production des produits agricoles, surtout pour l'élevage en extensif. Ce travail semble utile aussi en vue de la planification des investissements publics destinés à fournir l'eau qui est le facteur indispensable pour la vie des ménages dans les zones éloignées. De plus, il est recommandé de mobiliser les pôles technologiques de ces régions, de s'occuper davantage de ce thème, de prôner la recherche dans ce domaine et de promouvoir les projets privés dans ce secteur.

Références

- Cochran, W. G. (1957). Analysis of covariance: Its nature and uses. *Biometrics*, 13, 261-281
- El Khadimi A., Bchir L., & Zeroual A., 2004. *Dimensionnement et Optimisation Technico-économique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque - Eolien avec Système de Stockage*. *Renewable Energy*, Vol. 7, (2), pp. 73-83, Dec. 2004.
- Ghzaïel Mbarek, 2004. *Modélisation du pompage d'eau au moyen des énergies photovoltaïque et éolienne*. Mastère, ENIG-Tunisie 2004.
- Gelle M., Leroux M., Maraval B., Montrosegf F., 2004. *Energies renouvelables: quels enjeux de développement pour l'Afrique ?* Association AIDDER, 2004, Le Havre
- Helikson H.J., Haman D.Z. & Baird C.D., 1991. *Pumping water for irrigation using solar energy*. 1991.
- Hrayshat E.S., Al-Soud M.S., 2004. *Potential of solar energy development for water pumping in Jordan*.
- Maxwell S. E., Delaney, H. D. & O'Callaghan, M. F., (1993). Analysis of covariance. In L. K. Edwards (Ed.), Ap-

plied analysis of variance in behavioral science. Statistics: Textbooks and monographs, Vol. 137 (pp. 63-104). Inc, New York, NY: Marcel Dekker. Renewable Energy. Vol. 29, 2004.

Jacovides C.P., Tymvios F.S., Assimakopoulos V.D., Kaltsounides N.A., 2006. *Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation*, Renewable Energy, N° 15, Jan 2006.

Ounalli Amor (ANER), 2008.« Les énergies renouvelables en Tunisie: réalisations et perspectives d'utilisation dans le secteur agricole et en milieu rural », Séminaire sur l'utilisation des énergies renouvelables dans le secteur agricole, Kébili, Tunisie, le 29/04/2008.

Rachid M., Bousalem S. & Ben youssef B., 2008. *Etude des performances d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil*. UPPC, Vol 102, janvier 2008.

Annexes

Tableau 1 – Coûts moyennes et moyennes ajustées pour différents niveaux de HMT selon les sites.

HMT (m)	Site 1 - Kébili		Site 2 - Médenine		Site 3 - Gabès		Site 4 - Tounes	
	Moyenne	Moyenne Ajustée	Moyenne	Moyenne Ajustée	Moyenne	Moyenne Ajustée	Moyenne	Moyenne Ajustée
HMT25	433,41	433,92	451,47	459,79	465,97	466,3	496,11	496,8
HMT35	487,97	488,3	510,62	516,7	517,19	517,68	552,43	552,17
HMT45	541,74	541,98	560,55	560,82	569,21	569,71	607,18	607,62
HMT55	595,54	595,46	610,76	610,89	620,10	620,2	666,56	666,56
HMT65	647,99	647,79	660,65	660,46	670,39	670,38	716,07	715,71
HMT75	706,31	706,21	710,54	710,6	720,45	720,36	769,69	769,26
HMT85	762,08	761,97	780,29	780,09	790,26	790,1	821,69	821,71
HMT95	804,89	803,8	809,19	808,86	819,78	819,51	873,37	873,29
HMT105	877,27	876,98	878,89	878,51	899,59	899,31	926,48	926,38
HMT115	966,82	966,45	966,07	965,57	917,41	917,1	974,70	974,59

Tableau 2 – Analyse de covariance pour les coûts de pompage de l'eau selon les niveaux de HMT et la quantité d'eau comme covariable pour les quatre sites.

(Kébili)					
Source	DDL	Somme des Carrés	Carrés moyens	Valeur F	Pr > F
Modèle	3	2646922	882307	805,88	< 0,001
Erreur	96	185103	19482039		
Total Corrigé	99	2732025			R ² = 0,9618
(Médenine)					
Modèle	3	2395440	798111	717,36	< 0,001
Erreur	96	106767	111235184		
Total Corrigé	99	2502207			R ² = 0,9573
(Gabès)					
Modèle	3	2455553	817851	877,84	< 0,001
Erreur	96	113884	12691849		
Total Corrigé	99	2569437			R ² = 0,9549
(Tounes)					
Modèle	3	2739247	913082	813,20	< 0,001
Erreur	96	107791	11228211		
Total Corrigé	99	2847038			R ² = 0,9621

Tableau 3 – Analyse de covariance pour les coûts de pompage de l'eau selon les niveaux de HMT et la quantité d'eau ajustée comme covariable pour les quatre sites.

(Kébili)					
Source	DDL	Somme des Carrés	Carrés moyens	Valeur F	Pr > F
Modèle	3	2646922	882307	805,88	< 0,001
Erreur	96	185103	19482039		
Total Corrigé	99	2732025			R ² = 0,9618
(Médenine)					
Modèle	3	2395440	798111	717,36	< 0,001
Erreur	96	106767	111235184		
Total Corrigé	99	2502207			R ² = 0,9573
(Gabès)					
Modèle	3	2455553	817851	877,84	< 0,001
Erreur	96	113884	12691849		
Total Corrigé	99	2569437			R ² = 0,9549
(Tounes)					
Modèle	3	2739247	913082	813,20	< 0,001
Erreur	96	107791	11228211		
Total Corrigé	99	2847038			R ² = 0,9621

Tableau 4 – Estimation des paramètres du modèle et signification statistique pour les quatre sites étudiés.

Variable	Site 1 - Kébili					
	DDL	paramètres	Erreur	P > t	95% IC	
Constante	1	315,54	6,31072	31,35	< 0,001	298,71688 - 332,42616
HMT	1	5,25176	0,13330	45,59	< 0,001	5,02269 - 5,48083
Q _{ajusté}	1	-0,00310	0,00000218	-5,08	< 0,001	-0,00417 - -0,00203
HMT ²	1	-0,00001732	0,00000003	-2,12	0,0314	-0,00003425 - -0,00000001
Q _{total}						
Site 2 - Médenine						
Constante	1	347,34	8,57073	40,53	< 0,001	330,32740 - 364,35305
HMT	1	4,95969	0,11611	42,73	< 0,001	4,72822 - 5,19117
Q _{ajusté}	1	-0,00310	0,00000909	-5,11	< 0,001	-0,00425 - -0,00198
HMT ²	1	-0,00001369	0,00000012	-1,31	0,1919	-0,00003191 - 0,02396857
Q _{total}						
Site 3 - Gabès						
Constante	1	371,24	8,92860	39,58	< 0,001	355,51160 - 386,96112
HMT	1	5,01131	0,12097	41,44	< 0,001	4,77169 - 5,25194
Q _{ajusté}	1	-0,00329	0,00002084	-5,26	< 0,001	-0,00452 - -0,00206
HMT ²	1	-0,00001407	0,00000061	-1,87	0,0663	-0,00003075 - 0,00000266
Q _{total}						
Site 4 - Tounes						
Constante	1	276,35	6,87172	41,78	< 0,001	260,23180 - 292,44416
HMT	1	5,35213	0,11996	45,18	< 0,001	5,12326 - 5,58100
Q _{ajusté}	1	-0,00310	0,00000018	-5,33	< 0,001	-0,00427 - -0,00199
HMT ²	1	-0,00001667	0,00000012	-2,01	0,0478	-0,00003776 - -0,02239177
Q _{total}						