

PERSPECTIVES DU POMPAGE EOLIEN DANS LE SUD ALGERIEN

N. Kasbadji Merzouk (1), M. Merzouk (2), B. Benyoucef (3)

(1) - Division Energie Eolienne, Centre de Développement des Energies Renouvelables, BP. 62, Bouzaréah, Alger, Algérie

(2) - Université Saad Dahleb de Blida, Faculté des Sciences, Soumaa, Blida, Algérie.

(3) - Unité de Développement des Matériaux et Energies Renouvelables, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.

RÉSUMÉ

Le présent papier porte sur les perspectives d'installation d'éoliennes de pompage dans la région sud-ouest de l'Algérie. Six localités ont été choisies pour l'étude, à savoir Adrar, Timimoun, In Salah, Béchar, Tindouf et In Amenas. Une étude statistique a permis la détermination de la carte des vents de la région. La vitesse moyenne annuelle varient entre 3.5 et 6.5 m/s. Par ailleurs, la carte des ressources en eau du Sahara septentrional a montré que la région choisie est caractérisé par l'existence d'un affleurement du continental intercalaire avec un toit de réservoir allant de 10 à 100 mètres de profondeur. Ces deux paramètres combinés permettent de déterminer les perspectives d'installation d'éolienne de pompage dans ces régions. En effet, le calcul de la puissance éolien utile sur un site en fonction des limites de la machin éolienne ont permis la détermination des débits journaliers soutirés à l'aide d'une éolienne à pompage mécanique et un aérogénérateur de différentes puissances nominales. Les avantages et les inconvénients de chaque système sont mis en évidence.

Mots clés : Paramètre de Weibull, Potentiel Energétique éolien, Eolienne de pompage, Aérogénérateur.

SUMMARY

This paper relates to the prospects for wind mills installation of in the south-western area of Algeria. Six localities were selected for the study, namely Adrar, Timimoun, In Salah, Bechar, Tindouf and In Amenas. A statistical study allowed the determination of the wind speed map of the area. The annual mean velocity vary between 3.5 and 6.5 m/s. In addition, the water resources chart of the septentrional Sahara showed that the selected area is characterized by the existence of subsoil water from 10 to 100 meters of depth. These two combined parameters make it possible to determine the best places for installation of wind mill in these areas. Indeed, the calculation of the useful power wind according to the limits of the wind machines allowed the determination of the daily flow rate using a wind mill mechanical pumping and an aerogenerator of small power. The advantages and the disadvantages of each system are highlighted.

Key words : Wribull parameters, Wind energy potential, Windwills, Aerogenerators.

INTRODUCTION

L'une des préoccupations actuelle en Algérie est la revalorisation des terres agricoles dans les zones arides et semi-arides afin de parvenir à une autosuffisance alimentaire, freiner l'exode rural vers le nord et fixer les populations.

Au vu des potentiels énergétiques solaires, géothermiques et éoliens existants dans les régions situés au sud de l'Algérie, ces dernières sont généralement favorables à l'implantation des systèmes énergétiques basés sur les énergies renouvelables, (MEFTI, 2002, FEKRAOUI, 2003 et KASBADJI MERZOUK, 2000).

Plusieurs études établies, ont montrés que certaines régions de l'Algérie sont favorables à l'implantation des systèmes de pompage éolien, (KASBADJI MERZOUK *et al.*, 1998, 2005 et DAAOU NEDJARI *et al.*, 2005). Toutefois, toute installation doit être précédé par une étude de faisabilité qui déterminerait leurs rentabilités sur un site donné. C'est dans cette optique, que la présente étude été établie. Deux systèmes de pompage ont été abordés à savoir : l'éolienne de pompage mécanique et les aérogénérateurs avec leurs avantages et leurs inconvénients. L'étude des potentialités énergétiques des sites d'installation est passée par le traitement statistique des données vent qui a permis le calcul du potentiel énergétique éolien disponible.

Par ailleurs et compte tenu des nécessités de conversion du mouvement de l'air (vitesse du vent) en mouvement de rotation de l'éolienne, il y a nécessairement une suite de pertes d'énergie, en cascade, avant d'arriver à l'utilisation (Pompe, génératrice, etc., ...). En effet en introduisant les limites machines on calcule le potentiel utile réellement récupérable. Ce dernier est utilisé pour estimer les débits journaliers pompés pour une hauteur manométrique donnée.

Pour le pompage électrique l'estimation du débit moyens journaliers fonction de la hauteur manométrique totale de pompage a été effectués en considérant les caractéristiques de 04 aérogénérateur commercialisés, de puissance nominale égale 3, 12, 600 KW et 1 MW supposés installés sur 06 sites sahariens à savoir, Adrar, Timimoun, In salah, Tindouf, Béchar et In Amenas. Les résultats montrent que certains sites s'apprentent bien à de telles installations alors que d'autres nécessitent des systèmes hybrides à savoir solaire ou autre.

La même étude a été faite en considérant le pompage mécanique et en prenant en considération les limites du système, le débit moyen d'eau pompé a été déterminé pour un diamètres de rotor fixé.

MODÉLISATION

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'éolienne) l'énergie éolienne disponible (potentiel) subit une suite de pertes en cascades, jusqu'à la sortie machine, (limite de Betz, seuils machine et pertes de conversion).

En effet, seule une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné, appelée puissance utilisable est réellement obtenue en fin de processus, soit à la sortie de l'éolienne.

Puissance Energétique Eolien Disponible

L'énergie éolienne moyenne disponible sur un site donné, en 1 seconde (puissance) par unité de surface de la roue d'une éolienne s'écrit :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle \quad (1)$$

où ρ est la masse volumique de l'air égale en moyenne à 1.25 kg/m³ et $\langle V^3 \rangle$ la vitesse cubique moyenne du vent.

La vitesse cubique moyenne se calcule à partir de la densité de fréquence du vent pour un pas donné modélisée par la loi de Weibull. La densité de probabilité de cette distribution s'écrit sous la forme :

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (2)$$

Où $f(V)$ représente la distribution des fréquences des vitesses moyennes tri horaires pour une classe donnée, k et c des facteurs appelés communément les paramètres de Weibull.

La vitesse cubique moyenne est déterminée en intégrant la fonction de densité de probabilité :

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV \quad (3)$$

Il s'en suit que :

$$\langle V^3 \rangle = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (4)$$

Où Γ représente la fonction gamma.

Généralement les vitesses sont mesurées auprès des stations de l'Office national de météorologie, à une hauteur normalisée égale à 10 mètres du sol. Toutefois, le rotor des systèmes éoliens est généralement placé à une hauteur supérieure ou égale à 25 mètres du sol. Pour calculer le potentiel énergétique éolien moyen annuel, il faut extrapoler les vitesses moyennes à la hauteur du rotor. Cette extrapolation entraîne une variation du mode de distribution. Plusieurs formules empiriques permettant ce calcul, existent dans la littérature (HENNESSEY, 1977 et KASBADJI MERZOUK *et al.*, 2003). La plus utilisée est la méthode de la loi de la puissance modifiée (MIKHAIL *et al.*, 1981), qui s'écrit :

$$k_2 = k_1 \left[\frac{1 - 0.0881 \ln \frac{Z_1}{10}}{1 - 0.0881 \ln \frac{Z_2}{10}} \right] \quad (5)$$

et

$$c_2 = c_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^\alpha \quad (6)$$

avec :

$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} + \left[\frac{0.0881}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \right] - \left[\frac{0.0881 \ln c_1}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{Z_2}{10}\right)} \right]$$

avec $Z = (Z_1 * Z_2)^{0.5}$ et Z_0 : le paramètre de rugosité du lieu.

Le choix s'est porté sur ces expressions car il a été démontré que l'hypothèse que le paramètre était constant n'est pas fondée. En effet, ce dernier doit varier avec la stabilité atmosphérique, la rugosité du sol, l'altitude et les paramètres météorologiques.

Les paramètres de Weibull extrapolés permettent le calcul de la vitesse cubique moyenne et le potentiel énergétique à une altitude donnée.

Puissance Eolien récupérable

L'énergie cinétique est convertie en énergie mécanique grâce à l'hélice des éoliennes. La vitesse du vent en aval de la roue n'étant jamais nulle, ceci implique que la puissance éolienne disponible n'est pas entièrement récupérée au niveau de l'hélice, (CUNTRY, 1979). En effet, le potentiel énergétique récupérable au niveau de l'hélice s'écrit :

$$P_{rec} = \frac{16}{27} \langle P \rangle \quad (7)$$

Cette limite (environ 0.59) est appelée "limite de Betz".

En prenant en considération la limite de Betz et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable par unité de surface est donnée par :

$$\langle P_r \rangle = 0.37 \langle V^3 \rangle \quad (8)$$

Puissance éolienne moyenne utile

Etant donné que :

- la vitesse du vent est variable
- et que chaque machine éolienne est caractérisée par la vitesse de démarrage V_1 , une vitesse nominale V_n et une vitesse d'arrêt V_s spécifiques, la puissance éolienne utile est donnée par :

$$\langle P_u \rangle = \frac{1}{2} \rho A \langle V_u^3 \rangle \quad (9)$$

La vitesse V_u est déduite de la courbe représentative de la distribution de Weibull entre les limites de la machine. La limite inférieure est représentée par la vitesse de démarrage. En effet, seules les vitesses du vent supérieures à la vitesse démarrage V_1 sont considérées dans le calcul.

En second lieu, lorsque la vitesse nominale V_n est atteinte, l'augmentation de la vitesse de vent n'a aucun effet sur le régime de la roue. Enfin quand la vitesse d'arrêt V_s est atteinte, le système est stoppé et les vitesses qui lui sont supérieures n'interviennent pas pour le calcul de V_u , (figure 1). La densité de puissance utile est donnée par :

$$P_u = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_1 \\ \frac{1}{2} \rho V^3 & \text{" } V_1 \leq V \leq V_n \\ \frac{1}{2} \rho V_n^3 & \text{" } V_n \leq V \leq V_s \\ 0 & \text{" } V \geq V_s \end{cases} \quad (10)$$

La vitesse cubique utile moyenne est donnée par intégration de la vitesse cubique pondérée par la fonction de probabilité en considérant comme bornes d'intégration les limites imposées par la machine :

$$\langle V_u^3 \rangle = \int_{V_1}^{V_n} f(V) V^3 dV + V_n^3 \int_{V_n}^{V_s} f(V) dV \quad (11)$$

En utilisant la fonction normalisée gamma, on obtient après intégration Γ_n , (KASBADJI MERZOUK et al., 2002 et 2004) :

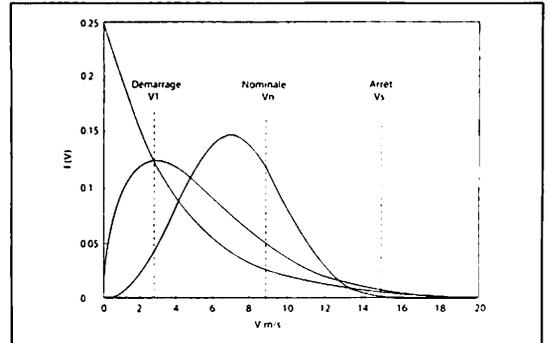


Figure 1 : Représentation des vitesses de démarrage, nominale et d'arrêt sur la courbe de distribution de Weibull.

$$\langle V_u^3 \rangle = \left[\Gamma \left(\left(\frac{V_n}{C} \right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) - \Gamma \left(\left(\frac{V_1}{C} \right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) \right] \overline{V^3} + V_1^3 \left[\exp \left(- \left(\frac{V_n}{C} \right)^k \right) - \exp \left(- \left(\frac{V_s}{C} \right)^k \right) \right] \quad (12)$$

Avec : $\Gamma_n(x, a) = \Gamma(x, a) / \Gamma(x)$

Puissance éolienne moyenne utilisable

La puissance éolienne moyenne réellement utilisable s'écrit :

$$\langle P_e \rangle = \eta \langle P_u \rangle \quad (13)$$

Où η représente le rendement machine.

Ce dernier représente le rapport entre la puissance nominale donné par le constructeur et la puissance électrique théorique calculée pour

la vitesse du vent constante égale à la vitesse nominale. Soit :

$$\eta = \frac{\langle P_n \rangle}{\langle P_{Théorique} \rangle} \quad (14)$$

Avec : $P_{Théorique} = \frac{1}{2} \rho A \langle V_n^3 \rangle$ (15)

Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne sont utilisés au maximum de leurs performances si leur choix est effectué, correctement, en fonction des paramètres du site d'implantation.

Estimation du débit pompé

En Considérant un système de pompage éolien de rendement global η_i et de hauteur manométrique totale H_t , le débit d'eau pompé est donné par :

$$\dot{Q} = \frac{\eta_i \langle P_e \rangle}{\bar{\rho} \cdot g H_t} \quad (16)$$

Le débit journalier sera égal à :

$$Q_d = 3600 * 24 * \frac{\eta_i \langle P_e \rangle}{\bar{\rho} g H_t} \quad (17)$$

APPLICATION

Choix des sites étudiés

L'étude de faisabilité porte sur des sites situés au sud de l'Algérie. Région, dont le climat chaud et sec en été et très froid en hiver, est caractérisée par de longues périodes de sécheresse et des précipitations irrégulières qui accrues les besoins en eau.

L'Atlas vent du sud de l'Algérie, (figure 2), réalisée en utilisant les vitesses moyennes à 10 m d'altitude de 20 stations (KASBADJI MERZOUK *et al.*, 2000), montre une zone climatique ventée dont le maximum de vitesse de vent moyenne est atteint à Adrar avec une valeur de 6,5 m/s.

En outre, la majorité de cette partie du Sahara a une ressource importante en eau souterraine, à savoir la nappe Albienne qui affleure dans certaines régions. En effet, la carte des ressources en eau de Septentrional Sahara représentant le toit du réservoir, (DUBOST, 1983 et FEKRAOUI *et al.*, 2005), montre que les couches perméables incluent un secteur entier qui s'étend d'Adrar à In Amenas tout en passant par In Salah, (figure 3).

En considérant ces paramètres et vu que le sud de l'Algérie, est connu pour son habitat dispersé qui n'est pas relié au réseau d'alimentation électrique, les sites de Tindouf, Timimoun, In Salah, Adrar, Bechar et In Amenas ont été choisis pour l'étude.

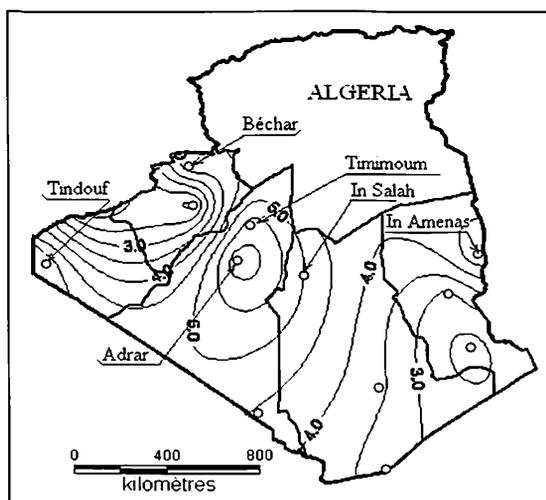


Figure 2 : Carte de la vitesse du vent du sud, (KASBADJI MERZOUK *et al.*, 2005).

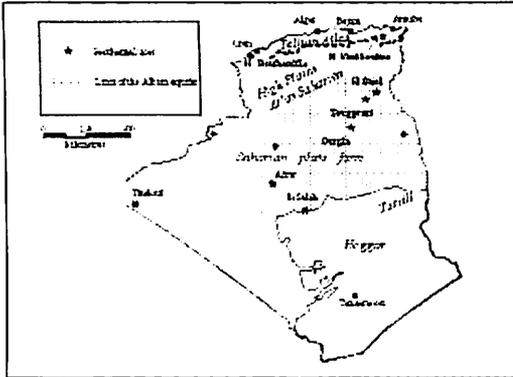


Figure 3 : Représentation de la nappe albienne, (FEKRAOUI *et al.*, 2005).

Dix ans de données tri horaires de la direction et vitesse du vent y sont disponibles au niveau des stations de mesure du réseau de l'ONM, ce qui permet la détermination de leurs potentialités énergétiques éoliennes.

Choix des aérogénérateurs

Les données fournies par l'institut hydraulique (Inrh, 2000) montrent que selon les besoins locaux, les débits soutirés des forages varient entre 1 l/s à 100 l/s (environ 8,6 m³/jour à 8 640 m³/jour). Pour répondre à ces besoins, les aérogénérateurs peuvent être utilisés comme source d'énergie pour le pompage de l'eau. En effet, ils permettent la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique grâce à un rotor couplé à une génératrice, qui commande une pompe.

Quatre aérogénérateurs commercialisés de puissance nominale égale 3, 12, 600 et 1000 kW ont été choisis pour l'étude de faisabilité du pompage électrique. Les caractéristiques des machines sont données respectivement au tableau I.

Tableau I : Caractéristiques des aérogénérateurs.

Puissance nominale, kW	V_{10} , m/s	V_{11} , m/s	V_{50} , m/s	V_r , m	D, m
3	3,5	12	14	25	4
12	3,5	12	14	25	7
600	3	15	25	50	44
1000	3	15	25	60	54,2

De même, le rendement global de la pompe génératrice a été pris égal respectivement à 25% et 55 % pour les petites machines et les grandes puissances, (Kasbadji Merzouk *et al.*, 2004).

Choix des machines éoliennes pour le pompage mécanique

L'éolienne de pompage mécanique utilise un système bielle manivelle monté sur l'arbre du rotor qui transforme le mouvement rotatif en un mouvement rectiligne alternatif qui commande la pompe à piston installé dans un puits à la base de l'éolienne. Elles démarrent généralement pour des vitesses faibles, (de l'ordre de 2.5 à 3 m/s), et s'adaptent bien aux caractéristiques des pompes immergées à piston qui nécessitent une vitesse de déplacement faible et permettent une hauteur de refoulement importante et dont le rendement Convertiseur-pompe est de l'ordre de 60 %, (Les pompes, 1976). Ces éoliennes sont généralement équipées d'une hélice pales et dont les diamètres peuvent atteindre les 9 mètres. Par ailleurs, le point faible de ce système réside dans la tige qui ne saurait dépasser des hauteurs de 20 m, à cause des contraintes mécaniques. Avec un rotor installé à 10 m du sol, ce type d'installation est réservé à des puits dont les profondeurs sont inférieures à 15 m. En figure 4 est représenté le schéma des systèmes éoliens mécanique et électrique pour le pompage de l'eau.

RESULTATS ET DISCUSSION

Carte de vent du sud de l'Algérie

Par ailleurs, les courbes de densité de probabilité des différents sites sont données en figure 5. Ces courbes diffèrent essentiellement par leurs modes respectifs. En effet, les modes passent de 1,6 m/s pour Bechar vers 5,4 m/s pour Adrar. La courbe représentative de ce dernier site approche la forme gaussienne.

De la même manière nous pouvons voir que le régime du vent d'Adrar se prolongent jusque à 20 m/s tandis que pour In Amenas le régime n'excède pas 14 m/s.

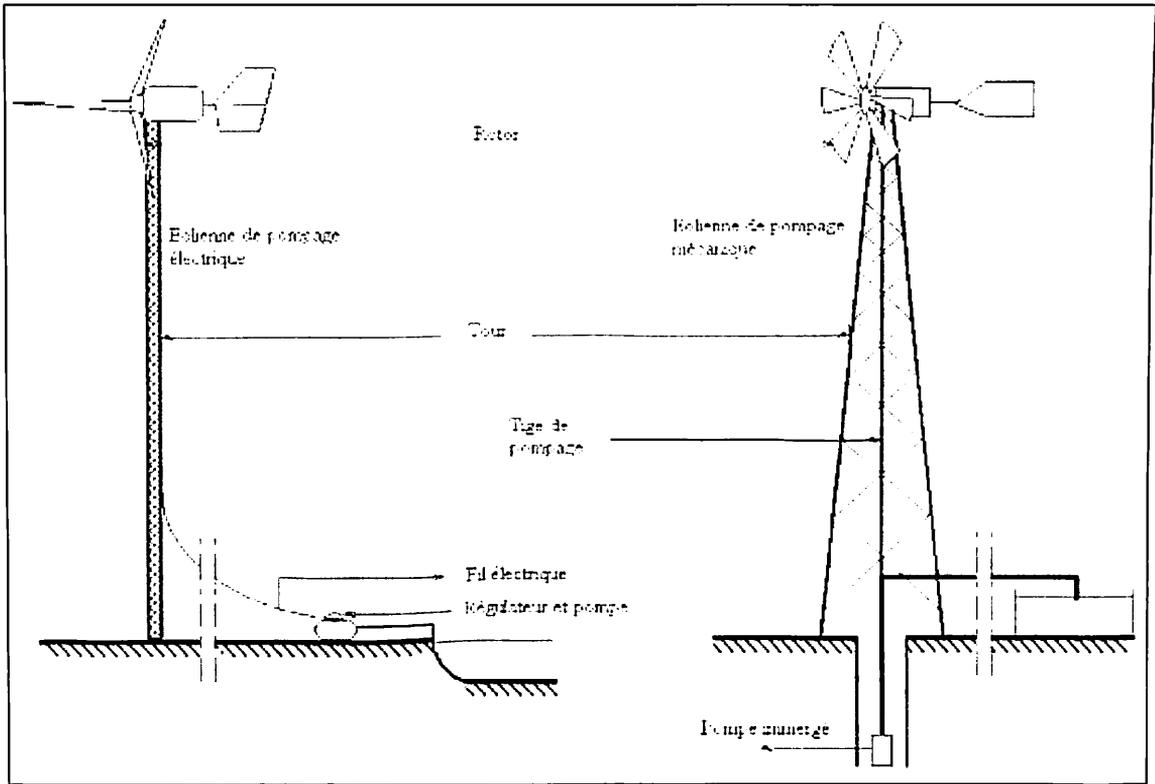


Figure 4 : Représentation schématique des systèmes éoliens mécanique et électrique pour le pompage de l'eau.

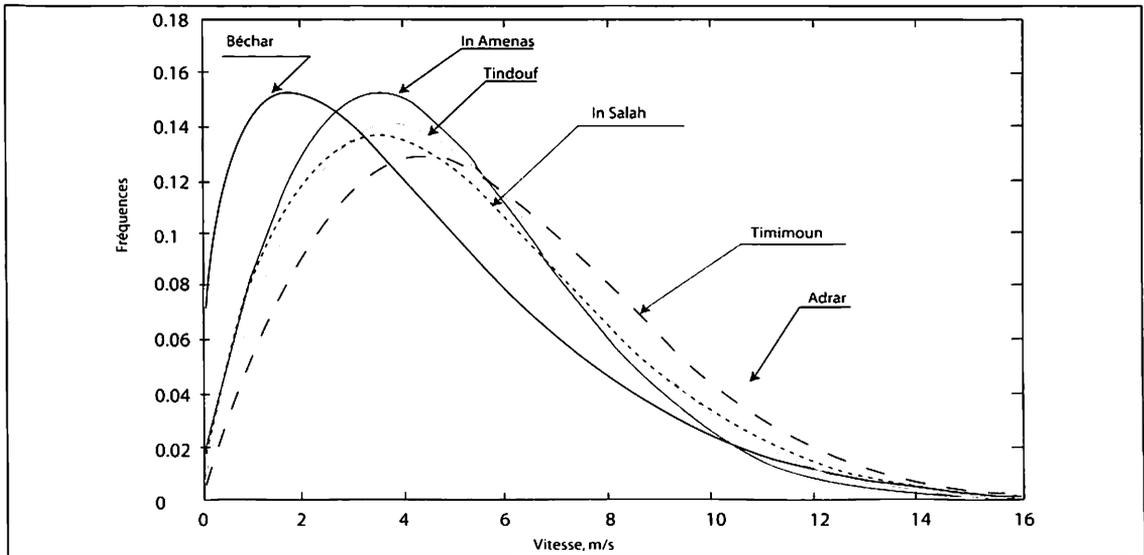
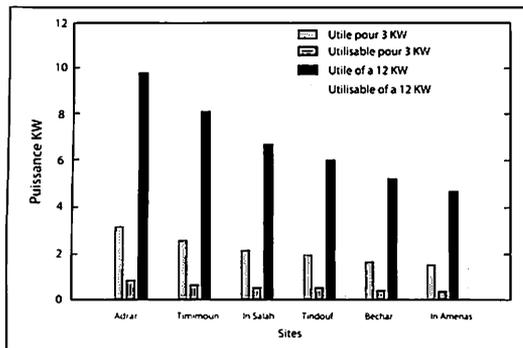


Figure 5 : Distribution de Weibull des différents sites.

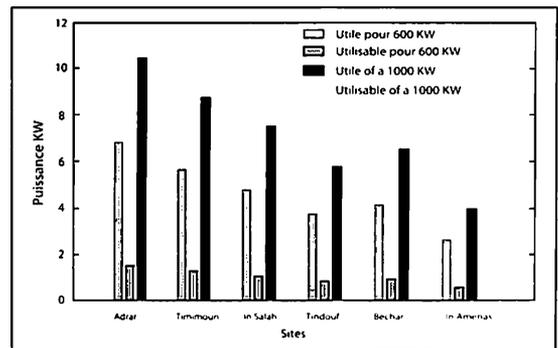
Puissance utilisable

En figure 6 sont comparées les puissances utilisables et utiles estimées pour les six sites et les quatre aérogénérateurs. Les résultats montrent que l'écart entre la puissance utilisable et utile est important.

Par ailleurs, on remarque que, pour les petites machines (figure 6a), les puissances utilisables et utiles varient de manière similaire aux puissances disponibles, (les sites sont classés sur l'axe des x suivant l'importance du potentiel disponible respectif).



(a)



(b)

Figure 6 : Puissance utile et utilisable pour les différents sites.

Pour les grandes puissances (600 kW et 1 MW), la figure 7, montre que la quantité de l'eau pompée estimée peut répondre aux besoins les plus élevés exprimés dans ces régions.

Même pour une hauteur manométrique totale d'environ 100 mètres, le volume de l'eau pompé peut atteindre 3300 m³/jour pour In Salah (au minimum) et 8700 m³/jour pour Adrar.

Pompage mécanique

Les résultats de la simulation, pour des machines similaires aux aérogénérateurs de petites puissances utilisées en mode électrique, sont représentés en figure 8. L'examen des familles de courbes montre que les débits pompés sont plus importants comparés à ceux estimés

Pour les machines de grande puissance (figure 6b), les positions de Bechar et Tindouf sont inversés, ceci montre l'influence des distributions de la vitesse du vent du site sur les puissances utilisables.

Par ailleurs, l'efficacité globale des aérogénérateurs, par rapport à un site donné est estimée par le rapport entre la puissance utilisable et la puissance nominale. Les efficacités moyennes varient 30 % pour Adrar à 7 % pour In Amenas suivant le régime des vent du site et de la puissance nominale considérée.

par les aérogénérateurs de petite puissance en mode électrique, mais avec les contraintes précitées (derrick au dessus du puits et profondeur de puits inférieure à 35 m) pénalisent ce mode d'utilisation.

Toutefois, il est clair que les débits pompés avec les aérogénérateurs de grandes puissances sont plus importants et offrent de grandes possibilités.

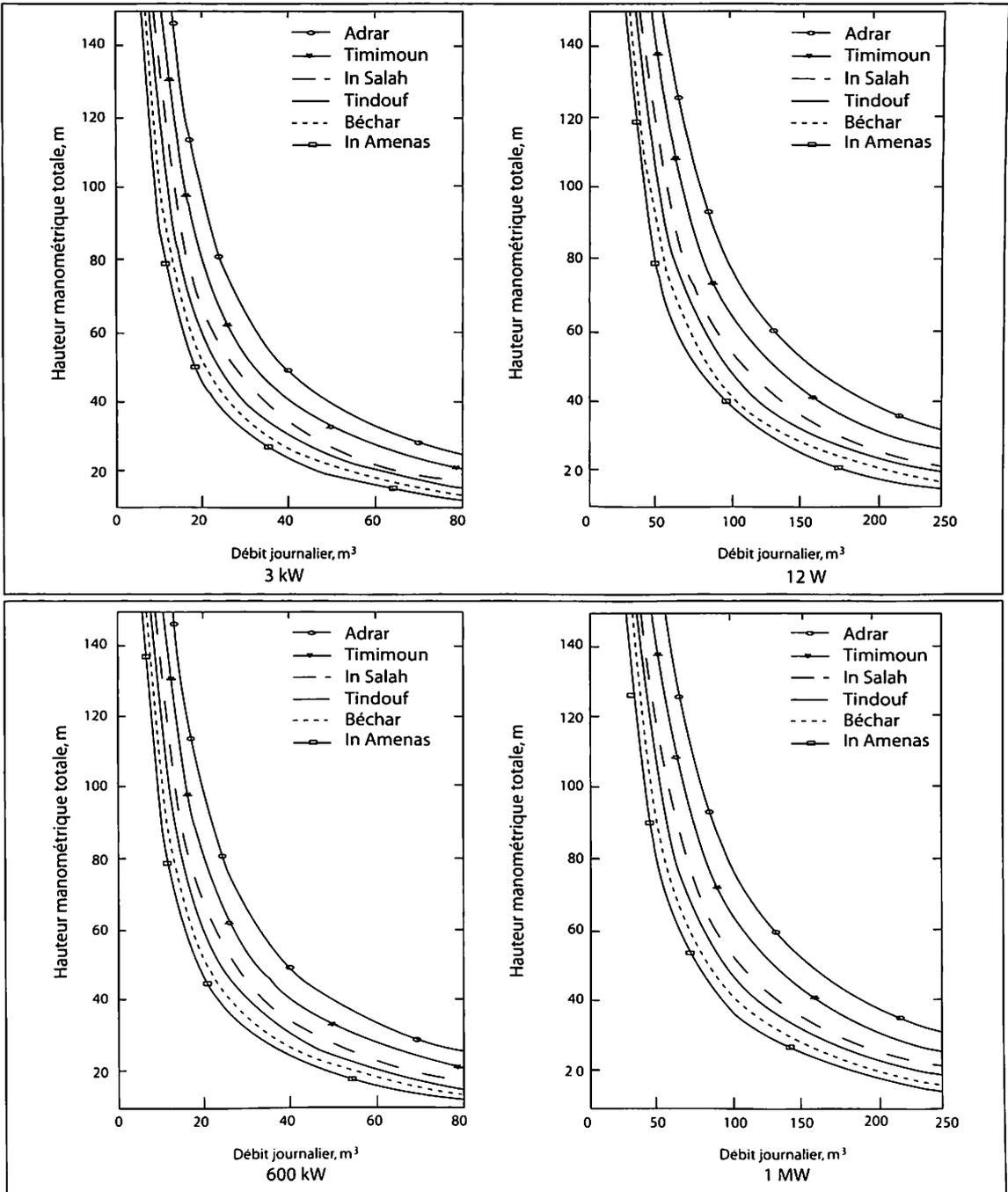


Figure 7 : Débit d'eau pompée pour six sites en fonction de la hauteur manométrique totale, en mode électrique.

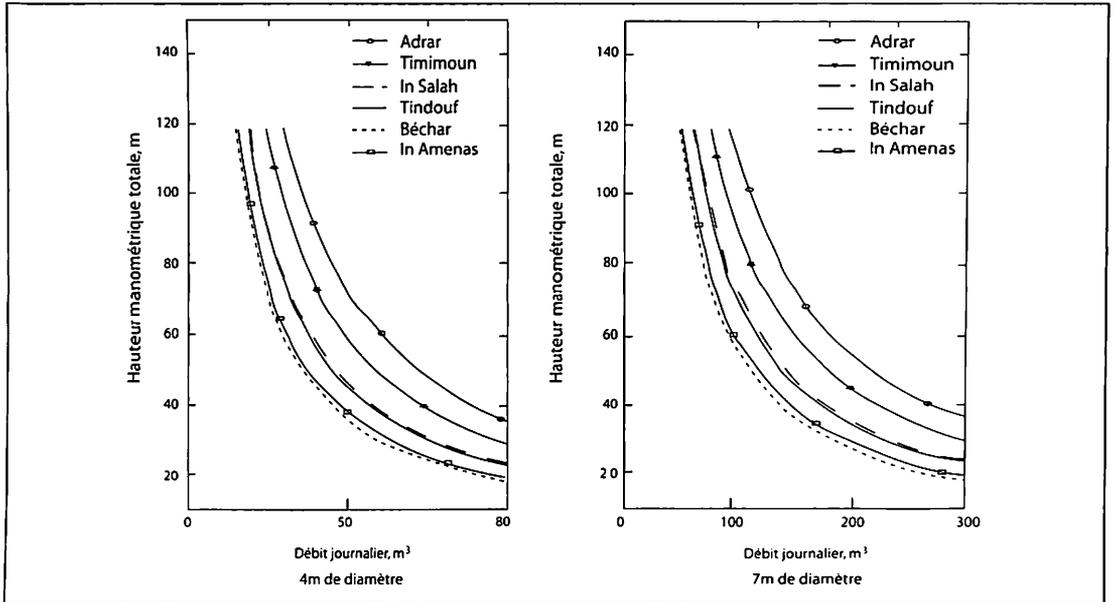


Figure 8 : Débit d'eau pompée pour six sites en fonction de la hauteur manométrique totale, en mode mécanique.

CONCLUSION

Au vu des résultats obtenus grâce à l'étude de faisabilité, l'irrigation des terres agricoles à l'aide de systèmes de pompage éoliens est une solution adéquate. En effet, les vitesses moyennes du vent, enregistrées dans ces régions sont parmi les plus élevées en Algérie et prévoient une rentabilité intéressante des systèmes éoliens.

Les précipitations moyennes ne dépassant guère les 300 mm d'eau pour cette région du pays, l'irrigation devient obligatoire pour toute forme de culture agricole.

Les résultats montrent par ailleurs, que l'existence de la nappe albienne est un avantage supplémentaire. Avantage qui milite en faveur du montage mécanique dans la région d'Adrar

grâce à la faible profondeur des toits du réservoir, plus performant et moins coûteux pour les faibles profondeurs.

Pour les forages (donc des profondeurs importantes) la résolution réside dans le pompage par aérogénérateurs.

Toutefois, le problème posé, reste dans la qualité de l'eau et sa salinité. En effet le mode d'irrigation le plus recommandé est celui du goutte à goutte ou bien par aspersion afin de limiter la stérilité des sols à long terme.

Références bibliographiques

- CUNTRY G., 1979. Eoliennes et aérogénérateurs, EDISUD/Technologie douce.
- DAAOU NEDJARI H., HADDOUCHE S., KASBADJI MERZOUK N., 2005. Utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau dans les hauts plateaux. JITH 2005, Tanger, Maroc, novembre 2005.
- DUBOST D., 1983. Contribution à l'amélioration agricole des eaux chaudes du continental intercalaire (albien) dans la cuvette du bas Sahara algérien. Bull. Agr. Sah., 5, 61, 109.
- FEKRAOUI A., 2003. La géothermie, une énergie d'avenir, Bulletin des énergies renouvelables, n° 4, décembre 2003.
- FEKRAOUI A., KEDAID F.Z., 2005. Geothermal Resources and uses in Algeria : A Country Update Report. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 april 2005.
- HAMMOUCHE R., 1990. Atlas Vent de l'Algérie. Publication interne de l'ONM, (Office national de météorologie), Alger, 1990.
- HENNESSEY J.P. Jr. 1977. Some Aspect of Wind Power Statistics. J. of Applied meteorology, 16(2), 119-128.
- INRII. 2000. Inventaire des Forages des wilayas en Algérie. Internal report of Hydraulic Institute, 200 p.
- KASBADJI MERZOUK N., 1998. Perspectives d'utilisation de systèmes éoliens de pompage sur des sites sahariens. SIPE 4, Béchar, septembre 1998.
- KASBADJI MERZOUK N., MERZOUK M., 2002. An Evaluation of useful power density of the wind machine. Wind Power 2002, La défense Paris, avril 2002.
- KASBADJI MERZOUK N., MERZOUK M., MESSEN N., BENYOUCEF B., 2003. Profil Vertical de la Vitesse du Vent en milieu semi-aride. Test des modèles d'Extrapolation. International congress on Photovoltaic and wind energy, Tlemcen, décembre 2003.
- KASBADJI MERZOUK N., 2000. Wind Energy Potential of Algeria. Inter. J. of Renewable 21, 553-562.
- KASBADJI MERZOUK N., MERZOUK M., 2004. Useful Power Density of a Wind Machine in Algeria. Proceeding of International Mechanical Engineering Conf. Kuwait, décembre 2004.
- KASBADJI MERZOUK N., MERZOUK M., 2005. Useful Wind Powers Machine Estimation, Application to Water Pumping Systems in South of Algeria. 9 International Congress on Mechanization and Energy Agriculture, 27 International Conference on CIGR, Izmir, Turquie, septembre 2005.
- Les pompes. Ed. Electro Hydraulique. p.126. 1976.
- MEFTI R., 2002. Evaluation du Potentiel Energétique Solaire, Bulletin des énergies renouvelables, n° 2, décembre 2002.
- MIKHAIL S.S., JUSTUS C.G., 1981. Comparison of Height Extrapolation Models and sensitivity Analysis. Journal of Wind engineering. 5 (2).