

Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable Application au pompage dans les Hauts Plateaux

Nachida Kasbadji Merzouk ^{1*} et Mustapha Merzouk ²

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

² Faculté des Sciences, Université Saad Dahleb, Route de Soumaa, Blida, Algérie

(reçu le 02 Juin 2006 - accepté le 30 Septembre 2006)

Résumé - Le potentiel énergétique éolien utilisable de la partie ouest des Hauts Plateaux algériens est estimé en considérant deux sites représentatifs, à savoir: Tiaret et El Bayadh. Les distributions statistiques sont établies pour tous les mois en traitant les données de dix années consécutives. Les puissances utiles et utilisables ont été estimées mensuellement en considérant les limites de 3 éoliennes du commerce de 100 kW, 600 kW et 850 kW de puissance nominale respective. Les quantités d'eau que l'on peut pomper quotidiennement ont été estimées pour les mois extrêmes (janvier et juillet). Les résultats montrent que les performances de la machine dépendent du site et de la période et que multiplier la puissance nominale d'une éolienne peut s'avérer sans conséquence sur la puissance utilisable et donc le débit d'eau pompée.

Abstract - The usable wind energy potential of Algerian high plains west part has been estimated considering two representative sites, namely Tiaret and El Bayadh. Monthly statistical distributions have been established for both regions using 10 years of continuous wind data.. A monthly useful and usable wind powers have been estimated regarding to a limits of 3 commercialized wind machines with 100 kW, 600 kW et 850 kW of nominal power, respectively. A daily water quantities witch can be pumped have been calculated for extreme months January and July. A results show that a wind machine performance is related to a site and a period. Same results show that multiplying a wind machine nominal power can be without consequence on usable power and a water flow rate.

Mots clés: Paramètres de Weibull - Potentiel énergétique éolien - Limites machines - Potentiel utilisable.

1. INTRODUCTION

A l'heure où on parle d'économie et de maîtrise de l'énergie, il est aujourd'hui impératif de développer de nouvelles sources d'énergies pour pallier au déficit énergétique prévu vers l'an 2020 et qui coïncidera, vraisemblablement, avec l'épuisement des sources d'énergies classiques [1].

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

Les Hauts Plateaux algériens disposent de potentiels solaire et éolien non négligeables et sont donc tous indiqués pour accueillir des systèmes énergétiques utilisant les énergies renouvelables [2, 3]. C'est dans cette optique, que la présente étude a été établie [4-6]. Une étude statistique des données vent a été utilisée pour le calcul du potentiel énergétique éolien disponible sur un site donné permettant le choix des sites ventés susceptibles de recevoir des systèmes de pompage.

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 (génératrice, pompe,.). En effet en introduisant les

* nkmerzouk@cder.dz

limites des machines, on calcule le potentiel utile réellement utilisable. Ce dernier est utilisé pour déterminer les débits journaliers pompés pour une hauteur manométrique donnée.

Trois aérogénérateurs du commerce, de puissance nominale respectivement égale à 100 kW, 600 kW et 850 kW ont été testés sur deux sites situés sur les Hauts Plateaux algériens, à savoir: Tiaret et El Bayadh. Les débits moyens journaliers ont été déterminés en fonction de la hauteur manométrique totale de pompage.

2. MODELISATION

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'éolienne) l'énergie disponible (potentiel) subit une suite de pertes en cascades, jusqu'à la sortie machine, (limite de Betz, seuils machine et pertes de conversion). Cette dégradation de l'énergie est représentée schématiquement en figure 1.

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.

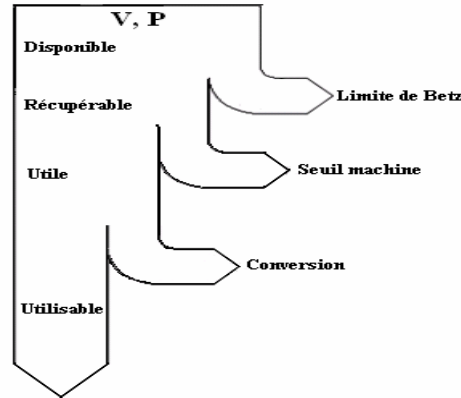


Fig. 1: Représentation schématique des dégradations successives de l'énergie éolienne avant utilisation

2.1 Puissance énergétique éolienne disponible

L'énergie éolienne moyenne disponible sur un site donné par unité de temps et 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/m^3 et $\langle V^3 \rangle$ la vitesse cubique moyenne du vent.

La détermination de la vitesse cubique moyenne se fait à partir de l'étude statistique en utilisant la distribution de Weibull, dont la densité de probabilité est donnée par:

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

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 par intégration du moment d'ordre 3, soit:

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

Il s'en suit que:

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

où Γ représente la fonction gamma.

2.2 Puissance éolienne récupérable

L'énergie cinétique disponible est convertie en énergie mécanique en utilisant une roue à aubes (ou pâles) appelée communément éolienne. 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. On montre que le potentiel énergétique récupérable au niveau de l'hélice est donné par [7]:

$$P_{\text{rec}} = \frac{16}{27} \langle P \rangle \quad (4)$$

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

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

$$\langle P_r \rangle = 0.37 \langle V^3 \rangle \quad (5)$$

2.3 Puissance éolienne moyenne utile

Une éolienne est caractérisée par une vitesse de démarrage V_1 , une vitesse nominale V_n et une vitesse d'arrêt V_s spécifiques, données par le constructeur. Attendu que seules les vitesses de vent comprises entre V_1 et V_s contribuent à la conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique, la puissance récupérée à l'axe (puissance utile) est égale à:

$$\langle P_u \rangle = \frac{1}{2} \rho A \langle V_u^3 \rangle \quad (6)$$

La vitesse V_u est déduite de la courbe représentative de la distribution de Weibull entre les limites de la machine (Fig. 2) et en tenant compte du fait que 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. Ainsi, la densité de puissance utile est donc égale à:

$$P_u = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_i \\ \frac{1}{2} \rho V^3 & \text{" } V_i \leq V \leq V_n \\ \frac{1}{2} \rho V_n^3 & \text{" } V_n \leq V \leq V_s \\ 0 & \text{" } V \geq V_s \end{cases} \quad (7)$$

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, soit:

$$\langle V_u^3 \rangle = \int_{V_i}^{V_n} f(V) V^3 dV + V_u^3 \int_{V_n}^{V_o} f(V) dV \quad (8)$$

Après intégration et utilisant la fonction gamma normalisée, on obtient:

$$\langle V_u^3 \rangle = \left[\Gamma\left(\left(\frac{V_n}{C}\right)^k, 1 + \frac{3}{k}\right) - \Gamma\left(\left(\frac{V_i}{C}\right)^k, 1 + \frac{3}{k}\right) \right] \overline{V^3} + V_i^3 \left[\exp\left(-\left(\frac{V_n}{C}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{V_s}{C}\right)^k\right) \right] \quad (9)$$

$$\text{avec: } \Gamma_n(x, a) = \Gamma(x, a) / \Gamma(x) \quad (10)$$

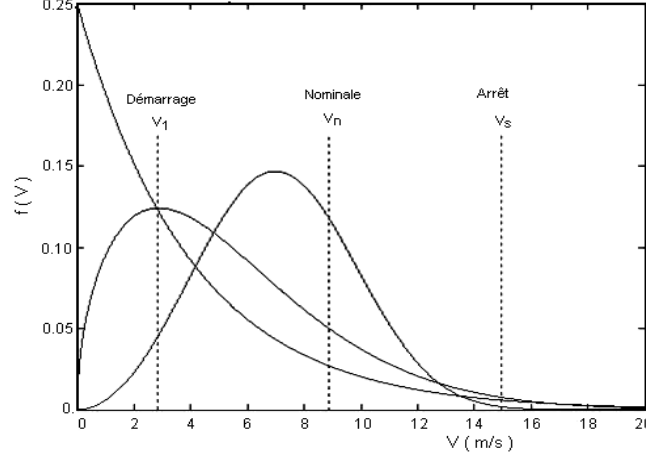


Fig. 2: Distributions de vitesses de vent et limites des vitesses caractéristiques d'une machine quelconque (démarrage, nominale et arrêt)

2.4 Puissance éolienne moyenne utilisable

En considérant le rendement η de la machine, la puissance éolienne moyenne réellement utilisable s'écrit:

$$\langle P_e \rangle = \eta \langle P_u \rangle \quad (11)$$

Quantité représentant le rapport entre la puissance nominale donnée par le constructeur et la puissance théorique calculée pour une vitesse du vent constante et égale à la vitesse nominale. Soit :

$$\eta = \frac{\langle P_n \rangle}{\langle P_{\text{Théorique}} \rangle} \quad (12)$$

$$\text{avec: } P_{\text{Théorique}} = \frac{1}{2} \rho A \langle V_n^3 \rangle \quad (13)$$

Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne sont donc utilisés de façon optimale si leur choix est effectué, correctement, en fonction des paramètres du site d'implantation.

2.5 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:

$$\dot{Q} = \frac{\eta_i \langle P_e \rangle}{\bar{\rho} g H_t} \quad (14)$$

Le débit journalier sera égal à:

$$Q_d = 3600 \times 24 \times \frac{\eta_i \langle P_e \rangle}{\bar{\rho} g H_t} \quad (15)$$

3. APPLICATION

3.1 Choix des sites d'implantation des machines

Le choix est porté sur deux sites algériens, connus pour leurs besoins en eau et caractérisés par un potentiel énergétique éolien intéressant. Ces sites sont situés dans les villes de Tiaret et El Bayadh et correspondent aux stations de mesure du réseau de l'Office National de Météorologie. En effet, dix ans de données mesurées, tri horaires de la vitesse du vent y sont disponibles. En outre, la majeure partie de ces sites est caractérisée par l'existence de ressources importantes en eaux souterraines utilisées pour l'activité pastorale et agricole.

3.2 Choix des aérogénérateurs

Les données fournies par l'institut hydraulique en 2000 [8], montrent que selon les besoins locaux, les débits soutirés des forages varient énormément d'un site à l'autre. Pour répondre à ces besoins, trois aérogénérateurs commercialisés [9], de 100 kW, 600 kW et 850 kW, placés à 45 m du sol ont été choisis. Les caractéristiques des machines sont données sur le tableau 1. Le rendement global du système pompe - génératrice a été estimé à 25 % [10], soit au niveau des caractéristiques moyennes des équipements de commerce.

Tableau 1: Caractéristiques des aérogénérateurs

Puissance nominale (kW)	V_i (m/s)	V_n (m/s)	V_s (m/s)	D_r (m)
100	3.5	8	14	32
600	3	15	25	44
850	4	16	25	52

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Distribution annuelle de la vitesse du vent

Les résultats de l'étude statistique des données de la vitesse du vent sont présentés sur le tableau 2. La méthode du maximum de vraisemblance est utilisée pour l'ajustement des données statistiques [11]. La détermination des coefficients k et c de Weibull est effectuée par itérations successives en utilisant la méthode d'optimisation, de Levenberg - Marquart sous Matlab [12].

On remarque que le facteur de forme obtenu pour les deux sites est très proche, tandis que les facteurs d'échelle sont assez différents. Le site le plus venté est celui de Tiaret avec 5,6 m/s de vitesse moyenne annuelle. Il dispose aussi de la puissance énergétique disponible la plus intéressante et représente ainsi le site le plus favorable à l'utilisation de l'énergie éolienne à des fins de pompage ou autre.

Tableau 2: Résultats statistiques à 10 m du sol

Site	k	c (m/s)	$\langle V \rangle$ (m/s)	$\langle V^3 \rangle$ (m ³ /s ³)	P (W/m ²)
Tiaret	1.72	6.20	5.6	381.91	233.92
El Bayadh	1.62	5.28	4.73	257.13	157.49

4.2 Distribution mensuelle de la vitesse du vent

Pour le choix de l'aérogénérateur adéquat à un site donné, il est plus indiqué d'effectuer une étude à l'échelle mensuelle pour savoir si la production répond à la demande durant toute l'année.

Pour cela la distribution de la vitesse du vent a été effectuée à l'échelle mensuelle, et les paramètres mensuels de Weibull des deux stations ont été estimés.

La distribution des fréquences mensuelles des vitesses de vent, est représentée en figure 3 pour les mois de janvier, avril, juillet et octobre, représentant les 4 saisons. On remarque que les distributions diffèrent sensiblement d'un mois à l'autre en particulier à Tiaret. Ce dernier présente un régime de vent pouvant atteindre 13 m/s en juillet et 21 m/s en janvier. Les distributions présentent moins de différences à El Bayadh avec des vitesses maximales n'excédant pas les 16 m/s.

On note enfin, que dans tous les cas, la vitesse de vent n'atteint jamais la vitesse d'arrêt des aérogénérateurs choisis pour l'étude (25 m/s selon les notes techniques des constructeurs).

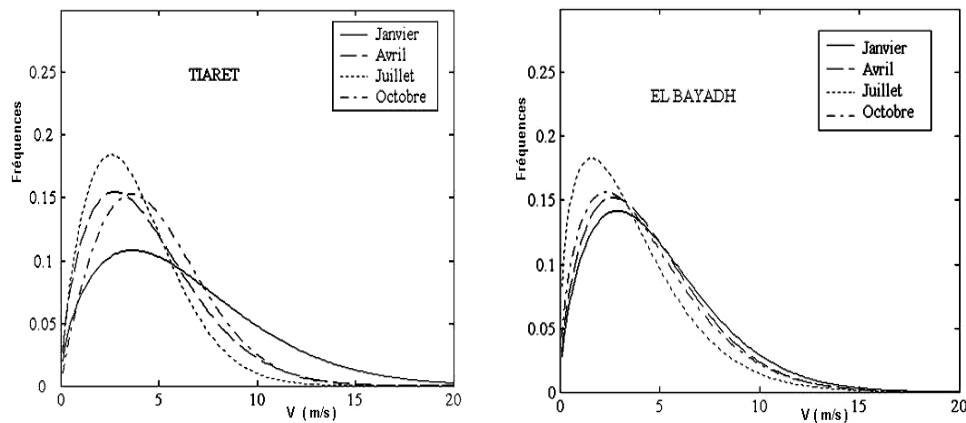


Fig. 3: Régime du vent des deux sites pour les mois de janvier, avril, juillet et octobre

4.3 Détermination de la puissance utile

Généralement les vitesses sont mesurées auprès des stations de l'Office National de Météorologie, à une hauteur normalisée égale à 10 mètres du sol [13]. Afin de déterminer la puissance utile et utilisable pour les trois aérogénérateurs choisis, les paramètres de Weibull ont été extrapolés à la hauteur de l'hélice, à savoir 45 mètres du sol. La loi de la puissance modifiée [14, 15] est utilisée car elle tient compte la stabilité atmosphérique, la rugosité du sol, l'altitude et les paramètres météorologiques.

En figure 4 sont représentés les histogrammes de la vitesse cubique moyenne mensuelle et de la vitesse cubique utile mensuelle des deux sites étudiés et pour les trois aérogénérateurs choisis. On remarque que les densités de puissances éoliennes obtenues avec les aérogénérateurs de 600 et 850 kW sont nettement supérieures à celles obtenues avec l'aérogénérateur de 100 kW de puissance nominale.

On constate aussi que pour le site de Tiaret, les limites de la machine de 100 kW (démarrage à partir de 3.5 m/s et stagnation dès 8 m/s) entraînent, en hiver, une perte supérieure à 50 % de la puissance disponible. Les histogrammes montrent que les aérogénérateurs de 600 et 850 kW ont des vitesses cubiques utiles très proches. La seule différence réside dans les diamètres respectifs. Le choix se fera donc en fonction de la demande locale en énergie.

On note enfin, qu'à El Bayadh la vitesse cubique utile varie d'une manière uniforme durant toute l'année, alors que pour Tiaret une diminution nette est constatée pendant la saison estivale.

Une source d'appoint sera donc nécessaire pour combler le déficit énergétique pendant la saison allant de mars à octobre.

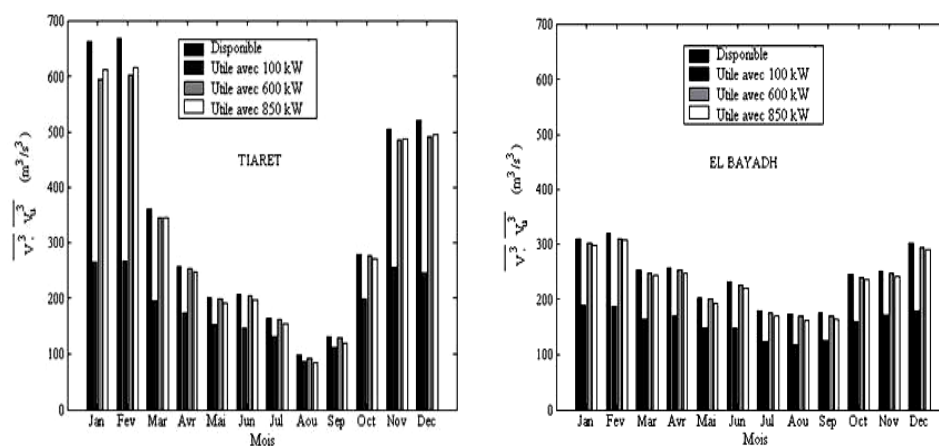


Fig. 4: Puissance disponible, utile et utilisable pour les deux sites et les trois générateurs

4.4 Quantité d'eau pompée

Les familles de courbes de la figure 5 représentent la variation de la quantité d'eau pompée en fonction la hauteur manométrique totale pour les sites de Tiaret et El Bayadh, pour les mois de janvier et juillet (mois correspondant aux limites inférieure et supérieure de la gamme de variation du potentiel éolien dans ces régions) pour les trois aérogénérateurs sus mentionnés.

Afin de mettre en évidence les effets respectifs de la période, du site et de la machine considérés, on prendra comme éléments de comparaison les productions journalières respectives pour une hauteur manométrique totale de 60 mètres (**Tableau 3**).

Tableau 3: Quantité journalière moyenne d'eau pompée ($10^3 m^3$) selon le site et la machine pour une hauteur manométrique totale de 60 mètres

Eolienne	100 kW		600 kW		850 kW	
Mois	Janvier	Juillet	Janvier	Juillet	Janvier	Juillet
El Bayadh	1.64	1.06	2.37	1.37	2.79	1.61
Tiaret	2.34	1.19	4.79	1.33	5.77	1.55

4.4.1 Effet du site

La quantité d'eau pompée étant proportionnelle à la puissance utile, on retrouve donc les mêmes rapports. Ainsi, les différences entre les productions estimées pour la période estivale sont négligeables et inférieures aux erreurs d'estimation quelque soit la machine. Par contre, durant la période hivernale, la production estimée peut passer du simple au double en considérant la même machine sur les deux sites, El Bayadh et Tiaret.

4.4.2 Effet saisonnier

Les résultats montrent que l'effet saisonnier est nettement plus prononcé pour un site à fort potentiel comme Tiaret. Ainsi, alors qu'à El Bayadh, le gain de production estimée, entre juillet et

janvier, varie de 54 % à 73 %, selon la machine, à Tiaret le rapport entre les extrêmes passe de 2 à près de 4, selon la machine.

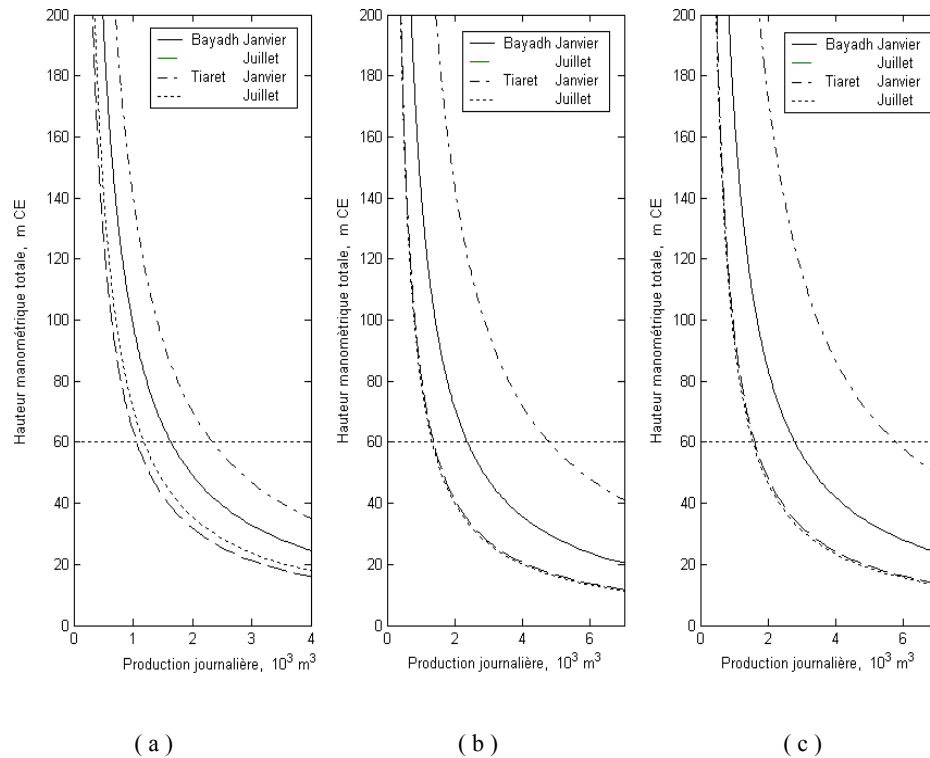


Fig. 5: Quantité d'eau pompée quotidiennement selon la saison et le site pour des éoliennes De 100 kW (a), 600 kW (b) et 850 kW (c) de puissance nominale respective

4.4.3 Effet machine

Les résultats obtenus montrent que le fait d'installer une machine 6 fois plus puissante est loin d'entraîner un gain de production du même ordre. En effet, le maximum de gain que l'on peut espérer plafonne à 2 pour Tiaret en plein hiver. Autrement, le gain est à peine perceptible en été et ceci quelque soit le site.

5. CONCLUSION

Les potentiels éoliens disponibles dans les régions de Tiaret et El Bayadh comptent parmi les plus importants des hauts plateaux. Comme, par ailleurs, ils disposent d'une faible pluviométrie compensée par des ressources en eaux souterraines non négligeables, ils constituent de bons terrains d'expérimentation de systèmes éoliens.

Les dégradations successives de l'énergie potentielle au cours des différentes transformations font que les rendements de conversion ne peuvent jamais excéder les 30 %. Les principaux facteurs de ces pertes étant la limite de Betz (invariante) et les limites machines (variables selon la technologie).

Néanmoins, comme le montrent les résultats obtenus, le choix de la machine doit être fait avec soin en fonction du régime des vents du site considéré. Il est, par ailleurs, recommandé de procéder à une campagne de mesures de quelques mois avant toute installation.

REFERENCES

- [1] B. Chergui, '*Politique Énergétique*', Sonatrach/Promos-DG, CEME'97, Biskra, 1997.
- [2] N. Kasbadji Merzouk, M. Merzouk et N. Messen, '*Mass Consistent Model Application to the Desertification Phenomenon Study in the High Plains of Algeria*', Inter. J. Renewable Energy, Vol. 28, pp. 655 – 663, 2003.
- [3] N. Kasbadji Merzouk, '*Wind Energy Potential of Algeria*', Inter. J. of Renewable, Vol. 21, pp. 553 - 562, 2000.
- [4] N. Kasbadji Merzouk, '*Perspectives d'Utilisation des Systèmes Eoliens de Pompage sur des Sites Sahariens*', SIPE4, Béchar, Septembre 1998.
- [5] N. Kasbadji Merzouk and M. Merzouk, '*Useful Wind Powers Machine Estimation, Application to Water Pumping Systems in South of Algeria*', 9th International Congress on Mechanization and Energy Agriculture, 27 International Conference on CIGR, Izmir, Turkey, Septembre 2005.
- [6] H. Daaou Nedjari, S. Haddouche et N. Kasbadji Merzouk, '*Utilisation de l'Energie Eolienne pour le Pompage de l'Eau dans les Hauts Plateaux*', JITH'2005, Tanger, Maroc, Novembre 2005.
- [7] N. Kasbadji Merzouk, '*Evaluation du Gisement Énergétique Éolien - Contribution à la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie*', Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 126 p., Mai 2006.
- [8] INRH, '*Inventaire des Forages des Wilayas en Algérie*', Internal Report of Hydraulic Institute, 200 p., 2000.
- [9] Document, '*Les Pompes*'. Ed. Electro-Hydraulique, 126 p., 1976.
- [10] N. Kasbadji Merzouk and M. Merzouk, '*Useful Power Density of a Wind Machine in Algeria*', Proceedings of International Mechanical Engineering Conf. Kuwait, Décembre 2004.
- [11] B. Garel, '*Modélisation Probabiliste et Statistique*', Cépaduès-Éditions, 2002.
- [12] M. Boumahrat et J. Gourdin, '*Méthodes Numériques Appliquées*', O.P.U. (Office des Publications Universitaires), Alger, 1983.
- [13] R. Hammouche, '*Atlas Vent de l'Algérie*', Publication Interne de l'O.N.M. (Office National de la Météorologie), Alger, 1990.
- [14] S.S. Mikhail and C.G. Justus, '*Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis*', Journal of Wind Engineering, Vol. 5, N°2, 1981.
- [15] N. Kasbadji Merzouk, M. Merzouk, N. Messen et B. Benyoucef, '*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.

NB: Cette étude a été réalisée grâce au financement d'un Projet National de Recherche, domicilié au CDER.