

## Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens

R. Maouedj<sup>1</sup>, S. Bousalem<sup>2</sup> et B. Benyoucef<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, 'URER-MS'  
B.P. 478, Route de Reggane, Adrar, Algérie

<sup>2</sup> Unité de Recherche des Matériaux et Energies Renouvelables, 'URMER'  
Université Abou Bakr Belkaid, B.P. 119, 13000 Tlemcen, Algérie

(reçu le 03 Novembre 2007 – accepté le 30 Juin 2008)

**Résumé** - L'estimation des ressources en énergie éolienne présente une difficulté majeure. Contrairement aux réserves en combustible fossile, la quantité d'énergie disponible varie avec la saison et l'heure du jour. L'énergie éolienne est davantage influencée par la topographie que l'énergie solaire. De plus, la quantité totale d'énergie éolienne convertible sur le territoire d'une nation, dépend de façon significative des caractéristiques, du rendement espéré, du dimensionnement et de la répartition horizontale des éoliennes. Nous avons présenté dans ce travail, dans une première partie une modélisation et une simulation d'un système de conversion éolienne et donc une estimation du potentiel énergétique éolienne (puissances disponible, récupérable et utile) sur des sites Algériens (régions sahariens: Tindouf, In Salah et In Amenas) et dans une deuxième partie une présentation d'un système de pompage éolien par des aérogénérateurs des caractéristiques différentes (Puissance nominale  $P_N$ , vitesse de démarrage  $V_D$ , vitesse nominale  $V_N$  et la vitesse d'arrêt de la machine  $V_M$ ).

**Abstract** - The estimate of the wind power resources presents a major difficulty. Contrary to the fossil fuel reserves, the quantity of energy available varies with the season and the hour of the day. The wind power of advantage is influenced by topography that solar energy. Moreover, the total quantity of convertible wind power on the territory of a nation depends to a significant degree of the characteristics, the dimensioning and the horizontal distribution of the wind. We presented in this work, a first part a modelling and a simulation of a wind conversion system and thus an estimate of the wind energy potential (powers available, recovered and useful) on Algerian sites (areas Saharan: Tindouf, In Salah and In Amenas) and in a second part a presentation of a wind pumping system by aerogenerators of the different characteristics (Rated power  $P_N$ , cut-in wind speed  $V_D$ , rated wind speed  $V_N$  and cut-out wind speed  $V_M$ ).

**Mots clés:** Paramètres de Weibull - Vitesse moyenne du vent – Puissance disponible - Puissance récupérée - Puissance utile.

### 1. INTRODUCTION

L'énergie éolienne a connu une très forte croissance au cours de la dernière décennie, grâce aux avantages qu'elle présente pour l'environnement, aux percées technologiques connexes et aux programmes d'encouragement gouvernementaux dans le monde.

### 2. DONNEES GEOGRAPHIQUES ET METEOROLOGIQUES DES SITES ETUDIES

**Tableau 1:** Données météorologiques caractéristiques des sites étudiés [2]

Sites	Tindouf	In Salah	In Amenas
Longitude (°)	8.06 W	2.28 E	9.38 E
Latitude (°)	27.40 N	27.12 N	28.03 N
Altitude (m)	401	268	561
Situation topographique	Désert	Désert	Désert

Rugosité (m)	0.00	0.02	0.00
--------------	------	------	------

Les figures 2 et 3 représentent la distribution moyenne mensuelle de la vitesse du vent et la vitesse cubique moyenne respectivement sur les sites de Tindouf, In Salah et In Amenas à une hauteur de 10 m du sol. On remarque, sur ces figures, que les sites d'In Salah et In Amenas présentent une évolution du vent pratiquement uniforme durant toute l'année (pas de fluctuation et facile à dimensionner). Par contre, la région de Tindouf est caractérisée par des variations mensuelles énormes.



Fig. 1: Carte géographique de l'Algérie (Situation géographique des sites étudiés) [3]

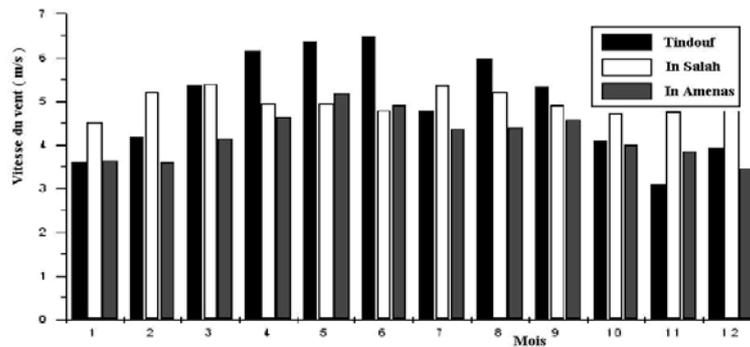


Fig. 2: Variation mensuelle de la vitesse moyenne du vent pour les sites étudiés

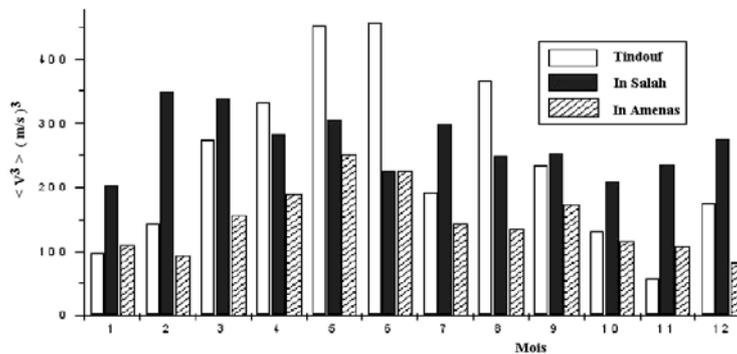


Fig. 3: Variation mensuelle de la vitesse cubique moyenne du vent pour les trois sites

### 3. CARACTERISTIQUES DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

#### 3.1 La fonction de distribution de Weibull

La fonction de répartition  $F(V)$  est la probabilité que la vitesse du vent est inférieure à une certaine valeur  $V$  et que la densité de probabilité  $f(V)$  est la dérivée de  $F(V)$ , [4, 5]:

$$f(V) = \frac{dF(V)}{dV} \quad (1)$$

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques [6,7], on a choisi de:

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \cdot \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \quad (2)$$

$k$  est le facteur de forme, sans dimension. Il caractérise la répartition du vent.  $C$  est le facteur d'échelle, (m/s), qui caractérise la vitesse du vent. La vitesse moyenne du vent s'écrit sous la forme suivante (distribution de Weibull):

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} f(V) \cdot dV = C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3)$$

Où la fonction Gamma  $\Gamma$  est définie par la relation suivante:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) \cdot t^{x-1} \cdot dt \quad \text{avec } x > 0 \quad (4)$$

La vitesse cubique moyenne du vent est donnée par l'expression suivante:

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 \cdot P(V) \cdot dV = C^3 \cdot \Gamma\left(1 - \frac{3}{k}\right) \quad (5)$$

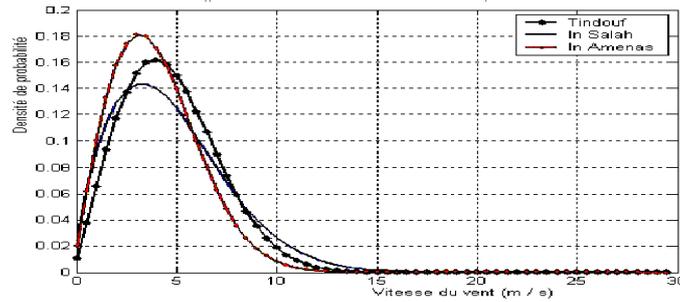


Fig. 4: Fonction de densité de probabilité de Weibull pour les trois sites

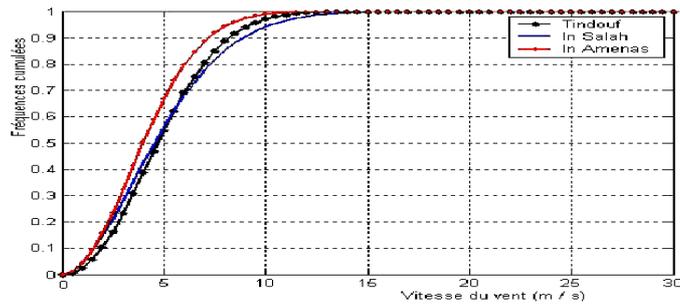


Fig. 5: Fonction de distribution cumulative de Weibull pour les trois sites

### 3.2 Caractéristique vitesse -altitude

La vitesse du vent augmente avec l'altitude. Cette dépendance s'exprime par la loi empirique de Davenport et Harris [8, 9], et qui est représentée sur la figure suivante:

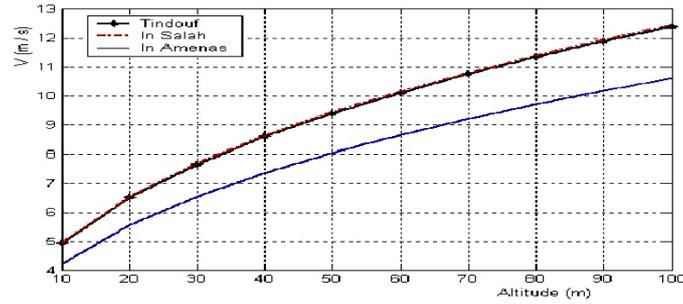


Fig. 6: Variation de la vitesse moyenne annuelle du vent en fonction de l'altitude

La figure 6 montre clairement l'augmentation de la vitesse moyenne du vent avec l'augmentation de l'altitude (pas d'obstacles face au vent).

## 4. PUISSANCE MOYENNE ANNUELLE FOURNIE PAR UN AEROGENERATEUR

### 4.1 Potentiel éolien disponible

L'énergie cinétique d'une masse d'air  $m$  qui se déplace avec la vitesse  $v$ , est [11, 13]:

$$E_C = \frac{1}{2} m v^2 \quad (6)$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface  $A$  ( $A = \pi R^2$ ), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance éolienne instantanée serait alors [14]:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (7)$$

Le potentiel éolien moyen disponible sur un site est donnée par:

$$\langle P_{\text{disp}} \rangle = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \langle V^3 \rangle \quad (8)$$

### 4.2 Puissance moyenne récupérable

En réalité, le dispositif de conversion (turbine éolienne) extrait une puissance  $P_{\text{réc}}$  inférieure à la puissance disponible  $P_{\text{disp}}$ , [13, 14].

$$P_{\text{réc}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (9)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$ , caractérise l'aptitude de conversion de l'énergie éolienne, et il est défini par l'expression suivante:

$$C_p = P / P_e ; \quad C_p < 1 \quad (10)$$

L'évaluation suivante de ce coefficient est basée sur la théorie Rankine – Froude de l'hélice éolienne dans un fluide incompressible.

La fonction  $C_p(a)$  a un maximum pour  $a = 1/3$  (0.59 limite de Betz). Il en résulte que:

$$C_{p_{\max}} = C_p \left( \frac{1}{3} \right) = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (11)$$

Enfin la densité d'énergie moyenne annuelle récupérable, exprimée en kWh/m<sup>2</sup>,  $\langle E \rangle$  est égale à:

$$\langle E \rangle = 3.25 \times \langle V^3 \rangle \quad (12)$$

La puissance utile est donnée par:

$$\langle P_u \rangle = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \langle V_u^3 \rangle \quad (13)$$

#### 4.3 Puissance utile

La densité de puissance est donnée par [15] (Fig. 7)

$$P_u = \begin{cases} 0 & \text{pour } V_D \geq V \\ a + b \cdot v^k & \text{pour } V_D < V \leq V_N \\ P_N & \text{pour } V_N \leq V \leq V_M \\ 0 & \text{pour } V_M \leq V \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{avec: } a = \frac{P_N \times v_D^k}{v_D^k - v_N^k} \quad \text{et} \quad b = \frac{P_N}{v_N^k - v_D^k}$$

où  $V_D$  est la vitesse de démarrage,  $V_N$  la vitesse nominale,  $V_M$  la vitesse d'arrêt de la machine (dite aussi hors-service) et  $P_N$  la puissance nominale.

On obtient après intégration de la relation (14):

$$P = \int_0^{\infty} P_u \times f(v) \cdot dv \quad (15)$$

$$P = \int_{V_D}^{V_N} (a + b \cdot v^k) \times f(v) \cdot dv + P_N \cdot \int_{V_N}^{V_M} f(v) \cdot dv \quad (16)$$

$$P = P_N \cdot (FC) \quad (17)$$

Où FC est le facteur de forme donné par l'expression suivante:

$$FC = \left( \frac{\exp\left[-\left(\frac{v_D}{C}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_N}{C}\right)^k\right]}{\left(\frac{v_N}{C}\right)^k - \left(\frac{v_D}{C}\right)^k} - \exp\left[-\left(\frac{v_M}{C}\right)^k\right] \right) \quad (18)$$

## 5. REGULATION MECANIQUE DE LA VITESSE DE L'EOLIENNE

D'après l'équation (8), on peut voir que la puissance produite est indéfiniment croissante en fonction de la vitesse du vent, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Les dispositifs de sécurité de la machine éolienne font en sorte à avoir l'expression de la puissance répartie sur différentes gammes de vitesses du vent (Fig. 7).

Les vitesses  $V_N$ ,  $V_D$  et  $V_M$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent [16]:

- **la zone '1'**, où  $P = 0$  (la turbine ne fonctionne pas),

- la zone '2', dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $v$ ,
- la zone '3', où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_N$ ,
- la zone '4', dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

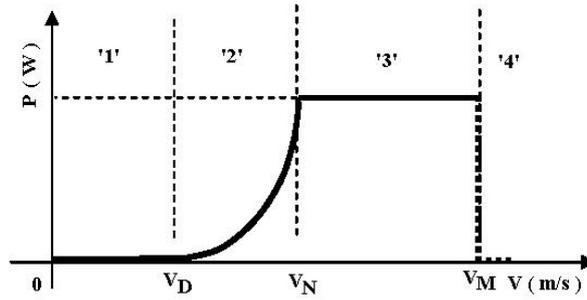
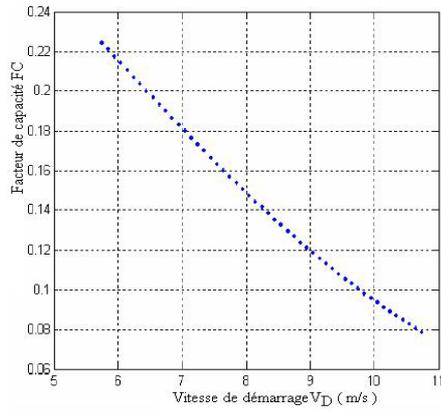
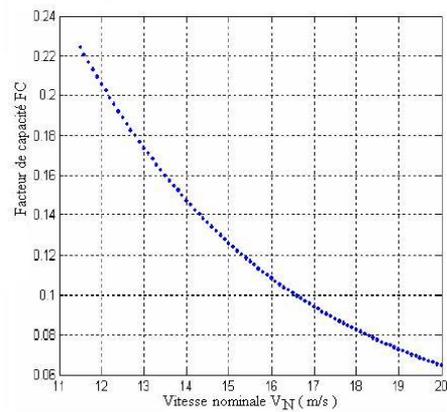
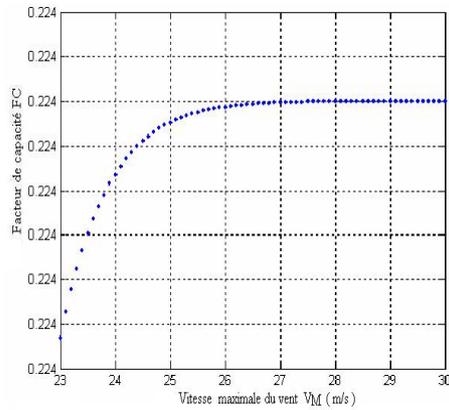


Fig. 7: Réponse en puissance d'un aérogénérateur à l'état stationnaire

Fig. 8: Effets de la vitesse de démarrage  $V_D$  sur le facteur de capacité FCFig. 9: Effets de la vitesse nominale  $V_N$  sur le facteur de capacité FCFig. 10: Effets de la vitesse maximale du vent  $V_M$  sur le facteur de capacité FC

Les figures 11 à 13 représentent la puissance énergétique éolienne disponible et récupérable sur les trois sites (Tindouf, In Salah et In Amenas).

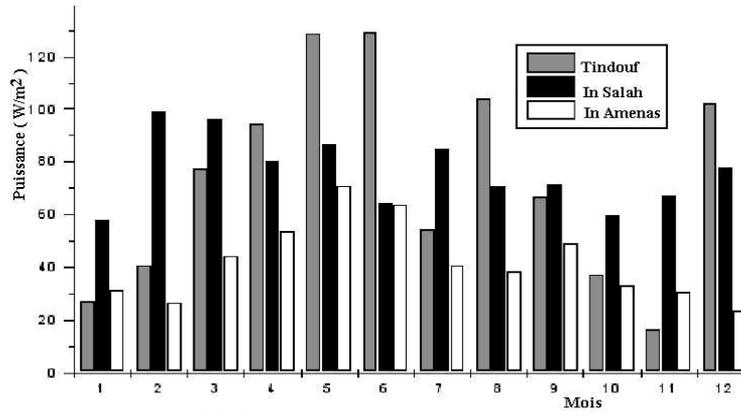


Fig. 11: Puissance disponible sur les trois sites

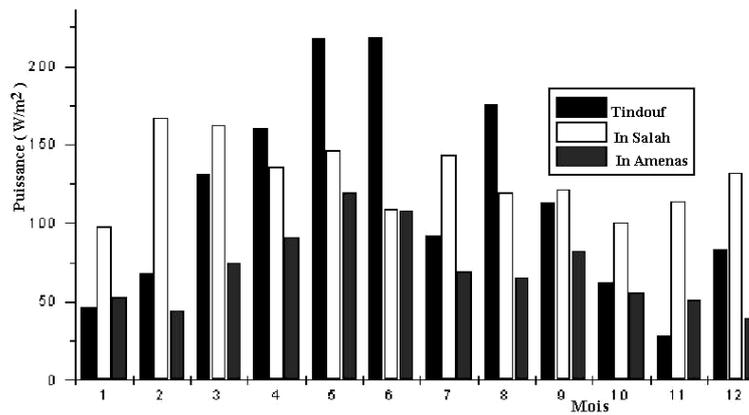


Fig. 12: Puissance récupérable sur les trois sites

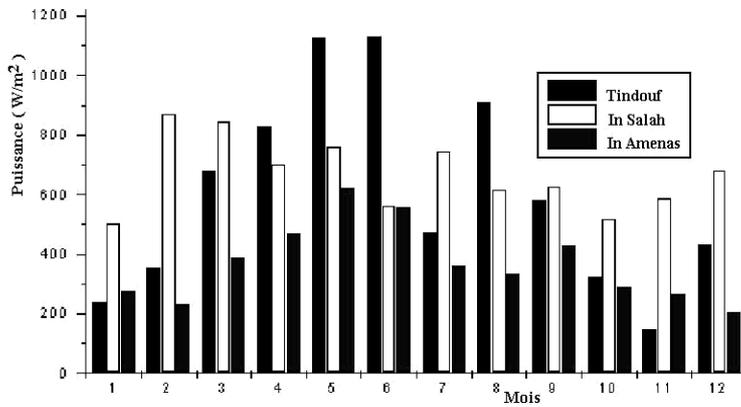


Fig. 13: Densité de puissance sur les trois sites

Compte tenu de la potentialité des sites et des caractéristiques de la machine, la puissance utile sur les trois sites est représentée sur la figure 14.

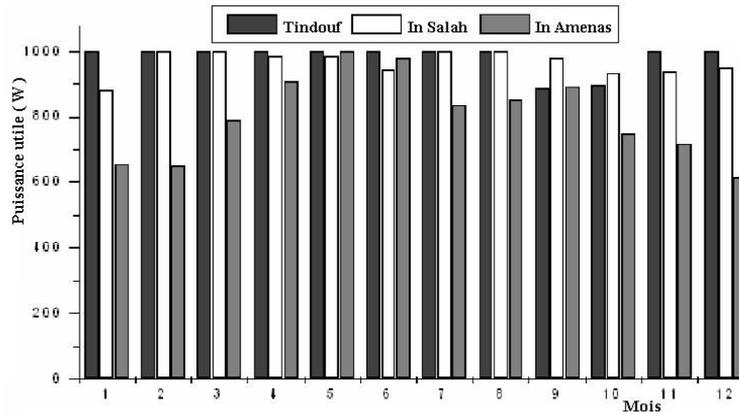


Fig. 14: Puissance utile sur les trois sites pour un aérogénérateur  
 $P_N = 1 \text{ kW}$ ,  $V_D = 1 \text{ m/s}$ ,  $V_N = 5 \text{ m/s}$  et  $V_M = 11 \text{ m/s}$

## 6. APPLICATION

### Pompage de l'eau à l'aide d'un aérogénérateur

Dans les systèmes de pompage de l'eau par aérogénérateur, ce dernier est directement connecté à la pompe (sans convertisseur de puissance). La pompe utilisée est en général une pompe centrifuge à moteur asynchrone, qui fonctionne à puissance et vitesse de rotation variables. Ces conditions de fonctionnement font que le rendement du système global varie avec la vitesse du vent et la taille de la pompe.

Après avoir calculé la puissance, le débit est donné par la formule suivante [17-19]:

$$Q = \frac{\eta \cdot P_{\text{élec}}}{\rho \cdot g \cdot H} \quad (19)$$

$H$  est la hauteur manométrique totale,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $\rho$  la masse volumique de l'eau,  $\eta$  rendement global du système, et  $P_{\text{élec}}$  la puissance utile fournie par l'aérogénérateur.

Les figures 15 à 18 représentent le débit journalier que peut fournir le système de pompage par aérogénérateur de 1 kW, 2 kW et 3 kW au niveau des régions de Tindouf, In Salah et In Amenas et pour différentes hauteurs manométriques totales (de 20 m à 100 m).

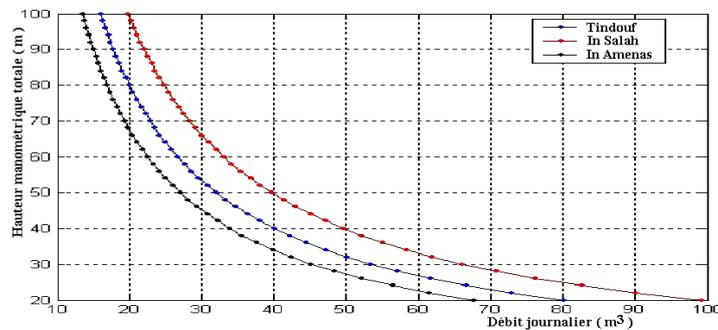


Fig. 15: Débit d'eau journalier pompé pour les trois sites en fonction de la hauteur manométrique totale par un aérogénérateur :  $P_N = 1 \text{ kW}$ ,  $V_D = 1 \text{ m/s}$ ,  $V_N = 5 \text{ m/s}$  et  $V_M = 11 \text{ m/s}$

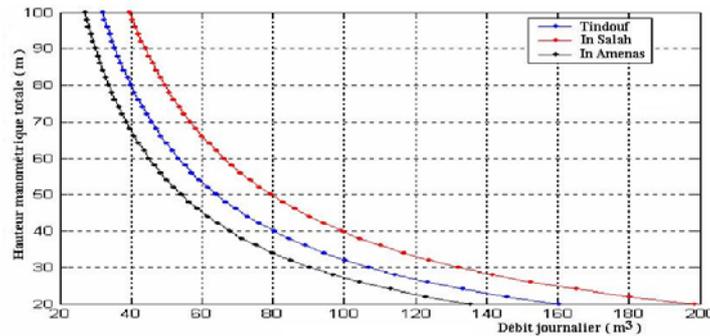


Fig. 16: Débit d'eau journalier pompé pour les trois sites en fonction de la hauteur manométrique totale par un aérogénérateur :  $P_N = 2$  kW,  $V_D = 1$  m/s,  $V_N = 5$  m/s et  $V_M = 11$  m/s

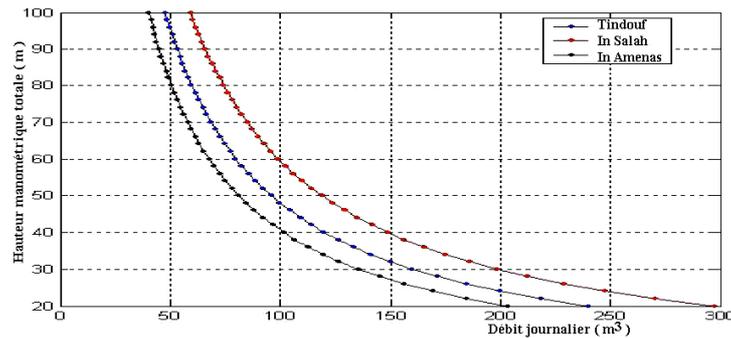


Fig. 17: Débit d'eau journalier pompé pour les trois sites en fonction de la hauteur manométrique totale par un aérogénérateur :  $P_N = 3$  kW,  $V_D = 1$  m/s,  $V_N = 5$  m/s et  $V_M = 11$  m/s

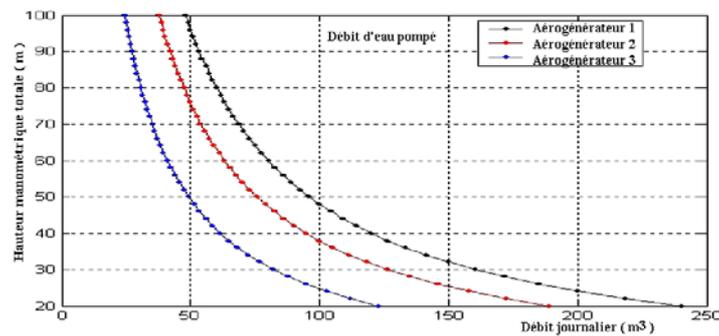


Fig. 18: Comparaisons du débit d'eau journalier pompé en fonction de la hauteur manométrique totale pour trois aérogénérateurs suivants  
 Aérogénérateur 1:  $P_N = 3$  kW,  $V_D = 1$  m/s,  $V_N = 5$  m/s et  $V_M = 11$  m/s  
 Aérogénérateur 2:  $P_N = 3$  kW,  $V_D = 2$  m/s,  $V_N = 6$  m/s et  $V_M = 12$  m/s  
 Aérogénérateur 3:  $P_N = 3$  kW,  $V_D = 3$  m/s,  $V_N = 7$  m/s et  $V_M = 13$  m/s

Pour un aérogénérateur de 1 kW installé sur un mât de 10 m de hauteur, le débit moyen que l'on peut obtenir est de l'ordre de  $46$  m<sup>3</sup>/jour à Tindouf,  $53$  m<sup>3</sup>/jour à In Salah et  $66$  m<sup>3</sup>/jour à In

Amenas dans le cas d'un forage de 30 m de profondeur et un débit moyen de 22 m<sup>3</sup>/jour à Tindouf, 28 m<sup>3</sup>/jour à In Salah et 40 m<sup>3</sup>/jour à In Amenas dans le cas d'un forage de 60 m de profondeur. Ce type d'aérogénérateur est recommandé pour des puits de faibles profondeurs où les besoins en eau sont faibles.

Pour un aérogénérateur de 2 kW installé sur un mât de 10 m de hauteur, le débit moyen que l'on peut obtenir est de l'ordre de 85 m<sup>3</sup>/jour à Tindouf, 103 m<sup>3</sup>/jour à In Salah et 126 m<sup>3</sup>/jour à In Amenas dans le cas d'un forage de 30 m de profondeur et un débit moyen de 45 m<sup>3</sup>/jour à Tindouf, 53 m<sup>3</sup>/jour à In Salah et 67 m<sup>3</sup>/jour à In Amenas dans le cas d'un forage de 30 m de profondeur. Et ce type d'aérogénérateur est recommandé à des puits de moyens profondeurs où les besoins en eau sont peu élevés.

Pour un aérogénérateur de 3 kW installé sur un mât de 10 m de hauteur, le débit moyen que l'on peut obtenir est de l'ordre de 135 m<sup>3</sup>/jour à Tindouf, 160 m<sup>3</sup>/jour à In Salah et 198 m<sup>3</sup>/jour à In Amenas dans le cas d'un forage de 30 m de profondeur et un débit moyen de 70 m<sup>3</sup>/jour à Tindouf, 80 m<sup>3</sup>/jour à In Salah et 100 m<sup>3</sup>/jour à In Amenas dans le cas d'un forage de 30 m de profondeur, et ce type d'aérogénérateur est recommandé pour des puits de grande profondeurs où les besoins en eau sont élevés.

On remarque, d'après les figures 14 et 18, que les caractéristiques de l'aérogénérateur ( $P_N$ ,  $V_N$ ,  $V_D$  et  $V_M$ ) ont une influence très importante sur la puissance utile délivrée par l'aérogénérateur et donc sur la quantité journalière d'eau pompée par le système.

## 7. CONCLUSION

Nous avons présenté, dans une première partie, une estimation du potentiel énergétique éolien sur les sites de Tindouf, In Salah et In Amenas et dans une seconde partie, un système de pompage éolien composé à partir d'aérogénérateurs de différentes puissances (1 kW, 2 kW et 3 kW).

L'examen des courbes nous a permis d'établir un rapport entre le débit d'eau pompé et la hauteur manométrique d'une part et la puissance nominale (caractéristique de l'aérogénérateur) d'une autre part:

- lorsqu'on pompe à des faibles profondeurs, les débits moyens sont plus importants que ceux obtenus à des grandes profondeurs;

- pour les mêmes hauteurs manométriques (30 m et 60 m par exemple), les débits que nous avons obtenus s'avèrent plus importants lorsqu'on pompe avec un aérogénérateur de puissance nominale plus élevé.

Nous pouvons donc conclure que l'aérogénérateur type de 1 kW peut être installé sur des puits de petites profondeurs et dans le cas où les besoins en eau sont faibles, et pour des puits plus profonds, l'installation d'un aérogénérateur de puissance nominale plus importante s'avère plus rentable.

La production d'énergie grâce aux éoliennes ne rejette ni gaz à effet de serre, ni polluants atmosphériques. En luttant contre le changement climatique, l'éolien participe donc au maintien à long terme de la biodiversité des milieux naturels. Le caractère réversible et recyclable de ces installations répond bien aux principes d'un développement durable.

## NOMENCLATURE

$f(V)$	Fonction de distribution de Weibull	$P_{disp}$	Potentiel éolien moyen disponible, W/m <sup>2</sup>
C	Facteur d'échelle	$P_{rec}$	Puissance moyenne récupérable, W/m <sup>2</sup>
k	Facteur de forme	$\langle E \rangle$	Densité d'énergie moyenne annuelle récupérable

$\Gamma$	Fonction Gamma	$P_u$	Puissance utile, W
$\langle V \rangle$	Vitesse moyenne du vent, m/s	$V_N$	Vitesse nominale, m/s
$\langle V^3 \rangle$	Vitesse cubique moyenne du vent, (m/s) <sup>3</sup>	$V_D$	Vitesse de démarrage, m/s
$\sigma^2$	Variance	$V_M$	Vitesse d'arrêt de la machine, m/s
$C_p$	Coefficient de puissance	H	Hauteur manométrique totale, m
$v$	Vitesse axiale d'écoulement en amont et en aval de l'hélice	$P_N$	Puissance nominale
$v_0$	Vitesse d'écoulement sur la surface de l'hélice, m/s	g	Accélérateur de la pesanteur, m/s <sup>2</sup>
A	Surface balayée par une hélice, m <sup>2</sup>	$\eta$	Rendement global du système
$E_c$	Energie cinétique d'une masse d'air, W	$\rho$	Masse volumique de l'eau, kg/m <sup>3</sup>
$P_{elec}$	Puissance utile fournie par l'aérogénérateur, W		

## REFERENCES

- [1] R. Hamouche, 'Atlas Vent de l'Algérie', Office National de la Météorologie, ONM, Dar-El-Beïda, Alger, 1990.
- [2] N. Kasbadji Merzouk, 'Wind Energy Potential of Algeria', Renewable Energy, Vol. 21, pp. 553 -562, 2000.
- [3] Document, 'Encarta, Carte de l'Afrique', 2006.
- [4] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, 'Wind Energy Handbook', England, pp. 14 – 15, 2001.
- [5] A.V. Machias and G.D. Skikos, 'Fuzzy Risk Index for Wind Sites', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, N°4, pp. 638 – 643, 1992.
- [6] B.S. Borowy and Z.M. Salameh, 'Optimum Photovoltaic Array Size for a Hybrid Wind – PV System', IEEE Trans Energy Conversion, Vol. 9, N°3, pp. 482 – 488, 1994.
- [7] M. Sathyajith, 'Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics', Faculty of Engineering, KCAET, Tavanur, Malapuram, Kerala, India, pp. 68 - 72.
- [8] F. Jurado and J.R. Saenz, 'Possibilities for Biomass - Based Power Plant and Wind System Integration', Energy, Vol. 27; pp. 955 – 966, 2002.
- [9] S.S. Mikhail and G.G. Justus, 'Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis', Journal of Wind Engineering, Vol. 5, N°2, 1981.
- [10] C.G. Justus, 'Vent et Performances des Eoliennes', Traduit et adapté par J. L. Plazy, Edition S.C.M, Paris, 1982.
- [11] F.D. Fernando, H. De Battista and R.J. Mantz, 'Wind Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling Design', Germany.
- [12] R. Maouedj, S. Bousalem et B. Benyoucef, 'Etude des Performances d'un Système Eolien pour le Site d'Adrar', 7<sup>ème</sup> Congrès National de la Physique et ses Applications, CNPA'2006, Béchar, Algérie, Décembre 2006.
- [13] E.H. Lysen, 'Introduction to Wind Energy', Edition C.W.D, Amersfoort, Netherlands, 1983.
- [14] M.M. Pandey and P. Chandra, 'Determination of Optimum Rated Speeds of Wind Machines for Particular Site', Solar and Wind Technology, Central Institute of Agricultural Engineering, Bhopal, India, Vol. 3, N°2, pp. 135 – 140, 1986.
- [15] W.R. Powell, 'An Analytical Expression for the Average Output Power of a Wind Machine', Solar Energy, Vol. 26, N°1, pp. 77 – 80, 1981.

- [16] K.A. Abed, '*Performance of a Wind Turbine Driven Compressor for Lifting Water*', Energy PII: S0360-5442 (96) 33389-8.
- [17] S. Mathew, K.P. Pandey and J.D. Burton, '*The Wind-Driven Regenerative Water Pump*', Wind Engineering, Vol. 26, N°5, pp. 301 – 313, 2002.
- [18] S. Mathew, K.P. Pandey and A.V. Kumar, '*Analysis of Wind Regimes for Energy Estimation*', Renewable Energy, Vol. 25, N°3, pp. 381 – 399, 2002.
- [19] R. Pallabazzer, '*Evaluation of Wind – Generator Potentiality*', Solar Energy, Vol. 55, N°1, pp. 49 – 59, 1995.