

CARACTERISATION DE LA VITESSE DU VENT EN FONCTION DE L'ALTITUDE : INFLUENCE SUR LA RENTABILITE DU PARC EOLIEN DE SIDI DAOUD – TUNISIE

F. Ben Amar^{a, b, *}, M. Elamouri^a, R. Dhifaoui^b

^a *Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie*

^b *Network and Machines Electric Research Unit, INSAT, Tunisia*

Fathi.Benamar@ipeis.rnu.tn

RESUME

Cette communication présente une étude des caractéristiques de la vitesse du vent en fonction de la hauteur et leur effet sur la rentabilité énergétique des aérogénérateurs de la centrale éolienne de Sidi Daoud, Tunisie. Une étude d'extrapolation verticale à l'aide de la loi de puissance a permis de connaître l'évolution de la vitesse du vent à des altitudes représentant un intérêt énergétique.

1. INTRODUCTION

Dans un monde de plus en plus conscient de l'état dégradant de son environnement et avec la flambée des prix du pétrole, la Tunisie s'est orientée entre autre vers le développement des ressources d'énergies renouvelables notamment l'énergie éolienne. En effet, les études de l'ANER montrent que le gisement éolien en Tunisie est estimé à plus de 1GW [5].

Le premier projet d'implantation d'une centrale électrique éolienne a été réalisé à Sidi Daoud. Cette centrale comporte 70 aérogénérateurs, soit une puissance totale de 53,5 MW [3].

Dans cet article, on s'intéresse à l'étude du régime du vent en fonction de l'altitude dans un endroit de mesure Mât 2 et la caractérisation des différents aérogénérateurs installés en site (MADE AE-45, AE-52 et AE-61) dont le but d'évaluer leur efficacité énergétique et leur facteur d'utilisation en fonction de la hauteur.

2. EVALUATION DU POTENTIEL EOLIEN

Le site de Sidi Daoud est situé à l'extrémité de la pointe du Cap-Bon, près d'El Haouaria au Nord-Est du pays (figure 1). C'est un site suffisamment venté et présente des infrastructures appropriées du point de vue accès et raccordement au réseau électrique [1].



Figure 1 : Centrale éolienne et relief de Sidi Daoud.

Les résultats de l'analyse statistique par les lois de Weibull et de Rayleigh, moyennant des mesures prises à deux hauteurs (45m et 60m) durant l'année 2004, montrent que (tableau 1) :

Tableau 1. Caractéristiques du vent calculées à chaque hauteur.

Hauteur	45 m			60 m		
	M	W	R	M	W	R
V_f (m/s)	4.5	4.9	4.5	5.5	5.3	5.5
V_m (m/s)	5.98	6.2	5.98	6.6	6.7	6.6
V_e (m/s)	11.5	10	9.5	12.5	10.7	10.5
E (kWh/m ²)	1396.8	1465.3	1301.6	1784.1	1840.37	1726.3
A (m/s)		6.98663			7.56561	
k		1.96964			1.98973	

M : Méthode énéorologique ;
W : Méthode de Weibull ;
R : Méthode de Rayleigh.

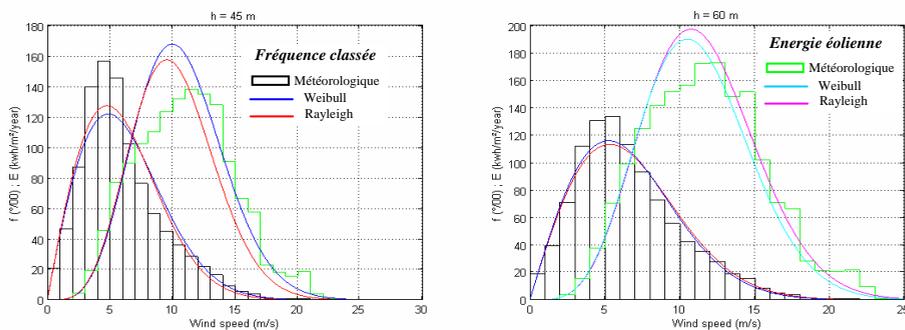


Figure 2 : Distributions annuelles des fréquences classées et de l'énergie disponible du vent.

- le passage de la hauteur 45m à 60m permet une augmentation des vitesses caractéristiques du vent de 10%.
- le facteur de forme k est le même pour les deux hauteurs, alors que le facteur d'échelle A , qui détermine la qualité du vent, est variable.
- les distributions des fréquences classées calculées par les deux lois

Weibull et Rayleigh sont équivalentes ; ce qui nous semble normale car le facteur k du site étudié est presque égal à 2 (figure 2). C'est pourquoi nous avons choisi, dans la suite de notre étude, la distribution de Rayleigh.

3. EXTRAPOLATION VERTICALE DU REGIME DU VENT

Les résultats obtenus nous ont permis d'adopter la loi de puissance [4] pour modéliser le profil vertical du vent. L'extrapolation de la vitesse V_0 mesurée à un niveau h_0 vers un niveau h , s'écrit :

$$V(h) = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

α est le coefficient de cisaillement. Sa valeur, calculée à la base de la vitesse moyenne, est de l'ordre 0.343.

L'étude de l'influence de la hauteur sur le potentiel éolien du site nécessite d'exprimer la distribution de Rayleigh sous la forme :

$$f(V, h) = \begin{cases} 2 \cdot B(h) \cdot V \cdot \exp[-B(h) \cdot V^2] & \text{pour } V \geq 0 \\ 0 & \text{pour } V < 0 \end{cases} \quad \text{avec } B(h) = \frac{\pi}{4 [V_m(h)]^2} \quad (2)$$

où V_m désigne la vitesse moyenne du vent et h désigne la hauteur.

La fonction de distribution cumulative associée est donc :

$$F(V, h) = \int_V^{+\infty} f(V, h) dV = \exp[-B(h) \cdot V^2] \quad (3)$$

De même, l'expression de la densité de puissance devient :

$$P_d(h) = P_{d0} \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^{3\alpha} \quad \text{avec } P_{d0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{16}{27} \cdot \rho \cdot \frac{\Gamma(2.5)}{[\Gamma(1.5)]^3} \cdot V_{m0}^3 \quad (4)$$

P_{d0} est la densité de puissance à la hauteur h_0 , Γ est la fonction Gamma.

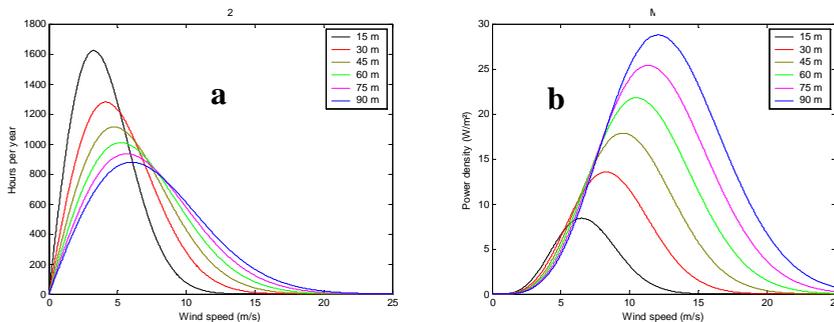


Figure 3 : Fréquences d'occurrence (a) et densité de puissance (b) pour différentes hauteurs.

La figure 3a représente en heure/an la distribution des fréquences d'occurrence et cumulées à différentes hauteurs. On note que le passage du

niveau 15m au niveau 90m permet de multiplier la vitesse fréquente et la vitesse énergétique par un facteur de 1.8 ; ce qui explique l'élargissement du domaine de la distribution. De même, l'accroissement de la distribution de la densité de puissance avec la hauteur est notable (figure 3b).

4. ETUDE DES AEROGENERATEURS INSTALLES

Dans cette partie, nous nous intéressons aux trois types d'aérogénérateurs à axe horizontal, installés dans le parc éolien de Sidi Daoud (tableau 2).

Tableau 2. Données techniques des aérogénérateurs.

Aérogénérateurs MADE	Type de régulation	Puissance nominale (kW)	Diamètre du rotor (m)	Vitesses (m/s)		
				démarrage V_d	nominale V_n	coupure V_c
AE-46	Stall	660	46	3	15	25
AE-52	Pitch	800	52	3	12	"
AE-61	Stall	1320	61	3	17	"

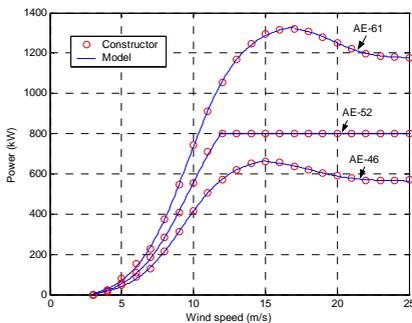


Figure 4 : Courbes de puissance.

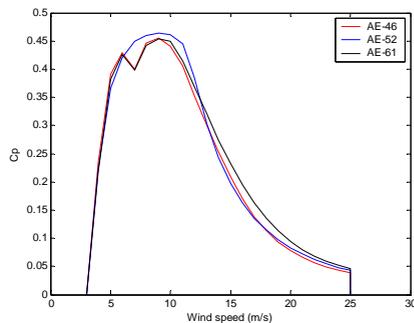


Figure 5 : Courbes $C_p=f(V)$.

La figure 4 illustre la variation de la puissance électrique de chaque machine en fonction de la vitesse du vent. Le rendement aérodynamique du rotor éolien défini par son coefficient de puissance C_p s'écrit :

$$C_p = \frac{P_s(V)}{0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot \eta_m \cdot \eta_g} \quad (5)$$

où η_m et η_g représentent respectivement le rendement du multiplicateur et le rendement de la génératrice.

Pour les trois machines, ce coefficient atteint son maximum à la vitesse du vent de 9m/s (figure 5).

4.1. Rendement, facteur d'utilisation et taux de disponibilité

Connaissant le régime du vent, le rendement de chaque machine en fonction de la vitesse du vent s'écrit :

$$\eta(V) = \begin{cases} \frac{P_s(V)}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3} & \text{pour } V_d \leq V \leq V_n \\ \frac{P_s(V)}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_n^3} & \text{pour } V_n \leq V \leq V_c \end{cases} \quad (6)$$

où s est la surface balayée par le rotor et $P_s(V)$ est la puissance électrique à la sortie de l'aérogénérateur.

Les maximums du rendement des trois machines (figure 6) sont obtenus pour la même vitesse optimale du vent ($V_{opt} = 9\text{m/s}$).

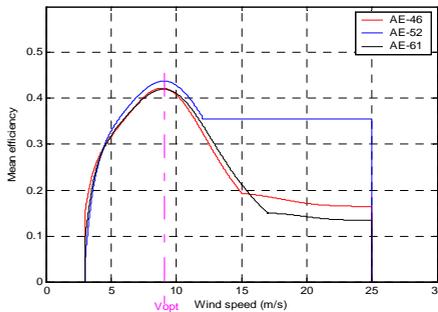


Figure 6 : Courbes du rendement $\eta=f(V)$.

Tableau 3. Caractéristiques des aérogénérateurs.

Aéro-générateur	C_{pmax} (%)	η_{max} (%)	V_n (m/s)	η_{gl} (%)	UF (%)
• AE-46	45.5	42.3	15	34.8	21.4
• AE-52	46.5	43.8	12	39.2	25.5
• AE-61	45.4	42.0	17	32.9	24.2

η : Rendement,
 UF : Facteur d'utilisation,
 AF : Taux de disponibilité

Le rendement global de chaque aérogénérateur est déterminé par [1, 2]:

$$\eta_{gl} = \frac{\sum_{i=d}^c [V_i \cdot \exp(-B \cdot V_i^2) \cdot P_s(V_i)]}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \left(\sum_{i=d}^n [V_i^4 \cdot \exp(-B \cdot V_i^2)] + V_n^3 \cdot \sum_{i=n}^c [V_i \cdot \exp(-B \cdot V_i^2)] \right)} \quad (7)$$

Les valeurs de ce rendement (tableau 3) montrent que l'énergie récupérable par les trois machines est importante et vaut le 1/3 de l'énergie disponible dans le site. Pour quantifier l'énergie électrique produite par une éolienne, il faut déterminer son facteur d'utilisation annuel [1], estimé par :

$$UF = \frac{2 \cdot B \cdot \sum_{i=d}^c [V_i \cdot P_s(V_i) \cdot \exp(-B \cdot V_i^2)]}{P_n} \quad (8)$$

D'après la relation (8), on constate que ce facteur UF ne dépend que de la vitesse moyenne du vent au site (à la hauteur de la nacelle) pour un aérogénérateur donné.

Les résultats obtenus (tableau 3) montrent que l'AE-52 présente des performances énergétiques supérieures à celles des autres machines.

4.2. Rentabilité énergétique des aérogénérateurs avec la hauteur

Connaissant le régime du vent, il est intéressant d'étudier la rentabilité de

ces machines en fonction de la hauteur. La figure 7 décrit l'évolution du rendement global, du facteur d'utilisation et du taux de disponibilité en fonction de la hauteur. On remarque que pour les hauteurs réalistes ($> 45\text{m}$), le facteur d'utilisation UF croît.

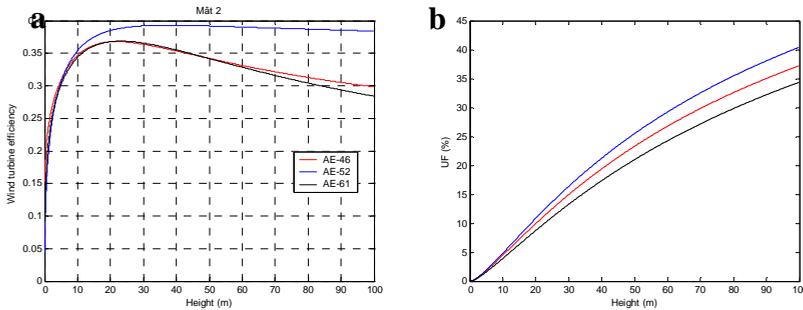


Figure 7: Rendement énergétique (a) et facteur d'utilisation (b) en fonction de la hauteur.

5. CONCLUSION

Dans cet article, on s'est intéressé à l'étude du régime du vent en fonction de l'altitude et les caractéristiques énergétiques des aérogénérateurs de la centrale éolienne de Sidi Daoud. L'estimation de la ressource du vent est évaluée en utilisant les distributions de Weibull et de Rayleigh. L'extrapolation des résultats obtenus aux différentes hauteurs a montré que la variation de la distribution de la vitesse du vent et de la densité de puissance correspondante est notable avec la hauteur.

Trois types d'aérogénérateurs à axe horizontal AE-46, AE-52 et AE-61 sont étudiés. Les paramètres caractéristiques indiquant les performances aérodynamiques (rendement énergétique et facteur d'utilisation) de chaque machine sont calculés et comparés pour différentes hauteurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. Ben Amar, M.Elamouri, R. Dhifaoui : Energy assessment of the first wind farm section of Sidi Daoud, Tunisia. *Renewable Energy* 33 (2008).
- [2] T. J. Chang et al: Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan. *Renewable Energy* 28 (2003) 851-871.
- [3] STEG: Evaluation technique des projets retenus (MED 2000 Projet). Eolin. Août 2002.
- [4] J. C. Baillon: Problèmes de captation et de couplage mécanique en énergie éolienne. Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université Poitiers 1980.
- [5] Promotion Of Renewable Energy, Energy Efficiency And Greenhouse Gas Abatement (PREGA): Grid Connected Wind Farm In Gobi Region. February 2006.