

## EVALUATION DE L'ENERGIE EOLIENNE PAR LA DISTRIBUTION DE WEIBULL

F. YUCEF ETTOUMI<sup>1</sup>, J.M. FALLOT<sup>2</sup>, H. SAUVAGEOT<sup>^</sup>  
et A. ADANE(I)

<sup>1</sup>Faculté d'Electronique et d'Informatique, Département Télécommunications,  
Laboratoire de Traitement d'Images et Rayonnement, Université des Sciences et de la Technologie,  
(U.S.T.H.B), BP 32 16111 El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie ;

Email : ; Tél. / Fax : +213 21 24 71 87.

<sup>^</sup>Laboratoire des Systèmes Energétiques (LASEN), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,  
(EPFL), CH-1015 Lausanne.

<sup>I</sup>Université Paul Sabatier Toulouse, Observatoire Midi Pyrénées, Laboratoire d'Aérodynamique,  
Centre de Recherches Atmosphériques, 8, route de Lannemezan, 65300 Campistrous, France.

### Résumé

Dans ce papier, une approche basée sur la distribution de Weibull, a été utilisée pour modéliser la vitesse de vent enregistrée selon une direction donnée. Elle permet de faire ressortir les principales propriétés statistiques des données tri-horaires de vent. Cette approche appliquée à quelques sites algériens, a été également testée sur des données horaires enregistrées à la station Chasserai (Jura suisse). Cette station siège de vents forts permet aussi de valider l'approche sur une échelle de temps plus faible c'est à dire : l'heure. Les mesures enregistrées dans une région donnée sont organisées en des fichiers mensuels selon les huit principaux secteurs de direction. Deux sortes de technique sont utilisées. L'une est une méthode graphique. L'autre repose sur le calcul itératif des moments. Les deux méthodes donnent des résultats similaires et permettent de calculer les paramètres de Weibull avec une bonne précision. Les distributions de Weibull ainsi obtenues permettent l'évaluation du potentiel éolien disponible en un site donné, pour chacun des douze mois de l'année e' pour chacun des huit secteurs de direction.

### Abstract

In this paper, a Weibull distribution-based approach is used to get the statistical properties of wind data collected every three hours in thirty seven meteorological stations of Algeria and hourly wind data recorded in the station of Chasserai (Switzerland). For each month of the year, these data have been sorted into eight main sectors of direction. Two kinds of technique have been used. The first one is a graphical method. The second one consists in an iterative calculation of the moments. Both methods yield similar results and enable us to compute the Weibull parameters with a good accuracy. Thanks to the obtained Weibull distributions, the available wind potential is evaluated in a given location for each of the twelve months and each of the eight\* directions.

**Mots-clés :** Statistique; Weibull; Météorologie; Vent; Energie.

**Keywords:** Statistics; Weibull; Meteorology; Wind; Energy.

### Introduction

Les problèmes environnementaux font actuellement l'objet d'importantes préoccupations à l'échelle planétaire. On peut citer, par exemple, les problèmes de l'épuisement de certaines ressources naturelles et de la relève énergétique. Ainsi, le tarissement des ressources énergétiques d'origine fossile et notamment le pétrole est prévu dans un horizon très proche, même pour un pays comme l'Algérie qui jouit pourtant d'une certaine potentialité en pétrole et en gaz. C'est pourquoi l'emploi des énergies renouvelables serait de mise pour assurer à la fois la relève énergétique et un develop-

pement durable. L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes mais la plus attractive des énergies de substitution [Darwish et Sayigh, 1988; Nfaoui *et al*, 1996; Hillring et Krieg, 1998; Horvath et Toth, 2001]. Actuellement, la recherche sur l'exploitation de ce type d'énergie est largement menée à travers le monde bien que le vent soit un phénomène aléatoire, non-stationnaire et à durée variable et relativement courte. Dans les basses couches de l'atmosphère, le vent joue un rôle crucial car il contribue énormément aux échanges thermiques entre l'atmosphère et la surface terrestre. Il participe au mécanisme d'évaporation des nappes d'eau et véhicule diverses particules en suspension dans l'air d'un endroit à un autre de la Terre. Il est responsable de l'érosion éolienne à laquelle est soumis le relief terrestre. En plus de son apport dans la connaissance climatique d'une région, il représente aussi une source appréciable d'énergie. En Algérie, la vitesse du vent et sa direction sont régulièrement mesurées dans l'ensemble des stations d'observation du réseau météorologique algérien, depuis de nombreuses années. Dans ce papier, une analyse statistique du vent, basée sur la distribution de Weibull, est menée en vue d'évaluer le potentiel énergétique éolien en Algérie. Ne disposant que de données trihoraires en Algérie et de vents pas assez forts, nous avons testé l'approche sur des données horaires provenant d'un site très venté, à savoir la station de Chasserai (Jura suisse), où les mesures sont effectuées à une échelle plus fine et en altitude. C'est une station automatique située sur un sommet jurassien bien dégagé à 1600 m par rapport au niveau.

## 1. Données

Les données du vent considérées dans cette étude, ont été collectées toutes les trois heures dans quelques stations météorologiques de l'Algérie pendant la période 1977/88. Les données du vent enregistrées, heure par heure, de 1991 à 2000, à la station de Chasserai (Jura suisse) ont aussi fait l'objet d'une analyse statistique. La direction et la vitesse du vent sont respectivement mesurées à l'aide d'une girouette et d'un anémomètre placés à 10m au dessus du sol dans les stations algériennes et à une hauteur de 60 m pour Chasserai. Les secteurs sélectionnés pour la direction du vent sont le Nord (N), le Nord Est (NE), l'Est (E), le Sud Est (SE), le Sud (S), le Sud Ouest (SO), l'Ouest (O) et le Nord Ouest (NO). Pour chacune des stations, ces données sont regroupées à l'échelle mensuelle selon chacun de ces huit secteurs.

## 2. Distribution de Weibull

Pour un site donné, représentons les mesures de la vitesse du vent obtenues pour un mois (m) et un secteur de direction (d), par une variable aléatoire (v) régie par la loi de Weibull. La distribution de Weibull s'écrit [Hennesey, 1977; Garcia *et al*, 1998] :

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \quad (1)$$

où, v, k et A sont respectivement la vitesse du vent, le facteur de forme (sans dimension) et le facteur d'échelle (en m/s).

La probabilité d'avoir une mesure (V) de la vitesse du vent, est :

$$F(V) = \int_0^V f(v)dv = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right] \quad (2)$$

Le moment d'ordre n de cette distribution est :

$$\mu_n = A^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad (3)$$

La fonction gamma qui intervient dans cette expression, est de la forme :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \left(\frac{v}{A}\right)^{x-1} \exp\left(-\frac{v}{A}\right) d\left(\frac{v}{A}\right) \quad (4)$$

La moyenne  $\bar{v}$  (ou moment d'ordre 1) et l'écart-type  $\sigma$  de la distribution de Weibull valent alors :

$$\bar{v} = A\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (5) \quad \sigma = A\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^{1/2} \quad (6)$$

### 3. Méthode d'analyse

Deux sortes de méthode permettent d'évaluer les facteurs de forme (**k**) et d'échelle (**A**) :

- La première méthode consiste à linéariser des distributions cumulées. Pour ce faire, on opère une transformation logarithmique. D'où :

$$\ln[-\ln(1 - F(V))] = k \ln(V) - k \ln(A) \quad (7)$$

- La seconde est basée sur le calcul itératif des moments de la distribution de Weibull.

### 4. Estimation de l'énergie éolienne

A partir des mesures du vent, il est possible de calculer l'énergie éolienne disponible en un lieu donné. Dans la pratique, l'énergie éolienne annuelle, exprimée en kWh/m<sup>2</sup>, est calculée à l'aide de la limite de Betz qui s'écrit [Hladik, 1984] :

$$E_B \text{ (kWh/m}^2\text{/an)} = 3,56 \sum f_i V_i^3 \quad (8)$$

où  $f_i$  est la fréquence correspondant à la vitesse  $V_i$  du vent, centre de la classe  $i$ .

Ce calcul peut se faire à l'aide de la distribution de Weibull, on obtient l'expression qui suit :

$$E_B \text{ (kWh/m}^2\text{/an)} = 3,56 A^3 \Gamma\left[1 + \frac{3}{k}\right] \quad (9)$$

### 5. Résultats et discussion

Toutes les valeurs, exprimées à une décimale près, des facteurs d'échelle (**A**) et de forme (**k**) la distribution de Weibull obtenus moyennant la méthode graphique et celle des moments, donnent lieu à des résultats similaires à 10% près pour toutes les stations. Les **figures 1 et 2** donnent la modélisation obtenue pour les stations d'Adrar et de Hassi Messaoud. Elles concernent chacun des huit secteurs de direction et chacun des douze mois de l'année. Pour l'ensemble des stations étudiées, l'adéquation de l'ajustement des données expérimentales aux données issues du modèle est effectuée à l'aide du test de Kolmogorov [Saporta, 1978]. Il montre que la distribution de Weibull ajuste convenablement l'ensemble des distributions expérimentales de la vitesse du vent aussi bien dans l'espace que dans le temps. Un autre critère de validation utilisé consiste à estimer le coefficient de corrélation. Nous trouvons que les valeurs obtenues se situent entre 0,94 et 0,98 (la **figure 3** illustre le cas de la station d'Oran). De façon générale, les résultats concordent avec l'observation. Les paramètres des modèles obtenus et la génération d'un nombre aléatoire uniformément distribué compris entre "0" et "1", permettent de produire des séquences synthétiques de la vitesse de vent. D'après les tests d'hypothèse, les résultats issus de la simulation sont en parfait accord avec ceux résultant de l'expérimentation pour l'ensemble des stations étudiées. La **figure 4** donne un exemple de résultats de la simulation obtenus pour Adrar et Hassi Messaoud. Cette manière de procéder permet de générer de

séries longues de la vitesse du vent pour un secteur de direction fixé. L'intérêt d'une telle démarche apparaît clairement lors de la conception du dimensionnement des systèmes de conversion d'énergie éolienne et de leur gestion optimale.

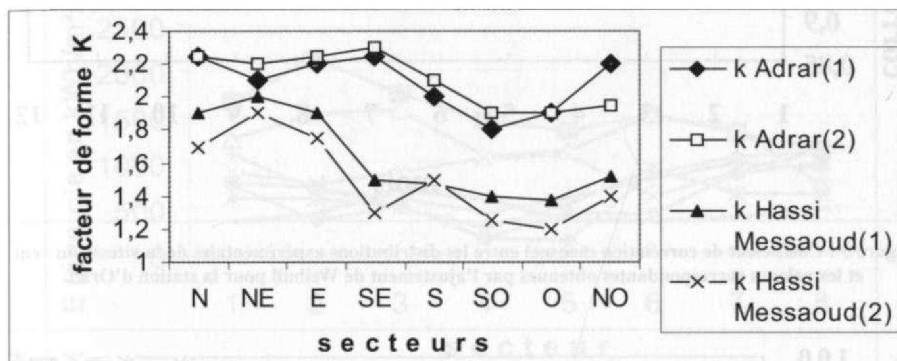


Figure 1 : Estimation des facteurs de forme (k) par la méthode graphique (notée 1) et par la méthode des moments (notée 2) pour les stations d'Adrar et de Hassi Messaoud

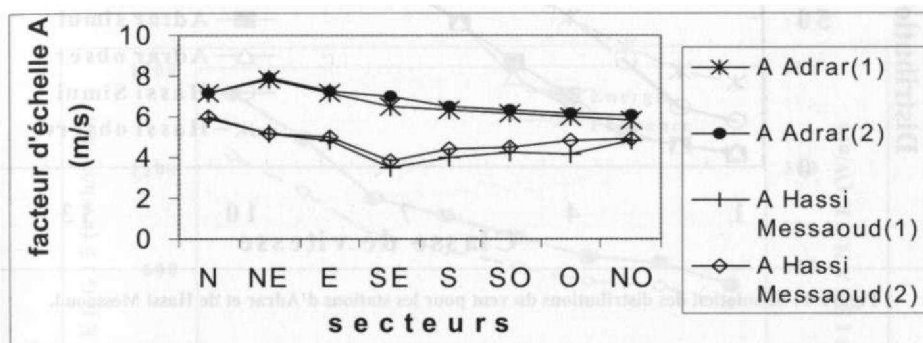


Figure 2 : Estimation des paramètres d'échelle (A) par la méthode graphique (notée 1) et par la méthode des moments (notée 2) pour les stations d'Adrar et de Hassi Messaoud.

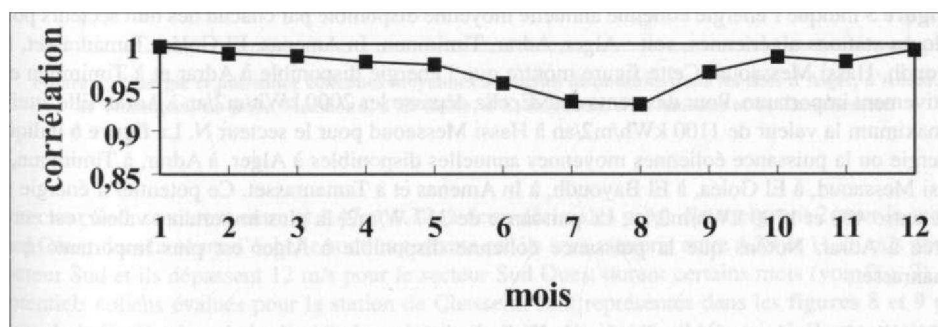


Figure 3 : Coefficient de corrélation mensuel entre les distributions expérimentales de la vitesse du vent et les valeurs correspondantes obtenues par l'ajustement de Weibull pour la station d'Oran.

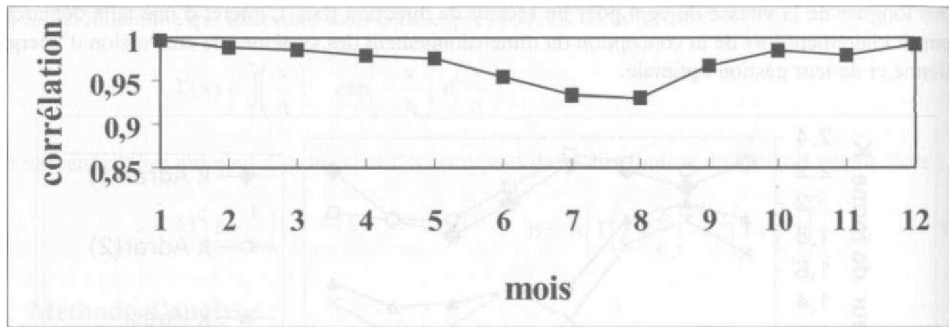


Figure 3 : Coefficient de corrélation mensuel entre les distributions expérimentales de la vitesse du vent et les valeurs correspondantes obtenues par l'ajustement de Weibull pour la station d'Oran.

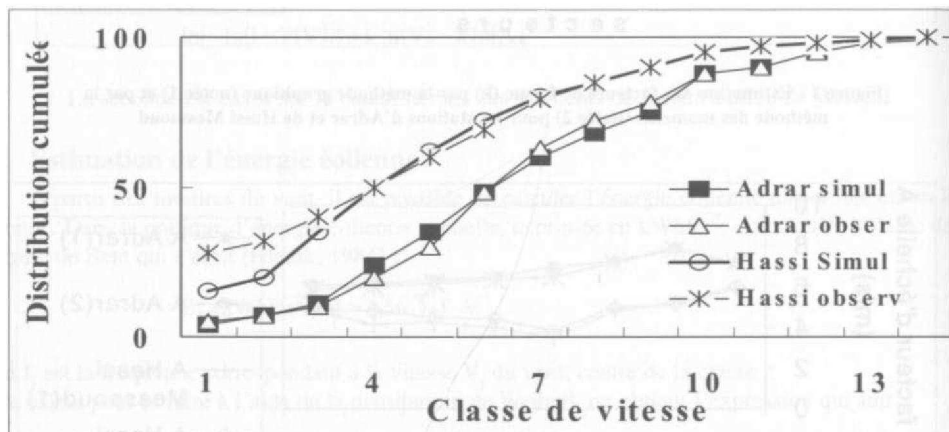


Figure 4 : Simulation des distributions du vent pour les stations d'Adrar et de Hassi Messaoud.

Ainsi, pour évaluer les performances ou le comportement de ces systèmes, il est nécessaire de connaître, de façon détaillée, les caractéristiques du vent du site où le système est appelé à évoluer. Les paramètres de Weibull ainsi calculés, permettent l'évaluation des ressources de l'énergie éolienne. La **figure 5** indique l'énergie éolienne annuelle moyenne disponible par chacun des huit secteurs pour quelques stations algériennes, soit : Alger, Adrar, Timimoun, In Amenas, El Goléa, Tamanrasset, El Bayouhd, Hassi Messaoud. Cette figure montre que l'énergie disponible à Adrar et à Timimoun est relativement importante. Pour des vents du NE, elle dépasse les 2000 kWh/m<sup>2</sup>/an à Adrar. Elle atteint au maximum la valeur de 1100 kWh/m<sup>2</sup>/an à Hassi Messaoud pour le secteur N. La **figure 6** indique l'énergie ou la puissance éoliennes moyennes annuelles disponibles à Alger, à Adrar, à Timimoun, à Hassi Messaoud, à El Goléa, à El Bayouhd, à In Amenas et à Tamanrasset. Ce potentiel d'énergie se situe entre 400 et 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an. La puissance de 317 W/m<sup>2</sup>, la plus importante valeur, est enregistrée à Adrar. Notons que la puissance éolienne disponible à Alger est plus importante qu'à Tamanrasset.

L'approche basée sur la distribution de Weibull s'adapte très bien aux données horaires du vent mesuré à la station de Chasserai (Jura suisse). Les coefficients de corrélation obtenus sont supérieurs à 0,95. Les tests d'ajustement valident ce type de modélisation. Les facteurs de forme obtenus pour

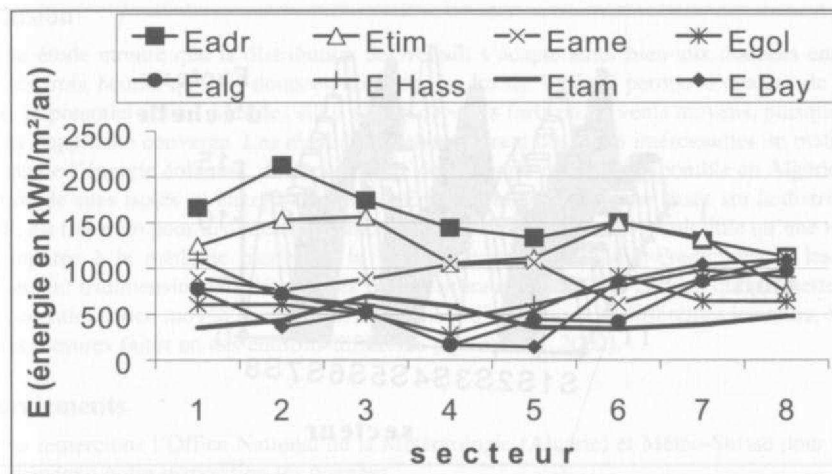


Figure 5 : Energie éolienne moyenne annuelle disponible par secteur pour quelques stations, soit : Alger (Ealg), Adrar (Eadr), Timimoun (Etim), In Amenas (Eame), El Goléa (Egol), Tamanrasset (Etam), El Bayouhd (Ebay), Rassi Messaoud (Ehass).

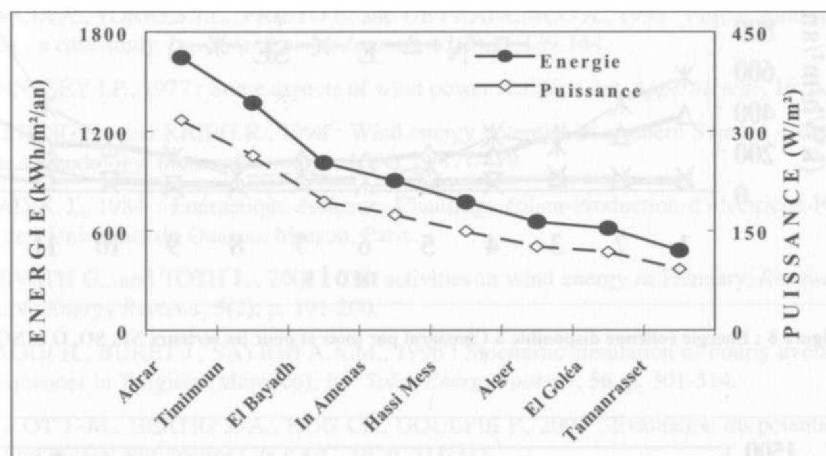


Figure 6 : Energie et puissance éoliennes moyennes annuelles disponibles dans les sites d'Alger, d'Adrar, de Timimoun, de Rassi Messaoud, cl \* K1 Goléa, d'El Bayouhd, d'In Amenas et de Tamanrasset.

le secteur Sud, se situent entre et 1,47 et 1,72 (à deux décimales près). Us atteignent 2 pour le secteur Sud Ouest. Les facteurs d'échelle sont importants car ils sont compris entre 4,39 et 11,25 m/s pour le secteur Sud et ils dépassent 12 m/s pour le secteur Sud Ouest durant certains mois (voir Fig. 7). Les potentiels éoliens évalués pour la station de Chasserai sont représentés dans les figures 8 et 9 pour chacun des huit secteurs de direction et chacun des mois de l'année. L'énergie éolienne atteint une vingtaine de kWh/m<sup>2</sup> pour le mois de mai et pour la direction SE. Elle vaut 1400 kWh/m<sup>2</sup> en novembre pour la direction S O.

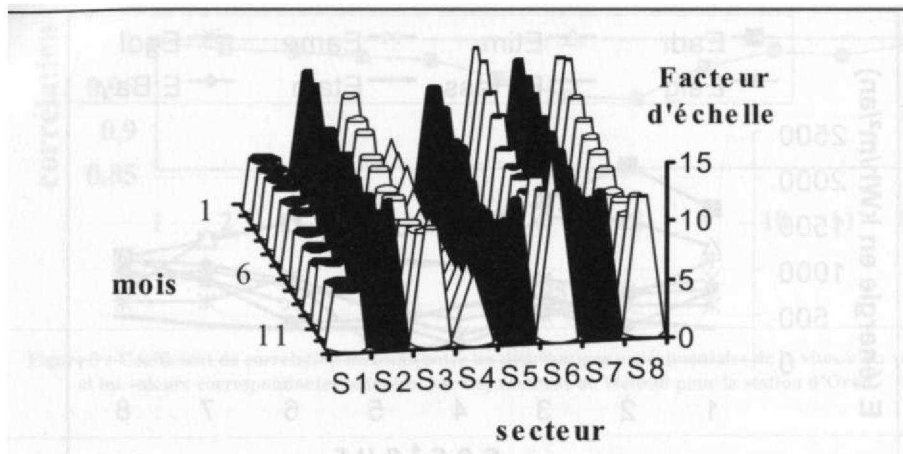


Figure 7 : Facteur d'échelle en ordonnée, pour chacun des douze mois de l'année et par secteur, soit S1, S 2. S 8 , pour la station de Chasseraï.

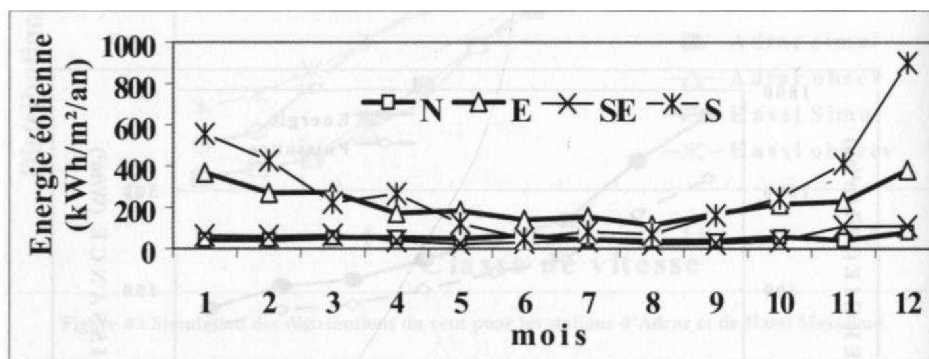


Figure 8 : Energie éolienne disponible à Chasseraï par mois et pour les secteurs NE, SO, O et NO.

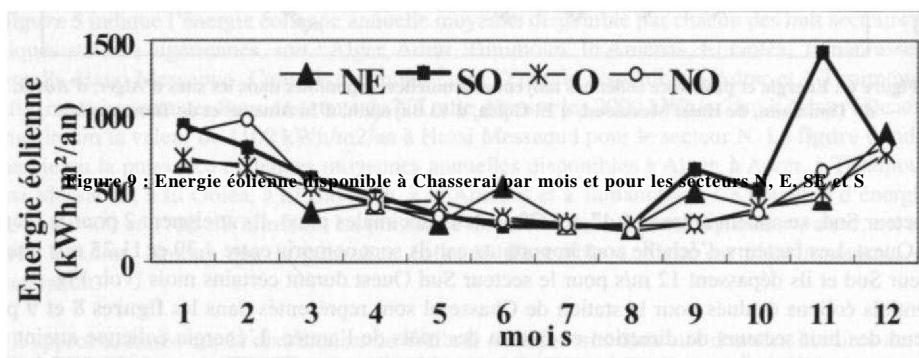


Figure 9 : Energie éolienne disponible à Chasseraï par mois et pour les secteurs N, E, SE et S

## Conclusion

Cette étude montre que la distribution de Weibull s'adapte aussi bien aux données enregistrées toutes les trois heures que les données horaires. La loi de Weibull permet d'évaluer de la même manière le potentiel éolien dans des sites, sièges de vents forts ou de vents moyens, puisque dans les deux cas l'approche converge. Les résultats obtenus ouvrent des voies intéressantes en matière d'exploitation de l'énergie éolienne, de cartographie de l'énergie éolienne disponible en Algérie et d'alimentation de sites isolés en énergie électrique. En particulier, l'approche basée sur la distribution de Weibull, est très utile pour le dimensionnement des systèmes éoliens. Ils serait utile qu'une telle étude soit comparée à la méthode basée sur la MCP (Measure-Correlative-Prediction) et les modèles d'écoulement tridimensionnels développés par le laboratoire (LASSEN-EPFL), qui permettent d'évaluer le potentiel éolien moyen annuel pour l'ensemble d'une région, à différentes hauteurs, à partir de quelques mesures faites en des endroits différents [Fallot *et al*, 2002].

## Remerciements

Nous remercions l'Office National de la Météorologie (Algérie) et Météo-Suisse pour avoir mis gracieusement à notre disposition les données.

## Références

- DARWISH A.S.K., and SAYIGH A.A.M., 1988 : Wind energy potential in Irak. *Int. Solar and Wind Technology*, **5**, p. 215-222.
- GARCIA A., TORRES J.L., PRIETO E. and DE FRANCISCO A., 1998 : Fitting wind speed distributions : a case study. *Int. Solar Energy Journal*, **62(2)**, p. 139-144.
- HENNESEY J.P., 1977 : Some aspects of wind power statistics. *Int. Appl. Meteor*, **16**, p. 19-128.
- HILLRING B., and KRIEG R., 1998 : Wind energy potential in southern Sweden - Example of planning methodology. *Renewable energy*, **13(4)**, p. 471-479.
- HLADIK J., 1984 : Energétique éolienne. Chauffage éolien-Production d'électricité-Pompage, Presses de l'Université du Québec, Masson, Paris.
- HORVATH G., and TOTH L., 2001 : The activities in wind energy in Hungary, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **5(2)**, p. 191-200.
- NFAOUI H., BURET J., SAYIGH A.A.M., 1996 : Stochastic simulation of hourly average wind speed sequences in Tangiers (Morocco). *Int. Solar Energy Journal*, **56**, p. 301-314.
- FALLOT J.-M., HERTIG J.-A., HUG Ch., GOULPIE P., 2002 : Evaluation du potentiel éolien dans le Jura Suisse. *Publications de l'AIC*, **14**, p. 311-318.
- SAPORTA G., 1978 : *Théories et méthodes de la statistique*, Paris, Technip.