

## **RESUME DE LA THESE**

Présentée à :

**L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID DE TLEMCCEN**

**FACULTE DES SCIENCES**

**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

**UNITE DE RECHERCHE *MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES***

Par :

**Nachida KASBADJI MERZOUK**

Pour l'obtention du titre de :

**DOCTEUR EN PHYSIQUE ENERGETIQUE ET MATERIAUX**

Sur le thème :

**EVALUATION DU GISEMENT ENERGETIQUE EOLIEN  
CONTRIBUTION A LA DETERMINATION  
DU PROFIL VERTICAL DE LA VITESSE DU VENT EN  
ALGERIE**

Soutenue publiquement le

2006 devant le jury composé de :

**M<sup>r</sup> N. CHABANE SARI**

**Professeur, Univ. de Tlemcen**

**Président**

**Mr B. BENYOUCEF**

**Professeur, Univ. de Tlemcen**

**Directeur de thèse**

**Mr J.P. CHARLES**

**Professeur, Univ. de Metz**

**Examineur**

**M<sup>r</sup> A. CHIKOUCHE**

**Directeur de Recherche, UDES**

**Examineur**

**M<sup>r</sup> M. BELHAMEL**

**Directeur de Recherche, CDER**

**Examineur**

**M<sup>r</sup> F. HANNANE**

**Professeur, Univ. de Blida**

**Examineur**

**M<sup>me</sup> F. YUCEF ETTOUMI**

**Maître de Conférences, USTHB**

**Examinatrice**

## **INTRODUCTION**

Même si des études ponctuelles sur les variations temporelle et spatiale de la vitesse du vent ont été publiées dès 1942, les premiers atlas des ressources énergétiques éoliennes sont ceux des USA en 1981, [1] et de l'Europe en 1989, [2].

Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés par Said et all en 1984, [3] suivis par Benssad (études ponctuelles), en 1985, [4], Hammouche (base de données), en 1990, [5] et Kasbadji Merzouk (base de données et cartographie) en 1996, [6].

Avant d'installer tout système éolien il faut impérativement détecter les zones ventées susceptibles de recevoir des éoliennes. Pour cela, les atlas énergétiques éoliens de l'Algérie (annuelle, saisonnière) ont été établis à partir de la vitesse moyenne annuelle du vent, [7,8]. Toutefois, ceci n'étant pas suffisant pour un concepteur ou installateur de machines éoliennes, des cartes à l'échelle microclimatique sont établies à l'aide d'un modèle d'estimation des vitesses du vent dans des sites accidentés. Ceci permet la localisation des zones ventées par rapport à la moyenne du pays, [9, 10].

Au vu de la disponibilité des mesures de la vitesse du vent à une hauteur standard fournies généralement par les services météorologiques, les recherches se sont orientées vers l'extrapolation verticale des paramètres vent.

Il est clair que pour une optimisation des systèmes éoliens sur un site donné, il est nécessaire de connaître les potentialités énergétiques du site d'installation et d'estimer la puissance réellement récupérée au niveau du noyau de l'hélice.

C'est pour cela que les mesures effectuées à plusieurs altitudes du mât de Ksar El Chellala ont été utilisées pour la détermination de la formule d'extrapolation de la vitesse du vent d'un point de mesure standard vers le niveau de l'hélice d'une machine éolienne selon différentes classes de stabilité atmosphérique.

Les résultats obtenus pour l'interpolation spatiale et l'extrapolation verticale de la vitesse du vent ont été validés par rapport à la littérature et à des mesures sur un pylône de 50m.

## **1. ETUDE BIBLIOGRAPHIE ET PROBLEMATIQUE**

### **1.1 Etude Bibliographique**

Après le rappel des éléments de physique atmosphérique par la définition des couches ainsi que des forces qui régissent le mouvement des masses d'air, la méthode de caractérisation de la vitesse du vent sur un site est présentée.

Les modèles statistiques d'ajustement les plus usités, [10,11], (Weibull, hybride Weibull et Rayleigh) et l'essentiel des travaux de recherche pour l'établissement de l'atlas algérien, (Said et all [3], Bensaad [4], Hammouche [5], Kasbadji Merzouk, [6]) sont passés en revue.

Par ailleurs, la théorie de similitude de Monin-Obukov de 1954, [12] et les travaux de Dyer 1974, [13] base des modèles d'extrapolation verticale du vent, sont explicités. Etablis pour des terrains plats et homogènes, ils définissent des fonctions universelles qui varient en fonction des conditions de stabilité de l'atmosphère dans la basse couche limite. L'essentiel des travaux partant par l'établissement de ces fonctions a été inventoriés en considérant les hypothèse et limites d'utilisation.

Les expressions du profil vertical de la vitesse du vent, les modèles d'extrapolation verticale de la vitesse du vent et des paramètres de Weibull, trouvés dans la littérature sont présentés.

Le test de ces formules, par plusieurs auteurs et les résultats de la validité sont exposés.

Enfin, un bref aperçu des avancées technologiques est abordé par la présentation de machines éoliennes tel que les aérogénérateurs de petite, moyenne et grande puissance nominale, les éoliennes mécaniques ainsi que les fermes éoliennes.

## 1.2. Position du problème

### a - Interpolation horizontale (Atlas vents)

Les services météorologiques fournissent des données brutes (vitesse et direction) mesurées au niveau des stations météorologiques (généralement des aéroports) moyennées sur une période de trois heures, (données trihoraire).

Toutefois, l'utilisateur potentiel nécessite besoin de données (estimation) en tout point du territoire présentant un besoin énergétique ou autre (architecture, agriculteurs,..). D'où la nécessité de l'établissement d'une carte des vents moyennant l'utilisation d'une méthode d'interpolation appropriée. Une fois la carte établie, les zones signalées comme particulièrement ventées nécessitent une étude microclimatique pour la confirmation des résultats d'interpolation.

### b- Extrapolation Verticale

Les modèles proposés par la littérature sont tous basés sur la théorie de Monin–Obukov, [12], qui détermine le profil vertical du vent à partir de relations implicites, fonction des conditions de stabilité de la couche limite atmosphérique.

Toutefois, ces formules empiriques d'extrapolation verticale de la vitesse du vent, trouvées dans la littérature ont été développées pour des climats particuliers et des sites appropriés aux installations éoliennes. Raison pour laquelle plusieurs travaux ont été réalisés par différents auteurs, pour déterminer la formule la plus adaptée à leurs conditions propres.

Ces formules ne répondent pas aux spécificités du climat et terrains des hauts plateaux et sud algérien. Dans ce sillage, l'objectif de la seconde partie de la présente étude est :

- tester les différents modèles empiriques pour un terrain semi-aride en utilisant les paramètres vent prélevés, à plusieurs niveaux du pylône de Ksar El Chellala.
- Déterminer un modèle adéquat d'extrapolation de la vitesse du vent et des paramètres de Weibull au climat semi-aride
- Valider le modèle à travers la littérature et avec des données mesurées au sol.
- Etablir l'Atlas corrigé des vitesses et puissance disponible du vent à 50 m.

## 2. ATLAS VENT DE L'ALGERIE

### 2.1 Variation temporelle de la vitesse moyenne du vent

La vitesse du vent varie différemment selon la journée, les saisons et l'année. Cette variation permet d'adapter le dimensionnement des systèmes éoliens aux besoins énergétiques qui varient selon la période considérée.

En figures 1 et 2 sont représentées respectivement, les évolutions journalière (Djelfa et InOussera) et saisonnière (Tebessa et Oran). Pour deux sites voisins, l'évolution journalière atteint le maximum pour deux valeurs différentes et que la variation de l'amplitude de l'évolution saisonnière est tout à fait différente pour les sites de Tebessa et Oran.

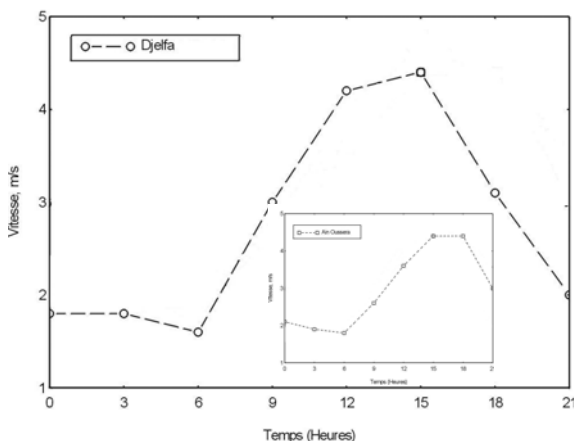


Fig. 1 : Variation journalière de la vitesse moyenne du vent

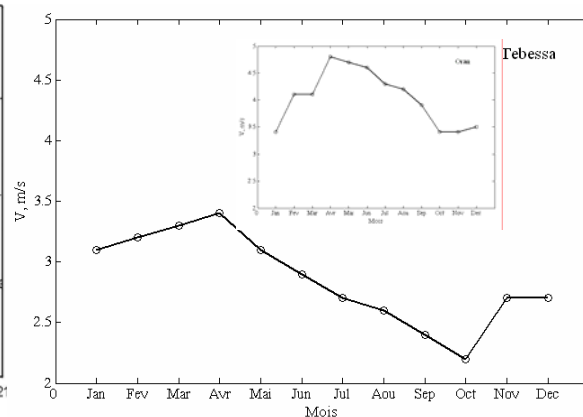


Fig. 2 : Variation mensuelle de la vitesse moyenne du vent

## 2.2 Etude Statistique

Les distributions statistiques les plus usitées pour la caractérisation d'un site, sont celles de Weibull [11], Hybride Weibull [12] et Rayleigh. Comme la distribution de Weibull exclut les vitesses nulles, elle est donc inadaptée pour les sites à fortes fréquences de vitesses nulles (>15%). On lui préfère dans ce cas là, la distribution hybride de Weibull. Selon le modèle, les expressions de la vitesse moyenne, cubique moyenne et variance sont donnés au tableau 1. L'ajustement des données statistique pour la détermination des paramètres de Weibull,  $k$  et  $C$  est effectué à l'aide de méthodes numériques.  $k$  et  $C$  représentent respectivement, le facteur de forme et d'échelle de la distribution de Weibull.

Tableau 1 : Distribution et expressions de la vitesse moyenne, cubique moyenne et variance selon le modèle utilisé.

Distribution	Fonction	$\langle V \rangle$	$\langle V^3 \rangle$	$\sigma^2$
Weibull	$\left(\frac{k}{C}\right)\left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right)$	$C \Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$	$C^3 \Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)$	$C^2 \left[ \Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right) \right]$
Hybride Weibull	$= (1 - ff_o) \left(\frac{k}{C}\right)\left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right)$ pour $V > 0$ $= ff_o$ pour $V = 0$ $ff_o$ : Fréquence vitesses nulles	$(1 - ff_o) C \Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$	$(1 - ff_o) C^3 \Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)$	$(1 - ff_o) C^2 \left[ \Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right) \right]$
Rayleigh	$f(V) = 2 \frac{V}{C^2} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^2\right)$	0.886 C	1.32 C <sup>3</sup>	0.2146 C <sup>2</sup>

(1)

## 2.3 Interpolation Spatiale de la vitesse moyenne du vent

### a- Atlas de la vitesse moyenne annuelle

L'atlas de la vitesse moyenne annuelle en Algérie a été établi à partir des données fournies par 64 stations de mesures. Sur ces 64 stations, 16 appartiennent au pays voisins [17]. Leurs paramètres sont utilisés pour améliorer affiner l'interpolation aux frontières. Par ailleurs, les paramètres de 27 stations nationales ont déjà été publiés par Hammouche [3]. Le traitement a donc porté sur les 21 stations restantes, [19]. Le logiciel géo référencé, Mapinfo, basé sur les systèmes d'information géographique (SIG) a été utilisé.

La méthode d'interpolation utilisée est celle dite "de la pondération inverse à la distance".

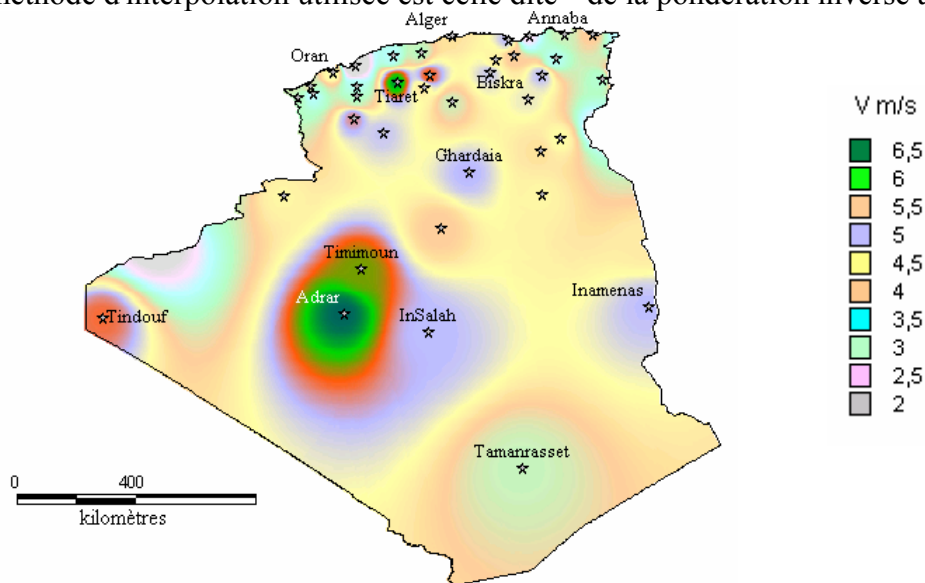


Figure 3: Atlas de la vitesse moyenne annuelle du vent en l'Algérie

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10m du sol est présentée en figure 3. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. A l'exception de la région côtière (moins Béjaïa et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.9 m/s. Plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran sont constatés.

En utilisant la même gamme de couleur, les atlas vent saisonniers de l'Algérie, sont représentés en figures 4.

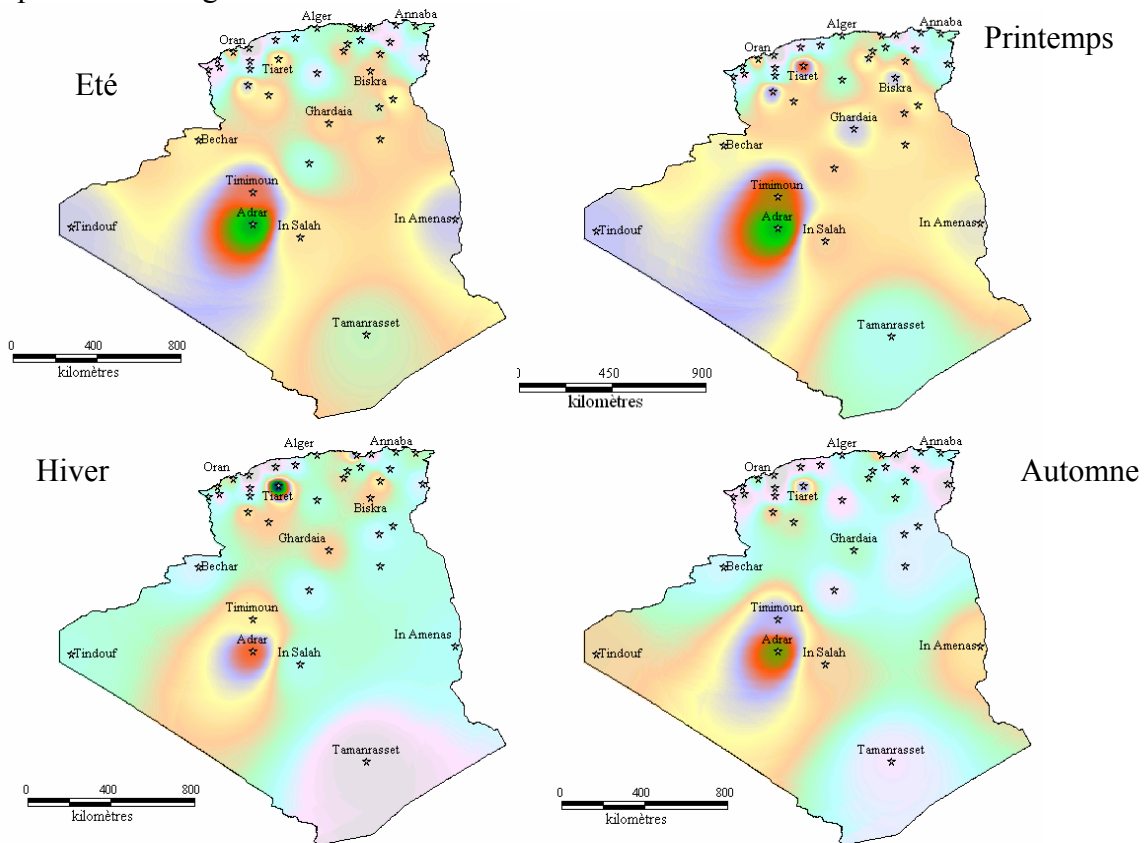


Figure 4: Atlas saisonniers de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie

On remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année. Quelque soit la saison, tous les atlas établis présentent la région sud ouest, à savoir Adrar, Timimoun et In Salah comme les zones les plus ventées, à l'exception de la période hivernale qui dégage une zone microclimat autour de Tiaret avec des vitesses de vent plus élevées.

#### b- Atlas microclimatiques de la vitesse moyenne

La carte des vents de l'Algérie, basée sur l'interpolation des données de vitesses du vent mesurées au sol s'avère insuffisante, l'effet de paramètres tel que le changement de rugosité du sol, les obstacles et la stabilité de l'atmosphère ne sont pas pris en compte lors de l'interpolation. C'est pour cela que le modèle numérique dénommé "AIOLOS", a été utilisé pour l'établissement des atlas microclimatiques, [8, 9]. Il permet la réduction de la divergence locale de la vitesse du vent (suivant les conditions rencontrées au sol), par projection vers le sol d'un écoulement de vent initial obtenu par interpolation des vitesses mesurées à 3000 m d'altitude.

Quatre sites sont choisis pour l'étude. Deux sites côtiers Ténès et les Andalouses et deux sites "internes", Sidi Aich et Tissemsilt. Les champs de vitesses du vent obtenus pour le site de Ténès et de Sidi Aich à 10 m du sol et 25 m sont donnés en figure 5a et b.

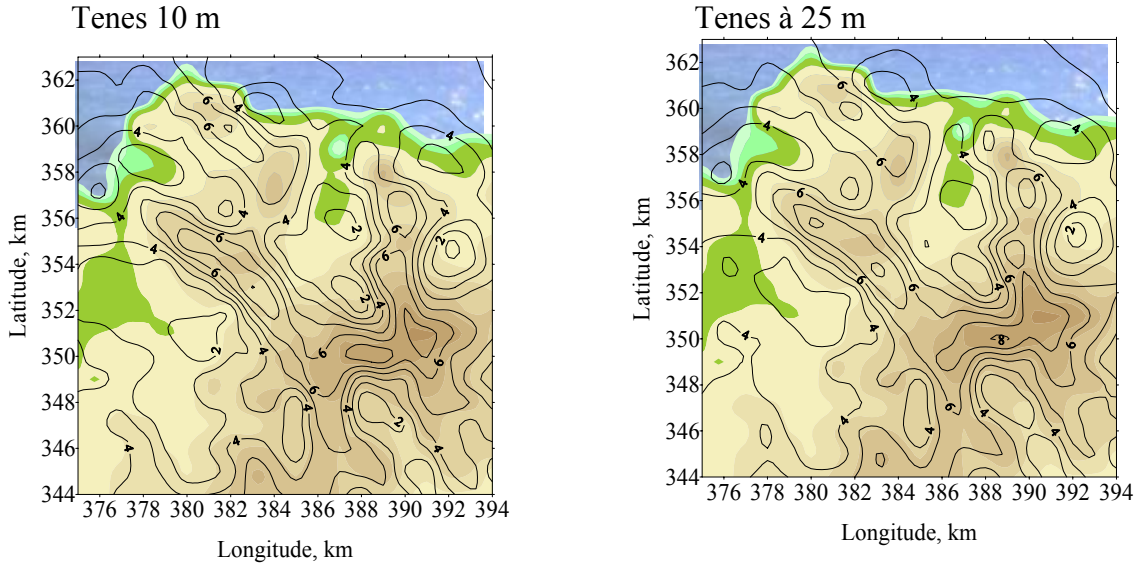
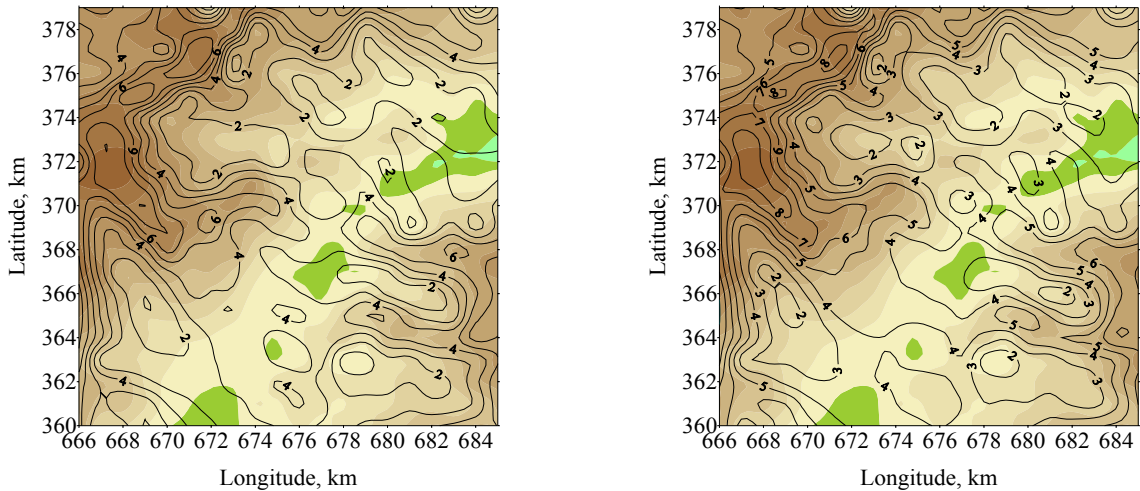


Figure 5a: Atlas microclimatiques de la vitesse moyenne annuelle pour un site côtiers



Sidi Aich à 10m

Sidi Aich à 25m

Figure 5b : Atlas microclimatiques de la vitesse moyenne pour un site ‘interne ‘.

Les vitesses obtenues à 25 m du sol sont supérieures à celles obtenues à 10 m du sol, pour tous les sites. En effet lorsqu’on s’éloigne du sol les effets de frottement diminuent.

Pour les deux sites, les maxima passent de 8.2 m/s pour Tènes à 9.2 m/s pour Sidi Aich. On constate que les vitesses obtenues sont plus élevées que celles obtenues lors de l’élaboration des atlas, il en ressort que pour le nord de l’Algérie (au vu de la topographie), tout installateur de systèmes éoliens, une description parfaite du lieu de mesure, ainsi que des obstacles, de la topographie et de la rugosité est nécessaire au dimensionnement optimum. Pour le sud, les résultats par interpolation des données au sol peuvent être utilisés par les concepteurs car les accidents au sol y sont moindres et la rugosité varie peu.

## 2.4 Potentiel Energétique Eolien

L’énergie cinétique moyenne, disponible sur un site donné, par unité de temps et par unité de surface, due à la vitesse du vent, s’écrit :

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

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

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 6. 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.

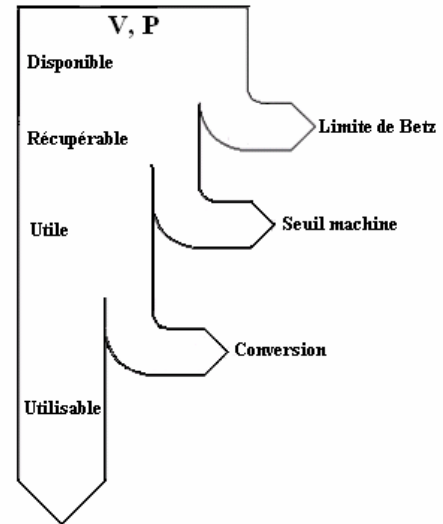


Fig. 6 : Représentation schématique des dégradations successives de l'énergie éolienne avant utilisation.

### a - Limite de Betz

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, (Limite de Betz). La puissance récupérable s'écrit :

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

Enfin la densité d'énergie moyenne récupérable sur une année,  $\langle E \rangle$  est égale à :

$$\langle E \rangle = \langle P_r \rangle \Delta t = 0.37 * 24 * 365.25 \langle V^3 \rangle \quad (5)$$

$$\text{Soit en kWh/m}^2 : \langle E \rangle = 3.25 \langle V^3 \rangle \quad (6)$$

La cartographie de la densité de puissance moyenne annuelle récupérable à 10 mètres du sol est représentée en figure 7. Ce résultat est obtenu après traitement de 10 années de mesures trihoraires de la vitesse du vent. La figure montre qu'au sud ouest, la densité d'énergie moyenne annuelle est supérieure à 2.0 MWh/m<sup>2</sup>. Des zones microclimatiques présentent une densité intéressante dépassant 1.4 MWh/m<sup>2</sup> sur les hauts plateaux, (Tiaret).

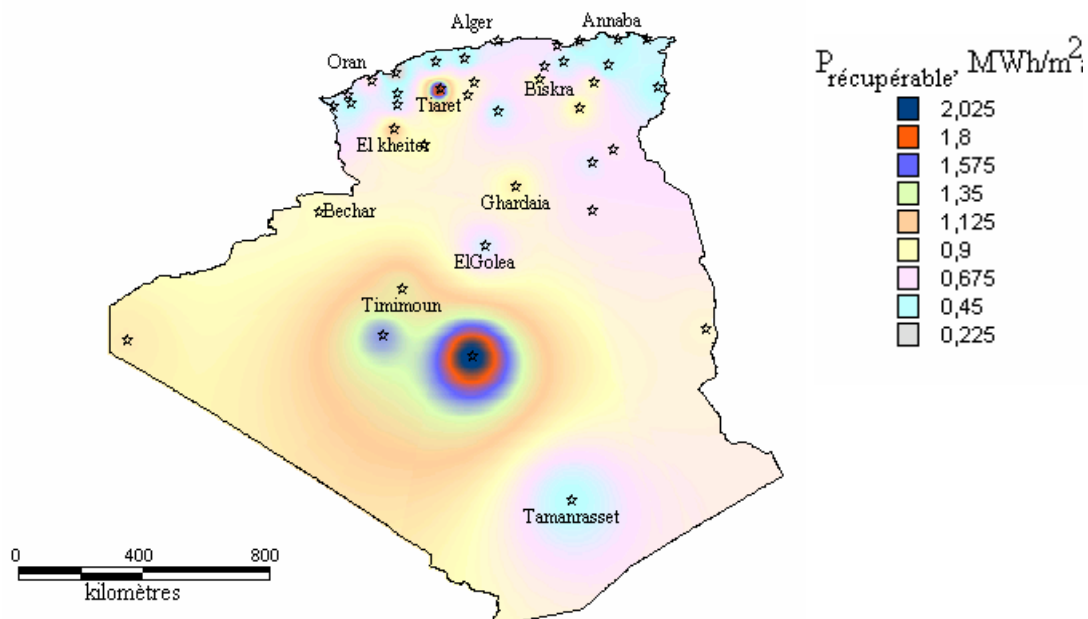


Fig. 7 : Densité d'énergie moyenne annuelle récupérable à 10 m du sol.

### b - Potentiel énergétique éolien utile

Au vu des limites de la machine, (vitesse de démarrage  $V_i$ , nominale  $V_n$  d'arrêt  $V_o$ ), la densité de puissance utile  $\langle P_u \rangle$  est fonction de la vitesse cubique utile qui s'écrit :

$$\langle P_u \rangle = \frac{1}{2} \rho \langle V_u \rangle^3 = \frac{1}{2} \rho \left[ \Gamma_n \left( \left( \frac{V_n}{C} \right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) - \Gamma_n \left( \left( \frac{V_i}{C} \right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) \right] \overline{V^3} + V_i^3 \left[ \exp \left( - \left( \frac{V_n}{C} \right)^k \right) - \exp \left( - \left( \frac{V_i}{C} \right)^k \right) \right] \quad (7)$$

$$\text{Avec : } \Gamma_n(x, a) = \Gamma(x, a) / \Gamma(x) \quad (8)$$

### c – Potentiel énergétique utilisable

La puissance éolienne moyenne réellement utilisable s'écrit :

$$\langle P_e \rangle = \eta \langle P_u \rangle \quad (9)$$

Où  $\eta$  étant le rendement de conversion global.

## 3. EXTRAPOLATION VERTICALE DES PARAMETRE VENT

### 3.1 Présentation de la méthode d'extrapolation verticale

L'extrapolation verticale de la vitesse du vent passe par l'élaboration du profil de la vitesse du vent en fonction de la hauteur. Ces profils dépendent de fonctions implicites dont l'expression diffère selon le cas de stabilité atmosphérique constaté, [16, 17].

Les classes de stabilité ont été déterminées à partir de la longueur de Monin-Obukov donnée par :

$$L = - \frac{\rho c_p u_*^3 T_*}{\kappa g H} \quad (10)$$

avec :

- $\rho$  : masse volumique de l'air, [kg/m<sup>3</sup>]
- $c_p$  : Chaleur spécifique de l'air, [J/kg K]
- $T_o^*$  : Température ambiante, mesurée à 2 m du sol, [K]
- $H$  : Flux de chaleur sensible spécifique, [W/m<sup>2</sup>]
- $u_*$  : Vitesse de frottement, [m/s]
- $z_o$  : Rugosité du sol en m, [m]

Le flux de chaleur sensible est déterminé à partir de l'établissement d'un bilan d'énergie sur l'interface sol-air. Le coefficient de frottement et la rugosité du lieu sont estimés grâce au tracé du profil logarithmique de la vitesse du vent dans les conditions neutres de stabilité.

La méthode donnée par Justus et Mikhaïel, [15] pour la détermination de la formule d'extrapolation semi empirique des paramètres de Weibull est utilisée.

Les expressions sont de la forme :

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{1 + b_{10} \log \left( \frac{z_2}{10} \right)}{1 + b_{10} \log \left( \frac{z_1}{10} \right)} \quad (11)$$

$$\frac{C_2}{C_1} = \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^n \quad \text{avec} \quad n = \frac{a_{10} + b_{10} \log C_1}{1 + b_{10} \log \frac{z_1}{10}} \quad (12)$$



### 3.2 Etude expérimentale

Les paramètres météorologiques relevés sur un pylône implanté par l'ONM à la station météorologique de Ksar El Chellala, sont utilisés pour l'étude (figure 8). La mâât équipé de stations automatiques de mesure aux niveaux 2, 4, 10, 20, 30, 40 et 50m. La température, l'éclairement solaire global et la vitesse du vent sont mesurés toute les 10 mns. Sur les 07 mois utilisés pour l'établissement des modèles d'extrapolation, nous avons constatés 4.5% de données manquantes. En retenant le critère que le gradient de la vitesse dans le sens vertical doit être positif, nous avons retenu les niveaux 2, 10, 20 30 et 40% qui représentent le nombre de données acceptables le plus élevé (58.4%).

### 3.3 Résultats et Discussion

En supposant la stabilité atmosphérique neutre et en utilisant la loi logarithmique, la rugosité du sol et le coefficient de frottement ont été déterminés par mois, saison et sur toute la période considérée (voir tableau 2). La valeur estimée de la rugosité pour les 07 mois de mesures est proche de celle donnée par l'ONM, [3] qui est de l'ordre de 0.08.

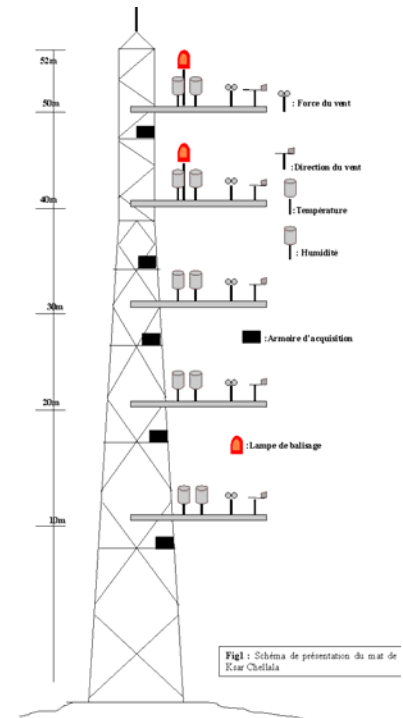


Figure 8. Pylône de mesure

Tableau 2. Résultats de la rugosité du sol et de la vitesse de frottement

Période considérée	$z_0$ , m	$u_*$ , m/s
Juillet	0.0744	0.4902
Août	0.0591	0.4819
Septembre	0.07	0.4845
Octobre	0.0966	0.4516
Novembre	0.1048	0.5887
Décembre	0.0844	0.4929
Janvier	0.0429	0.4944
Automne	0.0849	0.4195
Été	0.0666	0.4865
Hivers	0.0742	0.5264
Total	0.0749	0.4657

En figures 9 et 10, sont représentées les courbes représentatives de l'évolution de la vitesse du vent en fonction de l'altitude à l'échelle mensuelle et pour les 07 mois considérés. Ces courbes ont permis la détermination de la rugosité du sol et du coefficient de frottement. Alors que les courbes sont proches pour les saisons d'automne et été, celle de la saison hivernale est décalée. Le profil logarithmique de la vitesse du vent pour les 07 mois de mesure montre une variation importante près du sol qui diminue avec l'augmentation de l'altitude et une variation asymptotique qui s'annonce dès 40m.

L'éclairement global incident  $I_g$  et la quantité de chaleur sensible  $H$  sont tracés pour chaque saison et pour toute la période de mesures, selon les classes de stabilité en figures 11.

On remarque que contrairement au rayonnement global, les maxima atteints pour la quantité de chaleur sensible sont proches avec une différence de l'ordre de  $100 \text{ W/m}^2$  entre les mois d'été et d'hiver. Les résultats obtenus montrent que pour le cas stable, la quantité de chaleur sensible varie entre  $-50$  et  $-1.20 \text{ W/m}^2$ .

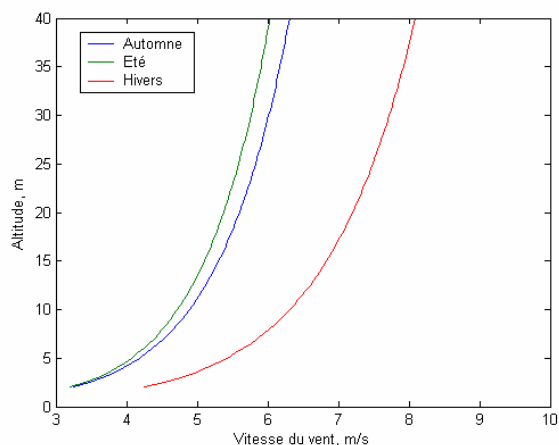


Fig. 9 : Profil saisonnier de la vitesse moyenne du vent

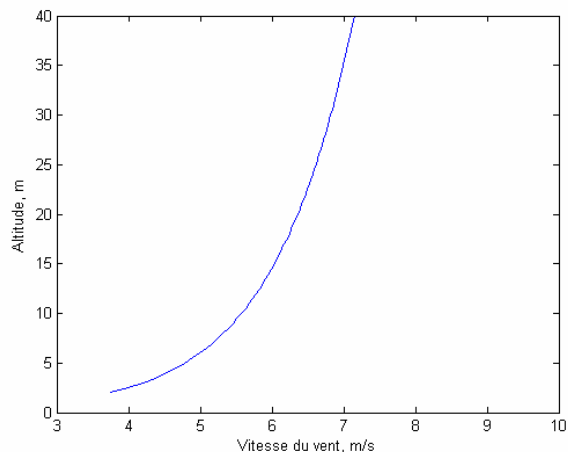


Fig. 10 : Profil de la vitesse du vent moyenné sur les 07 mois

En partant des définitions énoncées, les données ont été triées par classes de stabilité atmosphérique (voir tableau 3).

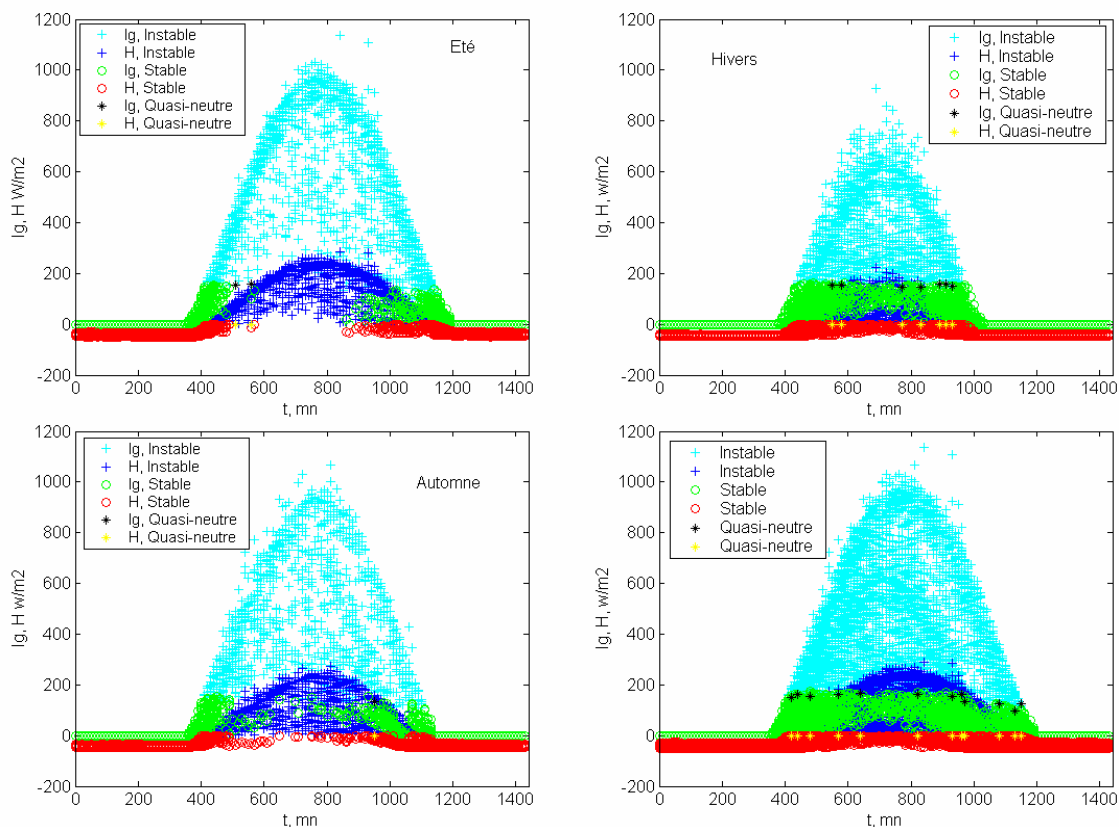


Fig. 11 : Variation de l'éclairement global et de la quantité de chaleur sensible selon les saisons et pour la période de mesures en fonction des classes de stabilité.

Tableau 3 : Définition des classes de stabilité selon la quantité de chaleur sensible.

Stabilité	Conditions	Gamme choisie	Observation
Neutre	$H$ proche de zéro	$-0.05 \geq H \geq 0.1$	Transition entre la nuit et le lever et coucher du soleil.
Instable	$H$ positive	$H > 0$	Au lever et au coucher du soleil
Stable	$H$ négative	$H < 0$	La nuit

Le calcul des paramètres précédents a permis l'estimation de la longueur de Monin-Obukov, donnée au tableau 4 selon la classe de stabilité de l'atmosphère. Ceci a permis le partage des données en fonction des conditions de stabilité atmosphérique.

Tableau 4 : Longueur de Monin-Obukov selon la classe de stabilité atmosphérique.

Mois	Stable		Instable		Quasi-neutre	
	$L_{max}$	$L_{min}$	$L_{max}$	$L_{min}$	$L_{max}$	$L_{min}$
Juillet	-153.161	-0.009	0	$1.5687 \cdot 10^{-6}$	0	0.
Août	-32.030	-0.013	0	88.238	0	0
Septembre	-115.803	-0.009	0	$2.247 \cdot 10^{-7}$	$2.988 \cdot 10^{-10}$	398.470
Octobre	-1179.800	-0.011	0	$4.454 \cdot 10^{-7}$	0	0.000
Novembre	-333.758	-0.023	0	168.357	-205.684	705.683
Décembre	-309.490	-0.022	0	145.134	$2.101 \cdot 10^{-10}$	$2.101 \cdot 10^{-10}$
Janvier	-140.253	-0.012	0	335.994	-418.905	1854.800
Automne	-232.425	-0.010	0	477.654	$1.445 \cdot 10^{-6}$	5.079
Été	-110.771	-0.009	0	0.110	$1.977 \cdot 10^{-13}$	152.336
Hiver	-582.426	-0.011	0	657.656	$3.185 \cdot 10^{-15}$	279.969
Total	-999.271	-0.001	0	400.531	-2068.600	0.636

Afin de vérifier l'hypothèse faite par nombre d'auteurs, que l'atmosphère est neutre pendant toute la journée, l'exposant  $n$  a été déterminé en utilisant toutes les données et en supposant l'atmosphère neutre, (1<sup>er</sup> estimation) puis en ne considérant que les données classées dans le cas quasi-stable de neutralité, (voir figure 12). On remarque que les courbes ont la même allure, mais que l'exposant diffère avec l'hypothèse. L'écart quadratique moyen calculé, est de l'ordre de 13%, ce qui ne justifie pas l'hypothèse de condition atmosphérique neutre.

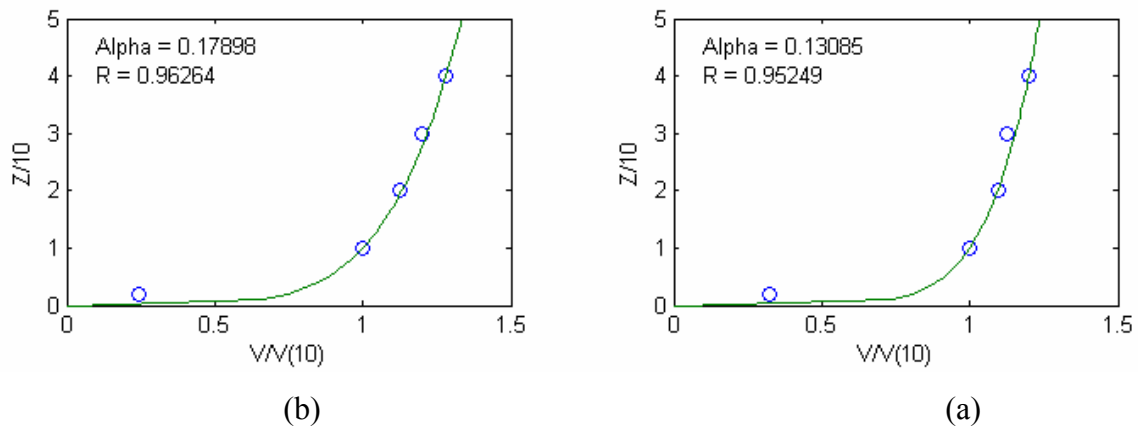


Fig. 12 : Comparaison du profil du vent sur toute la période de mesures pour une atmosphère neutre (a) et en faisant l'hypothèse d'une atmosphère neutre (b).

En figures 13 sont représentés les histogrammes en fréquences de la vitesse du vent calculée avec un pas de 1 m/s pour les niveaux de mesure 2 et 40 m, avec les courbes représentatives obtenues par l'ajustement au sens du maximum de vraisemblance, ceci en utilisant la distribution de Weibull.

Le facteur d'échelle et la vitesse moyenne du vent, passent du simple au double lorsque l'altitude de mesure varie de 2 m à 10 m. Près du sol, les valeurs enregistrées sont très variables. On note par ailleurs, que la proportion de vent faible diminue avec l'altitude et est inférieure à 3% à 40 m d'altitude.

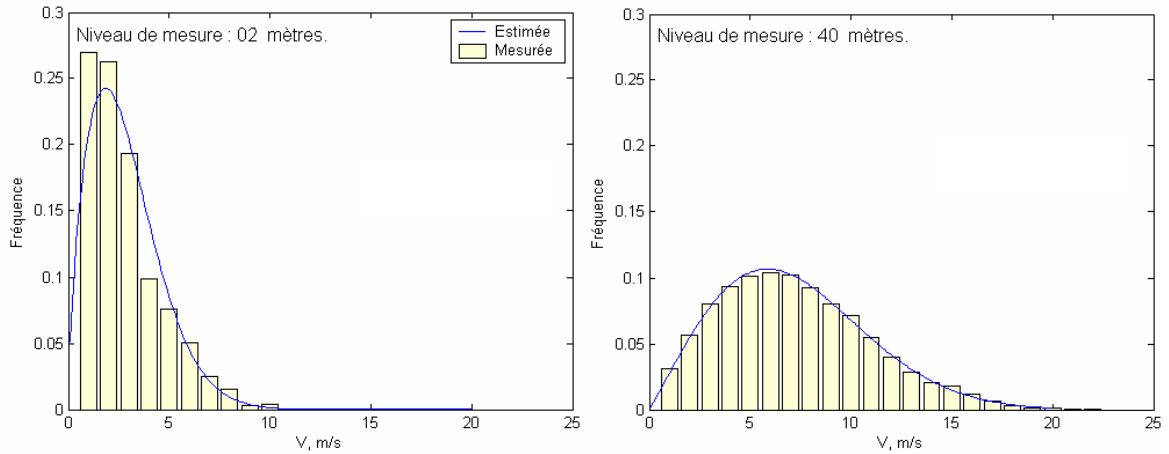


Fig. 13 : Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la distribution de Weibull, pour les altitudes 2 et 40.

L'extrapolation du facteur de forme d'un niveau à un autre se fait à l'aide de l'équation 3. Le facteur  $b_{10}$  est déterminé par saison et pour toute la période de mesures à l'aide du tracé de  $k/k_{10}$  en fonction de  $\log(z/10)$ , suivant les classes de stabilité, (voir figure 14).

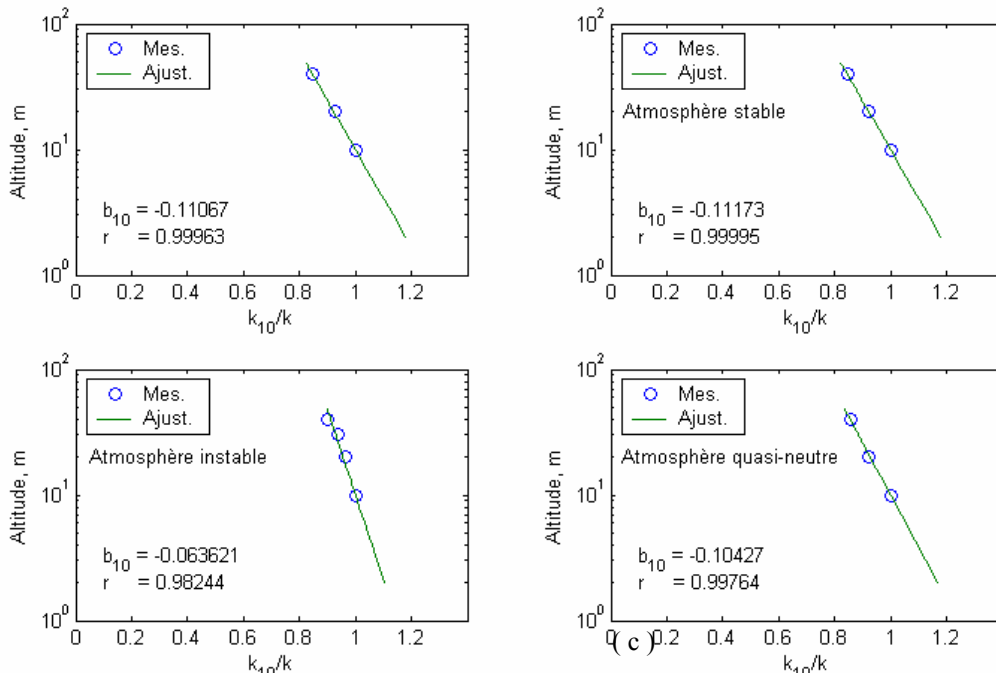


Fig. 14 : Variation du rapport de facteur de forme en fonction de l'altitude

Les points de mesure et la droite d'ajustement sont représentés sur les mêmes figures. La qualité de l'ajustement est représentée par la valeur du coefficient de corrélation. On constate que les coefficients estimés  $b_{10}$  sont proches pour le cas stable, quasi-neutre, ainsi que pour une stabilité confondue, alors qu'il est faible pour le cas instable.

La détermination du facteur d'échelle passe par le calcul de la constante  $a_{10}$  et de l'exposant  $n$  en fonction de  $\log(C_{10})$  pour toutes les catégories de données, mensuelles, saisonnières ainsi que pour toute la période de mesures.

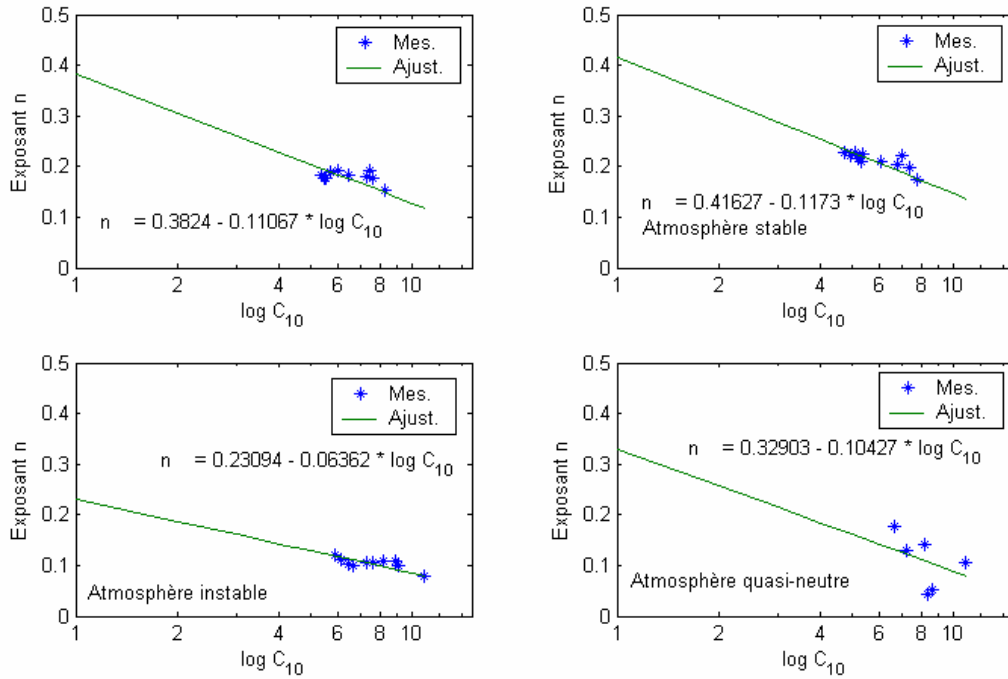


Fig. 15 : Variation de l'exposant  $n$  en fonction de  $\log(C_{10})$ .

fait à l'aide de l'équation 4. Les figures 15 représentent les nuages de points ainsi que les droites d'ajustement de l'exposant  $n$  par rapport au  $\log(C_{10})$  selon le type d'atmosphère. Le paramètre  $a_{10}$  déterminé par ajustement des données est proche pour les cas neutre, stable et quasi-neutre mais reste lointain pour le cas instable. Les résultats obtenus sont regroupés dans tableau 5 donnant l'expression de l'exposant selon le cas considéré. L'écart quadratique moyen (entre mesuré et estimé) calculé, est respectivement de 14% et 6% pour le paramètre  $a_{10}$  et  $b_{10}$ . Ce dernier est proche de celui obtenue lors du test de validation l'hypothèse de l'atmosphère neutre.

Tableau 5 : Expressions de l'exposant  $n$  de la loi de puissance

Condition atmosphérique	$n$	Condition atmosphérique	$n$
Stable	$n = \frac{0.41627 - 0.1173 \log C_1}{1 - 0.1173 \log \frac{z_1}{10}}$	/	$n = \frac{0.3824 - 0.11067 \log C_1}{1 - 0.11067 \log \frac{z_1}{10}}$
Instable	$n = \frac{0.23094 - 0.06362 \log C_1}{1 - 0.06362 \log \frac{z_1}{10}}$	Quasi-neutre	$n = \frac{0.32903 - 0.10427 \log C_1}{1 - 0.10427 \log \frac{z_1}{10}}$

(13)

## 4. SYNTHÈSE ET DISCUSSION

### 4.1- Validation

#### a- Validation des modèles d'interpolation

L'atlas vent établi, varie dans une gamme toute à fait vraisemblable et les zones particulièrement ventées se trouvent en altitude (Tiaret) ou dans des couloirs (Adrar, Ould Fayet et Ksar El Chellala) déjà signalés par les bulletins mensuels d'informations climatologiques et les travaux de Hammouche.

Pour valider le modèle d'AIOLOS, les mesures prélevées à 10 m sont traitées à l'aide de la distribution de Weibull et les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus après la projection des données mesurées à 3000 m au sol à l'aide, ceci en calculant l'erreur relative associée. Les écarts sont représentés figure 16 en fonction de l'altitude.

Avec des erreurs variant entre 10% et 21%, on peut conclure que l'utilisation du modèle AIOLOS pour la cartographie des vents pour les régions accidentées est acceptable, ceci compte tenu de la nature du vent et des problèmes de mesures.

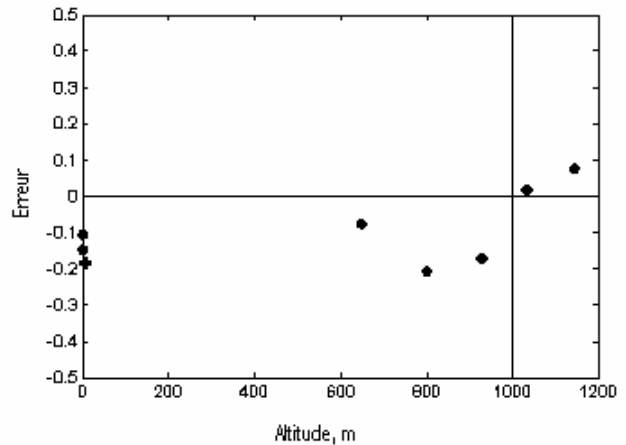


Fig. 16 Erreur relative entre les vitesses mesurées au sol et estimées par Ailos.

### b- Validation des modèles d'extrapolation verticale

Le modèle d'extrapolation proposé a été validé par comparaison des estimations avec les résultats statistiques de trois mois de mesures, non utilisées lors de l'établissement des formules. Les données ont été traitées pour chaque niveau de mesure (10, 30, 40 et 50m). Les paramètres de Weibull et la vitesse moyenne, estimés à 10m du sol, ont été extrapolés à l'aide des modèles établis pour le cas indifférent des conditions atmosphériques et pour les conditions stables à 30, 40 et 50m du sol.

En figure 17, représente la comparaison entre les résultats estimés et les valeurs mesurées de la vitesse du vent.

On remarque que les profils ont la même allure avec un écart qui augmente avec l'altitude. Lorsque ces dernières sont inférieures à 30 m les mesures s'ajustent avec la cas ou les conditions atmosphériques sont indifférentes aux mouvements de masses d'air. A partir de cette altitude les mesures s'ajustent avec les résultats obtenus dans les conditions instables.

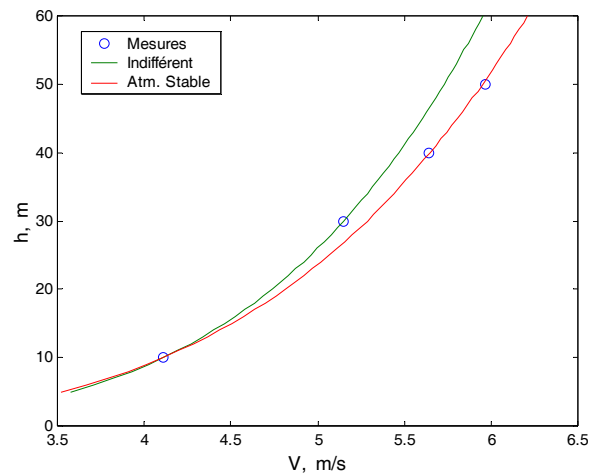


Fig. 17: Comparaison entre les vitesses mesurées et estimées en fonction de l'altitude..

### 4.2. Limites des modèles

69% des stations de mesures utilisées sont situées dans le nord de l'Algérie (longitude >32.5°). Certaines régions du nord ne sont pas suffisamment représentées à cause des accidents topographiques. Par ailleurs, 31% des stations de mesures sont situés sur plus de 80% du territoire. Pour bien représenter le territoire il faudrait doubler au moins le nombre de stations de mesures au nord et tripler le nombre au sud.

En figure 18, est montré l'influence des fréquences de vitesses nulles sur l'évolution statistique de la vitesse du vent de deux sites Oran et Tlemcen. Les fréquences des vitesses nulles respectives sont égales à 7% et 52%. Pour l'étude statistique, les distributions de Weibull et hybride Weibull sont utilisées. Alors que la distribution de Weibull semble adéquate pour le site d'Oran, cette dernière est totalement aberrante pour celui de Tlemcen. En effet, lorsque les fréquences des vitesses nulles sont élevées (>15%), l'utilisation de la distribution hybride de Weibull s'impose pour la caractérisation des vent.

Les premières limites du modèle AIOLOS, [9] sont d'ordre pratique. En effet, la pente entre deux points du maillage doit être < 25% sur toute la surface d'étude.

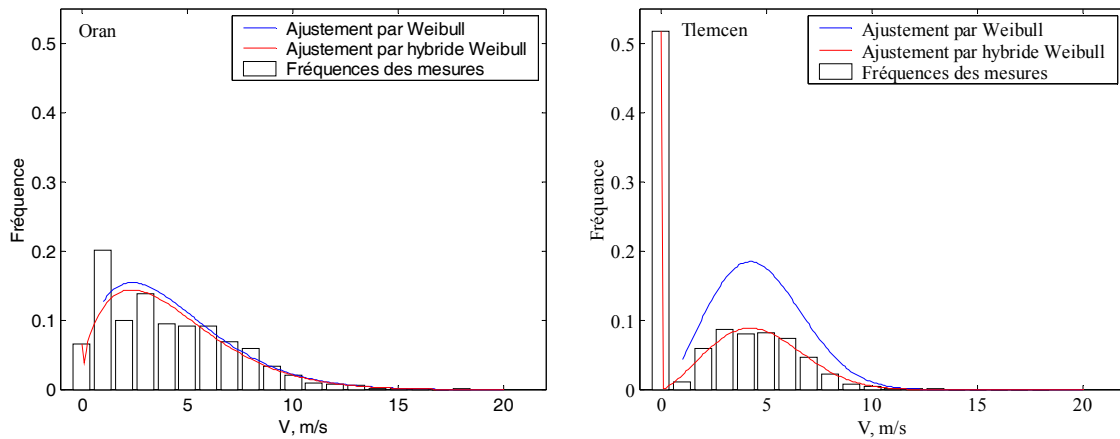


Fig. 18 : Effet de la fréquence nulle sur les fréquences pour deux sites Algériens.

Ceci implique que le code numérique n'accepte que les matrices dont la dimension maximale est inférieure ou égale à  $(80 \times 40)$ . Par ailleurs, la méthode de convergence utilisée est lente et limitée. En effet, après 100 itérations le résidu obtenu reste élevé. Les secondes limites apparaissent lors de l'établissement de l'atlas énergétique. Si l'écart obtenu (entre estimé et mesurés au sol) est inférieur à 16% pour la vitesse il passe de 29% à Annaba à 59% pour Oran, pour la densité de puissance. Par conséquent, le modèle AILOS n'est pas recommandé pour l'estimation de la densité de puissance.

Concernant les modèles d'extrapolation leurs limites résident dans le fait que les effets liés à la rugosité du sol n'ont pas été mis en évidence puisque l'étude a été réalisée au niveau d'un seul mât. Par ailleurs, Le modèle d'extrapolation de la vitesse du vent a été validé pour des altitudes allant de 0 à 50m. Au-delà, il est préférable de procéder à la vérification des formules.

Les effets de la vitesse de démarrage et nominale d'un aérogénérateur sur la vitesse cubique moyenne utile de trois sites algériens sont représentés en figures 19 et 20.

On remarque que l'effet de la vitesse nominale est similaire pour les trois sites avec un décalage dans les gammes de variation alors que l'effet de la vitesse de démarrage est plus significatif et dépend essentiellement du site d'implantation de l'aérogénérateur.

### 4.3. Vents dominants

La vitesse moyenne et les fréquences des différents secteurs déterminés pour deux sites algériens, Djelfa et Ksar El Chellala, sont représentées en figure 21. Les vents dominants du site de Djelfa sont dans la direction Nord-ouest (40%) avec une vitesse de 4.2m/s alors que ceux de Ksar El Chellala, sont Ouest avec une vitesse maximale enregistrée dans la direction Sud (6.6 m/s). Les résultats obtenus indiquent que les secteurs et vitesses du vent sont dominants, selon le Nord et Ouest et que les vents Sud sont affaiblis par ceux du Nord.

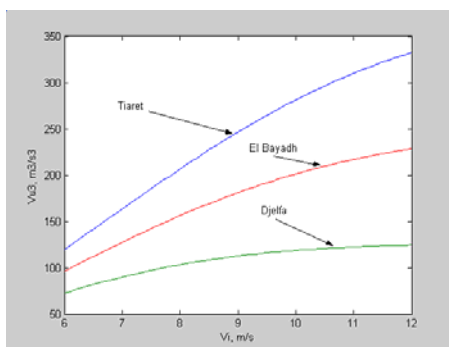


Fig. 19 : Effet de la vitesse de démarrage

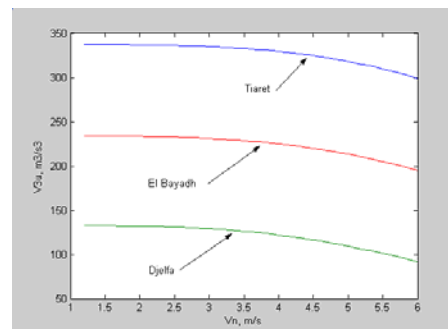


Fig. 20 : Effet de la vitesse nominale.

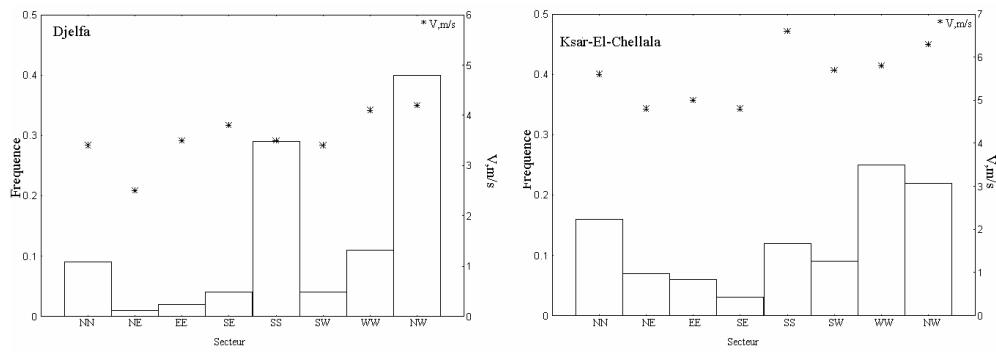


Fig. 21 : Fréquences des secteurs et vitesses moyennes des stations au sol

#### 4.4. Comparaison des modèles d'interpolation

En figure 22 est donnée la comparaison des atlas extrapolés à 50 m suivant le modèle de Justus et Mikhaïel, [15] et celui proposé.

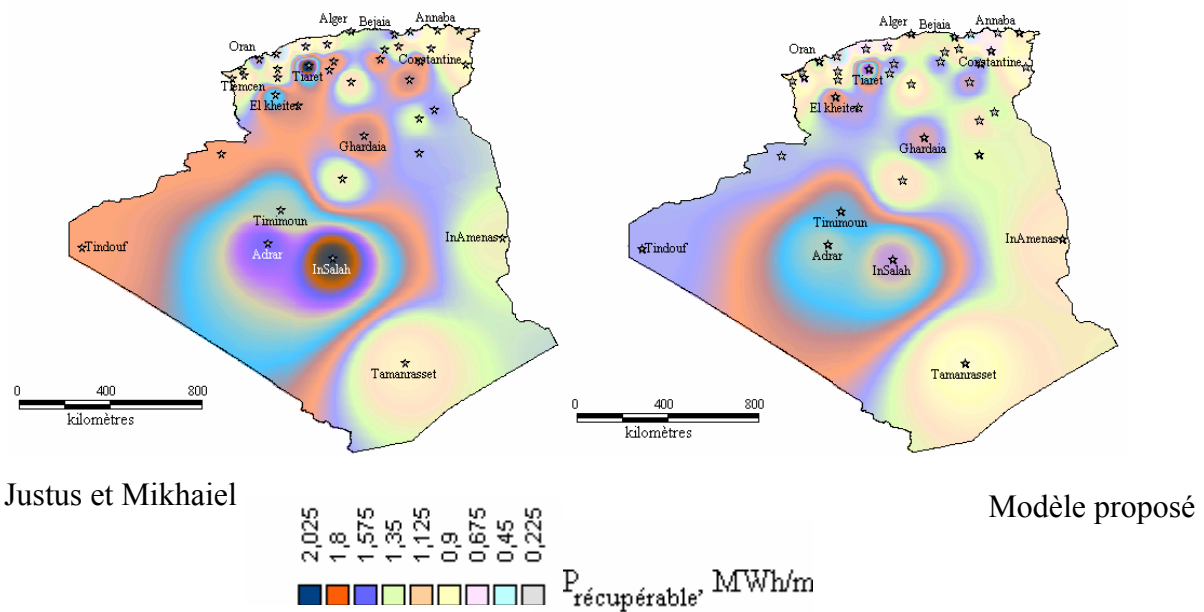


Fig. 22 : Comparaison des atlas à 50 m extrapolé suivant le modèle de Justus et Mikhaïel et le modèle proposé.

On remarque que le modèle de Justus et Mikhaïel, [15] surestime le potentiel éolien récupérable par rapport au modèle proposé dans les régions du sud ouest et des hauts plateaux.

#### 4.5 Comparaison des modèles d'extrapolation verticale

Les vitesses moyennes extrapolées à l'aide du modèle proposé ont été comparées avec les plus usités dans la littérature, à savoir la loi de puissance de Justus et Mikhaïel [15], la loi de puissance modifiée de Justus, [16] et la loi de puissance Modifiée de Mikhaïel, [17]. Les résultats obtenus sont donnés en figure 23. Les courbes de la loi de Justus et la loi proposée sont proches des points de mesure. En effet, les écarts entre les mesurées et les estimées par les

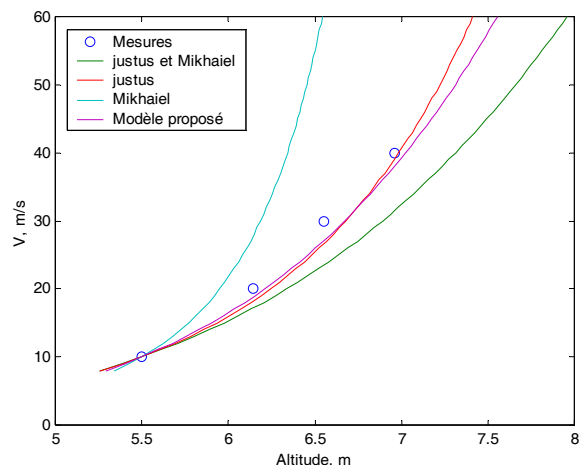


Fig. 23 : Comparaison des résultats des modèles avec les mesures



(tableau 6) sont faibles pour la vitesse moyenne obtenus pour le modèle de et la loi proposée, mais s'éloignent pour les vitesses cubiques moyennes. L'effet sur la puissance éolienne est donc plus significatif.

Tableau 6 : Ecart relatif moyen de la vitesse moyenne et cubiques moyennes

Modèle	Ecart (V), %	Ecart (V <sup>3</sup> ), %
Loi de puissance de Justus et Mikhaïel	7.54	32.44
Loi de puissance modifiée de Justus	2.52	18.33
Loi de puissance modifiée de Mikhaïel	11.88	22.62
Loi proposée	2.27	13.87

#### 4.6. Fréquence nulles et cartes des vent

L'effet des fréquences nulles sur les atlas est mis en évidence en figure 24, ou sont comparées les atlas de la vitesse du vent tracés à l'aide de la distribution de Weibull et la distribution hybride de Weibull. Si la distribution de Weibull surestime l'évolution de la vitesse du vent, l'utilisation généralisée de la distribution hybride de Weibull pénalise certains sites, le plus évident est le site de Tindouf. L'atlas le plus correcte serait celui présenté en figure 25 tracé à l'aide de la combinaison des deux distributions selon la fréquence de la vitesse nulle.

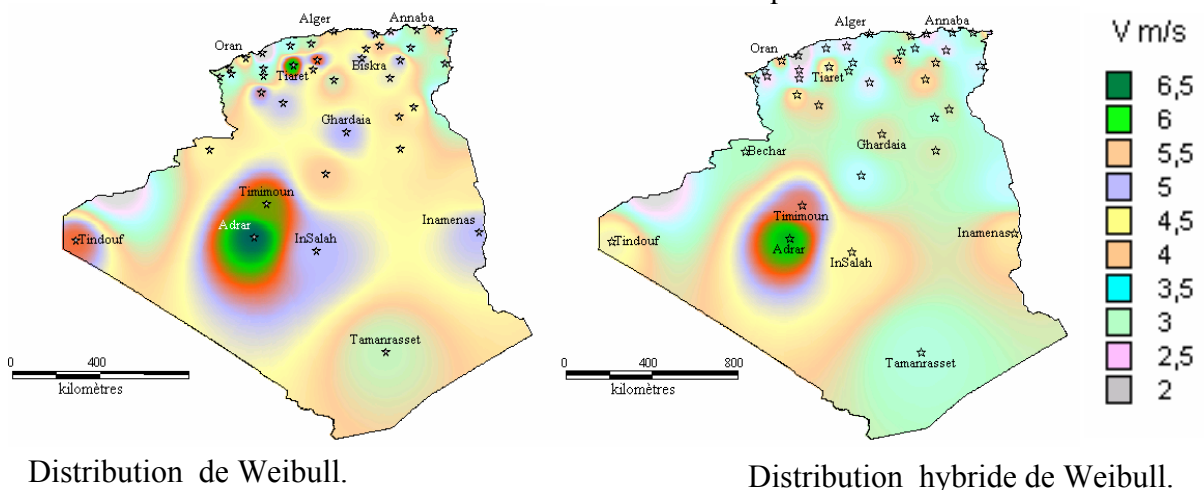


Figure 24 : Effet des fréquences nulles sur l'atlas des vents

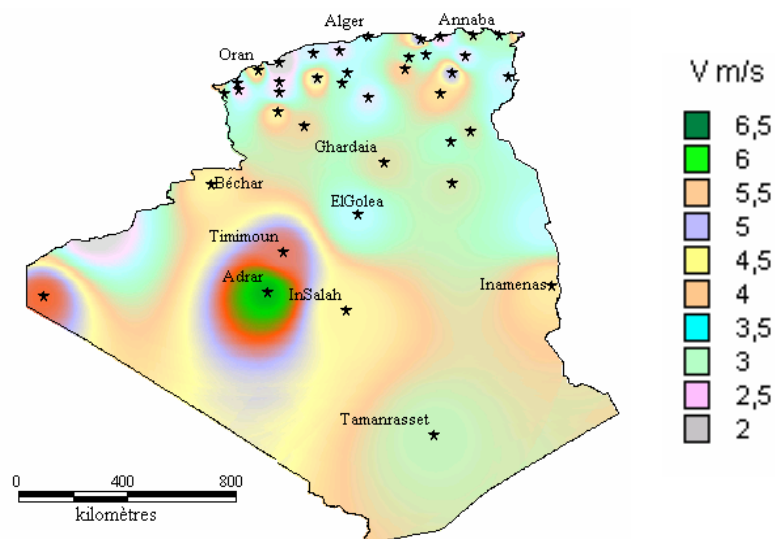


Fig. 25 : Atlas tracé avec la combinaison des distributions Weibull et hybride Weibull à 10m du sol

#### 4.7. Atlas Eolien de l'Algérie

En Figure 26 représente l'atlas de la vitesse du vent à 50m du sol, établi à l'aide de la combinaison des lois de Weibull et hybride Weibull (selon la fréquence des vitesses nulles) et du modèle d'extrapolation proposé. La carte montre que les sites les plus ventés sont ceux d'Adrar et Tiaret avec des vitesses du vent approchant les 9m/s.

L'atlas de la densité de puissance récupérable à 50m est représenté en figure 27. On notera que la combinaison des lois précitées entraîne une classification complètement différente de celle obtenue au chapitre 2. En effet, le site de Tiaret apparaît comme le site le plus intéressant avec 3.4 MWh/m<sup>2</sup> suivi de celui d'Adrar qui prend le dessus sur les autres sites du sud du pays.

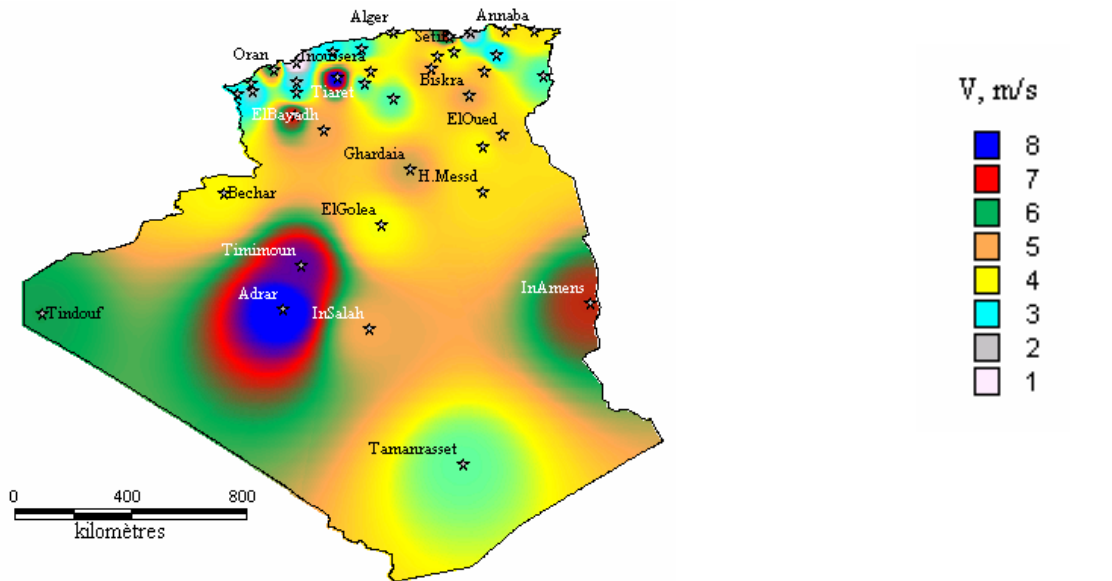


Figure 26 : Atlas de la vitesse du vent à 50 m d'altitude.

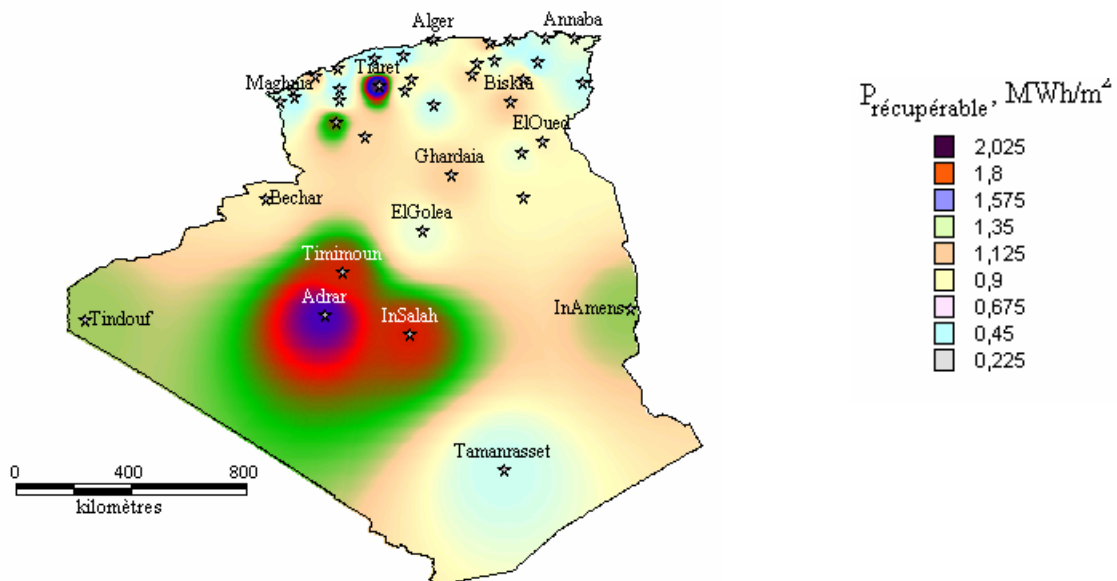


Figure 27 : Atlas de la densité de puissance énergétique à 50 m

## 5. APPLICATION ET PERSPECTIVES

### 5.1 Application du pompage en Algérie

La variation à l'échelle du mois des vitesses cubiques moyenne et moyenne utile du vent de deux sites algériens, Tiaret et El Bayadh et pour trois aérogénérateurs différents, ( $P_{\text{nominale}}=100, 600 \text{ et } 850 \text{ kW}$ ,  $V_{\text{démarrage}}= 3.5, 3 \text{ et } 4 \text{ m/s}$ ,  $V_{\text{nominale}}= 8, 15 \text{ et } 16 \text{ m/s}$ ) sont représentées en figure 28. Les aérogénérateurs de puissances nominaux 600 et 850 kW ont des densités de puissance pratiquement identiques et nettement plus élevées que celles obtenues avec le 100 kW. Pour le site de Tiaret, le choix le plus adéquat dépendra des besoins locaux, les résultats diffèrent seulement par les diamètres respectifs des rotors. Pour le site d'El Bayadh, la puissance utilisable est pratiquement uniforme durant l'année, ceci implique que l'étude à l'échelle annuelle suffit pour choisir la machine adéquate au site. La baisse estivale constatée pour Tiaret peut être compensé par le rajout d'un système d'appoint classique ou solaire, (système hybride). En Considérant un système de pompage éolien de rendement global  $\eta_i$  et de hauteur manométrique totale  $H_t$ , le débit journalier d'eau pompé est donné par :

$$Q_d = 3600 * 24 * \frac{\eta_i \langle P_e \rangle}{\bar{\rho} g H_t} \quad (14)$$

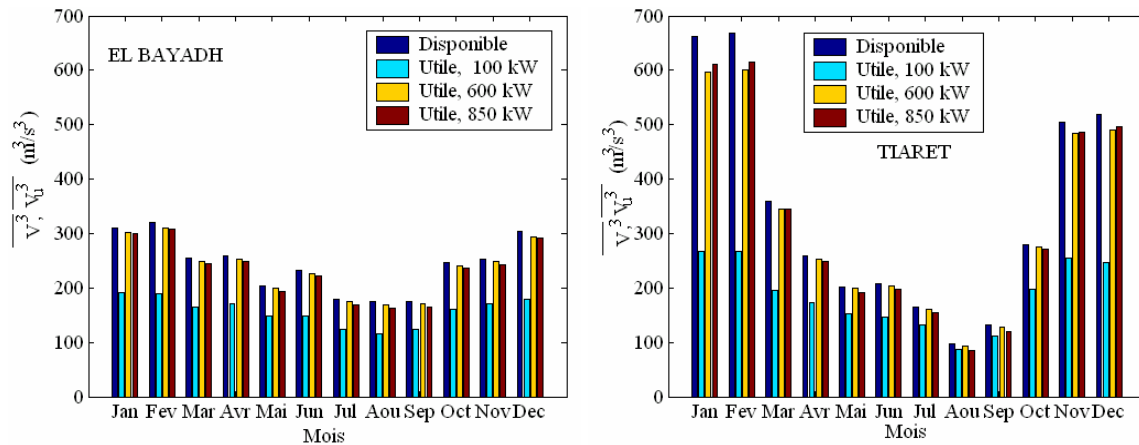


Fig.28 : Potentialités des sites pour différents aérogénérateurs.

Pour tenir compte de tous les besoins, quatre aérogénérateurs ont été choisis, deux aérogénérateurs de petites puissances nominales, respectivement, 3 et 12 kW et deux autres de 0,6 et 1MW. Le rendement global de la pompe-génératrice a été pris égal respectivement à 25% et 55% pour les petites machines et les grandes puissances.

Les résultats de la figure 29 montrent que, pour une hauteur manométrique de 30m, un aérogénérateur de 3 kW de puissance nominale peut pomper entre 30 et 70m<sup>3</sup>/j alors que la 12 kW produit entre 70 et 150 m<sup>3</sup>/j pour une hauteur manométrique totale de 50m. Pour les aérogénérateurs de grande puissance, la quantité de l'eau pompée peut répondre aux besoins les plus élevés exprimés dans ces régions. A 100m, le volume d'eau pompé est de 3300m<sup>3</sup>/j à InSalah et 8700m<sup>3</sup>/j à Adrar.

Les éoliennes mécaniques utilisées pour le pompage d'eau sont généralement multipâles avec de faibles vitesses de rotation. Les éoliennes choisies pour le pompage mécanique sont installées à 10 m du sol, avec un diamètre de l'hélice de 4 et 7m et un rendement Convertiseur-pompe de l'ordre de 60%.

Les débits pompés par les éoliennes, (voir figure 2.30) sont plus important comparés à ceux pompés par les aérogénérateurs de petite puissance en mode électrique, mais des contraintes (derrick au dessus du puits et profondeur de puits inférieure à 35 m) pénalisent ce mode d'utilisation. Pour une hauteur manométrique totale de 50m, le débit pompé est de l'ordre de

50 m<sup>3</sup>/j pour In Amenas, toutefois, il est clair que les débits pompés avec les aérogénérateurs de grandes puissances sont plus importants et offrent de grandes possibilités.

## 5.2 Perspectives

L'étude ouvre la voie à plusieurs perspectives, à savoir :

- Affiner les atlas grâce à la densification des points de mesure.
- Les microclimats ventés étant connus, il faudrait les caractériser et cerner au mieux le potentiel disponible en installant des point de mesures peu distants

Etablir des atlas des vitesses du vent par secteurs pour permettre la détermination des secteurs dominants et définir la même l'orientation adéquate des

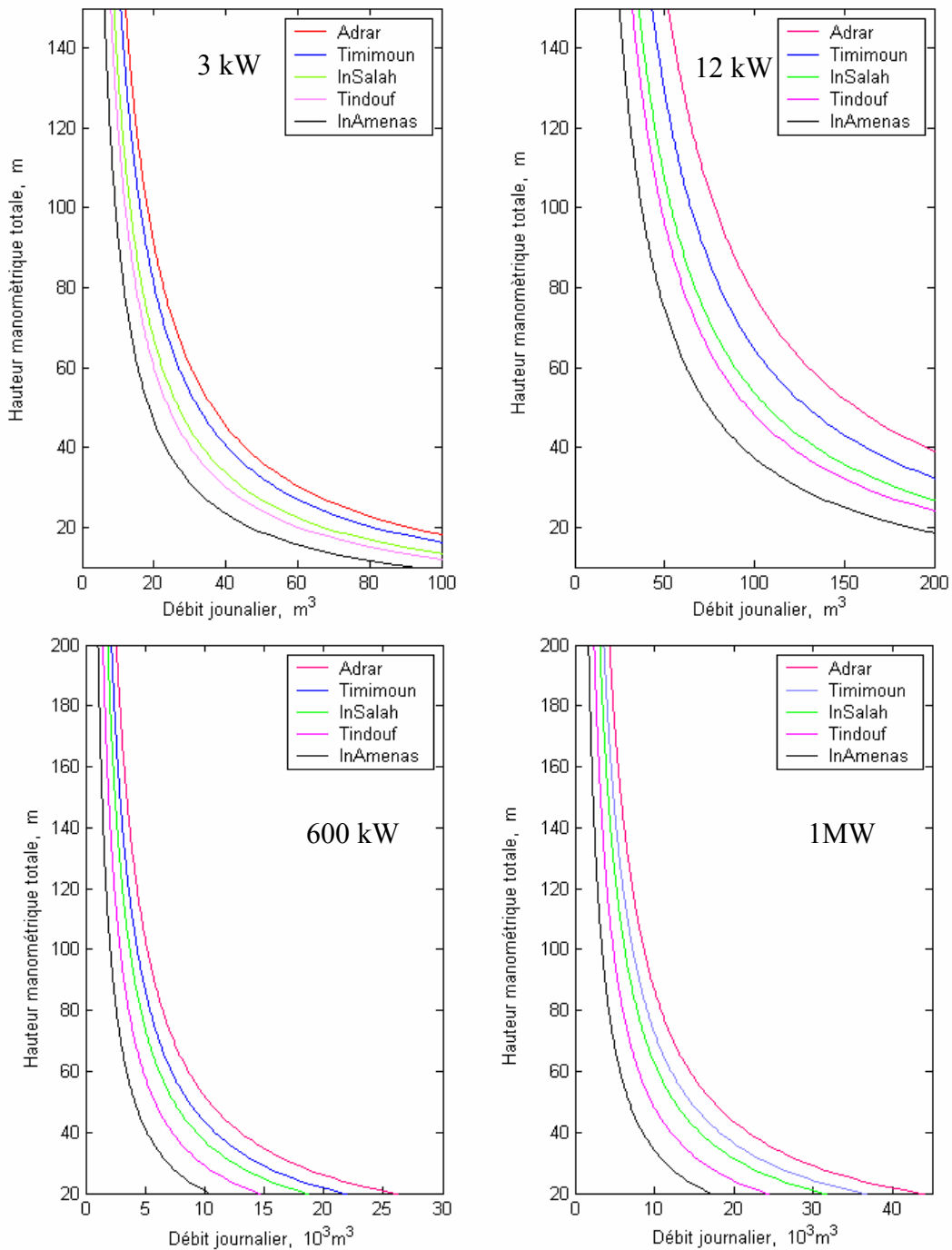


Fig. 29 : Débit d'eau pompée pour six sites en fonction de la hauteur manométrique totale.

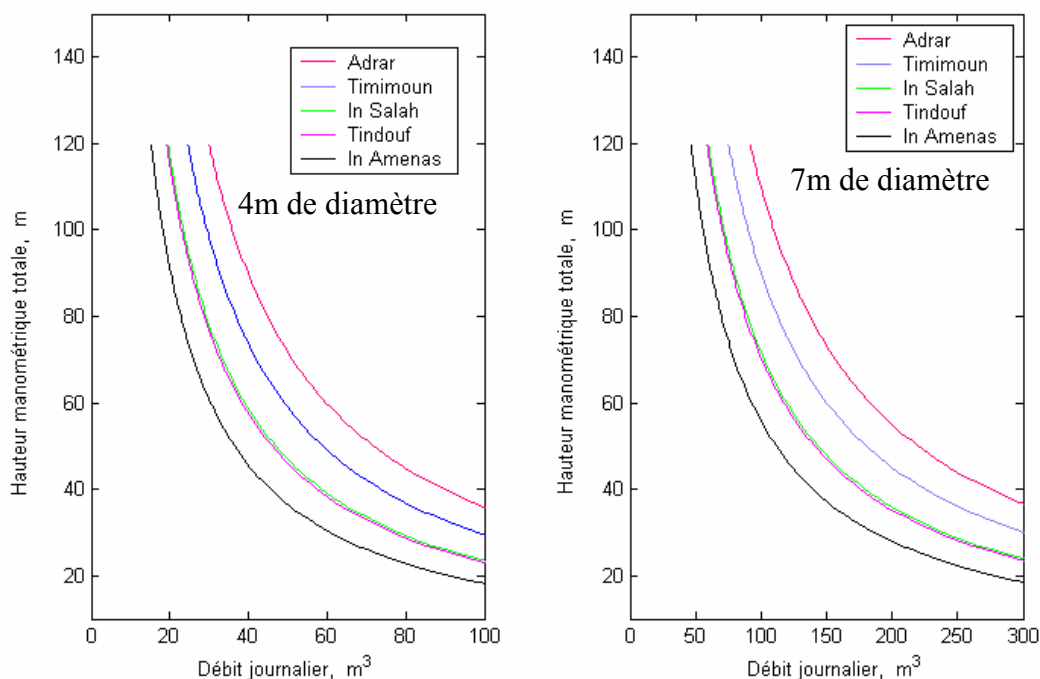


Fig. 30 : Débit d'eau pompée pour six sites en fonction de la hauteur manométrique totale, en mode mécanique.

- aérogénérateurs.
- Superposer les atlas a ceux de la topographie et du réseau de moyenne tension de Sonelgaz pour pouvoir trouver les points susceptible de recevoir des aérogénérateurs et optimiser les puissances à installer selon les potentialités des sites.

Le modèle d'extrapolation proposé pourrait être amélioré grâce :

- à la multiplication des mâts en divers points du territoire différents par le climat, la nature du sol pour tester le modèle proposé sur d'autres sites du territoire.
- Porter la hauteur à 100m avec un pas de 2 m de 2 à 10 m du sol, et un pas de 10m à partir de 10 m du sol.
- augmenter la précision des capteurs (ordre du 1/100)

## 6. CONCLUSION

Partant des mesures des paramètres vent, les variations journalières, mensuelles et annuelles du vent, ont été établies. L'étude statistique des mesures a permis la détermination des paramètres de Weibull nécessaires pour la caractérisation éolienne d'un site donné. L'interpolation spatiale des mesures de la vitesse du vent de 68 stations a permis l'établissement des atlas vent annuels et saisonniers aux échelles nationale et microclimatique. Enfin l'atlas de la densité d'énergie récupérable a été tracé.

Le site ainsi, le dispositif expérimental et les mesures utilisées, pour l'extrapolation verticale des paramètres de Weibull et de la vitesse moyenne du vent ont été présentés. Les mesures recueillies ont été classées par classe de stabilité atmosphérique. Ceci a permis la proposition d'une loi d'extrapolation qui s'adapte au mieux aux climats semi-arides

Les modèles d'interpolation au sol et d'extrapolation verticale de la vitesse du vent ont été validés. Les résultats obtenus sont corrects. Au vu des limites présentées, cette étude mérite d'être poursuivie par l'augmentation des mesures au sol et le test de la loi d'extrapolation à des altitudes supérieures à 50 m.

L'application au pompage saharien à partir d'aérogénérateurs et de machines éoliennes a montré la puissance récupérée à la sortie machines représente moins de 30% du potentiel

disponible. Les abaques des débits journaliers pompées, tracées pour les sites sahariens peuvent aider aux choix de l'aérogénérateurs ou l'éolienne adéquate selon la profondeur des forages et les potentiel énergétiques disponible d'un site donné.

Enfin, l'installation et le suivi de petites et moyennes éoliennes sera le meilleur moyen de juger de la faisabilité et des corrections pour le futur. En effet, il faut précéder toute installation éolienne par une campagne de mesures, de six mois minimum.

## REFERENCES

1. Pacific Northwest Laboratory, « Wind Energy Ressource Atlases », Vol. 1 et 2 PNL-3194. Pacific Northwest Laboratory Richland, Washington, D.C., USA, 1981
2. Troen I. et E.L. Petersen, « European Wind Atlas », Riso National Laboratory, Roskilde, Danmark, 1989.
3. Said M et A. Ibrahim, « Energy in the Arab World. Energy », N° 9-3, pp. 217-38, 1984.
4. Bensaïd H., « The Algerian Programme on Wind Energy ». Proceeding of WEAC, pp. 21-27, Oxford, 1985.
5. Hammouche R., « Atlas Vent de l'Algérie/ONM ». Office des Publications Universitaires (OPU), Alger 1990.
6. Kasbadji Merzouk N., « An Evaluation of Wind Energy Potential in Algeria ». Proceeding of EWEC'94 congress, Thessaloniki, Grèce, 1994.
7. Cuntry G., « Eoliennes et Aérogénérateurs », EDISUD/Technologie douce, 1979.
8. Kasbadji Merzouk N. et H. Daaou, « Atlas Energétique Eolien de l'Algérie », SIPE5, Béchar, Algérie 2000.
9. Lalas D. P. Wind « Energy Estimation and Sitting in Complex Terrain » Int. Jour. Solar Energy, vol. 3, pp. 43-71, 1985
10. Kasbadji Merzouk N. et H. Daaou, « Atlas Energétique Eolien de l'Algérie », SIPE5, Béchar, Algérie 2000.
11. Technical note of WMO, « Meteorological Aspect of the Utilisation as an Energy Sources », N°175, 1981.
12. Takle E.S. et Brown J.M. «Note on the Use of Weibull Statistic to Characterize Wind Speed Data ». Journal of applied Meteorology, N° 17, 1978.
13. Monin A.S. et A.M. Obukov, « Basic Regularity in Turbulent Mixing Surfaces Layer of the Atmospheric », Akad. Nauk. S.S.S.R., Trusd Geof. Inst, 24, 151, 1954.
14. Dyer A.J., « A Review of Flux Profile Relationships ». Boundary Layer Meteorology, 7, pp. 363-372, 1974.
15. Justus C.G. et A. Mikhail « Height Variation of Wind Speed and Wind Distributions Statistics ». Geophysical Research Letters, vol. 3, N° 5, 1976.
16. Mikhail A.S, « Height Extrapolation of Wind Data » Transaction of ASME, vol. 107, pp. 10- 14, 1985.
17. Poje S. et B. Cividini, « Assessment of Wind Energy Potential in Croatia » Solar Energy vol.41 N°6 pp 543 554, 1988.