



**Département d'Electronique**

**Laboratoire des Dispositif de Communication et de Conversion Photovoltaïque**

## **Thèse de Doctorat**

Présentée par : **Chellali Farouk**

**Thème**

---

# **Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie**

---

Président :	M. Haddadi	Professeur (ENP).
Directeurs de thèse:	A. Khellaf	Directeur de recherche (CDER).
	A. Belouchrani	Professeur (ENP).
Examineurs :	J.L Lacoume	Professeur Emérite (INP Grenoble).
	A. Serir	Maître de conférences (USTHB).
	R. Dizene	Professeur (USTHB).
	M. Belhamel	Directeur de recherche (CDER).
Invitée :	N. Merzouk-Kasbadji	Directrice de recherche (CDER).

**- Avril 2011-**

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER

# بسم الله الرحمن الرحيم

## ملخص

**ملخص:** إن الرياح ظاهرة معقدة يمكن دراستها من مختلف النواحي و على عدة أصعدة. تقترح هذه الأطروحة في دراسة السلوك العشوائي و الدوري للرياح في الجزائر. و قد قسمت إلى ثلاث أقسام :

**القسم الأول:** يتمثل في تطوير دالة كثافة الاحتمالات لسرعة الرياح و ذلك باعتماد مبدأ الكون الأقصى. بعد مقارنة نتائج هذه الأخيرة مع دالة ويبيل, اتضح انها تقدم نتائج أفضل.

**القسم الثاني:** يتمثل في دراسة السلوك الدوري لسرعة الرياح باعتماد التحليل الزمن-دوري.

**القسم الثالث :** يتمثل في إنشاء نماذج لمحاكاة سرعة الرياح. لهذا الغرض نقترح النموذج التراجمي ذو المعدل المتغير إضافة إلى نماذج الشبكات العصبية و قد سمحت هذه النماذج بالتنبؤ بسرعة الرياح لفترات قصيرة.

**كلمات مفتاحية :** السلوك العشوائي للرياح, السلوك الدوري للرياح , دالة كثافة الاحتمالات , التحليل الزمن-دوري , النموذج التراجمي ذو المعدل و الى نماذج الشبكات العصبية.

## RÉSUMÉ

**Résumé :** Le vent est un phénomène atmosphérique complexe qu'on peut étudier de plusieurs façons sous différentes échelles. Dans ce travail, on propose d'étudier le comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie. L'analyse du problème posé est scindée en trois parties. Dans la première, on modélise la densité de probabilité du vent tout en introduisant l'approche du maximum d'entropie dont les performances statistiques, obtenues à l'aide de cette dernière, sont comparées à celles issues de l'utilisation de la distribution conventionnelle de Weibull. Cette comparaison montre que l'approche qu'on propose est bien meilleure en termes d'erreur quadratique moyenne. Dans la deuxième partie, on étudie le comportement cyclique du vent en utilisant l'analyse temps-fréquence afin de suivre les variations du contenant spectral du vent par rapport au temps. Enfin dans la troisième partie, on effectue une anticipation de la vitesse du vent à court terme à l'aide de modèles auto récurrents, à moyennes ajustées, et à l'aide de modèles basés sur la théorie des réseaux de neurones.

**Mots clés :** Comportement stochastique du vent, comportement cyclique du vent, densité de probabilité du vent, principe du maximum d'entropie, analyse temps fréquence, modèles auto récurrents, réseaux de neurones.

## ABSTRACT

**Abstract :** Wind is a very complex phenomena that can be studies in different ways and at different levels. In the following work, we propose to carry out a study on the stochastic as well as the cyclical behavior of wind in Algeria. The problem analysis is structured in three parts. In the first study, we propose a new zind probability density by exploiting the principle of the maximum entropy. The statistical comparison between the performances of this approach with that of the conventional Weibull distribution has indicated that the proposed approaches are better in terms of RMSE. The second study is carried out on the analysis of the cyclical behavior of wind. In this part we used the time-frequency analysis to track the variations of the spectral content of the wind with respect to time. The third study deals with the modeling of wind speed. Moving average auto-recursive models and models based on the theory of neural networks are used to model than to predict the wind speed in the short term.

**Keywords :** Wind speed, stochastic behavior, cyclical behavior, probability density, the maximum entropy principle, time-frequency analysis, auto-recursive models, neural networks.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> . . . . .	<b>v</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> . . . . .	<b>x</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> . . . . .	<b>xii</b>
<b>DÉDICACE</b> . . . . .	<b>xv</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> . . . . .	<b>xvi</b>
<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>CHAPITRE 2 : NOTIONS DE BASE SUR LE VENT</b> . . . . .	<b>9</b>
2.1 Type de vent . . . . .	9
2.1.1 Vents Globaux . . . . .	9
2.1.2 Vents locaux . . . . .	11
2.1.3 Vent de surfaces . . . . .	12
2.2 Propriétés du vent . . . . .	13
2.2.1 Accélération et Turbulence . . . . .	13
2.2.2 Oscillations du vent . . . . .	13
2.3 Mesure des paramètres du vent . . . . .	15
2.3.1 Indicateurs écologiques . . . . .	15
2.3.2 Anémomètres et Girouette . . . . .	17

2.3.3	La rose des vents . . . . .	18
2.3.4	Vitesses moyennes de référence . . . . .	19
2.3.5	Classification des Vents (Echelle du Beaufort) . . . . .	19
2.4	Energie et puissance du vent . . . . .	21
2.4.1	Energie du vent . . . . .	21
2.4.2	Puissance du vent . . . . .	21
2.5	Contribution à la mise à jour de la carte du vent en Algérie . . . . .	22
2.6	CONCLUSION . . . . .	28
<b>BIBLIOGRAPHIE . . . . .</b>		<b>31</b>
<b>CHAPITRE 3 : DENSITÉ DE PROBABILITÉ DE LA VITESSE DU VENT</b>		<b>35</b>
3.1	Rappel sur les processus aléatoires . . . . .	36
3.1.1	Processus aléatoire . . . . .	36
3.1.2	Espérance mathématique . . . . .	36
3.1.3	Variance et écart type . . . . .	37
3.1.4	Fonction de corrélation . . . . .	37
3.1.5	Processus aléatoire stationnaire . . . . .	38
3.1.6	Ergodicité . . . . .	39
3.2	Distribution de Weibull . . . . .	39
3.2.1	Densité de probabilité à deux paramètres . . . . .	39
3.2.2	Estimation des paramètres de Weibull . . . . .	42
3.3	Principe du maximum d'entropie (PME) . . . . .	44
3.3.1	Distributions PME . . . . .	45
3.3.2	Distributions type-PME . . . . .	46
3.4	Distribution hybride . . . . .	46
3.5	Puissance du vent . . . . .	47
3.6	Résultats et discussions . . . . .	47
3.6.1	Distribution PME . . . . .	48
3.6.2	Distribution type-PME . . . . .	52
3.7	Conclusion . . . . .	59

<b>BIBLIOGRAPHIE</b> . . . . .	<b>61</b>
<b>CHAPITRE 4 : ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE DE LA VITESSE DU VENT EN ALGÉRIE</b> . . . . .	<b>65</b>
4.1 Estimation spectrale . . . . .	66
4.1.1 Signal déterministe . . . . .	66
4.1.2 Processus aléatoire . . . . .	67
4.1.3 Estimation de la densité spectrale . . . . .	68
4.2 Représentations temps-fréquence. . . . .	71
4.2.1 Transformée de Fourier à court terme . . . . .	71
4.2.2 Transformée en Ondelettes . . . . .	72
4.3 Résultats et discussions . . . . .	77
4.4 Conclusion . . . . .	87
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> . . . . .	<b>88</b>
<b>CHAPITRE 5 : MODÉLISATION ET PRÉDICTION DE LA VITESSE DU VENT</b> . . . . .	<b>92</b>
5.1 Modèles auto- récursif à moyenne mobile (ARMA) . . . . .	93
5.1.1 Transformation de puissance . . . . .	93
5.1.2 Normalisation . . . . .	94
5.1.3 Modélisation par ARMA . . . . .	95
5.1.4 Détermination de l'ordre . . . . .	95
5.1.5 Estimation des paramètres . . . . .	96
5.1.6 Validation des modèles . . . . .	96
5.2 Réseaux des Neurones . . . . .	97
5.2.1 Structure des réseaux de neurones . . . . .	97
5.3 Le modèle de persistance . . . . .	99
5.4 Résultats et discussions . . . . .	100
5.4.1 Modèles ARMA . . . . .	100
5.4.2 Les Modèles ANN . . . . .	104

5.4.3	Prédiction . . . . .	105
5.5	Conclusion . . . . .	108
	<b>BIBLIOGRAPHIE . . . . .</b>	<b>109</b>
<b>6 :</b>	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .</b>	<b>112</b>



**LISTE DES ANNEXES**

**Annexe I : Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME**  
..... xviii

**Annexe II : L'algorithme de Levenberg-Marquardt** . . . . . xxii

## LISTE DES TABLEAUX

2.I	Echelle de Beaufort. . . . .	20
2.II	Les moyennes mensuelles et annuelles de la vitesse du vent (m/s) à 10 m d'altitude. . . . .	24
3.I	Caractéristiques descriptives de la vitesse du vent dans les sites choisis. . . . .	48
3.II	RMSE des distributions de Weibull et PME/Type-PME pour les sites d'Annaba, Oran, Batna, Ghardaïa, Inamenass et Adrar. (Les distributions ayant les minimums RMSE et RMSE-P sont en gras). . . . .	49
3.III	Valeurs des paramètres des distributions Weibull et PME / Type- PME ayant les meilleures performances . . . . .	50
3.IV	Les valeurs des moments temporels et les moments statistiques des distributions de Weibull et PME / Type-PME ayant les meilleures performances . . . . .	51
5.I	Les caractéristiques des distributions du vent et les modèles ARMA sélectionnés pour chaque mois. . . . .	103
5.II	Le test de Ljung-Box. . . . .	104
I.I	Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site d'Annaba. . . . .	xviii
I.II	Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site d'Oran. . . . .	xix
I.III	Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site de Batna. . . . .	xix
I.IV	Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site de Ghardaia. . . . .	xx
I.V	Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site de Inamenass. . . . .	xx

I.VI Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour  
le site de Adrar. . . . . xxi

## LISTE DES FIGURES

2.1	Mouvement général de l'air en atmosphère. . . . .	10
2.2	Forces de Coriolis. . . . .	10
2.3	Vents locaux. . . . .	11
2.4	Passage du flux d'air sur un obstacle. . . . .	14
2.5	Le spectre de la vitesse du vent basé sur les travaux de Van der Hoven[2]. . . . .	14
2.6	Schémas des différents types de dunes [5]. . . . .	15
2.7	Dunes souvent rencontrées dans le Sahara Algérien [Google earth].	16
2.8	Classification de Putnam[6]. . . . .	17
2.9	Indicateurs biologiques. . . . .	17
2.10	Ensemble d'un anémomètre et girouette. . . . .	18
2.11	La rose des vents. . . . .	19
2.12	Déplacement d'une coulisse d'air. . . . .	21
2.13	Cartes annuelles à 10 m d'altitude. . . . .	25
2.14	La répartition annuelle de la vitesse du vent en Algérie en haut projetée sur l'altitude en bas. . . . .	26
2.15	Cartes mensuelles du vent en Algérie. . . . .	27
3.1	La distribution de Weibull pour plusieurs valeurs de c et k . . . . .	40
3.2	Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site d'Annaba. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent . . . . .	53
3.3	Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site d'Oran. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent . . . . .	54
3.4	Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site de Batna. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent . . . . .	55

3.5	Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site de Ghardaia. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent . . . . .	56
3.6	Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site d'Inamenass. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent . . . . .	57
3.7	Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site d'Adrar. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent . . . . .	58
4.1	Segmentation de Welch . . . . .	70
4.2	Analyse de Fourier pour un signal limité dans le temp. . . . .	71
4.3	Les scalogrammes des signaux de la figure 4.2 . . . . .	75
4.4	Les périodogrammes de Welch de la vitesse du vent pour les mois de Janvier et de Juillet. . . . .	78
4.5	Les scalogrammes de la vitesse du vent. (a) Annaba, (b) Oran. . .	80
4.6	Les scalogrammes de la vitesse du vent. (a) Batna, (b) Ghardaia. .	81
4.7	Les scalogrammes de la vitesse du vent. (a) Inamenass, (b) Adrar.	82
4.8	Les scalogrammes de la région d'Adrar. (a) Température, (b) Vitesse du vent. . . . .	83
4.9	Les XWT et WTC de la température et la vitesse du vent pour la région d'Adrar. . . . .	84
4.10	La transformée en Ondelettes de la vitesse du vent, la température	86
5.1	Fonctions d'activation. . . . .	97
5.2	Architecture d'un réseau ANN (2, 3,2) à trois couches et sept neurones . . . . .	98
5.3	. Moyennes horaires et écart type horaires pour les mois de Novembre . . . . .	100
5.4	Le périodogramme des vitesses du vent pour les mois de Novembre	101
5.5	Fonctions d'auto corrélation par rapport au décalage. . . . .	102

5.6	Fonctions d'autocorrélation partielle par rapport au décalage. . . .	102
5.7	Fonctions d'autocorrections ACF des résidus par rapport au décalage. . . . .	103
5.8	Evolution de l'erreur d'apprentissage en fonction des itérations . .	105
5.9	Les valeurs mesurées et les valeurs estimées de la vitesse du vent en utilisant les modèles ARMA et ANN pour 1 heure à l'avance (Novembre 2007) . . . . .	106
5.10	Les valeurs mesurées et les valeurs estimées de la vitesse du vent en utilisant les modèles ARMA et ANN pour 4 heures à l'avance (Novembre 2007) . . . . .	106
5.11	Evolution RMS lorsque les prédictions sont effectuées pour 1-7 h à l'avance (a) Novembre,(b) Décembre, (c) Janvier et (d) Février. .	107
5.12	Amélioration de RMSE pour les modèles ARMA et ANN par rapport . . . . .	107

## LISTE DES SIGLES

### Abréviations

ANN : Modèles basés sur la théorie des réseaux de neurone.

ARMA : Processus auto- récurif a moyenne mobile.

ACF : Fonctions d'autocorrélation.

PACF : Fonctions d'autocorrélation partielles.

PME :Principe de maximum entropie.

RMSE : Erreur quadratique moyenne.

RMSE-P : Erreur quadratique moyenne de la densité de puissance de la vitesse du vent.

### Notation.

$v$  :Vitesse instantanée du vent.

$\rho$  :Masse volumique de l'air.

$c$  :Facteur d'échelle.

$k$  :Facteur de forme.

$a_i$  :Paramètre de distribution PME.

$WT_x(s, n)$  :Transformée en Ondelettes.

$WT_{x,y}(s, n)$  :Transformée en Ondelette croisée.

$R_{x,y}^2(s, n)$  :Cohérence d'Ondelettes.

$\psi_0(n)$  :Fonction mère.

$\varepsilon$  :Bruit blanc Gaussien de moyenne nulle et de variance.

$AIK$  :Critère d'information d'Akaike.

$Q$  : La statistique de Ljung-Box.

$\chi_{1-\alpha, h}^2$  :Distribution Chi-carré avec un degrés  $h$ de liberté et un niveau des signification  $\alpha$ .

A mes parents.



## REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier et exprimer toute ma gratitude et reconnaissance à mes encadreurs, le Professeur Abdallah KHELLAF Directeur de recherche au centre de développement des énergies renouvelables et le Professeur Adel BELOUHRANI Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour avoir proposé et dirigé cette thèse et pour leur support, conseils, et motivations durant tout le projet.

Je remercie monsieur M. Haddadi, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Mes remerciements vont également au monsieur J.L. Lacouem Professeur Emérite (INP Grenoble) pour avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.

Je tiens à remercier monsieur M. Belhamel, directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) pour avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.

Je remercie également monsieur R. Dizene, Professeur de l'Université de Bab Ezouar (USTHB) pour avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.

Je remercie également madame A. Serrir, Maître de Conférences à l'université de Bab Ezouar (USTHB) pour avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.

Mes remerciements vont également à madame N. Merzouk, Directrice de recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables pour avoir acceptée d'examiner ce travail.

Ce travail a été réalisé à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, je tiens à remercier tous les collègues qui m'ont aidé à son aboutissement.

Je tiens à remercier aussi, mes amis de l'Office National de Météorologie de Ghar-daïa pour leurs orientations pratiques et conseils précieux.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à l'aboutissement de ce travail, en particulier toute ma famille pour son soutien moral durant toute la durée de préparation de cette thèse.

# Introduction

## **CHAPITRE 1**

### **INTRODUCTION**

Le vent est une source d'énergie gratuite propre et inépuisable. Il a servi l'humanité depuis des siècles pour la propulsion des navires et l'actionnement des éoliennes pour moulin à eau et le pompage d'eau. Après la première guerre mondiale, l'intérêt pour ce type d'énergie a diminué lorsque les carburants fossiles à bas prix ont pris le relais. Par la suite, on s'est rendu compte que l'approvisionnement de la planète en hydrocarbure ne durerait pas éternellement et que les stocks restants doivent être conservés pour l'industrie pétrochimique. Ainsi d'autres sources d'énergie en dehors du pétrole et du gaz naturel doivent être développées.

Les deux sources d'énergie, en dehors des hydrocarbures qui sont en mesure de fournir de l'énergie à long terme, sont le charbon et l'énergie nucléaire. Plusieurs études estiment qu'il y a suffisamment de charbon pour plusieurs siècles au rythme actuel de consommation. Malheureusement, le charbon et le nucléaire présentent de sérieux problèmes d'environnement. Le charbon nécessite de grandes opérations d'exploitation minière, laissant la terre dans de nombreux cas sans utilité. La combustion du charbon peut bouleverser l'équilibre thermique de la planète. La production de dioxyde de carbone et de soufre peut influencer négativement sur l'atmosphère et la capacité de la planète à produire de la nourriture pour sa population.

L'énergie nucléaire offre plusieurs avantages par rapport au charbon (où le dioxyde de carbone et le dioxyde de soufre ne sont pas produits) ; les opérations minières sont à plus petite échelle. Le problème majeur est l'élimination des déchets radioactifs, qui est la raison essentielle des craintes de plusieurs écologistes parce qu'il n'aura jamais une solution satisfaisante (sûr et durable).

En raison de ces problèmes, l'énergie éolienne et d'autres formes d'énergies durables

sont fortement encouragées. L'énergie éolienne peut devenir une source majeure d'énergie en dépit des coûts légèrement plus élevés que le charbon ou que l'énergie nucléaire. Mais, cela ne veut pas dire que l'énergie éolienne restera toujours plus chère que le charbon ou le nucléaire, parce que des progrès considérables et des avancées technologiques ont permis de réduire les coûts de cette source d'énergie.. Mais, malgré cet inconvénient du coût et d'autres inconvénients tels que l'aspect esthétique et le bruit acoustique, l'énergie éolienne pourra contribuer d'une façon essentielle dans le bilan énergétique mondial.

Globalement, l'énergie éolienne est devenue une source d'électricité très importante. Elle joue un rôle majeur dans les marchés énergétiques de la planète depuis la fin de l'année 2008 [1].

D'après l'Association Européenne de l'Energie Eolienne (EWEA), la capacité totale des nouvelles éoliennes mises en ligne dans toute l'Union Européenne en 2008 est de 64.948 GW, soit une augmentation de 15 % MW sur le total de l'année 2007 [2]. La capacité installée vers la fin de l'année 2009 permet d'éviter l'émission de plus de 90 millions de tonnes de CO2 chaque année.

Aux Etats Unis, l'industrie éolienne continue de croître avec un taux record en 2008. Avec une installation de 8.358 GW en 2008, sa capacité de production a augmenté de 50 % en une année . La capacité éolienne totale atteint maintenant plus de 25.170 GW, produisant suffisamment d'électricité pour alimenter l'équivalent de près de 7 millions de foyers (plus de 1% de la demande totale d'électricité des Etats-Unis [1].).

Concernant l'Asie, la Chine a augmenté sa capacité éolienne totale en 2008 avec plus de 6.3 GW, soit une croissance du marché de 107% par rapport à 2007. Avec une capacité installée de plus de 12.21 GW en fin 2008, elle se classe au quatrième rang mondial. Basé sur les taux de croissance actuel, la Chine prévoit une capacité d'environ de 50 GW d'ici 2015. Le marché croissant de l'énergie éolienne en Chine a également encouragé la

production nationale d'aérogénérateurs ; Elle possède maintenant plus de 40 entreprises nationales impliquées dans la fabrication [1].

L'Inde continue aussi à voir une croissance régulière et atteint maintenant près de 9.6 GW d'installations en énergie éolienne, contre environ plus de 8 GW en 2007. Le Japon se classe en troisième position en Asie avec une installation de 1.88 GW d'énergie éolienne pour la fin de l'année 2008 [1].

En Afrique du nord, l'Egypte a augmenté de 55 MW sa capacité éolienne en 2008 ; ce qui porte la capacité totale éolienne installée dans ce pays à 365 MW à la fin de 2008 [1].

En Algérie, la première éolienne a été installée à Adrar en 1953. C'est une éolienne à trois hélices avec une forme aérodynamique et de 15 m de diamètre. A l'époque, cette éolienne faisait partie des trois premières grandes éoliennes dans le monde avec une capacité de pompage de 50 litres par seconde. Les deux autres ont été implantées respectivement en Argentine et en Allemagne. Cette éolienne est hors d'usage depuis 1969. Entre temps, plusieurs éoliennes multi-pales (type western) ont été mises en place dans les zones steppiques isolées (Djelfa, M'sila, Laghouat et Ghardaïa). Ces éoliennes sont utilisées par les agriculteurs et les éleveurs de bétails pour le pompage de l'eau. La plupart de ces pompes éoliennes ont été fabriquées en Algérie par deux usines situées au niveau de Laghouat et El-Berouaguia.

Pour quantifier l'énergie éolienne disponible dans les différents sites en Algérie, plusieurs études ont été menées. Ces études s'adressent principalement à la cartographie de la vitesse du vent à différentes altitudes [2],[3] et [4], à l'évaluation du potentiel du vent et à l'étude et au dimensionnement des systèmes de conversion de l'énergies éolienne [5],[6] et [7].

L'évaluation du potentiel éolien est une étape importante pour l'installation des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, mais elle n'est pas suffisante. Une étude du

comportement du vent ainsi que ses caractéristiques stochastiques et cycliques est indispensable afin d'assurer une exploitation efficace. Nous proposons dans ce travail d'étudier les comportements stochastique et cyclique du vent en Algérie.

Le second chapitre comporte des notions de base sur le vent et sur ses différentes sources et propriétés. Dans ce chapitre, nous proposons d'utiliser des indicateurs écologiques et biologiques ainsi que " le savoir faire locale " pour localiser les zones ventées.

Dans le troisième chapitre, une étude descriptive de la densité de probabilité du vent en Algérie est considérée. En effet, une modélisation de la densité de probabilité de la vitesse du vent en utilisant l'approche du maximum d'entropie a été effectuée. La comparaison entre les performances statistiques de cette approche avec ceux de la distribution de Weibull conventionnelle a permis de déduire que l'approche proposée est meilleure en terme d'erreur quadratique moyenne.

Une étude du comportement cyclique du vent a été considérée dans le quatrième chapitre. Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'analyse temps-fréquence afin de suivre les variations du contenu spectral de la vitesse du vent par rapport au temps.

Des modèles auto-récurrents à moyennes ajustées ainsi que des modèles basés sur la théorie des réseaux de neurones ont été exploités dans le cinquième chapitre afin de modéliser et de prédire la vitesse du vent à court terme.

Par ces travaux de recherche, nous contribuons à :

- L'actualisation de l'Atlas Eolien de l'Algérie en ajoutant des données telles que celles de la région de Hassi-R'mel. Le potentiel éolien dans cette zone a été sous estimé en raison de sa localisation entre deux zones moins ventées.

- L'amélioration de la compréhension du comportement stochastique du vent en Algérie par la proposition de nouvelles densités de probabilité ainsi que le développement

de modèles pour la prédiction de la vitesse du vent.

- L'amélioration de la compréhension du comportement cyclique du vent en Algérie par l'application de l'analyse temps-fréquence. L'effet du facteur topographique sur le comportement du vent a été pris en compte en considérant six régions de différentes topographies et climats. Cette étude a révélé la présence de trois types d'oscillations principales et que le facteur topologique joue un rôle important dans l'allure du contenu spectral de la vitesse du vent.

Cette étude destinée essentiellement aux applications énergétiques peut être aussi utile pour d'autres applications telles que la lutte contre la désertification, l'agronomie, l'urbanisme, le transport (aérien et maritime) et la protection de l'environnement.



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC). <http://www.gwec.net>.
- [2] N. Kasbadji Merzouk. Evaluation du Gisement énergétique Eolien. Contribution à la Détermination du profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie. Thèse de doctorat (2006), L'Université Abou bekr Belkaid Tlemcen.
- [3] M. Said and A. Ibrahim, Energy in the Arab world. Energy 9 3 (1984), pp. 217-238.
- [4] R. Hammouche, Atlas Vent de l'Algérie. Publication Interne de l'ONM, Office National de Météorologie, Alger (1990).
- [5] Y. Himri, S. Rehmana, B. Draouic, S. Himri. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 9, December 2008, Pages 2495-2504.
- [6] Y. Himri, S. Himri, A. Boudghene Stambouli. Assessing the wind energy potential projects in Algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 13, Issue 8, October 2009, Pages 2187-2191.
- [7] Y. Himri, S. Arif, A. Malik, A. Boudghene Stambouli, S. Himri, B. Draouie. Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 13, Issues 6-7, August-September 2009, Pages 1584-1591.

## Notions de base sur le vent

## CHAPITRE 2

### NOTIONS DE BASE SUR LE VENT

Le vent est le résultat de la différence de pression résultant du chauffage inégal de la surface de la terre en raison de sa forme sphérique. L'angle d'incidence du rayonnement du soleil sur la surface de la terre dépend de la position géographique : il est proche de zéro à l'équateur (faisceau du soleil normal à la surface de la terre) et prend une valeur plus importante aux pôles. Cela conduit à une énergie inégale reçue par la terre et donc à un chauffage inégal de l'air atmosphérique.

Comme la force motrice d'origine de ce mouvement est tirée du soleil, l'énergie éolienne est fondamentalement une forme indirecte de l'énergie solaire. Un à deux pour cent du rayonnement solaire total atteignant la surface de la terre est convertie en énergie éolienne de cette façon [1].

Le vent est un phénomène atmosphérique complexe qu'on peut étudier de multiples façons à différentes échelles. L'objectif de ce chapitre est de décrire brièvement l'énergie éolienne, l'origine des vents et les différentes forces qui s'exercent sur l'air atmosphérique. Ensuite, on proposera une actualisation de la carte du vent de l'Algérie.

## 2.1 Type de vent

### 2.1.1 Vents Globaux

Les vents causés par la différence de température due au réchauffement inhomogène de l'air de l'atmosphère sont connus par les vents géostrophiques ou bien les vents globaux (figure 2.1). Ces vents sont observés sur les hautes altitudes et ne sont pas affectés par la surface de la terre. Le réchauffement inégal de l'atmosphère terrestre varie suivant

les latitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents. La figure

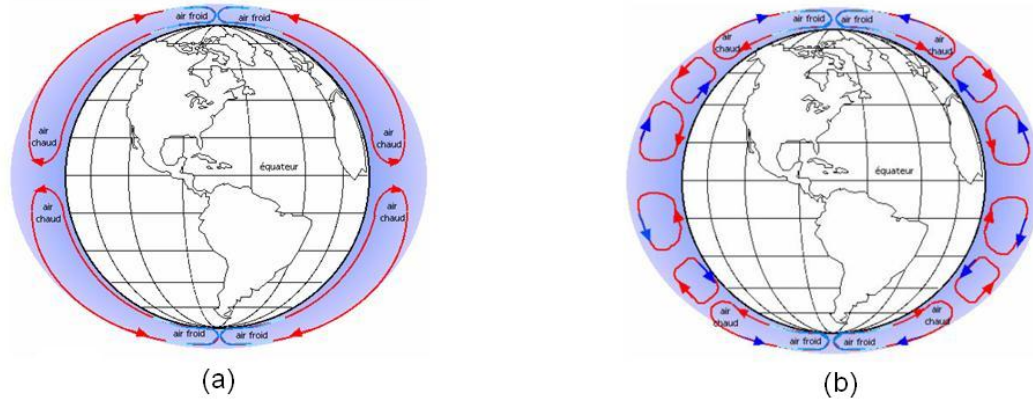


Figure 2.1 – Mouvement général de l'air en atmosphère.  
(a) Mouvement théorique, (b) Mouvement réel (actuelle).

(2.1.a) montre le mouvement général (global) de l'air en atmosphère. En réalité, l'air est déjà refroidi à  $30^\circ$  de latitude, alors il redescend au sol. De là, un autre cycle de  $30^\circ$  est formé et ainsi de suite (figure 2.1.b). Dans le cas de l'Algérie, la bande de la différence de pression est localisée dans le Sud entre Bechar, Tindouf et Adrar.

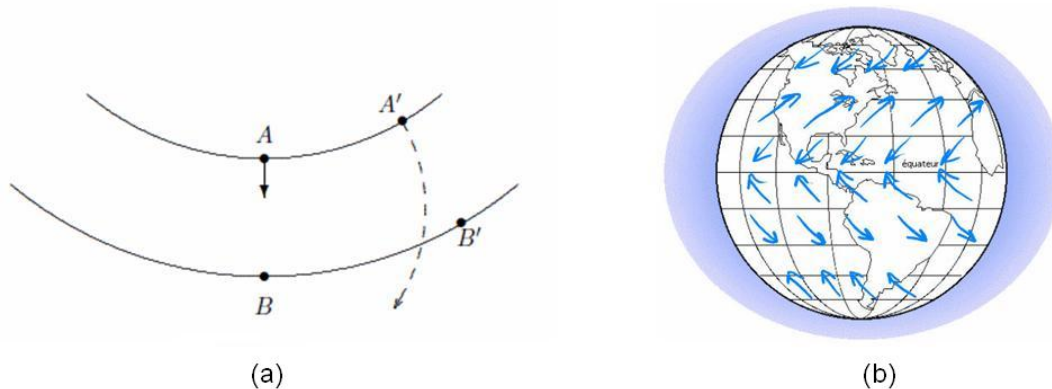


Figure 2.2 – Forces de Coriolis.  
(a) L'effet des forces Coriolis, (b) Les directions privilégiées.

La rotation de la terre provoque un autre phénomène près de sa surface dite forces de Coriolis [1]. A cause de l'effet de ces forces, la trajectoire rectiligne de la masse d'air est détournée (Figure 2.2.a). Sous l'influence des forces de Coriolis, le vent a tendance à

tourner vers la gauche dans le sens contraire de la montre dans l'hémisphère Nord et vers la droite dans le sens de la montre dans l'hémisphère sud [2]. Les flèches dans la figure 2.2.b indiquent que les directions privilégiées des vents globaux ne sont pas verticales (rectilignes) mais ils sont inclinés.

### 2.1.2 Vents locaux

Le changement de la vitesse et de la direction du vent pour des altitudes d'environ 100 m est très important pour les applications de la conversion d'énergie éolienne. Les vents locaux sont très influencés par des facteurs tels que la mer, la terre et les montagnes. En cours de la journée, la terre se réchauffe plus rapidement que la mer, ce qui provoque un soulèvement de l'air chaud qui s'étend ensuite vers la mer. L'air froid provenant de la mer est tout de suite attiré par la dépression créée au niveau de la terre à cause de son réchauffement : c'est la brise de la mer. La nuit, la direction de cette brise prend le chemin inverse (Brise de terre).

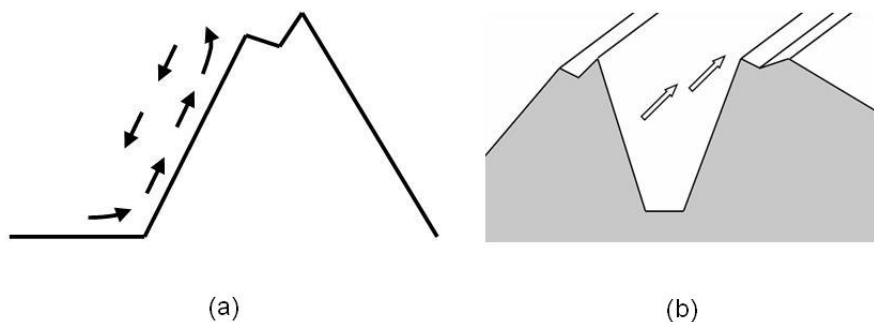


Figure 2.3 – Vents locaux.  
(a) Brise montante, (b) Effet tunnel.

Les reliefs, notamment les montagnes, favorisent beaucoup de phénomènes climatologiques intéressants. L'air commence à s'élever vers le sommet de la montagne, produisant ce que l'on appelle une brise montante. La nuit, le phénomène s'inverse et une brise

descendante se produit (figure 2.3.a).

La figure 2.3.b représente un autre phénomène causé par les montagnes et les collines, il est connu par l'effet tunnel ; la vitesse du vent augmente d'une façon importante à l'intérieur du tunnel. Ce phénomène est souvent exploité dans l'installation des aérogénérateurs.

### 2.1.3 Vent de surfaces

La variation verticale du vent est très différente d'un endroit à un autre car la surface du sol influe sur le vent par la résistance de frottement. Cette résistance peut être causée par la rugosité du sol lui-même ou en raison de végétations, bâtiments et autres obstacles présents sur le sol. Théoriquement, la vitesse du vent juste au-dessus de la surface du sol doit être nulle. Cette vitesse augmente avec l'altitude jusqu'à une certaine hauteur au-dessus de laquelle l'influence de la surface de la terre est plutôt faible.

Pour un aérogénérateur de hauteur  $h$ , l'extrapolation verticale des données du vent est indispensable. Généralement, la vitesse du vent est mesurée à une seule hauteur. Il se pose donc le problème de savoir comment à partir de la vitesse moyenne, il est possible d'obtenir la vitesse à une autre hauteur d'intérêt (par exemple à la hauteur de l'hélice d'un aérogénérateur).

Il existe plusieurs modèles permettant l'extrapolation verticale des vitesses du vent en fonction de plusieurs paramètres . Dans ce cadre, on peut citer les travaux de Justus et al. (1976) qui portent sur la détermination des formules d'extrapolation de la vitesse du vent d'un niveau  $h_1$  à  $h_2$ .

Pour des conditions atmosphériques neutres, le modèle logarithmique est donné par :

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\ln(h_2/Z_0)}{\ln(h_1/Z_0)} \quad (2.1)$$

Où

$v_1$  et  $v_2$  : les vitesses moyennes aux hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  respectivement.

$Z_0$  : L'indice de la rugosité du sol.

L'indice de rugosité  $Z_0$  d'une surface peut être proche de zéro (surface de la mer) ou supérieure à 2 (centres villes). Certaines valeurs typiques valent 0.005 pour les terrains plats et lisses, de 0.025 à 0.1 pour les terres herbeuses, de 0,2 à 0,3 pour les cultures en rangées, de 0,5 à 1 pour les vergers et les arbustes et de 1 à 2 pour les forêts et les centres villes [3].

En pratique,  $Z_0$  est obtenu par la mesure du vent à plusieurs hauteurs puis la résolution de l'équation (2.1). Les résultats doivent être classés par rapport à la période de l'année en raison de la variation de la direction du vent et l'état de la végétation.

## 2.2 Propriétés du vent

### 2.2.1 Accélération et Turbulence

Le flux du vent est accéléré au passage d'un obstacle lisse tels que les collines. Cette accélération est due à la compression des couches de vent sur un support (figure 2.4.a). Ce phénomène est pleinement exploité pour la production d'énergie et plus particulièrement si la pente de la crête se situe entre  $6^\circ$  et  $16^\circ$ . Les angles supérieures à  $27^\circ$  et moins de  $3^\circ$  ne sont pas favorables [1]. Pour des obstacles de plus de  $27^\circ$ , des turbulences sont provoquées durant le passage du flux d'air (figure 2.4.b).

### 2.2.2 Oscillations du vent

Plusieurs facteurs contribuent à la formation des oscillations du vent tels que les obstacles et la topographie du terrain. Les variations journalières souvent observées dans les régions côtières sont dues aux écarts de la température entre la mer et la terre. Les

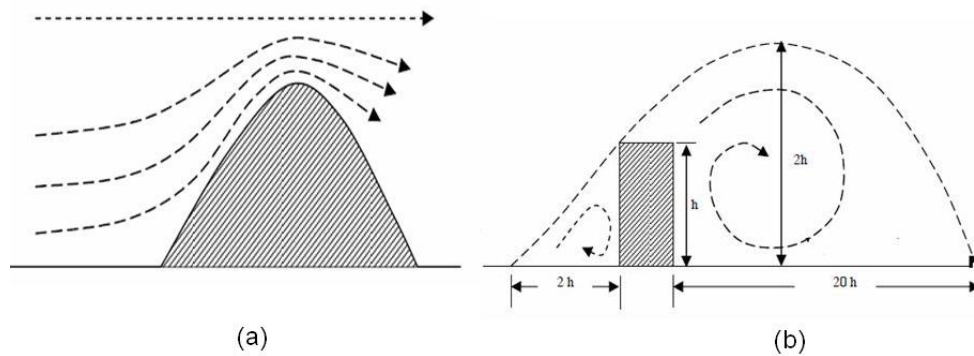


Figure 2.4 – Passage du flux d'air sur un obstacle.  
 (a) Effet d'accélération, (b) Effet de turbulence.

oscillations causées par les passages des systèmes météorologiques sont connues par les oscillations synoptiques.

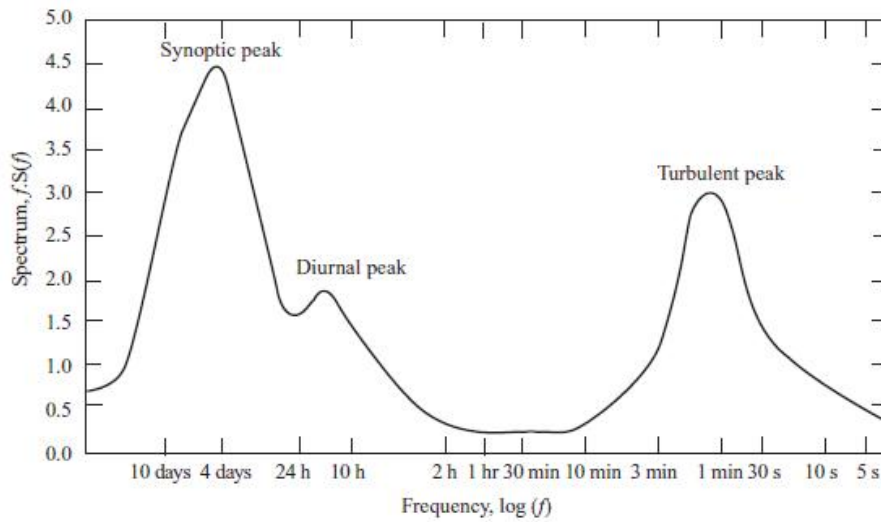


Figure 2.5 – Le spectre de la vitesse du vent basé sur les travaux de Van der Hoven[2].

Les études antérieures sur le comportement cyclique du vent remontent à 1957 lorsque Ven der Hoven [4] a évalué le spectre de puissance de la vitesse du vent. La figure 2.5 représente le spectre de la vitesse du vent obtenu par Van der Hoven (1957) à New York.



Les pics dominants dans ce spectre correspondent aux variations turbulentes, journalières et synoptiques. Les oscillations synoptiques avec des périodes d'oscillations comprises entre 4 à 6 jours sont associées au passage des systèmes météorologiques (fronts froids ou chauds) à grande échelle [1].

## 2.3 Mesure des paramètres du vent

### 2.3.1 Indicateurs écologiques

Les indicateurs écologiques peuvent être utilisés afin de déterminer l'intensité du vent dominant dans une région. Les dunes de sable présentent un exemple pour la formation éolienne. Les particules de sable soulevées et transportées par l'écoulement du vent, sont déposées lorsque la vitesse du vent est plus faible. Les tailles des particules transportées et déposées ainsi que la distance peuvent nous donner des indications sur l'intensité moyenne du vent dans cette région [5]. Encore, les formes des dunes peuvent nous indiquer la direction du vent (figure 2.6). Des dunes sous forme de croissant se

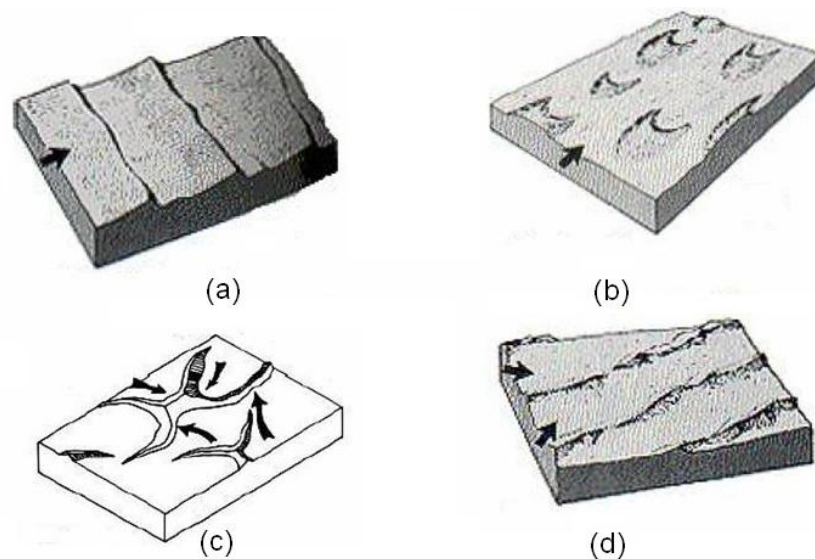


Figure 2.6 – Schémas des différents types de dunes [5].  
 (a) Dune transversale, (b) Dune Barkhane, (c) Dune étoile, (d) Dune longitudinale.

forment sous un régime du vent unidirectionnel " les Barkhanes ". Les dunes (longitudinales) linéaires " les Sifs " sont formées par des vents bidirectionnels. Lorsque le régime du vent est multidirectionnel, des dunes en forme d'étoiles sont souvent observées. La figure 2.7 montre les trois types des dunes souvent rencontrées dans le Sahara algérien. Les dunes de type Barkhanes (photo 2.7.a) sont souvent observées près de la région El-Goléa. Les dunes Sif (photo 2.7.b) peuvent être observées près de la région d'Adrar. Les dunes étoiles (photo 2.7.c) sont localisées près de Hassi-Messaoud.

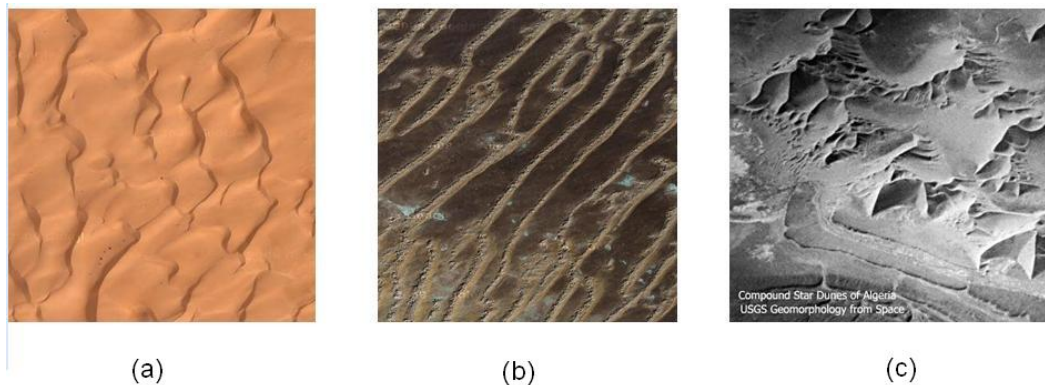


Figure 2.7 – Dunes souvent rencontrées dans le Sahara Algérien [Google earth].  
(a) Type Barkhane, (b) Type Sif, (c) Type étoile.

Dans les sites côtiers et montagneux, les arbres peuvent aussi être utilisés tant qu'indicateurs biologiques. Putnam [6] a classé les déformations des arbres et leurs branches en fonction de la puissance du vent (figure 2.8).

La figure 2.9 montre des arbres dans les régions de Djelfa et de Chiffa respectivement. L'inclinaison des arbres du "barrage vert" indique que ce site est exposé à un couloir du vent d'une façon permanente. A partir de l'inclinaison des arbres, on peut en déduire que les directions privilégiées de ce couloir sont la direction Ouest et la direction Sud-Ouest. Concernant la photo 2.9.b, on note que les arbres situés dans la région de Chiffa endurent une inclinaison plus une déformation due à l'effet tunnel.

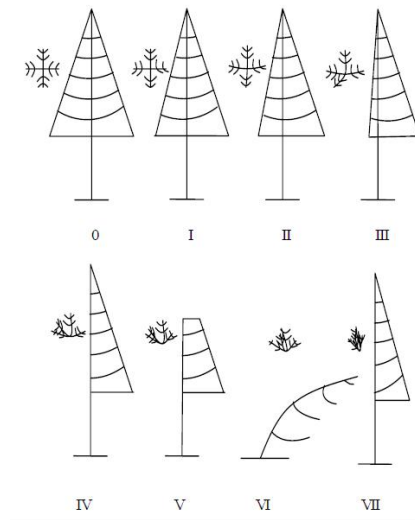


Figure 2.8 – Classification de Putnam[6].



Figure 2.9 – Indicateurs biologiques.  
 (a) Photo du barrage vert près de Djelfa, (b) Photo des arbres près de Chiffa.

### 2.3.2 Anémomètres et Girouette

Les capteurs les plus fréquemment utilisés pour mesurer la vitesse du vent sont les anémomètres à moulinet (figure 2.10). Sous l'action du vent, les coupelles font tourner le moulinet avec une vitesse angulaire proportionnelle à la vitesse du vent. Le transducteur (détecteur de proximité) assure alors la conversion de la vitesse de rotation du moulinet en un signal exploitable pour la mesure. La vitesse du vent s'exprime en mètres par seconde (m/s), en kilomètres par heure (km/h) ou en noeuds (kt). 1 m/s correspond à 3.6 km/h et à 1.85 kt.

La direction du vent quant à elle, est mesurée au moyen de girouettes, généralement à



Figure 2.10 – Ensemble d'un anémomètre et girouette.

18 directions de  $20^\circ$ . La girouette est constituée d'une queue d'orientation qui est reliée à un transducteur. La queue d'orientation entraîne dans sa rotation un jeu de frotteurs mettant en circuit un nombre de résistances en fonction de la direction du vent par rapport au Nord géographique. Souvent les quatre points cardinaux sont indiqués par les lettres N, S, E, W pour nous servir du repère. La direction est mesurée en degrés par rapport au Nord géographique.

### 2.3.3 La rose des vents

La rose des vents est construite pour avoir une idée de la distribution des vitesses et des directions du vent, elle est construite à partir des observations météorologiques faites dans une région sur une ou plusieurs années. La rose des vents que nous voyons sur la figure 2.11 est composée de dix-huit secteurs de 20 degrés chacun mais elle aurait pu être construite avec huit ou seize secteurs. Chaque secteur est conique et son rayon indique la fréquence relative de chaque direction du vent.

Les sections marquées en gris sont les plus importantes car l'énergie du vent varie avec le cube de sa vitesse, (dans la figure 2.11, nous voyons que les directions dominantes du vent sont le Nord et le Sud). La rose des vents est construite selon une échelle, donc, chaque rayon est multiplié par un certain nombre de façon à avoir le rayon de la plus grande portion égale à celui du cercle concentrique. Lors de la localisation d'un site

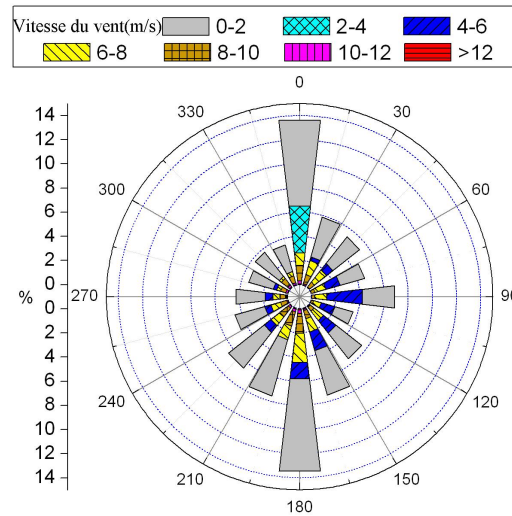


Figure 2.11 – La rose des vents.

éolien, la rose des vents nous donne une idée sur la direction des vents dominants. Il faut avoir alors peu d'obstacles et une rugosité moindre dans cette direction.

### 2.3.4 Vitesses moyennes de référence

La mesure du vent en surface telle qu'elle a été définie dans le guide de l'organisation météorologique mondiale doit être menée selon des conditions conventionnellement fixées [3] :

- A 10 mètres au-dessus du sol.
- Sur des terrains dégagés où la distance entre l'anémomètre et n'importe quel obstacle est d'au moins 10 fois la hauteur de l'obstacle.

### 2.3.5 Classification des Vents (Echelle du Beaufort)

L'échelle de Beaufort utilise des termes généraux, tels que brise, coup de vent, tempête et un ouragan, pour donner une description empirique de la vitesse du vent. Les vitesses violentes commencent à partir de 28 noeuds avec des adjectifs comme forts. Les tempêtes sont des vents de 56 noeuds (104 km / h) à 63 noeuds (117 km / h) [7].

Echelle	Appellation	Vitesse du vent		Etat de la mer	Effets à terre
		noeuds	Km/h		
0	calme	1	≤ 1	Mer d'huile, miroir	La fumée monte droit
1	très légère brise	1 à 3	1 à 5	Mer ridée	La fumée indique la direction du vent
2	légère brise	4 à 6	6 à 11	Vaguelettes	On sent le vent au visage
3	petite brise	7 à 10	12 à 19	Petits moutons	Les drapeaux flottent
4	jolie brise	11 à 16	20 à 28	Nombreux moutons	Le sable s'envole
5	bonne brise	17 à 21	29 à 38	Vagues, embruns	Les branches des pins s'agitent
6	vent frais	22 à 27	39 à 49	Lames, crêtes d'écume étendues	Les fils électriques sifflent
7	grand frais	28 à 33	50 à 61	Lames déferlantes	On peine à marcher contre le vent
8	coup de vent	34 à 40	62 à 74	Les crêtes des vagues partent en tourbillon d'écume	On ne marche plus contre le vent
9	fort coup de vent	41 à 47	75 à 88	Les crêtes des vagues partent en tourbillon d'écume	On ne marche plus contre le vent
10	tempête	48 à 55	89 à 102	Les embruns obscurcissent la vue, on ne voit plus rien	Les enfants de moins de 12 ans volent
11	violente tempête	56 à 63	103 à 117	Les embruns obscurcissent la vue, on ne voit plus rien	Les enfants de moins de 12 ans volent
12	ouragan	64 et plus	118 et plus	Les embruns obscurcissent la vue, on ne voit plus rien	Les enfants de moins de 12 ans volent

Tableau 2.I – Echelle de Beaufort.

## 2.4 Energie et puissance du vent

### 2.4.1 Energie du vent

L'énergie cinétique dans une coulisse d'air de masse  $m$ , d'une section  $A$  et de vitesse  $v$  selon la direction  $x$  est donnée par :

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Axv^2 \quad (2.2)$$

Où  $\rho$  est la densité ou la masse volumique de l'air, prend la valeur nominale de  $1.225 \text{ Kg/m}^3$  au-dessus du niveau de la mer pour une température de  $15^\circ$ .

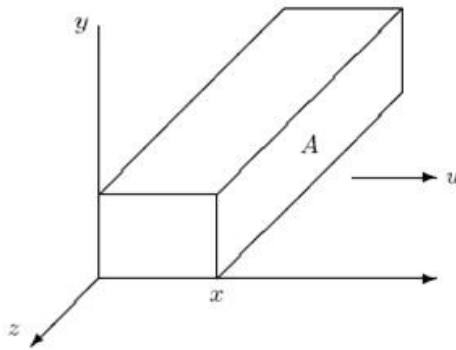


Figure 2.12 – Déplacement d'une coulisse d'air.

### 2.4.2 Puissance du vent

La puissance du vent  $P$  (en watt) est définie comme étant la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps. Elle est donnée par :

$$\begin{aligned} P &= \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}\rho Av^2 \frac{dx}{dt} \\ &= \frac{1}{2}\rho Av^3 \end{aligned} \quad (2.3)$$

## **2.5 Contribution à la mise à jour de la carte du vent en Algérie**

L'estimation de l'énergie éolienne disponible sur un site donné est sans doute l'étape la plus importante lorsqu'il s'agit d'envisager l'implantation d'un système d'exploitation de cette énergie. L'étude de la répartition géographique du gisement éolien disponible est très complexe, car elle dépend en plus du climat, de plusieurs paramètres tels que la topographie et l'environnement urbain.

Les premiers travaux en Algérie datent de 1984. On peut distinguer trois approches. La première est l'établissement des atlas et des cartes du vent de l'Algérie. Dans ce cadre, on peut citer les travaux de Said et al. en 1984 [8], suivis par Benssad en 1985 [9], Hammouche en 1990 [10], Kasbadji Merzouk en 2000 [11] et Youcef-Ettoumi [12].

La deuxième approche est l'évaluation du potentiel éolien et le dimensionnement des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Dans ce cas, des études techniques et technico-économiques ont été menées. Dans ce sujet, on peut citer les études de Himri et al. sur l'évaluation du potentiel éolien dans les régions Sud et Sud-Ouest [13]-[19], les travaux de Koussa et al. pour la région d'Adrar [20] et les travaux de Helal et al. pour la région de Beni-Saf [21].

La troisième approche est la modélisation de la vitesse du vent. Dans ce cadre, deux études ont été réalisées. Une modélisation de la vitesse du vent par des processus Markovien a été réalisée par Youcef Ettoumi et al. [22]. La deuxième a pris comme sujet la modélisation du profile vertical du vent en Algérie [23].

Dans cette partie, nous décrivons sommairement la répartition régionale des ressources éoliennes à partir de l'évaluation de la vitesse moyenne du vent. Les résultats sont donnés sous forme de cartes et tableaux afin de faciliter la lecture et permettre d'avoir une idée générale sur la répartition géographique du gisement éolien et de faire ainsi une première identification des régions ventées.



De plus, les cartes mensuelles de la vitesse moyenne du vent vont permettre à l'utilisateur d'avoir des informations non seulement sur l'importance mais aussi sur l'évolution de cette source d'énergie tout au long de l'année. En effet, il est indispensable lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne de connaître les périodes pour lesquelles ces systèmes seront plus ou moins productifs. Ceci permettra aussi de déduire leurs disponibilités en fonction des besoins énergétiques qui varient selon les saisons.

Les cartes de vent en Algérie rapportées dans les travaux ultérieurs [10],[11] et [23] sont obtenues par des méthodes d'interpolation. Leurs résultats peuvent être imprécis dans le cas où une zone intermédiaire (ventée) entre deux zones moins ventées n'est pas prise en considération. Dans cette section, on propose de contribuer à l'actualisation de la carte du vent de l'Algérie en ajoutant les données de la région de Hassi-R'mel.

La présente étude est basée sur l'utilisation des données journalières moyennes mesurées à 10 m du sol, au niveau de 37 stations météorologiques du réseau de l'Office National de la Météorologie (ONM). La période de mesure s'étalant de 2004 à 2009.

Il est important de signaler que les stations de mesure de l'ONM sont généralement situées soit sur des aéroports soit dans des centres urbains. Ces stations sont utilisées pour la navigation aériennes et elles ne sont pas nécessairement installées dans les régions les plus ventées. Ceci signifie que le potentiel peut être supérieur ailleurs (particulièrement dans des sites isolés et éloignés).

Les moyennes mensuelles et annuelles (à 10 m d'altitude) obtenues sont présentées dans le tableau 2.1 qui comporte aussi les coordonnées géographiques et astronomiques. Ce tableau va nous permettre d'avoir une idée sur l'évolution de la vitesse du vent en fonction des mois de l'année.

Ville	Altitude	latitude	Longitude	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	septembre	octobre	Novembre	Décembre	annuelle
Adrar	280	27.8	-0.2	6.2	6.4	6.5	6.5	6.9	6.1	6.7	6.2	6	5.8	5.9	5.8	6.3
Ain sefra	1147	32.8	-0.6	4.6	5.1	5.1	5.4	5.2	4.9	4.3	4.2	4.1	4	4.2	4.9	4.7
Alger	25	36.8	3.1	2.2	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6	1.5	1.6	1.4	1.9	2.4	1.9
Annaba	4	36.8	7.8	2.5	2.4	2.5	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	1.8	2.4	2.5	2.3
Batna	822	35.2	6.3	2.9	3.1	3.6	3.2	2.7	3	3	3.1	3	2.7	2.6	3.3	3
Bechar	881	31.7	-2.3	3.2	3.2	4.1	4.6	5	4	4.1	4	3.7	2.8	2.9	3.1	3.7
Bejaia	2	36.7	5.1	3.7	3.4	2.9	2.8	2.5	2.4	2.4	2.3	2.7	3.2	3.6	4.1	3
Biskra	87	34.8	5.7	3.9	4.3	4.9	5.3	5.1	4.3	3.8	3.7	3.9	3.3	4	4.1	4.2
Bou-saada	461	35.3	4.2	5.5	5.1	6.3	5.1	4.3	3.2	2.5	2.6	2.8	3.1	4.7	5.5	4.2
Chlef	143	36.2	1.3	3.1	3.5	3.3	2.6	3	2.7	2.1	2.4	2.7	2.9	3	3.1	2.9
Constantine	694	36.3	6.6	4	3.3	3.5	2.7	2.5	2.1	1.8	2	2	2.1	2.8	3.4	2.7
Djanet	967	24.3	9.5	3	2.9	3.5	4.1	4	4.2	4.1	4.2	3.5	3.2	2.4	2.4	3.5
Djelf	1144	34.7	3.2	3.2	5	5.2	5.6	4.7	5.1	4	4.2	4	3.9	3.6	3.5	4.3
ElGoela	397	30.6	2.9	2.8	3.8	4.3	4.2	4.7	3.9	3.3	3.2	3.7	3.5	2.6	3	3.6
El oued	61	33.5	6.8	2.6	2.7	3.6	4	3.9	3.8	3.5	3.5	3	2.6	2.3	2.6	3.2
Ghardaia	450	32.4	3.8	3.5	3.2	4.4	4.5	3.9	3.5	2.9	2.7	3	2.8	2.8	3.5	3.4
Ghelma	4	36.5	7.7	2.4	2.3	2.5	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	1.8	2.4	2.5	2.3
Griss	90	35.2	0.2	2.7	2.3	2.3	2	2.1	1.7	1.5	2	1.9	1.9	2.6	2.7	2.1
Hassi-Messaoud	142	31.7	6.2	3.2	3.3	4.1	4.2	4.8	4.1	3.4	3.7	3.9	3.5	2.8	3.1	3.7
Hassi-remel	774	32.9	3.3	5.7	6.3	7.6	8.1	7.8	6.6	5.3	5.4	5.4	4.8	4.5	5.7	6.1
Illizi	558	26.5	8.4	3.7	3.7	4.1	4.1	4.5	4.9	4.6	4.6	4.3	3.9	3.7	3.4	4.1
InAmenass	562	28	9.6	3.9	4.5	5	5.2	6	5.7	4.6	4.8	4.7	4.4	3.9	3.8	4.7
InSalah	293	27.2	2.5	5.3	4.9	5.5	5.1	5.6	5.3	5.6	5.3	4.9	4.6	4.7	4.3	5.1
Jijel	11	36.8	5.9	2.6	2.9	3.3	2.8	2.1	2.1	2.1	2	2.1	2.2	2.5	3.1	2.5
Laghouat	765	33.8	2.9	3.4	3.4	3.9	4.3	3.8	3.6	3	2.9	2.8	2.6	2.7	3.3	3.3
Oran	90	35.6	-0.6	2.7	2.8	3.2	3	3	2.9	2.6	2.3	2.3	2.1	2.4	2.7	2.7
Ouragla	142	31.9	5.4	3.1	3.3	4.3	4.2	4.9	4.7	4	4.1	4.3	3.5	2.8	2.8	3.8
Setif	1040	36.2	5.3	3.4	3.8	3.8	3.7	3.3	3.4	3.2	3.3	3.4	3	3.2	3.1	3.4
Tamanrasset	1378	22.8	5.4	3.4	2.9	2.9	2.9	3.1	3.2	3.3	3.2	3	2.9	2.5	2.6	3
Tebessa	811	35.4	8.1	3.2	3.2	3.5	3.1	2.9	2.5	2	2.1	2.3	2.4	2.9	3.3	2.8
Tiaret	989	35.3	1.5	3	4.1	3.8	3.2	3.5	3	2.6	2.8	2.9	2.9	3.6	4	3.3
Timimoun	312	29.2	0.3	5	5.6	5.3	5.9	6.1	4.8	4.9	4.9	4.5	4.1	4.4	4	5
Tindouf	431	27.7	-8.1	4.6	5.4	5.3	7	7.3	7.3	5.6	6.2	6.7	4.7	4.3	4	5.7
Tlemcen	247	35	-1.5	3.7	3.2	3.3	2.3	2.1	1.8	1.5	1.6	1.4	2.4	3.1	3.9	2.5
Touggourt	85	33.1	6.1	2.9	3.1	3.9	4.1	4.2	3.7	3.4	3.7	3.2	2.9	2.5	2.9	3.4

Tableau 2.II – Les moyennes mensuelles et annuelles de la vitesse du vent (m/s) à 10 m d'altitude.

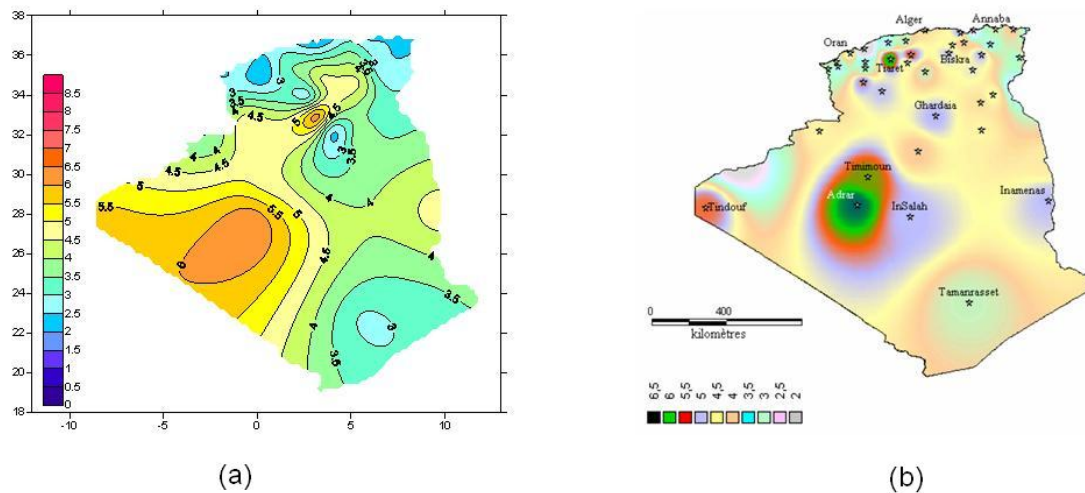


Figure 2.13 – Cartes annuelles à 10 m d’altitude.  
 (a) Carte réalisée a partir du tableau 2.2, (b) Carte réalisée par N.Kasbadji [23] .

A l’exception de la région de Hassi-R’mel où il a été constaté qu’elle possède un potentiel éolien important (entre 4-8 m/s), l’allure générale des cartes obtenues ressemble aux cartes précédentes (figure 2.13). On remarque globalement que l’Algérie est assez ventée puisque 78 % de sa surface est caractérisée par des vitesses supérieures à 3 m/s avec environ 40 % de ces vitesses sont supérieures à 5 m/s. Les cartes du vent , rapportées en Figure 2.13, montrent que les vitesses du vent élevées sont réparties dans le Sud alors que le Nord du pays est globalement moins venté. Il a été constaté que la région Sud-Ouest possède un potentiel important avec des vitesses supérieures à 4 m/s pour Bechar, et des vitesses supérieures à 5 m/s pour Tindouf et supérieures à 6 m/s pour Adrar. Le fait que la région Sud-Ouest possède un potentiel éolien important peut être attribué à deux facteurs. Le premier est qu’elle est située dans une zone de différence de pression (Vents globaux dans les latitudes près de  $30^{\circ}$ ). La deuxième est qu’elle est proche de l’océan Atlantique (les perturbations météorologiques atteignant la région avec une forte intensité).

Concernant la région Sud-est, où il a été constaté que le potentiel éolien dans cette région est relativement moins fort par rapport à la région Sud-Ouest. Des vitesses supérieures à 4.5 m/s ont été observées pour la région d’Inamenass. Alors pour la région

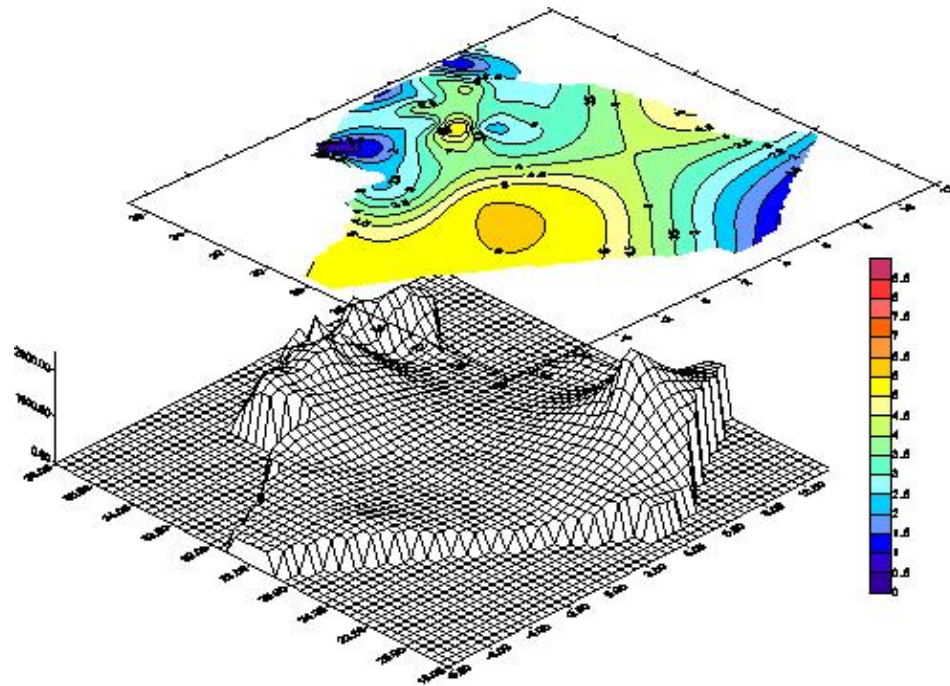


Figure 2.14 – La répartition annuelle de la vitesse du vent en Algérie en haut projetée sur l'altitude en bas.

de Tamanrasset, on note que le potentiel éolien est au-dessous des 4 m/s. Normalement, toute la bande Sud de l'Est jusqu'à l'Ouest doit être ventée. Compte tenu de l'aspect topographique, la diminution du potentiel éolien dans cette région est attribuée à la série montagneuse du Tassili qui détourne et empêche quelques perturbations météorologiques. Ceci est illustré dans la figure 2.14 qui présente la répartition annuelle de la vitesse du vent en Algérie projetée sur l'altitude (élévation par rapport au niveau de la mer).

Concernant la région de Hassi-R'mel, le tableau 2.2 indique que cette région possède un potentiel éolien aussi important que celui d'Adrar ( $v = 6m/s$ ). Ce potentiel a été sous-estimé parce qu'elle est localisée entre deux régions moins ventées (Laghouat et Ghardaïa). D'après la figure 2.14, ce potentiel peut être attribué à un couloir d'air qui passe par la région (effet tunnel) [24].

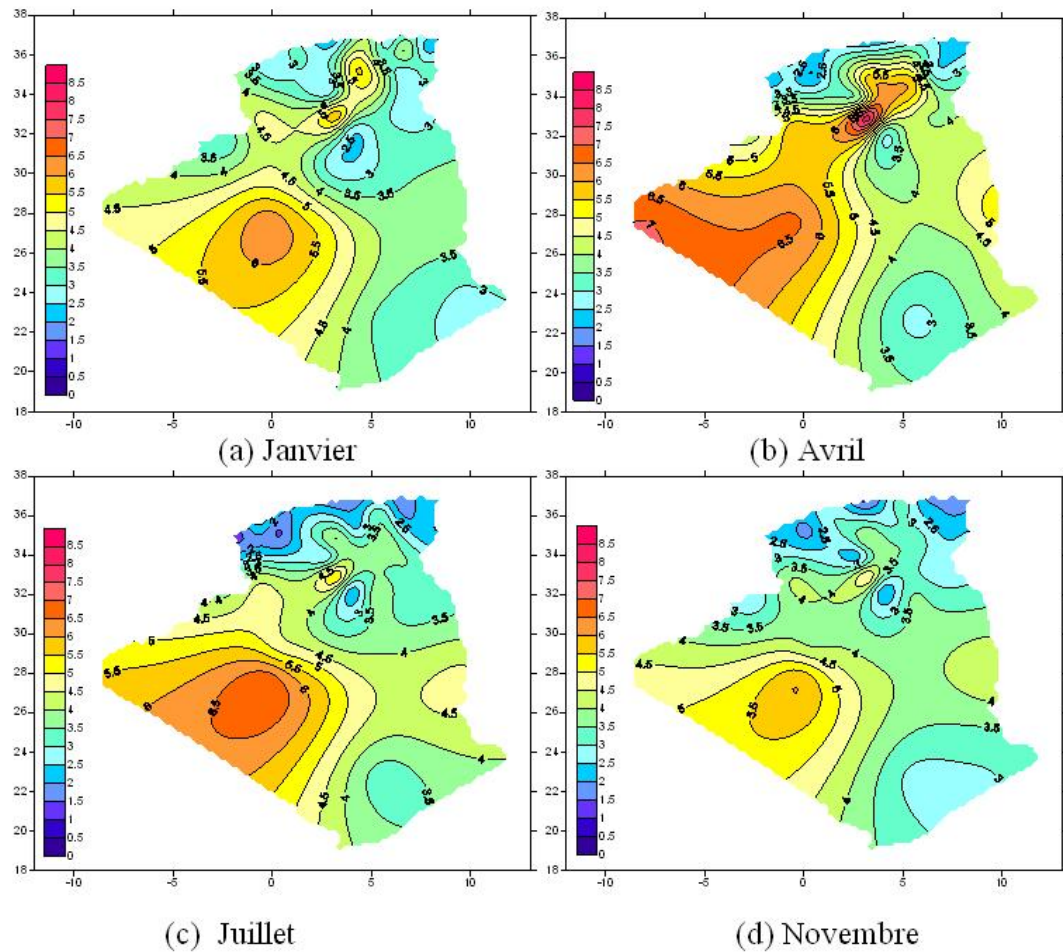


Figure 2.15 – Cartes mensuelles du vent en Algérie.

D'après, le tableau 2.2 et la figure 2.15 qui présentent les cartes mensuelles du vent en Algérie, on peut constater que le vent en Algérie obéit à une même variation mensuelle. Il est alors possible de classer les mois les moins ventés aux plus ventés. En effet, on remarque que les mois de printemps sont les plus ventés particulièrement dans les régions Sud. Durant cette période de l'année, ces régions sont caractérisées par des vents de sables importants. On note également que pour la partie Sud-Ouest du pays, la vitesse varie peu en fonction des saisons. Compte tenu de ces résultats, cette région est très favorable pour l'installation des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Concernant la région de Hassi R'mel, on note que l'écart mensuel est important. Les mois les plus ven-

tés sont incontestablement ceux de Mars ( $v=7.6$  m/s), Avril ( $v=8.1$  m/s ) et Mai ( $v=7.9$  m/s). Alors que pour les mois d'Octobre et Novembre, on note que le potentiel éolien ne dépasse pas les 4.8 m/s. Ceci pourrait être considéré comme un inconvénient pour les systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

Ces études ont été menées dans le cadre de travaux d'estimation de l'énergie éolienne, le nombre de sites considérés est limité et pour cette raison ces travaux ne peuvent être considérés comme préliminaires. Comme le montre cette étude pour le cas de Hassi-R'mel, une région ventée a été négligée. Beaucoup de travaux restent à faire car les stations météorologiques de l'Office National de la Météorologie (ONM) situées principalement au niveau des chefs lieu de Wilaya et des aéroports ne sont pas suffisantes pour caractériser le potentiel éolien en Algérie. Le territoire Algérien est très vaste et ces stations sont dispersées avec de grandes distances particulièrement dans le Sud. Afin de localiser les zones ventées (particulièrement les zones éloignées et isolées), nous encourageons à utiliser les indicateurs écologiques et de mener des enquêtes au près des habitants de ces zones spécialement les éleveurs de bétails et les routiers car la nature de leur travail dépend énormément du comportement du vent. D'ailleurs c'est grâce aux indications des routiers qu'on s'est intéressé à la région de Hassi-R'mel.

Il est important de noter que dans la terminologie arabe, le nom Hassi-R'mel signifie la source du sable. Les nomades de la région ont donné ce nom à cette région car elle est toujours caractérisée par des tempêtes sableuses. Ce travail préliminaire de détermination qualitative doit être suivi par une campagne de mesures pour une détermination quantitative du potentiel éolien.

## 2.6 CONCLUSION

Le vent est un phénomène atmosphérique complexe que l'on peut étudier de multiples façons à différentes échelles. Dans ce chapitre, nous avons présenté trois types de

vents et les forces qui agissent sur leurs comportements. Les vents globaux dûs à l'inhomogénéité de l'intensité du rayonnement solaire sur la surface de la terre, les vents locaux dûs à la topographie et les reliefs et les vents de la surface causés par la résistance de frottement du sol.

La vitesse et la direction du vent sont mesurées par d'anémomètre et de girouette selon des conditions conventionnellement fixées. Toutefois, les indicateurs écologiques et biologiques peuvent être utilisés afin d'obtenir des idées sur le comportement général du vent sur une zone précise. Dans ce travail, nous avons utilisé les formes et l'ampleur des dunes de sable dans le Sud comme indicateur écologique. Dans les régions Nord, l'inclinaison des arbres a été utilisée comme indicateur biologique.

A travers cette étude, on peut conclure que le gisement éolien est plus important au Sud, particulièrement le Sud-ouest, qu'au Nord. Il est plus important au printemps qu'en hiver.

De plus, certaines régions, particulièrement toute la région du Sud-ouest sont caractérisées par des vitesses élevées tout au long de l'année. Ceci est particulièrement vrai pour Adrar où la vitesse moyenne dépasse les 6 m/s.

Cette étude a permis également de fournir aux utilisateurs potentiels des informations sur l'évolution mensuelle et saisonnière de la vitesse moyenne du vent en Algérie. Celles-ci sont nécessaires pour le choix du site sachant que les besoins énergétiques varient en fonction des saisons. Cependant, ces informations sont insuffisantes lorsqu'il s'agit de dimensionner un système de conversion de l'énergie éolienne.

Néanmoins, cette étude ne suffit pas à l'identification de toutes les régions ventées de l'Algérie car le nombre de stations de mesure est insuffisant pour couvrir tout le territoire et leurs positions géographiques ne sont pas représentatives des régions possédant les vitesses les plus élevées. De plus, ces stations sont généralement situées sur

des aérodromes ou dans des centres urbains et les mesures effectuées sont plus destinées à l'aviation ou à la climatologie. Les conditions de mesure ne prennent pas en compte certaines exigences liées à l'environnement (obstacles, topographie) et qui peuvent influencer sur la représentativité des mesures. Il y a donc un besoin d'augmenter le nombre des stations de mesure et surtout de bien choisir les sites de mesures. Pour le choix judicieux de l'emplacement de ces stations, on peut utiliser les indicateurs écologiques .

A travers ces études, une contribution à l'actualisation de la carte du vent en Algérie a été effectuée en ajoutant les données de la région de Hassi-R'mel. Il a été constaté que cette région possède un potentiel éolien très important. Selon notre analyse, ce potentiel est attribué à un couloir d'air qui passe par la région (effet tunnel).



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Sathyajith. Wind energy, Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2006).
- [2] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi. wind energy handbook. John Wiley and Sons (2001).
- [3] C.G Justus. Vent et performances des éoliennes. Edition SCM (1980).
- [4] I. Ven der Hoven. Power spectrum of horizontal wind in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. Journal of Meteorology, Volume 14, Issue 2 (April 1957) pages 160-164.
- [5] V. Schwammle. Modeling of Dune Morphology. Master thesis. Institute of Computer Applications of the University of Stuttgart(2002).
- [6] P.C. Putnam. Power from the Wind. Van Nostrand, New York (1948).
- [7] W.J. Saucier. Principles of Meteorological Analysis. Courier Dover Publications (2003).
- [8] M. Said and A. Ibrahim. Energy in the Arab world. Energy 9 3 (1984), pages 217-238.
- [9] H. Bensaid. The Algerian Programme on Wind Energy. Proceeding of WEAC, Oxford (1958 ) pages 21-27.
- [10] R. Hammouche. Atlas Vent de l'Algérie. Office des Publications Universitaires (OPU), Algiers (1990).
- [11] N. kasbadji Merzouk. Wind energy potential in Algeria. Renewable Energy, Volume 21, Issues 3-4, (November 2000) Pages 553-562.
- [12] F. Youcef Ettoumi. Ressources Energétiques Renouvelables en Algérie. Thèse de Doctorat d'état, USTHB (2002).

- [13] Y. Himri, S. Himri, A. Boudghene Stambouli. Wind power resource in the southwestern region of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 1, (January 2010) Pages 554-556.
- [14] Y. Himria, A. Boudghene Stamboulib, B. Draouic and S. Himrid. Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Algeria. *Energy*, Volume 33, Issue 7 (July 2008) Pages 1128-1136.
- [15] Y. Himrib, S. Rehmana, B. Draouic and S. Himrid. Wind power potential assessment for three locations in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 12, Issue 9 (December 2008) Pages 2495-2504.
- [16] Y. Himri , S. Himri and A. Boudghene Stambouli. Assessing the wind energy potential projects in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issue 8( October 2009) Pages 2187-2191.
- [17] Y. Himri, S. Arif, A. Malik, A. Boudghene Stambouli , S. Himri and B. Draouie. Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issues 6-7 (August-September 2009) Pages 1584-1591.
- [18] Y. Himri, A. Boudghene Stamboulib and B. Draouic. Prospects of wind farm development in Algeria. *Desalination*, Volume 239, Issues 1-3( April 2009) Pages 130-138.
- [19] Y. Himri , A. Boudghene Stambouli , B. Draoui and S. Himri. Review of wind energy use in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 13, Issue 4( May 2009) Pages 910-914.
- [20] D. Saheb-Koussa , M. Haddadi and M. Belhamel. Economic and technical study of a hybrid system (wind-photovoltaic-diesel) for rural electrification in Algeria. *Applied Energy*, Volume 86, Issues 7-8( July-August 2009) Pages 1024-1030.
- [21] M.A. Tabet Helal and N. Ghellai. Le Gisement Eolien à Beni-Saf Région Côtière de l'Ouest Algérien. *Rev. Energ. Ren. ICPWE* (2003)143-146.

- [22] F. Youcef Ettoumi, H. Sauvageot and A.E.H. Adane. Statistical bivariate modelling of wind using first-order Markov chain and Weibull distribution. *Renewable Energy*, Volume 28, Issue 11( September 2003) Pages 1787-1802.
- [23] N. Kasbadji Merzouk. Evaluation du Gisement énergétique Eolien. Contribution à la Détermination du profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie. Thèse doctorat, Université Abou bekr Belkaid Tlemcen (2006).
- [24] F. Chellali F, A. Khellaf, A. Belouchrani and A. Reciou. Contribution to wind mapping in Algeria via the study of Wind behavior and wind energy in Hassi R'Mel, Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15 (February 2011) pages 993-1002.

## Densité de probabilité de la vitesse du vent

## CHAPITRE 3

### DENSITÉ DE PROBABILITÉ DE LA VITESSE DU VENT

Le vent joue un rôle primordial dans de nombreuses applications telles que l'exploration de l'énergie éolienne, la lutte contre la désertification, le transport et la diffusion des polluants. La vitesse du vent est très variable du point de vue temporel et géographique. Donc, la connaissance de ses caractéristiques est d'une grande importance. Lorsque la densité de probabilité de la vitesse du vent est connue, ses caractéristiques statistiques telles que la moyenne, la variance et la fonction d'autocorrection peuvent être facilement obtenues.

Dans la littérature, la distribution de Weibull est largement utilisée pour décrire la densité de probabilité du vent. Selon Carta al. [1], cette dernière est très utilisée dans la littérature spécialisée de l'énergie éolienne [2-9] et elle est pratiquement la seule distribution recommandée dans les manuels relatifs à l'énergie éolienne [10-13].

Le but du présent chapitre est d'introduire de nouvelles distributions de probabilité basées sur le principe du maximum d'entropie afin de décrire la densité de probabilité de la vitesse du vent. Nous tenons à mentionner que dans tout ce chapitre, le processus du vent est considéré comme un processus stochastique ergodique. En premier lieu, nous allons présenter un bref rappel des processus stochastiques ainsi que la définition de la stationnarité et l'ergodicité d'un processus aléatoire. En second lieu, nous introduisons la distribution de Weibull avec deux différentes méthodes généralement utilisées pour l'estimation de ces paramètres (Weibull). Après cela, et afin d'obtenir un meilleur ajustement de la densité de probabilité de vent, nous proposons une série de distribution basées sur l'application du principe du maximum d'entropie. L'erreur quadratique moyenne a été utilisée comme critère afin de comparer les performances des deux approches (densité de probabilité).

## 3.1 Rappel sur les processus aléatoires

### 3.1.1 Processus aléatoire

Un processus aléatoire ou bien une fonction aléatoire  $X(\xi, t)$  est un processus pouvant dans l'expérience adopter une forme quelconque inconnue d'avance. La forme prise par un processus aléatoire lors de l'expérience est appelée réalisation.

Evidemment, chaque réalisation du processus aléatoire est une fonction déterministe. Nous convenons de désigner les processus aléatoires par des lettres majuscules  $[X(\xi, t), Y(\xi, t), \dots]$  pour distinguer les fonctions non aléatoires (réalisations) que nous désignerons par des minuscules  $[x(t), y(t), \dots]$ . Pour un instant  $t$ , le processus aléatoire deviendra une variable aléatoire  $\xi$  au sens habituelle du terme [14]. Cette variable aléatoire possède une loi de répartition  $f(\xi, t)$  qui dépend généralement de  $t$ .

Mais, la fonction  $f(\xi, t)$  n'est pas une caractéristique exhaustive de  $X(\xi, t)$ . En effet, elle nous donne que la loi de répartition de  $X(\xi, t)$  pour une valeur précise de  $t$ .

La loi multidimensionnelle  $f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, t_1, t_2, \dots, t_n)$  représente une caractéristique plus complète du processus aléatoire  $X(\xi, t)$ . Mais, l'utilisation des caractéristiques aussi compliquées qui dépendent d'un grand nombre d'arguments est extrêmement difficile. C'est pourquoi dans les études des lois de répartition des processus aléatoires, on se limite généralement aux cas particuliers où pour caractériser complètement une fonction aléatoire il suffit par exemple de connaître  $f(\xi_1, \xi_2, t_1, t_2)$ .

### 3.1.2 Espérance mathématique

Soit la section du processus aléatoire  $X(\xi, t)$  pour un  $t$  donné. Dans cette section nous avons une variable aléatoire habituelle. L'espérance mathématique d'un processus aléatoire est définie comme suite :

$$m_x(t) = E[X(\xi, t)] = \int_R X(\xi, t) f(\xi, t) d\xi \quad (3.1)$$

Dans le cas général, l'espérance mathématique d'un processus aléatoire est une fonction non aléatoire qui dépend du temps  $t$ .

### 3.1.3 Variance et écart type

On définit d'une manière analogue la variance d'un processus aléatoire. On appelle variance d'un processus aléatoire  $X(\xi, t)$  une fonction non aléatoire  $\sigma_x^2(t)$  :

$$\sigma_x^2(X(\xi, t)) = E[(X(\xi, t) - m_x(t))^2] \quad (3.2)$$

Si  $\sigma_x^2(t) = 0$ , le signal perd son caractère aléatoire. Il s'agit alors d'un processus déterministe. Il est évident que  $\sigma_x^2(t)$  est une fonction non négative. La racine carrée de cette fonction  $\sigma_x(t)$  est l'écart quadratique moyen du processus aléatoire, soit :  $X(\xi, t)$  une fonction non aléatoire  $\sigma_x^2(t)$  :

$$\sigma_x(X(\xi, t)) = \sqrt{\sigma_x^2(X(\xi, t))} \quad (3.3)$$

### 3.1.4 Fonction de corrélation

L'espérance mathématique et la variance sont des caractéristiques très importantes d'un processus aléatoire. Cependant elles sont insuffisantes pour caractériser les particularités essentielles [16]. On appelle la fonction d'autocorrection  $C_x(t_1, t_2)$  :

$$C_x(t_1, t_2) = E[(X(\xi, t_1) - m_x(t_1))(X(\xi, t_2) - m_x(t_2))] \quad (3.4)$$

La fonction d'autocorrection indique le degré de dépendance entre les sections d'un processus aléatoire pour différentes valeurs de  $t$ .

### 3.1.5 Processus aléatoire stationnaire

Dans la pratique, on rencontre souvent des processus aléatoires qui se déroulent dans le temps d'une manière un peu près homogène et ressemblent à des oscillations aléatoires continues autour d'une certaine valeur moyenne. Ni l'amplitude moyenne, ni les caractéristiques de ces oscillations ne subissent des variations importantes dans le temps. Ces processus aléatoires sont dits stationnaires. Lors de l'étude de ces processus, le choix du moment initial importe peu. Les caractéristiques d'un processus aléatoire doivent être les mêmes quel que soit l'intervalle du temps choisi pour étudier ce processus [15].

Un processus aléatoire est dit stationnaire si toutes ses propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Pour un processus stationnaire, il est tout naturel de s'attendre à ce que son espérance mathématique soit constante.

$$m_x(t) = m_x = \text{const} \quad (3.5)$$

Un processus aléatoire doit également satisfaire à une seconde condition ; sa variance doit être constante :

$$\sigma_x^2(X(\xi, t)) = \sigma_x^2 = \text{const} \quad (3.6)$$

Un processus aléatoire  $X(\xi, t)$  est dit stationnaire au sens large si son espérance mathématique ne dépend pas de  $t$  et sa fonction de corrélation ne dépend que de la différence  $t_1 - t_2 = \tau$ , c'est à dire :

$$C_x(t_1, t_2) = C_x(\tau) \quad (3.7)$$



### 3.1.6 Ergodicité

Dans la pratique, nous avons une seule réalisation  $x(t)$ , soit une valeur particulière de  $X(\xi, t)$ . Ainsi, nous avons un signal déterministe qui constitue une trajectoire unique du processus aléatoire. Mais, le calcul de  $m_x(t)$ ,  $\sigma_x^2(X(\xi, t))$  et  $C_x(\tau)$  suppose la connaissance de la densité de probabilité.

Comment peut-on obtenir les moyennes statistiques de ce processus uniquement à partir d'une trajectoire du  $X(\xi, t)$  ?

Un processus est dit ergodique, si on peut identifier ou remplacer ses moyennes statistiques par ses moyennes temporelles [17]. C'est-à-dire :

$$E[X(\xi, t)] = T \xrightarrow{\lim} \infty \frac{1}{T} \int_R X(\xi, t) dt \quad (3.8)$$

Où  $T$  est l'intervalle d'observation. Ceci reste bien impossible si  $E[X(\xi, t)]$  est une fonction du temps [18]. Pour un processus aléatoire ergodique, une seule réalisation assez longue est suffisante pour obtenir ses caractéristiques.

## 3.2 Distribution de Weibull

### 3.2.1 Densité de probabilité à deux paramètres

La distribution de Weibull à deux paramètres est donnée par l'équation suivante :

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right\} \quad (3.9)$$

Où

$c$  : Facteur d'échelle.

$k$  : Facteur de forme.

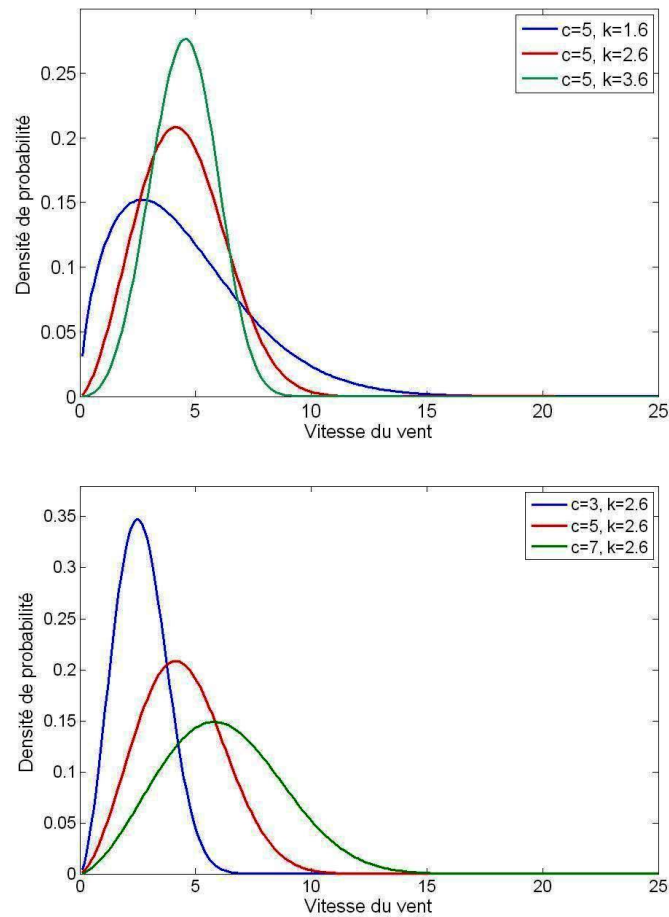


Figure 3.1 – La distribution de Weibull pour plusieurs valeurs de  $c$  et  $k$ . (a) Facteur de forme variable, (b) Facteur d'échelle variable.

Le facteur d'échelle  $c$  a la même dimension que la vitesse du vent  $v$ . Il doit être supérieur à zéro. Le facteur  $k$  est sans dimension, il varie généralement entre 1.5 et 3 dans la plupart des conditions du vent [9]. Si  $k = 2$ , la fonction résultante est souvent connue sous le nom de distribution Rayleigh [2]. Tandis que si  $k = 3.6$ , la distribution de Weibull peut être approximée par une distribution Gaussienne [3] et [6]. Ces aspects sont illustrés dans la figure 3.1 qui représente la distribution de Weibull pour plusieurs valeurs de  $c$  et  $k$ .

La détermination des paramètres de la distribution Weibull est très utile afin d'obtenir

la vitesse et la variance stochastiques de la vitesse du vent. La vitesse moyenne du vent peut être calculée comme suit :

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \int_0^{\infty} v f(v) dv \\ &= \int_0^{\infty} v \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) dv\end{aligned}\quad (3.10)$$

Posons

$$x = \left(\frac{v}{c}\right)^k \quad (3.11)$$

d'où

$$\bar{v} = c \int_0^{\infty} x^{1/k} e^{-x} dx \quad (3.12)$$

Sachant que la fonction Gamma est donnée sous la forme :

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} x^{y-1} e^{-x} dx \quad (3.13)$$

Et pour :

$$y = 1/k + 1 \quad (3.14)$$

En utilisant l'équation (3.12), on vérifie :

$$\bar{v} = c\Gamma(1/k + 1) \quad (3.15)$$

Concernant la variance  $\sigma_v^2$ , nous avons :

$$\begin{aligned}\sigma_v^2 &= \int_0^{\infty} (v - \bar{v})^2 f(v) dv \\ &= \int_0^{\infty} v^2 \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) dv \\ &\quad + \int_0^{\infty} \bar{v}^2 \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) dv \\ &\quad - 2 \int_0^{\infty} (v - \bar{v}) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) dv \\ &= \int_0^{\infty} v^2 \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) dv + \bar{v}^2\end{aligned}\quad (3.16)$$

D'une manière analogue que l'équation (3.11), on pourra démontrer que :

$$\int_0^{\infty} v^2 \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp-\left(\frac{v}{c}\right)^k dv = c^2 \Gamma(2/k + 1) \quad (3.17)$$

Ainsi que

$$\sigma_v^2 = c^2 [\Gamma(1/k + 1)^2 + \Gamma(2/k + 1)] \quad (3.18)$$

### 3.2.2 Estimation des paramètres de Weibull

Les paramètres  $c$  et  $k$  peuvent être estimés avec plusieurs techniques [9]. Dans cette section, on présente la méthode des moments ainsi que la méthode du maximum de vraisemblance.

#### 3.2.2.1 Méthode des moments

Afin d'estimer  $c$  et  $k$ , nous pouvons résoudre les équations ci-dessous

$$\sqrt{\frac{\sigma_v^2}{\bar{v}^2}} = \sqrt{\frac{\Gamma(1/k + 1)^2 + \Gamma(2/k + 1)}{\Gamma(1/k + 1)^2}} \quad (3.19)$$

et

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1/k + 1)} \quad (3.20)$$

L'équation (3.19) peut être résolue itérativement pour obtenir  $k$ . Justus [19] a proposé l'approximation suivant :

$$\hat{k}_{MM} = \left(\frac{\sigma_v}{\bar{v}}\right)^{-1.089} \quad (3.21)$$

#### 3.2.2.2 Méthode du maximum de vraisemblance

La fonction de vraisemblance appliquée à la distribution de Weibull s'écrit :

$$L_v = \prod_{i=1}^N f(v_i) = \prod_{i=1}^N \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_i}{c}\right)^{k-1} \exp-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k \quad (3.22)$$

Où  $N$  est le nombre total d'échantillons.

On introduit le logarithme dans l'équation (3.22) :

$$\ln(L_v) = \sum_{i=1}^N \ln(k) - k \sum_{i=1}^N \ln(c) + (k-1) \sum_{i=1}^N \ln(v_i) - \sum_{i=1}^N \left(\frac{v_i}{c}\right)^k \quad (3.23)$$

En maximisant par rapport à  $c$  et à  $k$  on obtient :

$$\frac{L_v}{\partial k} = \frac{N}{k} - N \ln(c) + \sum_{i=1}^N \ln(v_i) - k \sum_{i=1}^N \left(\frac{v_i}{c}\right)^{k-1} = 0 \quad (3.24)$$

et

$$\frac{L_v}{\partial c} = -\frac{k}{c} N + \frac{k}{c} \sum_{i=1}^N \left(\frac{v_i}{c}\right)^k = 0 \quad (3.25)$$

D'où :

$$\hat{c} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i^k) \right]^{1/k} \quad (3.26)$$

On remplace l'équation (3.26) dans l'équation (3.24), on aura :

$$\hat{k} = N \left( \frac{\sum_{i=1}^N (v_i^k \ln(v_i))}{\sum_{i=1}^N (v_i^k)} - \sum_{i=1}^N (\ln(v_i)) \right)^{-1} \quad (3.27)$$

L'équation (3.27) est une équation algébrique non-linéaire qui ne possède pas de solution analytique. L'estimation des paramètres de Weibull via la méthode du maximum de vraisemblance est difficile parce que cette équation doit être résolue numériquement par un processus itératif. Une fois  $\hat{k}$  devient optimale, il est substitué dans l'équation (3.26) pour trouver  $\hat{c}$ . Néanmoins, cette méthode est très recommandée car il a été démontré qu'elle donne la meilleure estimation de  $k$  et de  $c$  [1].

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser la méthode du maximum de vraisemblance. Afin d'accélérer les calculs, les valeurs obtenues par la méthode des moments

peuvent être utilisées comme valeurs initiales.

### 3.3 Principe du maximum d'entropie (PME)

Le principe du maximum d'entropie basé sur la maximisation de la fonction de Shannon  $S$  est largement utilisé dans la théorie de l'information. Récemment, ce dernier a été proposé pour étudier les distributions de la vitesse du vent [20].

$$S = - \int_a^b f(v) \log(f(v)) dv \quad (3.28)$$

Le PME a été introduit pour la première fois dans le domaine de l'énergie éolienne en 2004 par Li et al. [20, 21 et 22]. Les auteurs ont proposé un ensemble de familles de distributions pré-exponentielles pour ajuster la densité de probabilité de la vitesse du vent.

La fonction de densité de probabilité peut être obtenue en minimisant l'entropie de Shannon dans les limites suivantes :

- (a) La somme de toutes les probabilités dans l'intervalle de définition doit être égale à l'unité.
- (b) Le moment statistique de l'ordre  $M$  doit être égal à la moyenne temporelle d'ordre  $M$ .

Mathématiquement, ces deux restrictions peuvent être exprimées en tant que :

$$\int_a^b f(v) dv = 1 \quad (3.29)$$

et

$$\int_a^b v^j f(v) dv = \hat{m}_j \quad (3.30)$$

Où  $[a b]$  est l'intervalle dont lequel la fonction de densité de probabilité est définie. Dans notre cas,  $a = 0$  et  $b = v_{max}$ .

Un moment temporel  $\hat{m}_j$  de l'ordre  $j$  est estimé comme suit [21] :

$$\hat{m}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^j \quad (3.31)$$

Il est à noter que ces moments temporels sont calculés sous l'hypothèse que nous avons assez de valeurs  $N$  pour que ces moments tendent vers leurs vraies valeurs et que le processus du vent est un processus ergodique.

### 3.3.1 Distributions PME

On recherche une distribution de la forme :

$$f(v) = \exp\{a_0 + a_1v + a_2v^2 + \dots + a_Mv^M\} \quad (3.32)$$

Où  $a_j$  sont les paramètres à estimer.

Ainsi, la fonction de densité de probabilité est déterminée une fois que ses paramètres sont obtenus. Pour cela, on peut résoudre l'ensemble des équations suivantes :

$$\begin{aligned} \int_0^{v_{max}} e^{a_0+a_1v+a_2v^2+\dots+a_Mv^M} dv &= 1 \\ \int_0^{v_{max}} v e^{a_0+a_1v+a_2v^2+\dots+a_Mv^M} dv &= \hat{m}_1 \\ &\vdots \\ \int_0^{v_{max}} v^M e^{a_0+a_1v+a_2v^2+\dots+a_Mv^M} dv &= \hat{m}_M \end{aligned} \quad (3.33)$$

Le recours aux méthodes numériques est indispensable pour résoudre le système d'équations (3.33), car une solution analytique est pratiquement impossible. Le système d'équations est résolu en utilisant la méthode de Newton Raphson.

### 3.3.2 Distributions type-PME

Afin d'obtenir de meilleures performances, Li et al. [21] ont introduit le terme pré-exponentiel  $v^r$  aux distributions PME. Les distributions résultants sont connues sous le nom de distributions type-PME.

Une distribution type-PME est exprimée comme suite :

$$f(v) = v^r \exp\{a_0 + a_1v + a_2v^2 + \dots + a_Mv^M\} \quad (3.34)$$

Les valeurs de  $v^r$  sont données comme entrée. Ainsi, le système d'équations suivant est résolu numériquement :

$$\begin{aligned} \int_0^{v_{max}} v^r e^{a_0+a_1v+a_2v^2+\dots+a_Mv^M} dv &= 1 \\ \int_0^{v_{max}} v^{r+1} e^{a_0+a_1v+a_2v^2+\dots+a_Mv^M} dv &= \hat{m}_1 \\ \vdots & \\ \int_0^{v_{max}} v^{r+M} e^{a_0+a_1v+a_2v^2+\dots+a_Mv^M} dv &= \hat{m}_M \end{aligned} \quad (3.35)$$

### 3.4 Distribution hybride

La distribution hybride  $f_h(v)$  est utilisée lorsque la fréquence enregistrée des vents calmes sur un site donné est supérieure ou égale à 15% [19]. En effet, cette proportion ne peut être négligée et elle doit être prise en compte.

Cette distribution s'écrit :

$$f_h(v) = \begin{cases} ff_0 & v = 0 \\ (1 - ff_0)f(v) & v > 0 \end{cases} \quad (3.36)$$

Ou  $f(v)$  représente la densité de probabilité pour les vitesses non nulles et  $ff_0$  est la fréquence des vents calmes.



### 3.5 Puissance du vent

Dans de nombreuses applications telles que les domaines de l'énergie éolienne et la construction des structures, la distribution de la vitesse du vent est utilisée pour estimer la puissance du vent. Pour une surface  $A = 1m^2$ , la puissance du vent est donnée comme [21] :

$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (3.37)$$

Ainsi, la densité de l'énergie éolienne peut être exprimée en tant que [21] :

$$f_p(v) = \frac{1}{2}\rho v^3 f(v) \quad (3.38)$$

### 3.6 Résultats et discussions

Nous procéderons dans cette section à la détermination des densités de probabilité en utilisant les deux distributions citées ci-dessus pour six sites répartis à travers le territoire national. Nous avons utilisé les données horaires mesurées pendant deux ans. Le tableau 3.1 donne des caractéristiques descriptives de la vitesse du vent pour ces sites.

En effet, les valeurs présentées dans ce tableau ne sont que des estimateurs des moments temporelles calculées sous l'hypothèse que nous avons assez de valeurs pour que ces moments tendent vers leurs vrais valeurs (des mesures horaires pour deux ans  $N=17500$ ). Comme indiqué dans ce tableau, les sites côtiers en Algérie sont caractérisés par un potentiel faible tandis que les sites de l'intérieur (Sud) sont plus adéquats pour des installations de fermes éoliennes.

Les histogrammes des vitesses de vent dans les six sites considérés sont reportés dans les figures de 3.2 à 3.7. L'évaluation de ces histogrammes a révélé que les fréquences des vents calmes dans les régions de Batna et Ghardaïa sont supérieures à 15%. Afin de prendre cela en compte, des distributions hybrides seront considérées pour ces deux sites.

	$\hat{m}_1$ (m/s)	$\hat{m}_2$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\hat{m}_3$ (m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	$\hat{m}_4$ (m <sup>4</sup> /s <sup>4</sup> )	$v_{max}$ (m/s)
Annaba	3.60	18.40	115.55	836.06	16.1
Oran	3.63	20.73	154.80	1474.21	26.5
Batna	3.58	20.38	146.10	1250.36	18.6
Ghardaïa	3.62	22.01	157.82	1311.35	19.7
Inamenass	4.74	30.76	242.38	2265.61	25.8
Adrar	6.30	49.44	453.04	4779.65	31.1

Tableau 3.I – Caractéristiques descriptives de la vitesse du vent dans les sites choisis.

Pour les sites d'Annaba, Oran, Batna, Ghardaïa, Inamenass et Adrar, le tableau 3.2 présente les erreurs quadratiques moyennes des distributions Weibull et les distributions basées sur le principe du maximum d'entropie. Les distributions type-PME sont développées pour des valeurs de  $M$  qui varient entre 2 à 4 et pour celles de  $r$  qui sont comprises entre 1 et 4.

### 3.6.1 Distribution PME

D'après les résultats obtenus, il a été constaté que les distributions PME peuvent ajuster les densités de probabilité du vent mieux que celles de Weibull dans plusieurs sites et pour plusieurs valeurs de  $M$ . Dans 50% des cas considérés, les RMSE des distributions PME sont inférieures à celles des distributions de Weibull. Seulement pour la région d'Annaba, les distributions PME n'ont pas donné de meilleur ajustement, même pour différentes valeurs de  $M$ . Concernant la densité de puissance du vent, le tableau 3.2 indique que pour plus de 93% des cas étudiés, les distributions PME offrent des RMSE-P inférieures à celles des distributions Weibull. Pour le cas d'Annaba, il est très intéressant de noter que malgré le meilleur ajustement de la distribution de Weibull pour la densité de probabilité, le tableau 3.2 indique que les distributions PME présentent des RMSE-P inférieures ( $M = 2, 3$  et 4). Ceci est attribué à l'erreur introduite par les fréquences des calmes pour la densité de probabilité. Cette erreur tend vers zéro pour la densité de puissance grâce au terme  $v^3$  (équation 3.38).

	Annaba	Oran	Batna	Ghardaïa	Inamenass	Adrar
	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
DW	$\nu$	$\nu$	$\nu$	$\nu$	$\nu$	$\nu$
NPE	$\rho\nu^3/2$	$\rho\nu^3/2$	$\rho\nu^3/2$	$\rho\nu^3/2$	$\rho\nu^3/2$	$\rho\nu^3/2$
Nf=2						
f=0	0.03182	0.02844	0.04219	0.03108	0.03177	0.03049
f=1	<b>0.02141</b>	0.03317	0.03670	0.02751	0.03206	0.02807
f=2	0.01997	0.04138	0.03415	0.02419	0.03237	<b>1.37044</b>
f=3	0.02588	1.90039	0.03458	0.02108	0.0329	1.61312
f=4	0.03454	2.31790	0.06183	0.01819	0.03434	1.99249
Nf=3						
f=0	0.02832	0.72039	<b>0.02634</b>	1.01625	0.04086	0.84949
f=1	0.02866	<b>0.37901</b>	0.03429	1.63904	0.03696	0.70777
f=2	0.03134	0.43557	0.04168	2.00560	0.03377	0.59602
f=3	0.03416	0.66090	0.04731	2.33042	0.03116	0.52487
f=4	0.03685	0.89946	0.05189	2.60886	<b>0.02906</b>	0.50203
Nf=4						
f=0	0.02419	0.54859	0.02762	<b>0.89459</b>	0.03647	0.69191
f=1	0.03092	0.49272	0.03599	1.30651	0.03450	0.63394
f=2	0.03573	0.56337	0.04382	1.6434	0.03262	0.58094
f=3	0.03952	0.70607	0.04984	1.93321	0.03082	0.53474
f=4	0.04261	0.87303	0.05445	2.19015	0.02909	<b>0.49777</b>

Tableau 3.II – RMSE des distributions de Weibull et PME/Type-PME pour les sites d'Annaba, Oran, Batna, Ghardaïa, Inamenass et Adrar. (Les distributions ayant les minimums RMSE et RMSE-P sont en gras).

	Les paramètres des distributions de Weibull	Les paramètres des distributions PME/type-PME
Annaba $r = 1$	$k = 1.80$ $c = 4.28$	$a_0 = -0.90589$ $a_1 = -1.0169$ $a_2 = 1.838910^{-2}$
Oran $r = 0$	$k = 1.34$ $c = 4.15$	$a_0 = -1.8694$ $a_1 = 1.27658$ $a_2 = -4.9996 \cdot 10^{-2}$ $a_3 = 1.3098 \cdot 10^{-3}$
Batna $r = 4$	$k = 1.88$ $c = 4.87$	$a_0 = -0.6105$ $a_1 = -2.1199$ $a_3 = 1.2623 \cdot 10^{-1}$ $a_4 = -4.0579 \cdot 10^{-3}$
Ghardaïa $r = 0$	$k = 2.36$ $c = 5.73$	$a_0 = -7.3739$ $a_1 = 3.5710$ $a_2 = -7.2149 \cdot 10^{-1}$ $a_3 = 5.4830 \cdot 10^{-2}$ $a_4 = -1.4980 \cdot 10^{-3}$
Inamenass $r = 0$	$k = 2.09$ $c = 5.84$	$a_0 = -2.77935$ $a_1 = 0.448795$ $a_2 = -6.8140 \cdot 10^{-2}$ $a_3 = 1.4648 \cdot 10^{-3}$
Adrar $r = 4$	$k = 2.46$ $c = 7.49$	$a_0 = -3.89781$ $a_1 = -0.92934$ $a_2 = 8.6525 \cdot 10^{-2}$

Tableau 3.III – Valeurs des paramètres des distributions Weibull et PME / Type-PME ayant les meilleures performances

	Ordre	Moment temporel	Moment statistique Distribution Weibull	Moment statistique Distribution PME et Type-PME
Annaba	$m_0$	1	1	1
	$m_1$	3.60	3.80	3.60
	$m_2$	18.40	19.29	18.40
Oran	$m_0$	1	1	0.9997
	$m_1$	3.63	4.02	3.63
	$m_2$	20.73	22.58	20.73
	$m_3$	154.80	157.65	154.80
Batna	$m_0$	1	0.99	1.02
	$m_1$	4.29	4.32	4.32
	$m_2$	24.42	24.32	24.55
	$m_3$	175.09	163.58	176.16
Ghardaia	$m_0$	1	1	1
	$m_1$	5.07	5.07	5.07
	$m_2$	30.86	31.06	30.79
	$m_3$	223.14	216.68	220.78
	$m_4$	1908.31	1671.94	1834.47
Inamenass	$m_0$	1	1	.99
	$m_1$	4.74	5.1751	4.74
	$m_2$	30.76	33.53	30.76
	$m_3$	242.38	253.39	242.37
Adrar	$m_0$	1	1	1
	$m_1$	6.30	6.64	6.3
	$m_2$	49.44	52.38	49.44

Tableau 3.IV – Les valeurs des moments temporels et les moments statistiques des distributions de Weibull et PME / Type-PME ayant les meilleures performances

### 3.6.2 Distribution type-PME

Les résultats obtenus indiquent que les distributions type-PME ( $r \geq 1$ ) offrent de meilleures performances pour plusieurs valeurs de  $M$  et  $r$ . Nous tenons à mentionner qu'une augmentation de  $M$  ou  $r$  n'aboutit pas systématiquement à de meilleurs ajustements (tableau 3.2). Les valeurs de  $M$  et  $r$  qui donnent de meilleurs résultats sont présentées en gras dans le tableau 3.2. Or, il est très difficile de déterminer une règle générale qui donne la configuration optimale de  $M$  et  $r$ .

De même pour les distributions type PME, il est très important de mentionner qu'un bon ajustement de la vitesse du vent ne signifie pas nécessairement un bon ajustement de la densité d'énergie éolienne.

Toutefois, il est à noter que les RMSE des densités de puissances sont toujours supérieures à celles des densités de probabilités. Des résultats similaires ont été obtenus précédemment [20,21,24 et 25]. En effet, ceci est dû au terme  $v^3$ .

Le tableau 3.3 présente les valeurs des paramètres des distributions Weibull et PME / Type-PME ayant les meilleures performances. Tandis que dans le tableau 3.4 on présente les valeurs des moments temporels et les moments statistiques  $\hat{m}_j$ . D'après ce tableau, Il est tout à fait clair que les distributions PME/type-PME présentent les meilleurs ajustements des données expérimentales.

Pour les sites étudiés, les figures 3.2 à 3.7 présentent les histogrammes, les distributions de Weibull et les distributions PME / type-PME ayant les meilleures performances. On note que les distributions type-PME sont les plus adéquates pour ajuster les histogrammes de la vitesse du vent dans la plupart des cas étudiés (Annaba, Batna, Ghardaïa et Adrar) et particulièrement pour des vitesses entre 5 et 15 m/s.

Pour les régions d'Oran et d'Inamenass, il a été constaté que les distributions PME

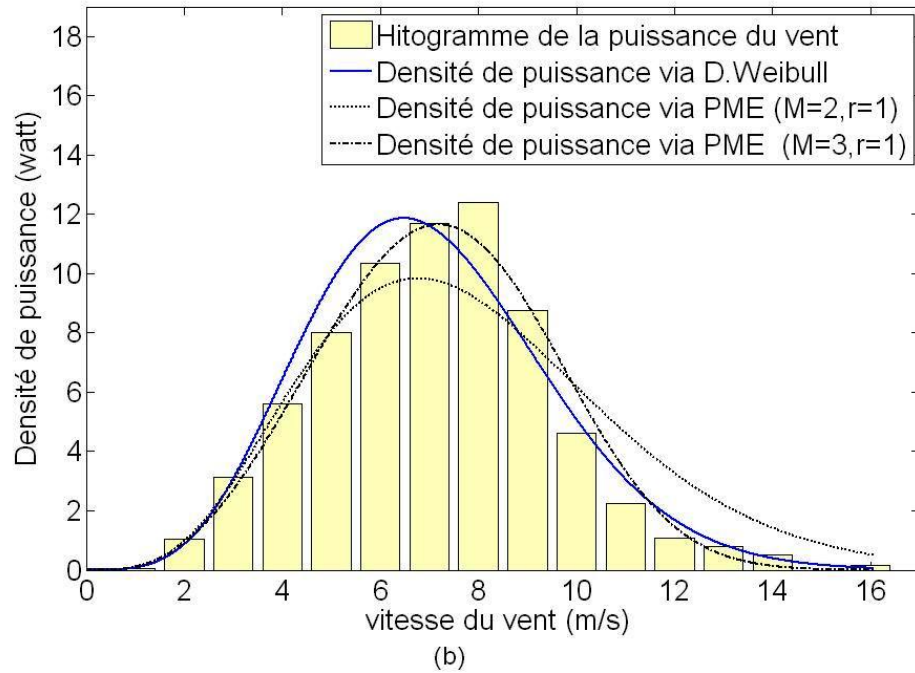
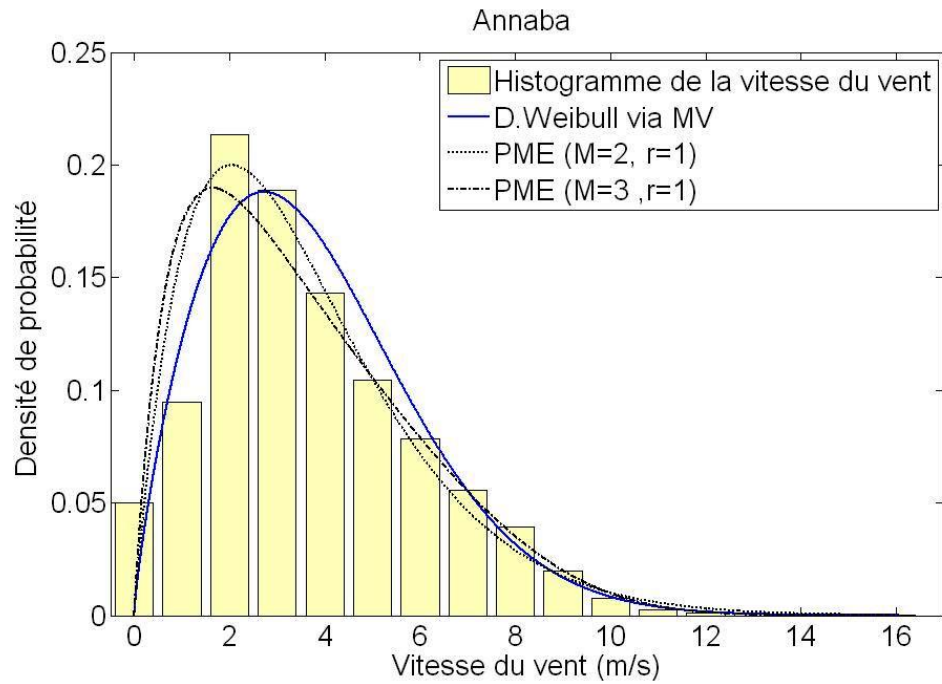


Figure 3.2 – Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site d’Annaba. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent

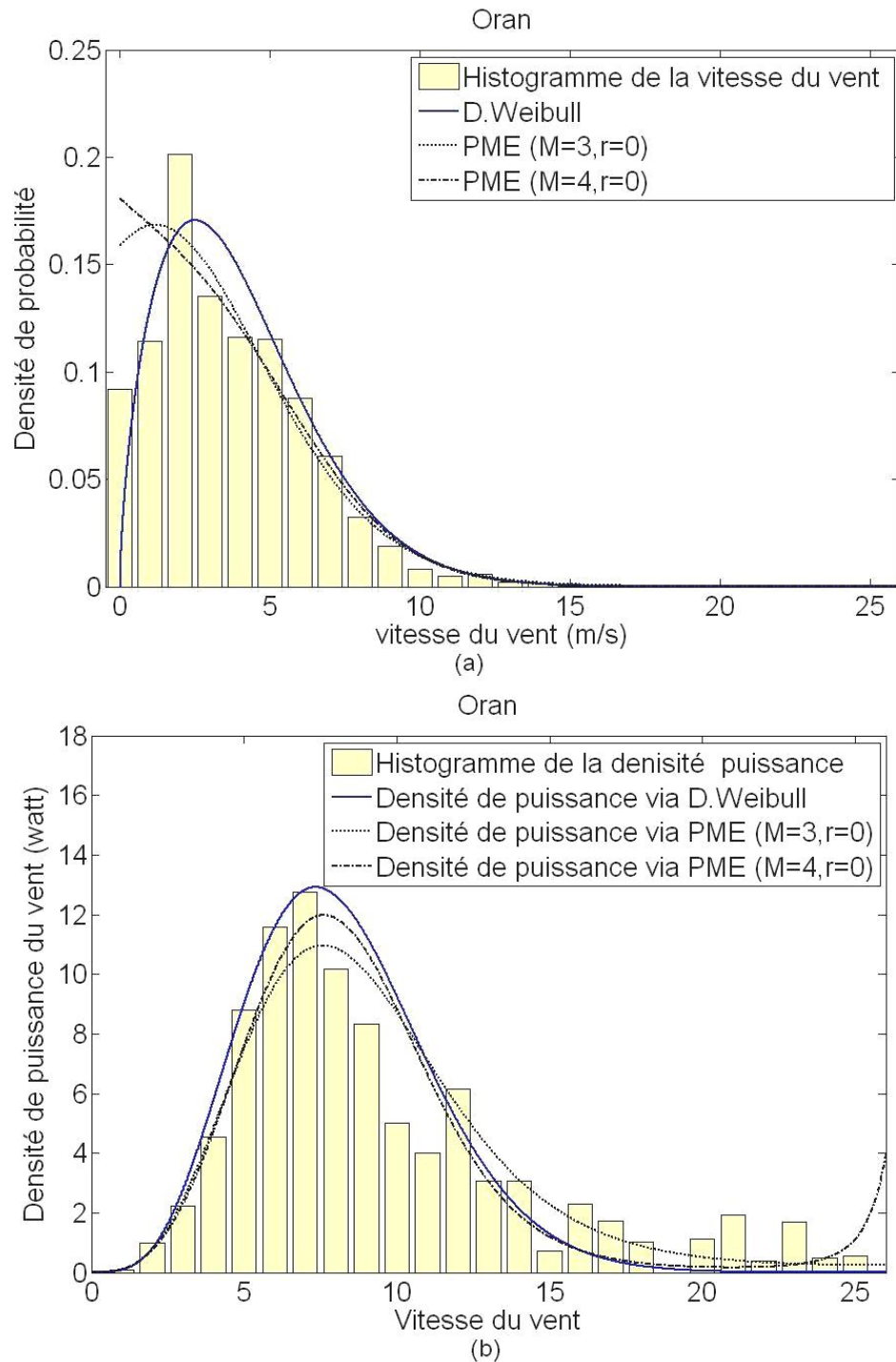


Figure 3.3 – Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site d’Oran. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent



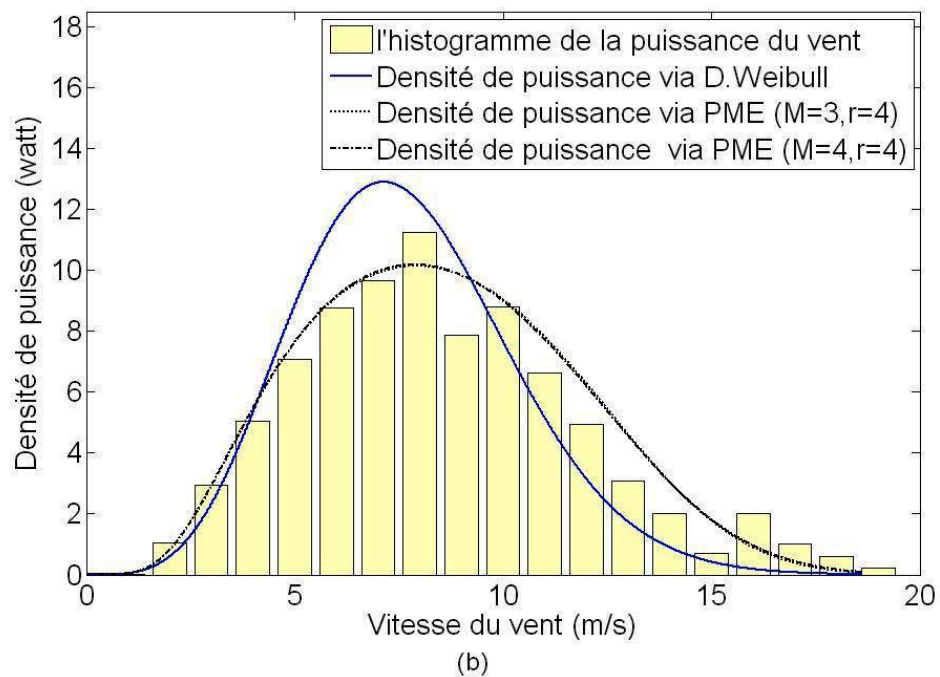
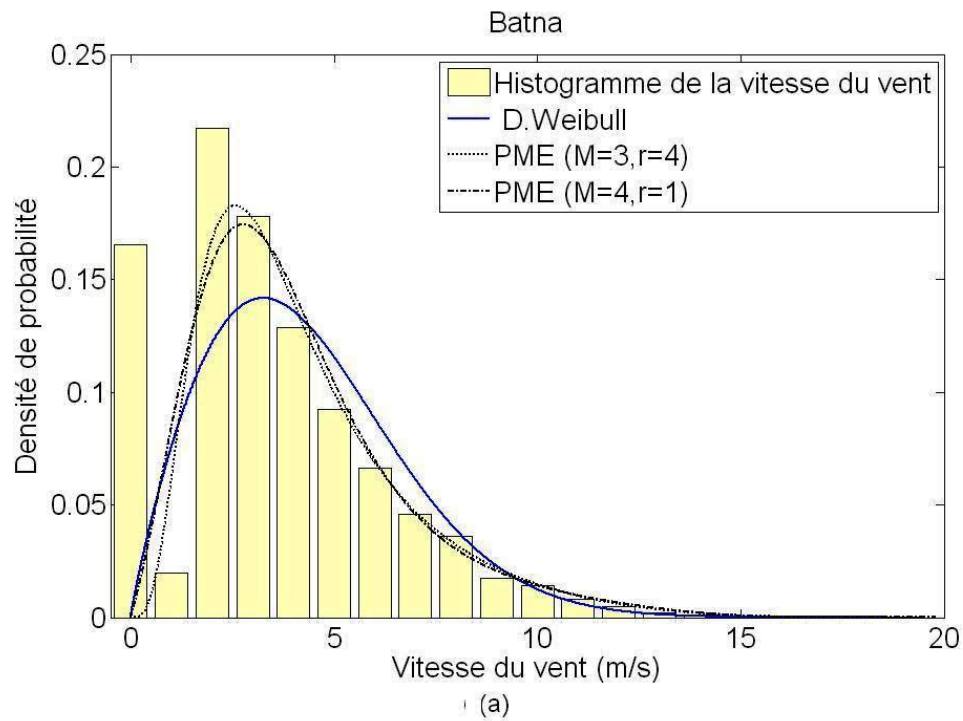


Figure 3.4 – Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site de Batna. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent

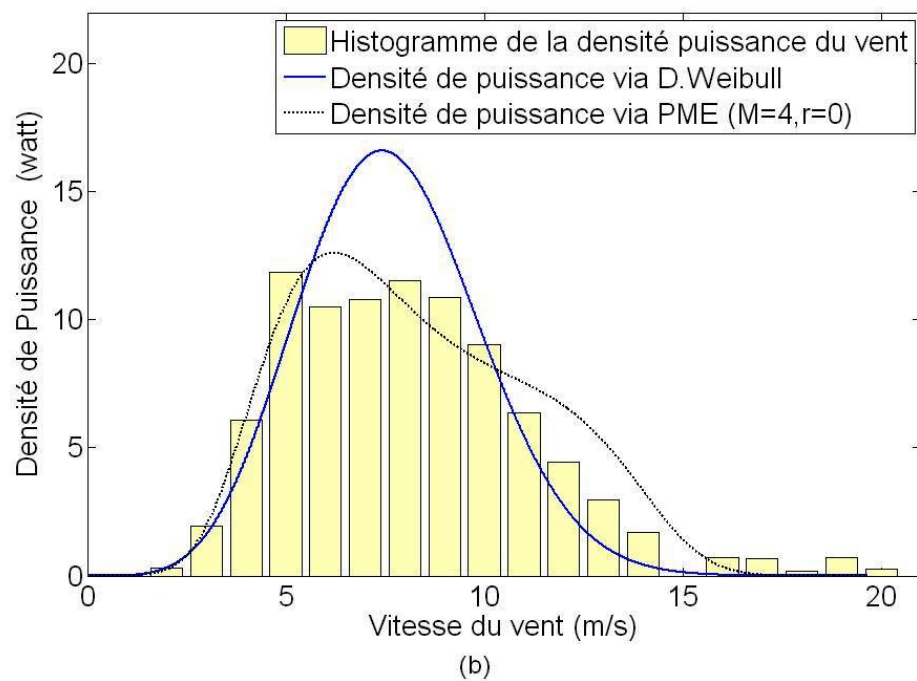
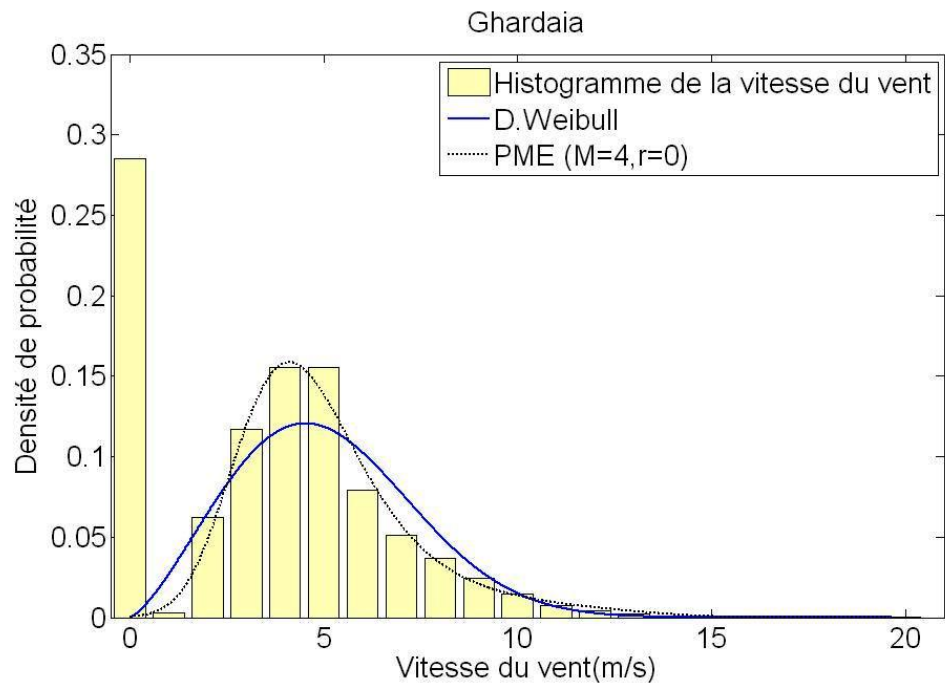


Figure 3.5 – Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site de Ghardaia. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent

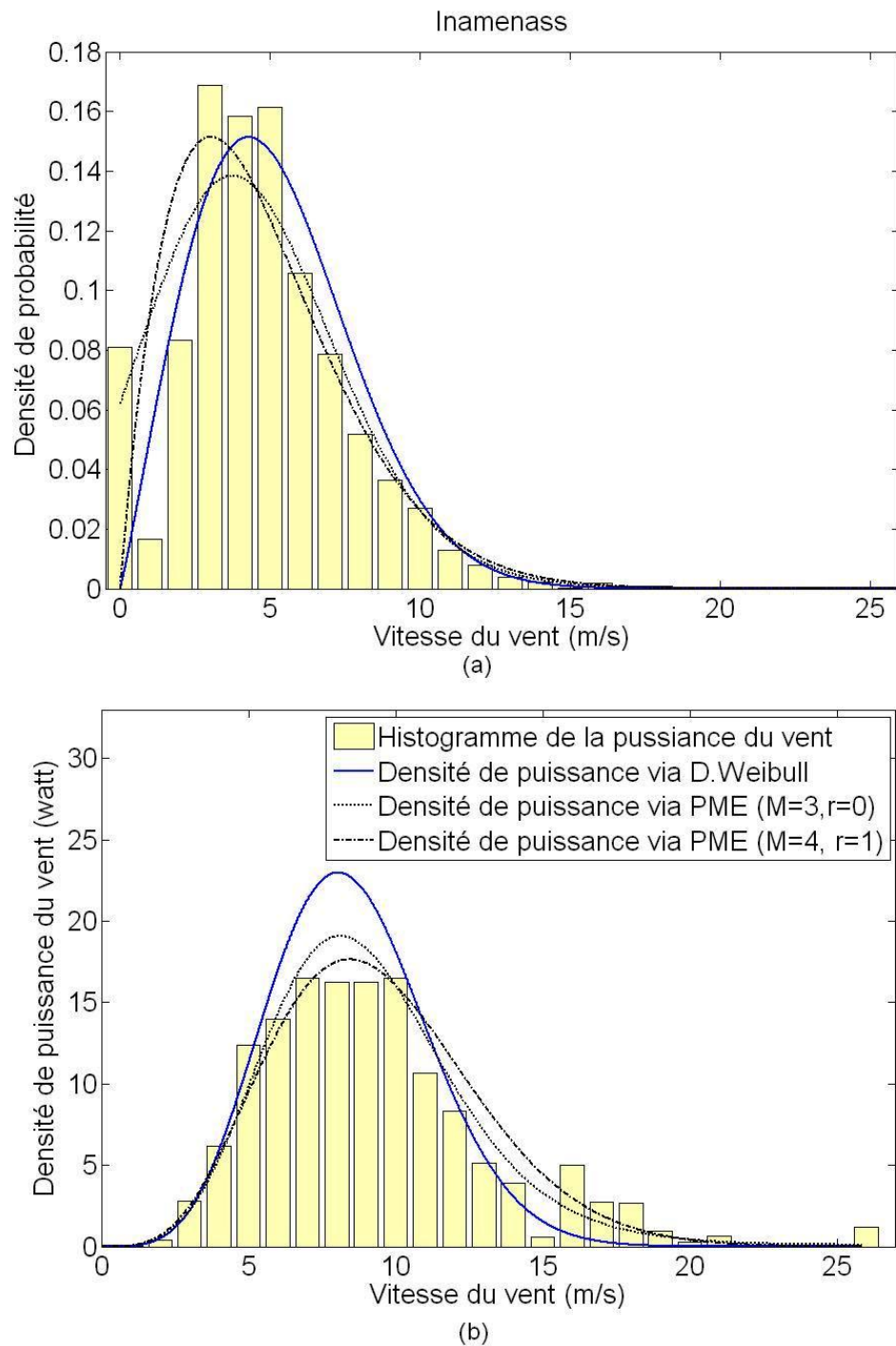


Figure 3.6 – Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site d’Inamenass. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent

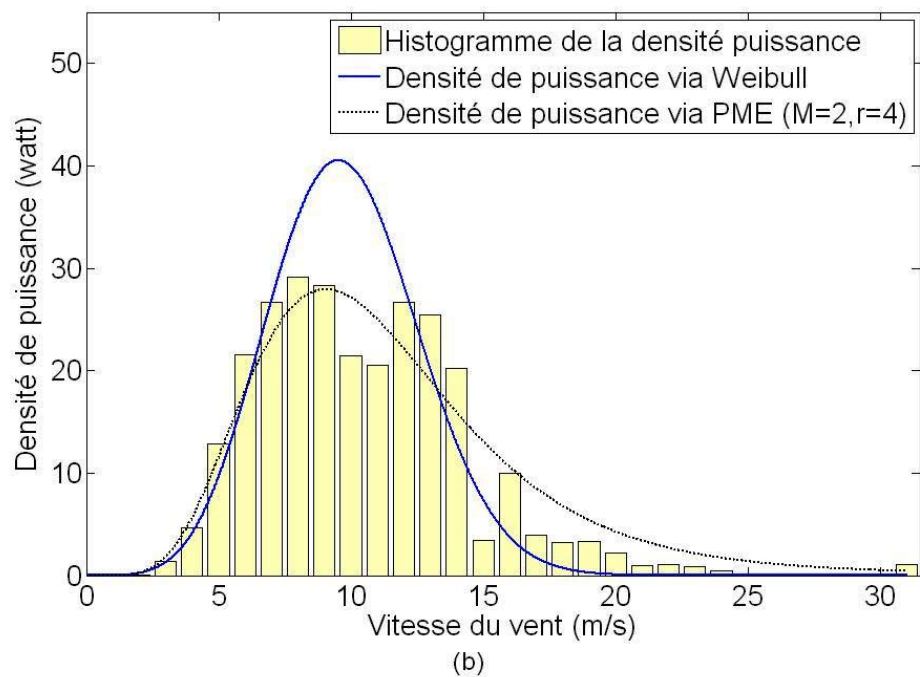
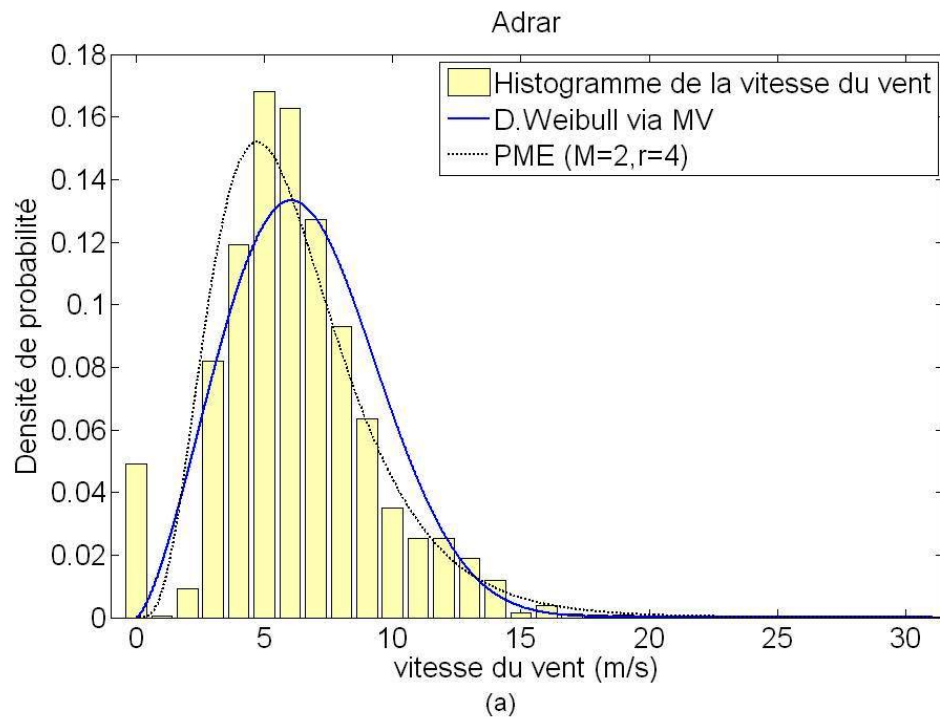


Figure 3.7 – Comparaison des distributions de PME/type-PME et la distribution de Weibull pour le site d’Adrar. (a) Les densités de probabilité du vent, (b) Les densités de puissance du vent

décrivent mieux la distribution du vent, plus particulièrement pour les périodes de calme ( $v = 0\text{m/s}$ ) car elles peuvent commencer par des valeurs nulles ce qui n'est pas le cas pour les distributions Weibull et les type-PME ( $r \geq 1$ ) qui doivent forcément passer par l'origine ( $(x,y) = (0,0)$ ).

En ce qui concerne les densités de puissance du vent, les résultats indiquent que les distributions PME / Type-PME sont plus adéquates à prédire les puissances du vent notamment pour les applications énergétiques (vitesses comprises entre 5 et 15 m/s).

Pour la région d'Oran, la densité de puissance PME (figure 3.3.b) présente une divergence pour des grandes valeurs de  $v$ . Ceci peut être expliqué par le fait que ces distributions sont optimisées pour les densités de probabilité du vent. De même, elles sont utilisées encore pour décrire les puissances du vent. En plus, ces distributions sont optimisées pour des intervalles bien déterminés. Au delà de ces intervalles, leurs comportements sont difficilement prévisibles contrairement aux distributions Weibull qui tendent à s'annuler pour de grandes valeurs de  $v \rightarrow \infty$ .

### 3.7 Conclusion

Dans ce travail, nous avons développé des distributions à partir du principe du maximum d'entropie. Il a été constaté que ces distributions constituent une meilleure alternative à la distribution de Weibull pour décrire les densités de probabilité et les densités de puissance du vent. Les résultats obtenus montrent que pour les six sites étudiés, les performances des distributions PME type-PME peuvent dépasser celles des distributions Weibull dans plusieurs cas spécialement pour des vitesses entre 5 à 15 m/s. Concernant les périodes de calme  $v = 0\text{m/s}$ , les résultats obtenus montrent que les distributions PME sont les plus adéquates car elles peuvent commencer par des valeurs non nulles.

Toutefois, la distribution de Weibull a présenté de bons résultats particulièrement

pour les vitesses de vent élevées où il a été constaté que les distributions PME/type-PME peuvent diverger.

Concernant les valeurs  $M$  et  $r$ , il a été trouvé que l'augmentation des contraintes statistiques  $M$  n'est pas également bénéfique en terme de performance. De même, l'augmentation de la puissance en terme pré-exponentiel  $\nu^r$  n'aboutit pas nécessairement au meilleur résultat.

Comme les études précédentes, nos résultats montrent aussi qu'un bon ajustement de la densité de probabilité ne signifie pas nécessairement une bonne estimation de la densité de puissance.

Finalement, il est indispensable de noter les inconvénients rencontrés dans l'élaboration et les calculs des distributions PME/ type-PME. Le premier est que ces distributions sont très laborieuses et nécessitent beaucoup de calculs afin de résoudre les systèmes d'équations. Dans le deuxième, il n'y a pas de règle générale qui détermine la meilleure configuration de  $M$  et  $r$ . Alors, il faut varier plusieurs combinaisons afin d'aboutir au meilleur ajustement possible. Le troisième inconvénient est que les distributions PME/type-PME sont optimisées pour des intervalles bien déterminés, au delà de ces derniers, leurs comportements sont totalement imprévisibles.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.A Carta, P. Ramirez and S. Velazquez. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis .Cases studies in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issue 5, June 2009, Pages 933-955 .
- [2] A.R. Daniel and A.A. Chen. Stochastic simulation and forecasting of hourly average wind speed sequence in Jamaica. *Solar Energy*, Volume 46, Issue 1, 1991, Pages 1-11.
- [3] H. Nfaoui, J. Buret and A. A. M. Sayigh. Stochastic simulation of hourly average wind speed sequence in Tangiers (Morocco). *Solar Energy*.Volume 56, Issue 3, March 1996, Pages 301-314.
- [4] D. Saheb-Koussa, M. Haddadi and M. Belhamel .Economic and technical study of a hybrid system (wind-photovoltaic-diesel) for rural electrification in Algeria *Applied Energy*, Volume 86, Issues 7-8, July-August 2009, Pages 1024-1030.
- [5] K. Lalarukh, Y.R. Jarfi. Time models to simulation and forecast hourly averaging wind speed in Quetta, Pakistan. *Solar Energy*.Volume 61, Issue 1, July 1997, Pages 23-32.
- [6] J.L. Torres, A. Garcia, M. De Blas and A. De Francisco. Forecast of hourly averaged wind speed with ARMA models in Navarre (Spain). *Solar Energy*, Volume 79, Issue 1, July 2005, Pages 65-77.
- [7] I.Y.F Lun. J.C. Lam. A study of Weibull parameters using long term wind observations. *Renewable Energy*, Volume 20, Issue 2, June 2000, Pages 145-153.
- [8] M. Al-Hasan., R.R. Nigmatullin. Identification of the Generalized Weibull distribution in wind speed data by Eigen-coordinates methods. *Renewable Energy*.Volume 28, Issue 1, January 2003, Pages 93-110.

- [9] E.K. Akpınar., S. Akpınar. A statistical analysis of wind speed data used in installation of wind energy conversion systems. *Energy Conversion and Management*, Volume 46, Issue 4, March 2005, Pages 515-532.
- [10] T. Burton., D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi. *Wind energy hand book*. John Wiley and sons (2001).
- [11] M.R. Patel. *Wind and Solar Power systems, Design, Analysis, and Operation*. CRC Press ,Taylor & Farncis, second edition (2006 ).
- [12] J. Peinke, P. Schaumann,S. Barth. *Wind Energy, Proceedings of the Euromech Colloquium*. Springer Berlin Heidelberg New York (2007).
- [13] S. Mathew. *Wind Energy, Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer Verlag, Berlin (2006).
- [14] E. Parzen, *Modern Probability Theory and Its Application*, John Wiley and Sons, New York (1960).
- [15] R. Serfozo. *Basics of Applied Stochastic Processes*. Springer Berlin Heidelberg (2009).
- [16] J.L. Doob. *Stochastic processes*. John Wiley and Sons, New York (1952).
- [17] A. Borovkov. *Statistique mathématique*. Editions mir Moscou (1984).
- [18] H.Ventsel. *théorie des probabilités*. Editions mir Moscou (1973).
- [19] C.G Justus. *Vent et performances des éoliennes*. Edition SCM (1980).
- [20] M. Li, and X. Li, On the probabilistic distribution of wind speeds : theoretical development and comparison with data. *International Journal of Energy*, Volume 1, No. 2 (2004), pp. 237-255.
- [21] M. Li, X. Li . Investigation of wind characteristics and assessment of wind energy potential for Waterloo region, Canada. *Energy Conversion and Management*, Volume 46, Issues 18-19, November 2005, Pages 3014-3033.



- [22] M. Li, X. Li. MEP-type distribution function : a better alternative to Weibull function for wind speed distributions. *Renewable Energy*, Volume 30, Issue 8, July 2005, Pages 1221-1240.
- [23] P. Ramirez, T.A. Carta. The use of probability distributions derived from the maximum entropy principle in the analysis of wind energy. A case study. *Energy Conversion and Management*, Volume 47, Issues 15-16, September 2006, Pages 2564-2577.
- [24] S. Akpinar, E.K. Akpinar. Wind energy analysis based on maximum entropy principle (MEP)-type distribution function. *Energy Conversion and Management*, Volume 48, Issue 4, April 2007, Pages 1140-1149.
- [25] Y.M. Kantar, I. Usta. Analysis of wind speed distribution : Wind distribution function derived from the minimum cross entropy principles as better alternative to Weibull function. *Energy Conversion and Management*, Volume 49, Issue 5, May 2008, Pages 962-973.

Analyse temps-fréquence de  
de la vitesse du vent  
en Algérie

## CHAPITRE 4

### ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE DE LA VITESSE DU VENT EN ALGÉRIE

Dans l'industrie de l'énergie éolienne, il y a toujours une certaine incertitude sur le produit final due au fait que la vitesse du vent est très variable. Bien que le vent soit considéré comme étant très variable aussi bien sur le plan temporaire que géographique, l'analyse du comportement cyclique de la vitesse du vent à travers le monde révèle la présence de certaines régularités telles que les oscillations diurnes et synoptiques. Les oscillations journalières sont largement observées dans les régions côtières et montagneuses. Ce phénomène est dû aux mouvements convectifs de l'air chaud pendant le jour et la nuit. Cependant, les oscillations synoptiques (des périodes d'oscillations comprises entre 4 à 9 jours) sont associées au passage des systèmes météorologiques (fronts froids ou chauds) à grande échelle [1].

Les études antérieures sur le comportement cyclique du vent remontent à 1957 lorsque Ven der Hoven [2] a évalué le spectre de puissance de la vitesse du vent. Il a indiqué que le spectre du vent est constitué de deux pics d'énergie ; un pic est observé à une période d'oscillation qui correspond à quatre jours (synoptique), alors que l'autre est observé à une période d'oscillation d'une minute (turbulence). Par la suite, plusieurs études similaires ont été réalisées afin de décrire le comportement cyclique de la vitesse du vent dans divers sites à travers le monde [3,4,5 et 6].

Les études mentionnées ci-dessus ont été effectuées sous l'hypothèse que ce signal du vent est un processus stationnaire ; ce qui n'est pas souvent le cas. Quand le vent a une composante périodique présente seulement dans un intervalle de temps limité, une analyse globale de Fourier est théoriquement possible, mais elle n'est ni pratique ni efficace [7]. La transformée de Fourier est limitée en raison d'une analyse avec une fenêtre unique ne peut pas détecter les caractéristiques du signal qui sont beaucoup plus longues et/ou trop courtes que la taille de cette fenêtre. Par conséquent, pour avoir une meilleure

représentation du spectre de vent pour un tel cas, nous devons chercher une approche capable de suivre les variations temporelles du spectre. Cette approche est connue par les représentations temps-fréquence. A travers l'analyse temps-fréquence, on peut facilement déterminer les fréquences des oscillations importantes dans une séries chronologiques (ou un processus aléatoire) et suivre leurs variations en fonctions du temps.

Pour différentes échelles de temps ou de gammes de fréquences, plusieurs études utilisant les transformées d'ondelette ont été réalisées. A ce titre, on peut citer les études sur les turbulences [8], les convections tropicales [9], les changements intra-décennales du système ENSO Monsoon [10], les oscillations intra-saisonnières de la vitesse du vent [11] et les relations entre l'activité solaire et certaines grandes échelles climatiques [12].

Dans le présent travail, nous proposons de réaliser une analyse temps-fréquence pour une étude du comportement cyclique de la vitesse du vent en Algérie. Le but de ce travail est d'étudier les caractéristiques spectrales du vent par la détermination des fréquences (ou bien les périodes), les intensités, les durées et les moments d'apparitions des oscillations potentielles dans le processus du vent. En premier lieu, un rappel général sur l'estimation spectrale et la transformée en Ondelettes sera présentée. Ensuite une étude sera réalisée pour six régions d'Algérie ayant différentes caractéristiques topographiques et climatiques. Finalement, on propose d'utiliser la transformée en ondelettes afin d'étudier la cohérence entre le vent et la température pour le site d'Adrar.

## **4.1 Estimation spectrale**

### **4.1.1 Signal déterministe**

Avant de définir la notion de spectre d'un processus aléatoire, il serait utile de revoir le concept analogue pour les signaux déterministes. La transformée de Fourier  $Z(f)$  d'un

signal  $z(t)$  est définie comme suite :

$$Z(f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t)e^{j2\pi ft} dt \quad (4.1)$$

L'intégrale de l'équation (4.1) converge uniformément vers une fonction de  $f$  si

$$\int_{-\infty}^{\infty} |z(t)| dt < \infty \quad (4.2)$$

L'énergie totale du signal  $z(t)$  est donnée par :

$$E_z = \int_{-\infty}^{\infty} |z(t)|^2 dt < \infty \quad (4.3)$$

D'après le théorème de Parseval,  $E$  peut également être obtenu à partir de l'amplitude du spectre du signal, c'est-à-dire :

$$\int_{-\infty}^{\infty} |z(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |Z(f)|^2 df \quad (4.4)$$

#### 4.1.2 Processus aléatoire

Supposons que nous observons une réalisation du processus aléatoire  $X(\xi, t)$ . A partir de la définition de la transformée de Fourier et de l'hypothèse de la stationnarité au sens large du processus  $X(\xi, t)$ , il est évident que nous ne pouvons pas utiliser l'équation (4.1) pour obtenir  $X(f)$  à partir de l'équation (4.1) car l'équation (4.2) n'est plus valide lorsqu'on remplace  $z(t)$  par  $X(\xi, t)$ . En effet, si  $X(\xi, t)$  est une réalisation d'un processus stationnaire au sens large, son énergie est infinie [13]. Pour un processus aléatoire stationnaire au sens large, il existe une relation entre sa densité de puissance  $P_X(f)$  et sa fonction d'autocorrélation  $C_X(\tau)$ . Cette relation est donnée par :

$$P_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C_X(\tau)e^{j2\pi f\tau} d\tau \quad (4.5)$$

### 4.1.3 Estimation de la densité spectrale

Le problème de l'estimation de la densité spectrale  $P_X(f)$  peut être formulé comme suit : étant donné un ensemble de  $N$  échantillons d'un processus aléatoire, la densité de puissance  $P_X(f)$  peut être obtenue en estimant d'abord la fonction d'autocorrélation à partir des échantillons observés, puis en appliquant la transformée de Fourier à ces estimations. Un estimateur de la fonction d'autocorrélation est donné par :

$$\hat{C}_X(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} x(n)x(n+\tau) \quad (4.6)$$

Cet estimateur, bien qu'il soit biaisé, est très utilisé car il donne toujours des estimations non négatives de la densité de puissance, ce qui n'est pas le cas avec l'estimateur sans biais [13].

#### 4.1.3.1 Périodogramme

Le periodogramme est un outil souvent utilisé dans le cas où on veut préserver l'information spectrale tout en éliminant la partie aléatoire [15]. Le périodogramme est donné par [14] :

$$\hat{P}_{per}(f) = \sum_{\tau=-N}^N \hat{C}_X(\tau) e^{j2\pi f\tau} \quad (4.7)$$

En pratique, le périodogramme défini par l'équation (4.7) est rarement utilisé. Le periodogramme lissé avec une fenêtre  $w(n)$  est souvent employé. Le periodogramme lissé est obtenu en introduisant la fenêtre  $w(n)$  dans la fonction de corrélation :

$$\hat{C}_X(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} x(n)w(n)x(n+\tau)w(n+\tau) \quad (4.8)$$

La fenêtre  $w(n)$  peut prendre plusieurs formes telles que la fenêtre de Hamming, la fenêtre de Hann, etc.

En général, un bon estimateur donne de meilleures estimations lorsque le nombre d'échantillons est important. Théoriquement, si le nombre d'échantillons tend vers l'infini, les estimations devraient converger vers les vraies valeurs des paramètres estimés. Ainsi, dans le cas d'un estimateur de la densité spectrale, il est souhaitable que la densité estimée tende vers sa valeur réelle quand  $N$  tend vers l'infini. Si c'est effectivement le cas, l'estimateur est appelé consistant. Bien que le periodogramme soit asymptotiquement sans biais, il peut être démontré que ce n'est pas un estimateur convergeant. Par exemple, si  $x(n)$  est un bruit blanc centré avec une variance  $\sigma_x^2$ , la variance de  $\hat{P}_{per}(f)$  est égale à  $\sigma_x^4$  quelque soit la longueur de la séquence observée [13].

#### 4.1.3.2 Méthode de Bartlett

Une approche pour réduire la variance du périodogramme est de segmenter sans chevauchement l'intervalle d'observation, trouver le périodogramme de chaque segment et enfin évaluer la moyenne des periodogrammes obtenues. Cet estimateur du spectre, connu comme l'estimateur de Bartlett, a une variance plus petite que la variance du périodogramme. L'estimateur du spectre de Bartlett est donné par :

$$\hat{P}_B(f) = \frac{1}{K} \hat{P}_{per}(f) \quad (4.9)$$

Où  $K$  est le nombre des segments.

La variance de cet estimateur est réduite par un facteur de  $K$ . Toutefois, cette réduction est payée par une diminution de la résolution. L'estimateur Bartlett a une résolution  $K$  fois inférieure à celle du périodogramme [16].

#### 4.1.3.3 Méthode de Welch

L'estimateur de Welch est un autre estimateur basé sur la même idée que l'approche de Bartlett. C'est à dire de diviser l'intervalle d'observations en plusieurs segments et

à trouver la moyenne de leurs periodogrammes. La différence est que les segments se chevauchent [17].

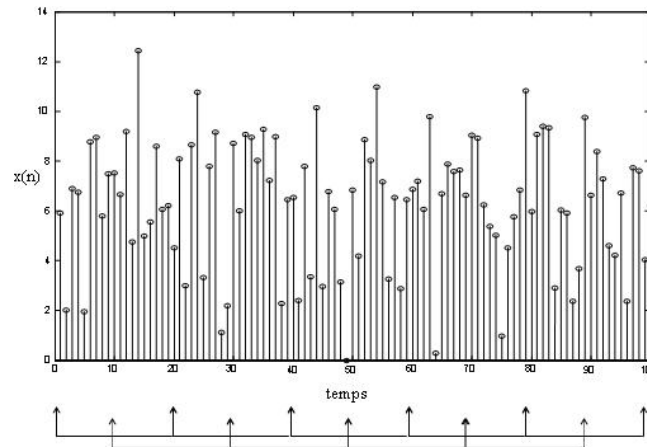


Figure 4.1 – Segmentation de Welch

En permettant le chevauchement des séquences, on peut former plusieurs segments comme dans le cas de la méthode de Bartlett. Aussi, si nous gardons le même nombre de segments, le chevauchement permet des segments plus longs. L'augmentation du nombre de segments réduit la variance de l'estimateur et l'augmentation de leur largeur améliore la résolution [13].

Afin d'illustrer les deux types de segmentations, nous présentons dans la figure 4.1 un signal de 100 échantillons. Pour des segments de 20 échantillons, on obtient uniquement 5 segments séparés pour la méthode de Bartlett. Cependant, pour des segments chevauchés, avec un taux de 50%, on obtient 9 segments pour la méthode de Welch.

L'analyse spectrale à travers les périodogrammes est réalisée sous l'hypothèse que le signal  $x(n)$  est un processus aléatoire stationnaire. Un exemple pour un signal non-stationnaire est un signal qui a une composante périodique présente uniquement dans un intervalle de temps limité. Une analyse globale de Fourier est théoriquement pos-



sible, mais elle n'est ni pratique ni efficace [7]. La figure 4.2 montre que cette analyse est capable de détecter les fréquences des oscillations présentes, mais elle est totalement aveugle devant leurs comportements temporels (début, fin et durées).

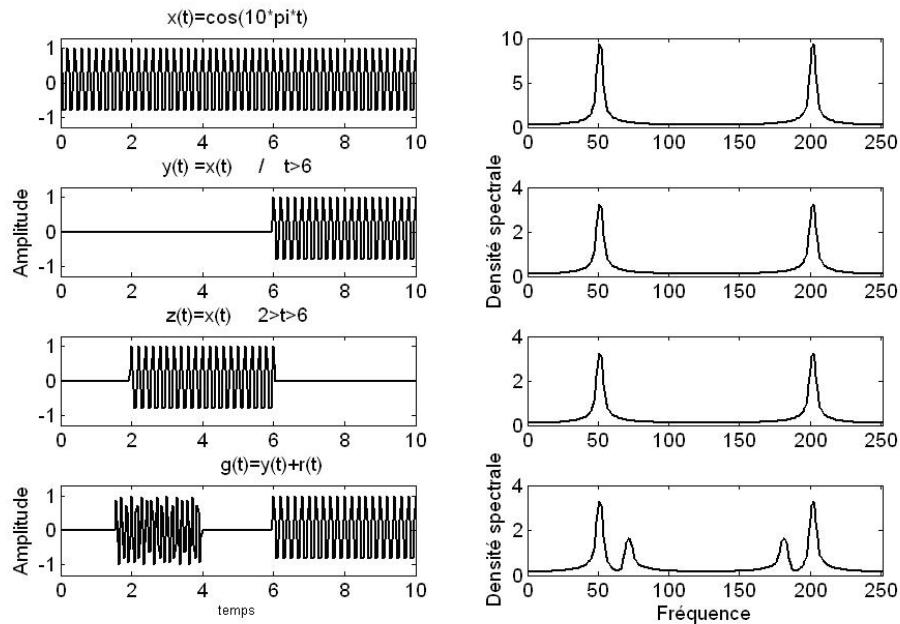


Figure 4.2 – Analyse de Fourier pour un signal limité dans le temps.  
(a) Représentation temporelle, (b) Représentation spectrale.

## 4.2 Représentations temps-fréquence.

### 4.2.1 Transformée de Fourier à court terme

La transformée de Fourier à court terme consiste à évaluer la transformée de Fourier avec une fenêtre glissante  $H(\cdot)$ . L'examen du spectre ainsi généré par cette fenêtre donne une représentation temps-fréquence connue sous le nom de spectrogramme [18].

$$SFT(n, f) = \sum_{m=0}^N x(m)H(m-n)e^{j2\pi fm} \quad (4.10)$$

Mais, la transformée de Fourier à court terme souffre du problème de limitation de résolution imposée par la taille de la fenêtre. L'utilisation d'une fenêtre courte en vue d'améliorer la résolution temporelle induit une diminution de la résolution en fréquence, et vice versa. Toutefois, la transformée en Ondelettes est capable d'atteindre une résolution variable dans un domaine, que ce soit le temps ou la fréquence, sans diminuer la résolution dans l'autre domaine [7].

#### 4.2.2 Transformée en Ondelettes

La transformée en Ondelettes est largement utilisée en tant qu'outil d'analyse temps-fréquence. Cet outil est capable de détecter des variations spectrales au sein des données météorologiques qui contiennent des informations spectrales à différentes échelles temporelles. La figure 4.3 montre que les scalogrammes d'Ondelettes peuvent facilement suivre et séparer les différentes composantes spectrales au sein d'un signal. Le scalogramme représente une méthode de visualisation de la transformée en Ondelettes. Il contient trois axes :  $x$  représente le temps,  $y$  représente la fréquence (ou la période) et  $z$  représente la valeur du coefficient (les amplitudes). L'axe  $z$  est souvent montré en faisant varier la couleur ou la luminosité (figure 4.3). La Transformée en Ondelettes introduite par Morlet [19] au début des années 1980 a été initialement utilisée pour l'analyse des signaux sismiques. Elle est définie comme :

$$WT_x(s, n) = \sqrt{\frac{1}{s}} \sum_{n'=1}^N x_{n'} \psi_0 \left( (n - n') \frac{1}{s} \right) \quad (4.11)$$

Où

$s$  : Facteur d'échelle.

$n$  : Facteur de translation.

$\psi_0$  : Fonction mère.

La fonction mère devrait satisfaire la condition d'admissibilité suivante :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi_0(\omega)|^2}{|\omega|^2} < \infty \quad (4.12)$$

Où  $\psi_0(\omega)$  est la transformation de Fourier de  $\psi_0$ .

De nombreuses fonctions mères ont été proposées. Dans la présente étude, nous avons utilisé la fonction de Morlet en raison de sa capacité à refléter les changements graduels dans les mesures climatiques [20]. La fonction de Morlet est une gaussienne modulée donnée par :

$$\psi(n') = \pi^{1/4} e^{j\omega_0 n'} e^{-\frac{n'^2}{2}} \quad (4.13)$$

Où  $\pi^{1/4}$  : Terme de normalisation.

$\omega_0$  : Fréquence non dimensionnelle.

$s$  : Échelle d'Ondelettes.

La transformée en Ondelettes peut être utilisée dans l'analyse des signaux non-stationnaires aussi bien pour obtenir des informations sur les fréquences des oscillations potentielles et détecter leurs comportements temporels. La localisation temporelle est accomplie par le fait que la fonction d'Ondelettes est définie dans un intervalle fini. De cette façon, avec une diminution d'échelle, les fonctions d'Ondelettes sont localisées dans des intervalles de plus en plus courts. Pour chaque niveau d'échelle, toutes les fonctions Ondelettes ont la même forme, en changeant seulement ses points de localisation, c'est à dire, ils subissent un mouvement de translation.

La valeur de  $\omega_0$  a été prise égale à 6 [8]. Il convient de noter qu'une analyse par un facteur d'échelle  $s$  est directement liée à la période d'oscillation (en cas d'ondelette de Morlet  $p = 1.06s$ ) et donc liée directement à la fréquence d'oscillation  $f = 1/p$ .

Le calcul de la Transformée en Ondelettes peut être réalisé soit par l'évaluation de la convolution dans l'équation (4.11) pour chaque échelle  $s$ , soit dans l'espace de Fou-

rier qui est considérablement plus rapide [17]. Afin d'utiliser la transformée de Fourier rapide (FFT), les séries chronologiques doivent être rembourrées avec des valeurs nulles pour avoir une longueur de la forme  $2^N$  (zero-padding). Ces valeurs vont être supprimées après. Dans toutes les figures qui présentent les scalogrammes, les amplitudes dans les zones qui sont sous les traits épais (cône d'influence COI) peuvent être atténuées en raison de l'effet de zero-padding.

#### 4.2.2.1 Transformée en Ondelettes croisée (Cross Wavelet transform XWT)

La transformée en Ondelettes est utilisée pour l'étude du comportement spectral d'une série chronologique donnée. Toutefois, afin d'enquêter sur les relations entre deux séries chronologiques, on peut comparer leurs propres scalogrammes ou bien utiliser la transformée en Ondelettes croisée (XWT).

la transformée en Ondelettes croisée est définie comme suit :

$$WT_{x,y}(s,n) = WT_x(s,n) \cdot WT_y(s,n)^* \quad (4.14)$$

où  $WT_y(s,n)^*$  désigne le complexe conjugué de  $WT_y(s,n)$ .

#### 4.2.2.2 Cohérence de la transformée en ondelettes(Wavelet Transform coherence WTC)

La transformée en Ondelettes croisée est un outil utile pour étudier les relations entre deux séries chronologiques. Cependant, son interprétation doit être faite en prêtant attention aux séries chronologiques originales. Une grande puissance dans La transformée en Ondelettes croisée peut être due soit à une puissance élevée dans les deux séries chronologiques ou bien à une puissance extrême dans une série chronologique. En outre, si la transformée en Ondelettes de deux séries chronologiques est de faible puissance pour un moment précis, la Cross-Ondelettes est incapable de révéler leurs relations, même

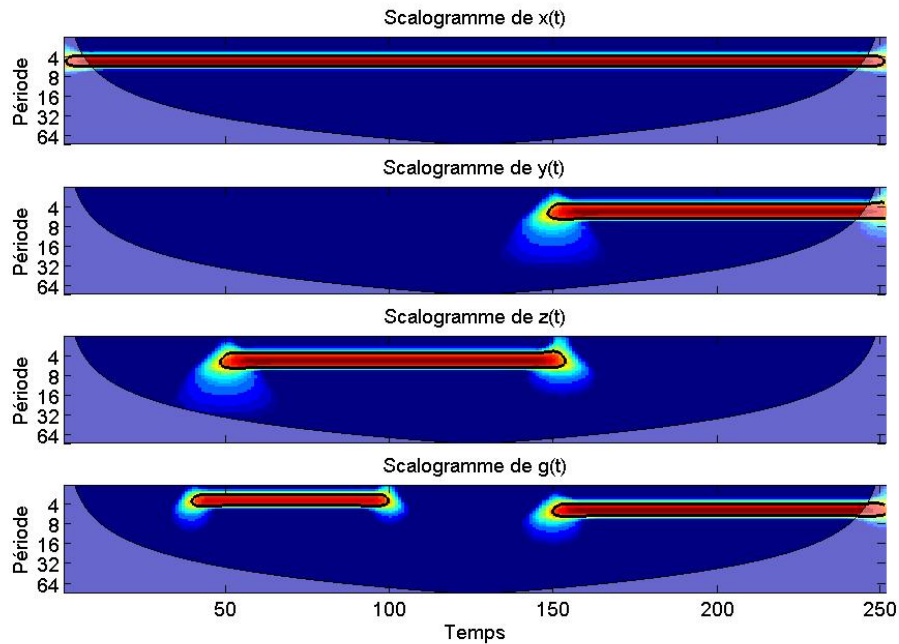


Figure 4.3 – Les scalogrammes des signaux de la figure 4.2

si ces deux séries chronologiques co-varient. Pour surmonter cette faiblesse en Cross-Ondelettes, Grinsted et al. [21] ont proposé l'utilisation de la cohérence d'Ondelettes (WTC) plutôt que la transformée en Ondelettes croisée.

La cohérence d'ondelettes est définie par [20] :

$$R_{x,y}^2(s,n) = \frac{|S(s^{-1}WT_{x,y}(s,n))|^2}{S(s^{-1}|WT_x(s,n)|^2)S(s^{-1}|WT_y(s,n)|^2)} \quad (4.15)$$

Où  $S(\cdot)$  est l'opérateur de lissage qui est essentiel dans l'analyse de la cohérence afin d'augmenter la puissance de la transformée en Ondelettes [10].

Les valeurs obtenues à l'aide de l'équation (4.15) varient entre 0 et 1. Plus le rapport de cohérence est important entre les séries temporelles, plus  $R_{x,y}^2(s,n)$  se rapproche de l'unité.

L'opérateur de lissage est donné par [20] :

$$S(WT(s, n)) = S_s(S_n(WT(s, n))) \quad (4.16)$$

Où  $S_s()$  : Opérateur de lissage sur l'échelle d'Ondelettes.  $S_n()$  : Opérateur de lissage dans le temps.

Les opérateurs de lissage  $S_s(\cdot)$  et  $S_n(\cdot)$  sont conçus de sorte qu'ils aient la même empreinte que l'ondelette utilisée. Ces opérateurs sont donnés par les équations suivantes :

$$S_s(WT(s, n))_n = (WT(s, n) * c_1 \text{rect}(0.6s))_n \quad (4.17)$$

$$S_n(WT(s, n))_s = \left( WT(s, n) * c_2 e^{\frac{-n^2}{2s^2}} \right)_s \quad (4.18)$$

où

$c_1$  et  $c_2$  : Les constantes de normalisation.

*rect* : Fonction rectangulaire.

Le facteur 0.6 est une valeur qui a été déterminée d'une manière empirique par Torrence [20]. Les valeurs de  $c_1$  et  $c_2$  sont déterminées numériquement après le calcul des deux convolutions dans les équations (4.17) et (4.18) afin que les poids des filtres  $c_1 \text{rect}(0.6s)$  et  $c_2 e^{\frac{-n^2}{2s^2}}$  soient égales à l'unité.

Le délai entre deux séries chronologiques peut être obtenu en évaluant la différence de phase. La phase des deux séries  $\phi_{x,y}(n, s)$  est définie comme suit [22] :

$$\phi_{x,y}(s, n) = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Img}(S(s^{-1}WT_{x,y}(s, n)))}{\text{Re}(S(s^{-1}WT_{x,y}(s, n)))} \right] \quad (4.19)$$

Où *Re* et *Img* sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de l'expression entre parenthèses

### 4.3 Résultats et discussions

Afin d'illustrer l'effet de la topographie d'une région sur le comportement cyclique du vent, on propose dans cette partie une étude pour six régions ayant des caractéristiques topographiques différentes. Ce sont les sites considérés en chapitre 3.

Dans la figure 4.4, on présente les périodogrammes de Welch des mois de Janvier et de Juillet. Dans les graphes présentés ci-dessous, la fréquence est représentée en abscisse en cycles par jour et la densité de puissance est représentée en ordonnées. On peut constater que les spectres mensuels de Janvier et de Juillet se distinguent par la forme et l'ampleur. En Janvier, un pic important se produit à des basses fréquences dans tous les spectres. Toutefois, en Juillet, on note que pour les sites d'Annaba, d'Oran et de Batna, les pics les plus significatifs ont été observés au niveau des fréquences journalières  $f \approx 1 \text{ cycles/jours}$ . Pour la région de Ghardaïa, on note que le périodogramme de Juillet présente une augmentation dans l'amplitude journalière par rapport au périodogramme du mois de Janvier. Les spectres du vent pour les régions d'Adrar et d'Iname-nass présentent de légères variations en Juillet. Leurs formes globales sont semblables à ceux de Janvier ; les oscillations à faibles fréquences dominent avec une présence des harmoniques journalières relativement faibles.

Dans les figures 4.5, 4.6 et 4.7, les scalogrammes ont été réalisés en utilisant les données de deux ans et sur une bande de fréquence comprise entre  $5.8 \cdot 10^{-3}$  et 3 cycles par jour, donc pour des périodes d'oscillation entre 8 heures à 170 jours. Le temps est présenté suivant l'axe des abscisses alors que les fréquences sont présentées en périodes suivant l'axe des ordonnées. Les résultats obtenus indiquent que le spectre du vent se comporte différemment pour les saisons froides et saisons chaudes pour toutes les régions étudiées. Bien que ces variations diffèrent d'une région à une autre en fonction de la topographie, trois caractéristiques principales peuvent être distinguées dans les scalogrammes obtenus.

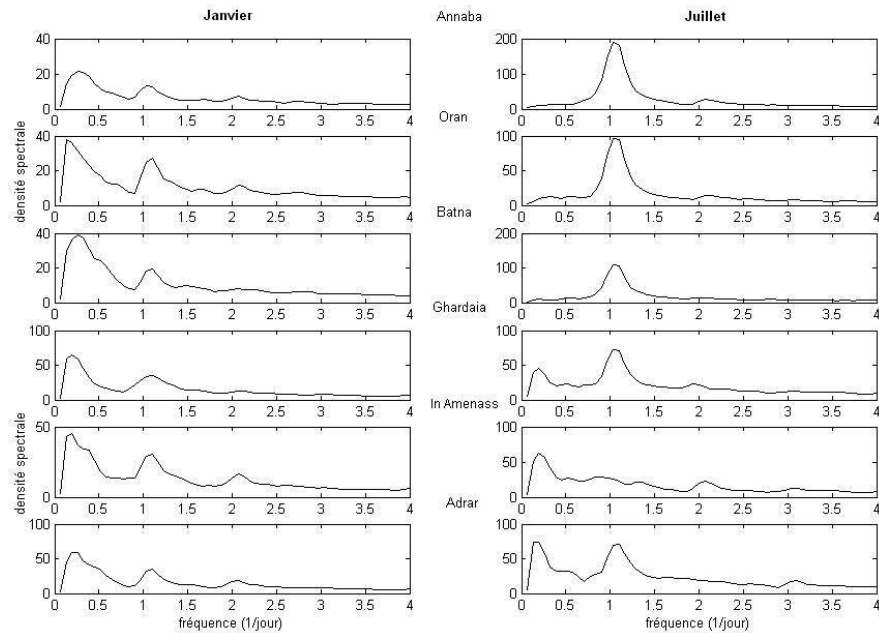


Figure 4.4 – Les périodogrammes de Welch de la vitesse du vent pour les mois de Janvier et de Juillet.

Premièrement, pour tous les sites étudiés, des oscillations synoptiques de fréquences autour de  $f \approx 0.08 - 0.11 \text{ cycles/jours}$  (périodes d'oscillation de 4 à 13 jours) ont été observées en hiver, en automne et en printemps. Ces oscillations sont attribuées au passage des systèmes météorologiques à front froid.

Deuxièmement, dans les zones côtières et les régions montagneuses (Annaba, Oran et Batna), les scalogrammes indiquent que les énergies cinétiques majeures ont eu lieu à la fréquence journalière. Ceci est en accord avec la théorie de la convection thermique entre la mer et la terre.

Troisièmement, des oscillations de longues durées avec des cycles de basses fréquences (à savoir, des périodes supérieures à 42 jours) ont été observées. Un tel type d'oscillations a été observé dans de nombreuses études [23, 24, 25 et 26]. Sultan al. [27] ont mentionné la présence d'activités de longue durée à l'ouest de l'Afrique. On



note que ces oscillations ne sont pas observées dans la région d'Inamenass. Enfin, il est intéressant de noter que les oscillations diurnes ne sont pas très significatives dans les régions intérieures (Adrar, Ghardaïa et Inamenass).

Finalement, il est très important de mentionner qu'en général le comportement cyclique du vent à Inamenass diffère de ceux de Ghardaïa et d'Adrar. Ceci peut être expliqué par le fait que la région d'Inamenass est située derrière la série montagneuse d'El-Hogar ; quelque perturbations météorologiques venant de l'Océan Atlantique n'atteignent pas la région [28].

La figure 4.8 montre les scalogrammes de la température et la vitesse du vent. Ces scalogrammes sont évalués en utilisant des données journalières pendant quatre ans et sur une bande de période de 2 à 128 jours (soit la fréquence de  $7,8 \cdot 10^{-3}$  à  $0,5 \text{ cycles/jour}$ ). Le scalogramme de la température révèle que les oscillations les plus importantes se produisent en hiver et au printemps dans des intervalles entre Décembre et Mai pour les années 2005, 2006 et 2007. En 2006, on peut voir que ces oscillations se prolongent jusqu'au mois de Juillet. Cependant en 2008, on note que les oscillations importantes sont observées dans des intervalles allant d'Avril à Juillet et d'Octobre à Décembre. En général, ces oscillations sont caractérisées par des durées relativement courtes ; allant d'une à quelques semaines. Du point de vue de fréquence, on peut voir que les oscillations dominantes résident dans la bande entre la période de 2 à 16 jours (soit des fréquences entre  $6,25 \cdot 10^{-2}$  et  $0,5 \text{ cycles/jour}$ ).

À partir des spectres de puissance en Ondelettes de la vitesse du vent, on constate que les oscillations synoptiques observées entre la mi-décembre 2006 et la mi-février 2007 (figure 4.7.b.) ne sont pas visible dans la figure 4.8.b. Ceci peut être attribué au problème de résolution ; la figure 4.7 est réalisée avec les données horaires alors que la figure 4.8 est obtenue en utilisant les valeurs journalières.

La figure 4.9 montre la transformée en Ondelettes croisée et la cohérence des Onde-

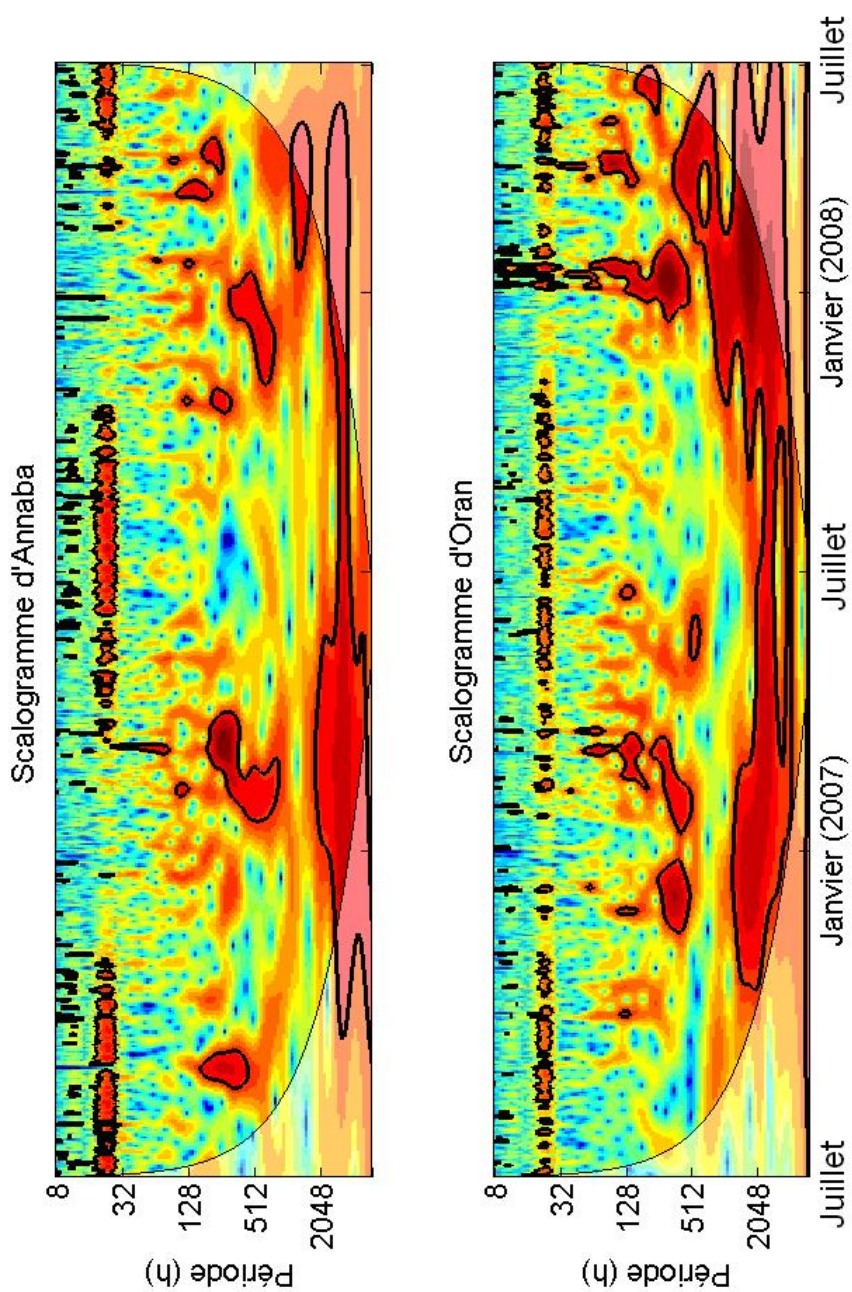


Figure 4.5 – Les scalogrammes de la vitesse du vent. (a) Annaba, (b) Oran.

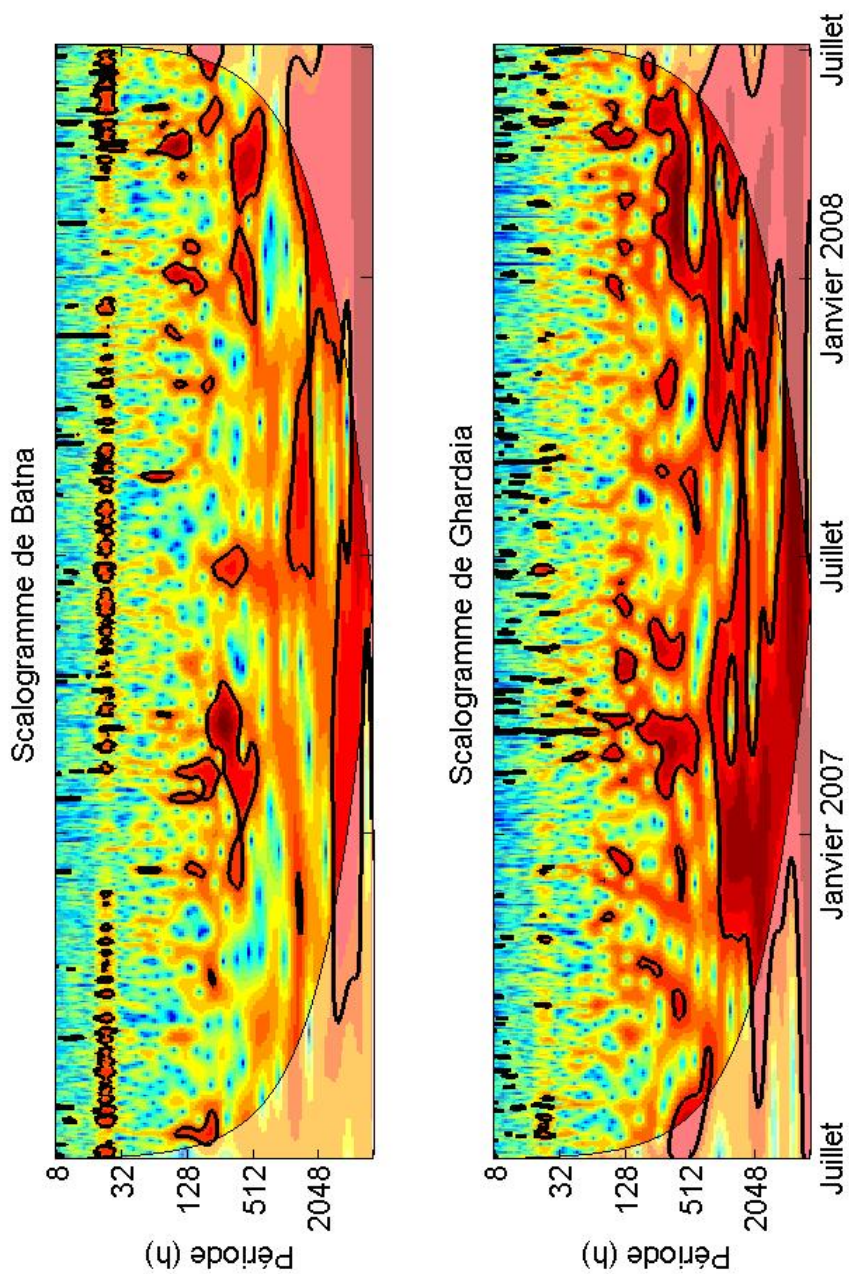


Figure 4.6 – Les scalogrammes de la vitesse du vent. (a) Batna, (b) Ghardaia.

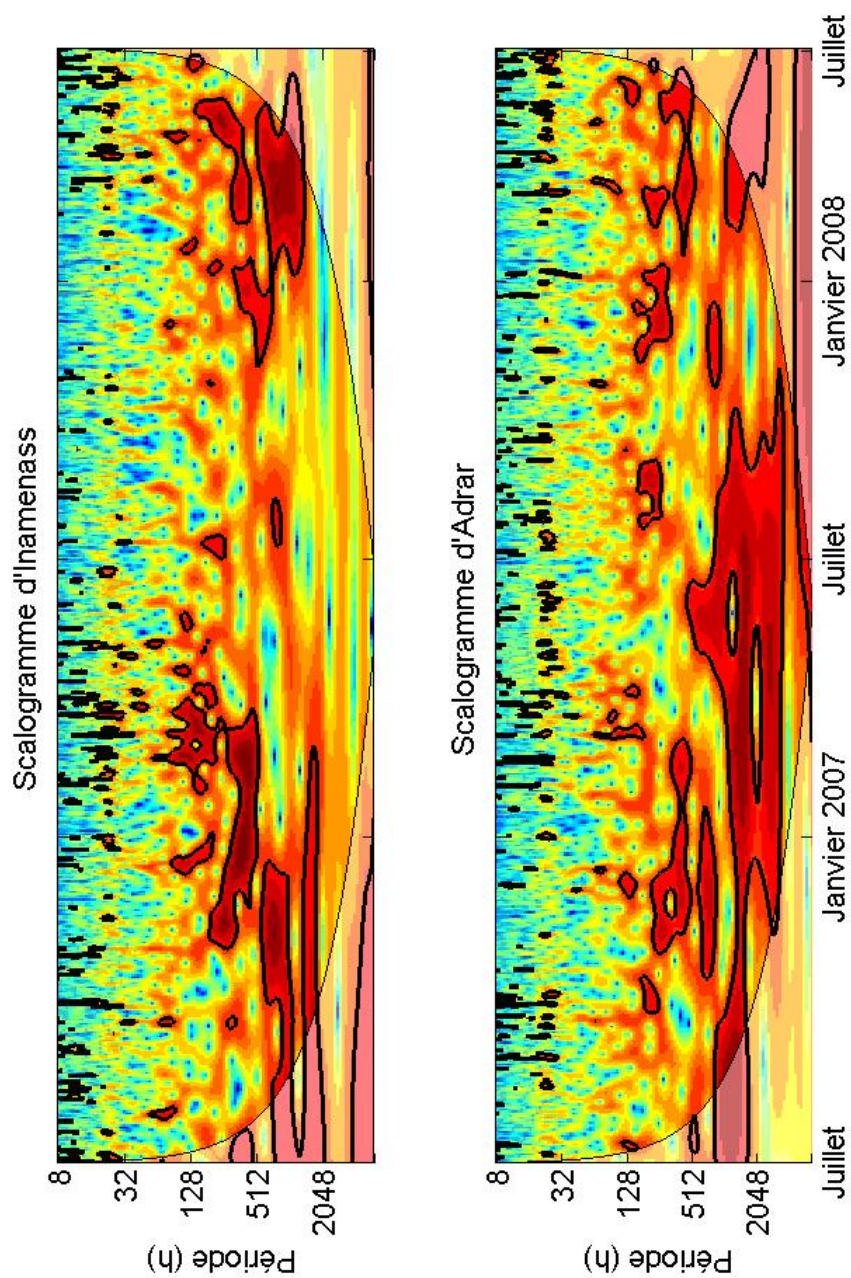


Figure 4.7 – Les scalogrammes de la vitesse du vent. (a) Inamenass, (b) Adrar.

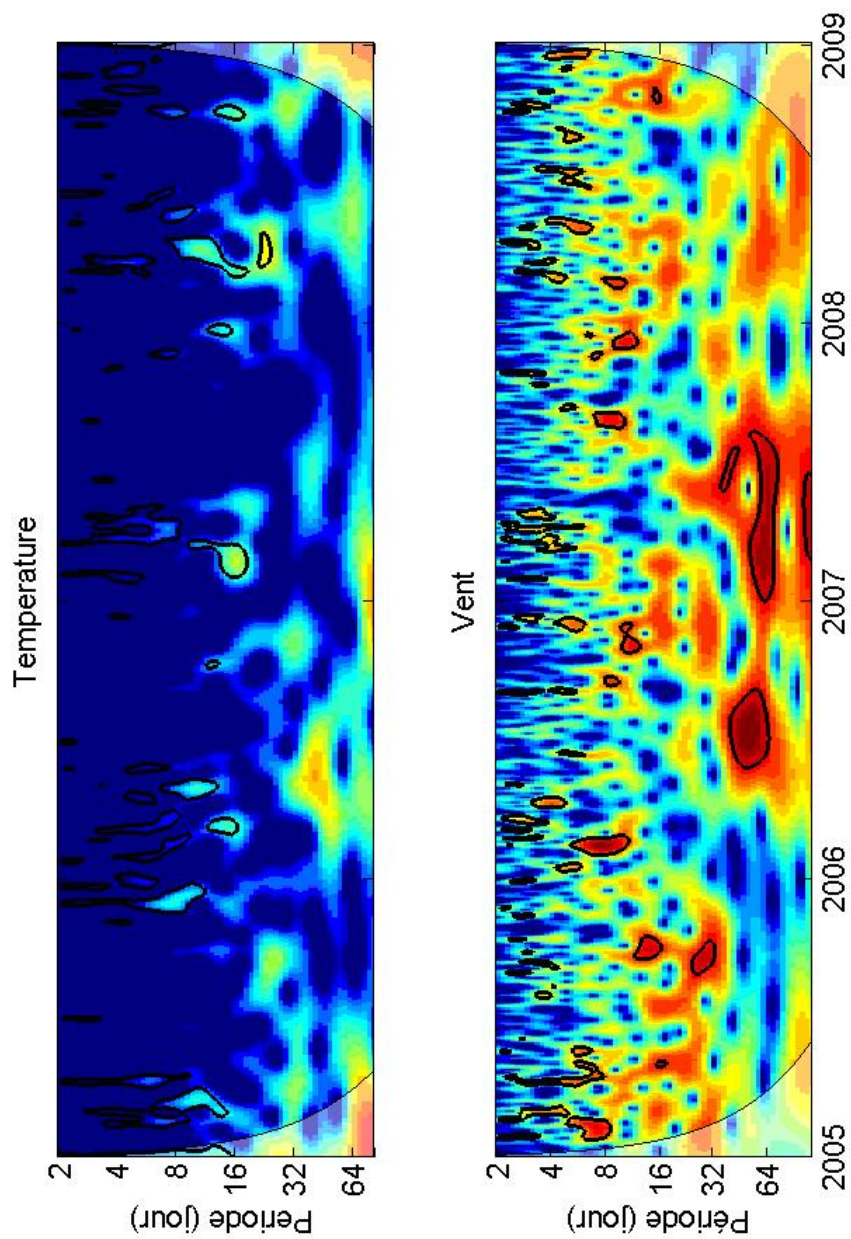


Figure 4.8 – Les scalogrammes de la région d’Adrar. (a) Température, (b) Vitesse du vent.

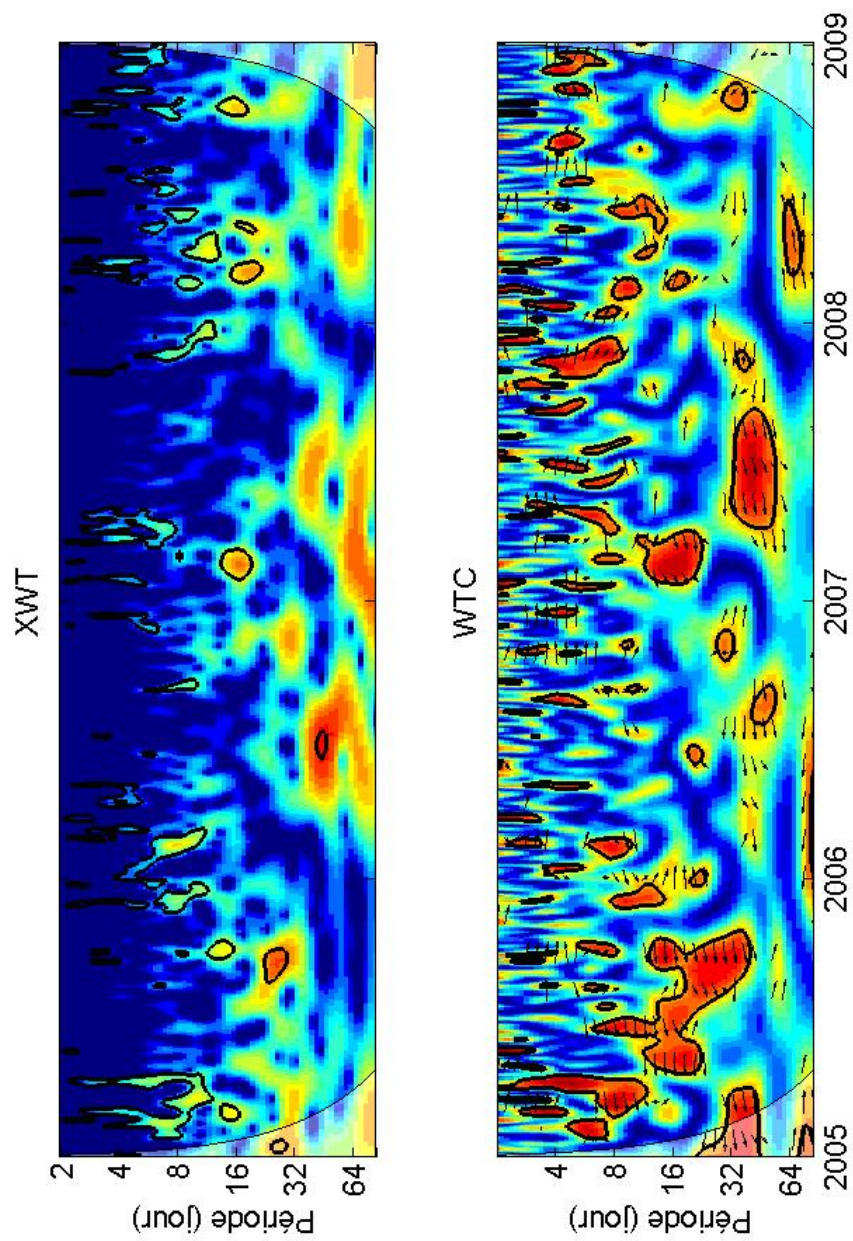


Figure 4.9 – Les XWT et WTC de la température et la vitesse du vent pour la région d'Adrar.

lettes de la vitesse du vent et de la température. A l'aide des scalogrammes de la figure 4.7, on peut distinguer deux types de pics significatifs dans le spectre de puissance de la transformée en Ondelettes croisée. Le premier type correspond à des pics de puissance commune élevée pour les deux séries chronologiques. Ces pics sont situés dans la bande de périodes de 2-16 jours qui se produisent pendant la saison froide au titre des années 2005, 2006 et 2007. Le deuxième type de pics correspond soit à une puissance extrême dans le spectre de la vitesse du vent en Ondelettes (Octobre 2005 et Juin-Juillet 2006), soit au spectre de puissance de température (Février à Mars 2007).

L'utilité de l'analyse de cohérence apparaît pour le cas où les deux spectres de puissance montrent de faibles amplitudes. Des rapports de cohérence longue durée en hiver ainsi que durant l'été de 2005 et 2007 ont été observés pour la bande de 2-50 jours (plus de 0,8). Toutefois, en 2006 et 2008 il a été constaté que le vent et la température co-varient avec plus de 0,8 seulement pour de courtes périodes (de une à deux semaines).

Pour la différence de phase entre la vitesse du vent et la température, les flèches sont tracées tous les 12 jours et seulement pour des cohérences supérieures à 0,5. Les sens des flèches varient de  $0^{\circ}$  à  $90^{\circ}$  pour les périodes courtes. On dit que les données de température sont en phase ou bien en avance de phase par rapport au vent. Physiquement, cela signifie que ces vents sont d'origine d'un gradient de température. Pour une période plus longue de la bande (16-50 jours), on peut voir que les températures sont en retard de phase. Physiquement, cela peut être interprété par le fait que les variations des températures sont dues au passage des systèmes météorologiques amenées par les vents [29].

Les figures 4.8 et 4.9 représentent les scalogrammes pour une période entre 2 et 64 jours où le cône d'influence préserve plus de 90% du signal original. Toutefois, pour des périodes supérieures à 64 jours (figure 4.10), l'effet de COI est bien significatif. Ainsi, il faut être prudent dans l'interprétation des résultats, surtout au début et à la fin de l'intervalle où les amplitudes de la transformée en Ondelettes peuvent être atténuées.

Les scalogrammes de la Figure 4.10 montrent la vitesse du vent, la température, la transformée en Ondelettes croisée et la cohérence des Ondelettes qui ont été évalués pendant 4 ans sur une période qui varie entre 32 à 512 jours. On note que la transformée en Ondelettes de la température ne montre aucune oscillations significative (sauf à la bande annuelle). Pour la vitesse du vent, des puissances importantes dans les bandes comprises entre 32 - 60 jours et 90-100 jours ont été observées dans les périodes d'été de 2006 et 2007.

Dans la figure 4.10.d, on note des atténuations au début des bandes comprises entre 120 et 128 jours. En fait, ces atténuations sont dues à l'effet de bord. Les flèches dans la figure 4.10.d, indiquent que le vent est en avance de phase par rapport à la température pour les périodes de longues durées.

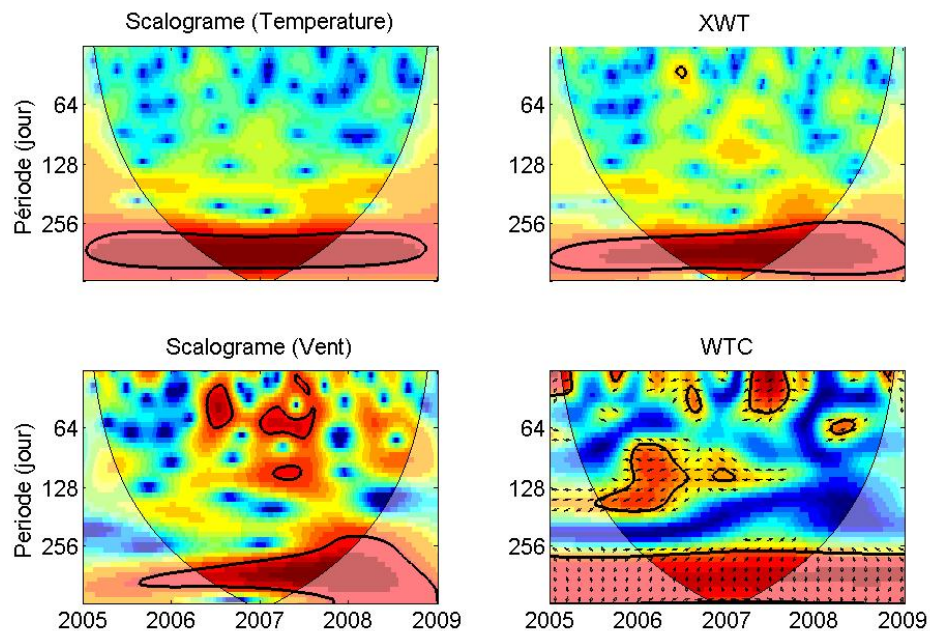


Figure 4.10 – La transformée en Ondelettes de la vitesse du vent, la température et leurs correspondantes cross Ondelettes et la cohérence pour une bandes entre 32 et 512 jours(Adrar).



#### 4.4 Conclusion

Dans ce travail, une étude du comportement cyclique du vent en Algérie a été réalisée. Afin de suivre les variations temporelles du spectre du vent, des approches temporelles spectrales ont été utilisées. L'analyse spectrale du vent en Algérie a révélé la présence de trois types d'oscillations. Le premier type d'oscillations est de type journalier. Ces oscillations sont particulièrement observées durant la saison estivale dans les sites côtiers et montagneux. Le deuxième type est synoptique (ayant des périodes d'oscillations entre 4 et 13 jours). Ces types d'oscillations sont présents dans toutes les régions étudiées et ils sont généralement observés durant la saison hivernale. Troisièmement, des oscillations de longues durées avec des cycles de basses fréquences (à savoir, les périodes supérieures à 42 jours) ont été observées dans les régions Sud.

Dans ce travail, la relation entre le comportement cycle de vent et la température pour la région d'Adrar a été examinée. Une grande cohérence entre la température et la vitesse du vent a été observée dans les fréquences synoptiques et intra-saisonniers. Pour la différence de phase, il a été constaté que les données de température sont en phase ou en avance de phase par rapport aux données de vitesse du vent dans les basses fréquences, alors que pour les fréquences les plus élevées (échelles saisonnières), il a été constaté que les deux séries chronologiques sont en déphasage.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Boussanyi. Wind energy Handbook. John Wiley and sons (2001).
- [2] I. Vender Hoven. Power spectrum of horizontal wind in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. Journal of Meteorology, Volume 14, Issue 2 (April 1957) pages 160-164.
- [3] D.C.-F Shih. Wind characterization and potential assessment using spectral analysis. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment , Volume 22, Number 2 (2008) Pages 247-256.
- [4] R. I Harris. Some further thoughts on the spectrum of gustiness in strong winds . Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 33, Issue 3, April 1990, Pages 461-477.
- [5] M. Yukihiro . Spectrum of long-Period Fluctuations of surface wind at Marcus Island". Journal of Atmospheric Sciences, vol 108, Issue 9 (1980) Pages 1456-1461.
- [6] H.J. Hwang. Power density spectrum of surface wind speed on Palmyra Island. Monthly weather review. Monthly Weather Review, Volume 98, Issue 1 (January 1970) Pages 70-74.
- [7] C.C. Victor, H. Ling . Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis. Artech House (2002) .
- [8] M. Farge. Wavelet transforms and their applications to turbulence. Annual Review of Fluid Mechanics, Volume. 24 (January 1992) Pages 395-458.
- [9] H. Weng, K.M. Lau . Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific. Journal of Atmospheric Sciences, vol. 51, Issue 17 (1994) Pages 2523-2541.

- [10] C. Torrence, G.P. Compo . A Practical Guide to Wavelet Analysis, Bulletin of the American Meteorological Society, volume 79, issue 01 ( January 1998) Pages 61-78.
- [11] B.B. Lee, L.C. Wu, C.C. Kao. Seasonal variations of wind and wave over Taiwan waters. Marine Geophysical Researches , Volume 28, Number 3 (2007) Pages 183-190.
- [12] V.M. Velasco, B. Mendoza . Assessing the relationship between solar activity and some large scale climatic phenomena. Advances in Space Research, Volume 42, Issue 5, (September 2008) Pages 866-878.
- [13] V. Madisetti, D.B. Williams. Digital Signal Processing Handbook. CRC Press LLC (1999).
- [14] A.V Oppenheim and R.W. Schaffer. Discrete-Time Signal Processing, Prentice-Hall (1989).
- [15] B.Porat. A course in digital signal processing. John Wiley and Sons.(1997).
- [16] M.S. Hayes. Statistical Digital Signal Processing and Modeling, John Wiley and Sons, New York (1996).
- [17] S.M Kay. Modern Spectral Estimation, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1988).
- [18] P.Flandrin . Temps-fréquence. Hermés, Paris (1993).
- [19] H.S. Liu, B.F. Chao. Wavelet spectral analysis of earth's orbital variations and paleoclimatic cycles. Journal of the atmospheric sciences, Volume 55, Issue 2 (January 1998) Pages 227-236.
- [20] M.O. Domindues, O.Jr. Mendes, D.C. Mendes .On wavelet technique in atmospheric sciences. Advances in Space Research, Volume 35, Issue 5, 2005, Pages 831-842.
- [21] C. Torrence. J.W. Webster . Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon System. Journal of climate. volume 12 (August 1999) Pages 2679-2690 .

- [22] A. Grinsted, J.C. Moore, S. Jevrejava. Application of the cross wavelet transform and the wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics* , Volume 11, Issue 5/6 (2004) Pages 561-566.
- [23] T.N. Krishnamuri,A.V. Mehta. Air-sea interaction on the time scale of 30 to 50 days. *Journal of the atmospheric sciences*, volume 45, n 8, (1998) Pages 1304-1322.
- [24] A.R. Madden, P.R. Julian. Observations of the 40-50-day tropical oscillation-A review . *Monthly Weather Review*, volume 122, issue 5 (1994) Pages 814-37.
- [25] T.C. Chen, M. Murakami. The 30-50 day variation of convection activity over western pacific ocean with emphasis of northwestern region. *Monthly weather review*, Volume 116 (1987) Pages 892-906.
- [26] T.T. Knutson, K.M. Weickmann. 30-60 day Atmospheric oscillations : composite life-cycles of convection and circulations anomalies. *Monthly weather review*, Volume 115 (1987) Pages 1407-1436.
- [27] B. Sultan, S. Janicot and A. Diedhiou . The West African Monsoon Dynamics. Part I : Documentation of Intrapersonal Variability. *Journal of Climate*. Volume 16 (2003) Pages 3389-340.
- [28] F.Chellali, A.Khellaf , A.Belouchrani. Application of time-frequency representation in the study of the cyclical behavior of wind speed in Algeria : wavelet transform . *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. Volume 24, Issue 8, November 2010, Pages 1233-1239.
- [29] F.Chellali, A.Khellaf , A.Belouchrani . Wavelet spectral analysis of the temperature and wind speed data at Adrar, Algeria. *Renewable Energy*, Volume 35, Issue 6, June 2010, Pages 1214-1219.

# Modélisation et prédiction de la vitesse du vent

## CHAPITRE 5

### MODÉLISATION ET PRÉDICTION DE LA VITESSE DU VENT

La capacité de prédire la vitesse du vent pendant quelques heures est d'une grande importance car elle aidera à assurer une utilisation efficace de l'énergie produite et améliorer la position de l'énergie éolienne par rapport à d'autres formes d'énergie.

La prédiction de la vitesse du vent a fait l'objet de plusieurs études dont diverses approches ont été proposées afin de modéliser la vitesse du vent. Les modèles auto-récurrents et les modèles basés sur la théorie des réseaux de neurones sont les approches les plus utilisées dans la littérature [1]. En 1984, Geerts [2] a proposé une prédiction à court terme de la vitesse du vent au moyen de modèles auto-récurrents à moyenne mobile (ARMA). La comparaison des performances de ces derniers a été réalisée par rapport au modèle persistant. Les modèles auto-récurrents à moyenne mobile ont fourni une meilleure prévision. Depuis ce temps, plusieurs études similaires ont été réalisées pour de nombreux sites du monde. On peut citer les travaux réalisés pour les régions de la Sicile en Italie [3], Tanger au Maroc [4], Quetta au Pakistan [5] et Navarre en Espagne [6]. D'autre part, les modèles basés sur la théorie des réseaux de neurone ont été aussi utilisés afin de prédire la vitesse du vent [1]. A ce titre, on peut citer les travaux réalisés pour les régions de Bombay en Inde [7], Odigitria en Grec [8, 9, 10, 11 et 12]. Par rapport aux modèles ARMA, il a été constaté dans plusieurs études que les réseaux de neurones donnent des performances très proches [1, 13 et 14].

Dans ce chapitre, nous proposons la prédiction de la vitesse du vent pour la région d'Adrar en utilisant deux approches. La première approche est basée sur les modèles ARMA, tandis que, la seconde est basée sur les réseaux de neurones. Avant d'entamer la modélisation, nous procéderons au prétraitement des données.

Dans le chapitre précédent, nous avons démontré que le processus du vent est un pro-

cessus non stationnaire car son spectre varie au court du temps. Pour le site d'Adrar, il a été constaté que le spectre du vent contient trois types d'oscillations qui apparaissent et disparaissent en fonction des saisons. Ainsi, les propriétés du processus du vent varient au court du temps. Tenant compte de cet effet, le développement d'un modèle général qui décrira le processus du vent au court de l'année est extrêmement difficile. Afin de surmonter ce problème, nous proposons de développer des modèles mensuels. Les données utilisées dans cette partie sont les données horaires mesurées pendant 4 ans (Novembre 2004 à Octobre 2008). En supposant que les propriétés du processus du vent sont les mêmes pour la même période de l'année, un modèle mensuel est développé en utilisant les mesures des trois années (par exemple Novembre 2004, Novembre 2005 et Novembre 2006), Alors que, les mesures de la quatrième année (Novembre 2007) seront utilisées comme un ensemble indépendant afin de valider les modèles utilisés.

## **5.1 Modèles auto- récuratif à moyenne mobile (ARMA)**

La modélisation du vent en utilisant les ARMA comporte trois étapes. La première étape consiste à transformer la distribution Weibull en distribution Gaussienne. La deuxième est la normalisation et la standardisation des données. La dernière étape consiste à l'identification et la validation des modèles.

### **5.1.1 Transformation de puissance**

Afin d'ajuster les modèles ARMA à la vitesse du vent, un changement de variables est nécessaire [5, 6 et 15]. L'objectif est de rapprocher la distribution des données de vent à partir d'une distribution Weibull à une distribution Gaussienne. En 1967, Dubey [16] a démontré que si le facteur de forme est égal à 3,6, la distribution Weibull est similaire à une distribution Gaussienne. La transformation des distributions consiste à augmenter

la puissance de chaque valeur des données observées par l'indice de puissance  $x$  :

$$v_i^x = (v_i)^x \quad (5.1)$$

Où

$$x = \frac{k}{3.6} \quad (5.2)$$

### 5.1.2 Normalisation

La périodicité journalière peut être éliminée par la soustraction des moyennes horaires  $u(i)$  puis la division par l'écart type horaire  $s(i)$  [6] :

$$v_i^* = \frac{v_i^x - u(i)}{s(i)} \quad (5.3)$$

Où

$$u(i) = \frac{1}{D} \sum_{j=i+24 \times n}^{24 \times D} v_j^x \quad (5.4)$$

et

$$s(i) = \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{j=i+24 \times n}^{24 \times D} (v_j^x - u(j))^2} \quad (5.5)$$

Où

$n$  est un entier et  $D$  est le nombre de jours dans un mois donné.

$$D = \frac{N}{24} \quad (5.6)$$

Où

$N$  est le nombre d'heures dans ce mois.

Evidemment,  $u(i)$  et  $s(i)$  sont des fonctions périodiques avec une période de 24 heures.

C'est à dire :

$$u(i) = u(i + 24) = \dots = u(i + n.24) \quad (5.7)$$



et

$$s(i) = s(i + 24) = \dots = s(i + n.24) \quad (5.8)$$

### 5.1.3 Modélisation par ARMA

La partie suivante consiste à ajuster des modèles ARMA aux vitesses du vent. Un modèle ARMA général est donné en tant que :

$$v_i^* = (\varphi_1 L + \varphi_2 L^2 + \dots + \varphi_p L^p) v_i^* + (1 + \theta_1 L + \theta_2 L^2 + \dots + \theta_q L^q) \varepsilon_i \quad (5.9)$$

Où

$p$  : Ordre de la partie autorégressive.

$q$  : Ordre de la partie mobile.

$L$  : Opérateur de retard.

$\varepsilon$  : Bruit blanc Gaussien de moyenne nulle et de variance  $\sigma_\varepsilon^2$

### 5.1.4 Détermination de l'ordre

La section suivante consiste à identifier les valeurs de  $p$  et  $q$ . Généralement, les fonctions d'autocorrélation et les fonctions d'autocorrélation partielles sont utilisées comme des identificateurs préliminaires [17]. La fonction d'autocorrélation d'un processus à moyenne mobile pur coupe l'axe des abscisses avec un retard  $p$ . Alors que, la fonction d'autocorrélation d'un processus autorégressif ou un processus auto-régressif à moyenne mobile décroît exponentiellement. L'ordre de la partie auto-régressive peut être déterminé en utilisant la fonction d'autocorrélation partielle qui coupe l'axe des abscisses avec un retard  $p$ .

Les fonctions d'autocorrélation et d'autocorrélation partielles peuvent être utilisées pour identifier la nature générale du processus ARMA. Les valeurs appropriées de  $p$  et  $q$  sont obtenues à l'aide d'un critère additionnel connu sous le nom de critère d'information

d'Akaike [6] :

$$AIK(p, q) = N \ln(\sigma_{\varepsilon}^2(p, q) + 2T) \quad (5.10)$$

Où  $T$  est le nombre des paramètres à estimer.

$$T = p + q \quad (5.11)$$

### 5.1.5 Estimation des paramètres

Une fois que  $p$  et  $q$  sont obtenus, les coefficients du modèle  $\varphi_i$  et  $\theta_i$  peuvent être estimés à travers plusieurs techniques. Dans ce travail, l'estimation des  $\varphi_i$  est réalisée en utilisant la méthode de Yule-Walker, alors que les paramètres  $\theta_i$  sont obtenus en utilisant l'algorithme de Newton-Raphson.

### 5.1.6 Validation des modèles

Les modèles peuvent être validés par l'évaluation de la fonction d'autocorrection des résidus  $C_r(\tau)$ . Un modèle est accepté si ces résidus ne sont pas corrélés et normalement distribués.

Au lieu de vérifier chaque valeurs de  $C_r(\tau)$ , le critère de Ljung-Box teste tout le groupe des fonctions d'autocorrélations. La statistique de Ljung-Box est la suivante [18] :

$$Q = (n + 2)n \sum_{\tau=1}^h \frac{C_r(\tau)^2}{n - \tau} \quad (5.12)$$

Où

$n$  : La taille de l'échantillon.

Un modèle est rejeté si

$$Q > \chi_{1-\alpha, h}^2 \quad (5.13)$$

Où  $\chi^2_{1-\alpha, h}$  est la distribution avec un degré de liberté  $h$  et une quantile  $\alpha$  (généralement  $\alpha = 0.10$ )

## 5.2 Réseaux des Neurones

Le principe général des réseaux de neurones est d'entraîner artificiellement un réseau de neurones artificiel avec des entrées afin qu'ils nous donnent certaines sorties [19].

### 5.2.1 Structure des réseaux de neurones

#### 5.2.1.1 Cellule (neurones)

Les réseaux de neurones sont constitués essentiellement de cellules (neurones). Ces cellules sont connectées entre elles avec des poids  $w_i$ . Chaque neurone dispose de trois éléments essentiels : Une entrée, une sortie et une fonction d'activation.

Il existe plusieurs types de fonctions d'activation dans la littérature. A titre illustratif, voici quelques fonctions couramment utilisées (Figure 5.1).

Le sigmoïde standard :  $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ .

La tangente hyperbolique :  $f(x) = \frac{2}{1+e^{-x^2}} - 1$ .

La fonction Gaussienne :  $f(x) = e^{-x^2/2}$ .

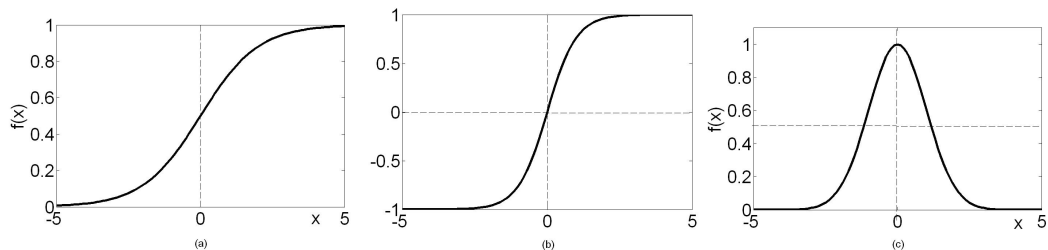


Figure 5.1 – Fonctions d'activation.

a) Le sigmoïde standard, b) La tangente hyperbolique et (c) La fonction Gaussienne.

### 5.2.1.2 Couches

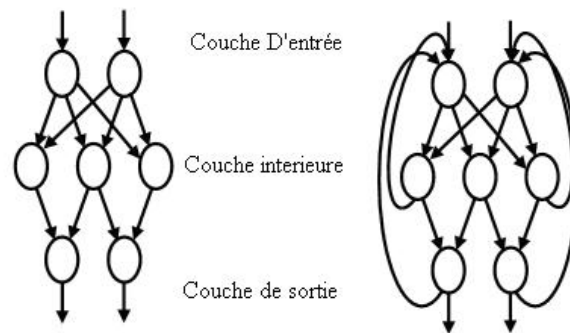


Figure 5.2 – Architecture d'un réseau ANN (2, 3,2) à trois couches et sept neurones  
(a) Feed-Forward ANN (b) Elman ANN..

L'architecture d'un réseau décrit à la fois le type de réseau ainsi que les dimensions d'un type donné. Du point de vue structure, une grande variété des types de réseaux peut être configurée en modifiant le schéma utilisé pour former les connexions entre les cellules. Les réseaux multicouches feed-forward sont les plus communs car leurs structures sont simples ; une couche d'entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches cachées. Chaque neurone est relié à tous les neurones de la couche précédente et n'autorise que les connexions vers l'avant. D'autres types des réseaux ANN sont les réseaux entièrement connectés. Ces types incluent une vaste catégorie des réseaux qui permettent à tout neurone d'être connecté à un autre neurone, y compris lui-même. Les réseaux d'Elman, les réseaux de Jordanie, et les réseaux de Hopfield sont des exemples de ces réseaux entièrement connectés [19].

La détermination de la meilleure architecture (structure) pour résoudre un problème spécifique peut être délicate. Selon Erasmo [20], une règle générale qui détermine le type approprié n'existe pas. Pour une application spécifique, il faut essayer les différents types afin de décider de la meilleure architecture.

### 5.2.1.3 Apprentissage

Les réseaux de neurones artificiels peuvent apprendre par expérience. Par l'application séquentielle de plusieurs entrées, les algorithmes d'apprentissage modifient les valeurs des poids entre les neurones de telle façon à améliorer la performance du réseau de neurone. En fait, l'ajustement des poids est plus au moins efficace et dépend de la connaissance du système à modéliser ou du problème à résoudre. Ainsi, deux grandes classes d'apprentissage existent :

- Apprentissage non supervisé : lorsqu'il n'y a pas de connaissances à priori des sorties désirées pour des entrées données, l'algorithme d'apprentissage utilisé ajuste les poids de façon à maximiser ou minimiser une certaine fonction coût.
- Apprentissage supervisé (back propagation) : cet algorithme ne peut être utilisé que lorsque les entrées ainsi que les sorties désirées sont connues. L'ajustement des poids se fait directement à partir de l'erreur qui est la différence entre la sortie obtenue par le réseau de neurones et celle désirée.

## 5.3 Le modèle de persistance

Le modèle persistant tel que défini dans [6] est donné par :

$$v_{(i+1)/i}^p = v_i \quad (5.14)$$

L'équation (5.14) signifie simplement que la vitesse du vent à l'instant  $i + 1$  (une heure à l'avance) est équivalente à celle du vent à l'instant  $i$ . Ce modèle a été développé par les météorologues comme outil de comparaison afin de compléter les autres modèles. On note que la précision de ce modèle diminue rapidement avec l'augmentation du délai.

## 5.4 Résultats et discussions

Les données utilisées dans cette partie sont les données horaires mesurées pendant 4 ans (Novembre 2004 à Octobre 2008). En raison de manque de données dans les séries chronologiques, notre étude est limitée à quatre mois (Novembre, Décembre, Janvier et Février). Les données des trois premières années sont utilisées pour identifier et former des modèles ARMA et ANN, alors que les données de la quatrième sont utilisées comme un ensemble indépendant de données afin de vérifier et valider les modèles obtenus.

### 5.4.1 Modèles ARMA

Afin d'illustrer l'effet de la normalisation, nous avons calculé les moyennes horaires et l'écart type horaire pour les mois de Novembre (figure 5.3) puis nous avons tracé dans la figure 5.4 les spectres des vitesses de vent pour le mois de Novembre avant et après la normalisation. La figure 5.4.b indique clairement que les harmoniques journalières et demi-journalières ont été éliminées.

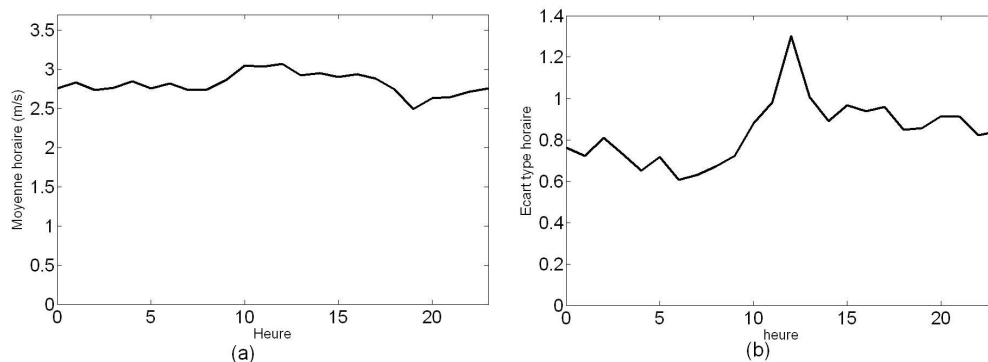


Figure 5.3 – . Moyennes horaires et écart type horaires pour les mois de Novembre  
(a) Moyenne horaire. (b) Ecart type horaire.

Les figures 5.5 et 5.6 présentent les ACF et PACF évaluées pour les quatre mois considérés. Cependant les fonctions d'autocorrélation des mois étudiés présentent des

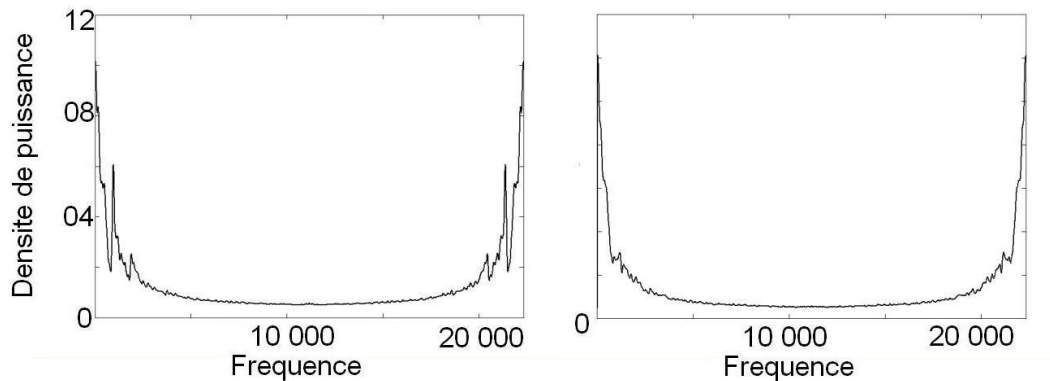


Figure 5.4 – Le périodogramme des vitesses du vent pour les mois de Novembre ((a) Avant la normalisation. (b) Après la standardisation.

diminutions exponentielles, nous remarquons que les fonctions d'autocorrélations partielles traversent l'axe des abscisses, ce qui indique que les vitesses du vent peuvent être modélisées par des modèles auto récurrents ou bien des modèles auto récurrents à moyennes mobiles.

Les ordres finaux des modèles ARMA sont obtenus en utilisant le critère AIK, Le tableau 5.1 présente ces ordres et rapporte aussi les paramètres des distributions de Weibull et les indices de transformations.

Afin de valider les modèles estimés, nous avons évalué conjointement les fonctions d'autocorrélations des résidus (figure 5.7) et le test de Ljung-Box (tableau 5.2). Si les résidus sont conjointement indépendants, leurs fonctions d'autocorrélation s'annulent pour un retard  $\tau = 0$ . A partir de la figure 5.7, nous pouvons constater que les résidus sont décorrélés. Pour le test de Ljung-Box, le tableau 5.2 indique que ce test est satisfait pour plusieurs degrés de liberté  $10 \geq h \geq 30$ . Ainsi les modèles sont retenus.

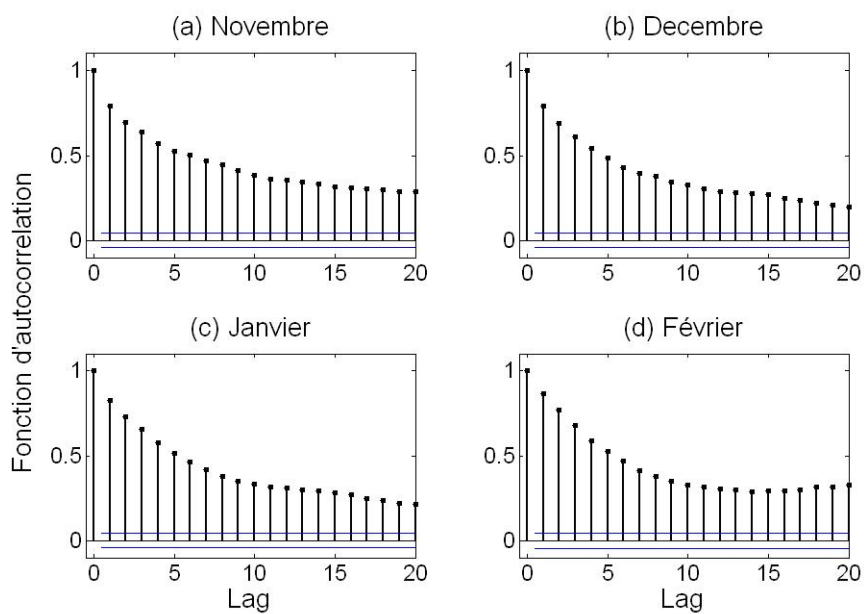


Figure 5.5 – Fonctions d’auto corrélation par rapport au décalage.

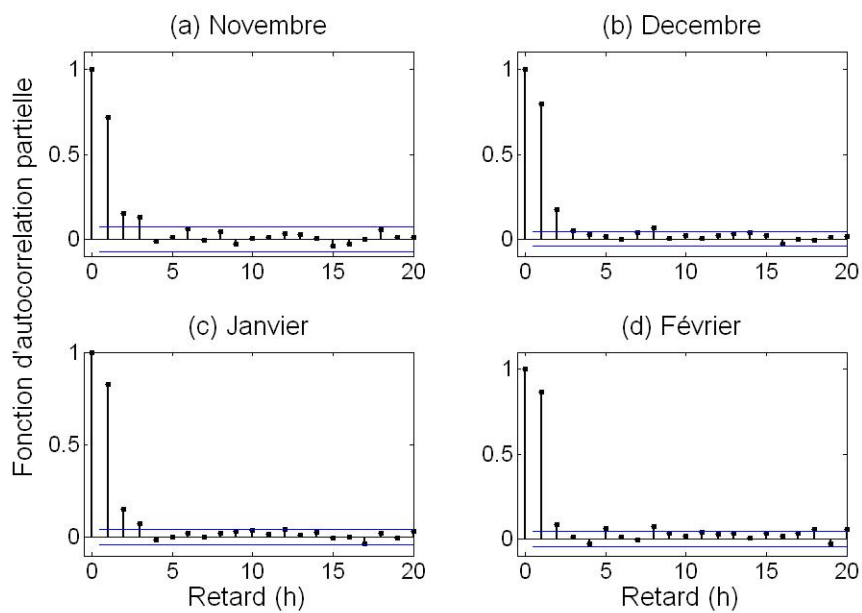


Figure 5.6 – Fonctions d’autocorrélation partielle par rapport au décalage.



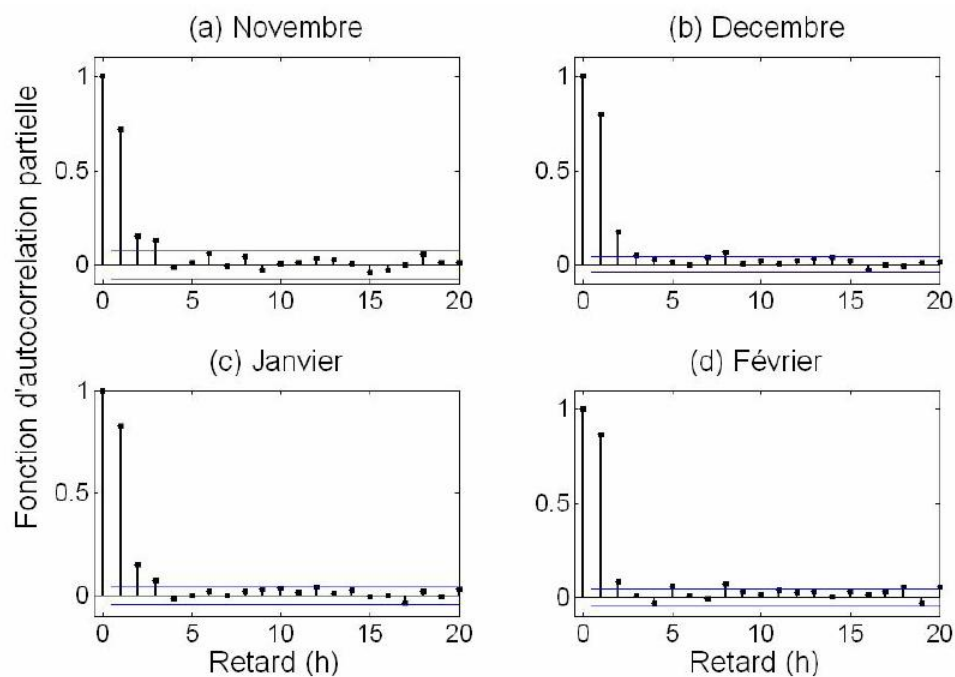


Figure 5.7 – Fonctions d'autocorrections ACF des résidus par rapport au décalage.

	Moyenne (m/s)	c	k	x	ARMA	AR	MA
Janvier	6.43	7.19	2.55	0.68	(3,0)	$\varphi_1 = 0.70$ $\varphi_2 = 0.10$ $\varphi_3 = 0.06$	
Février	6.10	6.81	1.81	0.50	(5,4)	$\varphi_1 = 1.96$ $\varphi_2 = -1.15$ $\varphi_3 = 01.01$ $\varphi_4 = -1.49$ $\varphi_5 = 0.67$	$\theta_1 = 1.10$ $\theta_2 = 0.28$ $\theta_3 = -0.87$ $\theta_4 = -0.78$
Novembre	5.89	6.61	2.23	0.75	(3,0)	$\varphi_1 = 0.69$ $\varphi_2 = 0.08$ $\varphi_3 = 0.06$	
Décembre	6.02	6.74	2.22	0.57	(5,5)	$\varphi_1 = 2.12$ $\varphi_2 = -1.73$ $\varphi_3 = 1.82$ $\varphi_4 = -2.00$ $\varphi_5 = 0.79$	$\theta_1 = 1.41$ $\theta_2 = 0.83$ $\theta_3 = 1.37$ $\theta_4 = -1.13$ $\theta_4 = -0.15$

Tableau 5.I – Les caractéristiques des distributions du vent et les modèles ARMA sélectionnés pour chaque mois.

$h$	Novembre	Décembre	Janvier	février	$\chi_{0.1}^2$
10	12.33	09.74	04.94	12.92	15.99
11	13.16	11.35	05.49	12.94	17.28
12	13.20	11.58	06.56	13.21	18.55
13	13.60	12.07	06.68	13.99	19.81
14	13.63	12.31	10.23	14.94	21.06
15	13.83	14.10	11.44	15.74	22.31
16	14.06	14.10	16.03	15.98	23.54
17	14.12	14.63	16.55	17.16	24.77
18	14.51	15.44	17.34	24.04	25.99
19	15.10	16.40	17.65	26.53	27.20
20	15.31	21.77	20.74	26.75	28.41
21	15.38	22.40	21.07	26.89	29.62
22	15.65	22.41	23.35	26.97	30.81
23	18.92	24.94	23.78	27.33	32.01
24	20.06	28.23	23.87	28.43	33.20
25	20.14	29.91	24.48	31.79	34.38
26	20.27	32.84	24.50	32.54	35.56
27	21.67	33.56	24.62	32.55	36.74
28	21.68	34.68	25.06	32.67	37.92
29	23.11	36.06	27.33	32.71	39.09
30	23.12	36.43	28.59	33.92	40.26

Tableau 5.II – Le test de Ljung-Box.

#### 5.4.2 Les Modèles ANN

Pour choisir une architecture ANN appropriée, nous proposons quatre ANN de différentes structures, les deux premières ANN sont de type feed-forward ANN(3,1) et ANN(3,3,1) alors que les autres ANN sont de type Elman ANN(3,1) et ANN(3,3,1). L'apprentissage des ANN a été réalisé en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquart [4].

D'après la figure 5.8, qui montre l'évolution de l'erreur d'apprentissage en fonction des itérations pour les quatre différentes architectures, les ANN donnent des performances très proches (RMS=0.32). Ainsi, le modèle le plus simple est choisi. Ceci est similaire à des résultats obtenus par [20] dont ils ont décidé de commencer l'analyse

avec un modèle à trois couches (selon les recommandations de divers auteurs). Néanmoins, il a été constaté que le modèle le plus simple (à deux couches et trois neurones) est le meilleur.

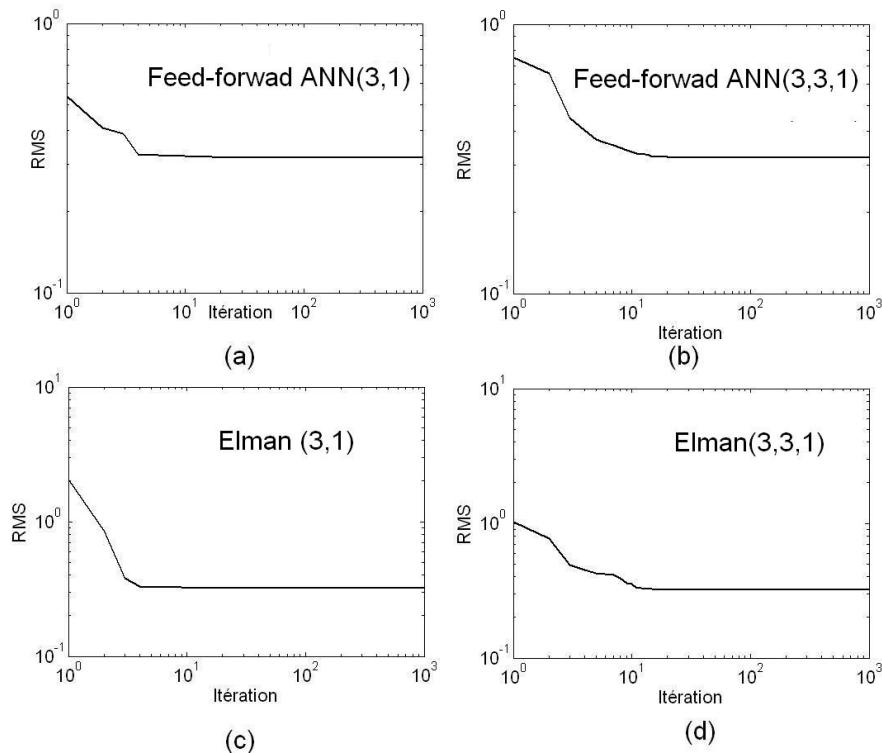


Figure 5.8 – Evolution de l'erreur d'apprentissage en fonction des itérations

### 5.4.3 Prédiction

Les figures 5.9 et 5.10 présentent les valeurs mesurées et les valeurs estimées (après la standardisation et la denormalisation) de la vitesse du vent en utilisant les modèles ARMA et ANN pour 1 et 4 heures à l'avance respectivement. On note que les deux modèles donnent des résultats très proches.

En ce qui concerne l'erreur de la prédiction, nous incluons dans la figure 5.11 l'évolution de la RMSE lorsque les prédictions sont effectuées pour 1-7 h à l'avance. Pour

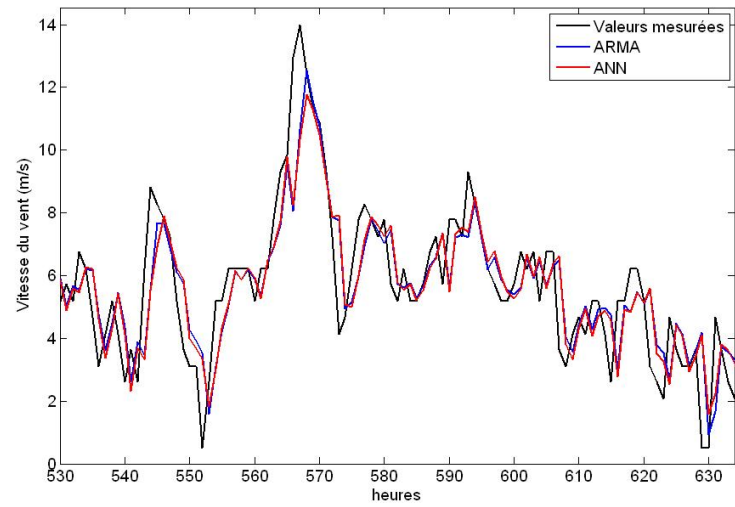


Figure 5.9 – Les valeurs mesurées et les valeurs estimées de la vitesse du vent en utilisant les modèles ARMA et ANN pour 1 heure à l’avance (Novembre 2007)

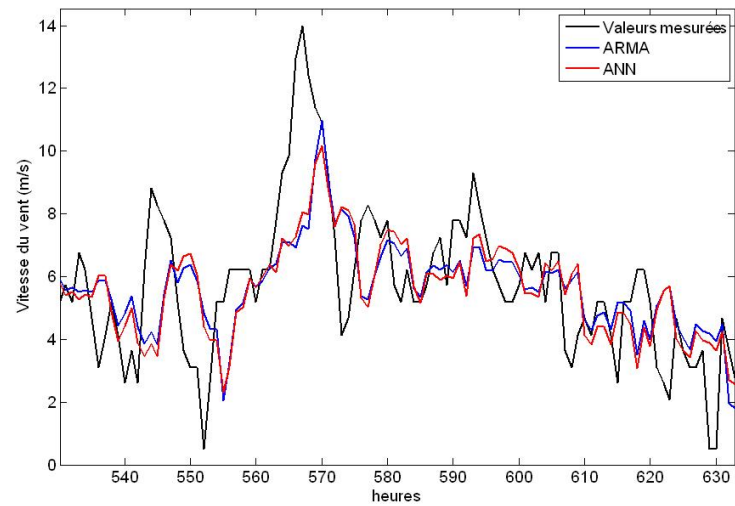


Figure 5.10 – Les valeurs mesurées et les valeurs estimées de la vitesse du vent en utilisant les modèles ARMA et ANN pour 4 heures à l’avance (Novembre 2007)

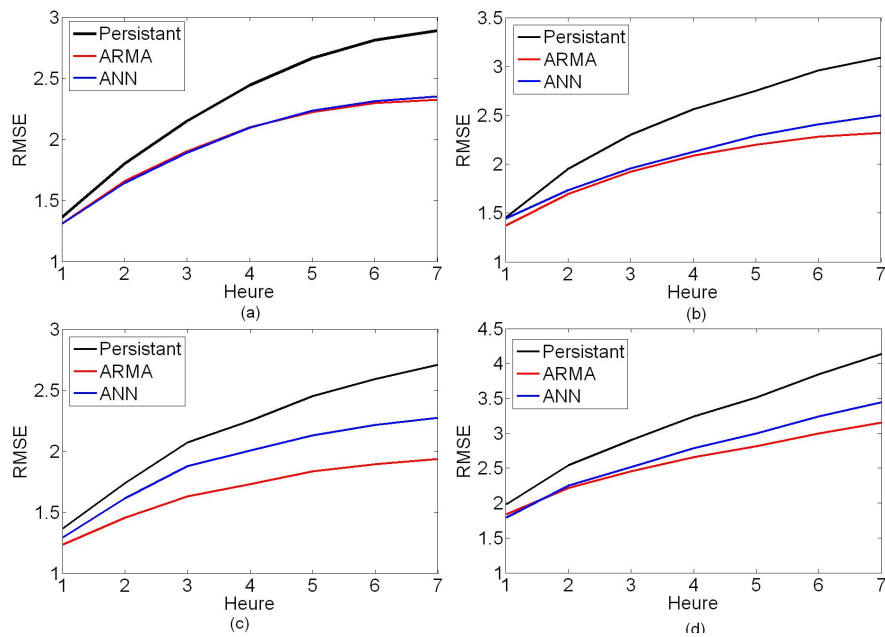


Figure 5.11 – Evolution RMS lorsque les prédictions sont effectuées pour 1-7 h à l’avance (a) Novembre, (b) Décembre, (c) Janvier et (d) Février.

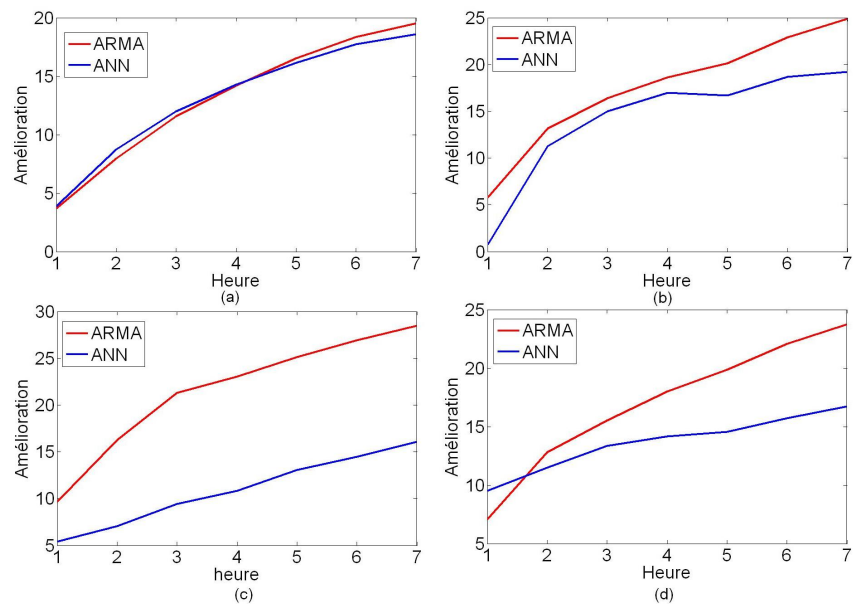


Figure 5.12 – Amélioration de RMSE pour les modèles ARMA et ANN par rapport aux modèles persistants. (a) Novembre, (b) Décembre, (c) Janvier et (d) Février.

les mois de Novembre, Décembre, Janvier et Février, nous constatons que les erreurs de prédictions obtenues avec les modèles ARMA et les modèles ANN sont toujours plus petites que celles obtenues avec les modèles de persistance. En tout cas, comme nous nous y attendions, les RMSE augmentent lorsque le moment de la prédiction s'éloigne des dernières données observées.

La figure 5.12 montre l'amélioration en pourcentage de la RMS moyenne pour chaque mois lorsque les modèles ARMA et ANN sont utilisés par opposition aux modèles persistants. L'amélioration maximale a été obtenue pour le mois de Janvier. Il y a une amélioration de 10% pour les prévisions de 1 h à l'avance et 28% pour 7 h à l'avance. L'amélioration minimale a été obtenue pour le mois de Décembre de 2% pour les prévisions de 1 h à l'avance.

## 5.5 Conclusion

Dans cette étude, les modèles linéaires auto-récurrents à moyennes mobiles ARMA ainsi que des modèles basés sur la théorie des réseaux de neurones ont été proposés pour la prédiction de la vitesse du vent. Nous avons développé des modèles mensuels. Le développement d'un modèle général qui décrira le processus du vent au court de l'année est extrêmement difficile.

Les résultats obtenus indiquent qu'après un processus de transformation et normalisation des données, les modèles ARMA sont capables de décrire les vitesses du vent. Concernant les modèles ANN, les résultats obtenus indiquent que les modèles simples de type feed-forward sont les plus adéquats pour décrire et prédire la vitesse du vent.

La comparaison entre les performances de ces deux approches a indiqué que leurs performances sont très proches.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. Yuan-Kang, H. Jing-Shan. A literature review of wind forecasting technology in the world. Power Tech conferences, IEEE Lausanne, 1-5 July 2007 Pages 504 - 509.
- [2] H.M. Geerts. Short range prediction of wind speeds : a system -theoretic approach. Proceeding of European Wind energy Conference. Hamburg, Germany (1984) Pages 594-599.
- [3] S. Bivona, R. Burlon , C. Leone. Hourly wind speed analysis in Sicily. Renewable Energy, Volume 28, Issue 9, July 2003, Pages 1371-1385.
- [4] H. Nfaoui, J. Buret, A. Sayigh. Stochastic simulation of hourly average wind speed sequence in Tangiers (Morocco). Solar Energy, Volume 56, Issue 3, March 1996, Pages 301-314 .
- [5] K. Lalarukh, Y.R. Jarfi. Time models to simulation and forecast hourly averaging wind speed in Quetta, Pakistan. Solar Energy, Volume 61, Issue 1, July 1997, Pages 23-32.
- [6] J.L. Torres, A. Garcia, M. De Blas, A. De Francisco. Forecast of hourly averaged wind speed with ARMA models in Navarre (Spain). Solar Energy, Volume 79, Issue 1, July 2005, Pages 65-77.
- [7] A. More, M.C. Deo. Forecasting wind with neural networks. Marine Structures, Volume 16, Issue 1, January-February 2003, Pages 35-49.
- [8] M. Bilgili, B. Sahin, A. Yasar. Application of artificial neural networks for the wind speed prediction of target station using reference stations data. Renewable Energy, Volume 32, Issue 14, November 2007, Pages 2350-2360.
- [9] K. Sreelakshmi, P. Ramakanthkumar .Neural Networks for Short Term Wind Speed Prediction. World academy of science, engineering and technologies, volume 42, 2008, Pages 721-725.

- [10] M. C. Alexiadis, P. S. Dokopoulos, H. S. Sahsamanoglou and I. M. Mnousaridis . Sort-term forecasting of wind speed and related electrical power. *Solar Energy*, Volume 63, Issue 1, July 1998, Pages 61-68.
- [11] C.W. Potter and M. Negnevitsky. Very Short-Term Wind Forecasting for Tasmanian Power Generation. *IEEE transactions on power systems*, Volume 21, Issue 2 , May 2006, Pages 965 - 972.
- [12] C. Erasmo, R. Wilfrido. Short term wind speed forecasting in la Venta, Oaxaca, México, using artificial networks. *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 1, January 2009, Pages 274-278.
- [13] A. Sfetsos. A comparison of various forecasting techniques applied to mean hourly wind speed time series. *Renewable Energy*, Volume 21, Issue 1, 1 September 2000, Pages 23-35.
- [14] A. Sfetsos. A novel approach for the forecasting of mean hourly wind speed time series. *Renewable Energy*, Volume 27, Issue 2, October 2002, Pages 163-174.
- [15] A. Daniel, A Chen. Stochastic simulation and forecasting of hourly average wind speed sequence in Jamaica. *Solar Energy*, Volume 46, Issue 1, 1991, Pages 1-11.
- [16] A.D. Dubey. Normal and Weibull distribution. *Naval Research Logistics Quarterly*, Volume 14, Issue 1, 1967, pages 69-79.
- [17] R.S. Tsay. *Financial Econometrics. From Basics to Advanced Modeling Techniques*. John Wiley Sons edition (2002).
- [18] D.S.G. Pollock. *Handbook of time series. Analysis, Signal. Rrocessing and Dynamics*. Academic Press edition (1999).
- [19] B. Widrow, S. D. Sterns, *Adaptive Signal Processing*, New York : Prentice-Hall (1985).
- [20] C. Erasmo, R, Wilfrido. Wind speed forecasting in the South Coast of Oaxaca, México. *Renewable Energy*, Volume 32, Issue 12, October 2007, Pages 2116-2128.



## Conclusion générale

## CONCLUSION GÉNÉRALE

La quantification du potentiel éolien ainsi que l'établissement des cartes du vent sont des étapes importantes avant l'installation des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Mais elles ne sont pas suffisantes. Une étude du comportement du vent ainsi que ses caractéristiques stochastiques et cycliques sont indispensables afin d'assurer une exploitation efficace.

Les précédentes études du vent en Algérie ont traité ce phénomène météorologique du point de vue énergétique (Evaluation du potentiel, cartographies et dimensionnement) en menant une analyse statistique. Toutefois, dans la présente étude, le vent a été considéré comme un signal aléatoire pour lequel ses propriétés stochastiques et cycliques sont à déterminer. Pour cela, plusieurs techniques du traitement du signal ont été utilisées afin d'analyser ces différentes caractéristiques.

Ce travail comporte trois principales approches. La première est l'étude descriptive du vent par le développement de nouvelles distributions de probabilités basées sur le principe du maximum d'entropie. La deuxième est l'étude du comportement cyclique du vent en utilisant les approches temps-fréquence. La troisième approche a consisté dans la modélisation de la vitesse du vent par des modèles auto-récurrents et des modèles basés sur la théorie des réseaux de neurones.

En plus, l'étude statistique du vent a été reprise en incluant de nouvelles données et de nouveaux sites. Ceci a permis de compléter les études précédentes et de faire ressortir d'importants sites.

La présente étude a traité plusieurs aspects du comportement du vent en Algérie. Les résultats obtenus sont nombreux. Nous les résumons par les points suivants :

1- L'Algérie recèle des ressources éoliennes appréciables avec une vitesse moyenne annuelle supérieure à 4 m/s sur 50% du territoire. La saison la plus ventée est le printemps avec des vitesses supérieures à 5 m/s occurant sur 42% de l'Algérie. Ce taux diminue à 16.2% en automne et en hiver.

2- Le Sud de l'Algérie est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que celles du Nord (Particulièrement le Sud-Ouest).

3- Une contribution à l'actualisation de la carte du vent en Algérie a été effectuée en ajoutant les données de la région de Hassi-Rmel. Il a été constaté que cette région possède un potentiel éolien très important. La région est très favorable à l'installation des systèmes de conversion de l'énergie éolienne parce qu'elle possède déjà l'infrastructure nécessaire.

4- L'étude descriptive des densités de probabilité du vent indique que le vent en Algérie obéit à la loi de Weibull. Toutefois, il a été constaté que les distributions dérivées à partir du principe de l'entropie maximale donnent de meilleurs ajustements.

5- L'étude du comportement cyclique du vent à travers la considération de plusieurs sites a révélé la présence de trois types d'oscillations ; journalières, synoptiques et intra-saisonniers. L'application des approches temps-fréquence a permis de suivre les variations du contenu spectral en fonction du temps.

6- La considération des différentes sites à travers le pays a révélé que le facteur topographique joue un rôle important dans la détermination de l'allure générale du contenu spectral du vent.

7- La relation entre le comportement cyclique du vent et la température pour le site d'Adrar a été examinée. Une grande corrélation entre la température et la vitesse du vent

a été observée dans les fréquences synoptiques et intra- saisonnières.

8- La modélisation des vitesses du vent a indiqué que les modèles auto-récurrents à moyennes mobiles ainsi que les modèles basés sur la théorie des réseaux de neurones sont capables de décrire le comportement stochastique du vent. Les résultats obtenus indiquent que les modèles ANN simples de type feed-forward sont les plus adéquats.

Les études menées jusqu'à présent sur le potentiel éolien restent préliminaires. Le territoire Algérien étant très vaste, le nombre limité de stations est insuffisant pour une détermination significative du potentiel éolien. A cause leur distribution éparse à travers le territoire national, ces stations ne couvrent pas des régions dont le potentiel s'avère parfois extrêmement important. La mise en place d'un réseau de stations de mesure plus dense et mieux adapté est une nécessité. En effet, la majorité des stations sont conçues pour la navigation aérienne.

Afin de localiser les zones à fort potentiel éolien, les indicateurs écologiques et les enquêtes auprès des habitants peuvent d'abord être utilisés. Les enquêtes fiables doivent être aussi menées auprès des habitants dont la nature du travail dépend énormément du comportement du vent. Ce sont plus particulièrement les éleveurs de bétails et les routiers. D'ailleurs c'est grâce aux témoignages des routiers qu'un intérêt a été porté à la région de Hassi-R'mel. Une fois les zones potentielles localisées, la mise en place d'une campagne de mesure permettra de caractériser et de quantifier le potentiel éolien.

Le vent est un facteur fondamental dans plusieurs domaines, y compris les systèmes de conversion de l'énergie éolienne, les constructions, le transport, la désertification et l'agriculture. Nous décrivons en bref l'impact de cette étude sur différents domaines.

Dans cette étude, nous avons développé des modèles (ARMA) et des modèles (ANN) afin de prédire la vitesse du vent à court terme. Cette prédiction est nécessaire dans le domaine de conversion de l'énergie éolienne afin d'éviter les creux de tension dans le

cas d'une baisse de production éolienne car les turbines (à gaz ou à vapeur) ont besoin d'un certain temps de démarrage.

A travers l'étude du comportement cyclique du vent, il a été constaté que le vent a une composante périodique journalière importante, particulièrement dans les régions côtières et montagneuses. Dans les grandes villes, ce phénomène peut être exploité dans le domaine de l'urbanisme en orientant les rues dans les directions Nord-Sud. Cette orientation est bénéfique car elle facilitera la ventilation des villes et les battisses. Elle permettra aussi d'évacuer le gaz  $CO_2$  et les autres gazes polluants. En plus, une connaissance a priori de la direction du vent aidera à choisir les emplacements des zones industrielles près de ces villes afin d'éviter les fumées et les cendres des usines.

Dans le domaine du transport aérien, l'utilisation des indicateurs écologiques a permis de détecter les directions dominantes du vent particulièrement dans le Sud ; Ceci est un élément très essentiel dans l'orientation des aérodromes ; Dans les régions Sud-Ouest, nous encouragerons d'orienter les aérodromes dans la direction du vent (Sud-Ouest) car une telle orientation est bénéfique pour le décollage et l'atterrissage des avions . Concernant les régions Sud-est, les indicateurs écologiques indiquent qu'il n'y a pas des directions dominantes dans ces régions (dunes étoilées). Nous encourageons donc de ne pas construire des grands aéroports dans ces régions car l'influence du vent est grande. Pour les planifications des vols, nous avons constaté que les périodes du printemps sont caractérisées par des tempêtes de sables et des oscillations importantes. Nous encourageons donc de minimiser le nombre des vols dans ces périodes et d'utiliser les petites avions (car ils sont moins influencés par le vent).

Dans le domaine de l'agriculture, selon sa force, le vent agit positivement ou bien négativement sur l'implantation. Il joue un rôle bénéfique sur les plantes car il aide dans la fécondation et le renouvellement de l'air autour des plantes. En outre, le vent agit négativement sur l'implantation en participant à l'augmentation de la transpiration, la déformation et la casse des branches des arbres. Pour la région d'Adrar, il a été constaté

que le vent enclenche des vagues de chaleurs (oscillations synoptiques). La construction des brises vents doit prendre la direction du vent en considération. En plus, l'anticipation de la direction et la vitesse du vent est un élément essentiel dans la lutte contre les criquets.

Concernant la lutte contre la désertification, les cartes obtenues dans cette étude ainsi que les indicateurs écologiques (photos du barrage vert) indiquent la présence d'un couloir du vent dans les régions de Hassi-R'mel jusqu'à Djelfa. Ceci doit être pris en considération par les autorités dans une éventuelle campagne de lutttes contre la désertification. En plus, ce couloir d'air agit négativement dans le domaine du transport terrestre ; souvent au printemps, la circulation est interrompue par des tempêtes de sables.

Comme perspectives, nous proposons deux grandes actions. Utilisant les indicateurs écologiques et les enquêtes, nous proposons d'abord la mise en place des stations de mesure afin de mieux quantifier le potentiel éolien et de compléter l'Atlas éolien. Ces stations doivent être mises en place particulièrement au Sud où le réseau de stations est très peu dense et dont le potentiel d'existence de sites ventés est grand. Nous proposons aussi et surtout de développer des modèles spatio-temporaires afin de mieux prédire la vitesse du vent.

## Annexe I

### Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME

Distribution PME		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>
M=2	r=0	-2.12638	0.258474	-0.0524432	0	0
	r=1	-1.37338	-0.443525	-0.0108659	0	0
	r=2	-0.90589	-1.016890	0.0183888	0	0
	r=3	-0.58222	-1.528920	0.0420065	0	0
	r=4	-0.34600	-2.006170	0.0625729	0	0
M=3	r=0	-2.24794	0.394551	-0.0856602	0.00211725	0
	r=1	-1.01395	-0.801355	0.0720460	-0.00509532	0
	r=2	0.04322	-1.90134	0.2168670	-0.01193110	0
	r=3	1.01916	-2.95553	0.3551460	-0.01854790	0
	r=4	1.9448	-3.98075	0.4891340	-0.02500990	0
M=4	r=0	-2.4328	0.701287	-0.2081930	0.0189698	-0.00072905
	r=1	-0.85245	-1.04459	0.1661190	-0.0178716	0.00055131
	r=2	0.46941	-2.51095	0.4486640	-0.0432781	0.00135723
	r=3	1.67776	-3.86626	0.6978140	-0.0648370	0.00201393
	r=4	2.82051	-5.16232	0.9304450	-0.0846241	0.00260596

Tableau I.I – Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site d'Annaba.

Distribution PME		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
M=2	r=0	-1.73514	-0.005324	-0.0235198	0	0
	r=1	-1.07379	-0.615392	0.0057140	0	0
	r=2	-0.84274	-1.040630	0.0192547	0	0
	r=3	-0.77935	-1.409550	0.0285087	0	0
	r=4	-0.77822	-1.764980	0.0368155	0	0
M=3	r=0	-1.86939	0.127658	-0.0499955	0.00130976	0
	r=1	-0.80883	-0.841971	0.0476619	-0.00194578	0
	r=2	0.19123	-1.862610	0.167400	-0.00681669	0
	r=3	1.06473	-2.797910	0.2724520	-0.01102290	0
	r=4	1.88858	-3.710310	0.3751380	-0.01519730	0
M=4	r=0	-1.76132	-0.016233	-0.0092444	-0.00230144	0.0000893
	r=1	-0.35567	-1.391510	0.203337	-0.01627530	0.00038098
	r=2	0.84836	-2.643970	0.395497	-0.02910870	0.00065097
	r=3	1.96049	-3.838760	0.577733	-0.04137070	0.00091021
	r=4	3.01594	-4.997280	0.753555	-0.05325110	0.00116216

Tableau I.II – Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site d'Oran.

Distribution PME		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
M=2	r=0	-1.74781	0.092728	-0.0322677	0	0
	r=1	-1.59933	-0.356750	-0.0122822	0	0
	r=2	-1.49834	-0.786088	0.0058207	0	0
	r=3	-1.44467	-1.196130	0.0221726	0	0
	r=4	-1.43385	-1.589640	0.0370719	0	0
M=3	r=0	-2.22696	0.428924	-0.0924976	0.00294113	0
	r=1	-1.82261	-0.203825	-0.0391668	0.00128477	0
	r=2	-1.41982	-0.838657	0.0149027	-0.00042556	0
	r=3	-1.01627	-1.477060	0.0699867	-0.00220394	0
	r=4	-0.61052	-2.119900	0.12623499	-0.0040579	0
M=4	r=0	-3.24756	1.371610	-0.3524201	0.0294869	-0.0008791
	r=1	-2.5644	0.477582	-0.2268203	0.0204633	-0.00063659
	r=2	-1.89121	-0.407711	-0.1037062	0.0117139	-0.0004042
	r=3	-1.22871	-1.283681	0.0167658	0.00325427	-0.00018243
	r=4	-0.57729	-2.150032	0.1345301	-0.00491069	0.0000286

Tableau I.III – Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site de Batna.



M=2	r=0	-3.72742	0.801651	-0.0825254	0	0
	r=1	-3.50638	0.317438	-0.0587535	0	0
	r=2	-3.36067	-0.138789	-0.037355	0	0
	r=3	-3.2837	-0.569621	-0.0180853	0	0
	r=4	-3.27003	-0.977184	-0.0007474	0	0
M=3	r=0	-4.94337	1.59673	-0.223097	0.00706766	0
	r=1	-4.59051	0.999186	-0.175812	0.00571846	0
	r=2	-4.27541	0.417266	-0.130306	0.0044186	0
	r=3	-3.98995	-0.152846	-0.0860672	0.00314969	0
	r=4	-3.72666	-0.714655	-0.042624	0.00189422	0
M=4	r=0	-7.37394	3.57103	-0.721494	0.0548296	-0.00149795
	r=1	-6.73364	2.71132	-0.603849	0.0464943	-0.00127509
	r=2	-6.11826	1.86935	-0.490443	0.0385664	-0.0010657
	r=3	-5.52578	1.04366	-0.380926	0.0310115	-0.00086862
	r=4	-4.95446	0.233026	-0.275002	0.023801	-0.00068289

Tableau I.IV – Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site de Ghardaia.

M=2	r=0	-2.59643	0.295207	-0.038997	0	0
	r=1	-2.11412	-0.251205	-0.0131546	0	0
	r=2	-1.92135	-0.693054	0.0046488	0	0
	r=3	-1.90695	-1.07123	0.0176514	0	0
	r=4	-2.00846	-1.41099	0.0278987	0	0
M=3	r=0	-2.77935	0.448795	-0.0681393	0.00146475	0
	r=1	-1.87077	-0.434774	0.0199967	-0.00160818	0
	r=2	-1.11208	-1.26304	0.103716	-0.00466732	0
	r=3	-0.4284	-2.05927	0.183976	-0.00764262	0
	r=4	0.20842	-2.83494	0.261906	-0.0105548	0
M=4	r=0	-2.60712	0.261952	-0.0193103	-0.0028232	0.00011193
	r=1	-1.39968	-0.918751	0.147607	-0.0132597	0.00032639
	r=2	-0.39082	-1.98209	0.293896	-0.0223657	0.0005127
	r=3	0.5288	-2.99344	0.43121	-0.0309082	0.00068747
	r=4	1.39349	-3.97274	0.562977	-0.0391028	0.00085517

Tableau I.V – Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site de Inamenass.

M=2	r=0	-3.64856	0.51422	-0.0428758	0	0
	r=1	-3.4634	0.082074	-0.0254557	0	0
	r=2	-3.49204	-0.288603	-0.0119519	0	0
	r=3	-3.64405	-0.623712	-0.0007137	0	0
	r=4	-3.89781	-0.92934	0.0086525	0	0
M=3	r=0	-4.05642	0.764615	-0.0813823	0.00164234	0
	r=1	-3.59022	0.154023	-0.0360677	0.00043854	0
	r=2	-3.19951	-0.446802	0.010725	-0.00091651	0
	r=3	-2.8612	-1.03155	0.0563419	-0.00226054	0
	r=4	-2.55765	-1.60485	0.100988	-0.00358697	0
M=4	r=0	-3.96308	0.694748	-0.0673115	0.00065377	0.0000208
	r=1	-3.16428	-0.152789	0.0259427	-0.0040476	0.00010031
	r=2	-2.52948	-0.922502	0.107737	-0.00811317	0.00016827
	r=3	-1.96778	-1.65857	0.184741	-0.0119232	0.00023174

Tableau I.VI – Valeurs des paramètres des distributions PME et Type-PME pour le site de Adrar.

## Annexe II

### L'algorithme de Levenberg-Marquardt

Les réseaux de neurones peuvent être considérés comme des fonctions non-linéaires de la forme suivante :

$$y_j = ANN(w_i, x_j) \quad (\text{II.1})$$

Où

$w_i$  : Poids du réseau.

$x_j$  : Vecteur des entrées.

$y_j$  : Vecteur des sorties.

L'apprentissage du réseau peut être considéré comme un problème d'optimisation général avec les paramètres  $w_i$  à ajuster. Il existe plusieurs algorithmes d'optimisation dont le plus utilisé est celui de Levenberg-Marquardt. Cet algorithme est simple, mais robuste. Fondamentalement, il consiste à résoudre l'équation suivante :

$$(JJ' + \lambda I)\delta = J'E \quad (\text{II.2})$$

Où

$J$  : Matrice jacobienne du système.

$\lambda$  : Facteur d'amortissement de Levenberg.

$\delta$  : Vecteur de mise à jour des poids.

$E$  : Erreur de sortie pour chaque entrée utilisée.

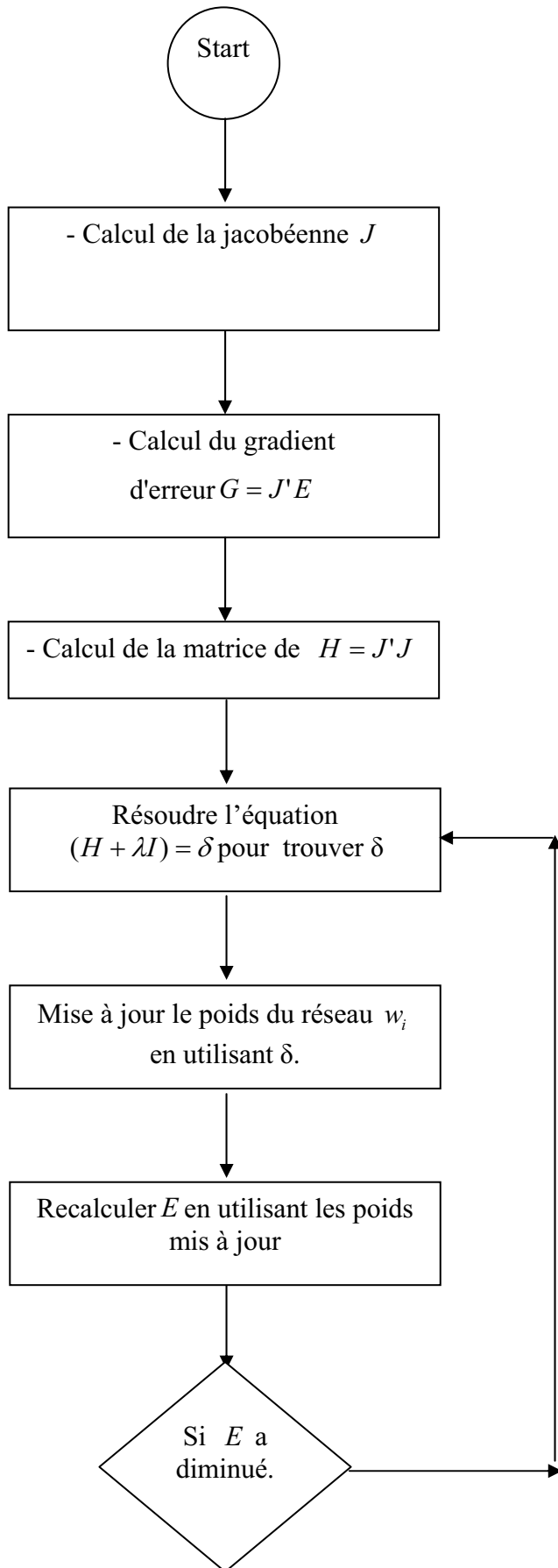
La matrice  $JJ'$  peut également être connue sous le nom de Hesseinne  $H$ . Le facteur d'amortissement  $\lambda$  est ajusté à chaque itération et il guide le processus d'optimisation.

La Jacobienne  $JJ'$  est la matrice des premières dérivées partielles des fonctions  $f(w_i, x_j)$ . Dans le cas de réseaux de neurones, c'est une matrice d'ordre  $W \times N$ . Où

$N$  est le nombre d'entrées et  $W$  est le nombre total de paramètres du réseau. D'où  $J$  est donnée comme suit :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(w_1, x_1)}{\partial w_1} & \frac{\partial f(w_2, x_1)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial f(w_W, x_1)}{\partial w_W} \\ \frac{\partial f(w_1, x_2)}{\partial w_1} & \frac{\partial f(w_2, x_2)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial f(w_W, x_2)}{\partial w_W} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f(w_1, x_N)}{\partial w_1} & \frac{\partial f(w_2, x_N)}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial f(w_W, x_N)}{\partial w_W} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Comme indiqué précédemment, l'algorithme Levenberg-Marquardt consiste fondamentalement à la résolution de l'équation (II.2) avec différentes valeurs de  $\lambda$  jusqu'à que  $E$  diminue. Alors, chaque itération d'apprentissage est composée des étapes suivantes :



## Références

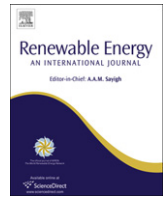
- [1] J.J. Moré. The Levenberg-Marquardt Algorithm : Implementation and Theory, Numerical Analysis. Springer Verlag edition (1977) .
- [2] K.A. Levenberg. Method for the Solution of Certain Problems in Least-Squares. Quarterly Applied Math ( 1944).

# Publications



Contents lists available at ScienceDirect

## Renewable Energy

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene)

## Wavelet spectral analysis of the temperature and wind speed data at Adrar, Algeria

F. Chellali<sup>a,c,\*</sup>, A. Khellaf<sup>b</sup>, A. Belouchrani<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables, Ghardaïa, Algeria

<sup>b</sup> Centre de recherche et développement des énergies renouvelables, CDER, Bouzeriah, Algeria

<sup>c</sup> Ecole Nationale polytechnique, ENP, El-harrach, Algeria

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 4 April 2009

Accepted 11 October 2009

Available online 7 November 2009

#### Keywords:

Wavelet transform

Coherency analysis

Wind speed

Temperature

Significant oscillations

Adrar region

### ABSTRACT

Spectra of many meteorological data such as wind speed and temperature are time variable. Thus a Fourier analysis is not sufficient. In the present work, the wavelet transform is applied as a time-frequency analysis to the meteorological data for the region of Adrar (27.9°N, 0.3°W, 263 m), Algeria. This analysis is carried out in order to investigate the power spectra behaviors of both temperature and wind speed and their variations with time.

To determine the relationship between these two meteorological parameters, the cross wavelet analysis is also applied. The study is carried out using data extending over a period of four years. The analysis is applied over a frequency range from 0.002 to 0.5 cycles per day.

The results show that significant synoptic oscillations of periods between 2 and 16 days occur mainly in the cold season in both wind and temperature time series. Those oscillations are characterized by short life durations of one to few weeks. Wavelet power spectrum has also revealed the presence of intra-seasonal oscillations of periods between 30 and 60 days. These intra-seasonal oscillations have been observed mainly in the warm seasons. This study reveals also that temperature and wind speed co-vary especially at the synoptic and the intra-seasonal frequencies.

© 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Recently, the wavelet transform (WT) has been widely used as a time-frequency tool (TFT). This tool is able to detect variations of power within meteorological data. The WT is a very adequate tool to analyze meteorological time series that contain information at different time scales such as diurnal, seasonal and annual time's scales. Via the time-frequency (TF) representation provided by the WT, one can easily determine significant time series oscillations and how these oscillations vary with respect to time. For different time scales and frequency ranges, several studies using WT and the cross wavelet transform have been carried out. Turbulence study [2], tropical convection [13], intra-decadal changes in ENSO Monsoon system [9], intra-seasonal oscillations in wind speed and oceanic wave [5] and relationships between solar activities and some large scales climatic [10] are among these studies.

The aim of the present work is twofold. First, the wavelet transform is applied to wind speed and temperature data in order to investigate their spectral behaviors and how they vary with

respect to time. From the wavelet power spectrum and with an appropriate choice of the analysis frequency band, one can determine the significant oscillations frequencies as well as their durations and time of occurrences. After that, the cross wavelet transform is used in order to study coherency and the phase difference between the two time series. The study is carried out using daily averages data extending over a period of 4 years (January 2005 to December 2008) and using frequency range from  $2 \times 10^{-3}$  to 0.5 cycles/day (i.e. periods from 2 to 512 days).

Data used in this study were obtained from the meteorological station located in the region of Adrar (27.9°N, 0.3°W). The site is characterized by a dry sub-tropical climate and its altitude is 263 m above sea level. Adrar region is considered to be one of the windiest regions in Algeria. Using data over the period from January 2005 to December 2008, the average wind speed value is found to be  $\bar{V} = 6.2$  m/s. This makes this region a very favorable site for wind power farms (Fig. 1).

## 2. Wavelet transform

Because many signals in nature present irregular or time limited features, they are considered to be non-stationary. Global Fourier

\* Corresponding author.

E-mail address: [chellali\\_farouk@yahoo.fr](mailto:chellali_farouk@yahoo.fr) (F. Chellali).



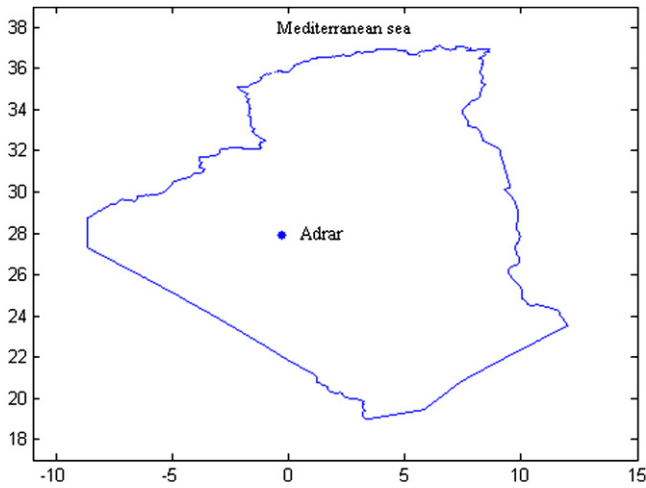


Fig. 1. Map of Algeria.

analysis may not be practical or efficient for these signals. Furthermore, The Fourier transform is limited because an analysis with single window cannot detect features in the signal that are either much longer or much shorter than the window size [12]. Therefore, a representation that can follow the signal spectrum as it varies with respect to time is required.

The short Fourier transform SFT consists of evaluating the Fourier transform of a time-sliding window. Then the examination of the obtained spectrum as the sliding window is moved will generate a time-frequency (TF) representation known as the spectrogram. But, the SFT suffers from the resolution limitation problem imposed by the sliding window. The use of short sliding window in order to improve the time resolution induces a diminution in the frequency resolution, and vice versa. However, the Wavelet Transform is capable of achieving a variable resolution in one domain (either time or frequency) and multi-resolution in the other domain [12].

Wavelet transform introduced by Morlet at the beginning of 1980 was originally used to analyses seismic signals. It is defined for given scale  $s$  as:

$$W(s) = \sqrt{\frac{\delta t}{s}} \sum_{n'=0}^N x_{n'} \psi_0 \left[ (n' - n) \frac{\delta t}{s} \right] \quad (1)$$

Where  $\sqrt{\delta t/s}$  is the normalisation factor,  $\psi_0(n)$  is the mother function that should satisfy the following wavelet admissibility condition:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi_0(\omega)|^2}{|\omega|^2} d\omega < \infty \quad (2)$$

Where  $\psi(w)$  is the Fourier transform of  $\psi_0(n)$ .

Many wavelet mother functions have been proposed. In the present study, we have used the Morlet function because of its ability to reflect the gradual changes in the climatic records. The Morlet function is a modulated Gaussian function and it is given by:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{j\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2} \quad (3)$$

Where  $\pi^{-1/4}$  is the standardisation term and  $\omega_0 = s\omega$  is a non-dimensional frequency and  $s$  is the wavelet scale. In the present work, in order to satisfy the admissibility condition, the  $\omega_0$  value is taken to be 6. More details are given elsewhere [2]. It should be noted that in wavelet analysis the wavelet scale is directly related to the oscillation period ( $P = 1.03$  s in case of Morlet wavelet) and hence to the frequency oscillation.

Computation of wavelet transform can be either carried out in the time domain by evaluating the convolution in eq. (1) for each scale or implemented in Fourier space which is considerably faster. More details can be found elsewhere [9]. To use the fast Fourier transform (FFT), time series of length  $N$  must be zero padded up to the next power of two then the padded values are removed afterwards. In all the following plots, areas under the thick lines are called the cone of influence (COI). Wavelet amplitudes in those areas may be attenuated due the edge effect induced by the zero padding.

The wavelet transform can be used to study the spectral behaviour of a given time series. However, to investigate the relationships of two time series, one can compare their corresponding WT or use the cross wavelet transform (XWT) defined as:

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) \cdot (W_n^Y(s))^* \quad (4)$$

Where  $(W_n^Y(s))^*$  denote the complex conjugate of  $W_n^Y(s)$ . The XWT is a useful tool to study relationships between two time series. However, its interpretation must be done carefully by paying attention to the original time series. High common power in the XWT may be due to a high power in both of the time series or from an extreme high power in one time series. Furthermore, if the wavelet transforms of two time series present low power at some specific time and scale, the XWT is enable to reveal their relationships even if those time series co-vary. To overcome such weakness in XWT, Grinsted et al. [3] have proposed the use of the wavelet coherence (WTC) rather than the XWT.

The wavelet coherence has been defined previously [9]. It is the square of the XWT over the individual power WT:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1} W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1} |W_n^X|^2) S(s^{-1} |W_n^Y|^2)} \quad (5)$$

Where  $S(\cdot)$  is the smoothing operator which is essential in coherence analysis. Otherwise the ratio  $R(s)$  would be equal to one [9]. Values derived using the WTC vary between 0 and 1. The closer the WTC is to 1 the more coherencies there is between the time series.

The smoothing operator is given by Grinsted et al. [3]:

$$S(W) = S_{scale}(S_{time}(W(s)))$$

Where  $S_{scale}$  denotes the smoothing operator along the wavelet scale and  $S_{time}$  the smoothing operator in time. The smoothing operators are designed so that they have the same footprint as the wavelet used; Morley wavelet in this case.  $S_{scale}$  and  $S_{time}$  are respectively given by:

$$S_{scale}(W)|_n = (W_n(s) * c_1 \Pi(0.6s))|_n \quad (6)$$

$$S_{time}(W)|_s = (W_n(s) * c_2 e^{-n^2/2s^2})|_s \quad (7)$$

Where  $c_1$  and  $c_2$  are normalisation constant and  $\Pi$  is the rectangular function. The factor 0.6 is the scale decorrelation length and it has been determined empirically [9].  $c_1$  and  $c_2$  are determined numerically after the computation of the two convolutions (the filters  $c_1 \Pi(0.6s)$  and  $c_2 e^{-n^2/2s^2}$  must have unit weight).

The delay between two time series at some specific time and scale can be obtained by evaluating the phase difference  $\phi_n^{XY}(s)$  defined as [9]:

$$\phi_n^{XY}(s) = \tan^{-1} \left( \frac{\Im(S(s^{-1} W_n^{XY}(s)))}{\Re(S(s^{-1} W_n^{XY}(s)))} \right) \quad (8)$$

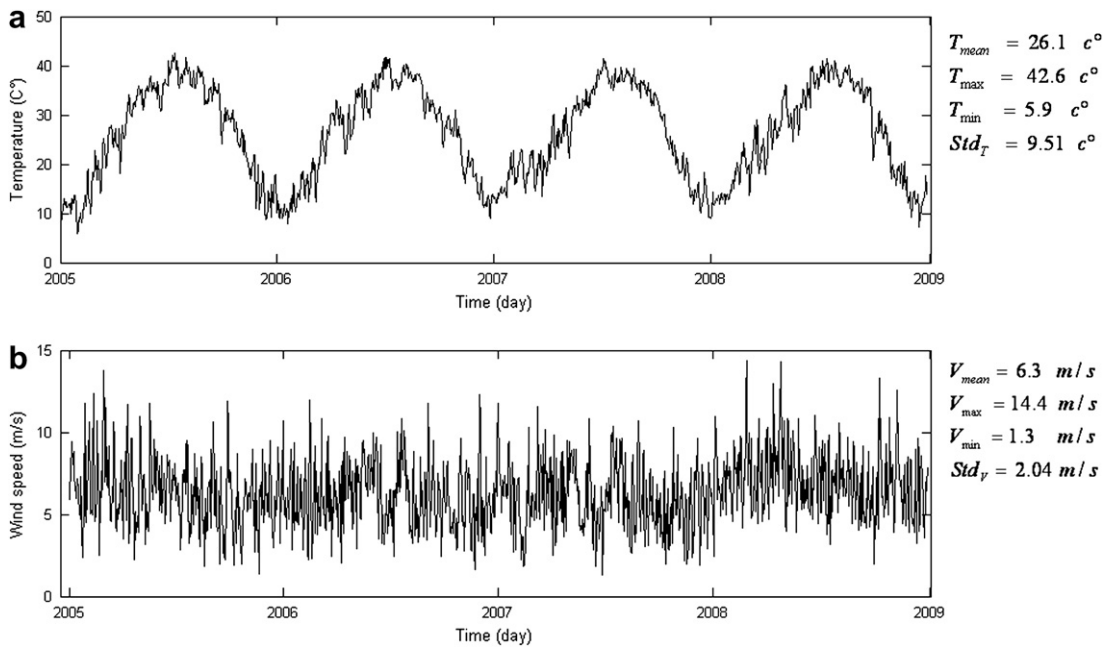


Fig. 2. time series of daily temperature and wind speed at Adrar station during the interval from 1 January 2005 – 31 December 2008.

Where  $\Re(S(s^-W_n^{XY}(s)))$  and  $\Im(S(s^-W_n^{XY}(s)))$  are the real and the imaginary parts of the smoothed XWT respectively. If  $\Im(S(s^-W_n^{XY}(s)))$  equal to zero then  $\phi_n^{XY}(s)$  is not defined.

### 3. Results and discussion

Fig. 2 shows data recorded at Adrar station and Fig. 3 shows their power spectra for the entire 4-year record. From Fig. 2, it is clear that for the temperature, the yearly periodicity is dominant, which is not the case for wind. This confirmed by the power spectra analysis (Fig. 3). For the power spectrum of the temperature, it is clear that it is dominated by the peak corresponding to the annual periodicities. Shorter periodicities cannot be visualized due to their lower amplitudes compared to the annual one. However, for the power spectrum of the wind speed, in addition to the dominant peak at the annual range, one can observe other peaks corresponding to lower periods such as those located at the 56 and 2–10 days period.

Fig. 4 shows the wind speed and the temperature wavelet power spectra The time is reported along the abscissa and the period (1/frequency) along the ordinates. All the WT power spectra in Fig. 4 are evaluated using one year data and over range of periods from 2 to 128 days (i.e. frequency from  $7.8 \times 10^{-3}$  to 0.5 cycles/day). The temperature power spectra for the year 2005, 2006 and 2007 reveal that the most significant oscillations occur in winter and spring in the period between December and May. In 2006, one can see that those oscillations have extended up to July. However in 2008; we note that the significant oscillations have moved to the periods from April to July and from October to December. Generally, the observed oscillations are characterized by relatively short durations, from one to a few weeks. The longest duration's oscillation has been observed in the period between January and April 2006. From the frequency point of view, one can see that dominant oscillations lay in the band between 2 and 16 days period (i.e. frequencies between  $6.25 \times 10^{-2}$  and 0.5 cycles/day).

From the wavelet power spectra of wind speed, one can distinguish two bands; the first band is between the 2–16 days period and the second band is between 30 and 60 days period.

Significant oscillations in the first band occur in winter, spring and fall. We note that in winter and spring those dominant oscillations are observed within 2–10 days period's band. However, in the fall, life cycles of those oscillations have increased up to 16 days. In the second band, we can distinguish two spans; one from June to October 2006 and the other from the mid-January to September 2007.

Fig. 5 shows the XWT and the WTC of wind speed and temperature. With the help of the scalograms of Fig. 4, we can distinguish two types of significant peaks in the power spectrum of the XWT. The first type of peaks corresponds to high common power in both of the time series. Those peaks are located inside the band of 2–16 days periods and they occur in the cold season for the years of 2005, 2006 and 2007. In 2008, common power is observed in spring and fall. The second type of peaks corresponds to an

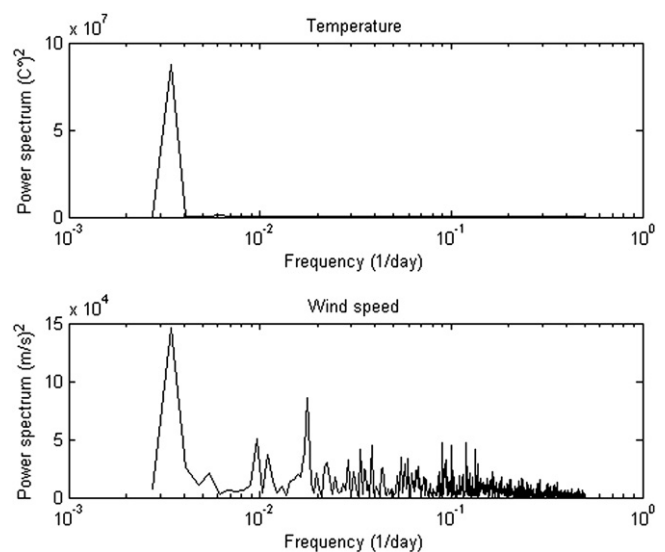
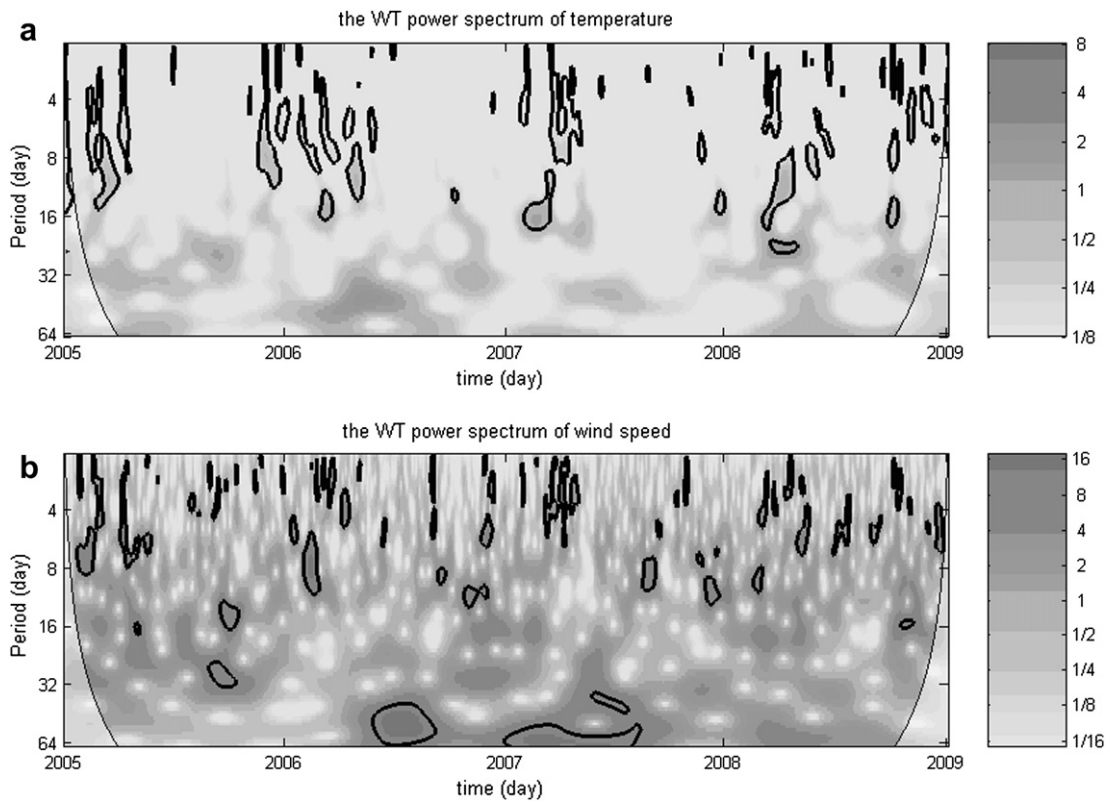
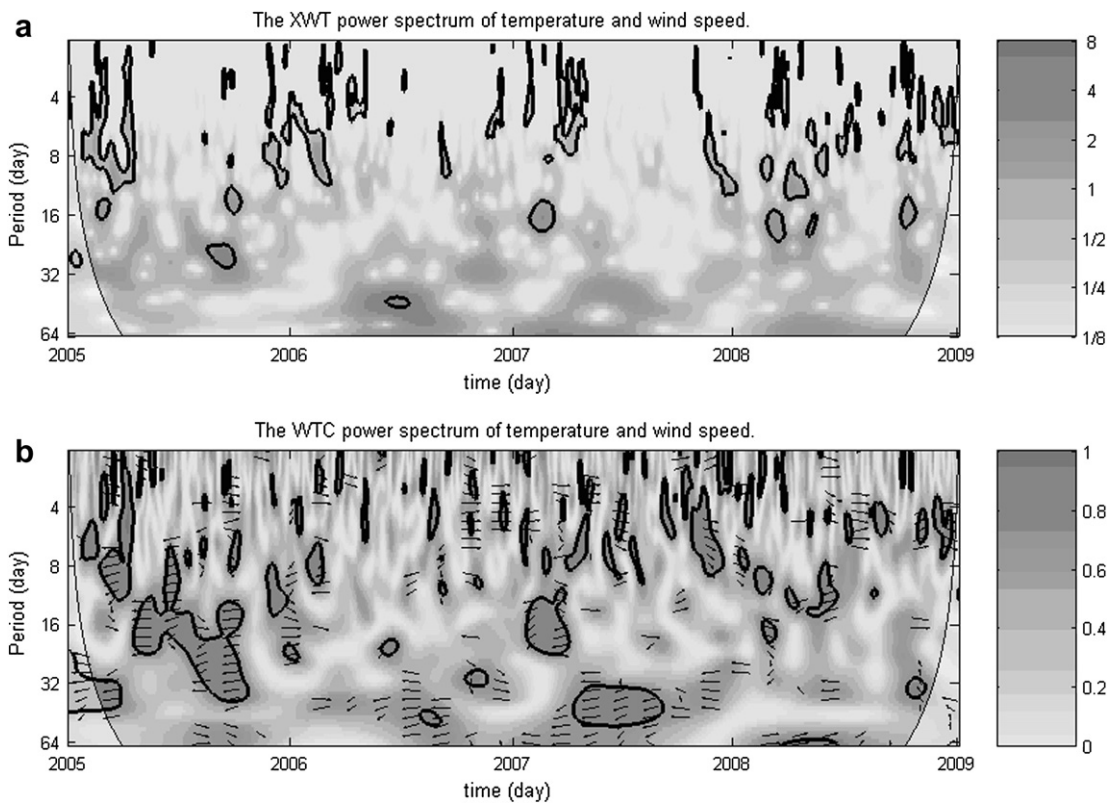


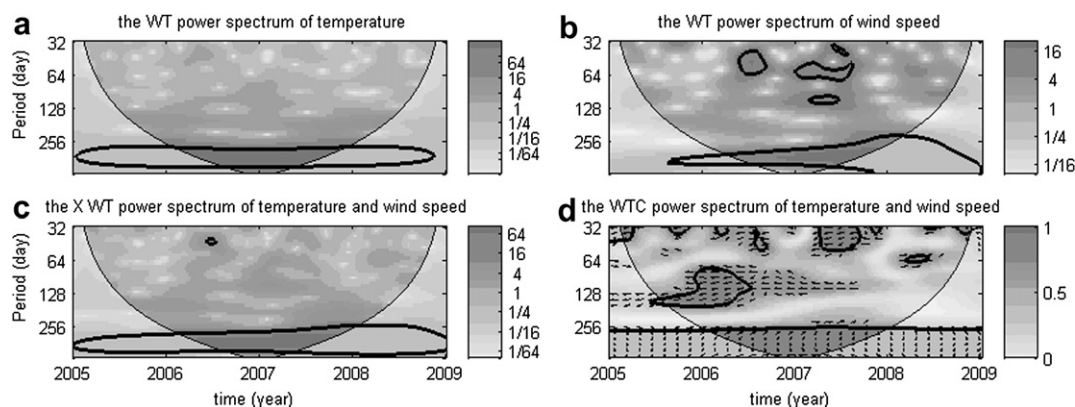
Fig. 3. Power spectra of temperature and wind speed time series at Adrar station.



**Fig. 4.** Wavelet power spectra of temperature and wind speed. The thick black contours indicates the 5% significance level against white noise and the thick black cones indicate the cone of influence where WT amplitudes may be attenuated due to the edge effect.



**Fig. 5.** The XWT and the WTC between temperature and wind speed. The thick black contours indicates the 5% significance level against white noise and the thick black cones indicate the cone of influence where WT amplitudes may be attenuated due to the edge effect. Arrows in the WTC indicated the phase difference between the two series and they are plotted only for coherency greater than 0.5.



**Fig. 6.** The WT power spectra of the temperature, wind speed and the XWT and the WTC between temperature and wind speed from January 2005 and December 2008. The thick black contours indicates the 5% significance level against white noise and the thick black cones indicate the cone of influence where WT amplitudes may be attenuated due to the edge effect. Arrows in the WTC indicated the phase difference between the two series and they are plotted only for coherency greater than 0.5.

extreme power in the wind speed wavelet spectrum such as in October 2005 and June–July 2006 or in the temperature power spectrum such as in the period from February to March 2007. The usefulness of the coherency analysis appears in the in periods where one or both of wavelet power spectra of wind and temperature show low amplitudes. Long duration's coherencies in winter as well as in summer of 2005 and 2007 have been observed in the band of 2–50 days (more than 0.8). However, in 2006 and 2008 it has been found that wind and temperature co-vary with more than 0.8 only in for short periods (from one to two weeks).

For the phase difference between wind speed and temperature, arrows are plotted every 12 days and only for coherency greater than 0.5. Directions of arrows vary from 0° to 90° for low periods. This means that temperature data are in phase or leads the wind speed data. For longer period's band (16–50 days), one can see that they are out of phase.

Figs. 4 and 5 show low periods (from 2 to 64 days) where the cone of influence preserve more than 90% of the original signal. However, for longer periods from 64 days up to one year (Fig. 6) the edge effect is significant. Thus, one should be careful when interpreting results especially at the beginning and the end of the interval where the WT amplitudes may be attenuated due to the edge effect.

Fig. 6 shows scalograms of wind speed and temperature and their corresponding XWT and WTC evaluated for 4 years from January 2005 to December 2008 and over period range from 32 to 512 days i.e. frequencies between  $2 \times 10^{-4}$  and 0.03 cycles/day. While WT temperature power spectrum shows no significant oscillations except at the annual band, one can see that in summers of 2006 and 2007 the wind speed power spectrum contains a significant power at the 32–60 days and 90–100 days bands. A significant coherency has been observed at the 70–150 days bands (greater than 0.5). As mentioned before one can remark the attenuation of the WTC amplitude exhibited by the edge effect at the beginning of interval near the 64 and 128 days periods. From arrows in Fig. 6d, we can see that annually, wind is lagging temperature.

Finally it is of interest to compare the present results with those obtained at other sites in previous studies. Oscillations of 4–6 and 10–15 days period's have been observed in lot of equatorial and sub-tropical regions [4,7,11]. In the literature, such oscillations are known as the synoptic oscillations [11] and they are attributed to the passage of cold weather system. For the site of Adrar, those cold weather systems come generally from the west side of the continent (Atlantic Ocean). Once or twice per year especially in winter,

very cold and rainy weather systems coming from Europe reach the region. For longer period's oscillations, similar intra-seasonal atmospheric oscillations of periods between 30–60 days have been observed in West Africa [8]. These long duration's oscillations have been observed in several other sites over the world; such as those mentioned by Madden–Julian in 1994 [6] and those observed in the western pacific where the existence of 30 – 50 days convective activities in the western pacific are reported [1].

#### 4. Conclusion

In this paper, we have applied the wavelet and the cross wavelet transforms to the wind speed and temperature times series data recorded at Adrar (27.9°N, 0.3°W, 263 m), Algeria over the period 2005–2008. The wavelet time-frequency power spectra of temperature have revealed the existence of significant synoptic oscillations with periods between 2–16 days. Those oscillations that occur in the cold seasons are attributed to the passage of weather systems. Wavelet power spectra of wind speed show significant oscillations in two period's bands. The first bands are between 2–16 days while the second band is between 30–60 days. Oscillations in the first band are mostly observed in the cold season. However, significant oscillations in the second band occur in the warm season. A great coherency between temperature and wind speed has been observed in synoptic and intra-seasonal band. For the phase difference between the two time series, it has been found that temperature data are in phase or leading the wind speed data at low frequencies, whereas for higher frequencies of seasonal scales, it has been found that the two time series are out of phase.

#### References

- [1] Chen TC, Murakami M. The 30–50 day variation of convection activity over western pacific ocean with emphasis of northwestern region. *Monthly Weather Review* 1987;116:892–906.
- [2] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics* 1992;24:395–457.
- [3] Grinsted A, Moore JC, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and the wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics* 2004;11:561–6.
- [4] Hwang HK. Power density of surface wind speed on palmyra island. *Monthly Weather Review* 1970;98(1):70–4.
- [5] Lee BB, Wu LC, Kao CC. Seasonal variations of wind and wave over Taiwan waters. *Marine Geophysical Researches* 2007;28:183–90.
- [6] Madden AR, Julian PR. Observations of the 40–50-day tropical oscillation—A review. *Monthly Weather Review* 1994;122(5):814–37.
- [7] Ronald RC. Meteor wind measurement at Durham, New Hampshire (43°N, 71°W). *Journal of the Atmospheric Sciences* 1975;32:1689–93.

- [8] Sultan B, Janicot S. The West African monsoon dynamics. Part I: documentation of intraseasonal variability. *Journal of Climate* 2003;1: 3389–406.
- [9] Torrence C, Compo GP. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 1998;79(1):61–78.
- [10] Velasco VM, Mendoza B. Assessing the relationship between solar activity and some large scale climatic phenomena. *Advances in Space Research* 2008;42: 866–78.
- [11] Ven der Hoven I. Power spectrum of horizontal wind in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *Journal of the Atmospheric Sciences* 1956;14(2):160–4.
- [12] Victor CC, Ling H. *Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis*. Artech House; 2002.
- [13] Weng H, Lau KM. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences* 1994;51:2523–41.

# Application of time–frequency representation in the study of the cyclical behavior of wind speed in Algeria: wavelet transform

Farouk Chellali · Abdallah Khellaf ·  
Adel Belouchrani

Published online: 10 April 2010  
© Springer-Verlag 2010

**Abstract** This study proposes a process of assessment of wind potential using descriptive statistics and time–frequency analysis. Via the time–frequency analysis, the variation of the spectral content of wind speed with respect to time is analyzed by the determination of the frequencies, the durations and the occurrence-time of significant fluctuations. The study is carried out for six sites in Algeria during a time interval of 1 year and over a frequency range from  $1.1 \times 10^{-2}$  to 2.4 cycles/day (i.e., periods from 10 h to about 90 days). The study has allowed to deduce that the windiest regions are located in the southern part of the country with annual mean from 5 to 6 m/s. The time–frequency analysis reveals the presence of three types of oscillations. In the warm season, diurnal oscillations have been distinguished especially in the coastal and mountainous regions. However, in the cold season, synoptic oscillations of periods around 9–13 days have been observed. The Southern regions are characterized by long oscillations of periods around 33–50 days.

**Keywords** Wind speed · Wind potential · Time–frequency analysis · Wavelet transform · Descriptive statistics · Diurnal oscillations and synoptic oscillations

## 1 Introduction

The knowledge of the characteristics of wind speed is of great importance before the implementation of any exploitation system of wind energy. Although wind is considered to be highly variable, the spectral analysis of worldwide wind speed reveals the presence of regularities such as diurnal and synoptic oscillations. The diurnal oscillations are widely observed in coastal and mountainous regions. Burton et al. (2001) mentioned that those oscillations are due to the convective motions of warm air between the day and the night. However, synoptic oscillations of periods between 4 and 6 days have been observed and are mentioned in several studies such as those of Yukihiro (1980) and Harris (1990). Those oscillations are associated to the passage of large-scale weather systems.

Earlier studies of wind speed spectrum date back to 1956, when Vender Hoven (1956) has evaluated the power spectrum of wind speed. He has then reported that the wind spectrum is constituted from two eddy-energy peaks; the first occurs at period of about 4 days while the second occurs at period of about 1 min. After that several studies have been undertaken in order to describe the cyclical behavior of the wind speed in many sites over the world. A spectral study of the power density of wind speed on Palmyra Island has been considered by Hwang (1970). It has been found that the distribution of eddy kinetic energy in the medium and high frequency range in the tropics was

---

F. Chellali (✉)  
Unit of Applied Research in Renewable Energy, B.P. 88 Gaarat  
Taam, Z I, 47000 Ghardaia, Algeria  
e-mail: farouk.chellali@enp.edu.dz

F. Chellali · A. Belouchrani  
Electrical Engineering Department, Ecole Nationale  
Polytechnique, EL Harrach, Algiers, Algeria  
e-mail: adel.belouchrani@enp.edu.dz

A. Khellaf  
Center of Development of Renewable Energies, Algiers, Algeria

quite similar to that at the middle latitudes. Militello et al. (2001) have proposed to formulate the wind speed power spectrum in Taiwan using random vibration theory and statistical regression analysis. In addition to the study of the spectral behavior of the wind speed for six stations in Taiwan, Shih (2008) have evaluated the cross-spectral density function.

All the above mentioned studies have been carried out under the assumption that wind signal is stationary; which is not in practical case. According to Victor and Ling (2002), when wind has salient periodic features only over limited interval, a global Fourier analysis is theoretically possible; but it may not be practical or efficient. The Fourier transform is limited because an analysis with single window can not detect features in the signal that are either much longer or much shorter than the window size. Therefore, to have better representation of the wind spectrum for such case, we should seek a representation that is capable of following the wind spectrum as it varies with time. Such representation is known by Time–Frequency Representation (TFR). The short Fourier transform (SFT) is the best-known TFR and it consists of evaluating the Fourier transform of a time-sliding window. Then the examination of the obtained spectrum as the sliding window is moved will generate a TFR known as the spectrogram. But, the SFT suffers from the resolution limitation problem imposed by the sliding window. The use of short sliding window in order to improve the time resolution induces a diminution in the frequency resolution, and vice versa. However, the Wavelet Transform which is also a time–frequency approach capable of achieving a variable resolution in one domain (either time or frequency) and multi-resolution in the other domain.

For different time scales and frequency ranges, several studies using WT has been carried out. We can mention the studies of Farge (1992) on turbulence, Weng and Lau (1994) on tropical convection, Torrence and Compo (1998) on intra-decadal changes in ENSO Monsoon system and Lee et al. (2007) on intra-seasonal oscillations in wind speed and oceanic wave.

In this work, we propose to carry out a time–frequency analysis of the wind in Algeria using the wavelet transform in order to study the cyclic behavior of the wind speed. The idea behind the use of wavelet analysis is to investigate spectral characteristics of wind by the determination of the periods, the intensities, the durations and the occurrence moments of potential oscillations in wind speed. The study is carried out over 1 year considering six sites with different topographic and climatic characteristics. The sites of Annaba, Oran and Batna represent the coastal and mountainous sites; while the sites of Ghardaïa, Inamenass and Adrar represent the interior or the southern sites. As results, it has been found that the wind spectrum is seriously

affected by seasonal weather variations and by the topography of the concerned region.

The present work constitutes a continuation of the study carried by Chellali et al. (2010) where a time–frequency analysis has been carried out for the site of Adrar. In the last study, the authors have examined the relationship between the spectra of wind speed and temperature.

## 2 Wavelet transform

Wavelet transform introduced by Morlet at the beginning of the 1980s has originally been used to analyze seismic signals. It is defined as:

$$WT(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad a > 0 \quad (1)$$

where  $a$  and  $b$  are the scale and the translation parameters, respectively.  $b$  can vary from 0 to  $N$ , where  $N$  is the length of the signal. The parameter  $a$  should be different from zero. Practically, the ranger of  $a$  is estimated via Fourier transform which is used to detect the lower and the higher frequencies (in order to avoid waste of computation time and memory space).

The function  $\psi(t)$  is called the mother function and it can take several forms such as Morlet, Mayer and HAAR functions. The most frequently used function is Morlet mother function and it is defined as:

$$\psi(t) = e^{j\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (2)$$

$$\hat{\psi}(\omega) = \sqrt{2\pi} e^{-2\pi^2(\omega-\omega_0)^2} \quad (3)$$

where  $j$  is the complex number,  $\omega_0$  is the wave number of the Morlet mother function and  $\hat{\psi}(\omega)$  is the Fourier transform of  $\psi(t)$ .  $\hat{\psi}(\omega)$  should satisfy the wavelet admissibility condition:

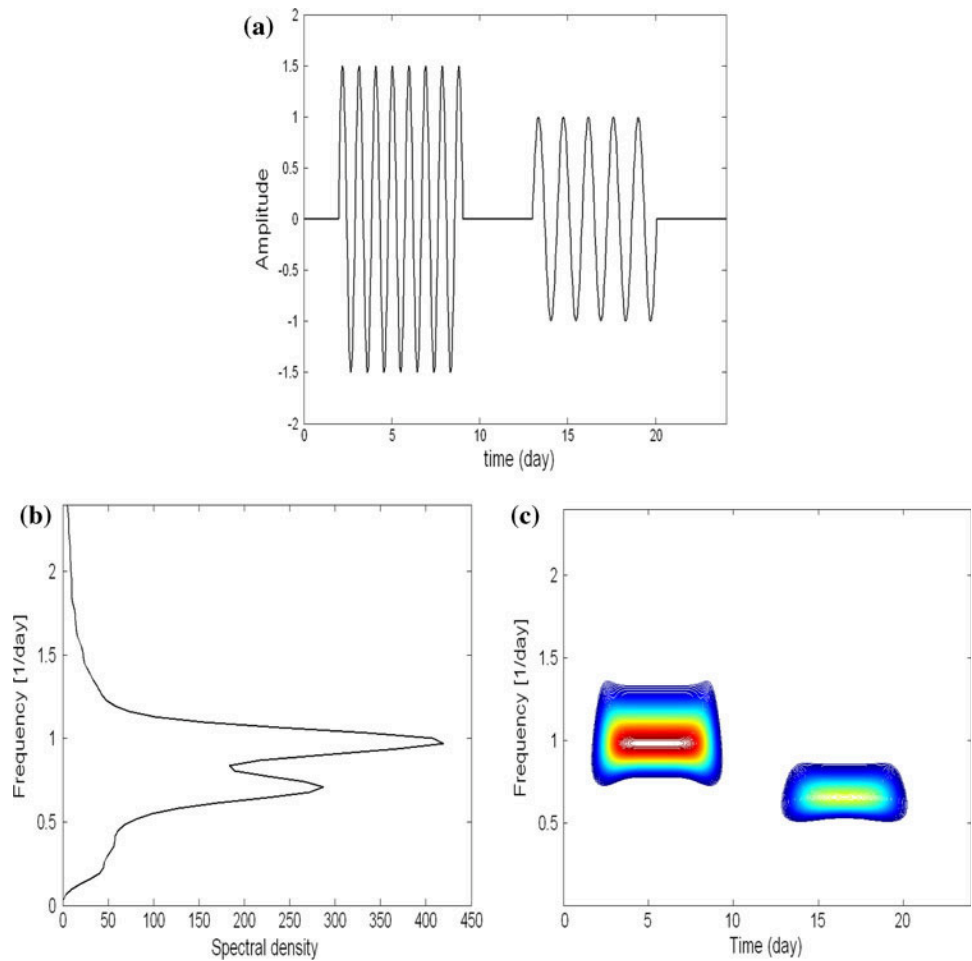
$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|^2} d\omega < \infty \quad (4)$$

The Morlet function is simply a sinusoidal function modulated by a Gaussian function. It has given good results in the analysis of wind speed.

According to Torrence and Compo (1998), the scale parameter of Morlet function is inversely proportional to the frequency  $\omega = \frac{1}{1.03a}$ . However, the translation parameter  $b$  is directly related to  $t$ . Therefore, the wavelet transform  $WT(a, b)$  can be expressed as TFR  $WT(\omega, t)$  known as the scalogram.

Figure 1 illustrates clearly that the Fourier transform is only able to detect amplitudes and frequencies of the present oscillations. However, it is completely blind of the

**Fig. 1** Illustrative figure on how the Morlet wavelet transform operates over non-stationary signal; time-variable frequency signal. **a** Amplitude versus time, **b** amplitude versus frequency, **c** scalogram

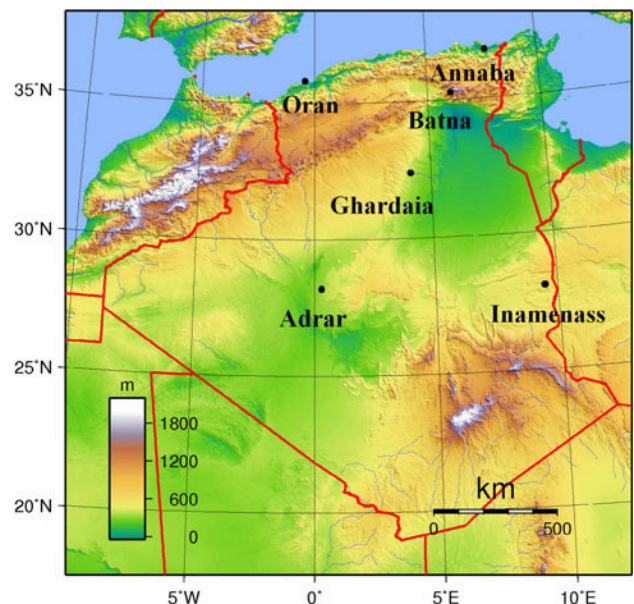


temporal variations of those oscillations; the beginning, the duration and the end of those oscillations. On the other hand, the scalogram adds time dimension to the spectral variations, thus enabling the following of the spectral variations with respect to time.

### 3 Data

Data used in this study are the hourly averaged wind speed measured during the time period of 1 year (year 2007) at six airport meteorological stations located at different sites in Algeria (Fig. 2). Algeria is located between the subtropical arid zone and the south Mediterranean coastal line. It is influenced by three main ascendant climates. In addition to the geographical coordinates and the elevations above the sea level for each site under consideration, Table 1 also presents a brief description of the ascendant climate in each region. Such climate description is helpful in understanding the influence of the effect of the topographical factor on the wind behavior for each site.

Figure 3 indicates that the used data satisfy the stochastic properties of the wind speed; the histograms at all



**Fig. 2** Topographical map of Algeria

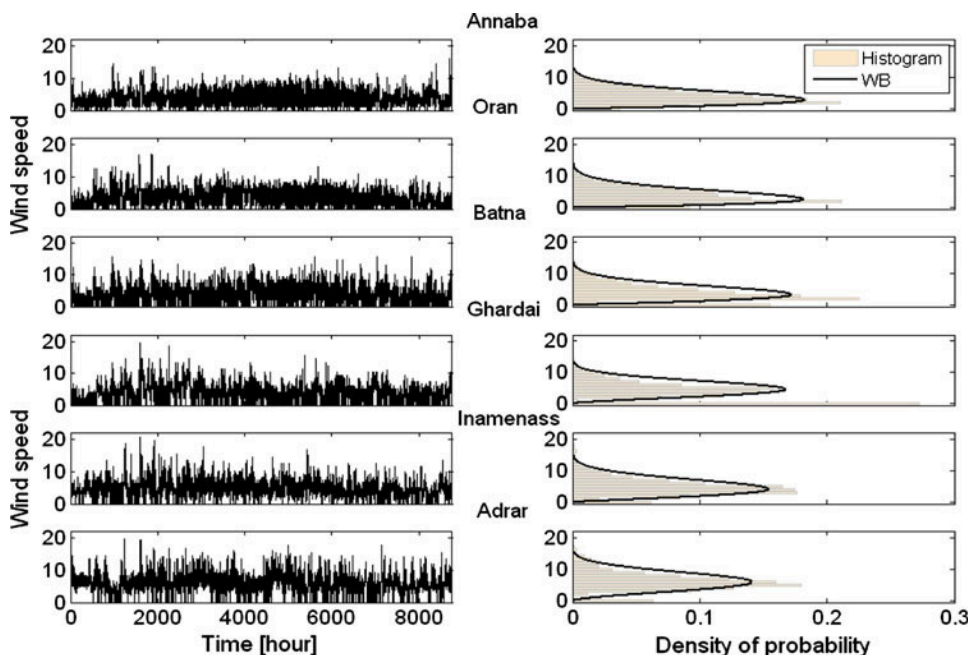
the stations fit the Weibull distribution that is widely used to describe the probability density of the wind. According to Carta et al. (2009), this density is the most used in the



**Table 1** Geographical coordinates altitude and climatic characteristics of the regions under consideration

	Coordinates and altitude	Climate characteristics
Annaba (costal)	(36.8°N, 7.8°E), 04 m	South mediterranean climate
Oran (costal)	(35.6°N, 0.6°W), 90 m	Wet-winter, dry-summer. Land/water differences play a large part on air flow
Batna (mountainous)	(35.5°N, 6.2°E), 914 m	Mountainous region: dry mid-latitude climate: semiarid climate. Mountains ranges trap cold air in winter, making winters very cold. Summers are warm to hot
Ghardaïa (semi-arid)	(32.4°N, 3.8°E), 450 m	Dry climate with very low precipitations, heavy sandy winds in spring (March, April and May)
Inamenass (desert)	(28.0°N, 9.6°E), 562 m	Dry sub-tropical climate: desert found in low latitude between 18 and 28°. They coincide with the edge of the equatorial subtropical high pressure belt and trade winds
Adrar (desert)	(27.9°N, 0.3°W), 263 m	

**Fig. 3** Hourly time series of wind speed and their corresponding histograms (Weibull distributions fit the histograms)



literature related to wind speed fitting and it is practically the only recommended distribution in books on wind energy.

The Weibull distribution with two parameters is given by the following equation:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \tag{5}$$

where  $v$  is the wind speed (m/s),  $c$  is the scale factor (of Weibull distribution) and  $k$  is the shape factor.

The scale factor  $c$  has the same dimension as the wind speed (m/s) and it must be greater than zero. On the other hand,  $k$  is dimensionless. If  $k = 2$ , the resulting function is often known by the Rayleigh distribution. For most wind conditions,  $k$  varies generally between 1.5 and 3.

The obtained values of  $c$  and  $k$  are given in Table 2. We note that for the site of Ghardaia, a hybrid distribution is used due to the fact that the frequency of calms is relatively high. The hybrid distribution is given by:

$$f_H(v) = \begin{cases} ff_0 & v = 0 \\ (1 - ff_0)f(v) & v \neq 0 \end{cases} \tag{6}$$

where  $ff_0$  is the frequency of calms.

#### 4 Results and discussion

Using the measured values, the monthly wind speed averages at the six considered sites are calculated and listed in Table 3. From this Table, we can deduce that the southern part of the country is characterized by an important wind potential especially the western part (Adrar with an average wind speed  $\bar{v}_{\text{annual}} \approx 6$  m/s at 10 m above ground level). However, the northern wind potential is relatively low. It should be noted that in the period between March and May, the southern part of the country is characterized by strong dusty wind storms.

In Fig. 4, and for the six considered sites, we represent the smoothed periodograms of January and July. In all the

presented graphs, the frequency is depicted along the abscissa in cycles per day and the power density is depicted along the ordinates. From Fig. 4, it can be seen that the

**Table 2** Obtained values of *c* and *k* for the studied sites

	<i>c</i>	<i>k</i>
Annaba	4.40	1.79
Oran	4.29	1.69
Batna	4.83	1.90
Ghardaïa	5.71	2.33
Inamenass	5.64	2.04
Adrar	7.15	2.45

**Table 3** Monthly and annually averaged wind speed of the six studied sites at 10 m above ground level (in m/s)

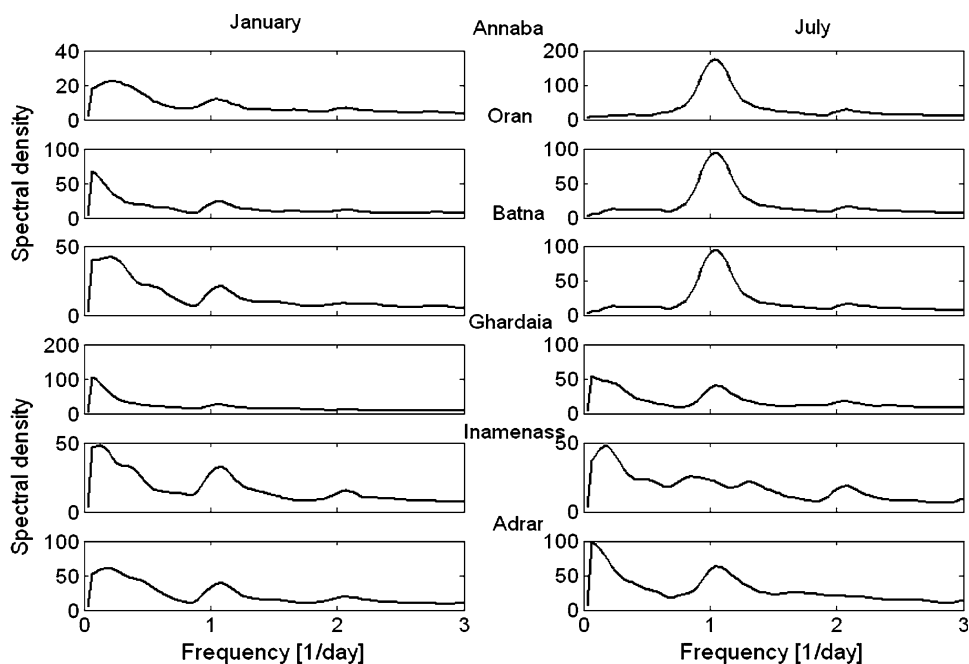
Month	Annaba	Oran	Batna	Ghardaïa	Inamenass	Adrar
01	2.7	2.3	2.8	2.1	4.1	6.6
02	4.1	4.2	3.5	4.2	4.7	5
03	4.5	4.2	4	4.9	5.4	7
04	3.4	3.6	3.4	5.5	5	6
05	3.7	4.4	3.5	3.9	5.5	6.6
06	3.9	4.4	4.2	4.1	5.2	5.2
07	4.1	3.7	3.9	3.0	5.2	7.4
08	4	3.8	4.8	3.4	4.9	5.6
09	3.8	3.4	3.7	3.7	4.4	5.5
10	3.4	3.1	3.7	3.9	3.8	5
11	3.5	2.3	2.8	2.3	3.8	5.1
12	3.8	2.3	2.8	3.2	4.1	6.1
Annual	3.7	3.5	3.6	3.7	4.7	6.0

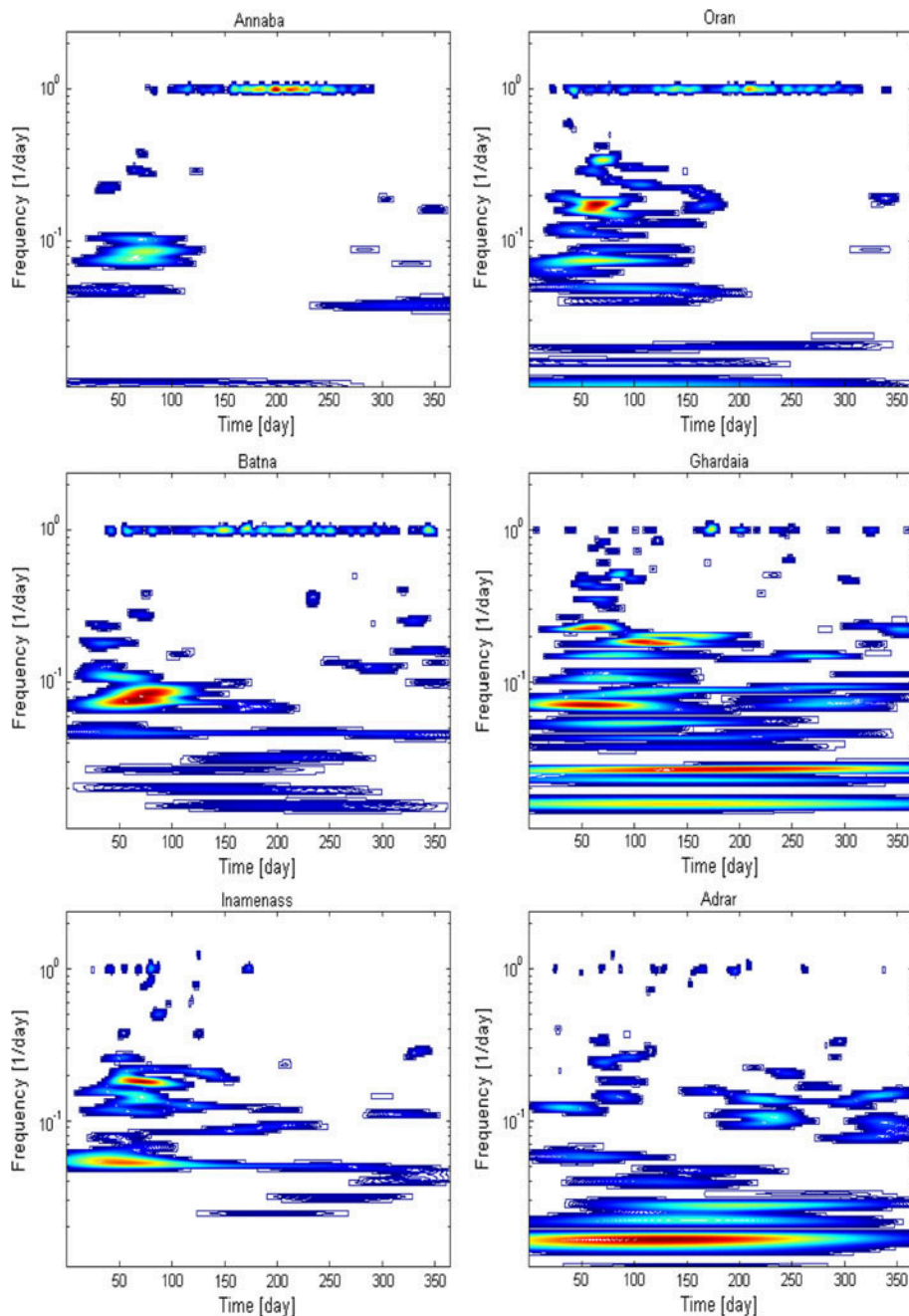
monthly wind spectra of January and July differ in shape as well as in magnitude. In January, a significant peak occurs at low frequencies for all the stations. However, in July, one can see that for Annaba, Oran and Batna, the most significant peaks have been observed at the diurnal frequency  $f \approx 1$  cycle/day. Compared to the periodogram of January, Ghardaïa periodogram of July shows an increase in the diurnal amplitude. However, wind spectra of Adrar and Inamenass sites have presented slight variations in July. But their overall shapes are the same as in January (the synoptic harmonics are dominating with the presence of relatively lower diurnal harmonics).

It is interesting to note that all periodograms cut-off at frequency  $f = 6.67 \times 10^{-2}$  cycles/day which correspond to period of 15 day. As mentioned before such feature is due to the fact that Fourier transform is unable to detect frequencies that are greater or equal to the main window (31 days in this case).

In Fig. 5, the wavelet scalograms are constructed using 1 year data and over frequency range from  $1.1 \times 10^{-2}$  to 2.4 cycles per day, i.e., periods from 10 h to about 90 days. The time is reported along the abscissa in days and the frequency is reported along the ordinates in logarithmic scale. The obtained results indicate that the spectrum of wind behaves differently from the cold season to the warm season for all the sites under study. Although those variations differ from one site to another depending on the topography of each region, three main features can be distinguished in the obtained scalograms. First, in all the stations, synoptic oscillations with frequencies around  $f \approx 0.08\text{--}0.11$  cycles/day (i.e., periods of 9–13 days) have been observed in the time interval between the mid-February and the mid-April.

**Fig. 4** Monthly periodograms evaluated using hourly wind speed measured in January and July for the studied sites





**Fig. 5** Annual wavelet scalograms using the hourly averaged wind speed of the year 2007 for the studied sites

Such oscillations are attributed to the passage of cold front systems during the winter. Second, in the coastal and the mountainous sites (Annaba, Oran and Batna), the scalograms indicate that the major kinetic energy in summer occurs at the diurnal frequencies. This agrees with the thermal effect theory. Third, in the interior regions (Adrar and Ghardaïa), long durations oscillations with low frequencies  $f \approx 0.02\text{--}0.03$  cycles/day (i.e., periods around 30–50 days) have been observed. Such type of long period's oscillations has been observed in many studies such as

that of Krishnamuri and Mehta (1998) and that of Madden and Julian (1994). Sultan and Janicot (2003) have mentioned the presence of long duration activities (monsoon from the Atlantic Ocean) in the west of Africa. These oscillations are not observed in the site of Inamenass due to the fact that it is located behind the mountain series of Tassili; some atmospheric perturbations can not reach the region (Fig. 2). Finally, it is interesting to note that diurnal oscillations are not very significant in the interior sites (Adrar, Ghardaia and Inamenass).

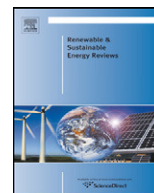
## 5 Conclusion

Wavelet transform has been employed in order to perform a time–frequency analysis of the wind speed in Algeria. It has been found that the wind spectrum is seriously affected by seasonal variations of the weather system as well as by the topography of a given site. The obtained scalograms show that in the coastal as well as the mountainous sites, the major kinetic energy occurs in summer at the diurnal frequency. However, in the interior sites of Adar and Ghardaïa, the wavelet scalograms showed a dominant energy at long period oscillations of around 33–50 days. Synoptic oscillations due to the passage of cold front weather systems have been observed at frequencies around  $f \approx 0.08\text{--}0.11$  cycles/day (9–13 days) between mid-February and mid-April in all the stations.

Spectral characteristics of wind speed clearly show trends depending on spatial location (north–south) and topographic factors. By using a denser network of measurements, it may be interesting to make those conclusions stronger. We propose as perspective to study the wind spectrum with respect to latitude and elevation.

## References

- Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Boussanyi E (2001) Wind energy handbook. Wiley, New York
- Carta JA, Ramirez P, Velazquez S (2009) A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. Cases studies in the Canary Islands. *Renew Sustain Energy Rev* 13:933–955
- Chellali F, Khellaf A, Belouchrani A (2010) Wavelet spectral analysis of the temperature and wind speed data at Adrar. *Algeria Renew Energy* 35:1214–1219
- Farge M (1992) Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annu Rev Fluid Mech* 24:395–457
- Harris RI (1990) Some further thoughts on the spectrum of gustiness in strong winds. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 33:461–477
- Hwang HJ (1970) Power density spectrum of surface wind speed on Palmyra Island. *Mon Weather Rev* 98:70–74
- Krishnamuri TN, Mehta AV (1998) Air–sea interaction on the time scale of 30 to 50 days. *J Atmos Sci* 45:1304–1322
- Lee BB, Wu LC, Kao CC (2007) Seasonal variations of wind and wave over Taiwan waters. *Mar Geophys Res* 28:183–190
- Madden AR, Julian PR (1994) Observations of the 40–50-day tropical oscillation—a review. *Mon Weather Rev* 122:814–837
- Militello A, Kraus NC (2001) Generation of harmonics by sea breeze in nontidal water bodies. *J Phys Oceanogr* 31:1639–1647
- Shih DCF (2008) Wind characterization and potential assessment using spectral analysis. *Stoch Environ Res Risk Assess* 22:247–256
- Sultan B, Janicot S (2003) The west African monsoon dynamics. Part I: Documentation of intrapersonal variability. *J Clim* 16:3389–3400
- Torrence C, Compo GP (1998) A practical guide to wavelet analysis. *Bull Am Meteorol Soc* 79:61–78
- Vender Hoven I (1956) Power spectrum of horizontal wind in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *J Atmos Sci* 14:160–164
- Victor CC, Ling H (2002) Time–frequency transforms for radar imaging and signal analysis. Artech House, Boston
- Weng H, Lau KM (1994) Wavelets, period doubling, and time–frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific. *J Atmos Sci* 51:2523–2541
- Yukihiko M (1980) Spectrum of long-period fluctuations of surface wind at Marcus Island. *J Atmos Sci* 108:1456–1461



## A contribution in the actualization of wind map of Algeria

Farouk Chellali<sup>a,c,\*</sup>, Abdullah Khellaf<sup>b</sup>, Adel Belouchrani<sup>c</sup>, Abdeladji Reciouid<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Unit of Applied Research in Renewable Energy, B.P. 88 Gaarat Taam, Z1, 47000 Ghardaia, Algeria

<sup>b</sup> Center of Development of Renewable Energies, Algiers, Algeria

<sup>c</sup> Electrical Engineering Departments, Ecole Nationale Polytechnique, EL Harrach, Algiers, Algeria

<sup>d</sup> Electrical Engineering Department, University of Boumerdes, Algeria

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 7 July 2010

Accepted 10 November 2010

#### Keywords:

Wind map

Time–frequency analysis

Weibull distribution

Wind speed

Techno-economical study

Hassi-R'mel

Algeria

### ABSTRACT

In the following work, we propose an assessment of wind potential in Algeria. The purpose of this study is twofold. First, to draw the attention to the important wind potential in the region of Hassi-R'mel  $\bar{v} \approx 6$  m/s. In the previous maps, the wind potential in this region has been underestimated due the fact that it is located between two less windy regions. Second, the actualization of the wind map of Algeria using very recent data stretching from February 2004 to December 2009. This paper is structured in three main parts. First, a stochastic and the cyclic study of the wind behaviors in the site of Hassi-R'mel are proposed. The stochastic study is carried out by fitting the wind speed data to Weibull distribution while the cyclic study is carried out via the use of time–frequency analysis. We have used the time–frequency analyses instead of the traditional Fourier analysis due its ability to follow the spectrum variation with respect to time. As results, it has been found that spectrum wind process enfold many limited interval oscillations. In the second part, we propose to contribute to the actualisation of the wind map in Algeria. In this part, we have considered also the topographical aspect of Algeria. Such consideration is very helpful for understanding the wind potential repartition over the country. Finally, a techno-economical study of a stand along hybrid system (wind/diesel) in the site of Hassi-R'mel is considered. Via this study, it has been found that the site of Hassi-R'mel is very adequate for wind energy conversion systems.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### Contents

1. Stochastic and cyclic behavior of wind speed in Hassi R'mel .....	994
1.1. Weibull distribution .....	994
1.2. Time–frequency analysis .....	994
1.2.1. Wavelet transform .....	995
1.2.2. Wavelet coherency .....	995
2. Contribution to the actualization of wind map of Algeria .....	996
2.1. Used data .....	996
2.2. Wind map of Algeria .....	997
3. Application: stand along hybrid system .....	999
3.1. The considered system .....	1000
3.1.1. The load profile .....	1000
3.1.2. Other input data .....	1000
3.2. Optimization results .....	1000
4. Conclusion .....	1001

\* Corresponding author at: Unit of Applied Research in Renewable Energy, B.P. 88 Gaarat Taam, Z1, 47000 Ghardaia, Algeria.

E-mail address: [farouk.chellali@enp.edu.dz](mailto:farouk.chellali@enp.edu.dz) (F. Chellali).

Wind plays a primordial role in several domains such as wind energy conversion, transport, agriculture and fight against desertification. Hence, the knowledge of wind speed characteristics is of a great importance. Wind can be studied from the stochastic as well as the cyclic point of view. However, for better understanding

of such phenomena, it is essential to incorporate other factors and sources that interact with it such as the topography and the urban environment.

In this work, we propose to carry out a stochastic as well as cyclic study of wind behaviors for the site of Hassi R'mel (32.9N°, 3.3E°), Algeria. The reason for choosing the site of Hassi-R'mel for study is that the recent measurements (From February 2004 to December 2009) have indicated that the region is characterized by an important wind potential with an annual wind average  $\bar{v} \approx 6$  m/s. In the previous studies, the potential in this region has been underestimated due to the fact that it is located between two regions less windy. As a second objective of this paper, we propose to contribute to the actualization of the wind map of Algeria by inserting data of Hassi-R'mel. A comparison between the obtained wind map and the previous maps will be done to examine the influence of considering data of Hassi-R'mel on the overall wind map of Algeria. Finally, and to draw the attention to the important wind potential in the site of Hassi R'mel, a techno-economical study of hybrid stand alone system is considered.

In the field of wind potential in Algeria, earlier works dates back to 1984 among we can distinguish three approaches. The first is the establishment of atlases and maps of wind Algeria. In this framework, we can cite the work of Said and Ibrahim [1], followed by the works of Bensaïd in 1985 [2] then comes Hammouche, in 1990 [3] and finally Kasbadji Merzouk in 2000 [4]. The second approach is the wind potential assessment and design of systems for converting wind energy. In this regard, one may cite studies of Himri et al. in the assessment of wind potential in the South and South-West of Algeria [5–7]. The work of Koussa et al. for Adrar region [8] and the work of Helal et al. for the region of Beni-Saf [9]. The third approach is the study of wind behavior. In this context, we can cite the work of Youcef Ettoumi et al. [10] who have proposed to model of wind speed by Markov process. Kasbadji has defended her doctoral thesis that has as subject the vertical modeling wind profile in Algeria [11]. Chellali et al. have carried out a spectral study of the wind speed using time–frequency analysis [12,13].

## 1. Stochastic and cyclic behavior of wind speed in Hassi R'mel

In this section, we propose to carry out a stochastic as well as a cyclic study of the wind speed behavior in the site of Hassi-R'mel. The stochastic study is done by fitting the density probability of wind speed to the Weibull distribution. However, the cyclic study is realized out by applying time–frequency analysis. The idea behind the use of time–frequency analysis is to study the variation of the spectral content of wind with respect to time. In fact, it has been shown in [12,13] that the use of such technique is helpful in understanding the cyclic behavior of wind speed in given region. In [12], it has been shown that the spectral content is seriously influenced by the topological factor. In addition to the cyclic study of wind, we propose also in this section to investigate the relationship between the cyclical behavior of wind and that of the atmospheric pressure. A similar analysis has been carried out for the site of Adrar in Algeria by Chellali et al. [13]. The authors in [13] have applied the wavelet coherence to study the correlation between wind speed and temperature. It has been found in that those two meteorological phenomena show a significant coherence for certain time intervals and frequency bounds.

### 1.1. Weibull distribution

According to Carta et al. [14], the Weibull distribution is the most used in the literature related to wind speed fitting and it is practically the only recommended distribution in books on wind energy such as [15–18].

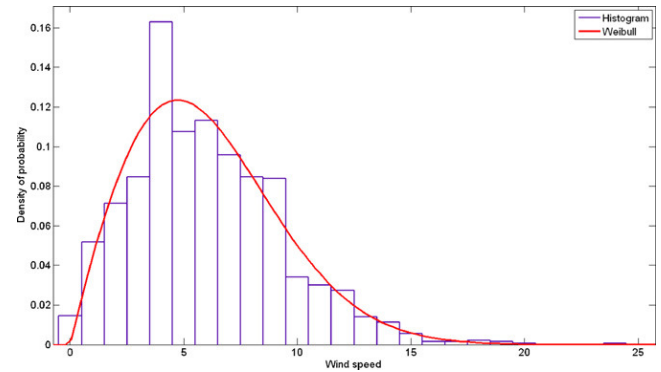


Fig. 1. Histogram of wind speed compared to Weibull distribution for the site of Hassi R'mel ( $c = 6.83$ ,  $k = 1.95$ ).

The Weibull distribution with two parameters is given by the following equation [18]:

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

where  $c$  is the scale parameter and  $k$  is the shape parameter. The scale parameter has the same unit as the wind speed (m/s, miles/hour or knout). However, the shape parameter  $k$  is dimensionless. In the most of the meteorological conditions this shape parameter varies generally between 1.5 and 3 [19].

The estimation of Weibull parameters can be done via several methods such as the method of moments and the method of the maximum likelihood. According to Carta et al. [14], the maximum likelihood estimators  $\hat{c}_L$  and  $\hat{k}_L$  give the best estimation of the Weibull parameters.  $\hat{c}_L$  and  $\hat{k}_L$  are given as [18]:

$$\hat{k}_L = N \left[ \frac{\sum_{i=1}^N v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^N v_i^k} - \sum_{i=1}^N \ln(v_i) \right]^{-1} \quad (2)$$

And

$$\hat{c}_L = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^k \right]^{1/k} \quad (3)$$

Eq. (2) is non-linear equation that should be solved iteratively. Once the optimal  $\hat{k}_L$  is found, it can be replaced in (3) to obtain  $\hat{c}_L$ .

The histogram in Fig. 1 is evaluated using daily average of wind speed during 6 years (from february 2004 to december 2009). The maximum daily average of wind speed is  $v_{\max} = 25$  m/s. Such results means that the site undergo to heavy wind speeds since we are speaking here about daily averages (mean of all the day).

In Fig. 4, we present also the estimated Weibull distribution. Fig. 4 indicates that the wind speed data in the site of Hassi R'mel satisfy the stochastic properties of the wind speed; the histogram fits Weibull distribution with  $c = 6.83$  and  $k = 1.95$  as parameters. However, it is important to mention that those values are obtained under the hypothesis that the process of wind is ergodic. This hypothesis allows considering that the temporal moments and the stochastic moments are equal.

### 1.2. Time–frequency analysis

Earlier studies on the cyclical behavior of wind speed dates back to 1956 when Vender Hoven has evaluated the power spectrum of the wind speed [20]. As results, it has been found that wind in New-York region is characterized by two types of periodicities. The first type is attributed to turbulences and it occurs at periods of 5 min. The second type of oscillations is synoptic oscillation. It occurs at

periods between 4 and 9 days and it is attributed to the passage of meteorological systems over the regions. After that, several similar works have been carried out to studies the cyclical behavior of wind over the world. A spectral study of the power density of wind speed on Palmyra Island has been considered by Hwang [21]. It has been found that the distribution of eddy kinetic energy in the medium and high frequency range in the tropics was quite similar to that at the middle latitudes. Militello and Kraus [22] have proposed to formulate the wind speed power spectrum in Taiwan using random vibration theory and statistical regression analysis. In addition to the study of the spectral behavior of the wind speed for six stations in Taiwan, Shih [23] have evaluated the cross-spectral density function.

Recently, the Wavelet transform has been used in the field of wind speed analysis as a time–frequency approach. Traditional Fourier analysis can be used to detect oscillations in given signal. However, it is not satisfactory in case of non-stationary. In case where a signal has a periodic component that appears only in limited intervals, Fourier analysis is completely unable to follow the spectrum variations with respect to time. In case of wind, it has been shown in [12] that the spectrum of wind speed in Algeria is time variable and it is seriously influenced by the topographical factor.

In this section, we propose to carry out a time frequency analysis on wind speed as well as on atmospheric pressure. It is known that those phenomena are widely correlated. Hence, we proposed to evaluate a coherency analysis to investigate such aspect.

1.2.1. Wavelet transform

Wavelet transform introduced by Morlet at the beginning of the 1980s has originally been used to analyze seismic signals. It is defined as [13]:

$$W(s, n) = \sqrt{\frac{1}{s}} \sum_{n'=0}^N x_{n'} \psi_0^* \left[ (n' - n) \frac{1}{s} \right] \tag{4}$$

where  $s$  is the scale factor,  $n$  is the translation parameter and  $\psi_0$  is the mother function that should satisfy the following wavelet admissibility condition

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi_0(\omega)|^2}{|\omega|^2} d\omega < \infty \tag{5}$$

where  $\psi_0(\omega)$  is the Fourier transform of  $\psi_0(n')$ .

Many wavelet mother functions have been proposed. In the present study, we have used the Morlet function because of its ability to reflect the gradual changes in the climatic records. The Morlet function is a modulated Gaussian function and it is given by:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{j\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2} \tag{6}$$

where  $\pi^{1/4}$  is the standardisation term and  $\omega_0 = s\omega$  is a nondimensional frequency and  $s$  is the wavelet scale. In the present work, in order to satisfy the admissibility condition, the  $\omega_0$  value is taken to be 6. More details are given elsewhere [24]. It should be noted that in wavelet analysis the wavelet scale is directly related to the oscillation period ( $p = 1.06 s$  in case of Morlet wavelet) and hence to the frequency oscillation.

The wavelet transform can be used to study the spectral behavior of a given time series. However, to investigate the relationships of two time series, one can compare their corresponding WT or use the cross wavelet transform (XWT) defined as:

$$W_n^{XY}(s, n) = W_n^X(s, n) \cdot (W_n^Y(s, n))^* \tag{7}$$

where  $(W_n^Y(s, n))^*$  denote the complex conjugate of  $W_n^Y(s, n)$ .

1.2.2. Wavelet coherency

The XWT is a useful tool to study relationships between two time series. However, its interpretation must be done carefully by paying attention to the original time series. High common power in the XWT may be due to a high power in both of the time series or from an extreme high power in one time series. Furthermore, if the wavelet transforms of two time series present low power at some specific time and scale, the XWT is unable to reveal their relationships even if those time series co-vary. To overcome such weakness in XWT, Torrence et al. [25] have proposed the use of the wavelet coherence (WTC) rather than the XWT.

The wavelet coherence is defined as the square of the XWT over the individual power WT [25]:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^X|^2)S(s^{-1}|W_n^Y|^2)} \tag{8}$$

where  $S(\cdot)$  is the smoothing operator which is essential in coherence analysis. Otherwise the ratio  $R(s)$  would be equal to one (for more details see [13]).

Values derived using the WTC vary between 0 and 1. The closer the WTC is to 1 the more coherencies there is between the time series.

The delay between two time series at some specific time and scale can be obtained by evaluating the phase difference  $\phi_n^{xy}(s)$  defined as [25]:

$$\phi_n^{xy}(s) = \tan^{-1} \left( \frac{\Im(S(s^{-1}W_n^{XY}(s)))}{\Re(S(s^{-1}W_n^{XY}(s)))} \right) \tag{9}$$

In Fig. 2, we present the daily averages of the atmospheric pressure and wind speed. Due to some gaps in measurement between January and May 2008. Our study is limited to period between February 2004 and December 2007.

For figures that present the Wavelet scalograms, we should mention that frequencies of oscillations  $f$  are presented in term of periods  $p = 1/f$ . Periods are depicted in the ordinates in days while the time is presented in the abscissa. The area under the thin line indicates the zone of influence where the amplitudes may be attenuated due to the zero padding used in the calculation of the scalograms (for more details see [25]).

Fig. 3 presents scalograms of pressure and wind speed. For the pressure scalogram, it has been found the dominant oscillations occur at periods from 3 to 32 days. Their life time vary from two weeks up to three month. It is interesting to note that those oscillations are significant only in periods of autumn and winter. Concerning the scalogram of wind speed, it has been found that periods of most significant oscillations are located between 3 and 14 days and they are characterized by short life time (one to three week). Similarly to pressure, the wind speed oscillations have been observed in autumn and winter. The observed oscillations are generally called synoptic oscillations and they are attributed to the passage of meteorological weather systems over a given region [12].

However, some long period's oscillations (between 64 and 128 days) have been observed in Springer 2006 and winter 2007. Those periods are known under the name of Madden and Julian oscillations [26]. Yet, it is important to mention that all the obtained scalograms present a significant periodicity at the annual frequency.

In Fig. 4, we have presented the wavelet coherency between the atmospheric pressure and wind speed. It has been found that the two meteorological phenomena co-vary significantly. At synoptic band (periods between 3 and 16 days), it has been observed that wind and pressure co-vary especially in autumn and winter. The usefulness of the coherency analysis appears in the in periods where one or both of wavelet power spectra of wind and pres-

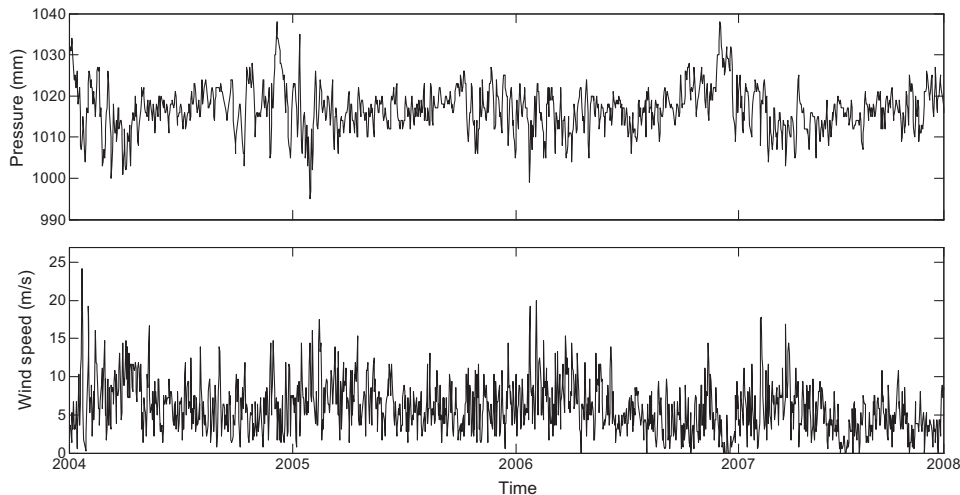


Fig. 2. Time series of daily atmospheric pressure and wind speed for the site of Hassi-R'mel, Algeria.

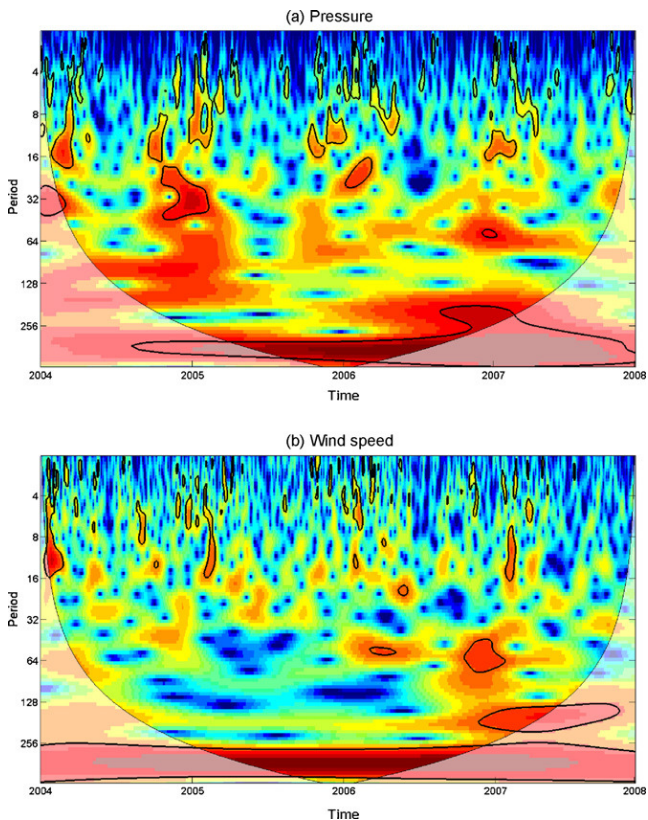


Fig. 3. Scalograms of atmospheric pressure and wind speed.

sure show low amplitudes. Long duration's coherencies have been observed in the band of 16–70 days (more than 0.8). Concerning the phase difference, arrows in Fig. 4 indicate that pressure is always loaded or in phase with wind. Physically this may be explained by the fact that the pressure belts are induced by wind.

## 2. Contribution to the actualization of wind map of Algeria

The estimation of wind energy available on a given site is probably the most important step when considering the establishment of a system of wind energy conversion. The study of the geographical distribution of wind resources available is very complex because

it depends, in addition to climate, to several parameters such as topography and urban environment. Yearly maps of wind speed are important. However, the monthly maps of wind speed will allow the user to have better information on the evolution of this source of energy for a given region. Indeed, it is essential when installing systems for converting wind energy to know the periods for which these systems are more or less productive.

In this section, we briefly describe the distribution of wind resources in Algeria by the evaluation of the wind speed map. Earlier maps of wind speed in Algeria presented in [3,5,9] have been obtained by interpolation methods. Their results can be incorrect in the case where an intermediate zone considered to be windy between two less windy areas is not taken into account. Hence, we propose to contribute to the updating of the wind speed map of Algeria through the use of recent data (2004–2009) and also by adding data of the region of Hassi-R'mel. The potential in this region has been underestimated due to the fact that it is located between two less windy regions. The results are given in the form of maps and tables to allow easy reading and to have a general idea about the geographical distribution of wind resources.

### 2.1. Used data

This study is based on the average daily wind speed. We have used data measured at 10 m above ground level from 37 weather stations in the network of National Meteorological Office (ONM). The measurement period stretch from February 2004 to December 2009 (6 years). However, it is important to note that those measure-

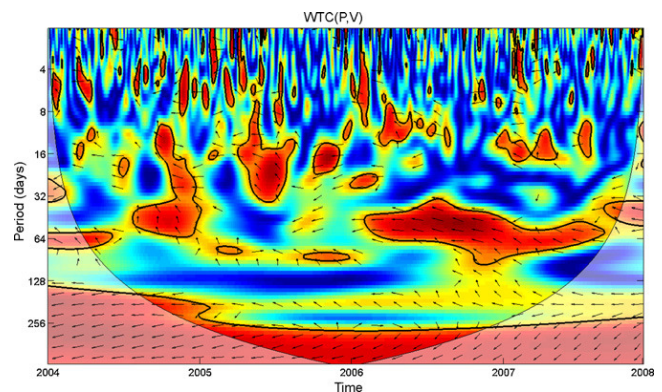


Fig. 4. Wavelet coherency between atmospheric pressure and wind speed.



ment stations are generally located either in airfields or in urban sites. This means that the potential may be greater elsewhere especially in isolated and remote sites. Algeria is located between the subtropical arid zone and the south Mediterranean coastal line. It is influenced by three main ascendant climates. First, the South Mediterranean climate characterized by wet winter and dry summer. Second, the dry subtropical climate with very cold winter and summer from warm to hot. Third, the Saharian climate for deserts found in low latitude between 18°N and 28°N. Those deserts coincide with the edge of the equatorial subtropical high pressure belt and trade winds.

2.2. Wind map of Algeria

The average monthly and annual wind speeds are presented in Table 1 which also includes the geographical coordinates and elevation above sea level for each site. This table will allow us to have an idea on evolution of the wind speed according to the months of the year.

Except for the region of Hassi-R'mel where it has been found that it has an important wind potential (4.8–8.1 m/s), the general appearance of the obtained maps are similar with the maps obtained in the previous studies (Fig. 5). Algeria is generally quite windy. 78% of its surface is characterized by velocities exceeding 3 m/s with about 40% of these speeds are above 5 m/s. Wind maps show that the highest wind speeds are distributed in the south while the north is generally less windy. It was found also that the southwestern region has a great potential with speeds exceeding 4 m/s for the site of Bechar, 5 m/s for the site of Tindouf and even above 6 m/s for the site of Adrar. The fact the southwestern region of the country has a significant wind potential can be attributed to two factors: the first is that it is located in an area of pressure

difference (wind in the latitudes near 30°N). The second is that it is close to the Athletic Ocean (weather disturbances reaches the region with high intensity).

On the other hand, in southeastern part of the country, it has been found that the wind potential is relatively weaker with respect to the western part. The highest speeds of 4.5 m/s were observed for the region Inamenass. So for the Tamanrasset region, we observe that the wind potential is below 4 m/s. taking into account the topographical aspect, the decrease of wind potential in this region can be attributed to the mountains series of Tassili which distracts and prevents some weather disturbances to reach the region. This is well illustrated in Fig. 6 which shows the annual distribution of wind speed in Algeria projected onto the topographical map of Algeria.

Concerning the site of Hassi-R'mel, Table 1 indicates that it has a very significant wind potential ( $v \approx 6$  m/s). This potential has been underestimated in the previous studies because this site is located between two less windy sites (Laghouat and Ghardaïa). From Fig. 6, this potential can be attributed to a corridor of air that crosses the region (tunnel effect).

Based on Table 1 and Fig. 7 that presents the monthly averages of wind speed in Algeria, we can see that the wind in Algeria obeys the same monthly rules. Thus, it becomes possible to classify months in term of average wind speed. We note that the months in spring (April, May, and June) are the windiest especially in internal zones. In spring, these regions are characterized by heavy dusty winds. Nevertheless, it has been noticed that in the southwest regions, Monthly velocities vary a little. Taking into account such results, this region is very favorable and adequate for the systems of wind energy conversion. As for the region of Hassi R'Mel, we note that the difference between the monthly averages is important; the windy months are undoubtedly those of April ( $v=8.1$  m/s), May

Table 1 Monthly and annual averages of wind speed in different site in Algeria.

	Elévation	Latitude	Longitude	Janvier	Fevrier	Mars	Avril	Mai	Jun	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembr	Decembre	Annuelle
Adrar	280	27.8	-0.2	6.2	6.4	6.5	6.5	6.9	6.1	6.7	6.2	6	5.8	5.9	5.8	6.3
A in sefra	1174	32.8	-0.6	4.6	5.1	5.1	5.4	5.2	4.9	4.3	4.2	4.1	4	4.2	4.9	4.7
Alger	25	36.8	3.1	2.2	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6	1.5	1.6	1.4	1.9	2.4	1.9
Annaba	4	36.8	7.8	2.5	2.4	2.5	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	1.8	2.4	2.5	2.3
Batna	822	35.2	6.3	2.9	3.1	3.6	3.2	2.7	3	3	3.1	3	2.7	2.6	3.3	3
Bechar	881	31.7	-2.3	3.2	3.2	4.1	4.6	5	4	4.1	4	3.7	2.8	2.9	3.1	3.7
Bcjaia	2	36.7	5.1	3.7	3.4	2.9	2.8	2.5	2.4	2.4	2.3	2.7	3.2	3.6	4.1	3
Biskra	87	34.8	5.7	3.9	4.3	4.9	5.3	5.1	4.3	3.8	3.7	3.9	3.3	4	4.1	4.2
Bou-saada	461	35.3	4.2	5.5	5.1	6.3	5.1	4.3	3.2	2.5	2.6	2.8	3.1	4.7	5.5	4.2
Chief	143	36.2	1.3	3.1	3.5	3.3	2.6	3	2.7	2.1	2.4	2.7	2.9	3	3.1	2.9
Constantino	694	36.3	6.6	4	3.3	3.5	2.7	2.5	2.1	1.8	2	2	2.1	2.8	3.4	2.7
Djanet	967	24.3	9.5	3	2.9	3.5	4.1	4	4.2	4.1	4.2	3.5	3.2	2.4	2.4	3.5
Djelf	1144	34.7	3.2	3.2	5	5.2	5.6	4.7	5.1	4	4.2	4	3.9	3.6	3.5	4.3
EL CocLa	397	30.6	2.9	2.8	3.8	4.3	4.2	4.7	3.9	3.3	3.2	3.7	3.5	2.6	3	3.6
F,l oued	61	33.5	6.8	2.6	2.7	3.6	4	3.9	3.8	3.5	3.5	3	2.6	2.3	2.6	3.2
Chardaia	450	32.4	3.8	3.5	3.2	4.4	4.5	3.9	3.5	2.9	2.7	3	2.8	2.8	3.5	3.4
Chelma	4	36.5	7.7	2.4	2.3	2.5	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	1.8	2.4	2.5	2.3
Griss	90	35.2	0.2	2.7	2.3	2.3	2	2.1	1.7	1.5	2	1.9	1.9	2.6	2.7	2.1
H Messaoud	142	31.7	6.2	3.2	3.3	4.1	4.2	4.8	4.1	3.4	3.7	3.9	3.5	2.8	3.1	3.7
HR'mcl	774	32.9	3.3	5.7	6.3	7.6	8.1	7.8	6.6	5.3	5.4	5.4	4.8	4.5	5.7	6.1
Illizi	558	26.5	8.4	3.7	3.7	4.1	4.1	4.5	4.9	4.6	4.6	4.3	3.9	3.7	3.4	4.1
InAmcnass	562	28	9.6	3.9	4.5	5	5.2	6	5.7	4.6	4.8	4.7	4.4	3.9	3.8	4.7
InSalah	293	27.2	2.5	5.3	4.9	5.5	5.1	5.6	5.3	5.6	5.3	4.9	4.6	4.7	4.3	5.1
Jijel	11	36.8	5.9	2.6	2.9	3.3	2.8	2.1	2.1	2.1	2	2.1	2.2	2.5	3.1	2.5
Laghouat	765	33.8	2.9	3.4	3.4	3.9	4.3	3.8	3.6	3	2.9	2.8	2.6	2.7	3.3	3.3
Oran	90	35.6	-0.6	2.7	2.8	3.2	3	3	2.9	2.6	2.3	2.3	2.1	2.4	2.7	2.7
Ouragla	142	31.9	5.4	3.1	3.3	4.3	4.2	4.9	4.7	4	4.1	4.3	3.5	2.8	2.8	3.8
Setif	1040	36.2	5.3	3.4	3.8	3.8	3.7	3.3	3.4	3.2	3.3	3.4	3	3.2	3.1	3.4
Tamanrasset	378	22.8	5.4	3.4	2.9	2.9	2.9	3.1	3.2	3.3	3.2	3	2.9	2.5	2.6	3
Tebessa	811	35.4	8.1	3.2	3.2	3.5	3.1	2.9	2.5	2	2.1	2.3	2.4	2.9	3.3	2.8
Tiaret	989	35.3	1.5	3	4.1	3.8	3.2	3.5	3	2.6	2.8	2.9	2.9	3.6	4	3.3
Timimoun	312	29.2	0.3	5	5.6	5.3	5.9	6.1	4.8	4.9	4.9	4.5	4.1	4.4	4	5
Tindouf	431	27.7	-8.1	4.6	5.4	5.3	7	7.3	7.3	5.6	6.2	6.7	4.7	4.3	4	5.7
Tlemoen	247	35	-1.5	3.7	3.2	3.3	2.3	2.1	1.8	1.5	1.6	1.4	2.4	3.1	3.9	2.5
Touggourt	85	33.1	6.1	2.9	3.1	3.9	4.1	4.2	3.7	3.4	3.7	3.2	2.9	2.5	2.9	3.4

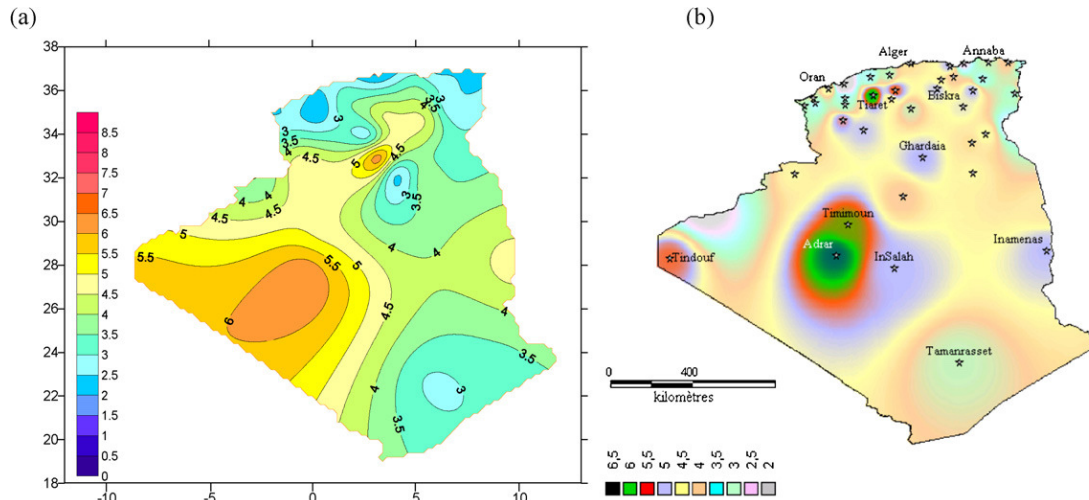


Fig. 5. Annual maps of wind speed in Algeria at 10 m high. (a) Map obtained from Table 1 (b) Map obtained in Ref. [11].

( $v = 7.9 \text{ m/s}$ ) and Mars ( $v = 7.6 \text{ m/s}$ ). As for the months of October and November, we note that the potential wind does not exceed  $4.8 \text{ m/s}$ . This can be considered as an inconvenient in the wind energy conversion field.

Finally, it is important to mention that these studies were conducted as part of work for estimating the wind potential in Algeria. However, the number of sites is little and therefore these studies can be regarded as preliminary results. As this study shows for the case of Hassi-R'mel, a windy area has been neglected. Much work remains to be done because the weather stations of the National Office of Meteorology (ONM) located mainly at urban areas and airports are not sufficient to characterize the wind poten-

tial in Algeria. More over, the Algerian territory is vast (more than  $2.4 \text{ millions km}^2$ ) and these stations are scattered with large distances especially in the south. To locate windy areas (especially remote and isolated areas), we encourage specialists to use ecological indicators and conduct investigations with people living in isolated areas especially cattle ranchers and truckers because the nature of their work depends heavily on the behavior of wind. Indeed it is thanks to the truckers signs we became interested is to the region of Hassi-R'mel.

N.B. in Arabic terminology, the name Hassi-R'mel means the source of sand. The nomads of the region have given this name to this region because it is always characterized by heavy sand storms.

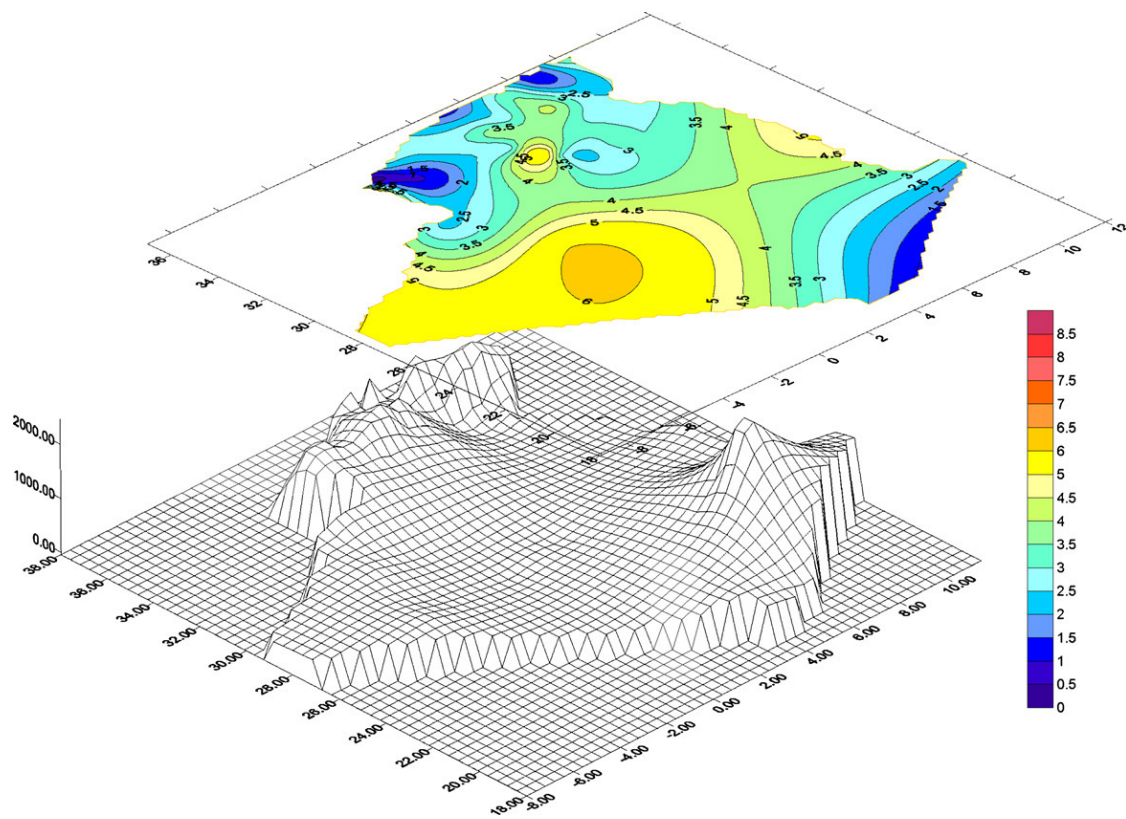


Fig. 6. Wind speed map projected on the topographical map of Algeria.

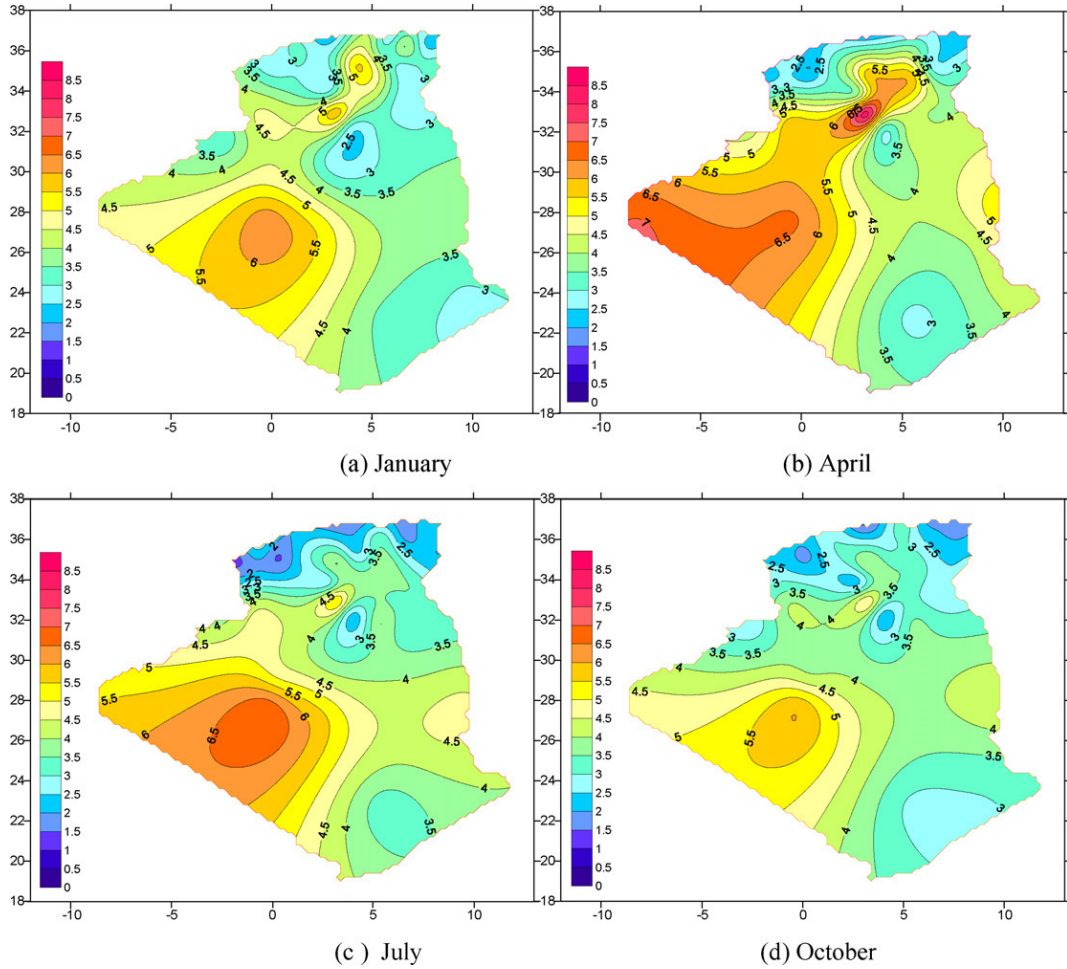


Fig. 7. Monthly maps of wind speed in Algeria (data from February 2004 to December 2009).

### 3. Application: stand alone hybrid system

As mentioned above, several studies have been carried out in order to estimate the appropriate dimensions of stand-alone hybrid systems in Algeria. However, in all those above studies, only the South-Western part of the country has been taken into consideration. In this part, a system optimization in terms of technical and economic feasibility is proposed. The purpose of this part is to draw the attention to the enormous potential of wind energy in the region of Hassi-R'mel that can be exploited in collecting further energy than the solar type already installed. The proposed study is carried out using Homer Software.

HOMER software is a user-friendly micropower design tool that simulates and optimizes stand-alone and grid-connected power systems. Recently, it has been used widely in the field of renewable energy such as the techno-economical studies of hybrid systems in Algeria [6], Saudi Arabic [27] and [28]. It can be used with any combination of wind turbines, PV arrays, run-of-river hydro power, biomass power, internal combustion engine generators, microturbines, batteries, and hydrogen storage, serving both electric and thermal loads. The advantage of the HOMER is that it can involve also all costs such as the initial capital and the maintenances costs including pollution penalties [29]. The simulation considers a one-year time-period using a minimum time-step of 1 min. It performs a sensitivity analysis which can help the

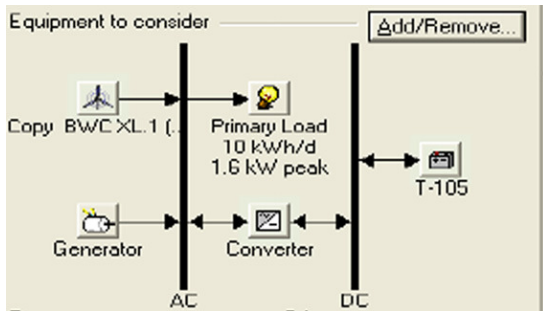


Fig. 8. The hybrid system considered for optimisation.

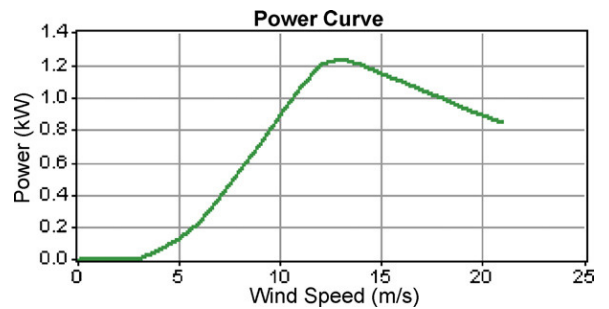


Fig. 9. Typical power curve for BWC XL1 wind turbine.

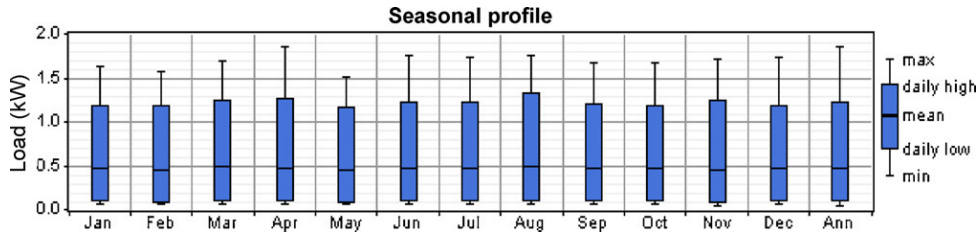


Fig. 10. The seasonal profile of the considered load.

analyst to do ‘what-if’ analyses and to investigate the effects of uncertainty or changes in input variables. The objective of the optimization simulation is to evaluate the economic and technical feasibility for a large number of technology options, while considering variations in technology costs and energy resource availability.

3.1. The considered system

The system under consideration for optimization is a stand alone wind/Gasoline generator hybrid system as shown in Fig. 8. The wind turbine is a modified version of the Bergey windpower BWC XL1 type which has a rated power of 1.24 kW AC. It has a lifetime of 20 years with a hub height of 25 m. The typical power curve of this turbine is shown in Fig. 9. The capital cost of this turbine is at 3900\$ with the replacement assumed at the same price and the operation/maintenance costs at 100\$/year. The number of turbine to be used can go up to 3 items. The Gasoline generator is a 2.6 kW with a capital cost of 900\$ and a lifetime of 5000 operating hours. Again replacement is assumed to be at the same price with the operation/maintenance costs at 0.04\$/h. The fuel price is taken to be constant (which is the case in Algeria) and is at 0.2\$/Litter. To take into account any economic effects on the gasoline prices and to assess the effect of this parameters on the system choice, this price has been allowed to vary increasingly up to 0.6\$/L. The system contains batteries of the type T-105 of the Trojan battery company. Their capital cost is at 220\$ with the same replacement cost and operating/maintenance cost of 4\$/year. The number of such a battery can be none or range from 13 to 16 items. For DC/AC or AC/DC conversion, up to 5 items of a 1 kW converter may be used. The capital cost of such a converter is fixed at 750\$ at the same replacement price and no operating/maintenance costs. These have 15-year lifetime and 90% efficiency.

3.1.1. The load profile

The load demand considered is for home consumption profile. The seasonal profile is shown in Fig. 10. It shows a relatively constant power demand over all the year. The daily consumption is assumed to be follow the same profile over al the year and is shown in Fig. 11. It shows that the consumption is important in the day-time and negligible at night. It peaks at three points: at the early morning; at noon and at the beginning of the night as all the family

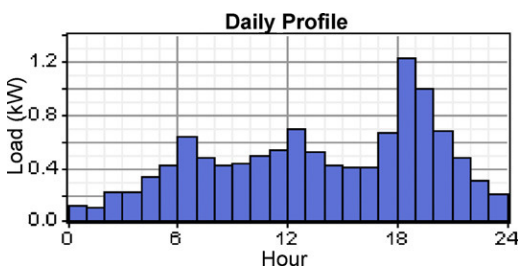


Fig. 11. The daily consumption of the considered load.

System Type	XL1	Gen (kW)	T-105	Conv. (kW)	Disp. Strgy	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Pen. Frac.
Gen/Battery	0	2.6	16	2	CC	\$ 5,920	1,775	\$ 24,870	0.638	0.00
Wind/Gen/Battery	1	2.6	16	2	CC	\$ 3,820	1,642	\$ 27,345	0.702	0.13
Gen/Battery	0	2.6	0	0	CC	\$ 900	2,855	\$ 31,381	0.805	0.00
Wind/Gen/Battery	1	2.6	0	0	CC	\$ 4,800	2,886	\$ 35,604	0.914	0.12

Fig. 12. The optimisation results with the optimum systems ranked.

members are around. The annual average daily consumption is at 10 kW/day.

3.1.2. Other input data

Besides the specifications listed earlier, some other factors have been set as additional specifications and constraints so that the problem is complete. First, the project lifetime has been set out to be 25 years with an annual interest rate of 8%. To highlight the stand alone system importance, the cost of connecting to the nearest grid is set to be 10,000\$/km while the price of purchasing a kWh is fixed at 0.1\$/kWh. Emissions are not taken into account in the optimization procedure (Lows in Algeria do not consider penalties for CO<sub>2</sub> emission).

3.2. Optimization results

Once the earlier described specifications have been set into HOMER, it performs calculations to determine the best combination that technically and economically meets the requirements. The

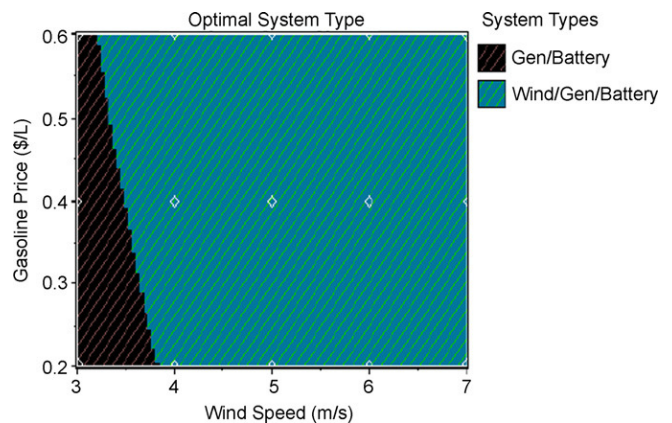


Fig. 13. Sensitivity analysis for wind speed and gasoline price parameters.

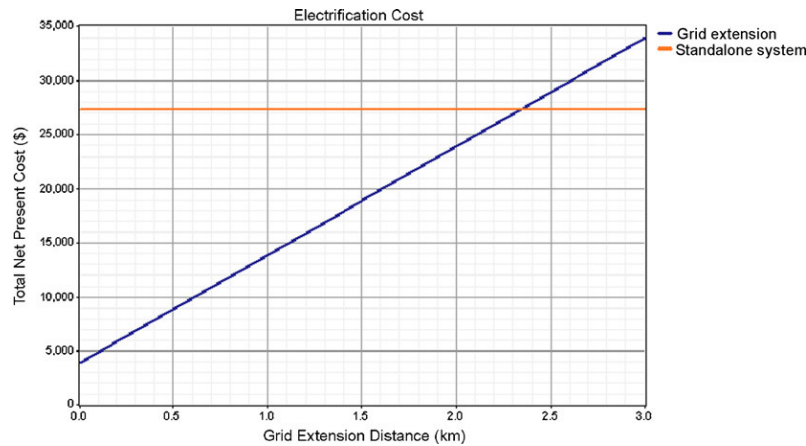


Fig. 14. A comparison between stand alone and grid connection alternatives.

**Table 2**  
Comparison of pollutant emissions for the optimum systems. (a) Diesel/battery system. (b) Wind/diesel/battery system.

Pollutant	Emissions (kg/yr)	Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	5856	Carbon dioxide	4929
Carbon monoxide	16.4	Carbon monoxide	13.8
Unburned hydrocarbons	82	Unburned hydrocarbons	53
Particulate matter	1.24	Particulate matter	1.04
Sulfur dioxide	12	Sulfur dioxide	10.1
Nitrogen oxides	146	Nitrogen oxides	123
(a)		(b)	

results are shown in Fig. 12 where the optimal systems are ranked according to their technical and economic feasibility. The optimal system is found to be the gasoline generator combined with the battery bank followed by the combination wind turbine with the gasoline generator and battery bank. It should be noted that the first system overtook the wind based system because the speed considered a wind speed of 3 m/s as pointed out earlier which is a too underestimated value. In Addition to that, we should mention that the price of the gasoline is subsidized in Algeria (the real price is three times more). To better visualize the effects of both wind speed and gasoline price, a sensitivity analysis over the two parameters has been carried out and the results are depicted in Fig. 13.

The results point out that for the current price of gasoline of 0.2\$/L, a speed of around 3.8 m/s is enough to favour the wind-based system and less speed values even favour this system for possible increase in prices.

This result is very important as it draws the attention that wind energy resources in the region are considerable especially as the true annual speed is 6.098 m/s. The amount of energy that can be drawn can serve as another source that can go hand in hand with the already existing awareness and care about the solar energy systems. HOMER produces the amounts of emissions of the wind-based system along with the amount of emissions produced by the rank 1 system which are summarized in Table 2. The results reveal that the involvement of wind turbine reduced the amount of emissions of the different components. Fig. 14 shows a comparison between which alternative best serves our needs either the stand alone system or the grid connection. The stand alone system is the best choice starting from a distance from the closest grid connection of 2.4 km which is the case for as any remote area.

**4. Conclusion**

Through this study, a contribution to the actualization of the wind map in Algeria has been carried out by adding data of the site

of Hassi R'Mel. In the previous maps, this potential has been underestimated due the fact this region is located between two less windy regions (Laghouat and Ghardaia). It has been found that the site of Hassi R'mel is characterized by an important wind potential with an annual wind mean speed  $v \approx 6$  m/s. In order to understand reason of wind repartition in Algeria, we have projected the wind map over the topographical map of Algeria. Decrease of wind potential in south-east part has been attributed to the mountainous series of Tassili (In Tamanrasset region). Those series prevent many meteorological perturbations to reach the east part. For the region of Hassi R'mel, the wind potential is attributed to this potential is attributed to a corridor of air that cross the region (tunneling). In the obtained maps we have used very recent data (2004–2009) and we have conduced that Springer is the windiest season. However, our maps are considered to be preliminary due to the fact number of used stations is little regarding the surface of Algeria (more than 2.4 millions km<sup>2</sup>). Moreover, these stations are generally located on airfields or in urban centers and measurements are intended to aviation or climatology. These measuring conditions do not take into account certain requirements related to the environment (obstacles, topography) that may influence the representativeness of the measures.

It has been also found that the density of probability of wind in Hassi-R'mel obeys to Weibull distribution. However, for the study of cyclic behavior of wind in this site, we have used the time–frequency approach due to the fact that wind is not stationary process. The study has revealed that the presence of synoptic oscillations of periods between 3 and 16 days. Those oscillations are generally observed in autumn and winter and they are characterized by a short life time. Those oscillations are attributed to the passage of weather systems that cross the region in the hibernal season. The study of coherency between wind speeds and pressure have reveled a great coherency between the two phenomena especially at low frequencies.

In this work, an optimization of a hybrid stand alone wind based energy system has been considered. The optimization task has been carried using that powerful tool HOMER which successfully determined the best technical and economical system to adopt. The system considered, though simple in construction, has successfully demonstrated that wind energy is another option to adopt in Hassi R'mel which possesses a potential of wind energy besides solar energy that can be economically beneficial to Algeria. The calculations have shown that the wind-based energy system is the best in terms of economical, technical besides its environmentally friendly characteristics that give it an important role in the country's sustainable energy strategy.

## References

- [1] Said M, Ibrahim A. Energy in the Arab World. *Energy* 1984;9(3):217–38.
- [2] Bensaid H. The algerian program on wind energy. *Proceeding of WEAC*. Oxford; 1985. p. 21–27.
- [3] Hammouche R. Atlas Vent de l'Algérie/ONM. Office des Publications Universitaires (OPU), Alger; 1990.
- [4] Kasbadji Merzouk N. Wind energy potential in Algeria. *Renewable Energy* 2000;21:553–62.
- [5] Himri Y, Himri S, Boudghene A, Stambouli. Wind power resource in the south-western region of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:554–6.
- [6] Himri Y, Boudghene Stambouli A, Draouic B, Himrid S. Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Algeria. *Energy* 2008;33:1128–36.
- [7] Himri Y, Rehmana S, Draouic B, Himrid S. Wind power potential assessment for three locations in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:2495–504.
- [8] Saheb-Koussa D, Haddadi M, Belhamel M. Economic and technical study of a hybrid system (wind–photovoltaic–gasoline) for rural electrification in Algeria. *Applied Energy* 2009;86:1024–30.
- [9] Tabet Helal et MA, Ghellai N. Le Gisement Eolien à Beni-Saf Région Côtière de l'Ouest Algérien. *Review of Energy Ren: ICPWE* 2003:143–6.
- [10] Youcef Ettoumi F, Sauvageot et H, Adane. A-E-H. Statistical bivariate modelling of wind using first-order Markov chain and Weibull distribution. *Renewable Energy* 2003;28:1787–802.
- [11] Kasbadji Merzouk N. Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie. Thèse doctorat, Université Abou bekr Belkaid, Tlemcen; 2006.
- [12] Chellali F, Khellaf A, Belouchrani A. Application of time–frequency representation in the study of the cyclical behavior of wind speed in Algeria: wavelet transform. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 2010;Vol8:1233–9.
- [13] Chellali F, Khellaf A, Belouchrani A. Wavelet spectral analysis of the temperature and wind speed data at Adrar, Algeria. *Renewable Energy* 2010;35:1214–9.
- [14] Carta JA, Ramirez P, Velazquez S. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. Cases studies in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable energy Reviews* 2009;13:933–55.
- [15] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. *Wind energy hand book*. John Wiley and Sons; 2001.
- [16] Peinke J, Schaumann P, Stephan Barth S. *Wind energy*. In: *Proceedings of the Euromech colloquium*. 2007.
- [17] Mathew S. *Wind energy, fundamentals*. In: *Resource analysis and economics*. Berlin: Springer Verlag; 2006.
- [18] Justus CG. *Vent et performances des éoliennes*. Edition SCM; 1980.
- [19] Akpinar S, Akpinar EK. Wind energy analysis based on maximum entropy principle (MEP)-type distribution function. *Energy Conversion and Management* 2007;48:1140–9.
- [20] Vender Hoven I. Power spectrum of horizontal wind in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *Journal of Atmospheric Sciences* 1956;14:160–4.
- [21] Hwang HJ. Power density of surface wind speed on Palmyra Island. *Monthly weather review*. *Monthly Weather Review* 1970;98(Issue 1).
- [22] Militello A, Kraus NC. Generation of harmonics by sea breeze in nontidal water bodies. *Journal of Physical Oceanography* 2001;31:1639–47.
- [23] Shih.F D.C.-F. Wind characterization and potential assessment using spectral analysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 2008;22:247–56.
- [24] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics* 1992;24:395–457.
- [25] Torrence C, Compo GP. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 1998;79:61–78.
- [26] Madden AR, Julian PR. Observations of the 40–50-day tropical oscillation—a review. *Monthly Weather Review* 1994;122:814–37.
- [27] Rehman S. Prospects of wind farm development in Saudi Arabia. *Renewable Energy* 2004;30:447–63.
- [28] Juhari AB, Kamaruzzaman S, Yusoff A, Alghoul MA, Zaharim A, Ahmad I. Optimization of PV-wind-hydro-gasoline hybrid system by minimizing excess capacity. *European Journal of Scientific Research* 2009.
- [29] Connolly D, Lund H, Mathiesen BV, Leahy M. A review of computer tools for analyzing the integration of renewable energy”, into various energy systems. *Applied Energy* 2010;87:1059–82.



## The application of the maximum entropy function principle to fit the wind speed distribution

F. Chellali<sup>1,3\*</sup>, A. Khellaf<sup>2</sup>, A. Belouchrani<sup>3</sup>, B. Batoun<sup>1</sup> et S. Boualit<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables 'URAER'  
Route de Ouargla, B.P. 88, Gart Taam, Ghardaïa, Algérie

<sup>2</sup> Centre de Développement des Energies Renouvelables 'CDER'  
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

<sup>3</sup> Ecole Nationale Polytechnique 'ENP'  
Avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie

**Abstract** - *In the field of wind energy conversion, an accurate determination of the probability distribution of wind speed guarantee an efficient use of wind energy, thus enhance the position of wind energy against other forms of energy. In the following paper we propose to use the maximum entropy principle to derive a family of pre-exponential distributions in order to describe wind speed probability distributions. The statistical performances of the developed distributions are compared with those of the conventional Weibull distributions. As a result it has been found that the proposed distributions provide better statistical performances and they fit the wind speed distributions better than the Weibull distributions.*

**Keywords:** Maximum Entropy Principle - Weibull distribution - Wind speed distribution - Wind energy.

### 1. INTRODUCTION

Wind plays a primordial role in many applications such as wind energy explorations, fight against desertification and pollutants transport and diffusion. Wind is considered to be highly variable from both of temporal and geographical point of views. Thus the knowledge of the characteristics of wind speed is of great importance. When the probability distribution of wind speed is known, then its characteristics can be easily obtained.

From a literature overview on the probability density functions proposed to describe the wind speed distribution, we can find that the Weibull is widely used to fit the wind speed distribution. According to Carta *et al.* [1], the Weibull distribution is the most used in the specialised literature of wind energy [2-9] and it is practically the only distribution which is recommended in books related to wind energy [10-13].

Recently, the maximum entropy principle (MEP) used in the information theory has been proposed to fit the wind speed distributions [14]. The MEP has been introduced for the first time in the wind energy field by Li and Li [14-16]. The authors have proposed a set of MEP-type exponential family of distribution functions to fit the wind speed distribution.

### 2. WEIBULL DISTRIBUTION

The Weibull distribution with two parameters can be written as:

---

\* Chellali\_faroul@yahoo.fr

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

Where  $V$  is the wind speed,  $c$  and  $k$  are the scale and the shape parameters respectively. The scale factor has the dimension of wind speed and it should be greater than zero. The shape factor  $k$  has no dimension and it ranges generally from 1.5 to 3 for most wind conditions [18]. If  $k$  is set to be equal to 2, then the resulting distribution is often called Rayleigh distribution.

Several techniques to estimate the parameters of Weibull distribution have been proposed. In the following we use the maximum likelihood method (ML) and the moment method (MM). The ML estimator of the shape factor  $\hat{k}_L$  and the scale factor  $\hat{c}_L$  are given by [17]:

$$\hat{k}_{ML} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N V_i^{\hat{k}} \ln(V_i)}{\sum_{i=1}^N V_i^{\hat{k}}} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(V_i) \right]^{-1} \quad (2)$$

$$\hat{c}_{ML} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^{\hat{k}} \right]^{1/\hat{k}_{ML}} \quad (3)$$

Where  $N$  is the total number of samples. The estimation of the Weibull parameters via the ML is very laborious because equation (2) needs to be solved numerically via an iterative process. However one can use the moment method (MM) that requires less calculation. The Weibull's parameters are estimated via the MM as [1]:

$$\hat{k}_{MM} = \left( \frac{\text{std}(V)}{\text{mean}(V)} \right)^{-1.091} \quad (4)$$

$$\hat{c}_{MM} = \frac{\text{mean}(V)}{\Gamma(1 + 1/\hat{k}_{MM})} \quad (5)$$

Where  $\Gamma(\cdot)$  is the Gamma function.

### 3. MAXIMUM ENTROPY BASED DISTRIBUTION

According to Carta *et al.* [1], the probability density function  $f(V)$  could be obtained by minimising the Shannon's entropy under the following restrictions:

a- The sum of all of the probabilities within the definition interval must be equal to one.

b- The  $M$ -low statistical orders  $m_i$  ( $i=1,2,\dots,M$ ) with respect to the theoretical distribution must be equal to the  $M$ -low statistical orders with respect to the empirical distribution.

Mathematically, the two restrictions can be expressed as:



$$\int_a^b f(V) d(V) = 1 \quad (6)$$

$$\int_a^b V^i f(V) d(V) = m_i' \quad (7)$$

Where  $[a, b]$  is the interval within which the probability density function is defined. In our case, we take  $a = 0$  and  $b = \max(V)$ .

The M-low statistical orders  $m_i'$  are obtained empirically as [15]:

$$m_i' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V^i \quad (8)$$

A general solution of equations (6) and (7) can be expressed as:

$$f(V) = \exp\left(\sum_{j=1}^M a_j V^j\right) \quad (9)$$

Where  $a_j$  are Lagrangian multipliers and  $M$  is the number of the used low order moments. Thus, the probability density function  $f(V)$  is determined once the  $a_j$  parameters are obtained. For this, one can solve numerically the following set of equations:

$$\begin{aligned} \int_0^{V_{\max}} V \exp\left(\sum_{j=1}^M a_j V^j\right) &= 1 \\ \int_0^{V_{\max}} V^1 \exp\left(\sum_{j=1}^M a_j V^j\right) &= m_1' \\ &\vdots \\ \int_0^{V_{\max}} V^M \exp\left(\sum_{j=1}^M a_j V^j\right) &= m_M' \end{aligned} \quad (10)$$

In order to obtain better accuracy, Li and Li [15] have introduced a pre-exponential term to the MEP distributions. The resulting distributions are known as the MEP type distribution. MEP type distribution of order  $r$  is obtained by adding the wind speed to the power of  $r$  as a pre-exponential term. Thus, the MEP-type distribution can be expressed as:

$$f(V) = V^r \exp\left(\sum_{j=1}^M a_j V^j\right) \quad r \geq 0 \quad (11)$$

In many applications such as in the wind energy field and in the structure's construction field, the wind speed distribution is used to estimate the wind energy. For a surface  $A$ , the wind power density  $E$  is given by [15]:

$$E = \frac{P}{A} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot f(V) d(V) \quad (12)$$

Where  $P$  is the wind power and  $\rho$  is the air density ( $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  in the standard conditions). Thus, the wind power distribution can be expressed as [15]:

$$e(V) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot f(V) \quad (13)$$

For the regions of Algiers (Algeria), we propose in the following study to investigate the possibility of developing wind speed probability distributions that may have better performances than the conventional Weibull distributions. MEP type distributions constrained by two, three and four low order moments are obtained and compared with Weibull distributions. The comparison is based on the coefficient of determinations (COD) criterion and the root mean square error (RMSE) criterions.

## 4. STATISTICAL ANALYSIS

### 4.1 Coefficient of determinations criterions

The COD is used to indicate how much the total variation in the dependent variable can be accounted for by the theoretical and the empirical distributions [15]. The COD is defined as:

$$\text{COD} = R^2 = 1 - \sigma_{x,y}^2 / \sigma_y^2 \quad (14)$$

Where  $R$  is the correlation coefficient,  $\sigma_y^2$  is the variance of the measured data from its own mean value  $y_m$  and it is given by:

$$\sigma_y = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_m)^2}{N - 1} \right]^{1/2} \quad (15)$$

Where  $y_i$  is the actual probability value,  $y_{ic}$  is the predicted probability values and  $N$  is the number of samples.

Similarly  $\sigma_{y,x}$  is given by:

$$\sigma_{y,x} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{ic})^2}{N - 1} \right]^{1/2} \quad (16)$$

The greater the value of COS indicates the better fitting of the wind speed.

**4.2 Root mean square error criterion**

The second criterion is the RMSE and it is given by:

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} (y_i - y_{ic})^2 \right]^{1/2} \tag{17}$$

The smaller the RMSE indicates the better fitting.

**5. RESULTS AND DISCUSSIONS**

To illustrate the suitability of the MEP-type distributions, we propose in the following section to compare their statistical performances (RMSE and COD) with those of the Weibull distribution. Data considered in this study are 10 minutes wind speed values measured at Algiers, Algeria (36.43° N, 3.15° E) . Data are measured during time period of two years (from January 2003-december 2004). **Table 1**, present some descriptive numerical measurements of the wind speed in the analysed stations. As indicated in **Table 1**, the site is characterised by low wind potential.

**Table 1:** Descriptive numerical measurements of the stations analysed

Site	$m_1$ (m/s)	$m_2$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$m_3$ (m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> )	$m_4$ (m <sup>4</sup> /s <sup>4</sup> )	std(V) (m/s)	$V_{max}$ (m/s)
Algiers	2.35	8.04	35.13	182.32	1.58	12.3

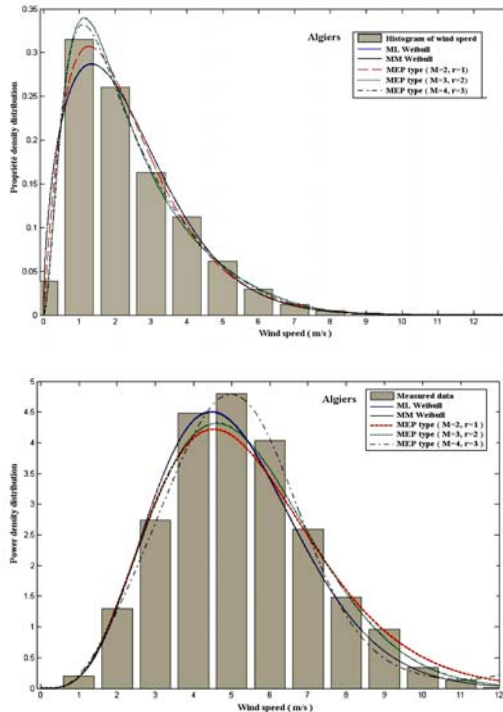


Fig. 1: A comparison of the MEP type distributions with the measured data and the Weibull distribution for the data measured at Algiers  
 a) Wind probability distributions. a) Wind density distributions.

**Table 2:** The MEP and the Weibull's parameters and their statistical analysis for the region of Algiers

Distribution	Parameters					Performances		
	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	RMSE	COD	RMSE
ML Weibull	k=1.5530, c=2.6267					0.0283	0.9182	0.2115
MM Weibull	k=1.5509, c=2.6212					0.0279	0.9204	0.2141
MEP-type								
M=2	r=0	-1.61094	0.302155	-0.1064581	-	0.0467	0.7782	0.2604
	r=1	-0.44955	-0.744470	-0.0151767	-	0.0190	0.9631	0.2488
	r=2	0.39930	-1.575796	0.04500493	-	0.0251	0.9360	0.4985
	r=3	1.08538	-2.3022492	0.09079630	-	0.0430	0.8207	0.7232
	r=4	1.67832	-2.974854	0.12966163	-	0.0593	0.6415	0.9198
M=3	r=0	-1.88093	0.728307	-0.2521049	0.01279260	0.0439	0.8121	0.3355
	r=1	-0.39649	-0.818343	0.0084810	-0.00196519	0.0183	0.9661	0.2060
	r=2	0.93746	-2.274798	0.2607838	-0.01738846	0.0061	0.9962	0.2105
	r=3	2.20783	-3.694824	0.5107382	-0.03326971	0.0126	0.9839	0.2781
	r=4	3.45673	-5.0874472	0.7573145	-0.04924215	0.0213	0.9539	0.3599
M=4	r=0	2.41451	1.905190	-0.8948381	0.13307339	0.0310	0.9018	0.3753
	r=1	-0.54538	-0.516182	-0.15198723	0.0277262	0.0164	0.9726	0.2430
	r=2	1.08409	-2.558064	0.4093055	-0.04479121	0.0054	0.9970	0.1507
	r=3	2.57851	-4.390556	0.8704425	-0.09954606	0.0079	0.9936	0.1182
	r=4	4.00065	-6.122225	1.2888335	-0.14732128	0.0165	0.9724	0.1557

**Table 2** shows the values of the estimated parameters of the two proposed distributions in addition to their statistical performances. As mentioned previously [15], one can see that the estimated parameters of the MEP type distributions can not be expressed in closed form (closed form means that they can not be rounded and they should be expressed by 6 or 7 digits). **Table 2** indicates that the Weibull distribution estimated using the moment method fits slightly better the wind speed than the one estimated using the maximum likelihood method.

For the MEP distribution ( $r = 0$ ), it has been found that it can not fit the wind distribution better than the Weibull distribution even when  $M$  is increased. However, for the MEP type distributions ( $r \geq 1$ ), **Table 2** indicates that they can fit wind speed distribution in many cases.

For  $M = 2$  it has been found that the MEP type with  $r = 1$  and  $r = 2$  provide better performances than the Weibull distribution. But for the wind power distribution, both of the Weibull based distributions provide better fitting than the MEP type distributions.

For  $M \geq 3$ , results indicate that the RMSE of the MEP type distribution is significantly lower than those obtained using the Weibull distributions. The lowest RMSE = 0.061 and RMSE = 0.054 have been obtained using  $r = 2$  for  $M = 3$  and  $M = 4$  respectively. This means that the higher the pre-exponential factor  $r$  do not mean necessarily the better fitting.

This result is also valid for the wind power density where the lowest RMSE has been obtained using  $r = 1$  and  $r = 3$  for  $M = 3$  and  $M = 4$  respectively. One can see from **Table 1** that a good fitting of the wind speed do not imply necessarily a good fitting of the wind power density. Similar results have also been obtained previously [15]. Such results can be explained by the fact that the wind power density is heavily weighted toward high wind speeds.

For the region of Algiers, we present in Figure 2 the histogram of the measured data, the ML and the MM Weibull distributions and the MEP type distributions. For low wind speed ( $V = 1 \text{ m/s}$ ), the MEP type fits better the wind speed than the Weibull distribution (Fig. 1a-).

For the wind power density distribution, Fig. 1b- shows clearly that the MEP with  $M = 4$  and  $r = 3$  has the best statistical performances especially at wind speed between ( $4 \leq V \leq 6 \text{ m/s}$ ).

## 6. CONCLUSION

In this work, it has been found that the distributions derived from the maximum entropy principle present a better alternative to describe the wind speed distribution than the Weibull distribution. For the MEP distributions, the results also indicate that the increase of the statistical constraints is beneficial in term of performances.

However, for the MEP type distributions, it has been found that the increase in the power of pre-exponential term do not necessarily yield better performances. Finally, as it has been already found in the previous studies, obtained results indicate that a good fitting of the wind speed distribution do not imply necessarily good fitting of the wind power density distribution

## REFERENCES

- [1] J.A. Carta, P. Ramirez and S. Velazquez, 'A Review of Wind Speed Probability Distributions Used in Wind Energy Analysis. Cases Studies in the Canary Islands', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, N°5, pp. 933 – 955, 2009.
- [2] A. Daniel and A. Chen, 'Stochastic Simulation and Forecasting of Hourly Average Wind Speed Sequence in Jamaica', *Solar Energy*, Vol. 46, N°1, pp. 1 – 11, 1991.
- [3] H. Nfaoui, J. Buret and A. Sayigh, 'Stochastic Simulation of Hourly Average Wind Speed Sequence in Tangiers (Morocco)', *Solar Energy*, Vol. 56, N°3, pp. 301 – 314, 1996.
- [4] K.D. Chou and R.B. Corotis, 'Simulation of Hourly Wind Speed and Array Wind Power', *Solar Energy*, Vol. 26, N°3, pp. 199 – 212, 1981.
- [5] K. Lalarukh and Y.R. Jarfi, 'Time Series Models to Simulate and Forecast Hourly Averaged Wind Speed in Quetta, Pakistan', *Solar Energy*, Vol. 61, N°1, pp. 23 – 32, 1997.
- [6] J.L. Torres, A. Garcia, M. De Blas and A. De Francisco, 'Forecast of Hourly Averaged Wind Speed with ARMA Models in Navarre (Spain)', *Solar Energy*, Vol. 79, N°1, pp. 65 – 77, 2005.
- [7] I.Y.F. Lun and J.C. Lam, 'A Study of Weibull Parameters Using Long-Term Wind Observations', *Renewable energy*, Vol. 20, N°2, pp. 145 – 153, 2000.
- [8] M. Al-Hasan and R.R. Nigmatullin, 'Identification of the Generalized Weibull Distribution in Wind Speed Data by Eigen-Coordinates Methods', *Renewable Energy*, Vol. 28, N°1, pp. 93 – 110, 2003.
- [9] E.K. Akpınar and S. Akpınar, 'A Statistical Analysis of Wind Speed Data Used in Installation of Wind Energy Conversion Systems', *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, N°4, pp. 515 – 532, 2005.
- [10] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, 'Wind Energy Handbook', John Wiley and Sons, 2001.
- [11] M.R. Patel, 'Wind and Solar Power System: Design, Analysis, and Operation', CRC Press, Taylor & Francis, Second Edition, 2005.
- [12] J. Peinke, P. Schaumann and S. Stephan Barth, 'Wind Energy', Proceedings of the Euromech Colloquium, Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [13] S. Mathew, 'Wind Energy, Fundamentals, Resource Analysis and Economics', Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [14] M. Li and X. Li, 'On the Probabilistic Distribution of Wind Speeds: Theoretical Development and Comparison with Data', *International of Journal Energy*, Vol. 1, N°2, pp. 237 – 255, 2004.
- [15] M. Li and X. Li, 'Investigation of Wind Characteristics and Assessment of Wind Energy Potential for Waterloo Region, Canada', *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, N°18-19, pp. 3014 – 3033, 2005.
- [16] M. Li and X. Li, 'MEP-Type Distribution Function: a Better Alternative to Weibull Function for Wind Speed Distributions', *Renewable Energy*, Vol. 30, N°8, pp. 1221 – 1240, 2005.
- [17] P. Ramirez and T.A. Carta, 'The Use of Wind Probability Distributions Derived from the Maximum Entropy Principle in the Analysis of Wind Energy. A Case Study', *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, N°15-16, pp. 2564 – 2577, 2005.
- [18] S. Akpınar and E.K. Akpınar, 'Wind Energy Analysis Based on Maximum Entropy Principle (MEP)-Type Distribution Function', *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, N°4, pp. 1140 – 1149, 2007.
- [19] Y.M. Kantar and I. Usta, 'Analysis of Wind Speed Distribution: Wind Distribution Function Derived From the Minimum Cross Entropy Principles as Better Alternative to Weibull Function', *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, N°5, pp. 962 – 973, 2008.