

DOC / 531.6-17 / 02

République Algérienne Démocratique et Populaire
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

THESE DE DOCTORAT

Présentée à :

L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID DE TLEMCCEN

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

UNITE DE RECHERCHE *MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES*

Par :

Nachida KASBADJI MERZOUK

Pour l'obtention du titre de :

DOCTEUR EN PHYSIQUE ENERGETIQUE ET MATERIAUX

Sur le thème :

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

Soutenue publiquement le 02 Mai 2006 devant le jury composé de :

M^r N. CHABANE SARI	Professeur, Univ. de Tlemcen	Président
Mr B. BENYOUCEF	Professeur, Univ. de Tlemcen	Directeur de thèse
Mr J.P. CHARLES	Professeur, Univ. de Metz	Examineur
M^r A. CHIKOUCHE	Directeur de Recherche, UDES	Examineur
M^r M. BELHAMEL	Directeur de Recherche, CDER	Examineur
M^r F. HANNANE	Professeur, Univ. de Blida	Examineur
M^{me} F. YOUCEF ETTIOMI	Maître de Conférences, USTHB	Examinatrice



PREAMBULE

Inscrit sous le n°:
Date le: 02/11/2009
Code: 3811

Le présent travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse de Doctorat au sein de la faculté des sciences, Département de physique de l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen et d'un Programme National de Recherche avec l'appui moral et matériel du Centre de Développement des Energies Renouvelables et en particulier de son directeur.

L'encadrement a été assuré par le Professeur B. Benyoucef, Directeur de l'Unité de recherche *Matériaux et Energies Renouvelables* de l'Université de Tlemcen, qu'il soit vivement remercié pour son appui et ses précieux conseils.

Que le Professeur N. Chabane Sari trouve ici l'expression de mes plus vifs remerciements pour avoir accepté de présider le jury d'évaluation.

Mes meilleurs remerciements vont au Professeur J.P. Charles pour avoir accepté de faire partie du jury d'examen, en faisant le déplacement malgré toutes ses charges.

Que Dr A. Chikouche, Directeur de recherche à l'Unité de Développement des Equipement Solaires, soit chaleureusement remercié d'avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation en qualité d'examineur et pour ces judicieuses remarques.

Que le Professeur F. Hannane, soit vivement remercié pour avoir accepté d'examiner le présent travail sans oublier ses précieuses observations.

J'adresser mes meilleurs remerciements au Dr M. Belhamel, Directeur de recherche et Directeur du Centre de développement des Energies Renouvelables d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes meilleurs remerciements vont au Docteur F. Youcef Ettoumi, Maître de Conférence à l'USTHB, pour avoir accepté de faire partie du jury et avoir examiné ce travail avec un grand intérêt.

Je remercie l'Office National de Météorologie et en Particulier Mr Saci, pour m'avoir fait la primeur des données du pylône de Ksar El Chellala.

Je ne saurais terminer sans remercier Dr M. Merzouk, pour ses conseils et son soutien.

ملخص

درست معطيات سرعة الرياح المقاسة ب 21 محطة للأرصاد الجوية خلال 10 سنوات. و استنتجت عوامل وايبل (Weibull) باستعمال منظومة وايبل أو أنغال وايبل حسب وضعية المكان المدروس . كما تم إنجاز الخريطة الوطنية لسرعة الرياح السنوية و الموسمية باستعمال معطيات ل 68 محطة للأرصاد الجوية.

استخرجت منها مناطق مناخية ذات طاقة رياحية معتبرة تم وضع خرائطها الرياحية باستعمال معطيات الرياح المقاسة على ارتفاع 700 هكتوباسكال .

من جهة أخرى وضعت نماذج تجريبية لاستنتاج التغير العمودي لعوامل وايبل الملائمة للمناطق الجافة باستعمال المعطيات المقاسة من طرف ديوان الأرصاد الجوية بواسطة العمود المنصوب في قصر الشلالة. و ذلك حسب أقسام المحيط الهوائية.

استعملت النماذج لتقييم سرعة الرياح على ارتفاع 50 م، مما أدى لإنجاز خرائط سرعة الرياح و خريطة المكامن الطقوية المستعادة.

وضع حد بتز (Betz) و حدود الآلات الكهروريحية يجعل مكامن طاقة الرياح المستعملة تمثل أقل من 30 % من مكامن طاقة الرياح المتاحة مما يؤدي إلى حتمية حسن الاختيار.

Abstract:

Weibull parameters of 21 meteorological stations have been established processing wind data recorded over a 10 years period, using Weibull or hybrid-Weibull distribution, regarding to local conditions. Yearly and seasonally mean wind speed maps of Algeria have been produced using a data of 68 stations.

Microclimates indicated by the atlases were submitted to finest analysis projecting wind speed data measured at 700 hpa.

Processing a wind data measured by ONM pylon installed at Ksar EL Chellala, empirical models of vertical extrapolation of Weibull parameters have been established with respect of atmospheric stability class. Formulas adapting better to the semi-arid climate of the high plains. Usable wind power maps at 10 and 50 meters, from the soil, have been carried out after extrapolating Weibull parameters.

Consequently of Betz limit first and wind machines limits secondly, useful wind power represent less than 30% of available wind potential. This result shows that a design of wind system requires a particular care.

NOMENCLATURE

A	: Surface de la roue	m^2
C, C_1, C_2	: Facteur d'échelle de Weibull	$m s^{-1}$
C_p	: Coefficient de puissance	
$\langle E \rangle$: Densité d'énergie moyenne récupérable sur une année	$MWh m^{-2}$
Er	: Erreur relative	
$F(V)$: Fréquence cumulée de la distribution de Weibull	
Fre	: Fréquence des directions par secteur	
G	: Flux échangé par convection	$W m^{-2}$
H	: Flux échangé par chaleur sensible	$W m^{-2}$
H_{mt}	: Hauteur manométrique totale	m
I_v	: Indice de variation	
I_g	: Eclairement global incident	$W m^{-2}$
L	: Longueur de Monin-Obukov	m
LL	: Fonction de vraisemblable	
L^-	: Rayonnement infrarouge émis par le sol	$W m^{-2}$
L^+	: Rayonnement infrarouge incident	$W m^{-2}$
N	: Nombre total d'observation de la vitesse non nulle	
Nb	: Nébulosité	
$\langle P \rangle$: Puissance énergétique éolienne moyenne disponible,	W
$\langle P_{Max} \rangle$: Puissance récupérable par la roue	W
$\langle P_r \rangle$: Densité de Puissance récupérable par la roue	$W m^{-2}$
$\langle P_u \rangle$: Densité de Puissance éolienne utile	$W m^{-2}$
$\langle P_e \rangle$: Densité de Puissance éolienne réellement utilisable	$W m^{-2}$
P_n	: Puissance nominale	W
$P_{théorique}$: Puissance calculée à la vitesse nominale	W
P_r	: Nombre de Prandtl	
Q^*	: Echange radiatif net	$W m^{-2}$
Θ	: Débit journalier	$m^3/jour$
Ri	: Nombre de Richardson	
R_p	: Facteur de puissance du vent	
T, T_{air}	: Température ambiante	K
T_s	: Température de radiation	K
T_{sea}	: Température de l'eau	K
$\langle V \rangle$: Vitesse moyenne du vent	$m s^{-1}$
V, V_x	: Vitesse du vent	$m s^{-1}$
V_{ailos}	: Vitesse du vent estimée avec le modèle Ailos	$m s^{-1}$
$V_{weibull}$: Vitesse du vent estimée avec le modèle de Weibull	$m s^{-1}$
V_b, V_n, V_s	: Vitesses de démarrage, nominale et d'arrêt	$m s^{-1}$
V_1	: Vitesse du vent au niveau z_1	$m s^{-1}$
V_2	: Vitesse du vent au niveau z_2	$m s^{-1}$
$\langle V_u \rangle$: Vitesse moyenne utile	$m s^{-1}$
W	: Composante verticale de la vitesse du vent	$m s^{-1}$
c_p	: Chaleur spécifique à pression constante	$kJ kg^{-1}$

ff_0	: Fréquence de vents calmes	
$f(V)$: Fréquences des vitesses moyennes tri horaires	
g	: Accélération de la pesanteur	$m s^{-2}$
k, k_1, k_2	: Facteur de forme de Weibull	
m	: Exposant d'extrapolation du facteur d'échelle	
n	: Exposant de la loi de puissance	
q^*	: Echelle d'humidité	
r	: Albédo	
u^*	: Vitesse de frottement	$m s^{-1}$
z_g	: Moyenne géométrique de l'altitude	m
z, z_1, z_2	: Altitude	m
z_o	: Rugosité du sol	m
z_r	: Hauteur de référence égale à 10	m
Γ	: Fonction gamma	
Γ_n	: Fonction gamma normalisée	
$\theta_0, \theta^*, \theta_{*v}$: Températures	K
ψ_H	: Fonction implicite de la chaleur	
ψ_M	: Fonction implicite du moment	
α et β	: Constantes sans dimension	
α_e	: exposant de la loi de puissance	
η	: Rendement global d'un système	
η_i	: Rendement indiqué de la pompe	
ϕ_H	: Fonctions universelles de la chaleur	
ϕ_M	: Fonctions universelles du moment	
κ	: Constante de Von-Karman	
λE	: Flux échange par chaleur latente	$W m^{-2}$
ρ	: Masse volumique de l'air	$kg m^{-3}$
σ	: Ecart type de la distribution de la vitesse m/s	
σ_s	: Constante de Stephan-Boltzman	$W m^{-2} K^{-4}$

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET PROBLEMATIQUE

1.1 INTRODUCTION	4
1.2 ELEMENTS DE PHYSIQUE ATMOSPHERIQUE	4
1.2.1 STRUCTURE ATMOSPHERIQUE	4
1.2.1.1 Force gravitationnelle	6
1.2.1.2 Force de pression	6
1.2.1.3 Force de Coriolis	6
1.2.1.4 Forces de frottement	6
1.2.2 COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE	6
1.2.2.1 Couche limite de surface (CLS)	7
1.2.2.2 Couche limite d'Eckerman	8
1.2.3 STABILITE ATMOSPHERIQUE	8
1.2.3.1 Conditions atmosphériques instables	8
1.2.3.2. Conditions neutres	9
1.2.3.3. Conditions stables	9
1.2.4. ORIGINE DU VENT	9
1.3 CARACTERISATION HORIZONTALE DE LA VITESSE DU VENT	9
1.3.1 MODELE D'AJUSTEMENT	10
1.3.1.1 Distribution de Weibull	10
1.3.1.2 Distribution hybride de Weibull	11
1.3.1.3 Distribution de Rayleigh	11
1.3.2 VARIATION SPATIALE (ATLAS DE L'ALGERIE)	12
1.3.2.1 Travaux de Said et all	12
1.3.2.2 Travaux de Bensaad	12
1.3.2.3 Atlas Vent de Hammouche	13
1.3.2.4 Atlas éolien de Kasbadji Merzouk	13
1.4. EXTRAPOLATION VERTICALE DES PARAMETRES VENT	13
1.4.1 PROFIL VERTICAL DE LA VITESSE DU VENT	14
1.4.1.1 Modèle de similitude de Monin-Obukov	14
1.4.1.2 Travaux de Paulson	15
1.4.1.3 Récapitulatif de Dyer	16
1.4.1.4 Travaux de Nieuwstadt	17
1.4.1.5 Travaux de Van Wijk	17
1.4.1.6 Travaux de B. Lange et all	18
1.4.2 EXTRAPOLATION VERTICALE DE LA VITESSE DU VENT	19
1.4.2.1 Loi logarithmique	19
1.4.2.2 Loi de puissance 1/7	20

1.4.2.3	Loi de puissance	21
1.4.2.4	Loi de puissance modifiée	22
1.4.2.5	Loi à coefficient variable	22
1.4.3	EXTRAPOLATION DES PARAMETRES DE WEIBULL	23
1.4.3.1	Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïl	23
1.4.3.2	Modèle modifié d'extrapolation de Justus	23
1.4.3.3	Modèle modifié d'extrapolation de Mikhaïel	24
1.4.3.4	Modèle d'extrapolation de Spéra et all	24
1.4.4	TEST DES MODELES D'EXTRAPOLATION	25
1.4.4.1	Test de Peterson	25
1.4.4.2	Test de Mikhaïel	25
1.4.4.3	Test de Poje	26
1.4.4.4	Test de Pneumatikos	26
1.5	AVANCEES TECHNOLOGIQUES	27
1.5.1	EXPANSION DES APPLICATIONS EOLIENNES	27
1.5.2	EOLIENNES DE POMPAGE	28
1.5.2.1	Eoliennes de pompage mécanique	28
1.5.2.2	Eoliennes de pompage électrique	28
1.5.3	INSTALLATION DE GRANDES PUISSANCES	29
1.5.3.1	Fermes éoliennes	29
1.5.3.2	Aérogénérateurs de grandes puissances	30
1.5.4	SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES	30
1.5.4.1	Matériaux du support	30
1.5.4.2	Matériaux des pâles	31
1.6	POSITION DU PROBLEME	32
1.6.1	INTERPOLATION HORIZONTALE	32
1.6.2	EXTRAPOLATION VERTICALE	32
1.7	CONCLUSION	33
	REFERENCES	34

CHAPITRE 2 : *ETABLISSEMENT DE L'ATLAS EOLIEN DE L'ALGERIE*

2.1	INTRODUCTION	38
2.2	VARIATION TEMPORELLE DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT	38
2.2.1	MESURE INSTANTANEE DE LA VITESSE DU VENT	39
2.2.2	VARIATION JOURNALIERE MOYENNE DE LA VITESSE DU VENT	40
2.2.3	VARIATION SAISONNIERE DE LA VITESSE DU VENT	40
2.2.4	VARIATION PLURIANNUELLE DE LA VITESSE DU VENT	41
2.3	ETUDE STATISTIQUE	41
2.3.1	DEFINITION DES PARAMETRES VENT	42
2.3.1.1	Vitesse moyenne, vitesse cubique moyenne	

et variance type	42
2.3.1.2 Facteur de puissance et indice de variation	43
2.3.2 METHODE D'AJUSTEMENT	43
2.3.2.1 Méthode des moindres carrées	43
2.3.2.2 Méthode de la vitesse moyenne et de la variance	44
2.3.2.3 Méthode de la vitesse moyenne et de la variabilité des vents	44
2.3.2.4 Méthode du maximum de vraisemblable	45
2.3.3 VARIATION DES PARAMETRES VENT	46
2.3.3.1 Forme de la distribution de Weibull	46
2.3.3.2 Variation mensuelle de la distribution de Weibull	47
2.3.3.3 Variation sectorielle des paramètres de Weibull	48
2.3.3.4 Variation des paramètres de Weibull avec l'altitude	49
2.3.3.5 Variation des vitesses moyennes	49
2.4 INTERPOLATION SPATIALE DES PARAMETRES VENT	51
2.4.1 METHODE D'INTERPOLATION	51
2.4.2 ATLAS DE LA VITESSE MOYENNE ANNUELLE DU VENT	52
2.4.2.1 Données utilisées	52
2.4.2.2 Atlas de la vitesse du vent	53
2.4.3 ATLAS DE LA VITESSE MOYENNE SAISONNIERE DU VENT	54
2.4.4 ATLAS MICROCLIMATIQUES DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT	56
2.4.4.1 Présentation du modèle de projection-interpolation	56
2.4.4.é Cartographie éolienne de quelques sites	57
2.5 POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN	60
2.5.1 PUISSANCE ENERGETIQUE DISPONIBLE	61
2.5.2 POTENTIEL ENRGETIQUE EOLIEN RECUPERABLE (THEOREME DE BETZ)	61
2.5.3 PUISSANCE EOLIENNE MOYENNE UTILE	64
2.5.4 PUISSANCE EOLIENNE MOYENNE UTILISABLE	65
2.6 CONCLUSION	66
REFERENCES	67

CHAPITRE 3 : EXTRAPOLATION VERTICALE DES PARAMETRES VENT

3.1 INTRODUCTION	69
3.2 METHODE D'EXTRAPOLATION VERTICALE	69
3.2.1 DETERMINATION DES CLASSES DE STABILITE	69
3.2.2.1 Détermination de la vitesse de frottement et de la rugosité du sol	71
3.2.2.2 Détermination de l'échange par chaleur sensible	71
3.2.3 METHODE D'EXTRAPOLATION VERTICALE DU VENT	73
3.2.3.1 Extrapolation verticale de la vitesse du vent	73

3.2.3.2 Extrapolation des paramètres de Weibull	74
3.3 ETUDE EXPERIMENTALE	76
3.3.1 APERÇU SUR LA REGION D'IMPLANTATION DU PYLONE DE MESURE	76
3.3.2 TECHNIQUE DE MESURES RECOMMANDEES	76
3.3.3 PYLONE DE MESURE	77
3.3.4 DONNEES MESUREES	78
3.3.5 TRAITEMENT DES DONNEES	79
3.3.5.1 Données manquantes	79
3.3.5.2 Données erronées	79
3.3.5.3 Données utilisées	80
3.4 RESULTATS ET DISCUSSION	80
3.4.1 CHOIX DE LA METHODE D'EXTRAPOLATION	80
3.4.2 DETERMINATION DES CLASSES DE STABILITE	81
3.4.2.1 Rugosité et vitesse de frottement	81
3.4.2.2 Chaleur sensible	83
3.4.2.3 Classe de stabilité	87
3.4.3 EXTRAPOLATION VERTICALE DES VITESSES MOYENNES	88
3.4.3.1 Extrapolation des vitesses par la loi de puissance	88
3.4.3.2 Distribution de Weibull	89
a - Facteur de forme k	90
b - Facteur d'échelle C	92
c - Vitesse moyenne	94
3.5 CONCLUSION	95
REFERENCES	96

CHAPITRE 4 : *DISCUSSIONS ET SYNTHÈSE*

4.1 INTRODUCTION	98
4.2 VALIDATION DE LA CARTE DES VENTS	98
4.2.1 DONNEES MESURES AU SOL	98
4.2.2 MODELE AILOS	99
4.3 VALIDATION DES MODELES D'EXTRAPOLATION VERTICALE	100
4.4 LIMITES DES MODELES	102
4.4.1 MODELISATION DES MESURES AU SOL	102
4.4.1.1 Densité de points de mesures	102
4.4.1.2 Qualité des mesures	102
4.4.1.3 Fréquence des vitesses nulles	102
4.4.1.5 Limites du modèle de projection (Ailos)	104
4.4.2 PROFIL VERTICAL	105

4.4.2.1 Faibles hauteurs du mât, nombre de mâts (diversité climatique)	105
4.4.2.2 Qualité des mesures	105
4.4.2.3 Problème de rugosité	105
4.4.2.4 Limites des machines sur la puissance utilisable	107
4.5 VENTS DOMINANTS	108
4.6 COMPARAISON DES MODELES D'INTERPOLATION	109
4.7 COMPARAISON DES MODELES D'EXTRAPOLATION VERTICALE	110
4.8 FREQUENCE DES VITESSES NULLES ET CARTE DES VENTS	111
4.9 ATLAS EOLIEN DE L'ALGERIE	112
4.10 CONCLUSION	114
REFERENCES	115
 CHAPITRE 5 : APPLICATION ET PERSPECTIVES	
5.1 INTRODUCTION	117
5.2 POTENTIEL ENERGETIQUE UTILISABLE	117
5.3 APPLICATION AU POMPAGE	119
5.3.1 CHOIX DES SITES D'IMPLANTATION DES MACHINES	119
5.3.2 POMPAGE ELECTRIQUE	119
5.3.3 POMPAGE MECANIQUE	121
5.4 PERSPECTIVES	122
5.4.1 MODELISATION AU SOL	122
5.4.2 MODELE D'EXTRAPOLATION	122
5.5 CONCLUSION	123
REFERENCES	124
 CONCLUSION GENERALE	 125
ANNEXE 1 : PARAMETRES DE WEIBULL A L'ECHELLE MENSUELLE	
ANNEXE 2 : ECHANGE RADIATIF	

INTRODUCTION GENERALE

L'homme utilise l'énergie éolienne depuis des milliers d'années. Les Perses de l'Antiquité utilisaient déjà l'énergie éolienne pour pomper l'eau. On a exploré le monde à l'aide de navires entraînés par le vent bien avant l'invention du moteur. Pas plus tard qu'en 1920, plus d'un million d'éoliennes servaient à pomper l'eau et à fournir l'électricité aux entreprises agricoles de l'Amérique du Nord. Dans les années 50, des centaines d'éoliennes étaient encore utilisées en Algérie pour le pompage de l'eau. Aujourd'hui, l'énergie électrique d'origine éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire. En 2005, 6183 MW ont été installés dans les pays de la communauté européenne (1808 MW pour l'Allemagne et 1764 MW pour l'Espagne), soit une production électrique de 83 TWh, égale à 2,8% de la consommation électrique de 2004. Il est prévu d'installer 40 GW à l'horizon 2010. Des puissances nominales sont passées de 10 kW à 4.5 MW pour les installations en pleine mer et répondent ainsi aux besoins énergétiques de plusieurs villes.

Il est clair que pour l'optimisation des systèmes éoliens en un site donné, il est nécessaire de connaître les potentialités énergétiques du site d'installation ainsi que les caractéristiques de la machine.

Même si des études ponctuelles sur les variations temporelles et spatiales de la vitesse du vent ont été publiées dès 1942, le premier atlas des ressources énergétiques éoliennes n'a été réalisé qu'en 1981, à Washington (USA), par le Pacific Northwest Laboratory, [1]. En 1989, une équipe danoise, faisant partie de Riso Laboratory, a publié l'Atlas Européen, [2]. Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés par Said et all, [3] en 1984, suivis par Benssad, en 1985, [4], Hammouche, en 1990 [5], Kasbadji Merzouk en 1994 [6] et F. Youcef Ettoumi en 2002, [7].

Toutefois, la détermination des caractéristiques éoliennes d'un site à la hauteur normalisée de 10 m du sol est insuffisante pour le dimensionnement d'un système éolien. Aussi, attendu que les données vents fournies par les services météorologiques

sont généralement mesurées à la hauteur standard de 10 m du sol, les recherches se sont orientées vers l'extrapolation des paramètres à la hauteur de l'axe de l'éolienne. Nombre de relations empiriques ont ainsi été développées. La théorie de similitude, établie par Monin et Obukov en 1955, constitue la base de tous les travaux sur le profil du vent et l'extrapolation verticale de la vitesse [8].

Les données fournies par 64 stations météorologiques dont 16 situées hors des frontières, permettront l'établissement des cartes des vitesses moyennes annuelle et saisonnières. Les zones particulièrement ventées, ainsi localisées, feront l'objet d'une étude détaillée par projection de données relevées à 3000 m d'altitude à l'aide du logiciel Ailos, [21].

En considérant la limite de Betz, les vitesses cubiques moyennes estimées ont servi l'établissement de la carte de la densité de puissance énergétique récupérable.

Les données relevées sur un pylône d'expérimentation appartenant à l'ONM et installé à Ksar El Chellala seront utilisées, après analyse, pour l'établissement d'un modèle d'extrapolation verticale des données vent valable en milieu semi aride.

Après validation et recensement des limites, les modèles seront utilisés pour l'étude de l'effet de paramètres particuliers.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique et l'exposé des motifs. Après l'introduction d'éléments de physique atmosphérique et la définition des couches et des forces qui régissent le mouvement des masses d'air, on présentera l'essentiel des travaux portant sur l'estimation des potentiels éoliens et en particulier, les différents modèles d'interpolation horizontale et d'extrapolation verticale. Nous terminerons ce chapitre par la position des problèmes qui sont l'objet des présents travaux.

Le second chapitre sera consacré à l'établissement des atlas vent de l'Algérie et à l'estimation du potentiel énergétique éolien utile. Après la présentation du modèle d'ajustement, et l'analyse des données fournies par l'ONM le chapitre abordera l'établissement des atlas vent et le traitement microclimatique des zones ventées. On terminera le chapitre par l'estimation du potentiel énergétique éolien utilisable.

Le troisième chapitre sera consacré à l'extrapolation verticale de la vitesse du vent. Après la présentation du dispositif expérimental et des données recueillies auprès de

l'ONM, on procédera à la modélisation des données valides. Ceci, en passant par la détermination des différentes classes de stabilité.

Le quatrième chapitre porte sur discussion et la synthèse des travaux.. Après la validation des résultats obtenus et la mise en évidence de leurs limites, on procédera à l'étude des effets de certains paramètres en particulier sur le potentiel énergétique utile.

Le cinquième et dernier chapitre est consacré à la présentation d'une application au pompage éolien et aux perspectives ouvertes.

L'application traitée se rapporte au pompage éolien avec les deux modes (électrique et mécanique) sur plusieurs sites sahariens et en considérant différentes classes d'éoliennes.

On terminera le chapitre par la proposition de quelques perspectives susceptibles de constituer une poursuite intéressante des présents travaux en de fournir de meilleurs outils aux concepteurs de systèmes éoliens.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIE ET PROBLEMATIQUE

1.1 INTRODUCTION

Même si des études ponctuelles sur les variations temporelles et spatiales de la vitesse du vent ont été publiées dès 1942, le premier atlas des ressources énergétiques éoliennes n'a été réalisé qu'en 1981 à Washington (USA), par le Pacific Northwest Laboratory, [1]. En 1989, une équipe danoise de Riso Laboratory, a publié l'Atlas Européen, [2]. Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés par Said et al, [3] en 1984, suivis par Benssad, en 1985, [4], Hammouche, en 1990 [5], Kasbadji Merzouk en 1994 [6] et F. Youcef Ettoumi en 2002, [7].

Par ailleurs, la théorie de similitude, qui représente la base de tous les travaux sur le profil du vent et l'extrapolation verticale de la vitesse a été établie par Monin et Obukov en 1955, [8].

La première partie du chapitre sera consacrée à l'introduction d'éléments de physique atmosphérique en définissant les couches ainsi que les forces qui régissent le mouvement des masses d'air. En seconde partie sont présentés l'essentiel des travaux portant sur l'estimation des potentiels éoliens et en particulier, les différents modèles d'interpolation horizontale et d'extrapolation verticale.

Nous terminerons ce chapitre par la position des problèmes qui sont l'objet des présents travaux.

1.2 ELEMENTS DE PHYSIQUE ATMOSPHERIQUE

1.2.1 STRUCTURE ATMOSPHERIQUE

L'atmosphère standard se compose de deux parties essentielles, (figure 1.1), à savoir [9]:

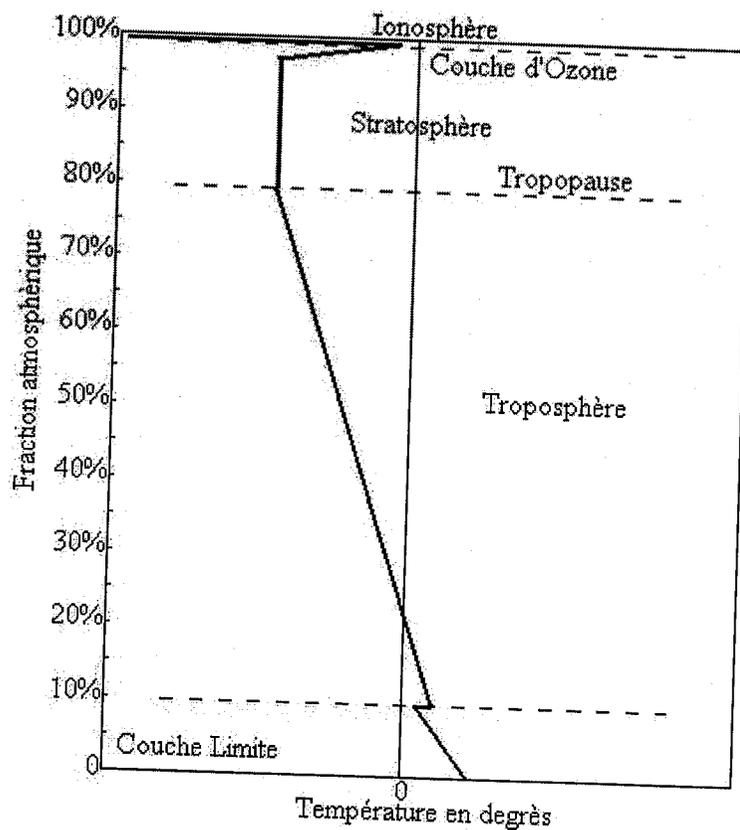


Figure 1.1 : Vue schématique de la couche atmosphérique standard.

- La troposphère dont l'épaisseur représente 80% de la structure atmosphérique, et dont la limite inférieure est le sol et la limite supérieure la tropopause. Son épaisseur est de l'ordre de 10 km ;
- La stratosphère qui représente les 20% au-dessus de la tropopause et dont la limite supérieure est l'ionosphère..

L'air qui constitue l'atmosphère terrestre est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides, concentrés dans la troposphère.

Dans cette région, le déplacement de l'air, par rapport à la surface terrestre, appelé vent résulte de l'équilibre entre les forces en présence.

Pour un observateur à l'arrêt par rapport au sol, il existe quatre forces majeures qui agissent sur une partie élémentaire d'air :

1. la force gravitationnelle ;
2. la force due au gradient de pression ;
3. la force de Coriolis ;
4. et les forces de frottement.

1.2.1.1 Force gravitationnelle

Conséquence de l'attraction mutuelle des corps, cette force intervient à cause de la grande masse de la terre. Elle est dirigée vers le centre de la terre.

1.2.1.2 Force de pression

Dirigées des hautes pressions vers les basses pressions, ces forces sont dues au gradient de pression résultant de l'échauffement inégal de l'air suivant les latitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents. Les forces de pressions sont à l'origine du déplacement des masses d'air.

1.2.1.3 Force de Coriolis

Cette force est le résultat de la rotation de la terre autour de son axe et est perpendiculaire à la vitesse du vent. Elle intervient dans les déplacements atmosphériques en raison de la faiblesse des forces contribuant à mettre l'air en mouvement.

1.2.1.4 Forces de frottement

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air avec le sol. Elles interviennent dans la couche limite atmosphérique. La force gravitationnelle et la force du gradient de pression sont les deux forces qui peuvent initier un mouvement de l'air. Leurs actions se font ressentir près du sol dans une zone appelée couche limite atmosphérique.

1.2.2 COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE

La couche limite atmosphérique, [10] dont l'épaisseur est d'environ 1000m, est la couche qui contient 10% du recouvrement de la masse d'air totale et où le déplacement d'air est régi par le gradient de pression. Elle est contrôlée et modifiée partiellement par le frottement aérodynamique de la surface et par l'importance de la stratification de la densité d'air qui résulte des différences de températures entre la surface du sol et l'air ambiant. Elle est fonction de plusieurs paramètres, tel que :

- la vitesse du vent ;
- la rugosité des sols ;
- et l'ensoleillement variable suivant les lieux et l'heure de la journée.

Près de la surface terrestre, la présence du sol perturbe l'écoulement de l'air et crée une forte turbulence (vent) alors que dans l'atmosphère libre, l'air sous l'action des forces de pression et de Coriolis est uniforme, horizontal et sa vitesse est constante (vent géostrophique). La couche limite atmosphérique (CLA), peut être divisée en deux sous couches, (voir figure 1.2), à savoir la couche limite de surface (CLS) et la Couche limite d'Eckerman.

1.2.2.1 Couche limite de surface (CLS)

Cette couche dont l'épaisseur varie entre 50 et 100m, est la partie basse de la CLA.

Elle est en contact direct avec la surface terrestre. Dans cette région, les effets de la force de Coriolis sont négligeables devant les effets dynamiques engendrés par les frottements au sol ainsi que par la stratification thermique de l'air.

Elle peut être départagée en deux sous couches :

- une sous-couche inférieure située au-dessus du sol où les forces de frottement sont prédominantes, par rapport à la stratification thermique de l'air. Dans ce cas, le mouvement de l'air est turbulent et est directement lié à la rugosité du sol.
- La seconde sous couche se situe juste au-dessus de la première. Les effets de frottement y sont négligeables devant la stratification thermique de l'air.

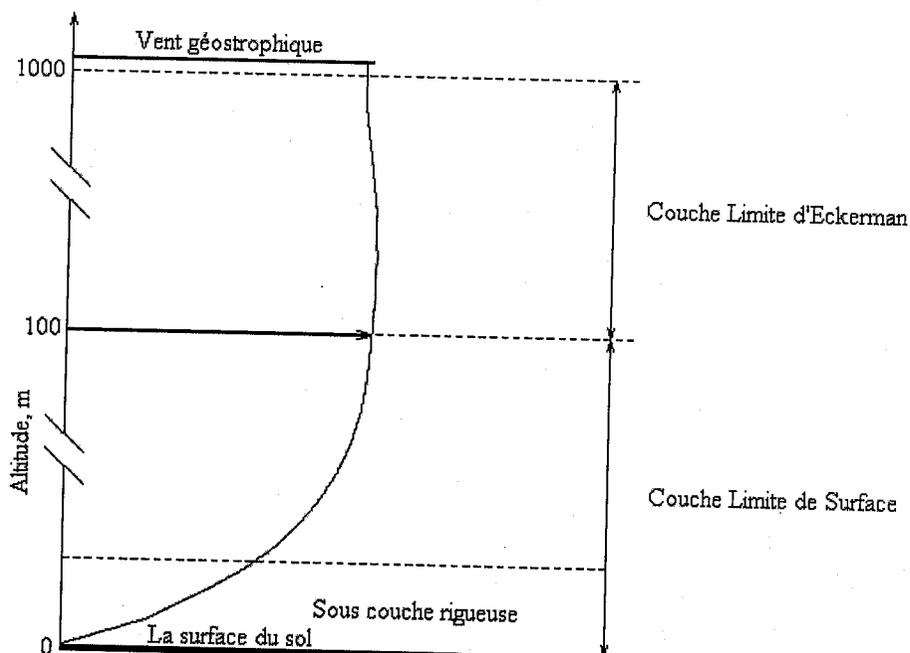


Figure 1.2 Vue schématique de la couche limite atmosphérique.

1.2.2.2 Couche limite d'Eckerman

La couche limite d'Eckerman est la partie supérieure de la couche limite atmosphérique. Le vent est alors influencé par le frottement au sol, la stratification thermique de l'air et la force de Coriolis.

Avec l'altitude, les forces de frottement deviennent négligeables devant l'effet de la force de Coriolis, jusqu'à atteindre le vent géostrophique.

1.2.3 STABILITE ATMOSPHERIQUE

Dans la couche limite de surface, la force de Coriolis est négligeable et l'écoulement de l'air est régi par des turbulences d'origine, [9] :

- mécanique : les turbulences sont générées par la proximité du sol qui modifient le profil de la vitesse du vent par la présence d'obstacle ou de discontinuité au sol.
- Thermique : les turbulences sont générées par la distribution de la température, due essentiellement aux différences de température résultant du réchauffement et refroidissement échange radiatif quotidien de la terre ainsi que de l'écoulement de l'air entre les régions chaudes et froides.

La sensibilité thermique de l'atmosphère est le rapport entre le gradient de température et le gradient adiabatique représentant l'augmentation de la température d'une masse d'air s'élevant adiabatiquement.

On distingue ainsi trois cas :

- les conditions atmosphériques instables ;
- les conditions atmosphériques neutres ;
- Et les conditions atmosphériques stables

1.2.3.1 Conditions atmosphériques instables

Elles interviennent lorsque la température de l'air décroît plus vite que le gradient adiabatique des masses d'air. En s'élevant, ces masses se refroidissent moins vite que l'air environnant. Elles continuent alors à s'élever et sont remplacées par d'autres masses d'air provenant de la couche supérieure.

Le mouvement de l'air est fortement turbulent. Elles se manifestent durant la journée et spécialement pendant le lever du soleil.

1.2.3.2 Conditions neutres

Elles interviennent lorsque le gradient de température et le gradient adiabatique sont de même ordre. Ceci implique qu'il n'y a aucune turbulence d'origine thermique. C'est le cas lorsque le temps est nuageux ou par vent fort. Dans ce cas, la turbulence mécanique domine la turbulence d'origine thermique.

1.2.3.3 Conditions stables

Elles interviennent lorsque la température de l'air décroît moins vite que le gradient adiabatique des masses d'air. Dans ce cas, elles ont tendance à redescendre vers le sol du fait de leur refroidissement rapide, ce qui entraîne la diminution de la turbulence.

La chaleur est rayonnée loin dans l'espace hors atmosphère et la terre est alors plus froide que l'air de recouvrement. Ces conditions se manifestent particulièrement pendant la nuit quand il y a peu de nuages ou quand les vents sont plutôt faibles.

1.2.4 ORIGINE DU VENT

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à l'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre. [11,12].

Ces déplacements sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud.

1.3 CARACTERISATION HORIZONTALE DE LA VITESSE DU VENT

La puissance énergétique éolienne moyenne disponible, associée à une circulation d'une masse d'air à une vitesse $\langle V \rangle$ et agissant sur une surface A , de la roue d'une éolienne s'écrit, [13]:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} \rho A \langle V^3 \rangle \quad 1.1$$

ρ désigne la masse volumique, paramètre variant avec la latitude et la température. Mais généralement considérée comme constante et avoisinant en moyenne 1.25 kg/m^3 . L'expression précédente montre que la puissance disponible varie avec la vitesse cubique moyenne du vent. Cette dernière est déterminée à partir d'un traitement statistique des données vent brutes et le calcul des fréquences à un seuil donné de vitesse, [14]

1.3.1 MODELES D'AJUSTEMENT

De part la forme des nuages de points obtenus, les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle. Les modèles usuels étant :

- la distribution de Weibull ;
- la distribution hybride de Weibull ;
- et la distribution de Rayleigh.

1.3.1.1 Distribution de Weibull

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull Sa densité de probabilité se présente sous la forme, [15]:

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad 1.2$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité $f(V)$ représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées.

k et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre k (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse.

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes.

La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \quad 1.3$$

$$f(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \quad 1.4$$

1.3.1.2 Distribution hybride de Weibull

La distribution hybride de Weibull, [15] est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est supérieure ou égale à 15%. En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit :

$$f(V) = (1 - ff_0) \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad \text{pour } V > 0$$

$$f(V) = ff_0 \quad \text{pour } V = 0 \quad 1.5$$

Où ff_0 représente la fréquence des vents calmes.

1.3.1.3 Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2.

Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(V) = 2 \frac{V}{C^2} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^2\right) \quad 1.6$$

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée.

L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites.

1.3.2 VARIATION SPATIALE (ATLAS DE L'ALGERIE)

Un grand nombre de pays ont établi leurs atlas éoliens. Mis à part l'Atlas américain [1], ces atlas, [2] sont généralement établis à l'aide du logiciel Wasp développé par le Laboratoire Riso au Danemark qui permet, à partir des données mesurées au sol, d'établir une interpolation spatiale tout en prenant en considération les conditions du sol, à savoir, la topographie, la rugosité et les obstacles, [17,18,19 et 20].

Les résultats obtenus sont ensuite extrapolés à l'aide de la loi de puissance à 25 et 60m et permettent ainsi de connaître l'évolution de la vitesse du vent à des altitudes représentant un intérêt énergétique (hauteur de l'hélice, hauteur d'un édifice.....).

Une autre approche porte sur l'utilisation d'un modèle qui, à partir de données mesurées à 3000 m d'altitude par radiosondage, permet une interpolation horizontale avec un pas choisi. On introduit par la suite l'influence des paramètres rencontrés au sol tel que la rugosité et l'altitude par l'extrapolation vers le sol du champ de vitesses obtenu initialement en considérant les conditions neutres de stabilité. Parmi les modèles développés, on peut citer celui d'AILOS, [21 et 22] qui s'adapte bien aux régions accidentées. Ce dernier a été testé en Algérie et a fait l'objet de plusieurs travaux [23, 24 et 25].

1.3.2.1 Travaux de Said et al, [3]

Jusqu' au milieu des années 80, les seules mesures des paramètres du vent disponibles en l'Algérie étaient rapportées dans les bulletins météorologiques de l'ONM qui donnent les vitesses et les fréquences moyennes des vents pour les différentes stations météorologiques [26]. En utilisant ces données, Said [3] a conclu que l'Algérie offrait de faibles possibilités en matière d'utilisation de l'énergie du vent par rapport aux pays limitrofs.

1.3.2.2 Travaux de Bensaad

Avec les mêmes données, Bensaad [4] a proposé une classification des vitesses du vent en fonction de la topographie du pays. En 1988, le même auteur a publié les vitesses et les fréquences moyennes de 22 stations, ainsi que les paramètres de Weibull pour Alger et Oran, [27]. Toutefois ces résultats sont basés sur des mesures effectuées sur de petites périodes de mesure.

1.3.2.3 Atlas Vent de Hammouche

En 1990, Hammouche [5] a édité " l'atlas de vent de l'Algérie " donnant les résultats de l'étude statistique de 37 stations en utilisant le logiciel Wasp utilisé pour la cartographie éolienne de l'Europe, [2].

Les résultats sont donnés sous forme de tableaux regroupant les paramètres annuels de Weibull à 10, 50 et 100 m, les fréquences directionnelles des vitesses pour un pas donné et les vitesses arithmétiques moyennes mensuelles et annuelles.

1.3.2.4 Atlas éolien de Kasbadji-Merzouk

Les résultats de Hammouche ont été utilisés pour établir la première carte du vent de l'Algérie par Kasbadji-Merzouk, [6]. Cette carte a été améliorée par le même auteur en 1999, en portant le nombre de stations à 46 et en utilisant la distribution hybride de Weibull, [28].

En parallèle, le modèle Aiolos a été utilisé pour l'établissement de cartes relatives aux microclimats des régions accidentées en Algérie. Les résultats obtenus ont permis de détecter des zones ventées en Algérie, avec des vitesses moyennes de vent allant jusqu'à 7 m/s, telles que la côte ouest méditerranéenne et des zones isolées comme Sidi Aich, par exemple, [29 et 30].

1.4 EXTRAPOLATION VERTICALE DES PARAMETRES VENT

Pour l'extrapolation verticale des paramètres de la vitesse du vent, on distingue généralement deux cas :

- L'extrapolation verticale de la vitesse du vent à court terme, qui passe par l'extrapolation de la mesure de la vitesse du vent quasi instantanée, moyennée sur une minute ou une heure
- L'extrapolation verticale de la vitesse du vent à long terme liée aux résultats de l'étude statistique en occurrence par l'extrapolation des paramètres de Weibull.

Toutefois, ces expressions sont établies à partir de l'analyse du profil vertical du vent.

1.4.1 PROFIL VERTICAL DE LA VITESSE DU VENT

1.4.1.1 Modèle de similitude de Monin-Obukov

La majorité des travaux sur la détermination du profil vertical du vent dans la couche limite de surface est basée sur la théorie de similitude de Monin-Obukov de 1954, [8] et les travaux de Businger 1955, [31].

Etablie pour des terrains plats et homogènes, elle relie le flux de chaleur turbulent H au produit des grandeurs u_* et θ_* appelées respectivement vitesse de frottement et échelle de température. La théorie de similitude spécifie que les équations respectives du gradient du vent et de la température dans la couche limite atmosphérique sont reliées au flux par l'intermédiaire des fonctions universelles Φ_M et Φ_H . Ces équations se mettent sous la forme suivante suivantes :

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{u_*}{\kappa z} \phi_M \left(\frac{z}{L} \right) \quad 1.7$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = - \frac{H}{\rho c_p \kappa u_* z} \phi_H \left(\frac{z}{L} \right) \quad 1.8$$

Avec :

H : le flux de chaleur sensible, W/m^2

ρ : la masse volumique de l'air, kg/m^3

κ : constante de Von-Karman = 0.41

u_* : vitesse de frottement, m/s

c_p : Chaleur spécifique à pression constante, kJ/kg

L : Longueur de Monin-Obukov, m

z : Altitude, m .

Ces fonctions universelles dépendent de paramètres adimensionnels, fonction de la stabilité verticale de l'atmosphère, à savoir z/L et Ri , (nombre de Richardson représentant le rapport entre le flux de chaleur et le moment turbulent élevé au carré).

La longueur de Monin-Obukov est donnée par :

$$L = \frac{\rho c_p u_*^3 T}{\kappa g H} = \frac{u_*^4 T}{\kappa g \theta_*} \quad 1.9$$

T étant la température ambiante mesurée à 1 m du sol et θ_* l'échelle de température égale à :

$$\theta_* = \frac{H}{\rho c_p u_*} \quad 1.10$$

1.4.1.2 Travaux de Paulson [32]

Les travaux de Paulson C.A. en 1970 [32] portent sur l'intégration des gradients adimensionnels ϕ_M et ϕ_H . Pour cela, il utilise la forme analytique des fonctions implicites des expressions du profil de la vitesse du vent et de la température, données par Panofsky en 1963 [32], à savoir :

$$u(z) = \left(\frac{u_*}{\kappa} \right) \left[\ln \left(\frac{z}{z_o} \right) - \psi_M \right] \quad 1.11$$

$$\theta(z) - \theta_o = \left(\frac{\theta_*}{\kappa} \right) \left[\ln \left(\frac{z}{z_o} \right) - \psi_H \right] \quad 1.12$$

avec z_o , rugosité du sol et θ_o la température mesurée près du sol.

$$\psi_M = \int_0^{z/L} \frac{(1 - \phi_M(\eta))}{\eta} d\eta \quad 1.13$$

$$\psi_H = \int_0^{z/L'} \frac{(1 - \phi_H(\eta'))}{\eta'} d\eta' \quad 1.14$$

η et η' sont égaux à z/L et z/L' selon l'intégration et $L' = PrL$, Pr étant le nombre de Prandlt.

Par ailleurs, l'équation suivante a été proposée par Panofsky en 1963, [32] :

$$\phi_M^4 - \gamma (z/L) \phi_M = 1 \quad 1.15$$

En intégrant les expressions, précédentes, l'auteur obtient :

$$\psi_M = \psi_H = 1 + \phi_M - 3 \ln \phi_M + 2 \ln \left(\frac{1 + \phi_M}{2} \right) + 2 \tan^{-1} \phi_M - \pi/2 + \ln \left(\frac{1 + \phi_M^2}{2} \right) \quad 1.16$$

En utilisant les gradients adimensionnels proposés pour des conditions instables de l'atmosphère par Paulson en 1970, et donnés par [32]:

$$\varphi_M = \left[1 - \gamma \left(\frac{z}{L}\right)\right]^{-1/4} \quad 1.17$$

$$\varphi_H = \left[1 - \gamma \left(\frac{z}{L}\right)\right]^{-1/2} \quad 1.18$$

Il obtient, après intégration :

$$\psi_M = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - \text{Arc tan } g(x) + \frac{\pi}{2} \quad 1.19$$

$$\psi_H = 2 \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) \quad 1.20$$

avec :

$$x = \left(1 - \gamma \frac{z}{L}\right)^{1/4} \quad 1.21$$

γ étant une constante à déterminer à partir des observations. L'auteur propose finalement la valeur $\gamma=16$ et conclut que les résultats obtenus sont en accord avec ceux proposé par Dyer en 1970, [33]

1.4.1.3 Synthèse de Dyer, [33]

Dyer A.J., [33] résume dans son papier (tableaux 1.1 et 1.2), les formules empiriques établies par différents auteurs et compare les différentes expressions des fonctions universelles ϕ pour les conditions stables et instables de l'atmosphère.

Tableau 1.1: Résumé des formules empiriques de ϕ , pour le cas instable, [33]

Auteurs	Validité	Chaleur	Moment
Swinbank, 1964			$\phi_M = (z/L)(1 - \exp(z/L))^{-1}$
Swinbank, 1968	$-0.1 > z/L > -2$	$\phi_H = 0.227(-z/L)^{0.44}$	$\phi_M = 0.613(-z/L)^{-0.2}$
Webb, 1970	$z/L > -0.03$	$\phi_H = 1 + 4.5(z/L)$	$\phi_M = 1 + 4.5(z/L)$
Dyer et al, 1970	$0 > z/L > -1$	$\phi_H = (1 - 16(z/L))^{-1/2}$	$\phi_H = (1 - 16(z/L))^{-1/4}$
Businger et al, 1971	$z/L > -2$	$\phi_H = 0.74(1 - 9(z/L))^{-1/2}$	$\phi_H = (1 - 15(z/L))^{-1/4}$

1.23

Tableau 1.2 : Résumé des formules empiriques de ϕ , pour le cas stable, [33]

Auteurs	Validité	Chaleur	Moment
Webb, 1970	$z/L > -0.03$	$\phi_H = 1 + 5.2 (z/L)$	$\phi_M = 1 + 5.2 (z/L)$
Businger et al, 1971	$z/L > -2$	$\phi_H = 0.74 + 4.7(z/L)$	$\phi_M = 1 + 4.7(z/L)$

1.24

Pour le cas instable, l'auteur déduit que les relations empiriques les plus adaptées sont celles établies par Dyer et al en 1970, à savoir :

$$\phi_M = \left(1 - 16 \left(\frac{z}{L}\right)\right)^{-1/4} \quad \phi_H = \left(1 - 16 \left(\frac{z}{L}\right)\right)^{-1/2} \quad 1.25$$

Prenant ainsi $\gamma=16$ pour les conditions stables, il propose l'expression suivante pour le calcul des fonctions ϕ_M et ϕ_H :

$$\phi_M = \phi_H = 1 + 5 \left(\frac{z}{L}\right) \quad 1.26$$

1.4.1 Travaux de Nieuwstadt, [34]

Nieuwstadt propose une méthode simple pour le calcul de la vitesse de frottement et de l'échelle de température à partir des profils de vitesses et de températures pour différents types de sol. Pour cela il utilise la méthode des moindres carrés. En comparant ses résultats aux méthodes et expérimentations déjà établies, l'auteur trouve une bonne concordance des résultats.

1.4.1.5 Travaux de Van Wijk, [35]

Les travaux de Van Wijk, [35] portent sur le test de la théorie de similitude au niveau de la mer. Alors que l'expression 1.10 résultant de l'intégration de l'équation 1.7 garde sa forme, celle relative au profil de température s'écrirait :

$$T_{air}(z) = T_{sea} - 0.01 * z + \left(\frac{g_*}{\kappa}\right) \left[\ln\left(\frac{z}{z_o}\right) - \psi_H\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad 1.27$$

avec T_{sea} la température à la surface de la mer

L'auteur adopte les formules de Dyer et al établies en 1970 en changeant la gamme de variation de la longueur de Monin-Obukov, à savoir:

- instables pour $L < 0$
- stables pour $L > 0$.

Par ailleurs, la longueur de Monin Obukov devient fonction d'une échelle de température dite virtuelle sous la forme :

$$\theta_{v*} = \theta_* + 0.00061 * T_{air} * q_* \quad 1.28$$

Le second terme est un facteur de correction fonction du flux de chaleur sensible H et du flux de chaleur latente λE . q_* étant l'échelle d'humidité.

Après développement, la longueur de Monin-Obukov à la surface de la mer se mettrait sous la forme :

$$L = \frac{u_*^2 T_{air}}{\lambda g \theta_* \left(1 + 0.00061 * T_{air} \left(\frac{q_*}{\theta_*} \right) \right)} \quad 1.29$$

La validité de ces expressions a été testée suivant différentes classes de stabilité à l'aide de la comparaison des résultats avec des mesures effectuées pendant 04 mois à deux niveaux (18 et 70m sur une plateforme en pleine mer). L'auteur trouve une bonne concordance entre les formules et les mesures.

1.4.1.6 Travaux de B. Lange et al, [36]

Les travaux de Lange portent sur la comparaison de trois modèles d'estimation de la rugosité et de la longueur de Monin-Obukov au niveau de la mer. A partir de données mesurées à 10m, l'auteur extrapole les vitesses à 50m et compare les résultats avec les mesures effectuées à cette altitude.

Les approches utilisées pour la détermination de la longueur de Monin-Obukov sont :

- L est directement déterminée à partir de la mesure de la vitesse de frottement et de la chaleur sensible (approche dite « Sonic »), soit :

$$L = - \frac{u_*^3}{\kappa \frac{g}{T} \text{cov}(W, T)} \quad 1.30$$

W étant la composante verticale du vent et T sa température.

- L est fonction du nombre de Richardson estimé à partir du gradient de la vitesse du vent et de la température de l'air, entre 10 et 50m du sol, (méthode du « Gradient »). Soit :

$$L = \begin{cases} \left(\frac{z'}{Ri} \right) & Ri < 0 \\ \frac{z'(1-5Ri)}{Ri} & 0 < Ri < 0.2 \end{cases} \quad 1.31$$

$$\text{Avec } z' = \frac{(z_1 - z_2)}{\ln(z_1/z_2)} \quad 1.32$$

- L est estimée à partir de la température de l'air, de la température à la surface de la mer et de la vitesse du vent à 10m du sol, en utilisant l'approche de Brun (méthode dite du « Volume »).

Selon l'auteur, les meilleurs résultats sont donnés par cette dernière approche.

1.4.2 EXTRAPOLATION VERTICALE DE LA VITESSE DU VENT

Les premiers travaux portant sur la détermination des formules d'extrapolation de la vitesse du vent d'un niveau z_1 à z_2 ont été effectués par Justus C.G. et A.S. Mikhail qui étudient la variation de la vitesse du vent ainsi que les paramètres de Weibull en 1976, [37 et 38]. Nous allons citer dans les paragraphes suivants les différentes formules proposées par la littérature.

1.4.2.1 Loi logarithmique, [39]

Le profil logarithmique est déduit à partir du rapport du profil vertical du vent. L'extrapolation de la vitesse mesurée V_1 en un point z_1 vers un niveau z_2 , s'écrirait :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z_1}{L}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z_2}{L}\right)} \quad 1.33$$

Avec :

- Ψ_m : fonction universelle
- z_0 : rugosité du sol, m.

Pour des conditions neutres, la fonction universelle étant nulle, l'équation précédente devient :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_o}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_o}\right)} \quad 1.34$$

1.4.2.2 Loi de puissance 1/7

La loi de puissance qui permet l'extrapolation verticale de la vitesse du vent d'un niveau z_1 à un niveau z_2 , se met sous la forme :

$$V(z_2) = V(z_1) \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{\alpha_e} \quad 1.35$$

Avec :

$$\alpha_e = \frac{\varphi_M\left(\frac{z_g}{L}\right)}{\ln\left(\frac{z_g}{z_o}\right) - \Psi_m\left(\frac{z_g}{L}\right)} \quad 1.36$$

z_g étant la moyenne géométrique de la hauteur donnée par :

$$z_g = (z_1 * z_2)^{1/2} \quad 1.37$$

Afin d'éliminer l'effet de l'instabilité atmosphérique liée à la variation de la radiation solaire entre la nuit et le jour, dans l'exposant de la loi de puissance, l'auteur, [37] fait tendre la longueur de Monin-Obukov vers l'infini en supposant l'atmosphère neutre.

Dans ce cas, l'exposant prend une forme logarithmique et s'écrit alors :

$$\alpha_e = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_o}\right)} \quad 1.38$$

L'auteur montre graphiquement que pour des régimes de vent très élevés et pour des altitudes élevées, la loi de puissance 1/7 est la limite du modèle de similitude d'où l'expression, [39] :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^{1/7} \quad 1.39$$

1.4.2.3 Loi de puissance

La dépendance du paramètre de Monin-Obukov de la rugosité du sol a été étudiée par Justus C.G. et al, [37] sous la forme suivante :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^n \quad 1.40$$

n étant un exposant dépendant, selon Reed, de la vitesse mesurée à z_1 .

D'après C.G. Justus et A.S. Mikhail, [37] Reed propose la relation suivante pour l'extrapolation de la vitesse du vent d'un niveau 1 à un niveau 2 :

$$V_2 = \alpha V_1^\beta \quad 1.41$$

avec :

$$\alpha = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^{0.27960 + 0.03265 \ln z_1} \quad 1.42$$

$$\beta = 0.90169 + 0.10528 \ln z_1 - 0.05502 \ln z_2 - 0.006424 \frac{\ln z_1}{\ln z_2} \quad 1.43$$

Malheureusement le formule de Reed montre quelques insuffisances, tel que :

- pour z_1 donné, n ne doit pas varier avec z_2
- V , α , β et n doivent être symétriques et ne doivent pas varier avec z_2 .

Pour éliminer ces anomalies, Justus C.G. et al, 1976, [37] ont proposé une expression pour l'exposant de la loi de puissance permettant l'extrapolation de la vitesse instantanée du vent et donnée par :

$$n = a + b \ln V_1 \quad 1.44$$

Pour une rugosité du sol comprise dans la gamme suivante $0.05 \text{ m} \leq z_0 \leq 0.5 \text{ m}$, il obtiennent alors :

$$a = \frac{0.37}{\left(1 - 0.0881 \ln \left(\frac{z_1}{10} \right) \right)} \quad 1.45$$

$$b = \frac{-0.0881}{\left(1 - 0.0881 \ln \left(\frac{z_1}{10} \right) \right)} \quad 1.46$$

1.4.2.4 Loi de puissance modifiée

Ce modèle a pour but d'allier théorie et expérimentation par l'introduction du paramètre de rugosité dans la loi de puissance. En effet, afin de combiner la précision du modèle théorique et la simplicité du modèle empirique précédent, le modèle de la puissance modifiée a été proposé par Mikhail et Justus C.G. et al en 1981, [40]. Pour une altitude égale à 10m, et pour des conditions neutres de stabilité, l'exposant de la loi de puissance se met sous la forme :

$$n_m = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_o}\right)} - \left[\frac{0.0881}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \right] \ln\left(\frac{V_1}{V_n}\right) \quad 1.47$$

Avec $V_n = 6$ m/s pour des conditions neutres de stabilité

z_g la moyenne géométrique de la hauteur.

En 1985, Mikhail ajuste expérimentalement le modèle précédent et propose l'expression suivante, [41]:

$$n = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_o}\right)} + \frac{0.0881 - 0.0881 \ln V_1}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \quad 1.48$$

1.4.2.5 Loi à coefficient variable

A travers leurs travaux sur le potentiel éolien au Maroc, H. Nfaoui et al [42] optent pour l'utilisation d'une formule empirique dont l'exposant est à coefficient variable, fonction de la rugosité. Cette expression a été proposée lors de l'établissement de l'atlas marocain, [43], soit :

$$n = \frac{x - 0.0881 \ln(V_1)}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \quad 1.49$$

En prenant pour :

$$z_0 = 0 \quad - 0.005 \text{ m} \quad x = 0.25$$

$$z_0 = 0.005 \text{ - } 0.05 \text{ m} \quad x = 0.31$$

$$z_0 = 0.05 \text{ - } 0.5 \text{ m} \quad x = 0.37$$

$$z_0 = 0.5 \text{ - } 4 \text{ m} \quad x = 0.48$$

On remarque que le coefficient varie en fonction de la classe de rugosité.

1.4.3 EXTRAPOLATION DES PARAMETRES DE WEIBULL

1.4.3.1 Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïel, [37]

En 1976, Justus et Mikhaïel ont proposé, pour une référence d'altitude initiale égale à 10m, les formules d'extrapolation suivantes :

$$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1 - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_2}{10}\right)} \right] \quad 1.50$$

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^m \quad 1.51$$

Avec

$$m = \left[\frac{0.37 - 0.0881 \ln(C_1)}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \right] \quad 1.52$$

1.4.3.2 Modèle modifié d'extrapolation de Justus, [44]

Repris par Poje [44], Justus a modifié en 1978, l'expression d'extrapolation des paramètres de Weibull en introduisant la rugosité du sol, tel que :

$$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \right] \quad 1.53$$

et

$$\left(\frac{C_2}{C_1}\right) = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{m_1} \quad 1.54$$

Avec :

$$m_1 = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_o}\right)} - 0.0881 \ln\left(\frac{C_1}{6}\right) \quad 1.55$$

Et

$$z_g = (z_1 * z_2)^{1/2}$$

1.4.3.3 Modèle modifié d'extrapolation de Mikhaïel, [41]

Pour une extrapolation à partir d'un niveau quelconque, Mikhaïel en 1985, reprend les expressions d'extrapolation des paramètres proposés en 1976, en modifiant l'exposant tel que :

$$m = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_o}\right)} + \frac{0.0881(1 - \ln C_1)}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \quad 1.56$$

1.4.3.4 Modèle d'extrapolation de Spéra et al, [41]

Mikhaïel A.S., en 1985, [41] expose la formule de Spéra et Richardson qui introduit le paramètre de rugosité du sol z_o , en proposant une extrapolation du paramètre de forme qui se présente sous la forme :

$$k_2 = k_1 \frac{1 - \alpha_o \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_r}\right)}{\ln V_h}}{1 - \alpha_o \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_r}\right)}{\ln V_h}} \quad 1.57$$

avec :

$$\alpha_o = \left(\frac{z_o}{z_r}\right)^{0.2} \quad 1.58$$

z_r étant la hauteur de référence égale à 10m et V_h la vitesse du vent homogène égal à V_j . Par ailleurs, l'exposant m_c de l'extrapolation du facteur d'échelle est donné par :

$$m_c = \alpha_o \frac{1 - \frac{\ln C_1}{\ln V_h}}{1 - \frac{\alpha_o \ln(z_1/z_r)}{\ln V_h}} \quad 1.59$$

1.4.4 TEST DES MODELES D'EXTRAPOLATION

1.4.4.1 Test de Peterson, [38]

L'auteur évalue la densité de puissance à 56 m d'altitude par l'utilisation de quatre modèles d'extrapolation différentes, à savoir :

- La loi de puissance 1/7, (équation 1.38) ;
- La loi de puissance (équations 1.47, 1.48) ;
- En déterminant l'exposant localement, à partir de la connaissance de deux points de mesure 7 et 23m ;
- Graphiquement, en utilisant le graphe donné par Plate et donnant P_{50}/P_5 et P_{50}/P_{10} en fonction de la rugosité locale du sol.

L'auteur teste ces modèles sur six tours installées dans 06 états des Etats-Unis et conclue que :

- Lorsque la rugosité est faible, l'extrapolation de la vitesse du vent n'est pas sensible à la variation du terrain ;
- Le modèle de Justus et al n'est pas adéquat, les incertitudes calculées lors de l'estimation de la puissance énergétique sont trop importantes ;
- La loi de puissance 1/7 donne de bons résultats lorsque la rugosité du sol est très faible par rapport à l'altitude d'extrapolation.

1.4.4.2 Test de Mikhaïel, [41]

L'auteur teste les performances des modèles suivants :

- lois de puissance 1/7, (équations 1.35 et 1.36)
- Loi logarithmique, (équation 1.34)
- Loi de puissance, (équations 1.44, 1.45 et 1.46)
- Loi de puissance modifiée, (équations 1.47, 1.48 et 1.49).

Sur trois sites américains (Colorado, Washington et Oklahoma). Il compare les vitesses de vent ainsi que les paramètres de Weibull extrapolés avec des mesures locales effectuées à plusieurs niveaux des pylônes. L'auteur conclue que pour les vitesses du vent extrapolées, le modèle de la loi de puissance modifiée présente l'écart type le plus faible (16.6%), et s'adapte le mieux aux régions. Par ailleurs les résultats de l'extrapolation du facteur d'échelle, différent d'un site à un autre (respectivement <2%, 6% et 28%) alors que ceux relatifs au facteur de forme sont proches.

1.4.4.3 Test de Poje, [43]

Pour l'établissement des atlas vent de la Yougoslavie, l'auteur a testé les modèles d'extrapolation des paramètres de Weibull de :

- Mikhaïel (équations 1.50, 151 et 1.58) ;
- Spéra et al (équations 1.56 à 1.58), la vitesse de vent homogène étant supposée égale à $V_h = 67$ m/s

En prenant pour référence le modèle de Justus (équations 153 à 1.55).

Sur les 32 stations traitées, les résultats différent énormément. A 50m d'altitude et pour un aérogénérateur donné, les puissances calculées par le modèle de Mikhaïel sont surestimées et atteignent des différences allant jusqu'à 28636 kWh. Même si les différences sont moindres, la méthode de Spéra, ne s'adapte pas à certains sites, les écarts enregistrés par rapport à la méthode de Justus varient de 100 à 1000 kWh. L'auteur propose d'établir un modèle spécifique pour chaque site considéré.

1.4.4.4 Test de Pneumatikos, [45]

Dans le cadre des recherches de sites ventés susceptibles de recevoir des installations éoliennes en Grèce, l'auteur teste les performances de quatre modèles d'extrapolation, à savoir :

- lois de puissance 1/7, (équations 1.35 et 1.36)
- Loi de puissance, (équation 1.44, 1.45 et 1.46)
- Détermination de la vitesse du vent à partir de l'expression du profil du vent suivant les classe de stabilité, et extrapolation selon les classes. (équation 1.11 à 1.21).

- Détermination de la vitesse du vent à partir de l'expression du profil du vent en supposant une stabilité neutre (équivalent à la loi logarithmique, (équation 1.34).

Les résultats obtenus montrent que l'extrapolation de la vitesse du vent de 8 à 32 m d'altitude, sous-estime les valeurs de 68 à 87% , selon les modèles.

L'exposant de la loi de puissance déterminé par l'auteur varie de 0.25 à 0.59 et est bien loin de l'exposant de la loi de puissance $1/7$, (soit 0.142).

1.5 AVANCEES TECHNOLOGIQUES

1.5.1 EXPANSION DES APPLICATIONS EOLIENNES

L'utilisation des aérogénérateurs est en pleine croissance dans le monde entier. La plus grande partie des investissements a été réalisée en Europe, où les coûts de production conventionnelle de l'électricité sont plus élevés et où l'on veut davantage réduire la pollution attribuable à l'émission des gaz à effet de serre et réduire la dépendance énergétique.

L'industrie mondiale des éoliennes comprend environ une douzaine de grandes entreprises situées en Europe. Au Danemark, l'industrie des éoliennes est supérieure à la fois à l'industrie de la pêche et à l'industrie agricole, [45]. Le développement technique des éoliennes modernes emprunte beaucoup à l'aviation. L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propre durables et auxquels on peut se fier à long terme.

L'aérodynamique et l'ingénierie modernes ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales. Après avoir réalisé des prouesses techniques avec les éoliennes à axe vertical, les inventeurs continuent d'explorer des machines à vent, parfois étonnantes, comme les turbines à concentrateur de flux.

Mais c'est bien l'éolienne à axe horizontal qui, comme un petit avion suspendu dans les airs, constitue la quasi-totalité des éoliennes installées. Les hélices modernes sont profilées comme celles des avions. Le système du pas variable automatique permet d'ajuster la rotation du rotor à la vitesse des vents.

1.5.2 EOLIENNES DE POMPAGES

1.5.2.1 *Éoliennes de pompage mécanique*

L'éolienne de pompage mécanique traditionnelle utilise un système bielle manivelle monté sur l'arbre du rotor. Elle possède normalement plusieurs pales montées sur un rotor qui tourne relativement lentement.

Le système bielle manivelle transforme le mouvement rotatif de la bielle en un mouvement rectiligne alternatif qui commande la pompe à piston installée dans un puits ou un étang, à la base de l'éolienne.

Le mouvement alternatif du piston de la pompe assure le pompage de l'eau. Les éoliennes de pompage mécaniques ont leurs avantages et leurs inconvénients. Elles sont généralement fiables, d'un entretien facile et d'un coût abordable. La contrainte principale réside dans le fait qu'elles doivent être installées directement au-dessus du puits ou de l'étang, ceci même si l'eau doit être utilisée à une certaine distance de ce puits. En effet, le point faible de ce système est la tige qui ne saurait dépasser des hauteurs de 20 m, à cause des contraintes mécaniques.

1.5.2.2 *Éoliennes de pompage électrique*

Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de se trouver près de la source d'approvisionnement en eau.

Le système éolien électrique commande une pompe électrique, (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source (un puits ou un étang) et la refoule à l'endroit de son utilisation (un abreuvoir à bétail, un étang ou un système d'irrigation).

La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement.

Les éoliennes de pompage électriques ne comprennent pas de batteries. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie.

En figure 1.3 est donné le schéma des systèmes de pompage mécanique et électrique pour le pompage de l'eau.

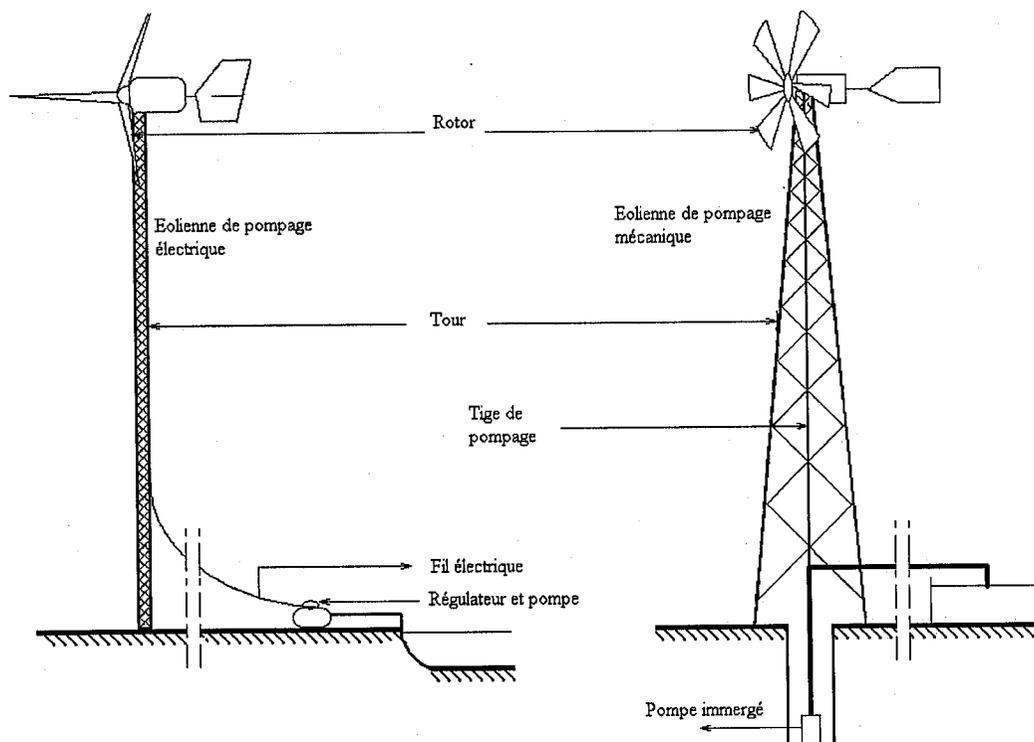


Figure 1.3 : Représentation schématique des systèmes éoliens mécanique et électrique pour le pompage de l'eau, [46].

1.5.3 INSTALLATIONS DE GRANDES PUISSANCES

1.5.3.1 Fermes éoliennes

Elles sont constituées par un grand nombre d'éoliennes destinées à la production d'électricité. Ces éoliennes sont bien plus grandes, (le diamètre de l'hélice vont de 20 à 70m, les tours atteignent 50 à 100m de hauteur) et produisent autour de 500 kW. Dans les fermes éoliennes des centaines de machines fonctionnent ensemble et suffisent pour alimenter une ville en électricité, (voire figure 1.4).

1.5.3.2 Aérogénérateurs de grande puissance

La tendance actuelle porte sur l'installation d'aérogénérateurs de grande puissance afin d'éliminer l'occupation de surface générée par les fermes éoliennes. Une éolienne de forte puissance (1 Mégawatt) a une hauteur de 60m et le diamètre du rotor sera de 55m. En pleine mer, la puissance nominale d'un aérogénérateur dépasse les 4 MW. Leurs installations en off-shore évitent les problèmes sonores que cause la rotation des hélices.

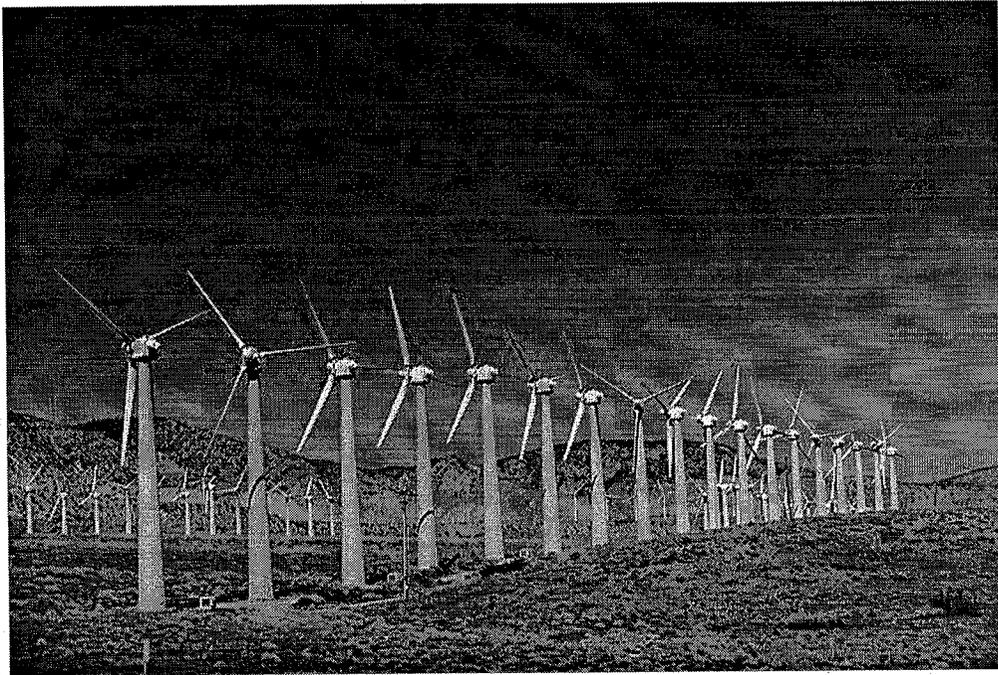


Figure 1.4. : Ferme éolienne

1.5.4 SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Aujourd'hui les avancées technologiques en matière de matériaux ont permis l'installation en Allemagne d'un aérogénérateur d'une puissance égale à 4 MW dont la production d'électricité répond à la demande de 400 foyers. Les différentes avancées se font grâce à des études faites sur les matériaux utilisés pour la conception des aérogénérateurs.

1.5.4.1 Matériau du support

Les pylônes peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils peuvent être autoporteurs et auto-résistants ou haubanés. Si l'haubanage permet de réduire les dimensions du mât, par contre il pénalise l'emprise au sol. Actuellement les mats en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de grande puissance.

Les problèmes de corrosion et de montage sont les paramètres principaux dans le choix de la solution à adopter, [47].

1.5.4.2 Matériaux des pales

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, particulièrement ceux dus aux pales d'hélicoptères.

Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux.

En effet, c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences :

- ils doivent être assez légers,
- résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion,
- et de mise en oeuvre ou d'usinage simple.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

- le bois : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.

- le lamellé-collé : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.

- les alliages d'aluminium pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.

- les matériaux composites : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées qui sont :

- la pale vrillée,
- la corde évolutive,
- le changement de profil, [48].

1.6 POSITION DU PROBLEME

On se propose dans la présente étude de fournir la tout concepteur ou installateur de systèmes éoliens, les outils nécessaires au choix et à l'optimisation de sa machine en tout point du territoire et ceci en :

- établissant les atlas permettant de détecter les zones ventées
- déterminant les puissances éoliennes disponibles au niveau de l'hélice par extrapolation des paramètres de Weibull afin de calculer les puissances réellement récupérables à la sortie de la machine.

1.6.1 INTERPOLATION HORIZONTALE

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

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

1.6.2 EXTRAPOLATION VERTICALE

Le dimensionnement de tout système éolien passe nécessairement par la connaissance de la vitesse du vent et ses variations au niveau de l'hélice.

Pour obtenir des données relatives à la hauteur désirée, il existe deux méthodes possibles, à savoir :

- effectuer une campagne de mesure sur une période suffisamment longue (au moins huit années), à la hauteur d'installation des hélices d'éoliennes, ce qui n'est pas concevable pour de petites applications ;
- procéder par une extrapolation verticale de données relevées à 10 mètres du sol à partir de modèles empiriques déjà établis.

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

Toutefois, ces formules empiriques ont été développées pour des climats particuliers et des sites appropriés aux installations éoliennes. Raison pour laquelle plusieurs travaux ont été réalisés par différents auteurs, pour déterminer la formule la plus adaptée à leurs conditions propres.

Par ailleurs, ils ne répondent pas aux spécificités du climat et terrains des hauts plateaux algériens. Dans ce sillage, l'objectif de la seconde partie de l'étude est :

- tester les différents modèles empiriques pour un terrain semi-aride en utilisant les paramètres vent prélevés, à plusieurs niveaux du pylône de Ksar El Chellala.
- Déterminer un modèle adéquat d'extrapolation de la vitesse du vent et des paramètres de Weibull au climat semi-aride
- Valider le modèle à travers la littérature et en utilisant des données qui n'ont pas été utilisées pour l'établissement de la formule.
- Etablir l'atlas corrigé des vitesses et puissance disponible du vent à 10 et 50m.

1.7 CONCLUSION

L'étude bibliographique a permis de passer en revue les principaux travaux de recherche se rapportant à la caractérisation horizontale et verticale de la vitesse du vent.

L'étude a été affinée par la présentation des travaux de comparaison entre les modèles empiriques effectués par plusieurs auteurs. Les principaux travaux de recherche portant sur le potentiel énergétique éolien en Algérie ont également été présentés. La fin du chapitre a été consacrée à la position des problèmes objet des présents travaux.

REFERENCES

1. Pacific Northwest Laboratory, « Wind Energy Ressource Atlases », Vol. 1 et 2 PNL-3194. Pacific Northwest Laboratory Richland, Washington, D.C., USA, 1981
2. Troen I. et E.L. Petersen, « European Wind Atlas », Riso National Laboratory, Roskilde, Danmark, 1989.
3. Said M et A. Ibrahim, « Energy in the Arab World » Energy, N° 9-3, pp. 217-38, 1984.
4. Bensaid H., « The Algerian Programme on Wind Energy ». Proceeding of WEAC, pp. 21-27, Oxford, 1985.
5. Hammouche R., « Atlas Vent de l'Algérie/ONM ». Office des Publications Universitaires (OPU), Alger 1990.
6. Kasbadji Merzouk N., « An Evaluation of Wind Energy Potential in Algeria ». Proceeding of EWEC'94 congress, Thessaloniki, Grèce, 1994.
7. Youcef Ettoumi F., « Ressources Energétiques Renouvelables en Algérie », Thèse de Doctorat d'état, USTHB, 2002.
8. Monin A.S. et A.M. Obukov, « Basic Regularity in Turbulent Mixing Surfaces Layer of the Atmospheric », Akad. Nauk. S.S.S.R., Trud Geof. Inst, 24, 151, 1954.
9. <http://www.rzs-hm.si/people/Mark.Zagar/work/arpege/lien5-4-3.html>
10. Turbelin G., « Modélisation de la Structure Atmosphérique en vue de l'Etude du Chargement Aérodynamique des Structures Soumises aux Effets de Vent ». Université d'Evry Val d'Essone, U.F.R. De sciences et Technologie, 2000.
11. Carson D.J., « Boundary Layer Meteorology, Introduction Lectures ». Workshop on An Atmospheric Area Modelling, ICTP, 1990.
12. Ensalem R., « Climatologie Générale », Ed. ENP, Alger 1989.
13. Cuntry G., « Eoliennes et Aérogénérateurs », EDISUD/Technologie douce, 1979.
14. Kasbadji Merzouk N. et H. Daaou, « Atlas Energétique Eolien de l'Algérie », SIPE5, Béchar, Algérie 2000.
15. Solari G., « Wind Speeds Statistics », Collège on atmospheric Boundary Layer and Air Pollution. ICTP, Trieste, Italie 1994.
16. Takle E.S. et J.M. Brown, « Note on the Use of Weibull Statistic to Characterize Wind Speed Data ». Journal of applied Meteorology, Vol. 17, 1978.

17. Phillips, G.T., « A Preliminary Users Guide for the NOABL Objectives Analysis Code », rapport interne, Science Application Inc., California, USA. 1979.
18. Peterson E.L. et Ib Troen, « Development of a method for Wind Climate Analysis for Non-mountains Terrain in Europe » European Wind Energy Conference, Hamburg, 1984.
19. Peterson E.L., Ib Troen et N. G. Motersen, « The European Wind Energy Resources, Recueil European Community Wind Energy Conference and Exhibition » Denmark, 1988.
20. Troen Ib, « On Diagnostic Wind Field Models ». College on atmospheric Boundary Physics', ICTP, Trieste, 1990.
21. Lalas D. P. Wind « Energy Estimation and Sitting in Complex Terrain » Int. Jour. Solar Energy, vol. 3, pp. 43-71, 1985
22. Botta G., R. Castagna, S. Magri et A. Virgil, « A Preliminary Evaluation of the Wind Resources in Central and Southern Italy ». Proceeding of EWEC'94 congress, Thessaloniki, Grèce, 1994.
23. Kasbadji Merzouk N., M. Merzouk et N. Messen, « Mass Consistent Model Application to the Desertification Phenomena study in the High Plains of Algeria », Inter. Journal of Renewable Energy, N°28 , pp 655-663, 2003.
24. Kasbadji Merzouk N., H. Daaou et S. Haddouche, « Evaluation of Wind Energy Potential for Windy Micro-area Using a Mass Consistent Model », VII World Renewable Energy Congress, Cologne Allemagne, 2002.
25. Daaou Nedjari H., S. Haddouche et N. Kasbadji Merzouk, « Caractérisation Eolienne du Site 'Les Grands Vents 'A l'Aide d'un Modèle Numérique » International Congress on the Renewable Energies and the Environment, Sousse, Tunisie 2005.
26. Bulletin Climatologique de l'Algérie, Office National de Météorologie, Alger, 1975.
27. Bensaid H., « Wind Speed and Wind Energy Potential », Proceeding of Possibilité d'utilisation des énergies éoliennes dans le monde arabe, Alger. 1988.
28. Kasbadji Merzouk N., « Atlas vent de l'Algérie, Résultats Préliminaires ». Revue des Energies Renouvelables, numéro spéciale JNVER99, pp 209-214, 1999.

29. Kasbadji Merzouk N. et N. Messen. « Contribution à l'Etude du Vent en Rapport avec l'Erosion Eolienne dans les Zones Arides » Revue Energies Renouvelables, numéro Spéciale Zones Arides, 2002.
30. Nedjari Daaou, H., S. Haddouche et N. Kasbadji Merzouk, « Amélioration de la carte des vents à partir des données interpolées » Revue Energies Renouvelables, numéro Spécial, Energies Photovoltaïque et éolienne, pp 119-124., 2003.
31. Businger, J.A. « On the Structure of the Atmospheric Surface Layer ». Journal. of Meteorology, vol. 12, pp 353:561, 1955.
32. Paulson C.A., « The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer » Journal of Applied Meteorology, 1970.
33. Dyer A.J., « A Review of Flux Profile Relationships ». Boundary Layer Meteorology, 7 363-372, 1974..
34. Nieuwstadt F., « The Computation of the Friction Velocity u^* and the Temperature scale T^* from Temperature and Wind Velocity Profiles by Least Square Method » Boundary layer meteorology 14, 235-246, 1978.
35. Van Wijk A.J.M., A.C.M. Beljaars, A.A. Holstag et W.C. Turkenburg, « Evaluation of a Stability Corrections in Wind Speed Profiles over the North Sea », J. of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 33 pp 551-566, 1990.
36. Lange B., S. Larsen, J. Hojstrup et R. Barthelmie, « Modelling the Vertical Wind Speed and Turbulence Intensity Profiles at Prospective Offshore Wind Farm Sites » Proceeding of Wind power 2002, Paris, France 2002.
37. Justus C.G. et A. Mikhail, « Height Variation of Wind speed and Wind Distributions Statistics ». Geophysical Research Letters, vol. 3, N° 5, 1976.
38. Peterson E., « On the Use of Power Laws Estimates of Wind Power Potential » J. of Applied Meteorology, vol. 17, pp 390:394, 1978.
39. Tennekes A., « The logarithmic wind profile » J. of Atmospheric sciences, vol. 30, pp : 234:238, 1973.
40. Mikhail A.S. et C.G. Justus, « Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis » Wind Engineering, Vol. 5, N° 02, 1981.
41. Mikhail A.S, « Height Extrapolation of Wind Data » Transaction of ASME, vol. 107, pp. 10- 14, 1985.

42. Nfaoui H., J. Bahraoui Buret et A.A.M. Sayigh, « Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Morocco », Solar Energy, N°1, pp 51-60, 1998.
43. Knidiri F, A. Laaouina, M. Fabre et A. Wyatt, « L'énergies éolienne au Maroc » rapport interne au CDER, 1986.
44. Poje S. et B. Cividini, « Assessment of Wind Energy Potential in Croatia » Solar Energy vol.41 N°6 pp 543 554, 1988.
45. Pneumatikos J.D., « An Experimental Test of the Empirical Formula Commonly Used to Represent Wind Speed Profiles near Ground » Renewable energy, vol11, N° 5/6, pp 423-428, 1991.
46. <http://www.canren.gc.ca/app/filerepository/>
47. <http://www.windpower.org/fr/tour/wres/>
48. http://perso.wanadoo.fr/badkiller.alex/Fonctionnement_eolienne.htm/

CHAPITRE 2

ETABLISSEMENT DE L'ATLAS EOLIEN DE L'ALGERIE

2.1 INTRODUCTION

Le but du présent chapitre est d'arriver à l'établissement de l'atlas vent de l'Algérie. En premier lieu, on donnera toutes les définitions des paramètres nécessaires à la caractérisation d'un site du point de vue éolien.

En second lieu, l'étude statistique utilisée pour l'étude des mesures vent est présentée et utilisée pour la détermination des vitesses moyennes annuelles du vent en Algérie. Ceci a permis l'établissement des cartes vent de l'Algérie à l'échelle annuelle et saisonnière.

Enfin un modèle d'estimation des vitesses du vent pour des sites accidentés, à partir de données mesurées à 300m d'altitude, est présenté et appliqué à des régions du nord et des hauts plateaux Ceci a permis la cartographie microclimatique de zones particulièrement ventées en Algérie.

La dernière partie est consacrée à l'estimation du potentiel énergétique éolien du pays et au tracé de l'atlas de la densité d'énergie récupérable en Algérie à 10 m d'altitude.

Enfin, la démarche utile à la détermination de la puissance éolienne réellement utilisable en fonction des limites de fonctionnement des aérogénérateurs et des paramètres énergétiques éoliennes des sites d'implantation est exposée.

2.2 VARIATION TEMPORELLE DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT

Pour connaître l'importance du vent en un point donné, il suffit de déterminer la vitesse moyenne arithmétique annuelle pondérée, calculée sur un échantillon de 10 années minimum. Cette dernière donne un ordre de grandeur de la vitesse du vent sur un site donné. Par ailleurs, les vents varient différemment selon la saison, la journée et l'année. Cette variation doit être déterminée puisqu'elle permet d'adapter le dimensionnement des systèmes éoliens aux besoins énergétiques qui peuvent varier

suivant les saisons, la journée ou l'année. La variation saisonnière est déterminée par l'établissement d'études à l'échelle mensuelle. La variation diurne est établie à l'échelle horaire. La variation pluriannuelle requiert de longues séries traitées à l'échelle de l'année.

2.2.1 MESURE INSTANTANEE DE LA VITESSE DU VENT

En figures 2.1 et 2.2 sont représentés respectivement, les tracés de la vitesse et de la direction du vent enregistrées à la station de mesures des paramètres météorologiques de Bouzaréah, [1]. On remarque que la vitesse et la direction du vent varient de façon aléatoire.

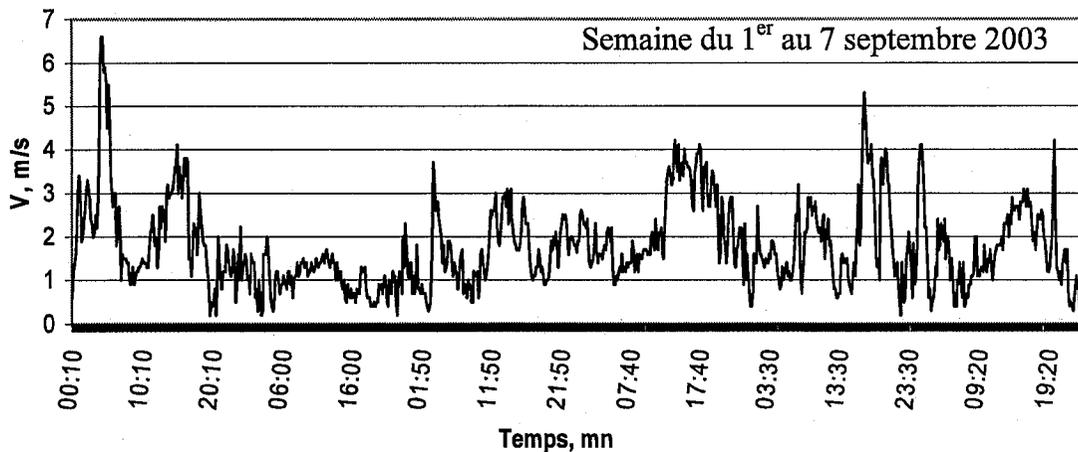


Figure 2.1 Mesures instantanées de la vitesse du vent enregistrées à Bouzaréah.

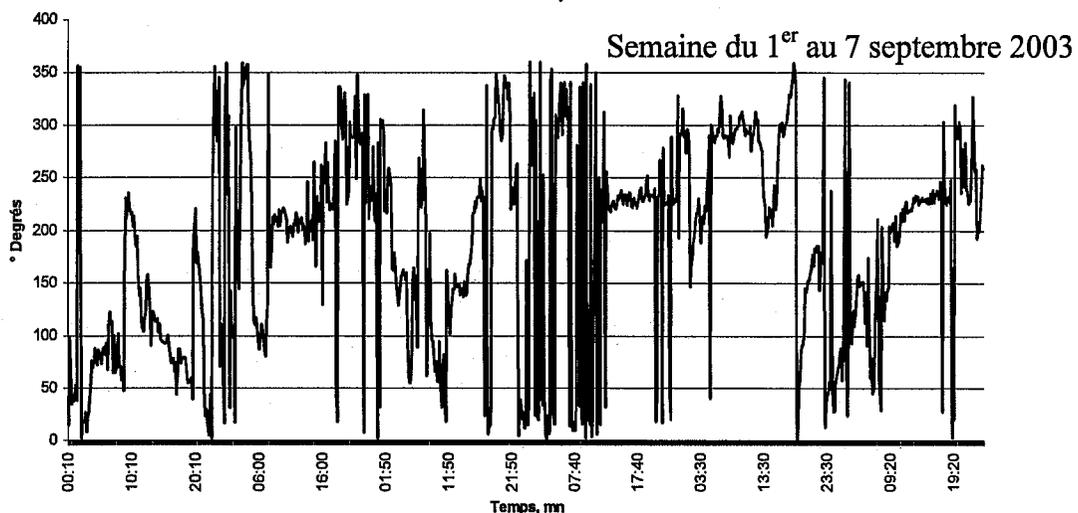


Figure 2.2 Mesures instantanées de la direction du vent enregistrées à Bouzaréah.

2.2.2 VARIATION JOURNALIERE MOYENNE DE LA VITESSE DU VENT

La variation journalière de la vitesse du vent est due aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire. La vitesse moyenne du vent varie peu la nuit et augmente pendant la journée à partir du lever du soleil. La figure 2.3 montre la variation journalière moyenne de la vitesse pour les stations de Djelfa et InOussera [2]. Pour ces deux sites voisins, les maximums sont atteints vers 15 h à InOussera et entre 15h et 18 h à Djelfa.

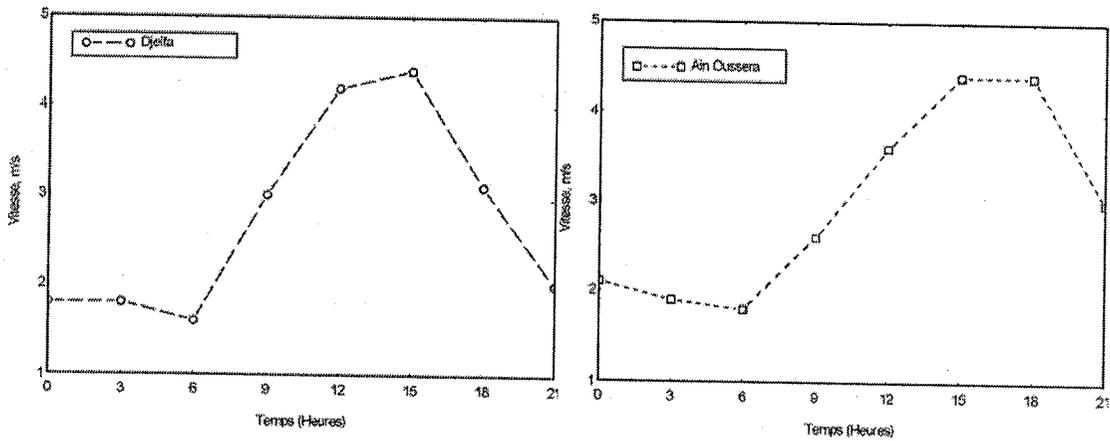


Figure 2.3 :Variation journalière de la vitesse moyenne du vent pour les sites de Djelfa et InOussera.

2.2.3 VARIATION SAISONNIERE DE LA VITESSE DU VENT

Les variations saisonnières ou mensuelles de la vitesse du vent dépendent du lieu géographique et différent d'un site à un autre. Seuls les relevés météorologiques des paramètres vent sur une longue période peuvent caractériser ces variations. La figure 2.4 montre la variation mensuelle de la vitesse du vent pour les sites d'Oran et Tébessa. On remarque que l'amplitude des variations est nettement supérieure à Oran.

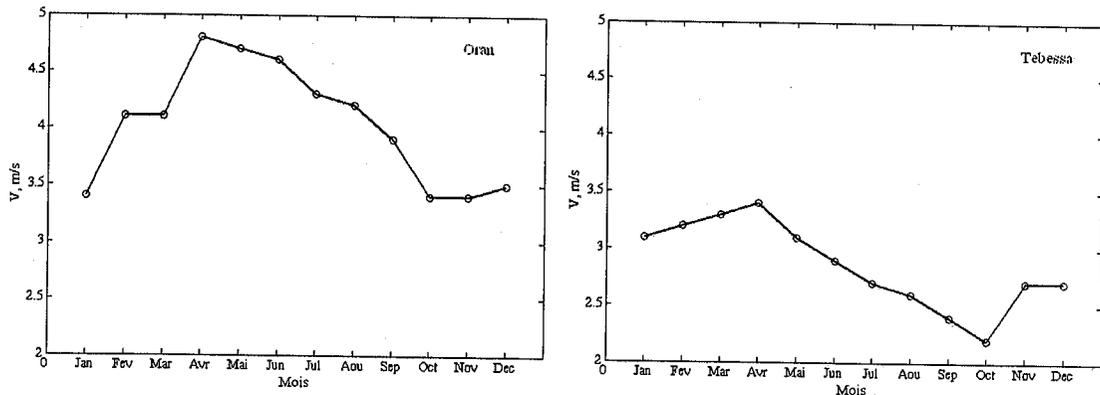


Figure 2.4:Variation mensuelle de la vitesse moyenne du vent pour Oran et Tébessa.

2.2.4 VARIATION PLURIANNUELLE DE LA VITESSE DU VENT

La vitesse moyenne annuelle du vent diffère d'une année à l'autre, (figure 2.5). On remarque que le site d'Oran présente une variation pseudo-périodique avec une période de l'ordre de trois ans alors que le site de Tébessa présente une période de l'ordre de dix ans. Période qui ne pourrait être confirmée que par l'examen de trente à quarante années de données. On remarque aussi que l'année 1985 semble être un « accident ». Afin de bien caractériser le potentiel énergétique éolien, il est nécessaire d'étudier le phénomène sur une période de 10 années minimum.

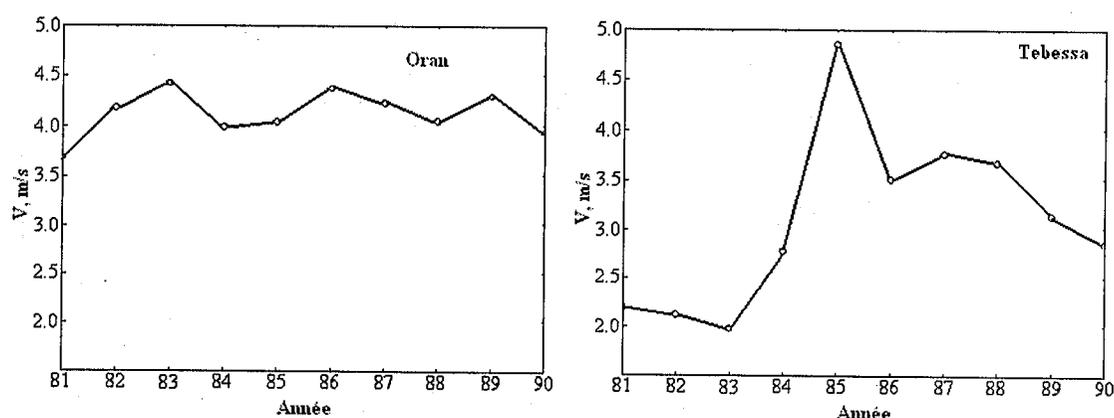


Figure 2.5 : Variation pluriannuelle de la vitesse moyenne du vent à Oran et Tébessa.

2.3 ETUDE STATISTIQUE

En plus de la méthode de la moyenne arithmétique pondérée, les trois méthodes statistiques utilisées pour la modélisation des distributions statique du vent présentées en chapitre 1, sont :

- la loi de Weibull, (équation 1.2), [3] ;
- la loi hybride de Weibull, (équation 1.5), [4] ;
- la loi de Rayleigh, (équation 1.5), [3].

Lois utilisées pour la détermination des facteurs éoliens caractérisant un site, à savoir :

- la vitesse moyenne du vent
- la vitesse cubique moyenne du vent
- la variance de la distribution des vitesses
- le facteur de puissance
- l'indice de variation.

2.3.1 DEFINITION DES PARAMETRES VENT

2.3.1.1 Vitesse moyenne, vitesse cubique moyenne et variance

Partant des mesures vent (vitesse et direction), la vitesse moyenne pondérée s'écrit :

$$\langle V \rangle = \int_0^{\infty} V f(V) dV \tag{2.1}$$

Alors que la vitesse cubique moyenne se détermine par :

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV \tag{2.2}$$

La variance est donné par :

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (V - \langle V \rangle)^2 f(V) dV \tag{2.3}$$

Les expressions relatives aux différents modèles sont portées dans le tableau 2.1.

Γ étant la fonction gamma donnée par :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt \tag{2.4}$$

Tableau 2.1 : Expressions des vitesses moyennes et cubiques moyennes ainsi que les variances selon le modèle utilisé.

Distributions	$\langle V \rangle$	$\langle V^3 \rangle$	σ^2
Arithmétique	$\sum_{i=1}^n f_i V_i$	$\sum_{i=1}^n f_i V_i^3$	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i (V_i - \langle V \rangle)^2$
Weibull	$C \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$	$C^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$
Hybride Weibull	$(1 - ff_0) C \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$(1 - ff_0) C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$	$(1 - ff_0) C^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$
Rayleigh	0.886 C	1.32 C ³	0.2146 C ²

2.3.1.2 Facteur de puissance et indice de variation

Par ailleurs, d'autres paramètres utiles à la caractérisation d'un site, du point de vue éolien, doivent être calculés, à savoir :

- Le facteur de puissance du vent, donné par (selon la distribution de Weibull) :

$$R_p = \frac{\langle V^3 \rangle}{\langle V \rangle^3} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad 2.6$$

- L'indice de variation donné par (selon la distribution de Weibull) :

$$I_v = \frac{\sigma}{\langle V \rangle} = \left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right)^{1/2} \quad 2.7$$

2.3.2 METHODES D'AJUSTEMENT

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'ajustement des données statistiques (détermination des coefficients k et C de Weibull). Nous allons citer les plus fréquemment utilisées.

2.3.2.1 Méthode des moindres carrés, [5]

La plus simple est la méthode des moindres carrés qui après hiérarchisation passe par le calcul de la fréquence cumulée de la distribution de Weibull qui s'écrit :

$$F(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \quad 2.8$$

$$F(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \quad 2.9$$

La relation 2.8 peut être linéarisée en écrivant :

$$\log[-\log F(V \geq V_x)] = k \log V_x - k \log C \quad 2.10$$

Et en posant :

$$Y = \log[-\log f(V \geq V_x)] \quad \text{et} \quad X = \log V_x \quad 2.11$$

Il vient :

$$Y = aX + b \quad 2.12$$

avec :

$$a = k \quad \text{et} \quad b = -k \log C \quad 2.13$$

$$\text{D'où : } C = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \quad 2.14$$

L'inconvénient de la méthode des moindres carrée appliquée à un modèle non linéaire réside dans le fait que le minimum de la variable linéarisée diffère de celui de la variable non linéarisée [5].

2.3.2.2 Méthode de la vitesse moyenne et de l'écart type

Si la vitesse moyenne $\langle V \rangle$ et l'écart type σ d'un site, sont connus, (on peut les estimer à partir de la distribution statistique), le paramètre de forme, k est déterminé en posant l'approximation suivante, [6] :

$$k = \left(\frac{\sigma}{\langle V \rangle}\right)^{1.086} \quad 2.15$$

Le facteur d'échelle est alors déterminé par :

$$C = \frac{\langle V \rangle}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad 2.16$$

2.3.2.3 Méthode de la vitesse moyenne et de la variabilité des vents

Cette approche empirique, consiste à estimer k , à partir de la variabilité du vent et de la vitesse moyenne, à savoir, [6] :

$$k = \begin{array}{ll} 1.05 \langle V \rangle^{0.5} & \text{variabilité du vent faible} \\ 0.94 \langle V \rangle^{0.5} & \text{variabilité du vent moyen ne} \\ 0.83 \langle V \rangle^{0.5} & \text{variabilité du vent élevée} \end{array} \quad 2.17$$

Dans ce cas, il faudrait connaître la variabilité du vent.

2.3.2.4 Méthode du maximum de vraisemblance

La fonction vraisemblance appliquée à la distribution de Weibull s'écrit, [7]:

$$L_v = \prod_{i=1}^N f(V_i) = \prod_{i=1}^N \frac{k}{C} \left(\frac{V_i}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V_i}{C}\right)^k\right) \quad 2.18$$

On prend le logarithme :

$$\log(L_v) = \sum_{i=1}^N \log k - k \sum_{i=1}^N \log C + (k-1) \sum_{i=1}^N \log V_i - \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_i}{C}\right)^k \quad 2.19$$

L est maximale pour $(\partial L_v / \partial k) = 0$, $(\partial L_v / \partial C) = 0$, et $(\partial^2 L_v / \partial k^2) < 0$, $(\partial^2 L_v / \partial C^2) < 0$, soit :

$$\frac{\partial(\log L_v)}{\partial C} = -\frac{k}{C} N + \frac{k}{C} \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_i}{C}\right)^k = 0 \quad 2.20$$

d'où :

$$C^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^k \quad 2.21$$

Par ailleurs,

$$\frac{\partial(\log L)}{\partial k} = \frac{N}{k} - N \log C + \sum_{i=1}^N \log V_i - \frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \log V_i}{C^k} + \frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \log C}{C^k} = 0 \quad 2.22$$

En utilisant 2.21, il vient :

$$\frac{N}{k} + \sum_{i=1}^N \log V_i - \frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \log V_i}{C^k} = 0 \quad 2.23$$

d'où :

$$\frac{1}{k} = \left(\frac{1}{C^k} \sum_{i=1}^N V_i^k \log V_i - \sum_{i=1}^N \log V_i \right) * \frac{1}{N} \quad 2.24$$

N étant le nombre total d'observations non nulles.

Le système 2.21-2.24 est résolu par itérations successives en utilisant une méthode d'optimisation, (Méthode Lvenberg-Marquart sous Matlab, [5]).

2.3.3 VARIATION DES PARAMETRES DE WEIBULL

Les paramètres k et C de Weibull caractérisent la distribution des vents tant au sens qualitatif que quantitatif. Dans la partie suivante nous allons étudier la variation de ces paramètres d'un site à un autre.

2.3.3.1 Forme de la distribution de Weibull

En figure 2.6 sont représentés les distributions des fréquences du vent par classes pour les stations d'Oran et Ain Oussera, [8].

On remarque que la distribution des fréquences des deux sites est différente. En effet, avec 40% de vent inférieur à 1m/s, la distribution hybride de Weibull s'applique au site d'InOussera alors que la distribution de Weibull convient au site d'Oran qui totalise une fréquence de faibles vitesses inférieure à 5%.

L'effet du facteur de forme k sur l'allure de la distribution est mis en évidence à travers la figure 2.7. De même l'effet du facteur d'échelle C sur l'allure de la distribution est mis en évidence grâce à la figure 2.8.

Sur la figure 2.7, on remarque que pour $k > 1$, le maximum de la fonction s'éloigne de l'axe des y, alors que pour $k=1$, la distribution prend la forme d'une loi exponentielle. Lorsque $k=2$, on retrouve la distribution de Rayleigh, alors que pour $k > 3$ la fonction se rapproche d'une loi binomiale.

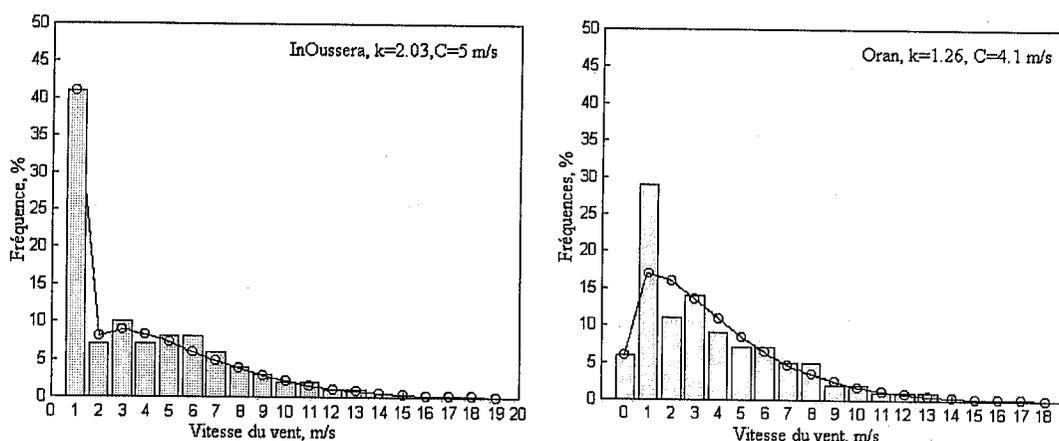


Figure 2.6 : Histogrammes des vitesses et courbes d'ajustement pour les lois de Weibull et hybride Weibull pour deux sites Algériens.

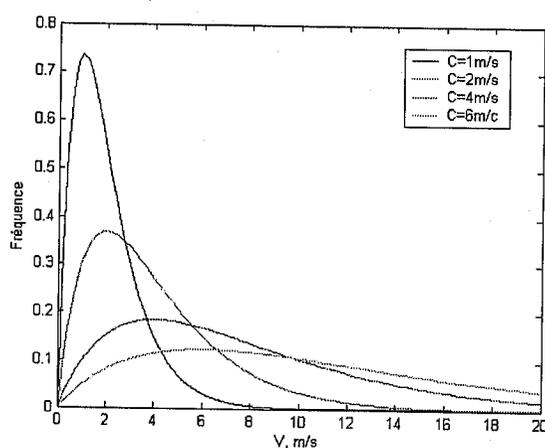
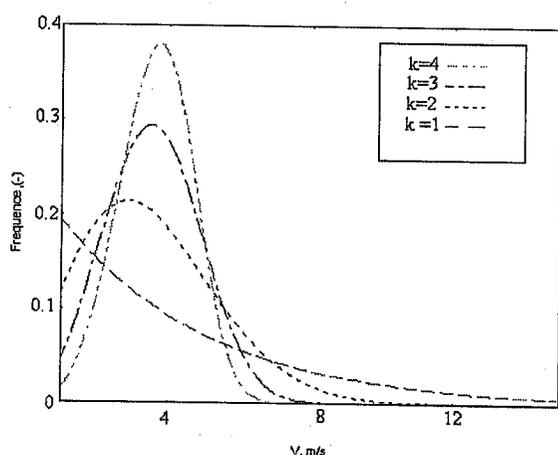


Fig. 2.7: Variation du facteur de forme k , pour $C=4m/s$. Fig.2.8. Variation du paramètre d'échelle C , pour $k = 2$

Ainsi, le facteur de forme k suggère la forme de la courbe. Une valeur élevée de k implique une distribution étroite avec des vents concentrés autour d'une valeur, alors qu'une faible valeur de k implique des vents largement dispersés.

Le facteur d'échelle C indique de la position du mode de la courbe, comme montré en figure 2.8. Sa valeur est élevée pour des sites ventés et faibles pour les sites peu ventés.

2.3.3.2 Variation mensuelle de la distribution de Weibull, [9]

Les courbes de la distribution statistique des fréquences mensuelles des vitesses du vent, (mois de janvier, avril, juillet et octobre) pour les sites de Tiaret et Djelfa, sont représentées en figure 2.9.

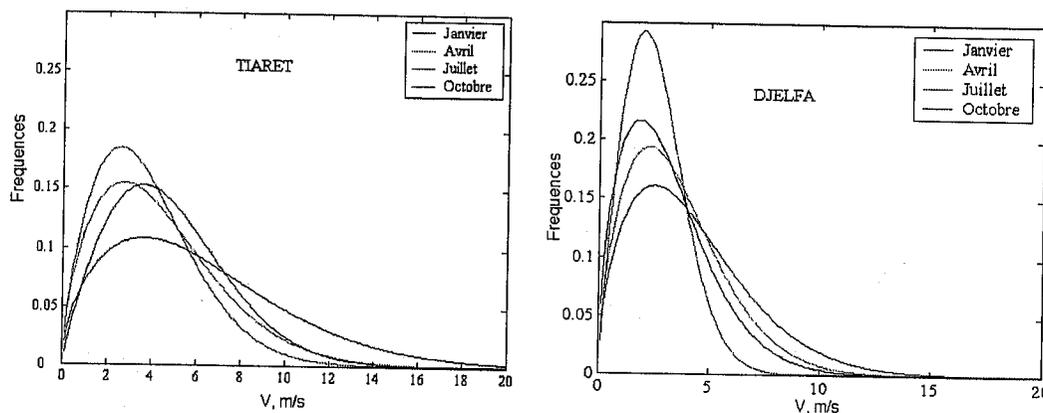


Figure 2.9 : Variation mensuelle de la distribution modélisée des vitesses du vent à Tiaret et Djelfa.

L'évolution de la distribution mensuelle diffère d'un mois à l'autre. Le site de Tiaret présente un régime de vent pouvant atteindre 13 m/s en juillet et 21 m/s en janvier. Pour Djelfa, la courbe de fréquence tend vers zéro pour une vitesse de vent égale à 8 m/s en juillet, et 16 m/s en janvier.

On remarque que le mois de juillet reste un mois particulier de l'année avec un facteur de forme faible entraînant une distribution étroite autour de la moyenne. En annexe 1 sont donnés les paramètres mensuels de Weibull pour quelques sites Algériens.

2.3.3.3 Variation sectorielle des paramètres de Weibull, [10]

Afin de déterminer les secteurs correspondants aux vents dominants de la région, les vitesses moyennes estimées et les fréquences par secteurs de deux sites algériens Skikda et El Oued sont donnés au tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Fréquences des secteurs et paramètres sectoriels de Weibull pour les sites de Skikda et ElOued.

Direction	Skikda			El Oued		
	Fre, %	k	C	Fre, %	k	C
Nord-Nord	24	1.55	3.7	11	1.54	4.4
Nord-Est	7	1.60	2.6	11	1.70	5.4
Est-Est	3	1.67	2.8	25	1.90	5.8
Sud-Est	5	1.66	2.8	7	1.67	4.3
Sud-Sud	36	1.87	3.0	16	1.52	4.3
Sud-Ouest	10	1.66	2.9	11	1.60	4.4
Ouest-Ouest	4	1.48	4.1	13	1.60	5.3
Nord-Ouest	10	1.50	4.6	7	1.55	5.5

Concernant le site côtier de Skikda, les vents dominants sont dans la direction Sud. Toutefois, la fréquence du secteur nord n'est pas négligeable puisqu'elle avoisine les 24%. Par ailleurs, pour le site d'ElOued, le secteur Est est dominant par rapport aux autres secteurs qui sont plus au moins proches à part le Nord-Ouest et le Sud-Est. Ceci, montre l'effet aléatoire de la vitesse du vent qui dépend de la position du pylône de mesures par rapport à son environnement.

2.3.3.4 Variation des paramètres de Weibull avec l'altitude

En figures 2.10 et 2.11 sont tracés, respectivement, les variations des paramètres de Weibull en fonction de l'altitude pour différentes valeurs de la rugosité z_0 et ceci suivant les expressions 1.52 à 1.54. Les sites représentés sont ceux de Adrar (0.01), Tiaret (0.02), Ghardaïa (0.03) et Touggourt (0.04), [9].

La courbe 2.10 montre que quelque soit la rugosité, le facteur k croît de façon monotone avec l'altitude. En effet, ce paramètre n'est fonction que des altitudes z_1 et z_2 .

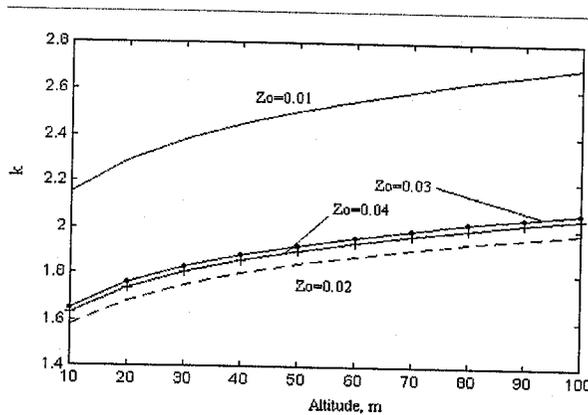


Fig. 2.10 : Variation de k avec l'altitude.

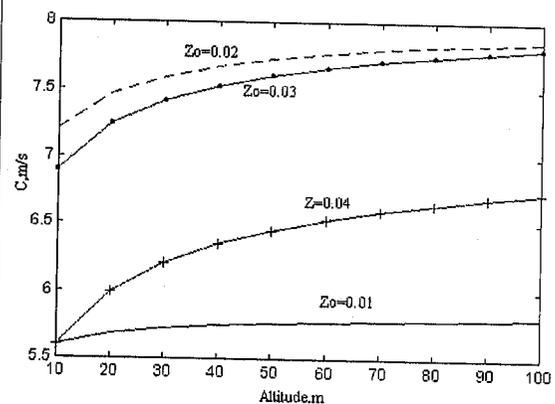


Fig. 2.11 : Variation de C avec l'altitude

Par contre, l'extrapolation du paramètre C montre un changement rapide près du sol où l'effet des frottements au sol se manifeste. Ce dernier est faible pour z_0 faible et augmente avec z_0 .

L'influence des autres paramètres d'instabilité est perceptible à partir de 20m et la courbe croît de manière asymptotique pour des altitudes élevées.

2.3.3.5 Variation des vitesses moyennes

Le même phénomène (variation de C) est observé quant au tracé de la vitesse cubique moyenne en fonction de la hauteur, donné en figure 2.12.

En effet pour le site montagneux de Tiaret la vitesse cubique moyenne atteint la valeur asymptotique rapidement alors que pour le site de Djelfa, cette dernière continue d'augmenter au-delà des 100m.

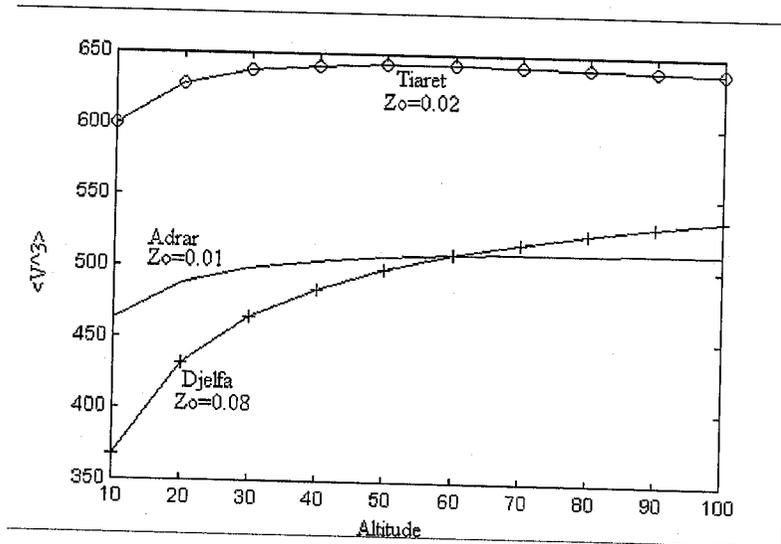


Figure 2.12 : Variation de $\langle V^3 \rangle$ en fonction de l'altitude, [9].

Les figures 2.13 et 2.14 représentent les vitesses moyennes et les vitesses cubiques moyennes tracées pour les sites d'Adrar, Tiaret, ElKheiter, InSalah, Béjaia, Oran et Bordj Bou Arriredj.

Ces figures montrent que les sites les plus ventés (au sens de la vitesse moyenne) ne sont pas nécessairement ceux dont la densité de puissance moyenne est la plus élevée. On remarque en effet que la vitesse cubique moyenne est maximale pour le site ayant le facteur de forme le plus élevé.

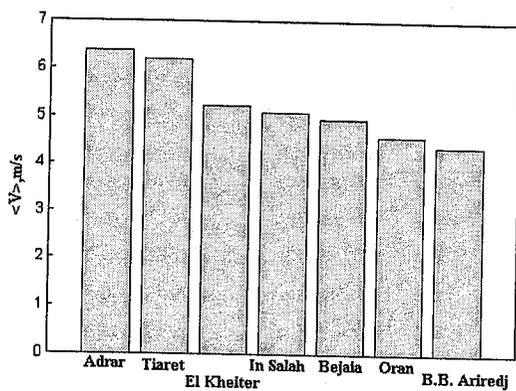


Figure 2.13 : Vitesses moyennes du vent pour quelques sites répartis sur le territoire national.

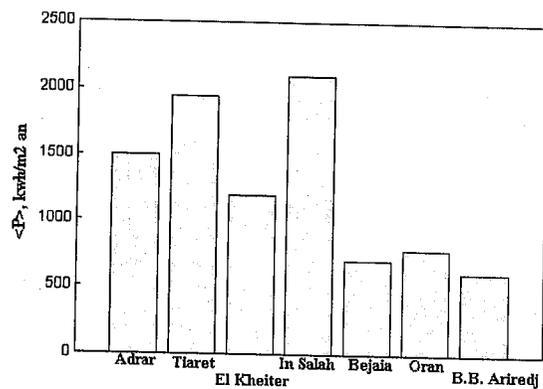


Figure 2.14 : Vitesses cubiques moyennes du vent pour les mêmes sites.

2.4 INTERPOLATION SPATIALE DE LA VITESSE DU VENT

2.4.1. METHODE D'INTERPOLATION

Les atlas éoliens ont été tracés à l'aide du logiciel Mapinfo, utilisant la méthode d'analyse Merise des systèmes d'information géographique (SIG). La méthode d'interpolation utilisée par Mapinfo est la méthode de pondération inverse à la distance, [11]. Elle permet le calcul de la valeur au nœud (s_0) du maillage par analyse des points avoisinants (s_i) définis par un rayon de recherche. Elle consiste à attribuer à chaque point brut, retenu dans la sélection, un poids inversement proportionnel à la distance entre ce point brut et le nœud à estimer (s_0), (voir figure 2.15).

Remarques :

1. Seuls les points bruts se trouvant dans le rayon de recherche participent au calcul de la valeur au nœud s_0 .
2. Si la densité de données est faible et que l'on choisit un grand rayon de recherche alors des points trop éloignés du nœud à estimer seront pris en compte et la valeur obtenue par interpolation sera peu fiable.
3. Si la densité de données au départ est forte il est inutile de réaliser l'estimation avec beaucoup de points puisque cela augmentera le temps de calcul et l'estimation ne sera pas meilleure.

Afin d'obtenir une bonne interpolation nous avons choisi un rayon de recherche de 600 km de façon à englober un maximum de mesures. L'exposant est choisi par défaut par le logiciel en fonction des mesures considérées et du rayon de recherche.

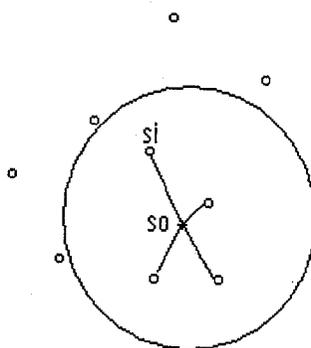


Figure 2.15 : Vue schématique du maillage et du rayon de recherche

2.4.2 ATLAS DE LA VITESSE MOYENNE ANNUELLE DU VENT

2.4.2.1 Données utilisées

Pour l'établissement de l'atlas de la vitesse moyenne annuelle, les vitesses moyennes de 48 stations de l'Office National de Météorologie ont été utilisées. Les mesures prélevées toutes les trois heures et pendant au moins 10 années sans interruption, de 21 stations de mesures, représentant presque toutes les zones topographiques du pays sont traitées statistiquement (voir tableau 2.3). Les paramètres de Weibull k et C et la vitesse moyenne annuelle sont déterminés, [12].

Afin d'augmenter la densité des points de mesure et la fiabilité des résultats, les vitesses moyennes annuelles du vent de 27 stations, établies par Hammouche [13] et publiées par l'Office National de la Météorologiques ont été incluses.

Par ailleurs, les vitesses moyennes annuelles du vent de 16 stations situées dans les pays voisins ont été rajoutées pour affiner le tracé de la carte aux frontières [14].

Tableau 2.3 : Caractéristiques des stations de mesures

Sites	Longitude [deg.]	Latitude [deg.]	Hauteur [m]	Rugosité [m]	Période [années]	Altitude [m]	Situation topographique
Skikda	06°54'E	36°53'N	10	0.01	10	1	Côte
Alger	03°15'E	36°43'N	10	0.01	10	24	Côte
Oran	00°37W	35°38'N	10	0.01	10	90	Côte
Tebessa	08°07'E	35°25'N	10	0.03	10	820	Atlas tellien
Constantine	06°37'E	36°07'N	10	0.01	10	694	Atlas tellien
Miliana	02°14'E	36°18'N	10	0.50	10	715	Atlas tellien
Chlef	01°20'E	36°12'N	12	0.01	05	143	Atlas tellien
Mascara	00°09'E	35°13'N	12	0.05	07	511	Atlas ellien
Tlemcen	01°17W	34°57'N	10	0.01	10	592	Atlas tellien
Setif	05°15'E	36°11'N	10	0.01	10	1033	Hauts plateaux
B.B. Arriredj	04°40'E	36°04'N	10	0.01	10	928	Hauts plateaux
Djelfa	03°15'E	34°40'N	10	0.08	09	1144	Hauts plateaux
In Oussera	02°31'E	35°33'N	10	0.08	10	649	Hauts plateaux
KsarChellala	02°19'E	35°10'N	10	0.08	10	800	Hauts plateaux
Tiaret	01°28'E	35°21'N	12	0.02	06	977	Hauts plateaux
El Bayadh	01°00'E	33°40'N	10	0.01	10	1341	Hauts plateaux
In Amenas	09°38'E	28°03'N	10	0.00	10	561	Sahara
El Oued	06°47'E	33°30'N	11	0.01	10	62	Sahara
El Golea	02°52'E	30°34'N	10	0.01	10	398	Sahara
In Salah	2°28'E	27°12'N	10	0.02	10	268	Sahara
Tindouf	08°06W	27°40'N	10	0.00	10	401	Sahara

2.4.2.2 Atlas de la vitesse du vent

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure 2.16. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Béjaia et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s, [15].

En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s.

Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.

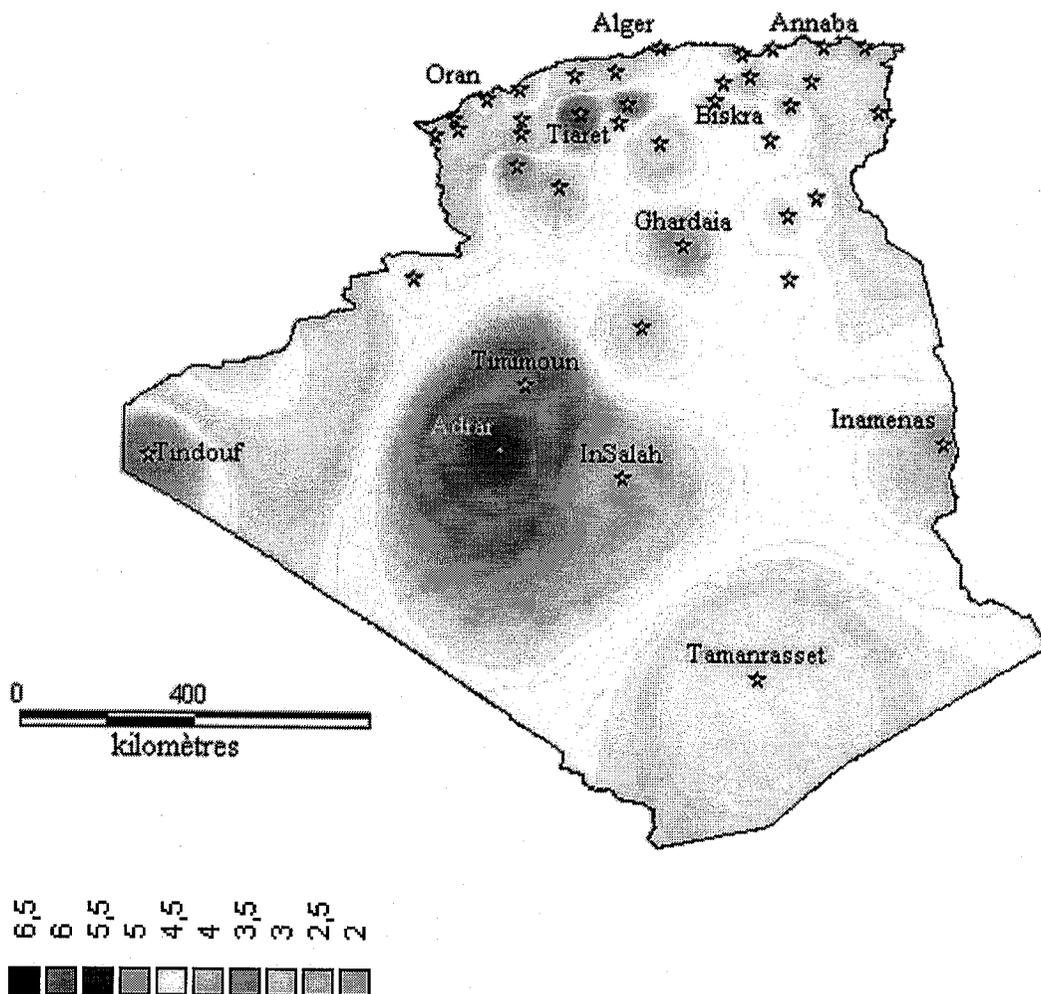


Figure 2.1 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

2.4.3 ATLAS DE LA VITESSE MOYENNE SAISONNIERE DU VENT

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figures 2.17 (Eté et Printemps) et 2.18 (Hiver et Automne). On remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année, [15].

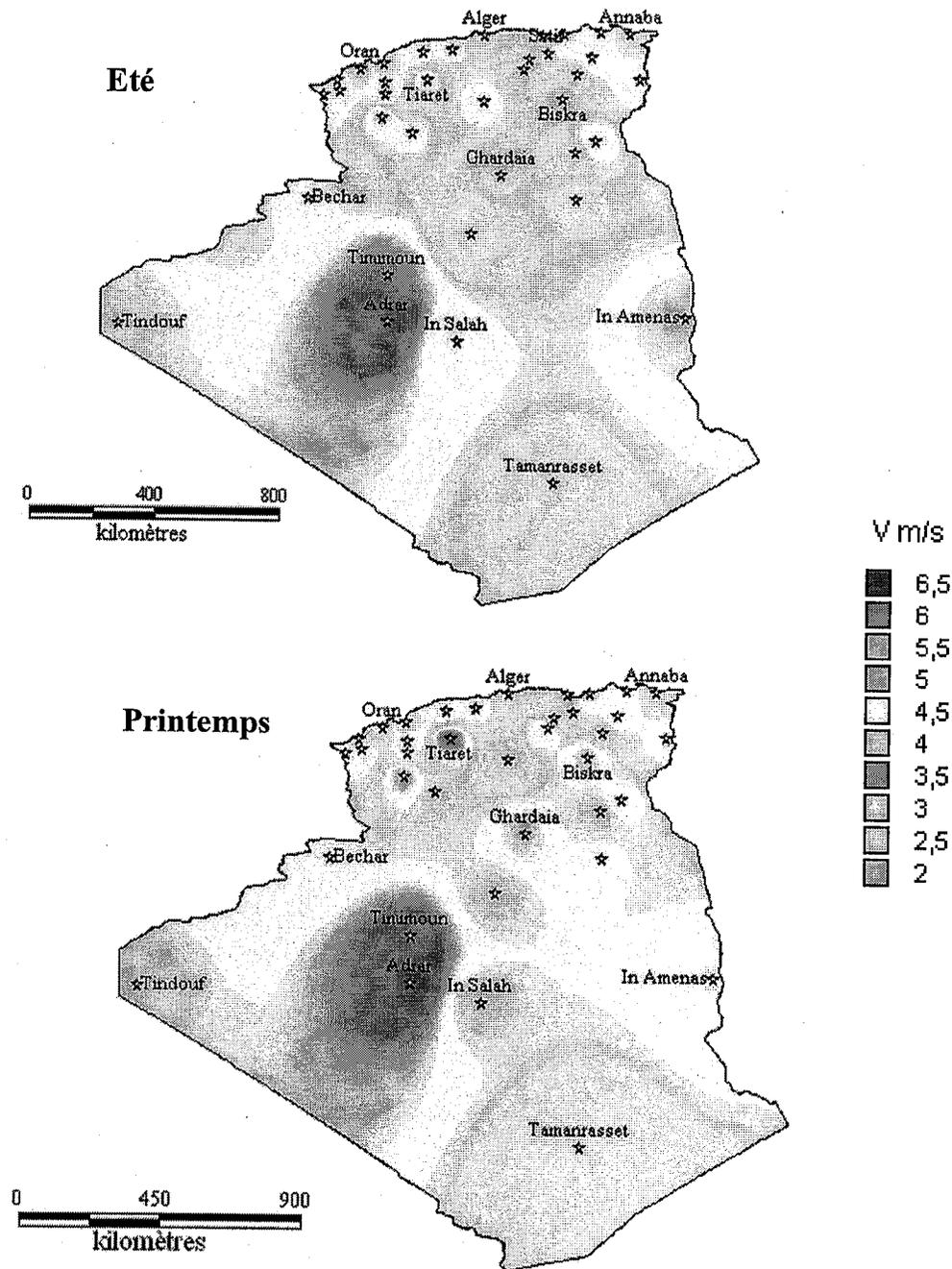


Figure 2.17 : Atlas vent saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Eté et Printemps)

Tous les atlas établis présentent la région sud ouest, à savoir Adrar, Timimoun et In Salah comme la zone les plus ventée, à l'exception de l'atlas hivernal qui se distingue par le microclimat de Tiaret qui présente les vitesses de vent les plus élevées.

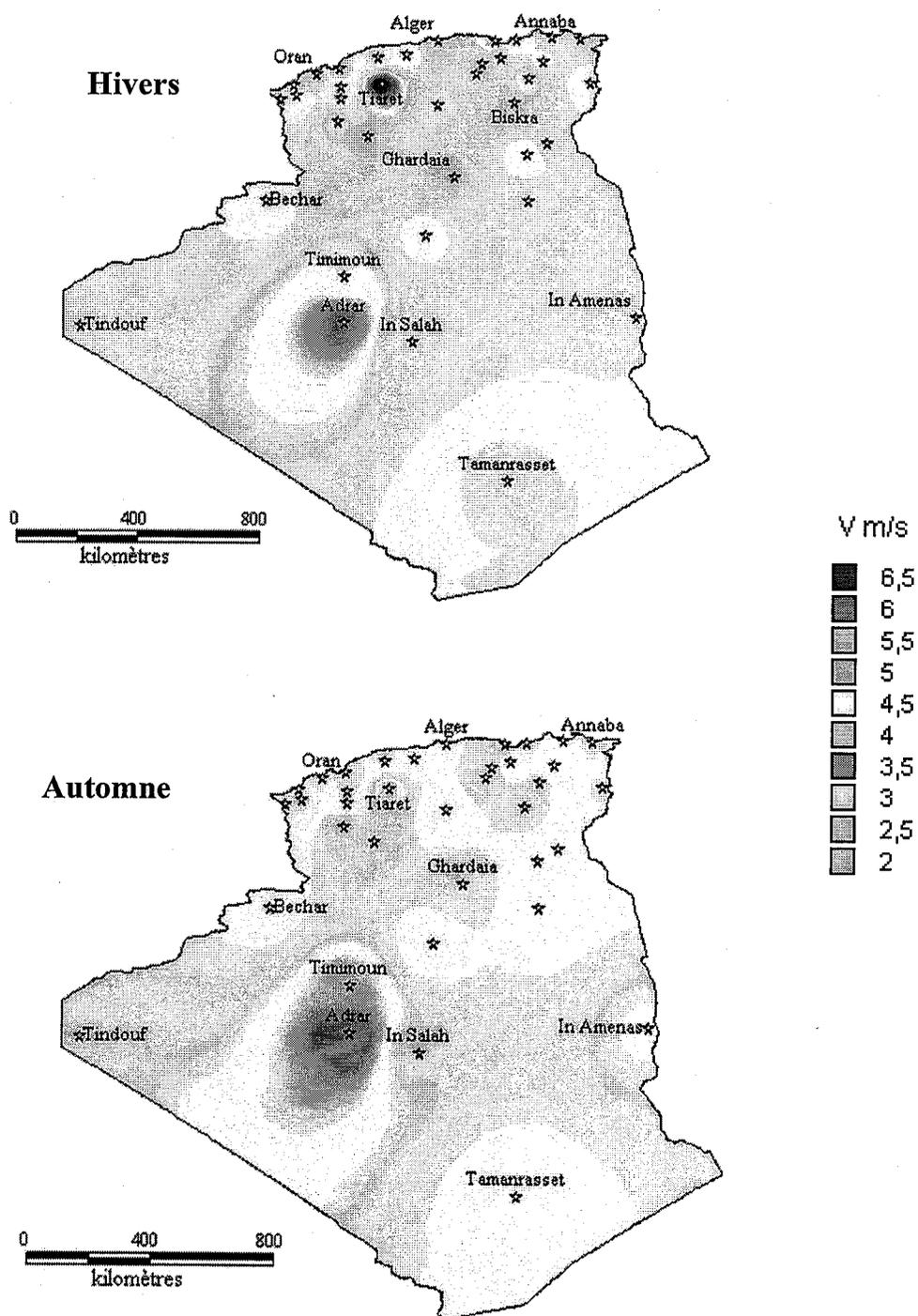


Figure 2.18 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol.
(Hiver et automne).

2.4.4 ATLAS MICROCLIMATIQUES DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT

2.4.4.1 Présentation du modèle de projection-interpolation

Lors de l'établissement de la carte des vents de l'Algérie, plusieurs paramètres interviennent, tel que la mesure de la vitesse du vent, sa direction, l'effet de la rugosité du sol, l'effet des obstacles, l'effet de la stabilité de l'atmosphère, etc.... Cette dépendance, implique que la carte des vents de l'Algérie, basée sur l'interpolation des données de vitesses du vent mesurées au sol s'avère insuffisante pour la caractérisation d'un site quelconque, [16]. Afin de prendre en compte tous ces paramètres, plusieurs modèles numériques ont été établis, tel celui dénommé "AIOLOS", qui a été développé pour des régions accidentées, [17].

Le modèle mathématique utilisé pour la détermination de l'écoulement du vent dans une région donnée est appelé "mass Consistent Model", [18]. C'est un modèle cinématique établi par Lalas [17] et basé sur la résolution de l'équation de continuité.

Lors des calculs, la densité de l'air est supposée constante. Le modèle permet la réduction de la divergence locale de la vitesse du vent (suivant les conditions rencontrées au sol), par rapport à un écoulement de vent initial obtenu par interpolation des vitesses mesurées. Le modèle est basé sur un maillage à trois dimensions établi pour la région considérée.

Initialement, une étude statistique des mesures de la vitesse et de la direction du vent, à 700 hpa, est effectuée et la vitesse moyenne estimée suivant les huit secteurs définis est déterminée. Une interpolation spatiale des vitesses moyennes selon un pas préalablement choisi, est effectuée à 700 hpa. Il en résulte huit fichiers donnant la vitesse moyenne en chaque point du maillage.

Afin de prendre en considération tous les paramètres pouvant créer une divergence (rugosité, topographie..), les vitesses estimées, sont projetées à 10 m du sol à l'aide du modèle. Pour ce faire d'autres données sont nécessaires, telles que :

- les altitudes aux nœuds du maillage (obtenues à partir des cartes topographiques) ;
- les rugosités (données aux conditions rencontrées au niveau du sol, mer ou terre)
- et des données supplémentaires, (essentiellement géographiques).

Huit matrices représentant un champ de vitesses moyennes estimées par secteur, à 10 mètres du sol sont obtenues. Enfin, la vitesse moyenne pondérée et normalisée (à la

vitesse standard de 10 m/s) est calculée en chaque nœud à l'aide de l'expression suivante :

$$V_{moyen} = \sum_{i=1}^8 (f_i * W_i) \left(\frac{V_i}{10} \right) \quad 2.25$$

Avec :

f : fréquence sectorielle aux nœuds à 3000m d'altitude (700 hpa)

V : vitesse estimée après projection aux nœuds à 10 m du sol, m/s

W : vitesse estimée aux nœuds à 3000 m du sol, m/s

Le terme $(f_i * W_i)$ représentant le produit de la fréquence du secteur et de la vitesse du vent au nœud, à 3000m d'altitude.

2.4.4.2 Cartographie éolienne de quelques sites

Quatre sites sont choisis pour l'étude. Il s'agit en l'occurrence des sites côtiers de Ténés et des Andalouses et de deux sites "internes", Sidi Aich et Tissemsilt. La topographie des sites précités est tracée en coordonnées Lambert en figure 2.20, [19].

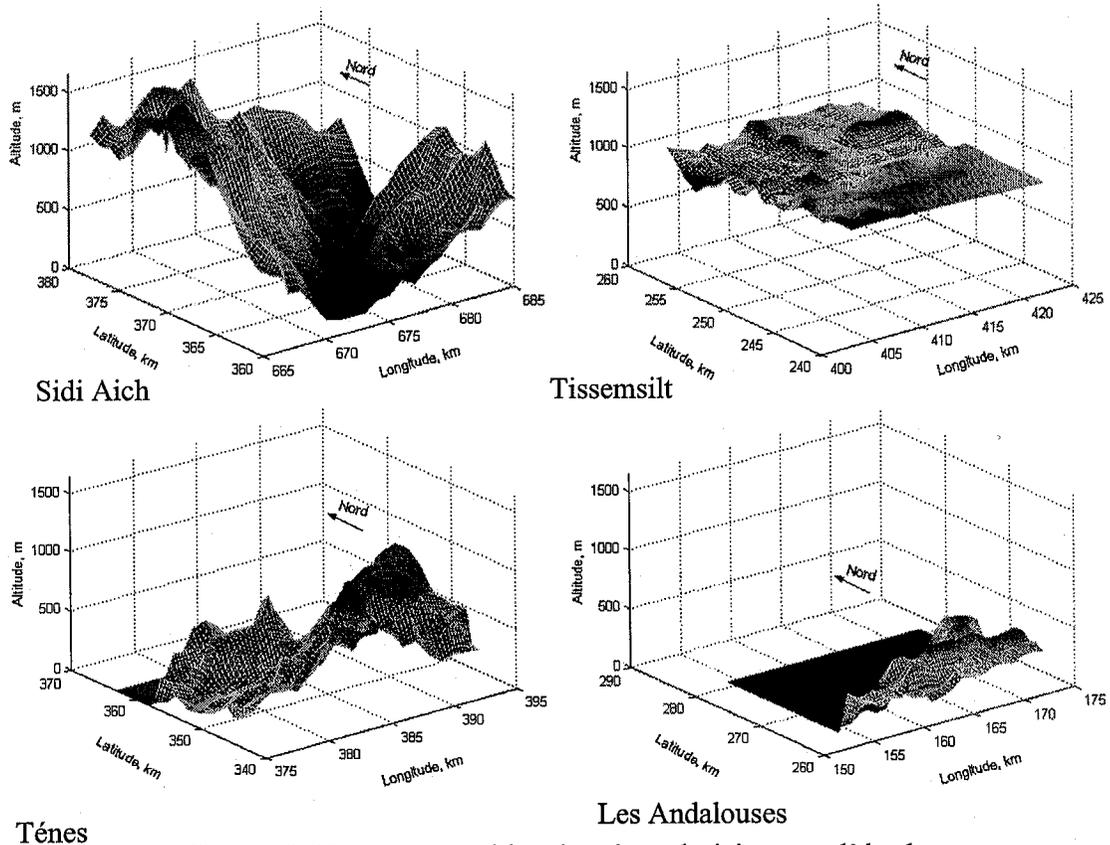


Figure 2.20 : Topographies des sites choisis pour l'étude

On remarque que les sites des Andalouses et de Tissemsilt ont des altitudes variant, respectivement, de 0 à 420 mètres et de 555 à 980 m. Les sites de Sidi Aich et de Ténès sont des sites de montagne avec des altitudes variant respectivement de 65 à 1615 m et de 0 à 1070m. Enfin, on remarque sur la figure 2.21, que lorsque les accidents topographiques sont fréquents et que les écarts en altitudes sont élevés, le champ de vitesses de la région est très touffu. C'est le cas des sites de Sidi Aich et Ténès. En effet, les vitesses de vent varient dans une gamme plus large.

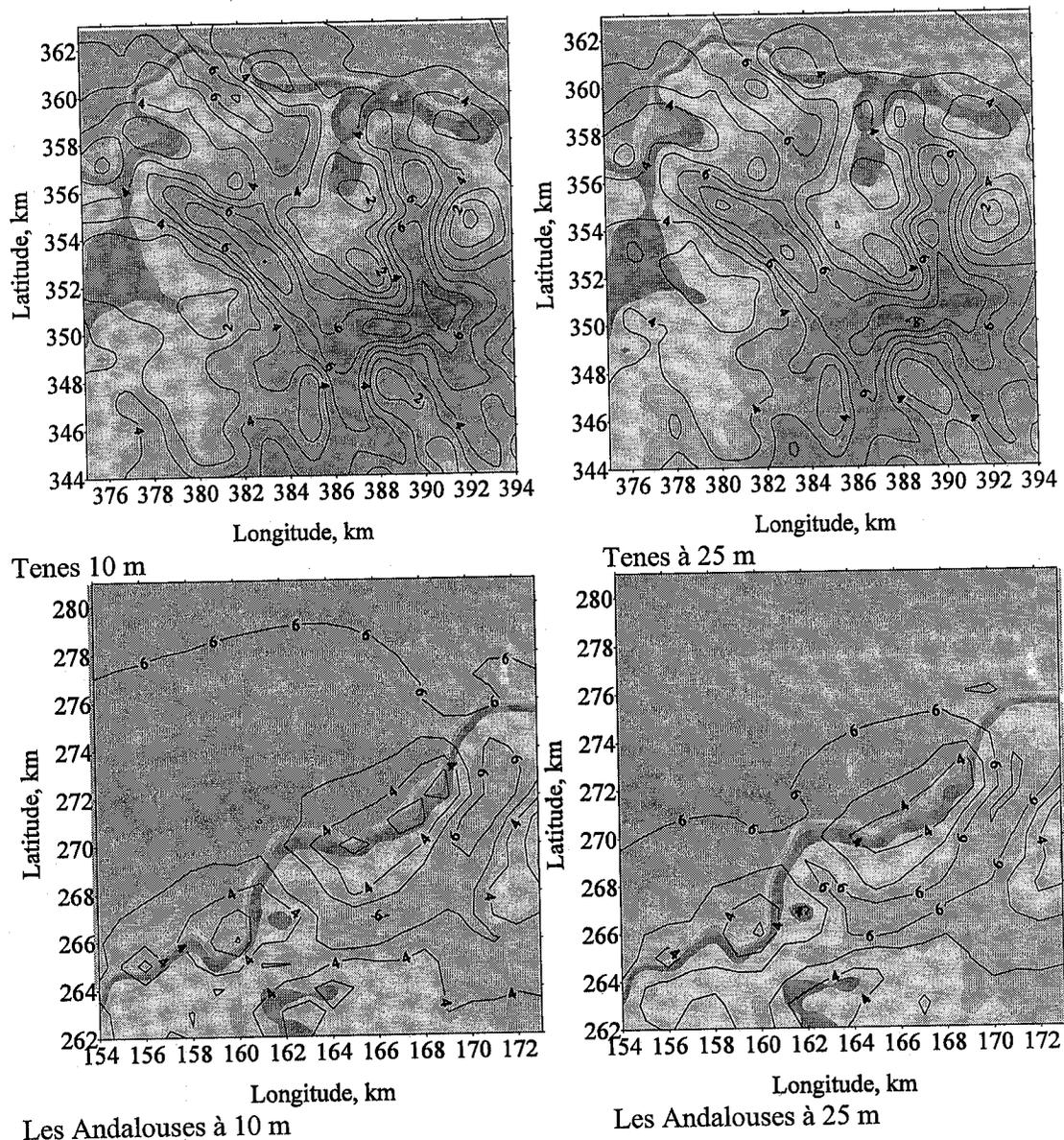


Figure 2.21 : Atlas microclimatiques de la vitesse moyenne annuelle pour les sites côtiers

Pour les deux sites côtiers, les vitesses estimées augmentent d'ouest en est. En effet, les maxima sont de l'ordre de 7.2 m/s pour les Andalouses, ils atteignent les 8.2 m/s pour Ténés.

Par ailleurs, pour les sites 'internes', dont la représentation des champs de vitesses est donnée en figure 2.22, les vitesses les plus élevées sont enregistrées à Sidi Aich, (9.2 m/s) où la distribution spatiale est aléatoire. On constate que les vitesses obtenues à l'aide des cartes microclimatiques sont plus élevées que celles obtenues lors de l'élaboration des atlas avec des pas plus importants.

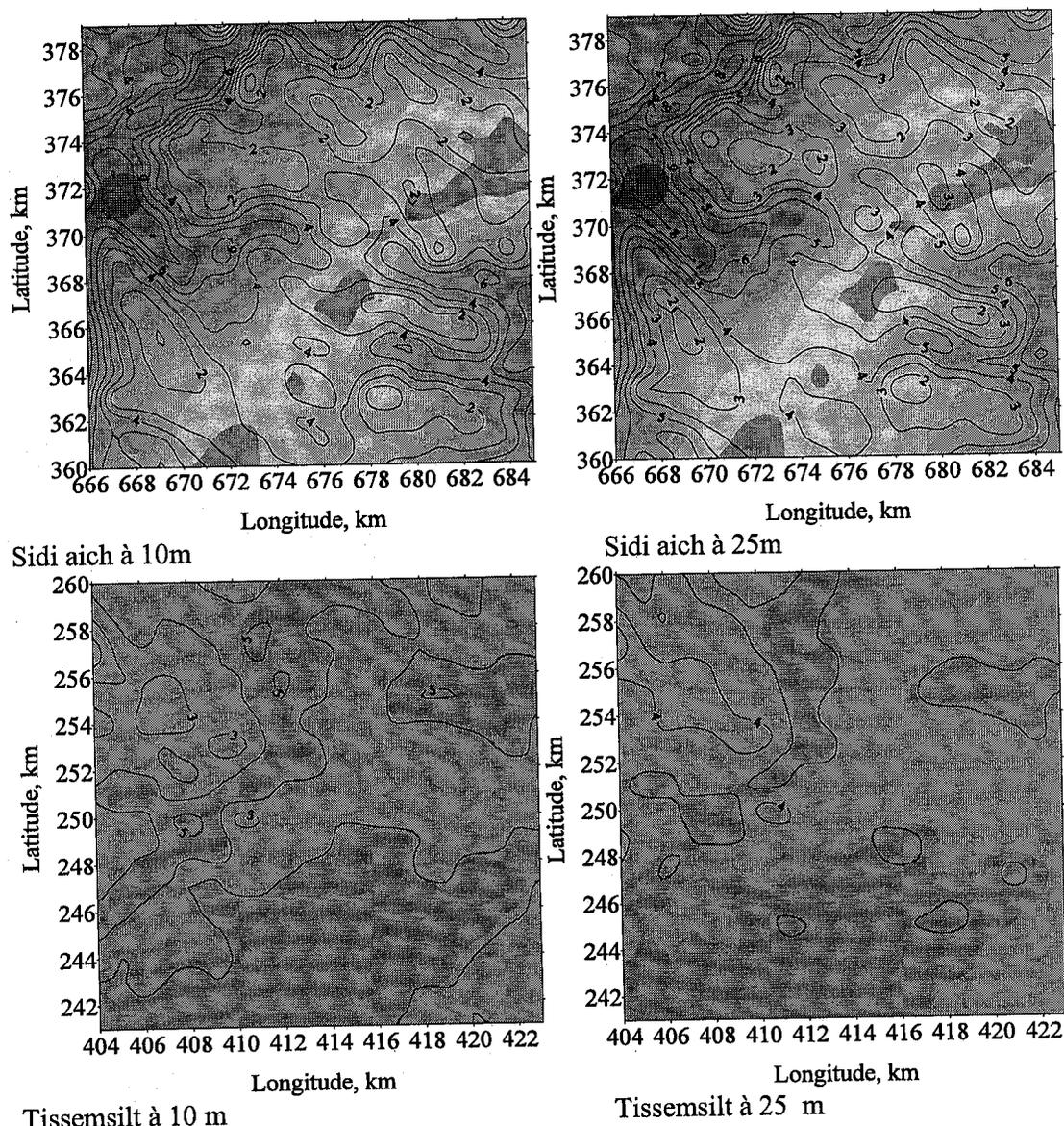


Figure 2.22 : Atlas microclimatiques de la vitesse moyenne annuelle pour les sites 'internes'

Il en ressort que pour tout concepteur de systèmes éoliens, une description parfaite du lieu de mesure ainsi que des obstacles, de la topographie et de la rugosité est nécessaire au dimensionnement optimum de l'installation.

Ceci s'applique essentiellement au nord de l'Algérie. Pour le sud, les résultats obtenus par interpolation des données au sol peuvent être utilisés par les concepteurs car les accidents au sol y sont moindres et la rugosité varie peu.

2.5 POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'éolienne) l'énergie disponible (potentiel) subit une suite de pertes en cascades, jusqu'à la sortie machine, (limite de Betz, seuils machine et pertes de conversion), [3]. Cette dégradation de l'énergie est représentée schématiquement en figure 2.23.

En effet, seule une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné, appelée puissance utile est réellement obtenue en fin de processus, soit à la sortie de l'éolienne.

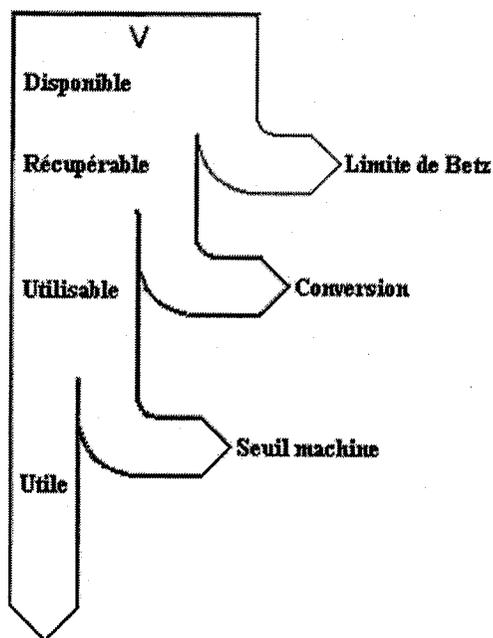


Figure 2.23 : Représentation schématique des dégradations successives de l'énergie éolienne avant utilisation.

2.5.1 PUISSANCE ENERGETIQUE DISPONIBLE

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

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle \quad 2.26$$

La détermination de la vitesse moyenne et cubique moyenne se fait à partir de l'étude statistique de la distribution des fréquences, par classes, de la vitesse du vent, (équations 2.1 et 2.2), [20].

2.5.2 POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN RECUPERABLE (THEOREME DE BETZ)

L'énergie cinétique disponible est convertie en énergie mécanique en utilisant une machine à aubes (ou pâles) dite communément éolienne. La vitesse du vent en aval de la roue n'étant jamais nulle, ceci implique que la puissance éolienne disponible n'est pas entièrement récupérée au niveau de l'hélice, [4].

Soit une masse d'air traversant un disque de surface A , à une vitesse V et soient V_{am} et V_{av} les vitesses respectives en amont et en aval de la surface, (voire figure 2.24).

L'équation de conservation de la quantité de mouvement permet d'écrire que la force qui s'exerce sur le disque est égale à la variation de la quantité de mouvement, soit :

$$F = \rho V A (V_{av} - V_{am}) \quad 2.27$$

En appliquant l'équation qui définit l'énergie, comme le produit d'une force par la vitesse, il vient :

$$P = FV = \rho A V^2 (V_{av} - V_{am}) \quad 2.28$$

Comme par ailleurs, la variation d'énergie cinétique donne :

$$P = \frac{1}{2} \rho A V (V_{av}^2 - V_{am}^2) \quad 2.29$$

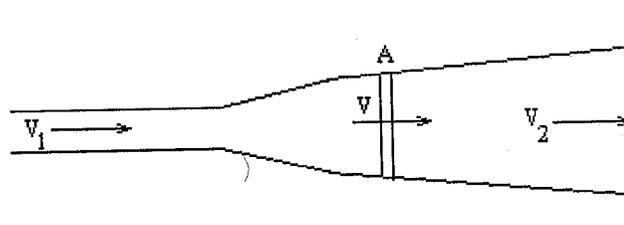


Figure 2.24 : Bilan sur une section de l'hélice

Par identification, il vient :

$$V = \frac{V_{av} + V_{am}}{2} \quad 2.30$$

En remplaçant V dans l'équation 2.26, on obtient :

$$P = \frac{1}{2} \rho A (V_{av}^2 - V_{am}^2) \left(\frac{V_{av} + V_{am}}{2} \right) \quad 2.31$$

Le maximum récupéré par la roue est obtenu pour

$$\frac{\partial P}{\partial V_{am}} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 P}{\partial V_{am}^2} < 0 \quad 2.32$$

Soit pour :

$$3V_{am}^2 + 2V_{av} V_{am} - V_{av}^2 = 0 \quad 2.33$$

Equation dont la solution est donnée par :

$$V_{am} = \frac{1}{3} V_{av} \quad 2.34$$

En remplaçant dans l'équation 2.31, la puissance maximale qui peut être extraite par une roue est égale à :

$$P_{Max} = \frac{1}{2} A \rho \left(V_{av}^2 - \left(\frac{V_{av}}{3} \right)^2 \right) \left(\frac{V_{av}}{2} + \frac{V_{av}}{6} \right) \quad 2.35$$

en se référant à l'équation 2.26, on obtient

$$\langle P_{Max} \rangle = \frac{16}{27} \langle P \rangle \quad 2.36$$

Cette limite (environ 0.59) est appelée "limite de Betz".

En prenant en considération la limite de Betz et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable par unité de surface est donnée par:

$$\langle P_r \rangle = 0.37 \langle V^3 \rangle \quad 2.37$$

Enfin la densité d'énergie moyenne récupérable sur une année, $\langle E \rangle$ est égale à, [3] :

$$\langle E \rangle = \langle P_r \rangle \Delta t = 0.37 * 24 * 365.25 \langle V^3 \rangle \quad 2.38$$

Soit en kWh/m² :

$$\langle E \rangle = 3.25 \langle V^3 \rangle \quad 2.39$$

La cartographie de la densité de puissance moyenne annuelle récupérable à 10 mètres du sol est représentée en figure 2.25. Ce résultat est obtenu par le traitement de 10 années de mesures relatives à 48 stations de l'ONM réparties sur tout le territoire.

Le maximum est enregistré dans la région sud ouest du Sahara. Il est situé dans la région d'In Salah où la densité de puissance moyenne récupérable sur une année atteint les 2.1 MWh/m² an.

En effet, la majorité du sud ouest du Sahara est caractérisée par un potentiel annuel moyen récupérable variant de 1 à 2 MWh/m².

Toutefois, des microclimats à l'ouest, dans les hauts plateaux possèdent des potentiels allant jusqu'à 1.4 MWh/m². Enfin, les valeurs estimées pour les régions de Batna, Biskra, El Bayadh, El Kheiter, Msila, El Oued et Ghardaia ne doivent pas être négligées puisque leur potentiel respectif avoisine le 1MWh/m².

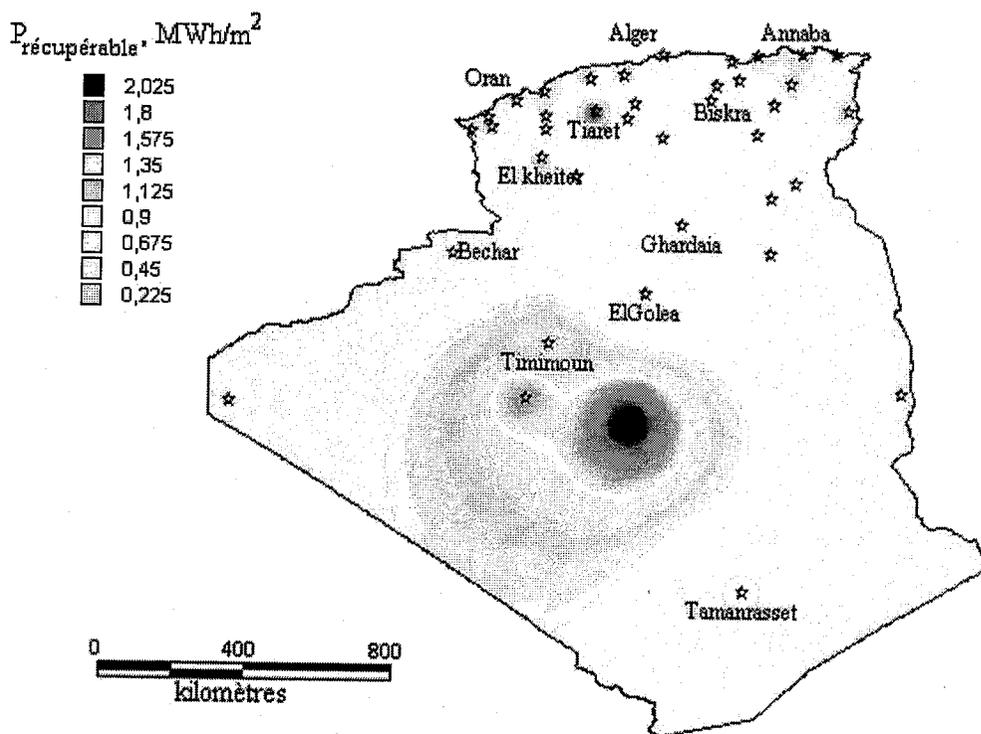


Figure 2.25 : Densité de puissance moyenne récupérable à 10 m du sol.

2.5.3 PUISSANCE EOLIENNE MOYENNE UTILISABLE

Etant donné que :

- la vitesse du vent est variable
- et que chaque machine éolienne est caractérisée par la vitesse de démarrage V_i , une vitesse nominale V_n et une vitesse d'arrêt V_s , spécifiques, la puissance éolienne utilisable est donnée par :

$$\langle P_u \rangle = \frac{1}{2} \rho A \langle V_u^3 \rangle \quad 2.40$$

La vitesse V_u est déduite de la courbe représentative de la distribution de Weibull entre les limites de la machine. La limite inférieure est représentée par la vitesse de démarrage. En effet, seules les vitesses du vent supérieures à la vitesse démarrage V_i sont considérées dans le calcul.

En second lieu, lorsque la vitesse nominale V_n est atteinte, l'augmentation de la vitesse de vent n'a aucun effet sur le régime de la roue.

Enfin, lorsque la vitesse d'arrêt V_s est atteinte, le système est stoppé et les vitesses qui lui sont supérieures n'interviennent pas pour le calcul de V_u (voir figure 2.26) [10].

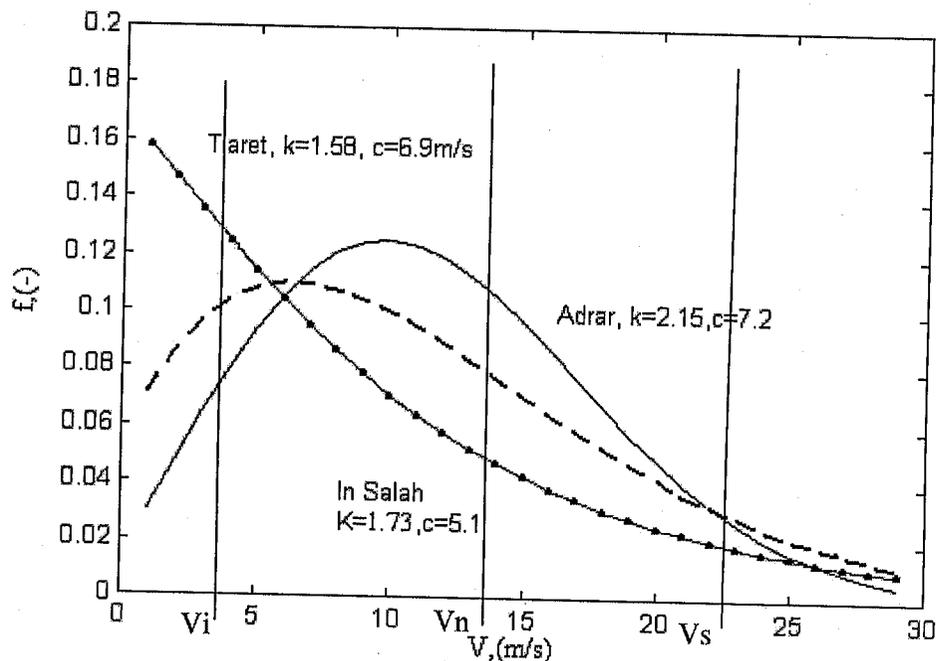


Figure 2.26 : Représentation des vitesses de démarrage, nominale et d'arrêt sur la courbe de distribution des vitesses.

La densité de puissance utilisable est donnée par :

$$\langle P_u \rangle = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_i \\ \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle & \text{" } V_i \leq V \leq V_n \\ \frac{1}{2} \rho V_n^3 & \text{" } V_n \leq V \leq V_s \\ 0 & \text{" } V \geq V_s \end{cases} \quad 2.41$$

La vitesse cubique utilisable moyenne est donnée par intégration de la vitesse cubique pondérée par de la fonction de probabilité en considérant comme bornes d'intégration les limites imposées par la machine, à savoir :

$$\langle V_u \rangle = \int_{V_i}^{V_n} f(V) V^3 dV + V_n^3 \int_{V_n}^{V_s} f(V) dV \quad 2.42$$

Soit, après intégration et en utilisant la fonction gamma normalisée :

$$\langle V_u^3 \rangle = \left[\Gamma_n \left(\left(\frac{V_n}{C} \right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) - \Gamma_n \left(\left(\frac{V_i}{C} \right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) \right] V_n^3 + V_n^3 \left[\exp \left(- \left(\frac{V_n}{C} \right)^k \right) - \exp \left(- \left(\frac{V_s}{C} \right)^k \right) \right] \quad 2.43$$

Avec : $\Gamma_n(x, a) = \Gamma(x, a) / \Gamma(x)$ 2.44

2.5. 3 PUISSANCE EOLIENNE MOYENNE UTILE

La puissance éolienne moyenne réellement utile s'écrit :

$$\langle P_e \rangle = \eta \langle P_u \rangle \quad 2.45$$

Où η représente le rendement machine.

Ce dernier représente le rapport entre la puissance nominale donnée par le constructeur et la puissance électrique théorique calculée pour une vitesse du vent constante égale à la vitesse nominale. Soit :

$$\eta = \frac{\langle P_n \rangle}{\langle P_{Théorique} \rangle} \quad 2.46$$

Avec :

$$P_{Théorique} = \frac{1}{2} \rho A \langle V_n^3 \rangle \quad 2.47$$

Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne sont utilisés au maximum de leurs performances si leur choix est effectué, correctement, en fonction des paramètres du site d'implantation.

2.6 CONCLUSION

Partant des mesures des paramètres vent, les variations journalières, mensuelles et annuelles du vent ont été établies. L'étude statistique des mesures a permis la détermination des paramètres de Weibull nécessaires pour la connaissance des potentialités énergétiques éoliennes d'un site donné. L'interpolation spatiale des données a permis l'établissement des atlas vent annuels et saisonniers aux échelles nationale et microclimatique.

Enfin, les densités d'énergie disponible et récupérable ont été estimées et l'Atlas énergétique tracé. La limite de Betz en premier lieu, les limites des machines ensuite font que le potentiel éolien utile représente moins de 40% du potentiel disponible. Rapport qui peut changer énormément en fonction du site (forme de la courbe de distribution) et du choix de l'éolienne (vitesse de démarrage, vitesse nominale).

REFERENCES

1. Bouhanik A., « Bulletin Mensuel Météorologique et Radiométrique », Bouzaréah, septembre 2003.
2. Kasbadji Merzouk N. et N. Messen, « Etude des Vents dans les Zones Semi-arides, Application à la Wilaya de Djelfa », Chemss2000, Blida, 2000.
3. Technical note of WMO, « Meteorological Aspect of the Utilisation as an Energy Sources », N°175, 1981.
4. Takle E.S. et J.M. Brown, «Note on the Use of Weibull Statistic to Characterize Wind Speed Data ». Journal of applied Meteorology, N° 17, 1978.
5. Boumahrat M. et J. Gourdin, «Méthodes Numériques Appliquées ». Office des Publications Universitaires (OPU), 1983.
6. Khdiri F. et A. Laouina, «L'énergie Eolienne au Maroc Gisement-Dimensionnement », Rapport interne au Centre de développement des énergies renouvelables, Marrakech, Maroc, 1986.
7. Garel B., « Modélisation Probabiliste et Statistique », Cépaduès-Editions, 2002.
8. Kasbadji Merzouk N. et N. Messen, «Contribution à l'Etude du Vent en Rapport avec l'Erosion Eolienne dans les Zones Arides ». Revue Energies Renouvelables, numéro Spéciale Zones Arides, 2002.
9. Kasbadji Merzouk N. et H. Daaou, «Atlas Energétique Eolien de l'Algérie ». SIPE5, Béchar, 2000.
10. Kasbadji Merzouk N., « An Evaluation of Wind Energy Potential in Algeria ». Proceeding of EWEC'94 congress, Thessaloniki, Grèce, 1994.
11. Gachet G., «Etude Comparative de Différentes Méthodes d'Interpolation pour générer des Modèles numériques d'Altitude Raster à partir de Points Bruts LIDAR», [http://lasig.epfl.ch/services/cours_laser/pdf/RAp_INTER_Ver_1 .pdf](http://lasig.epfl.ch/services/cours_laser/pdf/RAp_INTER_Ver_1.pdf) 2005.
12. Kasbadji Merzouk N., « Wind Energy Potential in Algeria », Int. J. Renewable Energy, 21/3-4, 55 »-562, 2000.
13. Hammouche R., « Atlas Vent de l'Algérie/ONM ». Office des Publications Universitaires (OPU), Alger 1990.
14. UMA, « Etude préliminaire des atlas maghrébins des énergies renouvelables ». Rapport interne à UMA, 1992.

15. Kasbadji Merzouk N. et H. Daaou., « Cartes Saisonnières du Vent en Algérie ». Journée d'études : Météorologie et Climatologie entre sciences et prise de décision, ONM/Alger, 2001.
16. Kasbadji Merzouk N., « Atlas Vent de l'Algérie, Les limites des Méthodes d'Interpolation. Application au Nord Est de l'Algérie ». AL-SIG'99, Alger, 1999.
17. Lalas D.P., « Wind Energy Estimation and Sitting in Complex Terrain ». International Journal. Solar Energy, vol. 3, pp. 43-71, 1985.
18. Phillips G.T., « A Preliminary Users Guide for the NOABL Objectives Analysis Code ». Internal report, Science Application Inc., California, 1979, USA.
19. Kasbadji Merzouk N., H. Daaou et S. Haddouche, « Carte des Vents de Algérie, Etablies à l'aide du Modèle AIOLOS ». 4émé Congrès National de la Physique Energétique, Faculté de physique de l'USTHB, Sidi Fredj 2000.
20. Cuntry G., « Eoliennes et aérogénérateurs », EDISUD/Technologie douce, 1979.
21. Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, «Useful Power Density of a Wind Machine in Algeria ». Proceeding of International Mechanical Engineering Conference, Koweit, 2004.

CHAPITRE 3

EXTRAPOLATION VERTICALE DES PARAMETRES VENT

3.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre porte sur la détermination de la formule empirique adéquate pour l'extrapolation des paramètres de Weibull d'un niveau standard vers un niveau digne d'intérêt tel que la hauteur de l'hélice d'une éolienne. En premier lieu, la méthode d'extrapolation adoptée est présentée. En second lieu, on donnera un aperçu de la région d'implantation du pylône, des instruments de mesures et des données mesurées. Enfin, le traitement et le classement des données, selon différentes classes de stabilité, sont présentés. Ceci a permis l'établissement des formules empiriques valables pour les zones arides et semi-arides.

3.2 METHODE D'EXTRAPOLATION VERTICALE

L'extrapolation verticale de la vitesse du vent passe par l'élaboration du profil de la vitesse du vent en fonction de la hauteur. Ces profils dépendent de fonctions implicites dont l'expression diffère selon le cas de stabilité atmosphérique constaté. Souvent, dans la littérature, on suppose que l'atmosphère est neutre afin d'annuler la valeur de la fonction implicite.

Pour comparer les modèles d'extrapolation verticale des vitesses moyennes et des paramètres de Weibull, il faut classer les données en fonction des conditions de stabilité rencontrées pendant les mesures.

3.2.1 DETERMINATION DES CLASSES DE STABILITE

En utilisant la théorie de similitude de Monin-Obukov [1], l'expression de la vitesse du vent (Dryer 1974 et Paulson 1970) [2 et 3], en fonction de l'altitude du lieu s'écrit :

$$V(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi_M \left(\frac{z}{L} \right) \right) \quad 3.1$$

- avec :
- κ : constante de Von-Karman
 - z_o : rugosité du sol, m
 - u_* : vitesse de frottement du sol, m/s
 - L : longueur de Monin-Obukov, m
 - Ψ_M : fonctions implicites.

Selon le cas de stabilité de l'atmosphère (mesuré par la longueur de Monin-Obukov), cette dernière est donnée, [2] par :

➤ $L < 0$ (cas instable)

$$\psi_M = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2 \operatorname{Arctan}(x) + \frac{\pi}{2} \quad 3.2$$

Avec :

$$x = \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{1/4} \quad 3.3$$

➤ $L > 0$ (cas stable)

$$\psi_M = -5 \left(\frac{z}{L}\right) \quad 3.4$$

Pour connaître les classes de stabilité, il faudrait déterminer la longueur de Monin-Obukov qui est définie par :

$$L = \frac{\rho c_p u_*^3 T_o^*}{\kappa g H} \quad 3.5$$

- avec :
- ρ : masse volumique de l'air, kg/m^3
 - c_p : Chaleur spécifique de l'air à pression constante, J/kg K
 - T_o^* : Température ambiante, mesurée à 2 m du sol, K
 - H : Flux de chaleur sensible spécifique, W/m^2
 - z_o : Rugosité du sol, m

En supposant que la densité de l'air et sa chaleur spécifique soient constantes, les paramètres à déterminer pour le calcul de la longueur de Monin Obukov sont la chaleur sensible, la vitesse de frottement et la rugosité du lieu de d'implantation du pylône de mesure.

3.2.1.1 Détermination de la vitesse de frottement et de la rugosité du sol

En supposant que l'atmosphère puisse être considérée comme neutre, le profil de la vitesse du vent se met sous la forme, [4] :

$$V(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \quad 3.6$$

Expression valable pour un terrain homogène et pour des mesures effectuées à une hauteur inférieure à 100m. z_o et u_* sont déterminés à partir du profil du vent, après ajustement des mesures du vent, en fonction de l'altitude z .

L'équation 3.6 peut être linéarisée en posant :

$$X = \ln(z) \quad ; \quad A = \frac{u_*}{\kappa} \quad ; \quad B = -\frac{u_*}{\kappa} \ln(z_o) \quad 3.7$$

L'expression devient :

$$V(z) = A X + B \quad 3.8$$

En procédant à l'ajustement au sens des moindres carrés, il vient :

$$A = \frac{\text{Cov}(X, V(z))}{\text{Var}(X)} \quad \text{et} \quad B = \langle V(z) \rangle - A \langle X \rangle \quad 3.9$$

d'où :

$$z_o = \exp(A/ B) \quad \text{et} \quad u_* = \kappa A \quad 3.10$$

3.2.1.2 Détermination de l'échange par chaleur sensible

Un bilan d'énergie sur l'interface sol-air permet d'écrire, [5 et 6] :

$$H + \lambda E = Q^* - G^* \quad 3.11$$

avec

H : Flux échangé par chaleur sensible, W/m^2

λE : Flux échangé par chaleur latente, W/m^2

G : Flux échangé par convection, W/m^2

Q^* : Echange radiatif net, W/m^2

L'échange de chaleur par convection est fonction du bilan radiatif Q^* et peut être exprimé par :

$$G = c_G Q^* \quad 3.12$$

Expression dans laquelle c_G représente le rapport entre le flux de chaleur émis par le sol et l'échange radiatif net.

Ce coefficient dépend de la nature du sol et varie peu pour un sol défini. Il est approximé à 0.1 pour les étendues vides de toute construction, [5].

Un bilan radiatif sur la surface du sol, permet d'écrire :

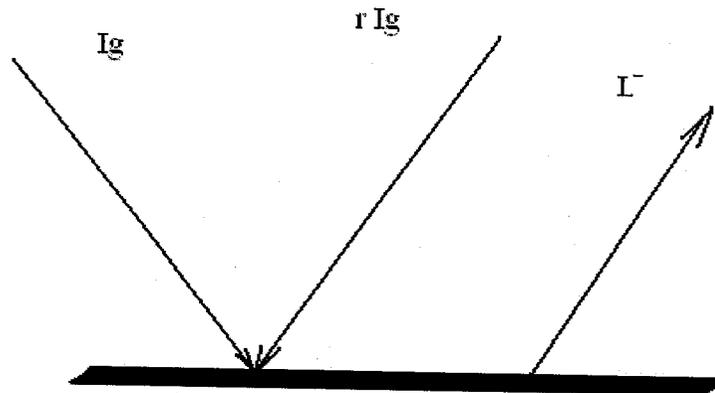


Figure 3.1 : Echange radiatif au sol-environnement.

$$Q^* = (1-r)I_g - L^- \quad 3.13$$

avec :

- r : albédo
- L^- : Rayonnement infrarouge émis par le sol, dans les grandes longueurs d'ondes, W/m^2
- I_g : Eclairement global incident, W/m^2 .

Après décomposition de l'éclairement incident et estimation des différentes composantes (annexe 2), il vient :

$$Q^* = \frac{0.588(1-r)I_{g,mesuré} + c_1 T^6 - \sigma T^4 + c_2 Nb}{1+c_3} \quad 3.14$$

Nb étant la nébulosité moyenne du site considéré.

Par ailleurs, pour un terrain sec et nu, le flux de chaleur latente est nul, car il n'y a pas d'évaporation d'eau, d'où :

$$H = (1-c_G)Q^* \quad 3.15$$

$$H = (1 - c_G) \frac{0.588 (1 - r) I_{g,mesuré} + c_1 T^6 - \sigma T^4 + c_2 Nb}{1 + c_3} \quad 3.16$$

Les différentes constantes sont données par Holstag, [6] et dépendent de la nature du terrain.

Cette méthode a permis de départager les données brutes en fonction des classes de stabilité.

3.2.2 METHODE D'EXTRAPOLATION VERTICALE DU VENT

3.2.2.1 Extrapolation verticale de la vitesse du vent

La loi de puissance est utilisée pour la détermination du profil vertical du vent.

Proposée par Reed et reprise par Mikhaïel et al [9], elle s'écrit :

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^n \quad 3.17$$

L'auteur, pose que l'exposant n du profil de la loi de puissance est fonction de la vitesse de référence V_1 , tel que $n=n(V_1)$. Il propose aussi de relier la vitesse V_1 à V_2 par la relation suivante :

$$V_2 = \alpha V_1^\beta \quad 3.18$$

avec :

$$\alpha = \alpha(z_1, z_2) \quad \text{et} \quad \beta = \beta(z_1, z_2) \quad 3.19$$

Les deux expressions précédentes 3.17 et 3.18 doivent être vérifiées en même temps. Pour la résolution, on introduit deux paramètres constants a et b pour la détermination des paramètres de n , α et β du système. L'équation 3.17 devient :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^a \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{n-a} \quad 3.20$$

Par identification des termes avec l'équation 3.17, on obtient

$$\alpha = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^a \quad \text{et} \quad V_1^\beta = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{n-a} \quad 3.21$$

En linéarisant cette dernière expression, il vient :

$$(\beta - 1) \log(V_1) = (n - a) \log\left(\frac{z_2}{z_1}\right) \quad 3.22$$

d'où l'on tire :

$$\frac{\beta - 1}{\log\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} = \frac{n - a}{\log(V_1)} = cste = b \quad 3.23$$

Et :

$$\beta = 1 + b \log\left(\frac{z_2}{z_1}\right) \quad ; \quad n = a + b \log(V_1) \quad 3.24$$

3.2.2.2 Extrapolation des paramètres de Weibull

Pour un site donné et à la hauteur z_1 , les fréquences cumulées pour $V \leq V_1$ s'écrivent, [10] :

$$F(V_1) = 1 - e^{-\left(\frac{V_1}{C_1}\right)^{k_1}} \quad 3.25$$

En faisant l'hypothèse que les fréquences sont indépendantes de la hauteur, il vient :

$$F(V_1) = F(V_2) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_1}{C_1}\right)^{k_1}\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_2}{C_2}\right)^{k_2}\right] \quad 3.26$$

En remplaçant V_1 par son expression (équation 3.17) :

$$F(V_2) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_2}{\alpha C_1^\beta}\right)^{k_1/\beta}\right] \quad 3.27$$

On obtient par identification,

$$C_2 = \alpha C_1^\beta \quad ; \quad k_2 = \frac{k_1}{\beta} \quad 3.28$$

On remarque que le paramètre d'échelle et la vitesse du vent varient d'une manière similaire. Par analogie, on a :

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^n \quad 3.29$$

avec :

$$n = a + b \log(C_1) \quad 3.30$$

A la hauteur de référence 10 et en combinant les relations 3.24 et 3.26, on tire :

$$\frac{k_{10}}{k} = 1 + b_{10} \log\left(\frac{z}{10}\right) \quad 3.31$$

La constante b_{10} étant déterminée à partir du tracé de k_{10}/k , en fonction de $\log(z/10)$, le rapport entre les facteurs de forme k_2 et k_1 s'écrit :

$$\frac{k_{10}/k_1}{k_{10}/k_2} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{1 + b_{10} \log\left(\frac{z_1}{10}\right)}{1 + b_{10} \log\left(\frac{z_2}{10}\right)} = \beta = 1 + b \log\left(\frac{z_1}{10}\right) \quad 3.32$$

L'extrapolation du paramètre d'échelle C passe par la détermination des constantes a et b de l'expression de l'exposant n , donnée par l'équation 3.30. En appliquant cette dernière à la référence $z=10$ m, il en vient :

$$n = a_{10} + b_{10} \log(C_{10}) \quad 3.33$$

a_{10} est déterminé grâce au tracé de la variation du coefficient de puissance n en fonction de $\log(C_{10})$. L'équation 3.29 permet d'écrire, pour une extrapolation de la référence 10 m à une altitude z_1 :

$$\frac{C_1}{C_{10}} = \left(\frac{z_1}{10} \right)^n \quad 3.34$$

d'où :

$$\log C_1 - n \log \frac{z_1}{10} = \log C_{10} \quad 3.35$$

En éliminant $(\log C_{10})$ entre les équations 3.33 et 3.35, on obtient :

$$n = \frac{a_{10} + b_{10} \log C_1}{1 + b_{10} \log \frac{z_1}{10}} \quad 3.36$$

3.3 ETUDE EXPERIMENTALE

3.3.1 APERÇU SUR LA REGION D'IMPLANTATION DU PYLONE DE MESURE

Le pylône de mesures des paramètres météorologiques a été implanté par l'ONM à la station météorologique de Ksar El Chellala, Wilaya de Tiaret. Située dans les hauts plateaux algériens, cette dernière est considérée comme une zone semi-aride avec un climat sec et rude, très chaud en été et souvent très froid en hiver. Les écarts de températures diurnes enregistrées dans la région, atteignent 19°C avec des précipitations de plus en plus faibles au fil des années, (actuellement entre 200 et 300 mm/an). [11].

3.3.2 TECHNIQUES DE MESURES RECOMMANDEES

Au cours de la recherche bibliographique, nous n'avons pas pu trouver de normes spécifiques aux mesures de paramètres météorologiques à différents niveaux de la couche limite atmosphérique.

Toutefois, JC. Kaimal [12], propose dans son papier différentes techniques de mesures ainsi que les capteurs nécessaires pour l'étude des profils dans la couche limite atmosphérique. Parmi les conditions nécessaires, on peut citer :

- l'implantation du pylône de mesure sur un terrain plat et homogène ;
- Les études précédentes ayant montré que pour des hauteurs inférieures à 8 m, le profil est logarithmique, alors qu'au-delà le profil devient linéaire, l'amplitude de variation de l'altitude doit être comprise entre 0.5 et 30 m minimum.
- Les mesures des différents paramètres doivent être effectuées au même instant et intégrées sur la même période.
- La période d'intégration des mesures doit être supérieure à la constante de temps du capteur
- Une précision de 0.05 m/s est requise pour la mesure de la vitesse moyenne
- Une précision de 0.01°C est requise pour la mesure de la température moyenne.
- Le nombre de point de mesures demandé doit vérifier le critère suivant :

$$N \geq \left[\frac{\sigma(x)}{\Delta x} \right]^2 \quad 3.37$$

Avec N le nombre de point, $\sigma(x)$ l'écart type de x et Δx la précision désirée.

3.3.3 PYLONE DE MESURE

La figure 3.é représente le schéma du pylône et des capteurs de mesures. Chacun des 5 paliers du mât ainsi que les mâts de 2 et 4m, disposent d'une station ENERCO comprenant une unité d'acquisition et des capteurs de mesures, à savoir :

- une sonde de température placée dans un mini abri ;
- un capteur d'humidité placé dans un mini abri (hygromètre);
- une girouette ;
- un anémomètre

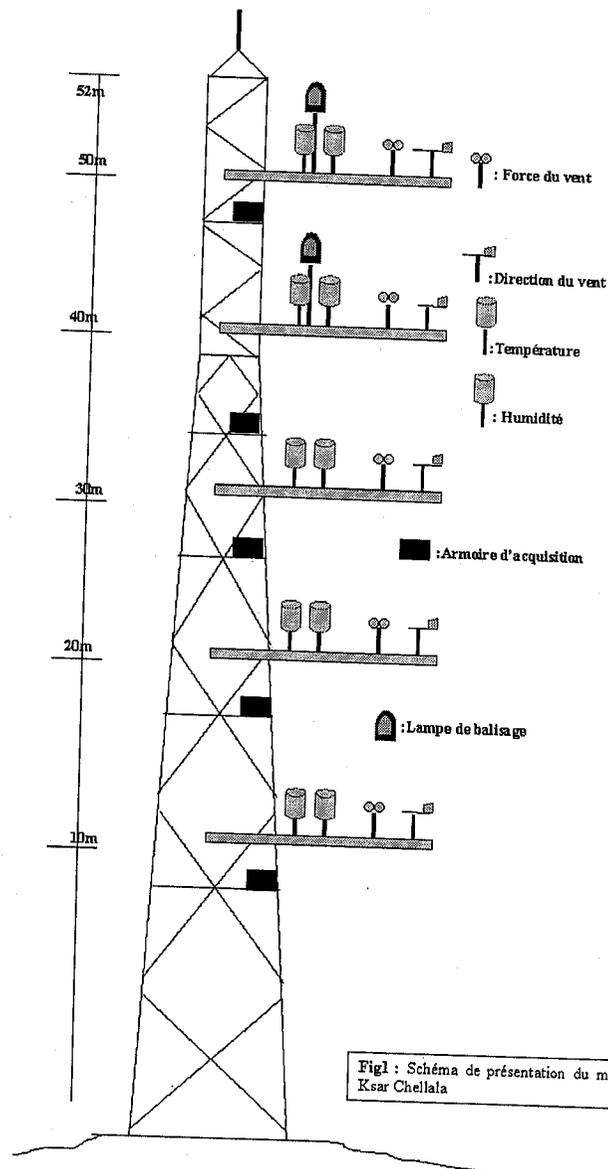


Figure 3.2 : Représentation schématique du pylône de mesure installé à Ksar El Chellala

Les différentes caractéristiques des capteurs de mesures installés sont les suivantes :

- Température : thermorésistance (Pt 100), précision au 1/10 degré.
- Humidité : sonde à variation capacitive, précision au 1/10 %.
- Direction du vent : Girouette, capteur potentiométrique, plage de mesure 0 à 360°, précision 5°, sensibilité 0.5 m/s.
- Vitesse du vent : capteur à impulsions avec une impulsion par mètre de vitesse de vent, plage : 0.3 à 50 m/s
- Insolation : héliographe électronique à fibre optique, résolution : 1/100 d'heure.
- Eclairement infra rouge : en mJ/cm² à l'aide d'un pyrgéomètre
- Eclairement diffus : en mJ/cm² à l'aide d'un pyranomètre
- Eclairement global : en mJ/cm² à l'aide d'un pyranomètre
- Rayonnement direct : mJ/cm² à l'aide d'un pyréliomètre

3.3.4 DONNEES MESUREES

Les mesures utilisées s'étalent sur une période de 10 mois, allant de juillet 2002 à janvier 2003 et avril à juin 2004.

Ce sont des mesures journalières prélevées toutes les 10 mn. Ces fichiers de données brutes portent sur les paramètres suivants :

- RAYRF : rayonnement réfléchi en mJ/cm²
- RDF : rayonnement diffus en mJ/cm²
- RIR : rayonnement infrarouge en mJ/cm²
- RAYGL : rayonnement global en mJ/cm²
- DI : durée d'insolation au 1/100 d'heure
- T : Température sous abri (en degrés et au dixième)
- DV : direction du vent (en degrés)
- V : Vitesse moyenne (en m/s)

Les paramètres vitesse, direction du vent et température, sont mesurés aux niveaux suivants : 02 04 10 20 30 40 et 50 mètres du sol.

3.3.5 TRAITEMENT DES DONNEES

3.3.5.1 Données manquantes

Sur l'année de mesures des paramètres brutes demandés auprès de l'ONM, seules 07 mois de mesures ont été fournis. Ces données ont été utilisées pour la détermination des formules empiriques d'extrapolation des paramètres de Weibull. Ces dernières ont été complétées par l'acquisition de mesures concernant trois autres mois qui ont d'ailleurs servi à la validation des formules (Avril - juin 2003).

Sur les 07 mois, 4.5% de données manquantes ont été retirées de la matrice initiale. Les données manquantes sont remplacées par le nombre "-999" dans les fichiers.

3.3.5.2 Données erronées

Le critère retenu pour l'acceptation repérer les données est basé sur l'hypothèse que le gradient de la vitesse dans le sens vertical est positif.

A ce titre, un programme calculant le gradient de la vitesse du vent par rapport à l'altitude de mesure a été développé.

Ceci a permis d'identifier les écarts négatifs qui ont entraîné le rejet de ces points de la matrice initiale. Ceci, tout en considérant toute les combinaisons possibles des hauteurs de mesures. Les résultats sont donnés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Dimension des matrices après filtrage.

Mois	A	Atm	A250	A250ss4	A450	A1050	A240ss4	A440	A240
Juillet	4608	4603	665	1124	665	1189	2370	2464	1331
Août	3600	3359	8	8	8	8	1906	1906	1864
Septembre	4032	3794	6	6	6	6	1935	1995	871
Octobre	4320	4174	568	764	568	769	2234	2362	1326
Novembre	3888	3784	815	820	815	820	2976	3022	2695
Décembre	4176	3989	28	28	28	28	2613	2613	2613
Janvier	4464	4125	9	9	9	9	3082	3082	3082
Total	29088	27819	2099	2759	2099	2829	17116	17443	13782
Tret	100%	95,64%	7,21%	9,49%	7,22%	9,73%	48,84%	59,97%	47,83%

Avec :

Tret.	:	Taux de données retenues
A	:	Matrice brute initiale
Atm	:	Matrice résultante après retrait des données manquantes
A250	:	Matrice retenue avec les niveaux, 2-4-10-20-30-40-50
A250ss4	:	" " " " " " , 2-10-20-30-40-50
A450	:	" " " " " " , 4-10-20-30-40-50
A1050	:	" " " " " " , 10-20-30-40-50
A240ss4	:	" " " " " " , 2-10-20-30-40
A440	:	" " " " " " , 4-10-20-30-40
A240	:	" " " " " " , 2-4-10-20-30-40

3.3.5.3 Données utilisées

Afin de se rapprocher des orientations précitées dans le paragraphe 3.3.3., le choix se portera sur la matrice A440 pour laquelle le nombre de données retenues est le plus élevé. Le profil du vent dans les premiers 8 mètres de la couche limite atmosphérique est cerné par la considération du niveau 4, soit pour $z_2=[4, 10, 20, 30, 40]$.

3.4 RESULTATS ET DISCUSSION

3.4.1 CHOIX DE LA METHODE D'EXTRAPOLATION

Pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent, on peut procéder de deux façons différentes, soit en passant par :

- L'extrapolation des mesures brutes de la vitesse moyennée sur un intervalle ne dépassant pas les 10 mn, (méthode dite : extrapolation des données à court terme)
- L'extrapolation des paramètres de Weibull, (méthode dite : extrapolation à long terme).

Afin de choisir le modèle le plus adéquat, une étude comparative du profil vertical du vent, basée sur les vitesses moyennes brutes et la moyenne estimée à chaque niveau, a été établie, [13].

En figure 3.3 est représentée la variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur durant la campagne de mesures ainsi que le résultat de l'interpolation des vitesses brutes mesurées en fonction de l'altitude.

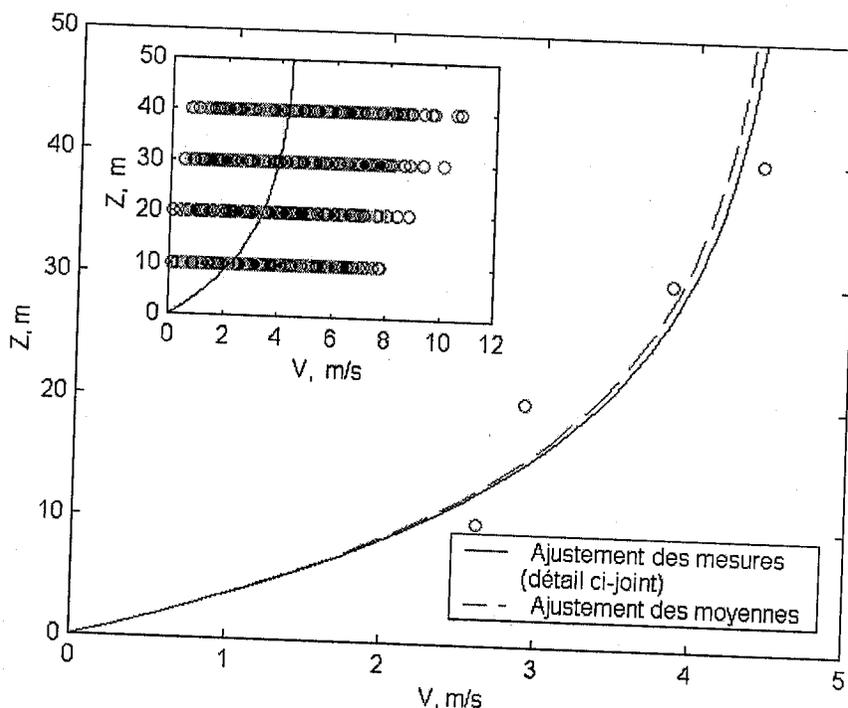


Figure 3.3 : Variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur.

De même, le tracé du profil vertical des vitesses du vent après ajustement au sens des moindres carrés est représenté.

On remarque que la courbe obtenue à partir des vitesses brutes (détail en fenêtre) est pratiquement confondue avec celle obtenue par corrélation des moyennes statistiques. Ceci nous a amené à utiliser les valeurs obtenues par cette dernière méthode pour la suite de l'étude.

3.4.2 DETERMINATION DES CLASSES DE STABILITE

3.4.2.1 Rugosité et vitesse de frottement

La rugosité du sol et la vitesse du frottement au sol sont tabulées suivant la nature du terrain, [14] (tableau 3.3). Toutefois, ceci n'est valable que si le terrain est homogène et que les obstacles sont situés à une distance supérieure à 1 km.

Comme ceci n'est pas le cas sur le site d'expérimental, la rugosité du sol et la vitesse de frottement ont été déterminées pour chaque mois, saison puis globalement.

Tableau 3.3 : Rugosité du sol pour différents types de terrains, Lysens.

Type de terrains	Description	Rugosité, m
Plat	Plage, glace, neige et océan.	0.005
Ouvert	Aéroports, terre vide de récolte, herbe basse.	0.04
	Herbes hautes et récoltes basses.	0.10
Rugueux	Rangée de grandes récoltes et petite forêt.	0.25
Très rugueux	Forêts et vergers	0.50
Fermé	Villages et banlieues.	1.0
Villes	Centres villes, espaces ouverts dans la forêt.	>2

L'estimation est basée sur l'hypothèse d'une stabilité atmosphérique neutre et en utilisant le modèle logarithmique (équation 1.33).

Les résultats sont figurés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 Résultats de la rugosité du sol et de la vitesse de frottement

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

En figures 3.4 et 3.5 sont représentées les courbes représentatives de l'évolution de la vitesse du vent en fonction de l'altitude à l'échelle mensuelle et saisonnière.

Ces courbes ont permis la détermination de la rugosité du sol et du coefficient de frottement.

Alors que les courbes sont confondues pour les mois de juillet, août et septembre, elles sont décalées pour le reste de la période.

A l'échelle saisonnière, le même décalage est constaté pour la période hivernale, qui semble plus ventée que le reste de l'année.

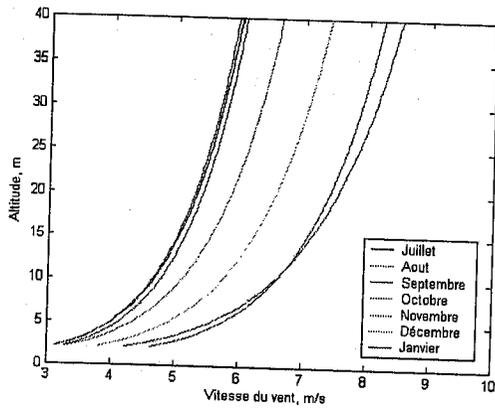


Figure 3.4 : Profil logarithmique de la vitesse du vent à l'échelle mensuelle.

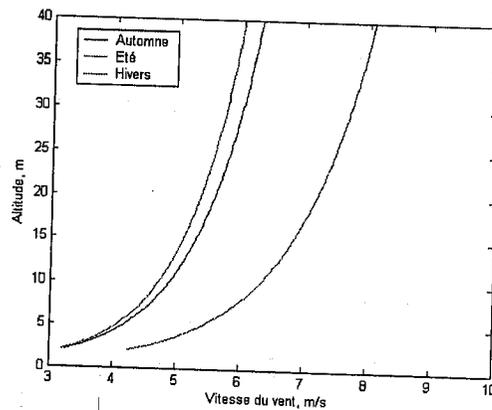


Figure 3.5 : Profil logarithmique de la vitesse du vent à l'échelle saisonnière.

En figure 3.6 est donné le profil logarithmique de la vitesse du vent pour les 07 mois de mesures. L'intersection avec l'axe des permet la détermination de la rugosité. La valeur obtenue de 0.749 est proche de celle donnée par l'ONM qui est de l'ordre de 0.08. On remarque que les variations asymptotiques s'annoncent dès les 40 m d'altitude.

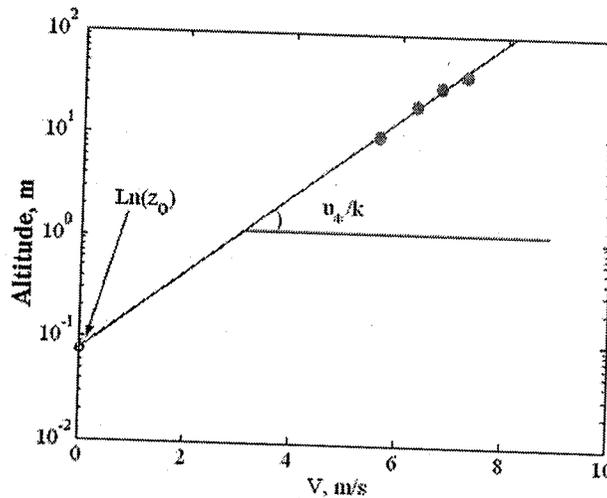


Figure 3.6 : Détermination de la rugosité pour toute la période considérée.

3.4.2.2 Echange par Chaleur sensible

L'équation 3.14 est utilisée pour la détermination de l'échange par chaleur sensible :

Les différentes constantes dépendent de la nature du sol et sont données par Holstag, [6] comme suit :

$$c_G = \begin{cases} 0.1 & \text{pour un terrain nu où gazonné} \\ 0 & \text{pour un terrain enneigé} \end{cases}$$

$$c_1 = 5.31 * 10^{-12} \quad \text{W m}^{-2} \text{K}^{-6} \quad (\text{Paramètre empirique})$$

$$c_2 = 60 \text{ W/m}^2 \text{ valable pour les altitudes moyennes.}$$

$$c_3 = 0.12, \text{ pour un terrain gazonné}$$

$$0.38, \text{ pour un terrain nu}$$

Vu que le site d'implantation du pylône de mesure est semi-aride, les coefficients c_G et c_3 considérés sont pris respectivement égaux à 0.1 et 0.38.

La nébulosité moyenne mensuelle a été prise à partir des tables établies par Capderou, [7], pour la région de Djelfa (tableau 3.5).

Tableau 3.5 : Nébulosité moyenne mensuelle du site de Djelfa

Mois	Nébulosité
Janvier	0.34
Février	0.37
Mars	0.36
Avril	0.26
Mai	0.31
Juin	0.21
Juillet	0.16
Août	0.20
Septembre	0.27
Octobre	0.30
Novembre	0.40
Décembre	0.38
Moyenne	0.30

Selon Capderou [7], pour les zones désertiques, l'albédo varie entre 0.2 et 0.3. Nous l'avons supposé constant et égal à 0.25 ce qui correspond à du sable sec.

Une simulation numérique basée sur une méthode itérative a été développée pour le calcul de l'échange par chaleur sensible.

L'éclairement global incident I_g et la quantité de chaleur sensible H sont tracés pour chaque mois ainsi que pour toute la période de mesures en figures 3.7. On remarque que contrairement au rayonnement global, les maxima atteints par la quantité de chaleur sensible sont proches avec une différence de l'ordre de 100 W/m^2 entre les mois d'été et d'hiver.

En partant des définitions énoncées au tableau 3.6, les données ont été triées par classes de stabilité atmosphérique selon la valeur de H .

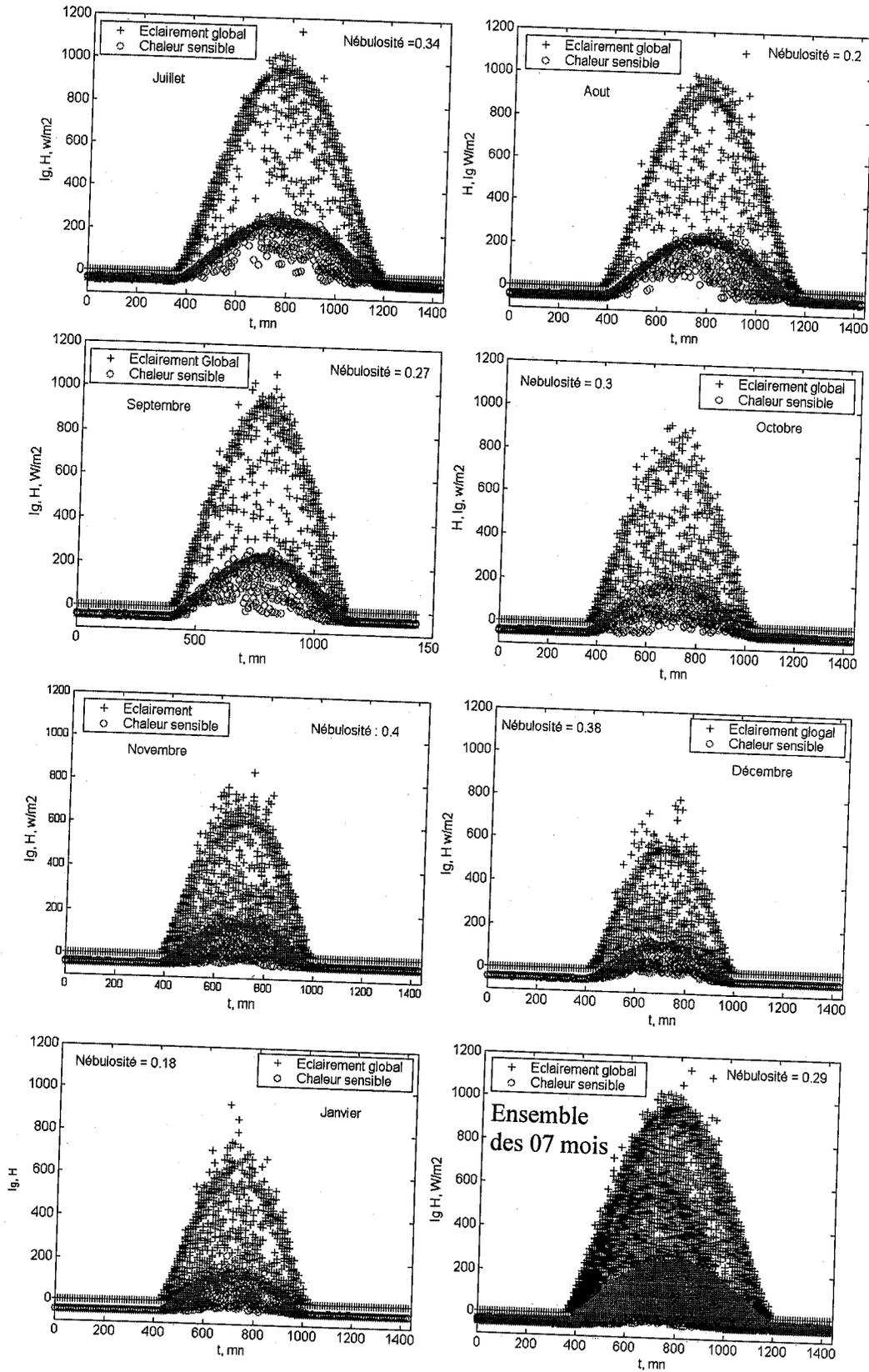


Figure 3.7 : Tracé de l'éclairement global et du flux échangé par chaleur sensible pour les 3 saisons ainsi que pour la période.

Tableau 3.6 : Définition des classes de stabilité selon la quantité de chaleur sensible.

Cas de stabilité	Condition nécessaire	Gamme choisie	Situation
Neutre	H proche de zéro	$-0.05 \geq H \geq 0.1$	Transition entre la nuit et le lever et coucher du soleil.
Instable	H positive	$H > 0$	Du lever au coucher du soleil, (La journée)
Stable	H négative	$H < 0$	La nuit

En figure 3.8 sont tracés la variation de l'éclairement global et de la quantité de chaleur sensible selon la classe de stabilité, sur les trois saisons disponibles (été, hiver et automne) ainsi que pour toute la période de mesures. Les résultats obtenus montrent que pour le cas stable, la quantité de chaleur sensible varie entre -50 et 120 W/m^2 . Il faut signaler que le passage des conditions stables à instables se fait lorsque l'éclairement solaire atteint 12% (soit 120 W/m^2) de l'éclairement solaire maximale.

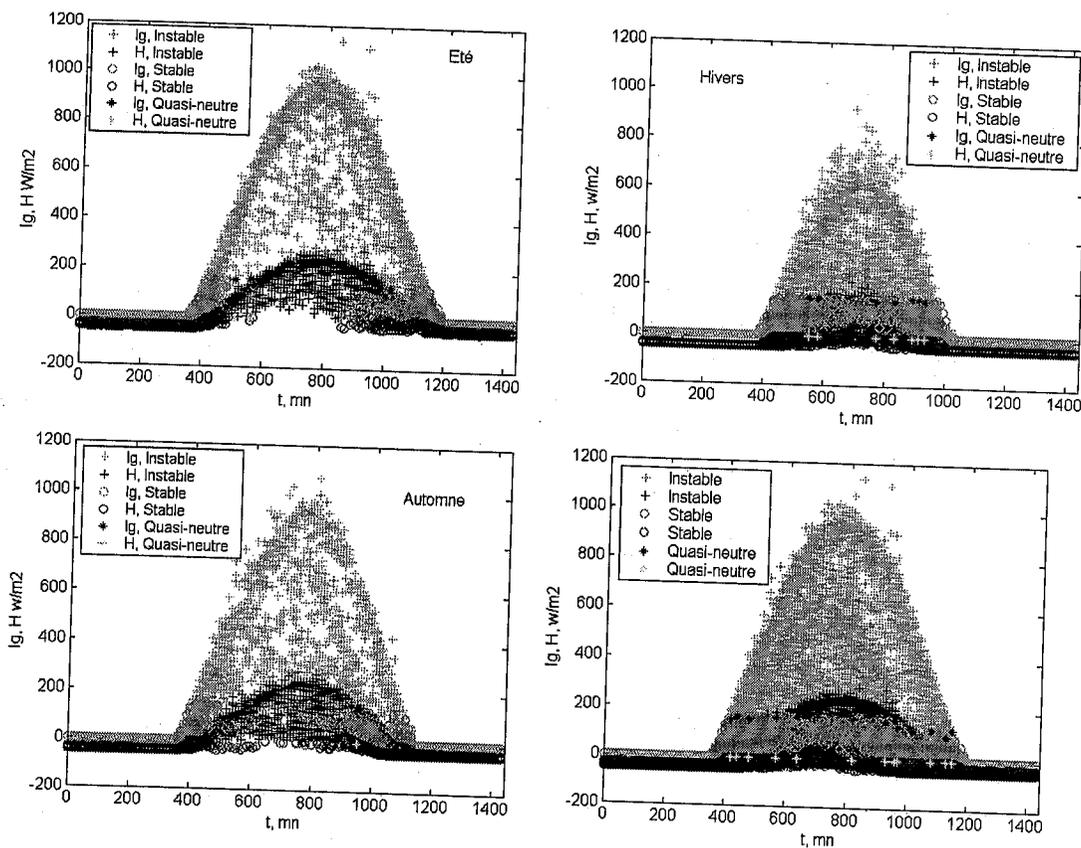


Figure 3.8 : Variation de l'éclairement global et du flux échangé par chaleur sensible pour les 3 saisons ainsi que pour la période de mesures selon les classes de stabilité.

3.4.2.3 Classes de stabilité

La détermination du flux de chaleur sensible, de la vitesse de frottement et de la rugosité du sol permet le calcul de la longueur de Monin Obukov à l'aide de l'équation 3.5. Au tableau 3.7 sont donnés les classes de stabilité en fonction de la longueur de Monin-Obukov. On remarque que pour les mois de septembre et octobre, les conditions atmosphériques ont été instables durant toute la période.

Tableau 3.7: Longueur de Monin-Obukov selon la classe de stabilité atmosphérique.

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

Les dimensions des matrices obtenues après classement des données selon les classes de stabilité sont données au tableau 3.8. Sur les $16986 \cdot 28$ données représentant la période de mesures, seules $10 \cdot 28$ sont classées dans le cas quasi-neutre.

Tableau 3.8 : Dimensions des matrices obtenues après classement des données selon la classe de stabilité atmosphérique

Mois	Instable	Stable	Quasi-neutre
Juillet	$827 \cdot 28$	$1538 \cdot 28$	$0 \cdot 28$
Août	$655 \cdot 28$	$1250 \cdot 28$	$0 \cdot 28$
Septembre	$591 \cdot 28$	$1342 \cdot 28$	$2 \cdot 28$
Octobre	$516 \cdot 28$	$1589 \cdot 28$	$0 \cdot 28$
Novembre	$664 \cdot 28$	$2308 \cdot 28$	$4 \cdot 28$
Décembre	$526 \cdot 28$	$2086 \cdot 28$	$1 \cdot 28$
Janvier	$527 \cdot 28$	$2552 \cdot 28$	$3 \cdot 28$
Automne	$1105 \cdot 28$	$2931 \cdot 28$	$3 \cdot 28$
Été	$1488 \cdot 28$	$2782 \cdot 28$	$0 \cdot 28$
Hiver	$1708 \cdot 28$	$6956 \cdot 28$	$7 \cdot 28$
Total	$4301 \cdot 28$	$12675 \cdot 28$	$10 \cdot 28$

3.4.3 EXTRAPOLATION VERTICALE DES VITESSES MOYENNES

3.4.3.1 Extrapolation des vitesses par la loi de puissance

La loi de puissance donnée par l'équation 3.17, permettant l'extrapolation de la vitesse du vent moyennée sur une courte durée, a été développée en faisant l'hypothèse d'une stabilité atmosphérique neutre.

Afin de vérifier l'hypothèse faite par nombre d'auteurs que l'atmosphère est neutre pendant toute la journée, l'exposant n a été déterminé en utilisant toutes les données et en supposant l'atmosphère neutre, (1^{er} estimation) puis en ne considérant que les données classées dans le cas quasi-neutre. Attendu que les dimensions des matrices, lorsque l'atmosphère est stable sont faibles pour le mois et les saisons, la comparaison a été faite en considérant toute la période de mesures.

La figure 3.9 représente la variation de la vitesse du vent en considérant la loi de puissance pour le cas réellement neutre et en étalant cette hypothèse à l'ensemble des données.

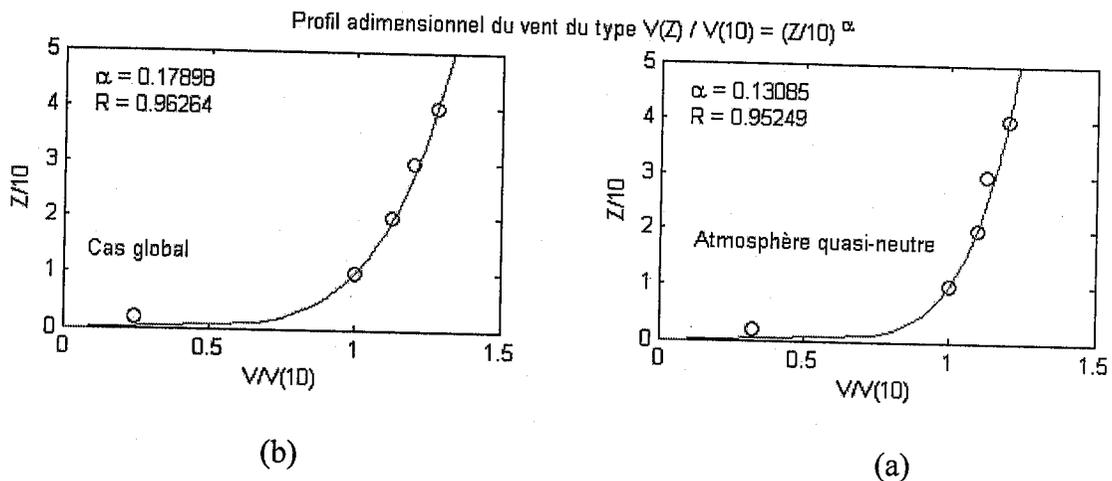


Figure 3.9 : Comparaison du profil du vent sur toute la période de mesures pour une atmosphère neutre (a) et faisant l'hypothèse d'une atmosphère neutre pour toute la période (b).

On remarque que les courbes représentées dans les figures ont la même allure, mais que l'exposant diffère entre les deux cas.

L'écart quadratique moyen calculé, est de l'ordre de 13%, ce qui ne justifie pas la supposition de condition atmosphérique neutre.

3.4.3.2 Distribution de Weibull

En figure 3.10 sont représentés les histogrammes en fréquences de la vitesse du vent calculée pour un pas de 1 m/s pour tous les niveaux de mesures avec les courbes représentatives obtenues par l'ajustement au sens du maximum de vraisemblable, en utilisant la distribution de Weibull. Les paramètres (facteur de forme k et facteur d'échelle C) sont calculés pour chaque niveau.

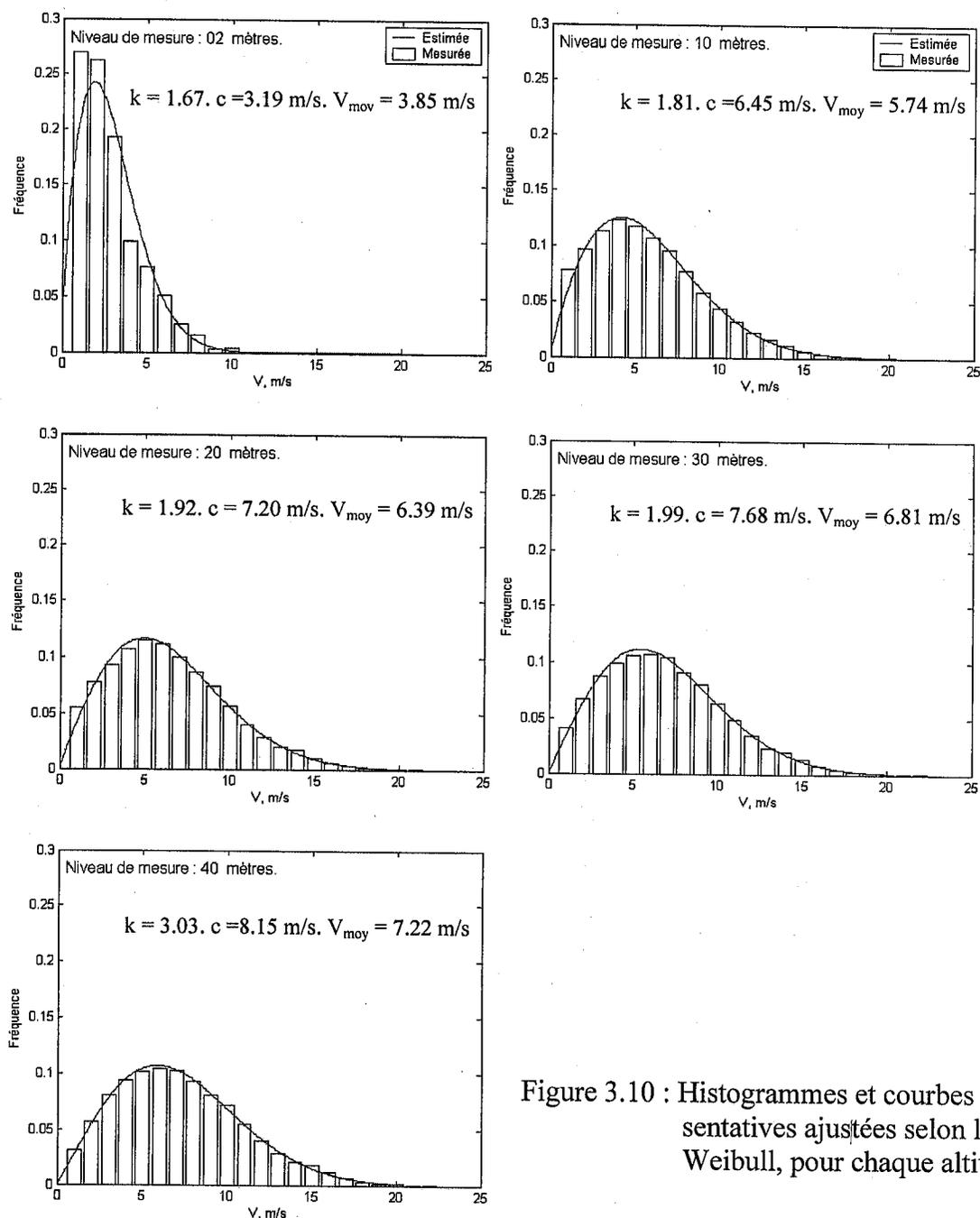


Figure 3.10 : Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull, pour chaque altitude.

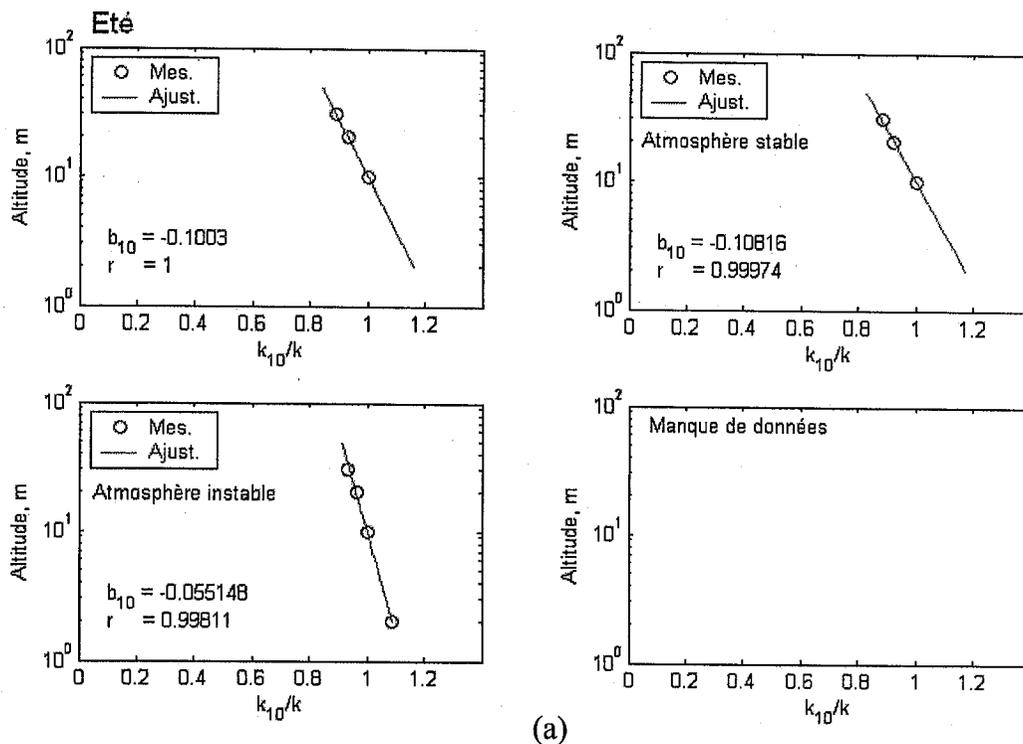
Le facteur d'échelle et la vitesse moyenne du vent, passent du simple au double lorsque l'altitude des points de mesure varie de 2m à 10m. À partir de cette altitude, la variation prend une allure asymptotique.

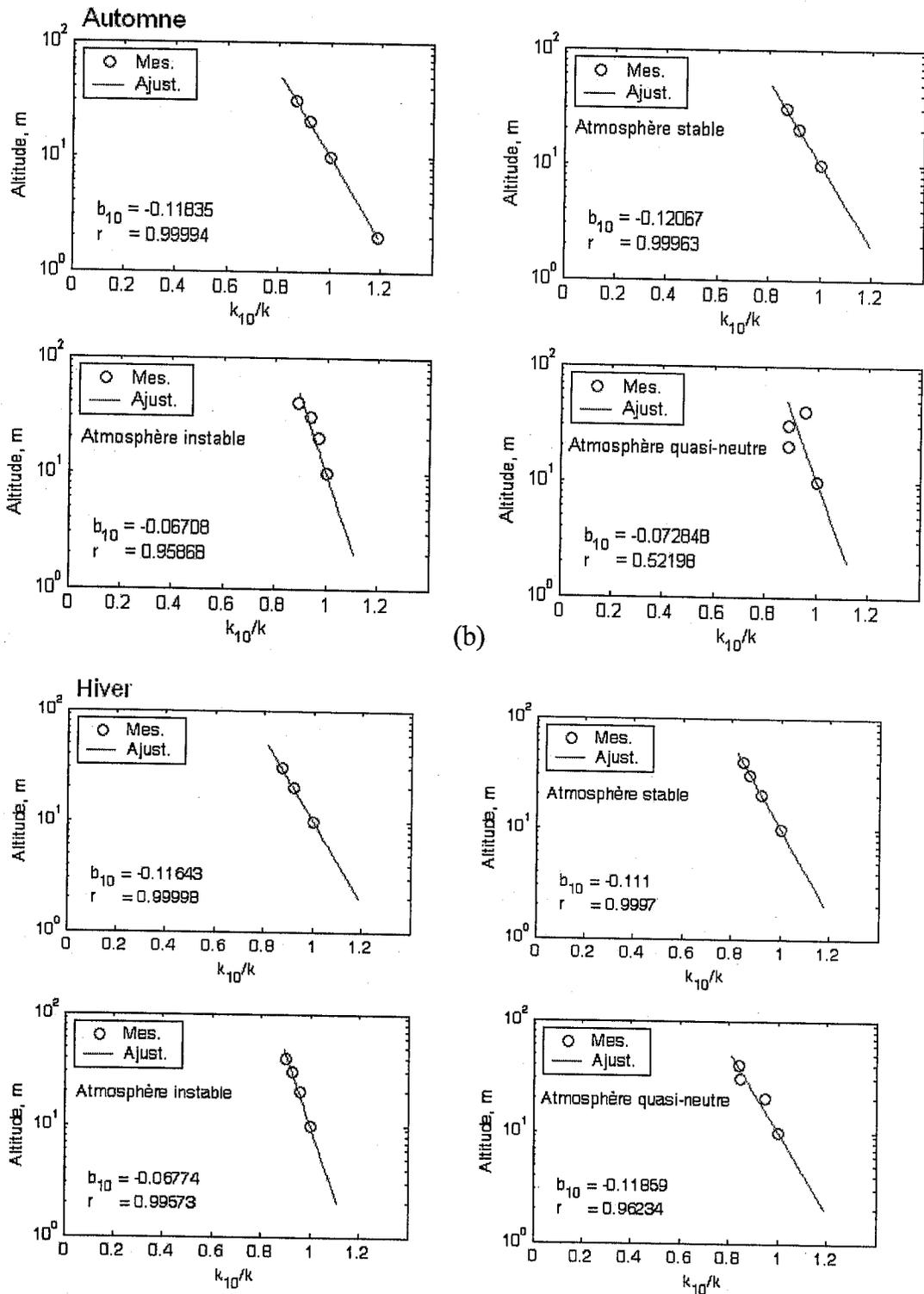
On remarque que près du sol, les valeurs enregistrées sont très variables. On note par ailleurs, que la proportion de vent faible diminue avec l'altitude et est inférieure à 3% à 40m d'altitude.

a - Facteur de forme k

L'extrapolation du facteur de forme d'un niveau à un autre se fait à l'aide de l'équation 3.32. Le facteur b_{10} est déterminé à l'aide du tracé de k/k_{10} en fonction de $\log(z/10)$. Ce paramètre a été déterminé par saison et pour toute la période de mesures. Le critère de Chauvenet a été utilisé pour l'élimination des points erronés. [15].

Les figure 3.11 a, b et c représentent la variation du rapport k_2/k_1 en fonction de la hauteur de référence et de l'altitude.





(c)

Figure 3.11 : Variation du rapport de facteur de forme en fonction de l'altitude selon les saisons. a- été, b- Hiver et c- Automne

Les différentes mesures ont été départagées suivant les classes de stabilité. Les points de mesures et la droite d'ajustement sont représentés sur les mêmes figures. La qualité

de l'ajustement est représentée par la valeur du coefficient de corrélation. Les coefficients b_{10} sont faibles lorsque les conditions atmosphériques sont stables, et sont très proches du cas où toutes les conditions atmosphériques sont confondues. Dans ce cas et pour les trois saisons traitées, les différences enregistrées ne dépassent pas les 3%.

En figure 3.12, les mêmes courbes sont représentées pour les 07 mois de mesures. Dans ce cas, on constate que les coefficients estimés b_{10} se rapprochent pour le cas stable, quasi-neutre et toutes confondues, alors qu'il reste faible pour le cas instable.

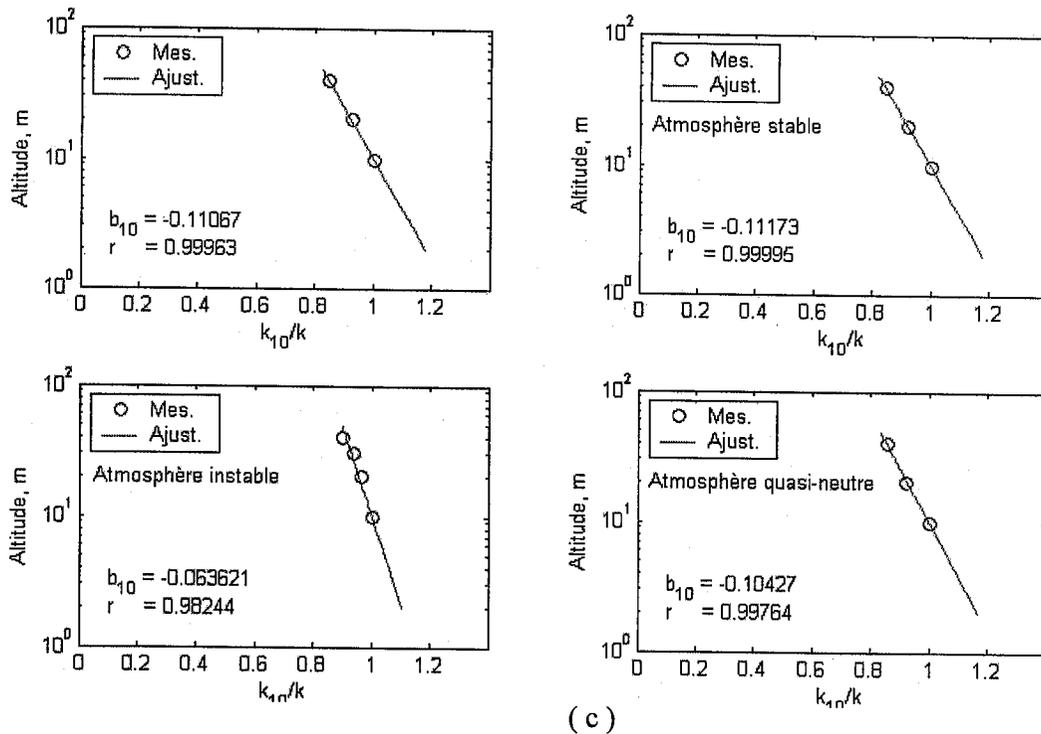


Figure 3.12 : Variation du rapport de facteur de forme en fonction de l'altitude pour toute les mesures et selon la stabilité atmosphérique.

b – Facteur d'échelle C

L'estimation de l'exposant du modèle d'extrapolation est donnée par l'équation 3.33. La détermination du facteur d'échelle passe par le calcul de la constante a_{10} et de l'exposant n en fonction de $\log(C_{10})$ pour toutes les catégories de données, à savoir mensuelles, saisonnières ainsi que pour toute la période de mesures. L'extrapolation du paramètre C se fait à l'aide de l'équation 3.36.

Le tableau 3.9 regroupe les résultats des ajustements établis au sens des moindres carrés.

Tableau 3.9 : Valeurs mensuelles de l'exposant n obtenues par ajustement.

Condition atmosphérique			Stable		Instable		Neutre	
	C_{10}	n	C_{10}	n	C_{10}	N	C_{10}	n
Janvier	8.319	0.154	7.763	0.175	10.887	0.080	8.393	0.042
Décembre	7.621	0.176	7.402	0.197	6.457	0.102		
Novembre	7.464	0.192	7.037	0.221	8.897	0.108	8.595	0.051
Octobre	6.030	0.191	5.359	0.225	8.154	0.110		
Septembre	5.337	0.184	4.747	0.228	6.690	0.099	6.687	0.178
Aout	5.451	0.177	4.945	0.221	6.442	0.103		
Juillet	5.525	0.178	5.335	0.211	5.862	0.120		
Eté	5.492	0.178	5.174	0.215	6.109	0.112		
Hivers	7.282	0.180	6.828	0.204	9.118	0.100	7.255	0.129
Automne	5.693	0.188	5.077	0.227	7.348	0.105	10.793	0.105
Global	6.456	0.182	6.070	0.211	7.614	0.105	8.179	0.141

Dans le cas présent, le paramètre b_{10} doit être fixé à la valeur déterminée pour le cas global tel que donné au tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Valeur de la constante b_{10}

Condition atmosphérique	b_{10}
Données confondues	-0.11607
Stable	-0.1173
Instable	-0.06362
Quasi-neutre	-0.10427

La figure 3.13 représente les nuages de points ainsi que les droites d'ajustement respectives de l'exposant n par rapport au $\log(C_{10})$. Le paramètre a_{10} , déterminé après lissage est proche pour les cas neutre, stable et quasi-neutre mais reste lointain pour le cas instable.

Les résultats obtenus sont regroupés dans tableau 3.11 donnant l'expression de l'exposant selon le cas considéré.

On remarque qu'en ignorant les classes de stabilité, on aboutit à une expression de l'exposant assez proche de celle trouvée pour le cas neutre.

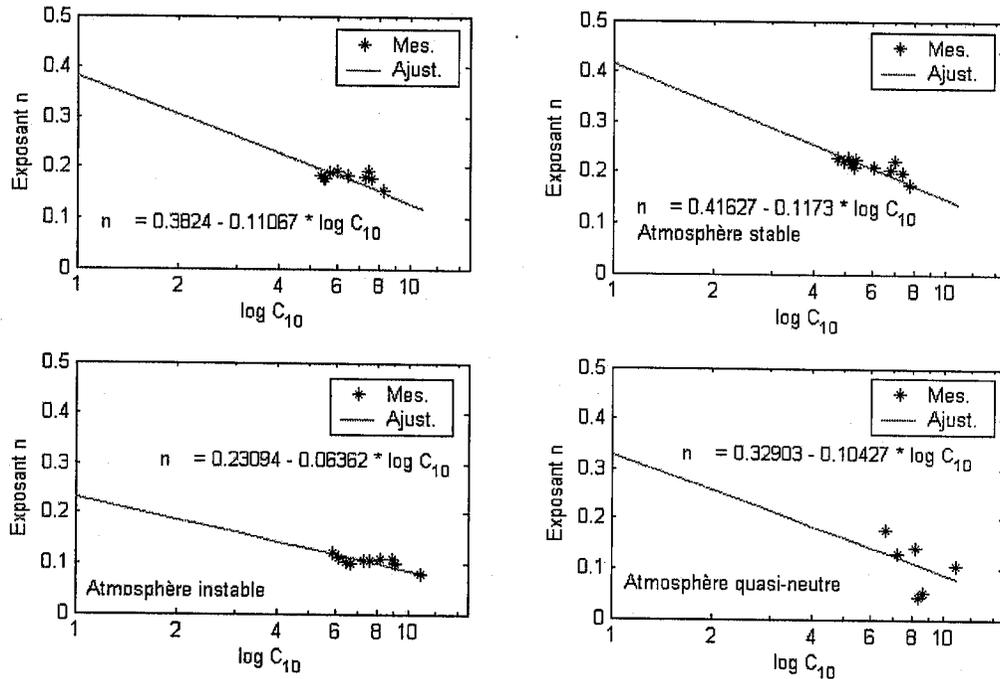


Figure 3.13 : Tracés de la variation de l'exposant n en fonction $\log(C_{10})$ pour la détermination de la constante a_{10} .

Tableau 3.11 : Expressions de l'exposant n de la loi de puissance

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

3.38

c- Vitesse moyenne

Attendu que, par hypothèse, l'exposant n est valable pour l'extrapolation de la vitesse du vent, ce dernier se met sous la forme :

$$n = \frac{a_{10} + b_{10} \log V_1}{1 + b_{10} \log \frac{z_1}{10}} \tag{3.39}$$

3.5 CONCLUSION

La rugosité du sol, le coefficient de frottement et le flux échangé par chaleur sensible permettant la détermination de la longueur de Monin Obukov, ont été déterminés. Ceci a permis le classement des mesures vent relevées à l'aide du pylône de Ksar El Chellala, selon la classe de stabilité atmosphérique. Ceci a permis la caractérisation verticale de la vitesse du vent dans la couche limite atmosphérique.

Enfin, l'extrapolation verticale des paramètres de Weibull et de la vitesse moyenne du vent ont été établies. Ces dernières s'adaptent mieux aux climats semi-arides des hauts plateaux algériens.

REFERENCES

1. Monin A.S. et Obukov A.M. « Basic Regularity in Turbulent Mixing Surfaces Layer of the Atmospheric ». Akad. Nauk. S.S.S.R.. Trud Geof. Inst. 24, 151. 1954.
2. Dyer A.J., « A Review of Flux Profile Relationships ». Boundary Layer Meteorology, 7, pp. 363-372, 1974.
3. Paulson C.A. « The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer ». Journal of Applied Meteorology, 1970.
4. Tennekes A., « The Logarithmic Wind Profile » Journal of Atmospheric Sciences. vol. 30, pp. 234-238, 1973.
5. Itier B. « Une Méthode Simplifiée pour la Mesure du Flux de Chaleur Sensible » Journal Recherche Atmosphérique 14, N° 1, pp: 17-44, 1980.
6. Holtslag A.A.M. et A.P. Van Ulden « A Simple Scheme for Daytime Estimates of the Surface Fluxes from Routine Weather Data » Journal of Climate and Applied Meteorology. vol. 22, N°4, 1983.
7. Capderou M. « Atlas Solaire de l'Algérie. Modèles Théoriques et Expérimentaux ». OPU, mai 1988.
8. Merzouk M. « Contribution à la Détermination des Performances Théoriques et Expérimentales des Capteurs Solaires à Tubes Sous-vide en Régime Transitoire ». Thèse de doctorat d'état en physique énergétique, Université de Tlemcen, 2004.
9. Mikhail A.S. et C.G. Justus « Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis ». Wind Engineering, Vol. 5, N° 02, 1981.
10. Justus C.G. et A. Mikhail « Height Variation of Wind Speed and Wind Distributions Statistics ». Geophysical Research Letters, vol. 3, N° 5, 1976.
11. Messen. N., N. Kasbadji Merzouk, A. Brague, C. Zaidi et Z. Benzenboua. « Contribution à l'Etude du Vent en Rapport avec l'Erosion Eolienne dans les Zones Aride ». Rapport Technique Final. Centre de Recherche Scientifique et Technique en Zone Aride, Biskra. Algérie, 2000.
12. Kaimal J.C. « Sensors and Techniques for Direct Measurement of Turbulent Fluxes and Profiles in the Atmospheric Surface Layer » Atmospheric Tehnology, N°7, 1975.

13. Kasbadji Merzouk N., M. Merzouk, N. Messen et B. Benyoucef « Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Milieu Semi-Aride. Test des Modèle d'Extrapolation. » International Congress on Photovoltaic and Wind Energies, Tlemcen 2003.
14. Hammouche R. « Atlas Vent de l'Algérie, ONM » Office des Publications Universitaires (OPU) Algérie, 1990.
15. Boumahrat M. et J. Gourdin « Méthodes Numériques Appliquées ». Office des Publications Universitaires (OPU), Algérie, 1983.

CHAPITRE 4

DISCUSSION ET SYNTHÈSE

4.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre porte sur la discussion des résultats et la synthèse de la présente étude. La première partie porte sur la validation de l'interpolation spatiale (Atlas et modèle Ailos) et du modèle d'extrapolation verticale de la vitesse du vent proposée. La seconde partie porte sur l'étude des limites des modèles établis. Limites liées à la projection des vitesses du vent, à la qualité et la densité des points de mesures ainsi que celles relatives à la rugosité et à la fréquence des vitesses nulles.

Enfin, la comparaison entre les atlas extrapolés avec le modèle Justus et Mikhaïel, [1] et celui proposée est établie ainsi que celle comparant les modèles proposés par la littérature avec le modèle établi.

4.2 VALIDATION DES ATLAS EOLIENS

4.2.1 DONNEES MESUREES AU SOL

En l'absence de travaux antérieurs, il est impossible de faire une validation avec des résultats fournis par la littérature.

Selon des informations recueillies lors de colloques, un atlas éolien du monde arabe serait en cours de réalisation sous l'égide de l'Alecso [2], mais à ce jour, ce travail n'a fait l'objet d'aucune publication.

Par contre, la carte obtenue représentant la vitesse moyenne annuelle interpolée à 10m du sol, affiche des variations dans une gamme toute à fait vraisemblable et les zones particulièrement ventées se trouvent en altitude (Tiaret) ou dans des couloirs (Adrar, Ould Fayet et Ksar El Chellala) déjà signalés par les bulletins mensuels d'informations climatologiques, [3] et les travaux de Hammouche, [4].

Nous pouvons donc considérer que les résultats obtenus sont valables et peuvent être exploités sans problème.

4.2.2 MODELE AILOS

Un traitement statistique des paramètres vent mesurés à 10m du sol par neuf stations météorologiques situées au nord de l'Algérie, à savoir Annaba, Béjaia, Skikda Bordj Bou Arriredj, Sétif, In Oussera, Ksar El Chellala et Djelfa est effectué. Ces stations sont caractérisées par différentes topographies. La distribution de Weibull a été utilisée pour l'évaluation de la vitesse moyenne annuelle à 10m du sol. En outre, le modèle d'AIOLOS est appliqué sur une surface de 20 km², contenant les différentes stations considérées. Le pas du maillage choisi est de 1 km, [5].

Pour valider le modèle d'AIOLOS, les mesures relevées à 10m sont traitées à l'aide de la distribution de Weibull et les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus après la projection des données mesurées à 3000 m au sol, (tableau 4.1). L'erreur relative associée est calculée en utilisant l'écart relatif, soit :

$$Er = \frac{\bar{V}_{Ailos} - \bar{V}_{Mesurée}}{\bar{V}_{Ailos}} \quad 4.1$$

Les écarts sont représentés en figure 4.1, en fonction de l'altitude des stations météorologiques. On peut voir, que les vitesses estimées par le modèle AIOLOS sont sous-estimées par rapport aux mesures au sol pour les altitudes inférieures à 1000 m, tandis qu'elles sont surestimées pour des altitudes supérieures à 1000 m.

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

Tableau 4.1 : Comparaison entre les résultats de l'estimation par Ailos et les mesures au sol.

Sites	V _{Ailos} , m/s	V _{Mesurée} , m/s	Er, %	Al, m	Observations
Annaba	3.40	4.03	-18.5	5	Côte
Bejaia	4.32	4.96	-14.8	1	"
Skikda	3.30	3.65	-10.6	1	"
Bordj Bou Arriredj	3.73	4.37	-17.2	928	Hauts plateaux
Sétif	4.00	3.94	1.50	1033	"
InOussera	4.00	4.30	-7.50	649	"
Ksar El Chellala	4.55	5.50	-20.9	800	"
Djelfa	3.90	3.60	7.69	1144	"

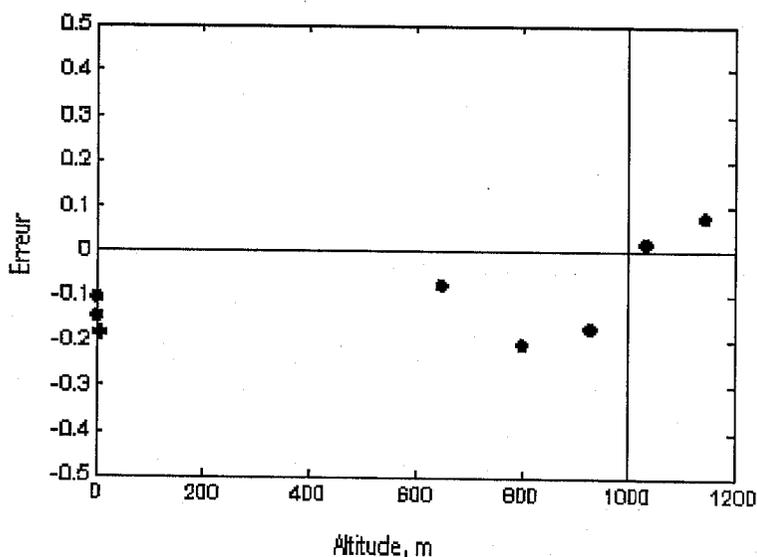


Figure 4.1 : Distribution de l'erreur relative entre les vitesses mesurées au sol et les vitesses estimées par Ailos.

4.3 VALIDATION DES MODELES D'EXTRAPOLATION VERTICALE

Afin de valider le modèle établi, les résultats d'extrapolation obtenus ont été comparés avec les résultats statistiques de trois mois de mesures non utilisés lors de l'établissement des modèles. Les données des mois d'avril, mai et juin 2003 ont été traitées pour chaque niveau de mesure (10, 30, 40 et 50m). Les paramètres de Weibull ont été déterminés et la vitesse moyenne calculée.

Par ailleurs, les facteurs de forme et d'échelle, estimés à 10m du sol ont été extrapolés à l'aide des modèles établis pour le cas indifférent des conditions atmosphérique et pour les conditions stables à 30, 40 et 50m du sol.

Les paramètres extrapolés ont permis le calcul des vitesses moyennes pour chaque cas. La comparaison entre les vitesses estimées et mesurées de la vitesse du vent est présentée en figure 4.2. On remarque que les profils ont la même allure avec un écart qui augmente avec l'altitude.

Lorsque ces dernières sont inférieures à 30m les mesures s'ajustent avec la cas ou les conditions atmosphériques sont indifférentes au mouvement des masses d'air alors qu'à partir de cette altitude les mesures s'ajustent avec les résultats obtenus dans les conditions atmosphériques stables.

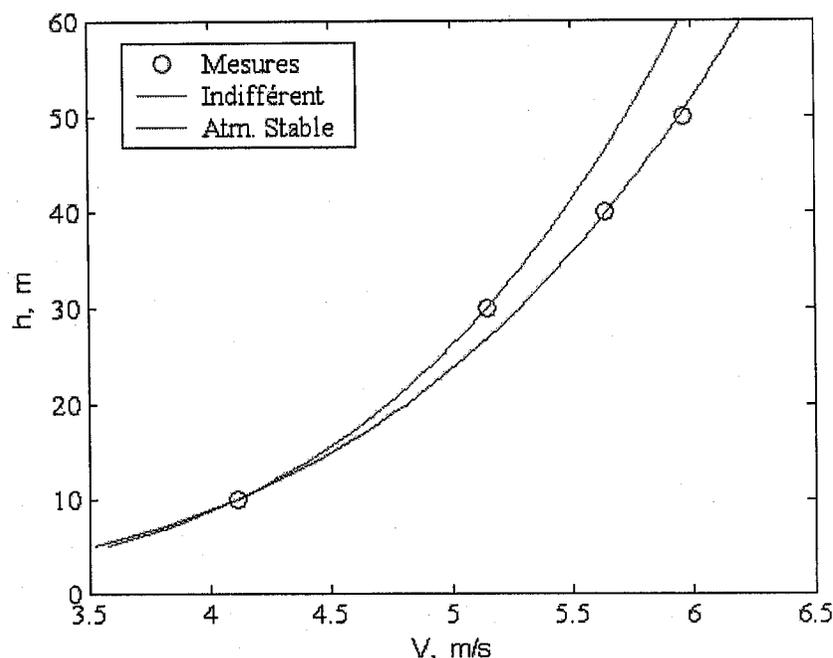


Figure 4.2 : Comparaison entre les vitesses mesurées et les vitesses estimées en fonction de l'altitude et selon le type d'atmosphère.

L'adéquation des différents modèles aux résultats expérimentaux est mesurée par l'écart relatif donné par :

$$\varepsilon = \left(\frac{V_{mes} - V_{cal}}{V_{mes}} \right) \quad 4.2$$

Les résultats de la comparaison présentés dans le tableau 4.2 confirment la conclusion précédente (sous estimation pour l'hypothèse de l'atmosphère indifférente et surestimation pour l'hypothèse d'atmosphère stable).

On remarque que les écarts, pour des altitudes inférieures à 30 m du sol, le modèle proposé pour une atmosphère indifférente s'adapte mieux alors qu'au-delà de cette valeur le cas stable est plus adéquat. Ceci s'explique par le fait que l'effet des facteurs d'instabilité (échange sol-air) s'atténue avec l'altitude.

Tableau 4.2 : Vitesses estimées, mesurées et écarts quadratiques relatifs

Altitude	V _{mesurée} m/s	Atmosphère Indifférent		Atmosphère stable	
		V _{estimée} m/s	Ecart, %	V _{estimée} , m/s	Ecart, %
10	4.1122	4.1122	0	4.1122	0
30	5.1507	5.1502	-0.0086	5.2843	2.5285
40	5.6400	5.4677	-3.15	5.6486	0.1518
50	5.9661	5.7289	-4.14	5.9501	-0.2689

4.4 LIMITES DES MODELES

4.4.1 MODELISATION DES MESURES AU SOL

4.4.1.1 *Densité des points de mesures*

La topographie de l'Algérie est très diverse (côte méditerranéenne, chaînes de montagnes, hauts plateaux et étendues de sable). Ceci nécessite une grande densification des stations de mesures. Malheureusement, 69% des stations de mesures utilisées sont situées dans le nord de l'Algérie (longitude $>32.5^\circ$). Avec un relief aussi accidenté, le nord du pays a besoin de beaucoup plus de stations pour une couverture correcte. La densité actuelle fait donc que certaines régions sont pratiquement oubliées.

Par ailleurs, 31% des stations de mesures sont situées sur plus de 80% du territoire (Sahara). Pour bien représenter le territoire, il faudrait doubler le nombre de stations de mesures au nord et tripler leur nombre au sud.

Par ailleurs, les données fournies par les bulletins mensuel d'informations climatologiques, [3] se limitent à la publication de la vitesse moyenne mensuelle, de la vitesse maximale, au nombre de fois que la vitesse a été supérieure à 10, 20 et 30 m/s dans le mois. Ces données sont insuffisantes pour l'étude de l'aspect énergétique.

4.4.1.2 *Qualité des mesures*

Lors de l'analyse des données, nous avons rejeté les relevés de plusieurs stations car ces dernières ne portent pas sur un nombre d'année suffisamment représentatif (8 années minimum). Par ailleurs, beaucoup de données erronées sont signalées lors de l'analyse. Enfin, la qualité de la mesure et la précision, requises pour un utilisateur énergétique n'est pas disponible.

4.4.1.3 *Fréquence des vitesses nulles*

En figure 4.3 est montré l'influence des fréquences de vitesses nulles sur l'évolution statistique de la vitesse du vent. Trois sites ont été choisis Oran, Bordj Bou Arriredj et Tlemcen dont les fréquences en vitesses nulles sont respectivement de 7%, 30% et 52%. Pour l'étude statistique, les distributions de Weibull et hybride Weibull sont utilisées. Alors que la distribution de Weibull semble adéquate pour le site d'Oran, ceci n'est pas le cas pour le site de Bordj Bou Arriredj et totalement aberrante pour

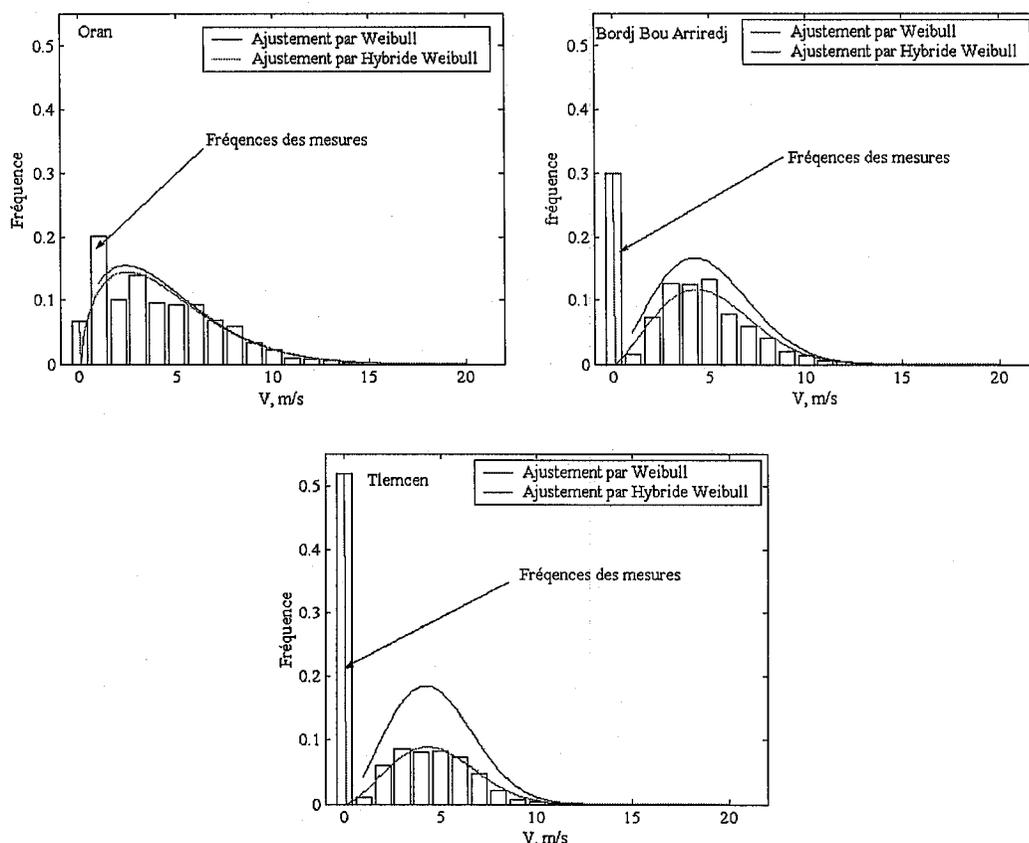


Figure 4.3 : Effet de la fréquence nulle sur la qualité de l’ajustement pour trois sites Algériens, (Oran, Bordj Bou Arriredj et Tlemcen).

celui de Tlemcen. En effet, lorsque les fréquences des vitesses nulles sont élevées (>15%), l’utilisation de la distribution hybride de Weibull s’avère plus adéquate pour la caractérisation des vents, [6].

En effet, la vitesse moyenne est réduite de moitié lors du passage de Weibull à hybride Weibull, comme le montre le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Vitesse moyenne et cubique moyenne estimées suivant la distribution de Weibull et Hybride Weibull

Site	Fr ₀ , %	Weibull		Hybride Weibull	
		V _{moy} , m/s	V ³ _{moy} , m ³ /s ³	V _{moy} , m/s	V ³ _{moy} , m ³ /s ³
Oran	6.69	4.36	221.07	4.07	206.29
Bordj Bou Arriredj	30.00	4.89	203.59	3.43	142.50
Tlemcen	51.85	4.69	167.57	2.26	80.69

4.4.1.4 Limites du modèle de projection (Ailos)

Les limites du modèle Ailos sont de deux types, celles portant sur les cartes microclimatiques de la vitesse du vent et celles relatives à l'atlas du potentiel énergétique disponible.

Les premières limites sont d'ordre pratique. En effet, le maillage doit être choisi tel que la pente entre deux points soit inférieure à 25% sur toute la surface d'étude. Cette condition implique la réduction du pas du maillage. Ceci nous amène à diminuer la surface étudiée lorsque la région est très accidentée car la taille de matrice maximale acceptée par le code est fixée à 80*40. Par ailleurs, la méthode de convergence utilisée est lente et limitée. En effet, après 100 itérations le résidu obtenu reste élevé, [5].

Les secondes limites apparaissent lors de l'établissement de l'atlas énergétique, [6].

En figure 4.4 sont représentées les cartes de la densité de puissance moyenne à 10m du sol des sites de Annaba et Ténès, estimées pour un maillage avec un pas de 1km.

Les densités de puissance de vent diminuent lorsqu'on se dirige de la mer vers l'intérieur du pays. A 10 m, on observe une variation uniforme des densités de puissance de vent pour Annaba. Ceci est essentiellement dû à la faible variation de la topographie. Cette variation devient plus touffue pour Oran qui présente un microclimat accidenté avec une densité de puissance qui avoisine les 330 W/m².

Afin de valider le modèle nous avons comparé les résultats statistiques des mesures au sol avec les estimations du modèle Ailos.

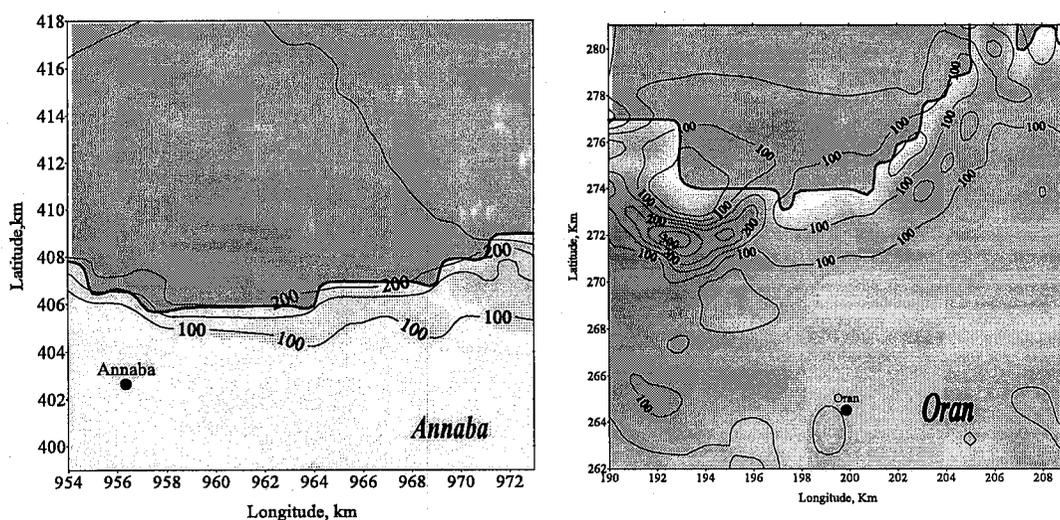


Figure 4.4 : Estimation de la densité de puissance par le modèle Ailos des sites de Annaba et Oran.

Les écarts obtenus sont donnés sur le tableau 4.4. Concernant la vitesse du vent, l'écart obtenu est inférieur à 16%, alors que pour la densité de puissance, l'écart passe de 29% à Annaba à 59% pour Oran.

Ces comparaisons montrent que le modèle Ailos peut être appliqué pour les régions accidentées, cependant, il faut avoir à l'esprit qu'il présente quelques insuffisances.

Tableau 4.4 : Validation du modèle Aiolos pour deux sites Côtiers.

Site	$V_{Weib.}$, m/s	$V_{Aiol.}$, m/s	$V_{disc.}$, %	$P_{Weib.}$, /m ²	$P_{Aiol.}$, /m ²	$P_{disc.}$, %
Annaba	4.03	4.45	10.5	100.8	72	29
Oran	4.58	3.85	16	145.3	58	60

4.4.2. PROFIL VERTICAL

4.4.2.1 Faibles hauteurs du mât, nombre de mâts (diversité climatique)

Le modèle a été établi pour des altitudes allant de 0 à 50m. Aujourd'hui, les aérogénérateurs de grandes puissances (1 MW et plus), sont installés à des hauteurs supérieures à 70 m du sol, [7].

Par ailleurs, la disponibilité d'un seul mât installé sur un terrain uniforme ne permet pas l'étude de l'effet de la topographie du site.

4.4.2.2 Qualité des mesures

Les vitesses du vent, utilisées ont été mesurées avec une précision du dixième. Lorsque les vitesses mesurées sont faibles l'écart enregistré entre deux altitudes est petit. C'est pour cela qu'il est conseillé d'utiliser des mesures de vitesses du vent avec des précisions du centième.

4.4.2.3 Problème de rugosité

Il est clair que l'effet de la rugosité dans l'établissement des formules empiriques joue un rôle important dans l'extrapolation des paramètres vent.

Son introduction dans les formules d'extrapolation de la vitesse du vent nécessite l'installation de pylônes sur des terrains présentant des natures différentes et permettant la mesure des paramètres vents proches du sol et sur plusieurs niveaux.

Les seules modèles d'extrapolation fonctions de la rugosité du sol sont les modèles de Justus, [8] et Mikhaïel, [9].

Toutefois, ces derniers présentent des limites dues à la restriction de la gamme de validité imposée par les auteurs.

Afin de juger de la validité de ces modèles, nous avons tracé le profil du vent en variant la rugosité de 0 à 0.5m (figure 4.5). Les résultats montrent que cette restriction fait que ces modèles ne sont pas valables pour les sites sahariens dont la rugosité est très faible.

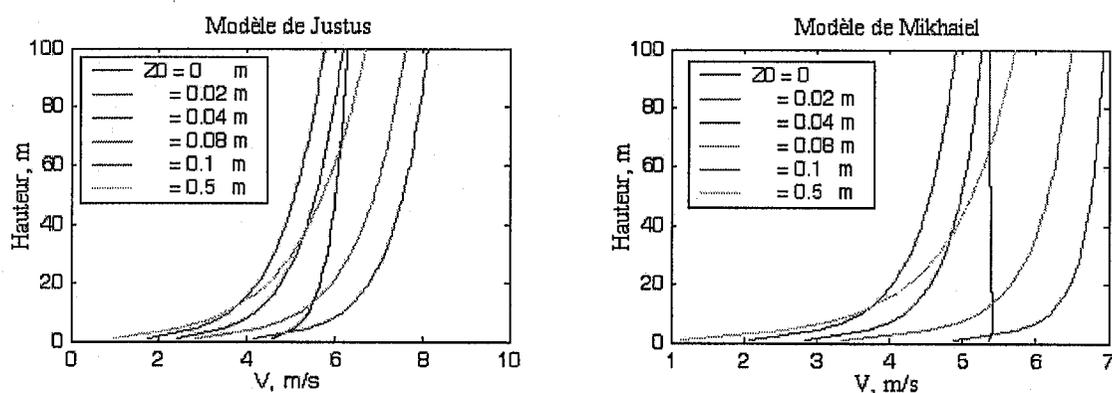


Figure 4.5 : Effet de la rugosité sur les modèles d'extrapolation verticale de la vitesse du vent de Justus, [8] et de Mikhaïel, [9].

En figure 4.6 est représentée la densité de puissance énergétique éolienne récupérée à 50m d'altitude, tracée après extrapolation des paramètres k et C à 50m, à l'aide de l'équation 4.13.

Les mesures utilisées portent sur 45 stations de mesures réparties sur le territoire national. En effet, les stations de mesures, dont les rugosités sont inférieures à 0.05m n'ont pas été utilisées lors de l'interpolation, à savoir :

- Hassi Messaoud,
- In Amenas
- et Tindouf.

Le site le plus intéressant est le site de Tiaret. En effet, lorsque le facteur de forme de la distribution de Weibull est proche de 1, la puissance récupérable diminue avec l'augmentation de l'altitude (Cas d'Adrar).

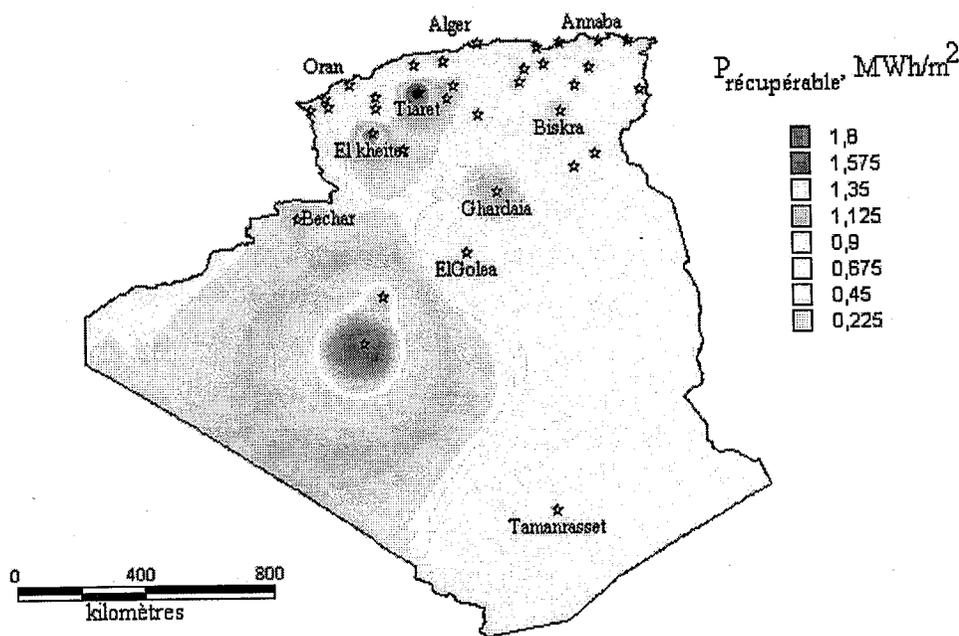


Figure 4.6 : Densité de puissance moyenne récupérable à 50 m du sol.

4.4.2.4 Limites des machines sur la puissance utilisable

Les effets de la vitesse de démarrage (en raison de l'inertie de la machine) et nominale (limite à partir de laquelle l'augmentation de la vitesse de vent n'a plus aucun effet sur la production énergétique), sur la vitesse cubique moyenne du site de Djelfa et de Tiaret sont représentés respectivement en figures 4.7 et 4.8. Si l'effet de la vitesse nominale est similaire pour les trois sites avec un décalage dans les gammes de variation, l'effet de la vitesse de démarrage est plus significatif et dépend essentiellement du site d'implantation de l'aérogénérateur, [10,11].

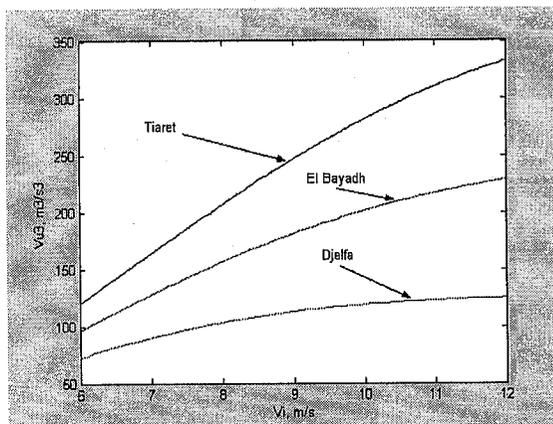


Fig. 4.7: Effet de la vitesse de démarrage sur la puissance utile.

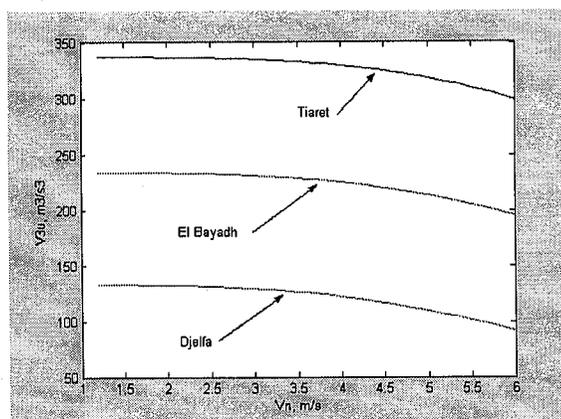


Fig. 4.8 : Effet de la vitesse nominale sur la puissance utile.

4.5 VENTS DOMINANTS

Afin de déterminer les secteurs relatifs aux vents dominants de la région, l'étude statistique de la vitesse est associée à la direction du vent. Pour cela :

- en premier lieu, les secteurs sont classés selon huit directions, les fréquences sont alors déterminées. Les vitesses relatives aux classes des secteurs sont identifiées dans des fichiers séparés.
- en second lieu le classement des vitesses par classe de vitesse et suivant le secteur est effectué.
- Enfin les paramètres de Weibull ainsi que la vitesse moyenne, sont déterminés pour chaque secteur.

Les vitesses moyennes estimées et les fréquences des différents secteurs sont représentées en figure 4.9 pour trois sites algériens situés sur les hauts plateaux, à savoir Djelfa, In Oussera et Ksar El Chellala.

Concernant le site montagneux de Djelfa, les vents dominants sont dans la direction Nord-ouest. La fréquence de cette dernière représente 40% avec une vitesse maximale de l'ordre de 4.2 m/s. Toutefois la fréquence du secteur sud n'est pas négligeable puisqu'elle avoisine les 29% avec une vitesse moyenne égale à 3.5m/s.

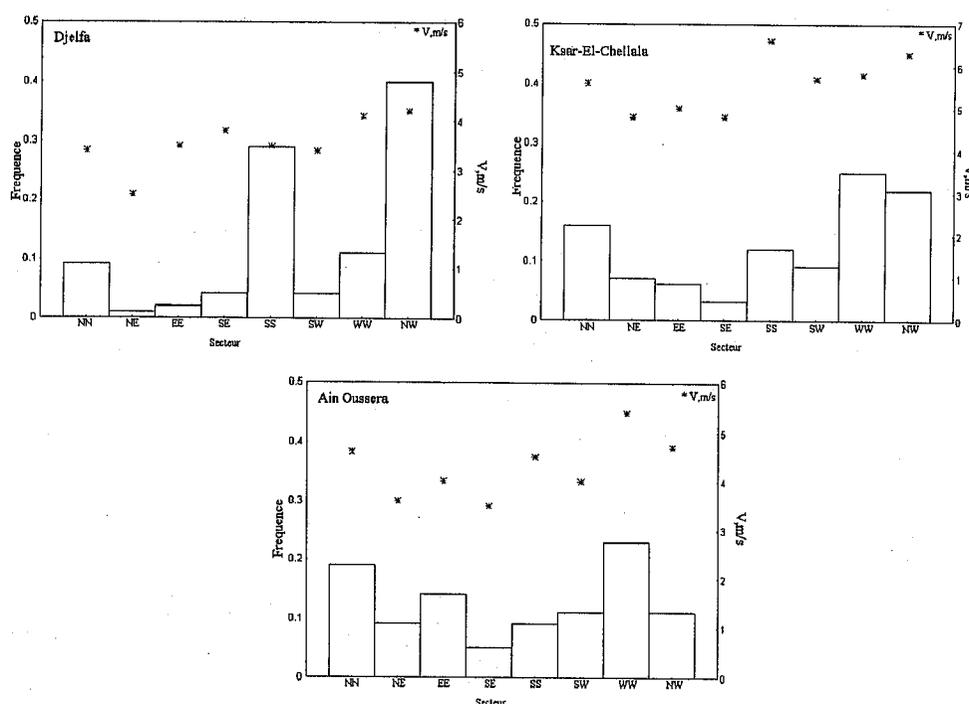


Figure 4.9 : Fréquences des secteurs et vitesses moyennes des stations au sol.

Pour les sites de Ksar El Chellala et InOussera, les vents dominants sont Ouest, avec des vitesses de l'ordre de 5.8 et 5.4 m/s respectivement. Toutefois, la vitesse maximale pour le site de Ksar El Chellala est enregistrée dans la direction Sud, mais avec une fréquence de secteur plus faible que celle enregistrée suivant le secteur ouest. Cette étude, nous a permis la caractérisation d'une zone semi-aride du point de vue éolien. Les résultats obtenus indiquent que les secteurs et vitesses du vent sont dominants dans les directions Nord et Ouest. Si on considère que le grain de sable se déplace à partir de 3 m/s, il existe bien un déplacement Sud Nord, mais dans de faibles proportions puisque la fréquence du secteur est faible et est contrecarrée par les vents nord et nord ouest, [12].

4.6. COMPARAISON DES MODELES D'INTERPOLATION

Pour montrer l'effet conjugué de l'extrapolation verticale suivi par l'interpolation horizontale des vitesses du vent, les atlas de la densité de puissance énergétique éolienne, ont été tracés à 50m à l'aide du modèle de Justus et Mikhaïel [13] et celui développé par la présente étude. En figure 4.10, on remarque que le modèle de Justus et Mikhaïel [13], surestime le potentiel énergétique éolien récupérable par rapport au modèle proposé dans une grande partie du sud-ouest et dans les hauts plateaux. .

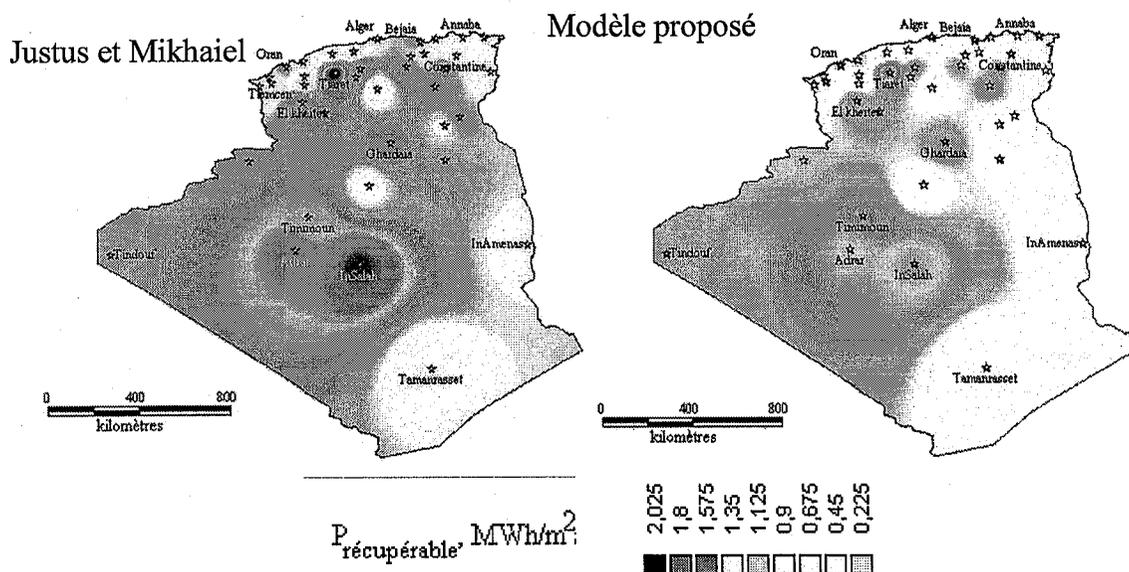


Figure 4.10 : Comparaison des atlas à 50m après extrapolation suivant le modèle de Justus et Mikhaïel et le modèle proposé.

4.7 COMPARAISON DES MODELES D'EXTRAPOLATION VERTICALE

Afin d'établir la comparaison, les données brutes mesurées à 10 mètres du sol ont été extrapolées en utilisant les différentes formules empiriques précitées et le modèle proposé aux altitudes successives de 20, 30 et 40 mètres à partir du sol. Les données brutes ont été traitées statistiquement à l'aide de la distribution de Weibull et les différentes vitesses moyennes et cubiques moyennes calculées

Les modèles de comparaison choisis sont :

- Loi de puissance de Justus et Mikhaïel, [13]
- Loi de puissance modifiée de Justus, [8]
- Loi de puissance modifiée de Mikhaïel, [9]
- Loi proposée

Les résultats obtenus, comparés aux résultats du traitement statistique des mesures relevées à 20, 30 et 40 m du sol, sont représentés en figure 4.11.

Par ailleurs, l'écart quadratique relatif a été calculé pour les différentes estimations de la vitesse moyenne et de la vitesse cubique moyenne. Les résultats sont donnés dans le tableau 4.5.

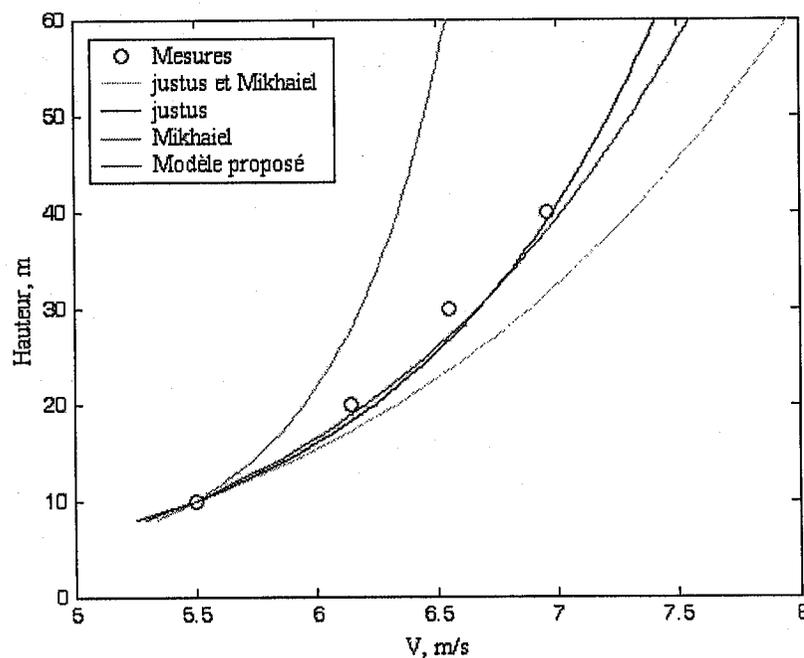


Figure 4.11 : Validation et comparaison des résultats des modèles d'extrapolation verticale de la vitesse du vent.

Les écarts entre les vitesses moyennes obtenues par le modèle de Justus et la loi proposée sont très proches mais s'éloignent pour les vitesses cubiques moyennes. L'effet sur la puissance éolienne est donc plus significatif.

On remarque que les résultats obtenus quant à l'extrapolation de la vitesse du vent avec le modèle proposé et celui proposé par Justus sont proches.

Tableau 4.5 : Ecart relatif moyen de la vitesse moyenne et cubiques moyennes

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

4.8 FREQUENCE DES VITESSES NULLES ET CARTE DES VENTS

En figures 4.12 sont comparées les atlas de la vitesse du vent, tracés en utilisant :

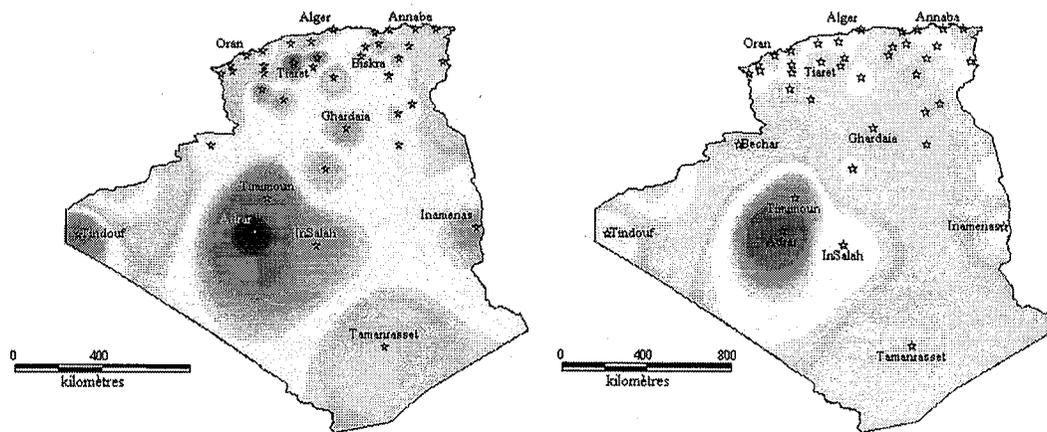
- la distribution de Weibull
- la distribution hybride de Weibull
- une combinaison des deux distributions suivant la fréquence de la vitesse nulle de chaque point de mesure.

Même si l'allure reste la même pour les atlas, une grande différence est constatée quant aux gammes des vitesses obtenues.

Cet effet est plus significatif dans le nord et les hauts plateaux ainsi que dans la zone de Tindouf.

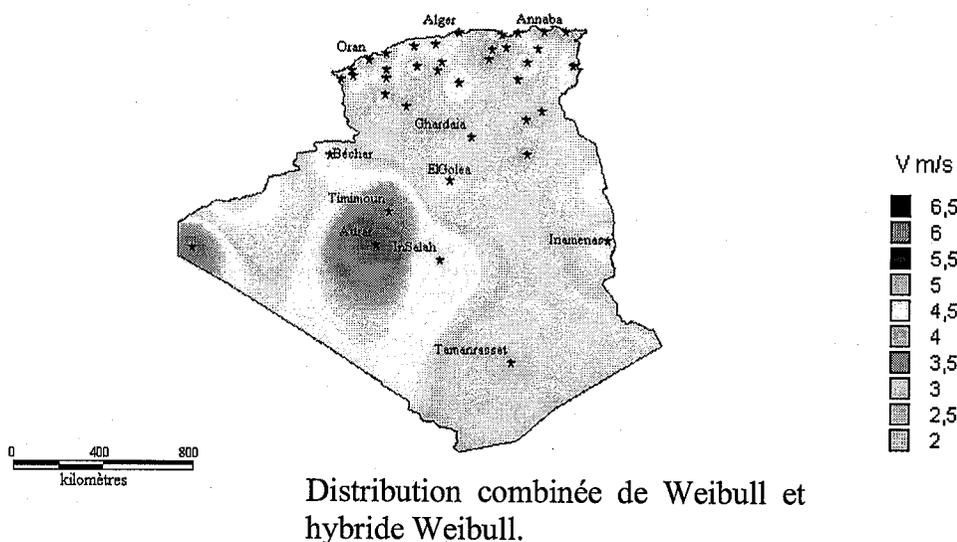
Par ailleurs, le même microclimat autour d'Adrar se retrouve dans les trois atlas. En effet, c'est dans cette région que les fréquences de vitesses nulles sont les plus faibles.

Nous pensons que la combinaison des deux distributions, pour le tracé de l'Atlas de la vitesse du vent est la plus adéquate. Car si la distribution de Weibull surestime l'évolution de la vitesse du vent, l'utilisation généralisée de la distribution hybride de Weibull pénalise certains sites. Le cas le plus évident est le site de Tindouf.



Distribution de Weibull.

Distribution hybride de Weibull.



Distribution combinée de Weibull et hybride Weibull.

Figure 4.12 : Effet des fréquences nulles sur l’atlas des vents à 10 m du sol

4.9 ATLAS EOLIEN DE L’ALGERIE

En Figure 4.13 représente l’atlas de la vitesse du vent à 50m du sol, établi à l’aide de la combinaison des lois de Weibull et hybride Weibull (selon la fréquence des vitesses nulles) et du modèle d’extrapolation proposé. La carte montre que les sites les plus ventés sont ceux d’Adrar et Tiaret avec des vitesses du vent approchant les 9m/s.

L’atlas de la densité de puissance récupérable à 50m est représenté en figure 4.14. On notera que la combinaison des lois précitées entraîne une classification complètement différente de celle obtenue au chapitre 2. En effet, le site de Tiaret apparaît comme le site le plus intéressant avec 3.4 MWh/m² suivi de celui d’Adrar qui prend le dessus sur les autres sites du sud du pays.

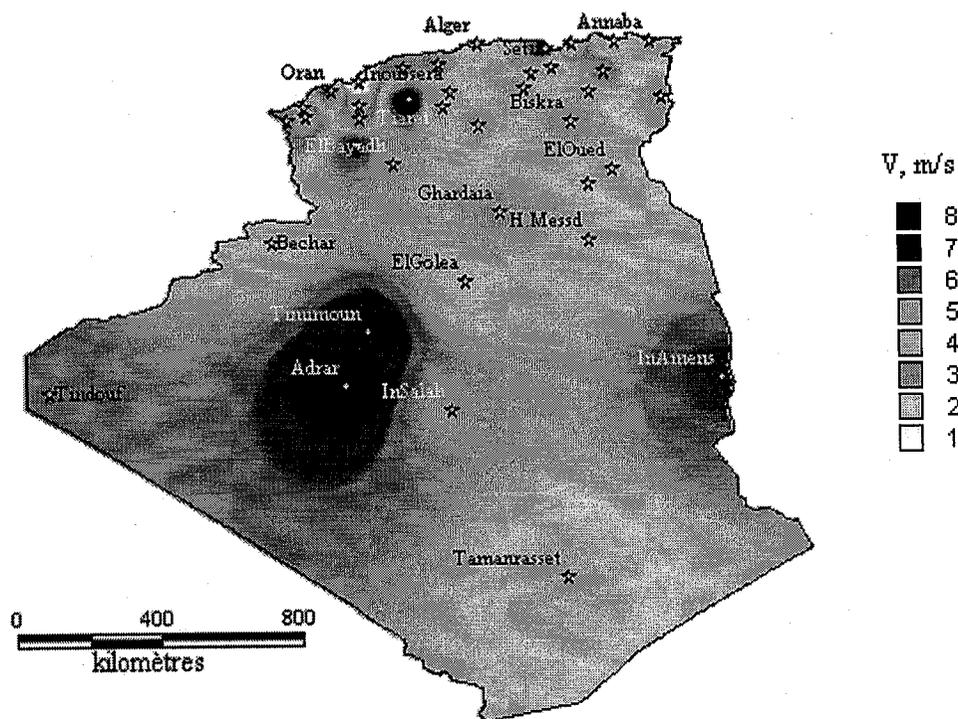


Figure 4.13 : Atlas de la vitesse du vent à 50 m d'altitude.

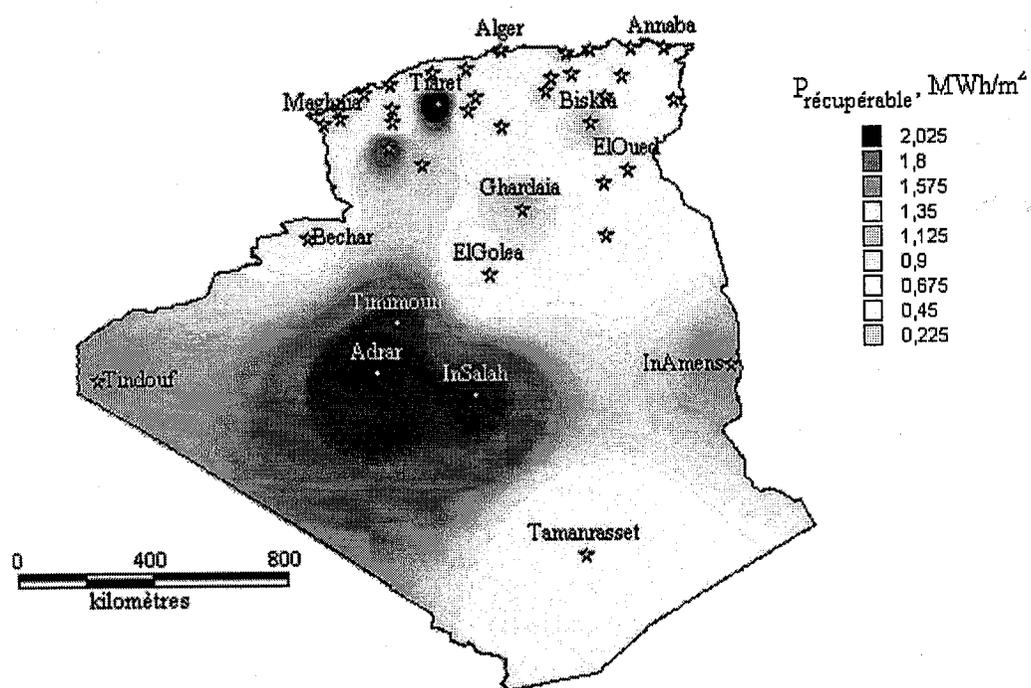


Figure 4.14 : Atlas de la densité de puissance énergétique à 50 m

4.10 CONCLUSION

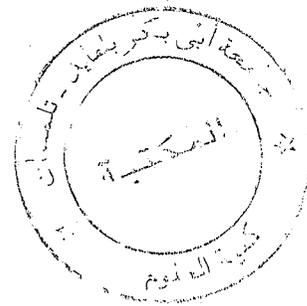
En absence de travaux antérieurs, les résultats ont été validés sur la seule base de la logique des distributions. Les résultats obtenus pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent ont été validés à l'aide de données non utilisées lors de la modélisation. Les résultats obtenus sont corrects et peuvent être exploités selon le besoin.

Les limites des modèles ont été signalées. Ces limites ouvrent des perspectives pour des études complémentaires.

L'aspect énergétique a été abordé à travers l'effet des limites des modèles sur la vitesse cubique moyenne et donc la puissance disponible. De même les effets des limites des éoliennes (Vitesse de démarrage et vitesse d'arrêt) ont été mis en évidence à des fins d'optimisation du choix des machines.

Une étude microclimatique a été menée sur une région menacée par « l'avancée du désert ». Cette étude, axée sur la mise en évidence des vents dominants, montre que le vent contribue au phénomène mais n'en est pas le facteur essentiel.

Enfin l'étude de l'effet des vitesses nulles sur la qualité de l'ajustement montre que la meilleure carte obtenue en adaptant le choix du modèle (Weibull ou hybride Weibull) à la fréquence des vitesses nulles de la station.



REFERENCES

1. Justus C.G. et A. Mikhail « Height Variation of Wind Speed and Wind Distributions Statistics », *Geophysical Research Letters*, vol. 3, N° 5, 1976.
2. Alnacer W.E., M. Al-Maleeg, H.M. Elsayed, B. Eliagoubi et A.A. Alkalak, « First Wind Energy Atlas for the Arab States », *World Renewable Energy Congress VII*, Cologne, Allemagne, 2002.
3. *Bulletin Mensuel d'informations climatologiques*, ONM, Alger, 2004.
4. Hammouche R., « Atlas Vent de l'Algérie/ONM ». Office des Publications Universitaires (OPU), Alger 1990.
5. Kasbadji Merzouk N., M. Merzouk et N. Messen, « Mass Consistent Model Application to the Desertification Phenomena study in the High Plains of Algeria », *Inter. Journal of Renewable Energy*, N°28 , pp 655-663, 2003.
6. Takle E.S. et J.M. Brown, « Note on the Use of Weibull Statistic to Characterize Wind Speed Data ». *Journal of applied Meteorology*, Vol. 17, 1978
7. Kasbadji Merzouk N., H. Daaou et S. Haddouche, « Carte des vents de Algérie, établies à l'aide du modèle AIOLOS », 4^{ème} Congrès National de la Physique Energétique, Faculté de physique de l'USTHB, Sidi Fredj, 23-24, 2000.
8. http://www.mecatronique.bretagne.ens/cachan.fr/DocPedagogiques/EnR_Multonn2004_2.pdf
9. Mikhail A.S, « Height Extrapolation of Wind Data » *Transaction of ASME*, vol. 107, pp. 10- 14, 1985.
10. Poje S. et B. Cividini, « Assessment of Wind Energy Potential in Croatia » *Solar Energy* vol.41 N°6 pp 543 554, 1988.
11. Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, « An Evaluation of Useful Power Density of the Wind Machine », *Wind Power 2002*, La défense Paris, 2002.
12. Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, « Useful Power Density of a Wind Machine in Algeria », *Proceeding of International Mechanical Engineering Conference*, Kuwait, 2004.
13. Kasbadji Merzouk N. et N. Messen, « Contribution à l'Etude du Vent en Rapport avec l'Erosion Eolienne dans les Zones Arides », *Revue Energies Renouvelables*, numéro Spéciale Zones Arides, Juillet 2002.

14. Justus C.G. et A. Mikhail « Height Variation of Wind Speed and Wind Distributions Statistics », *Geophysical Research Letters*, vol. 3, N° 5, 1976.
15. Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, *Useful Wind Powers Machine Estimation, Application to Water Pumping Systems in South of Algeria*, 9 International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture, 27th International Conference of CIGR IV (The efficient use of electricity and Renewable Energy Sources), Izmir, Turquie, 2005.
16. Dubost D., « Contribution à l'amélioration agricole des eaux chaudes du continental intercalaire (albien) dans la cuvette du bas Sahara algérien », *Bull. Agr. Sah.*, 5, 61, 109, 1983.
17. INRH, « Inventaire des Forages des wilayas », en Algérie, rapport interne à l'INRH, p. 200, 2000.
18. Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, « Perspectives du pompage éolien en Algérie », *Colloque International sur les ressources en eau souterraines dans le sahara*, Ouargla, Algérie, 2005.

CHAPITRE 5

APPLICATION ET PERSPECTIVES

5.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre est consacré à l'application au pompage et aux perspectives ouvertes par la présente étude.

La première partie du présent chapitre porte sur la détermination de la puissance éolienne utilisable en fonction des limites de fonctionnement des aérogénérateurs et des paramètres éoliens des sites d'implantation.

La méthode développée est appliquée pour des sites sahariens. Le potentiel utile obtenu à la sortie de la machine est calculé respectivement, en introduisant les caractéristiques de 04 aérogénérateurs de puissances nominales égales à 3kW, 12 kW, 600 kW et 1MW.

La seconde partie est consacrée à l'application pompage avec deux variances mécanique et électrique.

Le chapitre se termine par la présentation des principales perspectives ouvertes par ce travail et susceptibles de constituer des sujets de recherche.

5.2 POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN UTILISABLE

Trois aérogénérateurs différents dont les caractéristiques sont portées dans le tableau 5.1 ont été testés (par simulation) sur 02 sites algériens, à savoir Tiaret et El Bayadh. Sites dont les caractéristique sont données au tableau 5.2 [1]. Les variations, à l'échelle du mois, des vitesses cubiques moyennes récupérables et utilisables du vent, tel que données par l'équation 2.43, sont représentées en figure 5.1.

Tableau 5.1 : Caractéristiques des aérogénérateurs choisis

Puissance nominale kW	V_i (m/s)	V_n (m/s)	V_s (m/s)	D_r (m)
100	3.5	8	25	36
600	3	15	25	44
850	4	16	25	52

Tableau 5.2 : Caractéristiques des sites considérés

Site	K	c , (m/s)	V , (m/s)	σ^2	V^3 , (m^3/s^3)	P , (W/m^2)
Tiaret	1.72	6.20	5.52	11.00	381.91	233.92
El Bayadh	1.62	5.28	4.73	8.92	257.13	157.49

Les histogrammes de la figure 5.1 montrent que les aérogénérateurs, de puissances nominales 600 et 850 kW ont des densités de puissance utilisable pratiquement identiques et nettement plus élevées que celles obtenues avec l'aérogénérateur de 100 kW, mais le rapport de 8.5/1 et de 6/1 se réduit à un maximum de 2/1, ceci implique que pour les aérogénérateurs de grandes puissances, le choix le plus adéquat dépendra des besoins locaux puisque les résultats diffèrent seulement par les diamètres respectifs des rotors.

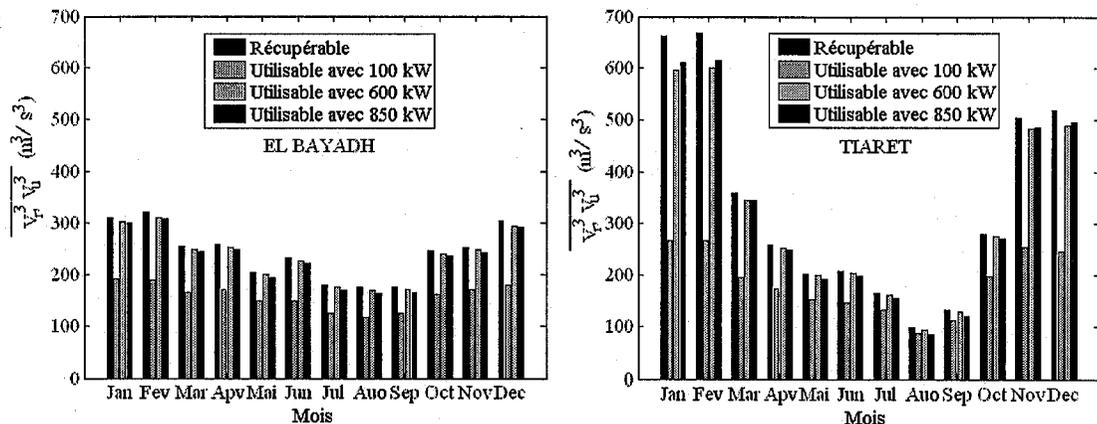


Figure 5.1 : Puissance énergétique obtenue à la sortie des aérogénérateurs choisis par rapport au potentiel des sites d'El Bayadh et Tiaret.

On note que la puissance utilisable pour le site d'El Bayadh est pratiquement uniforme durant l'année ce qui indique que les résultats obtenus à l'échelle annuelle suffisent pour choisir la machine adéquate au site.

Par ailleurs, pour Tiaret, les figures montrent une baisse de la densité de puissance éolienne utilisable pendant l'été. Le choix de l'éolienne adéquate se fera suivant les résultats hivernaux et le complément relatif à la période mars-octobre sera compensé par le rajout d'un système d'appoint classique ou solaire, (système hybride).

5.3 APPLICATION AU POMPAGE

En Considérant un système de pompage éolien de rendement global η_i et de hauteur manométrique totale H_{mt} , le débit d'eau pompée est donné par :

$$\dot{Q} = \frac{\eta_i \langle P_e \rangle}{\rho g H_{mt}} \quad 5.1$$

Le débit journalier sera égal à :

$$Q_d = 3600 * 24 * \frac{\eta_i \langle P_e \rangle}{\rho g H_{mt}} \quad 5.2$$

5.3.1 CHOIX DES SITES D'IMPLANTATION DES MACHINES

Le choix porte sur six sites sahariens, connus pour leurs besoins en eau et caractérisée par un potentiel énergétique éolien intéressant comparativement au nord du pays.

Ces sites sont Tindouf, Timimoun, In Salah, Adrar, Bechar et In Amenas et correspondent aux stations de mesures du réseau de l'ONM. En effet, dix ans de données trihoraires de la vitesse du vent y sont disponibles. En outre, la majorité de cette partie du Sahara a une ressource importante en eau souterraine, à savoir la nappe Albienne qui affleure dans certaine région (Adrar). En effet, la carte des ressources en eau du Sahara Septentrional représentant le toit du réservoir [2,3], montre que les couches perméables incluent un secteur entier qui s'étend d'Adrar à In Amenas tout en passant par In Salah. Par ailleurs, ces régions sont connues pour leur habitat dispersé qui non relié au réseau de distribution électrique.

5.3.2 POMPAGE ELECTRIQUE

En figure 5.2 sont donnés les débits journaliers pompés sur différents sites, à savoir Adrar, Timimoun, In Salah, Tindouf et In Amenas et pour les différents aérogénérateurs cités précédemment, [4 et 5]. En faisant varier la hauteur manométrique totale de 0 à 200m et pour un rendement global pompe-génératrice égal à 25% ou 55% (selon la puissance) [6], on estime la quantité d'eau extraite par une pompe placée sur un site donné.

Les résultats de la figure 5.2 (a) montrent que, pour une hauteur manométrique de 30m, un aérogénérateur de 3 kW de puissance nominale peut pomper entre 30 et 70m³/jour, alors que l'aérogénérateur de 12 kW (figure 5.2 (b)) produit entre 70 et 150

m^3/jour pour une hauteur manométrique totale de 50m. Pour les aérogénérateurs de grandes puissances, les figures 5.2 (c et d) montrent que la quantité de l'eau pompée peut répondre aux besoins les plus élevés exprimés par ces régions. Avec une H_{mt} de 100m, le volume de l'eau pompé atteint $3300 \text{ m}^3/\text{jour}$ pour InSalah et $8700 \text{ m}^3/\text{jour}$ pour Adrar.

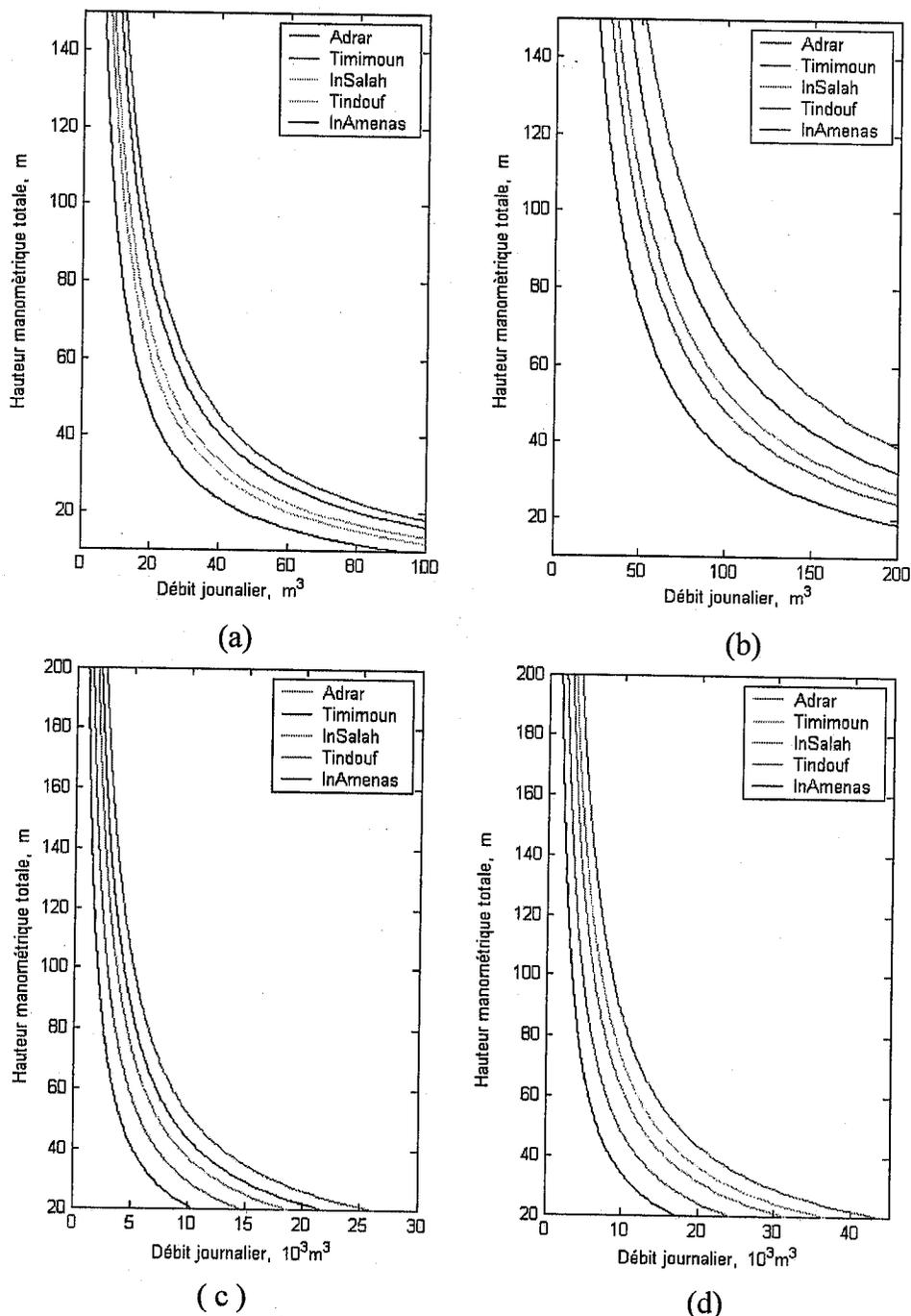


Figure 5.2 : Débit d'eau pompée pour six sites en fonction de la hauteur manométrique totale. Pour (a): 3 kW, (b):12 kW, (c):600 kW et (d):1 MW

5.3.3 POMPAGE MECANIQUE

Les éoliennes utilisées pour le pompage d'eau sont généralement multipâles avec de faibles vitesses de rotation. Ces éoliennes (dites lentes), sont équipées d'hélice de 6 à 24 pales et dont les diamètres peuvent atteindre les 9 mètres. Elles démarrent généralement pour des vitesses faibles, (de 2.5 à 3 m/s) et s'adaptent bien aux caractéristiques des pompes à piston qui nécessitent une faible vitesse de déplacement tout en assurant une hauteur de refoulement importante, [7]. Le point faible de ces systèmes réside dans la tige qui ne saurait dépasser une longueur de 30 m sous peine de gros problèmes d'inertie et de résistance des matériaux. Cette contrainte impose que ce type d'installation est réservé aux puits dont les profondeurs sont inférieures à 35 m. Cette même contrainte, ajoutée au fait que le derrick portant l'éolienne doit absolument surplomber le puits, limite la position de l'axe de l'éolienne autour de 10m du sol. Les résultats de la simulation, pour des machines similaires à celles utilisées en mode électrique sont représentés en figure 5.3, [8].

Pour un rendement Convertiseur-pompe égal à 60%, l'examen des familles de courbes montre que les débits pompés sont plus importants que dans le cas du pompage électrique mais avec les contraintes précitées.

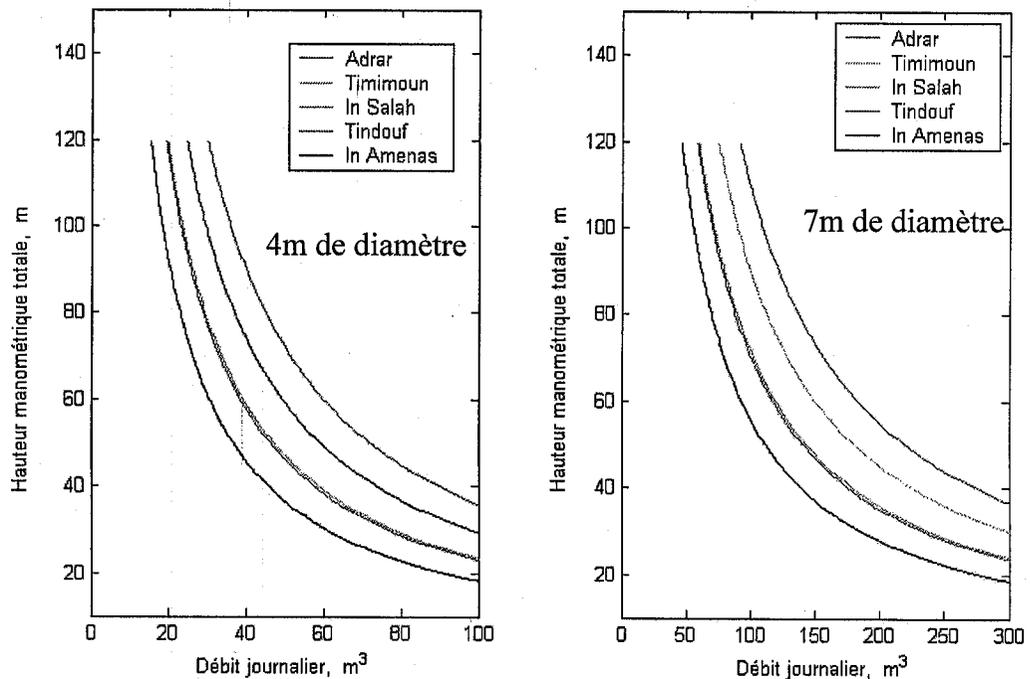


Figure 5.3 : Débit d'eau pompée pour six sites en fonction de la hauteur manométrique totale, en mode mécanique.

5.4 PERSPECTIVES

5.4.1 MODELISATION AU SOL

L'étude présentée dans la présente thèse a été réalisée suivant les moyens mis à notre disposition. Néanmoins, elle ouvre la voie à plusieurs perspectives.

Au vu des limites énumérées, il serait intéressant de poursuivre l'étude en considérant les points suivants:

- Les atlas peuvent être affinés grâce à la densification des points de mesures. Le réseau de l'ONM comporte 72 stations de mesures, mais seules une quarantaine dispose de séries interrompues.
- Les microclimats ventés sont connus, reste qu'il faudrait installer des stations de mesures à même de confirmer et mieux caractériser les potentialités.
- Etablir des atlas des vitesses du vent par secteurs. Ceci permettra la détermination des secteurs dominants et leurs effets en architecture, agriculture, désertification, etc...
- Superposer les atlas à ceux de la topographie et du réseau de moyenne tension de Sonelgaz pour pouvoir trouver les points susceptible de recevoir des aérogénérateurs et optimiser ainsi les puissances à installer selon les potentialités des sites.
- Etablir la cartographie éolienne marine
- Tester la faisabilité par l'installation d'un aérogénérateur de moyenne puissance sur un site algérien
- Effectuer une étude technico-économique pour déterminer le prix de revient du kWh électrique produit par un aérogénérateur donné.

5.4.2 MODELE D'EXTRAPOLATION

Le modèle d'extrapolation proposé pourrait être amélioré :

- grâce à la multiplication des mâts en divers points du territoire différant par le climat et la nature du sol.
- En portant la hauteur à 100m avec un pas de 2m près du sol et 10m à partir de 10m
- En augmentant la précision des capteurs (ordre du 1/100)
- En testant le modèle proposé en d'autres points du territoire.

5.5 CONCLUSION

Au vu des résultats de l'application, l'irrigation des terres agricoles à l'aide de systèmes de pompage éoliens est une solution intéressante. En effet, les vitesses moyenne du vent, enregistrées dans ces régions sont parmi les plus élevées en Algérie et permettent une rentabilité intéressante des systèmes éoliens. Les résultats montrent, que l'existence de la nappe albiennne dans la région d'Adrar est un avantage supplémentaire grâce à la faible profondeur du toit du réservoir. Avantage qui milite en faveur du montage mécanique, plus performant et moins coûteux pour les faibles profondeurs.

Pour les forages (donc des profondeurs importantes) la solution réside dans le pompage par aérogénérateurs.

Le champ exploré est assez vaste, aussi il mériterait une poursuite aussi bien dans le domaine de l'interpolation horizontale que l'extrapolation verticale. Les perspectives ouvertes par cette étude consistent en particulier en réduction de l'effet des limites présentées.

REFERENCES

1. Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, « An Evaluation of Useful Power Density of the Wind Machine », Wind Power 2002, La défense Paris, 2002.
2. Dubost D., « Contribution à l'amélioration agricole des eaux chaudes du continental intercalaire (albien) dans la cuvette du bas Sahara algérien », Bull. Agr. Sah., 5, 61, 109, 1983.
3. INRH, «Inventaire des Forages des wilayas», en Algérie, rapport interne à l'INRH, p. 200, 2000.
4. Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, « Useful Power Density of a Wind Machine in Algeria », Proceeding of International Mechanical Engineering Conference, Kuwait, 2004.
5. Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, «Useful Wind Powers Machine Estimation, Application to Water Pumping Systems in South of Algeria», 9 International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture, 27th International Conference of CIGR IV (The efficient use of electricity and Renewable Energy Sources), Izmir, Turquie, 2005.
6. Catalogue sur « Les pompes », Ed. Electro_Hydraulique, p.126, 1976.
7. Cuntry G., « Eoliennes et aérogénérateurs EDISUD /Technologie douce », pp. 300, 1979.
8. Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk, « Perspectives du pompage éolien en Algérie », Colloque International sur les ressources en eau souterraines dans le sahara, Ouargla, Algérie, 2005

CONCLUSION GENERALE

L'étude bibliographique a permis de passer en revue les principaux travaux de recherche se rapportant à la caractérisation horizontale et verticale de la vitesse du vent. Les conditions d'établissement des modèles empiriques ainsi que leurs limites ont été mises en évidence.

Les principaux travaux de recherche portant sur le potentiel énergétique éolien dans le monde et en Algérie ont également été présentés.

Partant des mesures des paramètres vent, les variations journalières, mensuelles et annuelles du vent, ont été établies. L'étude statistique des mesures a permis la détermination des paramètres de Weibull nécessaires pour la connaissance des potentialités énergétiques éoliennes d'un site donné. Enfin, une interpolation spatiale des mesures de la vitesse du vent de 64 stations a permis l'établissement des atlas vent annuels et saisonniers aux échelles "nationale" et "microclimatique".

L'analyse des résultats montre que, compte tenu de la disparité des fréquences nulles enregistrées au niveau des différentes stations, la meilleure manière de procéder pour la modélisation de la vitesse du vent en Algérie passe par l'utilisation des lois de Weibull ou hybride de Weibull selon les conditions du site.

Le site d'implantation du dispositif expérimental ainsi que son instrumentation ont été présentés. Les données recueillies ont été classées selon la classe de stabilité atmosphérique. Ceci a permis l'établissement de formules empiriques d'extrapolation verticale des paramètres de Weibull et de la vitesse moyenne du vent qui s'adaptent mieux au climat semi-aride des hauts plateaux.

Les limites de Betz en premier lieu, les limites des machines ensuite font que le potentiel énergétique éolien utilisable représente moins de 30% du potentiel disponible, (vitesse de démarrage, vitesse nominale et rendement de conversion).

Rapport qui peut changer énormément en fonction du site

Les programmes développés pour la détermination de la puissance utile pour des aérogénérateurs peuvent être utilisés par tout concepteur de systèmes éoliens.

Les résultats de l'interpolation horizontale de la vitesse du vent et de son extrapolation verticale ont été validés avec succès. Ces résultats constituent donc des données de base pour tout exploitant. Toutefois, au vu des limites énumérées, ce travail demande à être poursuivi par la densification des points de mesures, la multiplication des mâts et l'amélioration de la précision des capteurs.

Les atlas établis constituent certes des éléments d'aide à la décision mais l'installation et le suivi de petites et moyennes éoliennes sera le meilleur moyen de juger de la faisabilité et des corrections pour le futur. En effet, il serait judicieux de précéder toute installation éolienne par une campagne de mesures de quelques mois. Cela éviterait bien des surprises.

Paramètres de Weibull à l'échelle mensuelle

Sites des hauts plateaux

Sites	<i>Tiaret</i>		<i>Djelfa</i>		<i>B. B. Arriredj</i>	
Fréquence des vitesses nulles	20%		36.5%		30%	
Mois	<i>k</i>	<i>c</i> , (m/s)	<i>k</i>	<i>c</i> , (m/s)	<i>k</i>	<i>c</i> (m/s)
Janvier	1.5936	7.0758	1.5800	4.7189	1.8540	5.0647
Fevrier	1.5922	7.0996	1.6039	4.8448	1.8072	5.2029
Mars	1.5154	5.4762	1.4972	4.2399	2.2456	4.4870
Avril	1.6513	5.0381	1.6469	3.9827	1.9905	4.7476
Mai	1.7429	4.6986	1.6121	3.8875	2.1809	4.5493
Juin	1.5786	4.5474	1.9602	3.7035	2.2294	4.3410
Juillet	1.7502	4.3582	1.9476	2.8839	2.1449	3.8686
Aout	2.1620	3.8283	1.6927	2.7855	1.9928	3.7671
Septembre	1.8034	4.0527	1.7743	3.0349	2.1783	4.3189
Octobre	1.9140	5.4982	1.5723	3.4905	1.8638	4.1500
Novembre	1.7628	6.6727	1.6414	4.0817	1.9028	4.9346
Décembre	1.6432	6.5521	1.6890	4.9596	2.0274	4.6713
Annuel	1.7442	6.2907	1.7121	4.3561	1.9820	4.9558

Sites côtiers

Sites	<i>Oran</i>		<i>Alger</i>		<i>Skikda</i>	
Fréquence des vitesses nulles	06%		34%		15%	
Mois	<i>k</i>	<i>c, (m/s)</i>	<i>k</i>	<i>c, (m/s)</i>	<i>k</i>	<i>c (m/s)</i>
Janvier	1.0924	2.8545	1.7701	4.1228	1.6153	3.8634
Février	1.0897	3.3551	1.7906	4.3058	1.3874	3.1576
Mars	1.1317	2.7188	1.8619	3.8563	1.6670	3.1337
Avril	1.2563	3.3346	1.8176	3.8572	1.5389	3.1278
Mai	1.2748	2.8909	2.1580	3.7884	1.8870	2.6624
Juin	1.1866	2.7255	2.0852	3.1371	1.8130	2.2681
Juillet	1.2152	2.5213	1.7459	3.6684	1.6919	2.3338
Aout	1.1380	2.3201	2.0969	3.4763	1.7713	2.4434
Septembre	1.1723	2.2608	1.6747	3.4249	1.7813	2.7646
Octobre	1.1037	2.1442	1.4979	4.1361	1.8476	3.2820
Novembre	1.0400	2.3322	1.6618	3.9677	1.7123	3.5551
Décembre	1.1241	2.7467	1.8149	4.4625	1.6047	3.7270
Annuel	1.2559	4.1261	2.0284	4.9983	1.5680	3.3023

Sites Sahariens

Sites	<i>Tindouf</i>		<i>InSalah</i>		<i>InAmenas</i>	
Fréquence des vitesses nulles	16%		23%		19%	
Mois	<i>k</i>	<i>c, (m/s)</i>	<i>k</i>	<i>c, (m/s)</i>	<i>k</i>	<i>c (m/s)</i>
Janvier	1.8636	4.0603	1.7585	5.0799	1.6914	4.0563
Fevrier	1.9508	4.7096	1.6123	5.8173	1.9180	4.0480
Mars	2.1465	6.0376	1.7698	6.0370	1.7652	4.6605
Avril	3.0544	6.9496	1.6708	5.5299	2.0113	5.2344
Mai	2.1800	7.1842	1.5795	5.5109	2.1178	5.8346
Juin	2.3200	7.3145	1.8455	5.3824	2.0124	5.5379
Juillet	2.2043	5.3972	1.9680	6.0517	2.1930	4.9076
Aout	2.2363	6.7350	2.1765	5.8767	2.4788	4.9639
Septembre	2.5415	5.9873	1.8078	5.5268	2.1060	5.1520
Octobre	2.0070	4.6168	1.9330	5.3319	2.0873	4.5130
Novembre	1.9458	3.5041	1.7535	5.3268	2.0562	4.3580
Décembre	1.4522	4.3396	1.5941	5.3422	1.9171	3.8980
Annuel	1.8562	5.8176	1.7339	5.7740	1.8690	5.4321

ANNEXE 2

Echange Radiatif

$$Q^* = (1-r)I_g - L^-$$

A2.1

L'albédo dépend de la nature du sol. Dans l'Atlas solaire de l'Algérie, Capderou, [7], donne les valeurs pour différents types de sol (voire tableau A.1).

Tableau A2.1 Albédo pour différents sols.

Nature du sol	Moyenne	Nature du sol	Moyenne
*Végétation		* Surfaces construites	
- Terre labourée	0.2	- Villes	0.15
- Herbages verts	0.25	- Bitume	0.15
- Herbes sèches	0.2	- Ciment, béton, gravier	0.25
- Champs cultivés	0.15	- Pierre	0.45
- Forêts	0.15	- Calcaire	0.8
* Zones désertiques		- Peinture blanche	0.05
- Désert	0.3	- Peinture noire	
- Sable sec	0.25	* Eau et Neige	
- Cailloux	0.2	- Neige fraîche	0.8
		- Neige ancienne	0.6
		- Lac, mer calme	0.05

L'éclairement solaire incident peut être décomposé en (UV+Visible) et IR, soit :

$$I_g = I_{\lambda=0.3-2.5\mu m} + I_{\lambda>2.5\mu m} \quad \text{A2.2}$$

$$\text{ou : } I_g = I_{uv} + I_{visible} + I_{IRproche} + I_{IRlo \text{ int air}} \quad \text{A2.3}$$

Sachant que :

$$I_{g,mesurée} = I_{uv} + I_{visible} + I_{IRproche} \quad \text{A2.4}$$

Ainsi l'échange radiatif s'écrit

$$Q^* = (1-r)(I_{g,mesuré} - I_{IRproche} + L^+) - L^- \quad \text{A2.5}$$

avec :

$$L^+ = I_{IRproche} + I_{IRlo \text{ int air}} \quad \text{A2.6}$$

L^+ : Rayonnement infrarouge incident ;

L'échange radiatif peut ainsi s'écrire :

$$Q^* = (1-r)(I_{g,mesuré} - I_{IRproche}) + (1-r_{IR})L^+ - L^- \quad A2.7$$

En négligeant la réflexion du sol dans l'infrarouge r_{IR} , il vient :

$$Q^* = (1-r)I_{visible} + L^+ - L^- \quad A2.8$$

Ou :

$$Q^* = (1-r) \left(\frac{I_{visible}}{I_{mesuré}} \right) I_{g,mesuré} + L^+ - L^- \quad A2.9$$

En assimilant le soleil à un corps noir M. Merzouk, [8] a tracé la fréquence cumulée en fonction de la gamme de longueur d'ondes. Sachant que la gamme du visible est comprise entre 0.38 - 0.68 μm , on tire d'après la figure A2.1 que le rapport de l'éclairement visible sur le global est estimé à 0.588.

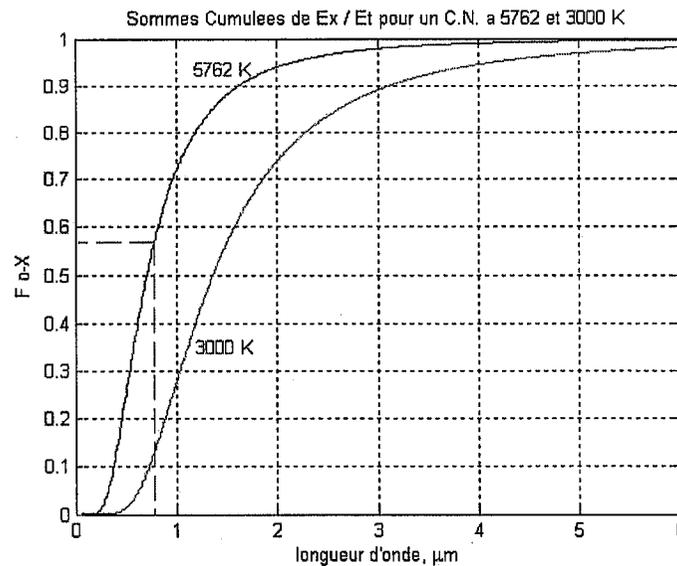


Figure A2.1 : Fréquences cumulées, en fonction de la longueur d'ondes émis par un corps noir. [8]

L'équation se met alors sous la forme :

$$Q^* = 0.588(1-r)I_{g,mesurée} + L^+ - L^- \quad A2.10$$

L'infrarouge incident est estimé par :

$$\begin{aligned} L^+ &= c_1 T^6 && \text{par ciel clair} \\ L^+ &= c_1 T^6 + c_2 N && \text{par ciel nuageux.} \end{aligned}$$

N étant la nébulosité représentant le taux de couverture nuageuse du ciel et se détermine à partir de l'expression suivante :

$$Nb = 1 - \frac{\sigma_{moy}}{\sigma_{clair}} \quad A.11$$

Avec :

σ_{moy} : durée d'insolation moyenne du mois.

σ_{clair} : durée d'insolation par ciel clair.

La nébulosité moyenne mensuelle a été tabulée par Capderou, [7].

En supposant la terre à un corps noir, l'infrarouge s'écrit selon la loi de Stephan Boltzman :

$$L^- = \sigma T_s^4 \quad A2.12$$

Avec :

- σ_s : constante de stephan-Boltzman

- T_s : température équivalente du sol

Attendu que la température T_s n'est généralement pas mesurée, l'expression précédente est approximé à [6] :

$$L^- = \sigma T^4 + 4\sigma_s T^3 (T_s - T) \quad A2.13$$

T étant la température mesurée de 1 et 2 m du sol.

Le second terme étant fonction de l'échange radiatif net, on peut écrire :

$$4\sigma_s T^3 (T_s - T) = c_3 Q^* \quad A2.14$$

d'où :

$$L^- = \sigma_s T^4 + c_3 Q^* \quad A2.15$$

c_3 étant un coefficient de proportionnalité dépendant de la nature du sol.