

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° :



DOMAINE : Sciences de la Matière

FILIERE : Physique

OPTION : Énergie Solaire

Mémoire présenté pour l'obtention
du Diplôme de Master Académique

Par : HAMADI Somia

Intitulé :

**ÉTUDE QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DU
POTENTIEL ÉOLIEN ET FONCTIONS
MATHÉMATIQUES UTILISÉES POUR SA
MODÉLISATION**

Soutenu le 06/ 06/2017 devant le jury composé de:

SALMI Mohamed	Université Mohamed Boudiaf - Msila	Président
BOURSAS Abdelhakim	Université Mohamed Boudiaf - Msila	Rapporteur
BOULECHFAR Hichem	Université Mohamed Boudiaf - Msila	Examineur

Année universitaire : 2016/2017

DEDICACE

Je Dédie ce modeste Travail :

- *A mes parents.*
- *A mes frères et mes sœurs.*
- *A toute ma famille et à mes amis.*

A tous ceux que je ne nomme pas, mais qui se reconnaîtront.

.....SOMIA HAMADI.....

كلمة شكر

"رَبِّ أَوْزَعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ
وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ وَأَدْخِلْنِي بِرَحْمَتِكَ فِي عِبَادِكَ
الصَّالِحِينَ "

الآية.19.من سورة النمل

الحمد لله و الصلاة والسلام علي الحبيب المصطفي محمد صلي الله عليه و سلم أتوجه بالشكر
والحمد و الثناء إلي الجلي العلي إلي خالق السماوات و الأرض الذي أمدنا بنعمة البصر و البصيرة
ووقفنا في درب دراستنا و أنار لنا طريق العلم إلي الله الحمد و الشكر

ثم أتقدم بالشكر الحار إلي والدي العزيزين "عيسي و لويظة" اللذان سهرا علي راحتي طول
مسيرتي الدراسية ادعوا الله لهما بالعمر الطويل إنشاء الله و إلي أخواتي و إخوتي والي عائلتي
الكريمة جميعا

كما أتقدم بالشكر إلي من أمدني بيد العون و منحنني الثقة لإتمام هذا العمل أستاذي ومشرفي الفاضل
"بورصاص عبد الحكيم" أدام الله له الصحة و العافية كما لا انسي صاحبة الفضل في مساعدتي
أستاذتي العزيزة "احد ادن رزيقة" و إلي الأستاذ رئيس لجنة المناقشة "سالمي محمد" مع الأستاذ
المناقش بولشفار هشام

كما لا انسي أن أتقدم بالشكر إلي صديقاتي الكريمات "عزيزة و جميلة و هاجرو فريدة" علي
وقوفهن معي و مساندتهن لي

« و إلي كل من أحب ولم يذكر اسمه »

.....سمية.....

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....09

HISTOIRE DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE.....12

CHAPITRE I: PHYSIQUE DE L'ATMOSPÈRE ET CARACTERISTIQUES DU VENT

I-1 Introduction.....16

I-2 Eléments de physique atmosphérique.....16

I-2-1 Structure atmosphérique.....16

2-1-1 La troposphère.....16

2-1-2 La stratosphère.....17

2-1-3 Couche limite atmosphérique (CLA).....18

2-1-4 Sous-couche rugueuse.....19

2-1-5 Couche limite de surface.....19

2-1-6 Couche d'Ekman.....19

I-3 Paramètres de vent.....20

I-3-1 Origine du vent.....20

I-3-2 Mesure du vent.....20

I-3-3 Instruments pour mesurer le vent.....21

a- La girouette.....21

b- La manche à air (manche à vent).....21

c- L'anémomètre.....22

I-3-4 Variations de la vitesse de vent.....22

4-1 Etude temporelle.....23

4-2 distribution temporelle de la vitesse de vent.....25

4-3 Vitesse moyenne théorique.....26

4-4 Vitesse moyenne empirique.....26

4-5 Vitesse cubique moyenne.....26

4-6 Densité de puissance moyenne.....27

4-7 Variation spatiale de la vitesse du vent.....28

4-7-1 Variation verticale de la vitesse du vent.....28

4-7-2 Rose des vents.....	29
Conclusions.....	30
CHAPITRE II: LOIS MATHÉMATIQUES MODÉLISANT LA DISTRIBUTUION DES VITESSES DE VENT ET MÉTHODES NUMÉRIQUES D'AJUSTEMENT	
II-1 Distributions statistiques des fréquences du vent.....	32
II-1-1 Distribution de Weibull.....	32
II-1-2 Distribution de Weibull hybride.....	35
II-1-3 Distribution de Rayleigh.....	35
II-2 Méthodes d'ajustements.....	36
II-2-1 Méthode de la vitesse moyenne et de l'écart type	36
II-2-2 Méthode graphique.....	36
II-2-3 Méthode du Facteur d'énergie (Energy pattern factor method).....	37
II-2-4 Méthode du maximum de vraisemblance (MLM).....	38
II-2-5 Méthode du maximum de vraisemblance modifiée (MMLE).....	39
II-3 Implémentation des calculs et résultats.....	39
II-3-1 Calcul de k et c par la méthode graphique pour le site de Valkenburg.....	40
II-3-2 Calcul de k et c par la méthode des moments pour le site de Valkenburg.....	43
II-4 Conclusions.....	47

CHAPITRE III: CARACTÉRISTIQUES DU GISEMENT ÉOLIEN EN ALGÉRIE

III-1 Gisement éolien en Algérie.....	50
III-2- Cartographie des microclimats de la vitesse moyenne de vent.....	53
III-3- Cartographie des microclimats des paramètres k et c de Weibull.....	54
III-4 Le vent dans la région de Msila.....	56
4-1 Vitesse de vent.....	56
4-1-1 Vitesse de vent journalière.....	56
4-1-2 Vitesse de vent mensuelle.....	57
4-1-3 Vitesse de vent Annuelle.....	58
CONCLUSIONS GENERALES.....	62
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	64

ملخص

Abstract

Résumé

LISTE DE FIGURES

Figure 01: Eolienne de Charles.F.Brush (Etats-Unis, 1888).....	13
Figure 02: Eolienne de Gedser.....	13
Figure I-1: Vue schématique de la couche atmosphérique standard.....	17
Figure I-2 : Structure verticale de la troposphère.....	17
Figure I.3: Structure vertical de l'atmosphère.....	18
Figure I.4: Couche limite atmosphérique.....	20
Figure I.5: girouette.....	21
Figure I.6: Tête de girouette à transmetteur.....	21
Figure I.7: manche à air.....	22
Figure I.8: Anémomètre.....	22
Figure I.9: Variations temporelles de la vitesse de vent :à la seconde, horaire, mensuelle et Saisonnière.....	25
Figure I.10: modèle d'histogramme de la vitesse de vent mesurée à 50m.....	26
Figure I.11: Rose des vents.....	29
Figure I.12: Roses des vents à 16 directions, illustrant la distribution de la fréquence, la vitesse et l'énergie pour différentes directions.....	30
Figure II.1: Variation de la densité de distribution de Weibull en fonction de la vitesse du vent pour une valeur constante de c	33
Figure II.2: Variation de la densité de distribution de Weibull en fonction de la vitesse du vent pour une valeur constante de k	34
Figure II.3: Droites de régression linéaire servant à déterminer les valeurs de k et c saisonnières et annuelle pour le site de Valkenburg (méthode graphique).....	42
Figure II.4: Histogrammes des vitesses annuelles et saisonnières ajustés par la distribution de Weibull par deux méthodes à 10m du sol pour le site de Valkenburg.....	44
Figure II.5: Histogrammes des vitesses annuelles et saisonnières ajustés par la distribution de Weibull par les deux méthodes à 10m du sol pour le site d'Eindhoven.....	45
Figure III.1: Cartes annuelles des vents à 10m du sol.....	50
Figure III.2: Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol.(été et printemps, hiver et automne).....	51
Figure III.3: Courbes de Weibull hybride et les histogrammes de fréquence, à 10 m du sol.....	52
Figure III.4: Les courbes de Weibull et les histogrammes de fréquence, à 10m du sol	53
Figure III.5: cartographie des microclimats de la vitesse moyenne de vent pour les sites de Sétif et B.B.Arreridj à l'Est (a) et de Tlemcen et Oran à l'Ouest(b).....	54

Figure III.6 (a): Cartographie du paramètre de forme k	55
Figure III.6 (b): Cartographie du paramètre d'échelle c en m/s.....	56
Figure III.7: Variation de la vitesse moyenne journalière du vent à Msila.....	57
Figure III.8: Variation mensuelle de la vitesse du vent à Msila.....	57
Figure III.9: Variation annuelle de la vitesse de vent à Msila.....	58
Figure III.10: Rose des vents pour la région de Msila.....	58
Figure III.11: Histogramme et courbe de Weibull hybride des fréquences de la vitesse du vent pour la région de Msila.....	59
Figure III.12: Planification du parc éolien de 9MW à Msila.....	60
Figure III.13: Parc éolien virtuel à Msila.....	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01: Production de l'énergie éolienne par pays	10
Tableau I.1: Format série chronologique des données de la vitesse de vent	23
Tableau I.2: Format Fréquentielle des données de la vitesse de vent	23
Tableau I.3 : Format série chronologique de la vitesse de vent du site de Valkenburg.....	24
Tableau I.4: Tableau des classes et longueurs de rugosité z_0	29
Tableau II.1: Tableau Excel pour calculer k et c par la méthode graphique.....	41
Tableau II.2: Valeurs saisonnières et annuelles de la vitesse moyenne et des paramètres k et $c(m/s)$ à 10m pour le site de Valkenburg ajustées par la méthode graphique.....	43
Tableau II.3: Valeur de k et c saisonnière et annuelle estimée par la méthode des moments pour le site de Valkenburg.....	43
Tableau II.4: Vitesse moyenne et paramètres de Weibull saisonniers et annuels à 10m du sol pour le site d'Eindhoven (méthode graphique).....	46
Tableau II.5: paramètres de Weibull saisonniers et annuels à 10m du sol pour le site d'Eindhoven (méthode des moments).....	47
Tableau II.6: Pourcentage des vitesses supérieures à la vitesse de démarrage.....	47
Tableau III.1: Les paramètres d'hybride Weibull et la vitesse moyenne, à 10m du sol.....	52
Tableau III.2: Les paramètres de Weibull et la vitesse moyenne, à 10m du sol.....	53
Tableau III.3: Paramètres de Weibull et la vitesse moyenne par secteur pour le site de Msila à 10m du sol.....	61

NOMENCLATURE

v_{moy}, \bar{v} : vitesse moyenne du vent (m/s)

v_i : vitesse du vent observée à l'instant i (m/s)

$\overline{v^3}$: La moyenne de la vitesse au cube du vent

\bar{v}^3 : vitesse moyenne du vent au cube

N : nombre d'observations de la vitesse du vent pendant une période de temps

$f(v)$: fonction de densité de probabilité

$f(v_i)$: probabilité d'occurrence de la vitesse de vent v_i

$F(v)$: Fonction de distribution cumulée

k : Facteur de forme de la loi de Weibull (sans dimension)

c : Facteur d'échelle de la loi de Weibull (m/s)

p : densité de puissance instantanée (W/m^2)

\bar{P} : densité de puissance moyenne (W/m^2)

ρ_i : densité de l'air mesurée à l'instant i

ρ : densité de l'air (kg/m^3)

A : surface balayée par la voilure de l'éolienne (m^2)

z_1 : hauteur de l'observation de la vitesse du vent v_1 (m)

z_2 : hauteur à laquelle on veut estimer la vitesse du vent v_2

α : Facteur de puissance

z_0 : rugosité du terrain (m)

$\Gamma(n)$: fonction gamma

F_0 : pourcentage de vitesses nulles.

σ : écart type de la distribution de la vitesse du vent

E_{PF} : facteur d'énergie du vent

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'augmentation des effets négatifs sur l'environnement issue de l'utilisation des combustibles fossiles et les réserves limitées de cette énergie ont poussé de nombreux pays à explorer et à chercher d'autres ressources d'énergie, renouvelables et respectant l'environnement, pour soutenir la demande croissante de l'énergie. L'énergie éolienne est une source d'énergie propre alternative aux combustibles fossiles, qui pollue la couche inférieure de l'atmosphère par l'émission de dioxyde de carbone, une cause principale de l'effet de serre. L'installation des générateurs éoliens peut réduire efficacement la consommation de combustibles fossiles polluant et le coût de la production générale d'électricité.

L'énergie éolienne en particulier joue un rôle croissant dans la réalisation des objectifs du développement durable, de la sécurité énergétique et de la protection de l'environnement. De nos jours, elle a été reconnue comme l'une des énergies propres la plus prometteuse dans le monde en raison de la baisse des coûts et la durée de vie des installations. L'énergie éolienne peut répondre non seulement à la demande d'énergie dans les modes directement connectés au réseau, mais aussi dans les applications autonomes et distantes [1]. Elle a l'avantage d'être utilisée localement dans les zones rurales et isolées (pompage de l'eau, production d'électricité) [2]

L'application de l'énergie éolienne dans les systèmes d'énergie électrique augmente rapidement en raison des préoccupations publiques accrues pour les impacts environnementaux négatifs et l'escalade des coûts énergétiques associés à l'utilisation de sources d'énergie conventionnelles [1].

La dernière décennie a été caractérisée par un développement accéléré de l'ingénierie de systèmes éoliens dans le monde entier, qui ont par conséquent contribué de manière significative à la vie quotidienne dans certains pays développés. La production d'énergie éolienne connaît une croissance remarquablement rapide au cours des 20 dernières années, et c'est maintenant une technologie mature, fiable et efficace pour la production d'électricité [3]. Depuis 1996, la capacité éolienne globale a continué de croître à un taux cumulatif annuel proche de 40%. Au cours de la dernière décennie, les installations ont pratiquement doublé tous les deux ans et demi. Au cours de l'année 2010, la capacité éolienne a atteint un total de 196 630 Mégawatt, contre 159 050 MW en 2009, 120 903 MW en 2008 et 93 930 MW en 2007. En 2010, 9918 MW d'énergie éolienne ont été installés à travers l'Europe, les pays de l'Union européenne représentant 9295 MW au total [4]. Actuellement la chine est classé en premier lieu en terme de systèmes éoliens installés avec une capacité avoisinant 91,4 GW, en deuxième lieu vient les USA (61GW), puis l'Allemagne (34,2 GW) et en quatrième position l'Espagne (22,9 GW). L'inde qui est un pays émergeant vient en cinquième lieu avec une production de 20,1 GW (tableau 01) [5]

Selon le dernier rapport annuel du GWEC (The Global Wind Energy Council) [32], la capacité éolienne mondiale était de 318,137 Gigawatts (GW) au 31 décembre 2013, cinq ans après avoir passé les 100 GW.

En dix ans, la capacité de production a été pratiquement multipliée par 10 (39,4GW en 2003). Il est estimé qu'à la fin de 2015, la capacité de production électrique renouvelable installée permettait d'assurer 23,7 % de la production électrique mondiale. Dans ce pourcentage l'énergie électrique provenant des systèmes éoliens n'excède pas les 3,7% (rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables 2016) [6]. Ces statistiques montrent nettement que l'énergie éolienne produite actuellement est loin d'être en mesure d'assurer les besoins mondiaux en électricité.

Pays	Capacité éolienne	Pourcentage de la production mondiale
1-Chine	91,4 GW	28.7 %
2-USA	61 GW	19.2 %
3-Allemagne	34,2 GW	10.8 %
4-Espagne	22,9 GW	7.2 %
5-Inde	20,1 GW	6.3 %
6-Grande-Bretagne	10,5 GW	3.3 %
7-Italie	8,5 GW	2.7 %
8-France	8,2 GW	2.6 %
9-Canada	7,8 GW	2.5 %
10-Danemark	4,7 GW	1.5 %

Tableau 01: Production de l'énergie éolienne par pays

En Algérie le gisement éolien commence à être timidement étudié. L'évaluation du potentiel éolien dans notre pays se fait en première phase à partir des données des stations météorologiques. Cependant, pour mieux exploiter le potentiel éolien en Algérie, des cartes et des atlas de vents, semblables à ceux élaborés dans les pays développés, doivent être établis sur tout le territoire national comprenant toutes les caractéristiques du vent. Quelques travaux ont été fait dans ce sens, mais ils restent insuffisants, vu l'étendu du territoire nationale. Actuellement la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Une première ferme éolienne pilote de 10 MW de puissance est implantée dans la région d'Adrar depuis juin 2014. Par ailleurs, et suite à la révision du programme national en 2015, la part de l'énergie éolienne a été rehaussée de 2000 MW à 5010 MW et occupe désormais la seconde place derrière le photovoltaïque, loin devant les autres filières [7]. Cependant, les systèmes d'énergie éolienne souffrent d'un inconvénient majeur puisque la ressource

éolienne est intermittente, donc n'est pas disponible tout le temps pour que les turbines fonctionnent continuellement [8]. Bien que le vent n'est qu'une source intermittente, il représente néanmoins, une source d'énergie fiable, la plus populaire et la plus prometteuse. Dans une ferme éolienne spécifique, l'énergie électrique générée dépend principalement de la vitesse moyenne du vent. Étant donné que la variation de la vitesse moyenne annuelle du vent est difficile à prévoir, les variations de la vitesse du vent au cours d'une année peuvent être mieux caractérisées par la fonction de densité de probabilité (pdf). Au cours des deux dernières décennies, un certain nombre de travaux ont apparu dans la littérature visant à élaborer un modèle statistique adéquat pour décrire la distribution des fréquences éoliennes. L'utilisation de cette approche de distribution de fréquence peut fournir une méthode simple pour prédire la production d'énergie d'un système éolien de conversion d'énergie. Une grande importance a été donnée au modèle de Weibull à deux paramètres, car c'est le mieux qui convient à décrire une large collection de données empiriques du vent [9]

Il existe des méthodes qui ont jusqu'à présent été utilisées principalement pour ajuster la distribution de probabilité des vitesses de vent mesurée dans un lieu donné sur une période de temps, généralement mensuelle ou annuelle. Dans la littérature, il est courant de tenir compte de ces fonctions pour comparer celle qui correspond le mieux à la distribution mesurée dans un lieu donné. Au cours de ce processus de comparaison, le paramètre sur lequel l'adéquation de l'ajustement est jugée est nécessaire.

Dans le présent mémoire on a comparé entre deux méthodes d'ajustement ; la méthode dite graphique et la méthode des moments pour déterminer les deux paramètres du modèle de Weibull en l'occurrence le paramètre de forme k (sans dimension) et le paramètre d'échelle c (exprimé en m/s)

HISTOIRE DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique transportée par les vents, qui sont des déplacements perpétuels des masses d'air dans l'atmosphère. Elle est une forme indirecte de l'énergie solaire, car l'ensoleillement de la Terre, qui par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, engendre des différences de pression et de température en créant ainsi des déplacements perpétuels des masses d'air, qui sont les vents. L'utilisation de cette énergie est soit directe (mouture, pompage, bateaux à voiles), soit indirecte (production d'électricité via un aérogénérateur) [10].

L'énergie éolienne, qui tire son nom d'Éole (dieu du vent dans la Grèce antique) est l'une des énergies les plus anciennes utilisées par les humains. Il y a déjà 5000 ans, les Égyptiens, puis les phéniciens utilisaient le vent pour la navigation maritime. Ensuite, l'énergie éolienne fut utilisée pour broyer le grain et pomper de l'eau. En Europe, les premières éoliennes utilisées pour pomper l'eau et moulinier le blé sont construites vers 1100 apr. J.-C. Cette source d'énergie nous sert aujourd'hui à produire de l'électricité [11]. Son utilisation dans ce sens est récente. Dans les années 1887-1888, l'américain Charles F. Brush construit la première éolienne à Cleveland, qui produit du courant pour 12 batteries, 350 lampes à filament, 2 lampes à arc à charbon et 3 moteurs. A la fin du XIXe siècle, Poul la Cour conçoit plusieurs éoliennes expérimentales et mène des recherches en soufflerie. L'éolienne expérimentale de Poul la Cour existe toujours à Askov (Danemark). Puis, pendant la première moitié du XXe siècle, les éoliennes sont progressivement confrontées à la concurrence croissante des centrales à charbon et l'électricité provenant des réseaux électriques. Cependant, en raison des pénuries de charbon et de pétrole pendant les deux guerres mondiales, la demande en énergie éolienne se maintient. C'est en 1957, que Johannes Juul (27 Octobre 1887 – 5 Novembre 1969), un ingénieur danois, pris une part importante dans la création de la turbine Gedser, qui sert de modèle aux éoliennes modernes. L'éolienne Gedser se compose d'un générateur de trois pales à pivot.

Les problèmes environnementaux posés par les sources d'énergie traditionnelles (charbon, pétrole, gaz et nucléaire) et les crises d'énergies mondiales successives ont incité les autorités des pays développés à accélérer le développement de l'industrie éolienne. Ainsi en 1980, l'état de Californie décida que d'ici l'an 2000, 10% de son alimentation énergétique proviendra de l'énergie éolienne. La directive 2009/28 / CE du Parlement et le Conseil européen encourage l'utilisation des énergies renouvelables et établit, pour chaque État membre, un objectif de consommation d'énergie à partir de sources renouvelables cohérent avec une part d'énergie de 20% provenant de sources

renouvelables dans la consommation énergétique communautaire globale D'ici 2020. Au cours des dernières années, on a enregistré une croissance significative du nombre des éoliennes installées dans le monde. La plupart des machines à vent, soit environ 40% de l'ensemble de la puissance installée, sont situées en Europe, en particulier en Allemagne, en Espagne, au Royaume-Uni, en Italie et en France, tandis que le reste est principalement situé en Chine, Etats-Unis et Inde [1-3]. La diffusion des turbines éoliennes est due à la réduction du coût par unité d'énergie produite, grâce aux progrès réalisés dans la conception des éoliennes, la taille du plus grand aérogénérateur qui était de 50 kW avec un diamètre de 15m en 1989 est aujourd'hui de 7.5 MW, avec un diamètre de 127 m environ (ENERCON). La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations, plus de 135 mètres. Donc les éoliennes sont devenues plus efficaces, avec des coûts de construction plus faibles et une fiabilité plus élevée. Ainsi, l'énergie éolienne est devenue une source d'énergie exploitable à des coûts similaires à ceux des centrales à combustibles fossiles.



Figure 01: Eolienne de Charles.F.Brush (Etats-Unis, 1888)



Figure 02: Eolienne de Gedser

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie [12]. De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. Par ailleurs, selon des archives du Ministère de l'hydraulique, deux autres éoliennes ont été installées à Mecheria, pour l'alimentation en eau potable de la ville et à Naama, pour le pompage de l'eau. Les deux machines étaient couplées à une génératrice à courant continu et entraînaient une pompe électrique à courant continu. Une autre éolienne du même type a été installée pour la protection cathodique des tubages du Chott Chergui. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Ce constat était également valable même à l'échelle internationale.

L'une des premières applications de l'énergie éolienne est le pompage de l'eau. En Algérie la plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique [12]. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans. Plus récemment, le Haut Commissariat au Développement de la Steppe a installé 77 éoliennes de pompage de l'eau sur les Hauts plateaux [12]. Les éoliennes de pompage de l'eau sont de type mécanique ou électrique. On peut trouver les deux types. Mais suite aux incidents mécaniques rencontrés avec les éoliennes de pompage mécanique, il est généralement admis que pour les forages de grandes profondeurs, les aérogénérateurs couplés à une pompe électrique est plus fiable. Cependant, pour qu'une telle installation soit performante, la vitesse moyenne du vent doit être supérieure à 4m/s. Actuellement, la première ferme éolienne en Algérie, de puissance 10 MW est opérationnelle à Adrar au sud algérien. Malgré que la puissance existante est insignifiante, Un programme ambitieux est mis en place jusqu'à l'an 2030. A noter que ce nouveau programme vise aussi bien les installations connectées au réseau électrique que les petites éoliennes destinées au pompage de l'eau ou à l'alimentation en électricité des localités isolées. Des études et travaux de recherche sont menés par La Division Énergie Éolienne sous l'égide du Centre de Développement des Énergie Renouvelables (CDER), pour développer les systèmes de conversion de l'énergie éolienne et promouvoir l'exploitation de cette énergie dans le pays.

Chapitre I

PHYSIQUE DE L'ATMOSPHÈRE ET CARACTÉRISTIQUES DU VENT

I-1 Introduction

Ce Chapitre présente une synthèse bibliographique sur le vent comme une source d'énergie renouvelable à savoir ; structure de l'atmosphère, origine du vent, la vitesse du vent, instruments de mesure de la vitesse du vent et principes de calcul de la puissance éolienne.

I-2 Éléments de physique atmosphérique

I-2-1 Structure atmosphérique

L'atmosphère est un mélange de gaz et de particules qui entourent le globe. Vue de l'espace, elle forme une fine couche de lumière bleue foncée sur l'horizon. Elle est constituée de couches qui forment des anneaux autour de la Terre et s'étend sur quelques centaines de kilomètres d'altitude, mais confinée en majeure partie sur une hauteur de 50 kilomètres au dessus de la surface terrestre (voir **figure I.1**)

L'atmosphère qui est une fine couche gazeuse très mince en comparaison au rayon terrestre, joue le rôle d'un filtre au rayonnement solaire, qui est essentiel à la présence de la vie sur terre. Elle est composée à 78,09% d'azote, 20,95% d'oxygène, 0,93% d'argon et d'une variété de gaz en traces. L'atmosphère est considérée comme un gaz parfait dont la pression diminue en fonction de l'altitude suivant une loi exponentielle. Elle est divisée en plusieurs couches concentriques (Troposphère, Stratosphère, Mésosphère et la Thermosphère) séparées par des étroites zones de transition, comme illustré sur la Figure I.1. Ces couches sont définies par rapport à leur composition chimique et par conséquent, leur structure thermique qui en détermine les propriétés dynamiques.

La couche de l'atmosphère la plus proche de la surface est la troposphère, qui s'étend jusqu'à environ 15 kilomètres d'altitude. La troposphère, dont la limite inférieure est le sol et la limite supérieure la Stratosphère contient des gaz essentiels à la vie et sont présents à l'état naturel, comme l'oxygène et l'azote, ainsi, le plus grand pourcentage de la masse atmosphérique (75%) et la vapeur d'eau y est abondante, c'est pourquoi la plupart des phénomènes météorologiques y ont lieu [13]. Bien que l'atmosphère se subdivise en plusieurs grandes parties en fonction du gradient vertical de température, les deux grandes parties essentielles de l'atmosphère standard sont par conséquent la troposphère et la stratosphère (Figure I-1) :

2-1-1 Troposphère

La troposphère correspond à la couche atmosphérique la plus proche du sol terrestre. Son épaisseur est variable, de l'ordre de 7km de hauteur au-dessus des pôles allant jusqu'à 18km au-dessus de l'équateur et environ 13km, selon les saisons, dans certaines zones. C'est dans cette couche qu'on retrouve la plus grande partie des phénomènes météorologiques. Plus on s'élève dans la troposphère, plus la température décroît de façon significative d'environ 6°C tous les 1000 mètres

pour atteindre -56°C à la tropopause. Cette dernière marque la séparation entre la troposphère et la stratosphère.

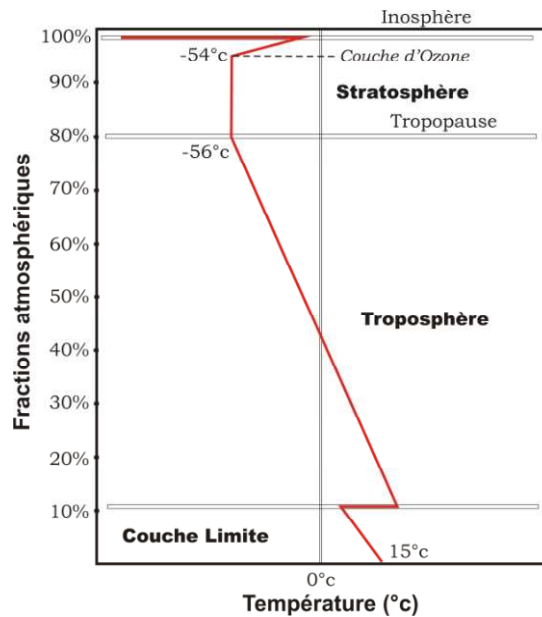


Figure I.1: Vue schématique de la couche atmosphérique standard

2-1-2 Stratosphère

La stratosphère se trouve au-dessus de la troposphère et limitée en haut par l'ionosphère. Elle comprend la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie sur Terre, car elle absorbe la majorité des rayons solaires ultraviolets qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère. S'agissant d'un environnement beaucoup plus calme, les mouvements de l'air y sont bien moindres.

La zone des basses couches atmosphériques étant la troposphère, peut être scindée en deux parties distinctes. L'atmosphère libre d'un côté et la couche limite atmosphérique (CLA) d'un autre. La **Figure I-2** représente la structure verticale de la troposphère:

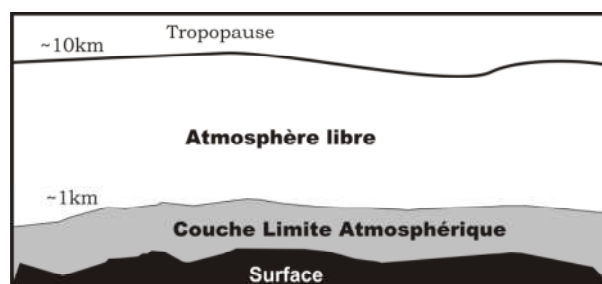


Figure I.2 : Structure verticale de la troposphère

L'atmosphère libre qui est le siège d'un vent uniforme, horizontal et peu turbulent avec une vitesse constante représente le foyer des vents dit géostrophiques. Les forces de pression et de Coriolis sont prédominantes et les forces de frottement négligeables. La couche limite atmosphérique représente le lieu même des forces de frottement. Ces forces induisent un comportement complexe du fluide atmosphérique.

Les éoliennes actuelles, dépassent rarement les 100m de hauteur. Cela signifie que l'environnement de fonctionnement des éoliennes est situé dans la couche limite atmosphérique. L'étude des aspects structurales de cette couche et les forces dynamiques y agissants est indispensable pour mieux rentabiliser les machines éoliennes.

2-1-3 Couche limite atmosphérique (CLA)

La couche limite atmosphérique située entre le sol et l'atmosphère libre, dont l'épaisseur est d'environ 1000 m, 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.

La couche limite atmosphérique est composée de trois couches distinctes d'épaisseur variable (**Figure I.2**), à savoir la sous-couche rugueuse (de quelques millimètres à quelques mètres) [13], la couche de surface (quelques dizaines à la centaine de mètres), et la couche d'Ekman (de l'ordre du kilomètre).

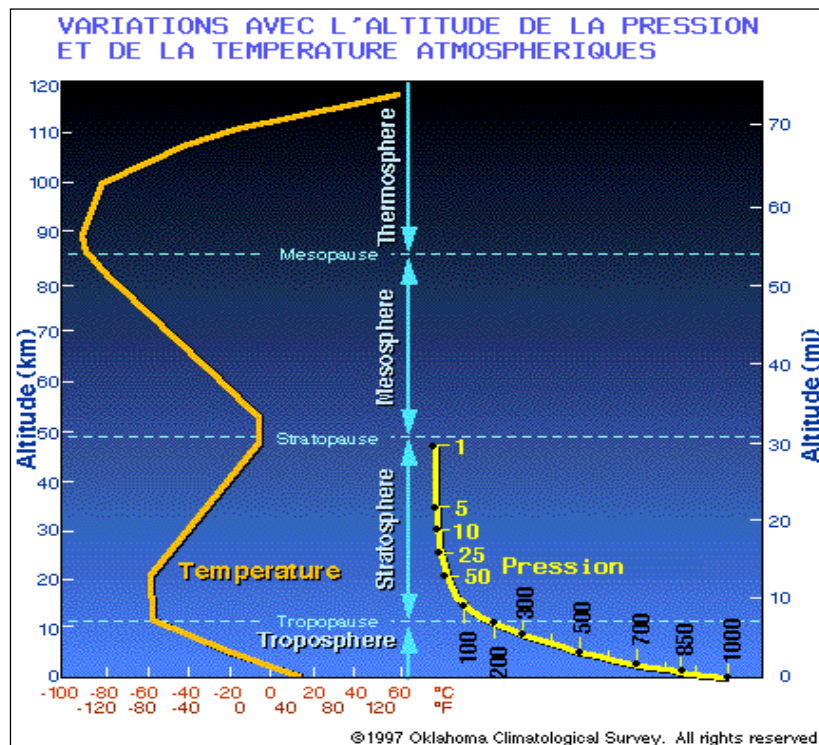


Figure I.3: Structure verticale de l'atmosphère

2-1-4 Sous-couche rugueuse

Elle se trouve au voisinage immédiat du sol (**Figure I.4**), c'est une zone de mélange des sillages des obstacles rencontrés par le vent. Les champs de vitesses y est fortement hétérogènes et in stationnaires et les forces de frottement y sont prépondérantes. Son épaisseur varie en fonction de la nature du terrain, de quelques millimètres en mer à quelques dizaines de mètres en zone urbaine. C'est au travers de cette couche que se font les échanges de masse, d'énergie, et d'humidité entre le sol et la couche limite atmosphérique.

2-1-5 Couche limite de surface

Communément appelée CLS et également appelée couche de mélange ou couche de Prandtl, elle est définie comme la région où la température diminue rapidement avec l'altitude pendant la journée, et où les flux de quantité de mouvement, de chaleur sensible et latente sont conservatifs et égaux à ceux du sol. Elle s'étend de dix à quelques dizaines de mètres et représente environ 10% de la couche limite atmosphérique. La turbulence y est homogène, et la force de Coriolis négligeable devant les forces de frottement dues au sol. Enfin, la direction du vent (composante horizontale de la vitesse) ne varie pas avec la hauteur alors que son intensité est proportionnelle au logarithme de l'altitude.

2-1-6 Couche d'Ekman

C'est une couche de mélange (**Figure I.4**) où la force de Coriolis devient comparable aux forces de frottement au sol. Cela entraîne une rotation de la direction du vent avec l'altitude pouvant atteindre 30 à 40°. Celle-ci se fait dans le sens anticyclonique (à droite pour l'hémisphère Nord et à gauche pour l'hémisphère Sud). 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 [14] :

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

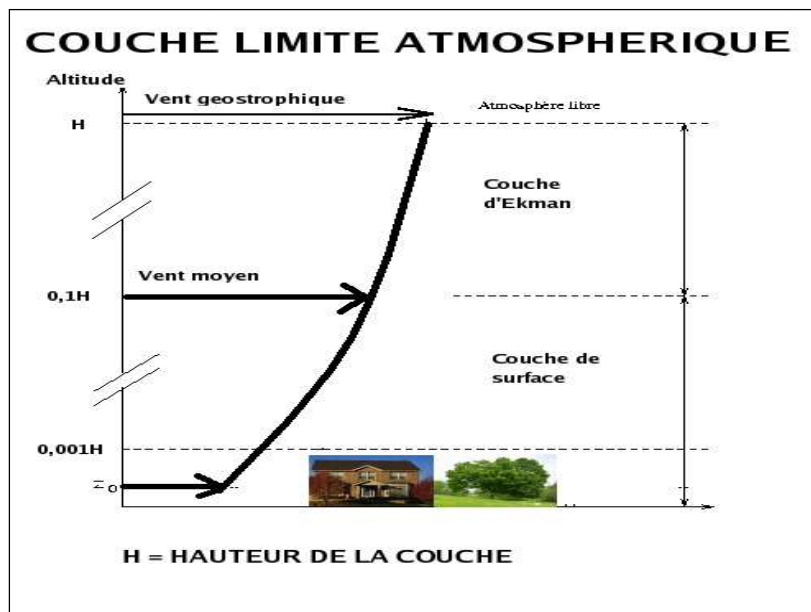


Figure I.4 : Couche limite atmosphérique

I-3 Paramètres de vent

Le rendement des aérogénérateurs, le Choix des sites et le dimensionnement des parcs éoliens sont fortement affectés par le profile de vent. Pour mieux caractériser le vent d'un site ou d'une région donnée, la connaissance d'un certain nombre de grandeurs physiques est nécessaire tel que la vitesse de vent, la direction, la fonction de densité de probabilité (pdf), la vitesse moyenne (journalière, mensuelle, saisonnière ou annuelle) et d'autres.

I-3-1 Origine du vent

Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Ces variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement d'une part à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et d'autre part, aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures des régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par-dessus de l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre [15]

I-3-2 Mesure du vent

La mesure directe du vent se fait dans des stations météorologiques, où deux éléments servent à le caractériser : sa vitesse et sa direction. Le mot «direction» en parlant du vent sous-entend celle d'où vient le vent. Un vent d'ouest est un vent qui souffle de l'ouest, un vent de nord est un vent qui souffle du nord. Son indication est donnée en utilisant des girouettes. La composante horizontale du

déplacement de l'air en un point et à un instant donnés se dispose selon une certaine direction ; elle atteint en outre une vitesse déterminée appelée «vitesse de vent». Elle est mesurée généralement en mètres par seconde (m/s), en kilomètres par heure (km/h), mais aussi en nœuds ou en milles par heure, dont il existe entre ces diverses unités la relation suivante:

$$1m/s = 3,6km/h = 1,94noeud$$

Les instruments utilisés pour mesurer la vitesse de vent sont les anémomètres.

I-3-3 Instruments pour mesurer le vent

a- La girouette

La girouette est un instrument qui nous indique la direction du vent. C'est un pointeur (une flèche, un coq, etc.) qui est monté sur un axe rotatif (**Fig. I.5** et **I.6**). Le pointeur peut tourner librement autour de son axe et s'aligne donc parallèlement au vent. C'est la partie la plus mince du pointeur (la pointe de la flèche, le bec du coq, etc.) qui nous indique la provenance du vent. Il peut y avoir une croix immobile indiquant les points cardinaux fixée sous le pointeur d'une girouette Traditionnelle [16].



Figure I.5: girouette



Figure I.6 : Tête de girouette à transmetteur

Puisque l'usage des girouettes s'est répandu en Europe durant le moyen-âge et qu'il en existait même 4000 ans auparavant, on ne peut pas dire qui en est l'inventeur précisément.

Unités de mesure: Les points cardinaux ou les degrés d'orientation par rapport au nord géographique.

b- La manche à air (manche à vent)

La manche à air est un instrument qui nous indique l'origine du vent et nous donne aussi une approximation de la vitesse de vent. C'est un tube de toile souple fermé à l'une des extrémités que l'on appelle manchon et fixé à un mât (**Fig. I.7**). Le vent s'engouffre par l'ouverture et soulève le manchon. Il y a toujours au moins trois bandes rouges et deux bandes blanches qui s'alternent. Ces bandes nous permettent d'estimer approximativement la vitesse de vent. Chaque bande correspond à une vitesse de 5 nœuds (environ 9 km/h). Alors quand il y a cinq bandes du tube de toile complètement à l'horizontal on peut dire qu'il y a un vent d'au moins 25 nœuds (environ 45 km/h).

Le tube de toile peut aussi pivoter sur son axe alors il nous permet de connaître la direction de vent. Le manchon pointe vers où le vent se dirige [16].



Figure I.7: manchon à air

c- L'anémomètre

L'anémomètre est un instrument qui nous indique la vitesse de vent. L'anémomètre est composé de coupelles en forme de demi-sphères vides orientées dans le même sens (**Fig. I.8**) et qui tournent librement autour d'un axe. Dans les anémomètres modernes, un système électronique permet alors de calculer le nombre de tours effectués par les coupelles dans un certain temps. La vitesse du vent s'affiche alors sur un petit écran. On peut très bien connaître la vitesse du vent seulement de façon mécanique. L'anémomètre a été inventé par l'architecte italien Leon Battista Alberti en 1450 [16].

Unités de mesure : En kilomètres par heure (km/h) ou en mètres par seconde (m/s)



Figure I.8: Anémomètre

I-3-4 Variations de la vitesse de vent

Le vent est un phénomène aléatoire qui présente des grandes variations qu'on peut classer en deux groupes : **la variabilité temporelle** et **la variabilité spatiale** [17].

La variabilité temporelle comprend trois sous-groupes :

- à basses fréquences : les variations annuelles, saisonnières, mensuelles ;
- à moyennes fréquences : les variations journalières, horaires ;

- à hautes fréquences : les variations à la seconde ou à plus haute fréquence (au-dessus de 1 Hz) caractéristiques de la turbulence du vent.

La variabilité spatiale concerne principalement la variation verticale et le champ des directions du vent.

4-1 Étude temporelle

Pour savoir l'importance du vent sur une région bien précise, il suffit de déterminer la vitesse moyenne arithmétique annuelle, calculée sur un échantillon de 10 ans minimum. Cette valeur présente un ordre de grandeur de la vitesse du vent sur le site étudié. Par ailleurs, la vitesse du vent varie selon la journée, le mois, la saison et l'année [17].

La variation journalière (ou diurne) est établie à l'échelle horaire du jour, la variation saisonnière est déterminée à l'échelle mensuelle et en fin la variation pluriannuelle exige de longues séries traitées à l'échelle de l'année (**Fig. I.9**). Ces variations journalières, saisonnières et annuelles présentent un rôle déterminant dans le dimensionnement des systèmes éoliens. Les données sur la vitesse de vent sont en générale disponibles au niveau des stations météorologiques sous forme de tableaux chronologiques. Les tableaux comprennent des séries temporelles de la vitesse de vent (**Tab. I.1 et I.3**), ou bien les fréquences d'occurrence d'un certain nombre de classes de vitesses, qui sont des intervalles de vitesses qui peuvent être homogènes ou non (**Tab. I.2**).

Hour	Wind Speed (m/s)	Hour	Wind Speed (m/s)	Hour	Wind Speed (m/s)	Hour	Wind Speed (m/s)
1	4.3124	7	4.2243	13	5.7124	19	8.3301
2	4.1627	8	4.3146	14	8.3242	20	9.3050
3	5.7024	9	4.2342	15	9.2672	21	6.5214
4	4.3240	10	6.7014	16	9.3250	22	4.2270
5	3.8642	11	6.8192	17	6.7030	23	3.8219
6	4.1634	12	6.8210	18	5.7184	24	4.3642

Tableau I.1 : Format série chronologique des données de la vitesse de vent

Wind speed (m/s)	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Frequency%	8.33	33.33	16.67	20.83	0	8.33	12.50

Tableau I.2 : Format fréquentielle des données de la vitesse de vent

POTENTIAL WIND STATION 210 Valkenburg
MOST RECENT COORDINATES X : 88750; Y : 464425
MEASURED AT 10.0 METER HEIGHT

POTENTIAL WIND MEANS: CORRECTED TO THE WIND SPEED AT 10 M HEIGHT OVER
OPEN LAND WITH ROUGHNESS LENGTH 0.03 METER

CONSULT THE REPORTS AT THE SITE: <http://www.knmi.nl/samenw/hydra>
FOR BACKGROUND INFORMATION

THESE DATA CAN BE USED FREELY PROVIDED THAT THE FOLLOWING SOURCE IS
ACKNOWLEDGED:

ROYAL NETHERLANDS METEOROLOGICAL INSTITUTE
KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT

VERSION NOVEMBER 2006

TIME IN GMT

DD = WIND DIRECTION IN DEGREES NORTH

QDD = QUALITY CODE DD

UP = POTENTIAL WIND SPEED IN 0.1 M/S

QUP = QUALITY CODE UP

DATE, TIME, DD, QDD, UP, QUP

20061101,01,310, 0,129, 0

20061101,02,320, 0,129, 0

20061101,03,310, 0,140, 0

20061101,04,320, 0,151, 0

20061101,05,320, 0,140, 0

20061101,06,320, 0,162, 0

20061101,07,330, 0,162, 0

20061101,08,340, 0,152, 0

20061101,09,340, 0,152, 0

20061101,10,340, 0,152, 0

20061101,11,340, 0,130, 0

20061101,12,340, 0,130, 0

20061101,13,330, 0,119, 0

20061101,14,350, 0,105, 0

20061101,15,330, 0,108, 0

20061101,16,340, 0, 87, 0

20061101,17,350, 0, 94, 0

20061101,18, 30, 0,105, 0

20061101,19, 50, 0, 42, 0

20061101,20, 60, 0, 42, 0

20061101,21, 50, 0, 11, 0

20061101,22, 40, 0, 21, 0

20061101,23, 30, 0, 42, 0

20061101,24,220, 0, 23, 0

Tableau I.3 : Format série chronologique de la vitesse de vent du site de Valkenburg

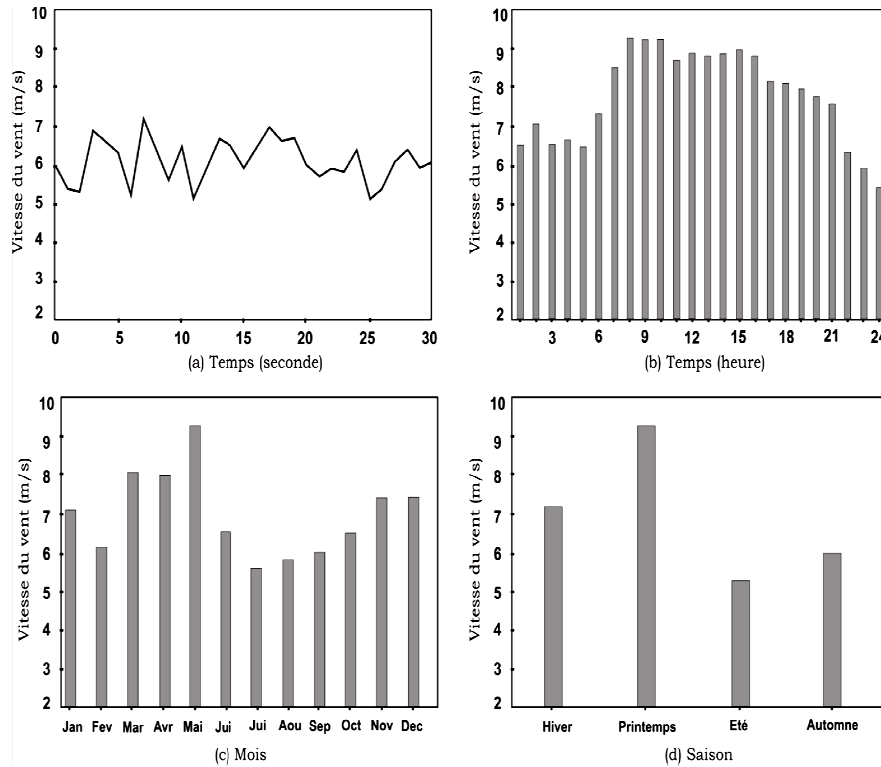


Figure I.9 : Variations temporelles de la vitesse de vent :à la seconde, horaire, mensuelle et saisonnière

4-2 Distribution temporelle de la vitesse de vent

Le potentiel éolien dans une région donnée se calcul à partir de la distribution de la vitesse du vent mesurée sur une période qui peut aller d'un mois jusqu'à plusieurs années. Les vitesses mesurées sont regroupées en plusieurs classes de vitesses. Pour chaque classe on calcul la fréquence relative désignant la probabilité d'occurrence de cette classe. Les classes sont des intervalles de vitesses, qui sont en générale de même taille. Les fréquences obtenues sont représentées en fonction des différentes classes sous forme d'histogramme. La **Figure I.10** illustre un histogramme type d'un échantillon de vitesses de vent mesurées à 50m du sol. La distribution obtenue s'appelle la fonction de densité de probabilité empirique notée $f(v_i)$ ou v_i représente la vitesse observée du vent. La probabilité d'observer cette vitesse est mesurée par la hauteur de la colonne correspondant à la classe à qui appartient cette vitesse.

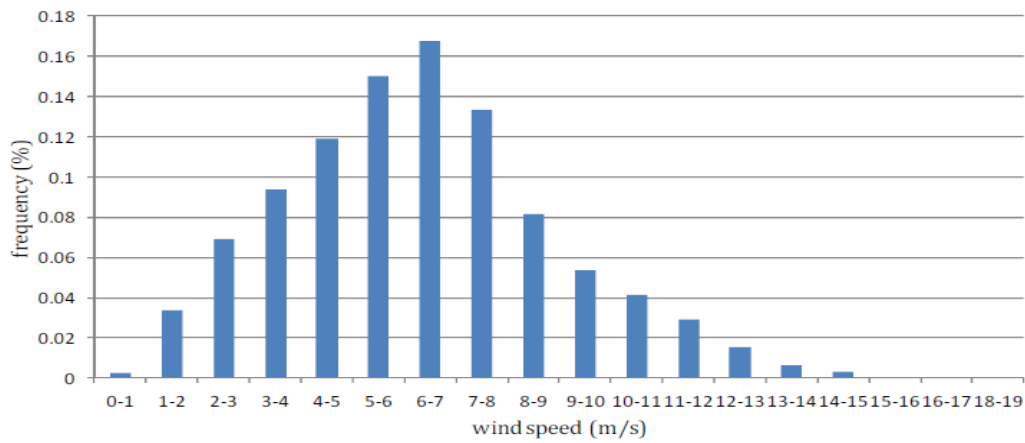


Figure I.10: modèle d'histogramme de la vitesse de vent mesurée à 50m

La modélisation de la distribution de la vitesse du vent se fait à partir de plusieurs lois mathématiques présentes dans la littérature et qui sont utilisées pour refléter la distribution de la vitesse du vent mesurée sur une période de temps. Le modèle est une loi de probabilité notée $f(v)$, appelée fonction de densité de probabilité (pdf) (de l'anglais probability density function). La loi la plus adéquate est celle dont la fonction $f(v)$ est la plus proche de la fonction de densité de probabilité empirique $f(v_i)$. Différents testes statistiques sont utilisés dans la littérature pour évaluer la validité du modèle étudié. Il est prouvé par le biais de ces mêmes testes que le modèle le plus compatible donc le plus utilisé en littérature est la distribution de probabilité de Weibull.

4-3 Vitesse moyenne théorique

La vitesse moyenne du vent peut être obtenue en intégrant la fonction de densité de probabilité $f(v)$ [18]:

$$v_{moy} = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (I.1)$$

4-4 Vitesse moyenne empirique

La vitesse moyenne du vent sur une région donnée peut être calculée empiriquement à partir des vitesses du vent mesurées dans cette région pendant une période de temps donnée suivant la formule suivante [18]:

$$v_{moy} = \sum_{i=1}^N v_i f(v_i) \quad (I.2) \quad \text{où}$$

N : nombre d'observation (vitesse du vent);

v_i : vitesse du vent observée;

$f(v_i)$: probabilité d'occurrence de la vitesse observée du vent v_i .

4-5 Vitesse cubique moyenne

La vitesse cubique moyenne du vent $\overline{v^3}$ est donnée par la relation suivante :

$$\overline{v^3} = \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (I.3)$$

Ou bien sous la forme empirique suivante [18]:

$$\overline{v^3} = \sum_{i=1}^N v_i^3 f(v_i) \quad (\text{I.4})$$

4-6 Densité de puissance moyenne

Le calcul de la densité de puissance du vent disponible sur un site donné est indispensable pour mieux évaluer le gisement éolien du site étudié. La densité de puissance instantanée au niveau des pales d'un aérogénérateur est donnée par l'expression suivante [19]:

$$p_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (\text{I.5})$$

p_v : densité de puissance en fonction de la vitesse instantanée v du vent, dont la direction est perpendiculaire aux pales.

ρ : densité de l'air (fonction de la pression et de la température du site). Sa valeur typique dans les conditions standards (1 atm et 20°C) est 1.20 kg/m^3 .

A : Surface balayée par la voilure de l'éolienne

En générale on définit la densité de puissance par unité de surface par :

$$P(v) = \frac{p_v}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{I.6})$$

La densité de puissance moyenne par unité de surface, peut se mettre alors sous la forme suivante :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho \overline{v^3} \quad (\text{I.7})$$

Généralement, il existe deux façons pour estimer la densité de puissance dans le site ; la première est basée sur les données mesurées et la seconde sur la fonction de densité de probabilité $f(v)$.

a- Première méthode

En utilisant la moyenne arithmétique, la densité de puissance moyenne par unité de surface est donnée par la relation suivante :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_i v_i^3 \quad (\text{I.8})$$

Où ρ_i et v_i sont respectivement la densité de l'air et la vitesse du vent mesurées à l'instant i , et N le nombre total des mesures effectuées dans une période de temps donnée[19].

b- Deuxième méthode

En fonction de la densité de probabilité $f(v)$, la densité de puissance par unité de surface peut s'écrire :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty v^3 f(v) dv \quad (\text{I.9})$$

ρ supposée constante.

4-7 Variation spatiale de la vitesse de vent

On distingue entre la variation verticale de la vitesse du vent et la variation de la direction du vent :

4-7-1 Variation verticale de la vitesse de vent

Appelée communément loi de cisaillement, est une équation permettant de calculer à partir d'une vitesse de vent connue, la vitesse de vent à une altitude différente, en générale plus élevée. Plusieurs lois de cisaillement sont citées en littérature. Les deux lois couramment utilisées dans le monde de l'éolien sont : la loi de cisaillement faisant appel à un facteur de puissance α et la loi de cisaillement utilisant la rugosité z_0 .

a- Loi de cisaillement faisant appel à un facteur de puissance α

Elle est donnée par la relation :

$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (\text{I.10}) \quad \text{où :}$$

z_1 : en m, est la hauteur de l'observation de la vitesse du vent v_1 (m/s)

z_2 : en m, est la hauteur à laquelle on veut estimer la vitesse du vent v_2 (m/s);

α : est un facteur de puissance dont la valeur varie généralement entre 0,1 et 0,25

b- Loi de cisaillement utilisant la rugosité z_0

Elle est définie par :

$$v_2 = v_1 \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)} \quad (\text{I.11}) \quad \text{où :}$$

z_2 : est l'altitude en m à laquelle on désire calculer la vitesse du vent v_2 ;

z_1 : l'altitude de référence en m où la vitesse v_1 est mesurée;

z_0 : est un paramètre physique appelé rugosité (en m) définissant la rugosité du terrain qui est fonction du relief et des constructions entourant le site (**tableau I.4**).

Classes de rugosité	$z_0(m)$	Description
0	0,0002	Surface d'eau
0,5	0,0024	Terrain complètement dégagé avec une surface lisse, par exemple une piste d'atterrissage en béton ou de l'herbe fraîchement coupée
1	0,03	Terrain agricole dégagé, sans clôtures ou haies vives et avec très peu de constructions, seulement des collines doucement arrondies
1,5	0,055	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 1250 m les unes des autres
2	0,1	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 500 m les unes des autres
2,5	0,2	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 250 m les unes des autres
3	0,4	Villages, petites villes, terrain agricole avec de nombreuses ou de hautes haies vives, des forêts et un terrain très accidenté
3,5	0,8	Grandes villes avec de hauts immeubles
4	1,6	Très grandes villes avec de hauts immeubles et des gratte-ciel

Tableau I.4: Tableau des classes et longueurs de rugosité z_0

4-7-2 Rose des vents

La rose des vents est une représentation des différentes directions géographiques. Elle est divisée soit en 8, 12, 16 ou 32 secteurs qui représentent les différentes directions (**Fig. I.11**).

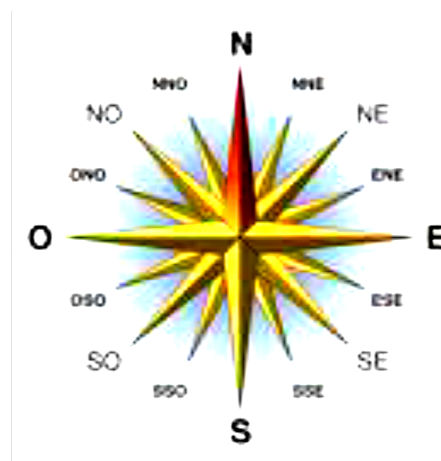


Figure I.11 Rose des vents

Sur la rose des vents on peut représenter simultanément trois informations concernant le vent en l'occurrence : la fréquence, la vitesse moyenne et la vitesse cubique moyenne (donc puissance éolienne disponible sur le site) pour chaque direction (**Fig. I.12**). La direction du vent sur un site donné est indiquée en générale dans le même tableau regroupant les données du module de la vitesse de vent (**Tab I.3**)

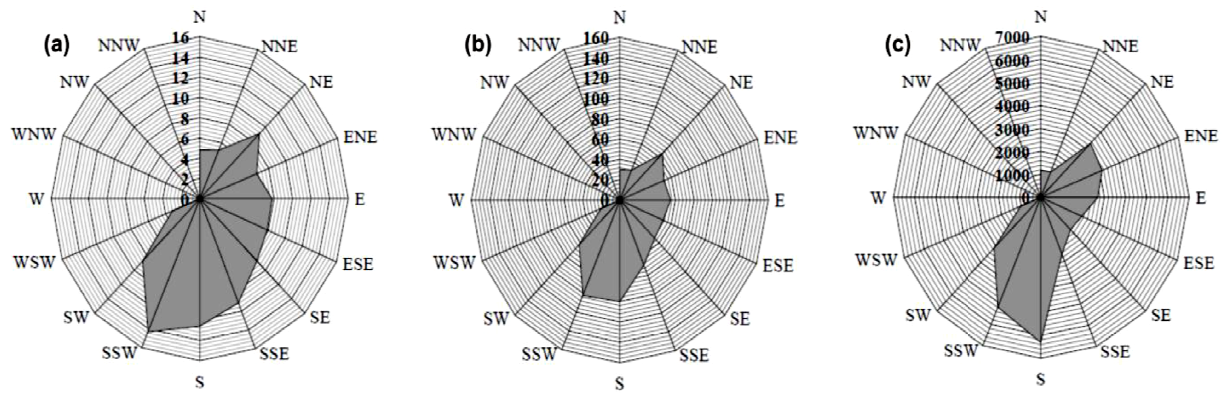


Figure I.12 : Roses des vents à 16 directions, illustrant la distribution de la fréquence, la vitesse et l'énergie pour différentes directions.

Conclusions

Pour mieux cerner les phénomènes régissant le vent un ensemble de paramètres ont été définis ; en l'occurrence la vitesse du vent et sa direction, la fonction de densité de probabilité (pdf) $f(v)$, ainsi que la fonction de probabilité cumulée correspondante $F(v)$, la vitesse moyenne (mensuelle, saisonnière ou annuelle) et la vitesse cubique moyenne, puisque la densité de puissance moyenne disponible sur le site étudié y est proportionnelle.

Chapitre II

**LOIS MATHÉMATIQUES MODÉLISANT
LA DISTRIBUTUION DES VITESSES DE
VENT ET METHODES NUMÉRIQUES
D'AJUSTEMENT**

II-1 Distributions statistiques des fréquences du vent

En plus de la moyenne conventionnelle de la moyenne arithmétique, il existe d'autres méthodes statistiques pour la modélisation des distributions statistiques de la vitesse du vent tel que la loi de Weibull (classique), la loi de Weibull hybride, la loi de Rayleigh et la fonction Gamma, etc.

II-1-1 Distribution de Weibull

La distribution de Weibull (qui porte le nom du physicien suédois Weibull, qui le premier en 1930 la appliqua en étudiant la fatigue des matériaux) fournit une bonne approximation de plusieurs lois de probabilité. Pendant un certain temps elle fut utilisée pour représenter la distribution de la vitesse du vent appliquée dans des études de la charge du vent. Au cours des dernières années, la plus grande attention fut axée sur cette méthode pour des applications de l'énergie éolienne non seulement en raison de sa plus grande flexibilité et simplicité, mais aussi parce qu'elle peut s'adapter le mieux aux données expérimentales.

La fonction de Weibull permet de caractériser la distribution fréquentielle des vitesses de vent sur une période donnée (un mois, une saison ou une année). Elle se présente comme une représentation mathématique simplifiée, décrite à l'aide de deux paramètres. Cette fonction se révèle d'une grande utilité pour calculer l'énergie qu'on peut récupérer de la puissance utilisable et estimer les vents à différentes hauteurs au dessus du sol et pour la prise de décision concernant le choix adéquat du site d'implantation des projets éoliens.

La fonction de distribution de probabilité de Weibull à deux paramètres ; $f(v)$ est une fonction de densité de probabilité sous la forme [18,21, 22]:

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

$f(v)$: la fonction de densité de probabilité de Weibull. Elle exprime la probabilité d'observer la vitesse v du vent;

k : le facteur de forme de la loi de Weibull (sans dimension);

c : le facteur d'échelle de la loi de Weibull (m/s).

Les paramètres k et c définissent la forme et l'échelle de la courbe de Weibull, ils ont des influences sur la distribution statistique des vitesses du vent. Une valeur élevée de k implique une distribution étroite, son maximum augmente et il est décalé vers la droite avec des vitesses de vent concentrées autour d'une valeur (moyenne), par contre si k est faible, il conduit à des vents largement dispersés. La **Figure II.1** illustre la variation du facteur d'échelle k avec une valeur constante du facteur de forme c pour une distribution de Weibull.

Le facteur d'échelle c est directement relié à la vitesse moyenne du vent par la relation suivante [17,18] :

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (\text{II.2}) \quad \text{où :}$$

\bar{v} : la vitesse moyenne du vent ;

$\Gamma(n)$: la fonction gamma donnée par la forme intégrale suivante:

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1} \exp(-x) dx \quad (\text{II. 3}) \quad \text{où :}$$

$$n = 1 + 1/k \quad (\text{II.4})$$

Pour une valeur fixe de k , l'augmentation de la valeur de c représente une augmentation de la valeur moyenne de la vitesse du vent. Donc, le facteur d'échelle ajuste la courbe à l'histogramme des fréquences, sa valeur est élevée pour les sites venteux et faible pour les sites de vent faibles[20]. Un exemple illustratif est représenté sur la **Figure II.2**

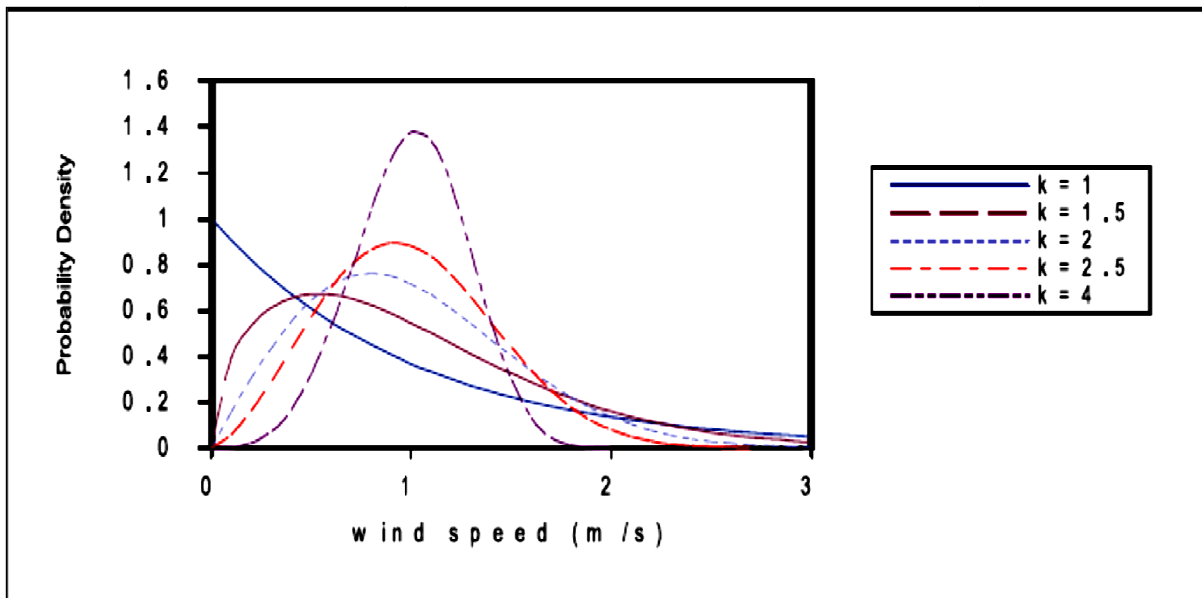


Figure II.1: Variation de la densité de distribution de Weibull en fonction de la vitesse du vent pour une valeur constante de c

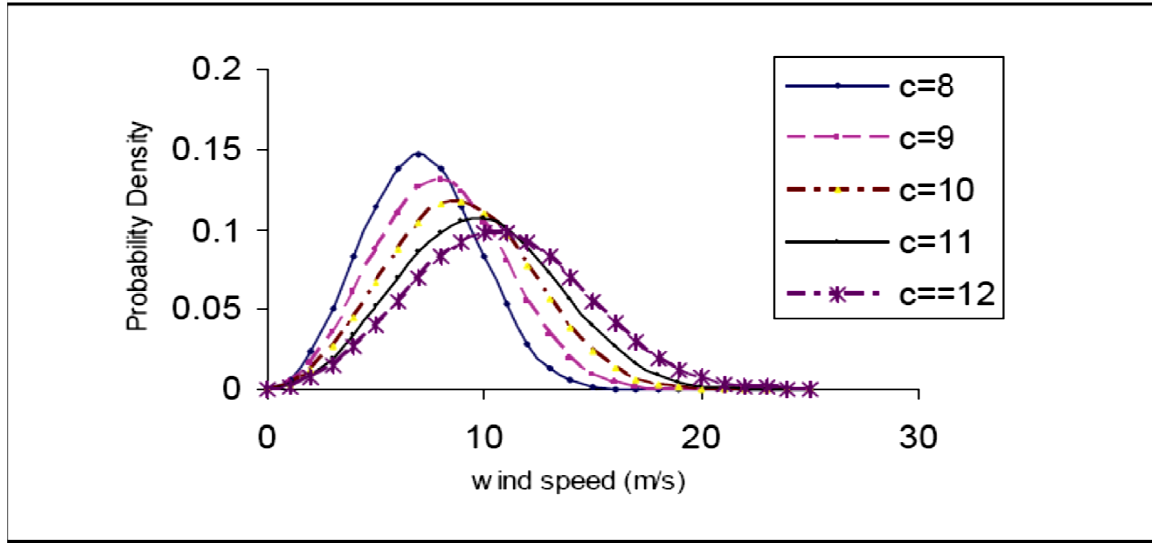


Figure II.2: Variation de la densité de distribution de Weibull en fonction de la vitesse du vent pour une valeur constante de k

La fonction de distribution cumulative correspondante est donnée par [18,21, 22] :

$$F(v) = \int_0^{\infty} f(v)dv \quad (\text{II.5})$$

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (\text{II.6})$$

La fréquence cumulative $F(v)$ représente la probabilité d'avoir une vitesse de vent inférieure ou égale à v . On en déduit que la fréquence avec laquelle la vitesse du vent sera dans un certain intervalle (donc la probabilité de cet incident) est déterminée par l'intégration de la fonction de densité de probabilité dans l'intervalle approprié :

$$F(v_1 \leq v \leq v_2) = \int_{v_1}^{v_2} f(v)dv = \exp \left[- \left(\frac{v_1}{c} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{v_2}{c} \right)^k \right] \quad (\text{II.7})$$

De même la probabilité pour que la vitesse de vent soit supérieure à une certaine valeur v_0 de la vitesse, qui peut être la vitesse de démarrage d'un aérogénérateur sera calculée par :

$$F(v \geq v_0) = \int_{v_0}^{\infty} f(v)dv = \exp \left[- \left(\frac{v_0}{c} \right)^k \right] \quad (\text{II.8})$$

Remarque:

La fonction de distribution de Weibull est un cas particulier de la distribution gamma généralisée, elle peut être réduite en deux autres distributions théoriques ; la distribution exponentielle ($k=1$) et la distribution de Rayleigh ($k=2$). Ce cas particulier de la loi de Weibull est appelé loi de Rayleigh.

II-1-2 Distribution de Weibull hybride

La loi de Weibull hybride ou modifiée est utilisée pour caractériser les sites dont les fréquences de vents calmes sont très importantes (plus de 15 à 20 %). Elle a donc une influence significative sur la répartition des vitesses de vent et donc sur la caractérisation du site. En effet, la loi de Weibull classique ne permet pas de prendre en considération les vents calmes et c'est pour cette raison on a souvent recours à la distribution de Weibull modifiée définie selon l'équation suivante [17] :

$$f(v) = \begin{cases} F_0; & v = 0 \\ (1 - F_0) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right); & v > 0 \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

avec F_0 étant le pourcentage de vitesses nulles.

II-1-3 Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh se déduit directement de la loi de Weibull en prenant le paramètre de forme k égale à 2. La distribution cumulative de la loi de Rayleigh sera alors donnée par la relation suivante [21]:

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \quad (\text{II.10})$$

La fonction de densité de probabilité correspondante est donnée par :

$$f(v) = \frac{2v}{c^2} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \quad (\text{II.11})$$

L'avantage principal de la loi de Rayleigh réside dans sa simplicité. Par définition elle utilise un paramètre de forme $k = 2$. De ce fait, la loi de Rayleigh ne dépend plus que de la valeur moyenne de la vitesse du vent sur le site. Cependant, le principal désavantage de cette loi

est lié à l'utilisation du paramètre de forme k fixé à 2, car elle ne permet pas de s'adapter au mieux au régime réel du vent rencontré sur le site étudiée.

II-2 Méthodes d'ajustements

L'estimation des deux paramètres k et c de la loi de Weibull permet de caractériser la distribution statistique des vitesses de vent sur une période donnée, et par conséquent d'estimer la production d'énergie éolienne.

Il existe plusieurs méthodes pour détermination les coefficients k et c de la distribution de Weibull ajustée à des données brutes de la vitesse de vent prises sur une période déterminée. Ci-dessous sont citées les méthodes les plus utilisées dans ce but:

II-2-1 Méthode de la vitesse moyenne et de l'écart type

La méthode de la vitesse moyenne et de l'écart type appelée aussi **la méthode des moments** a été proposée par Justus et all [25] Si la vitesse moyenne \bar{v} et l'écart type σ sont connus, le facteur de forme k et le facteur d'échelle c sont déterminés par les équations suivantes [18,23, 24]:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,090} \quad \text{avec } 1 \leq k \leq 10 \quad (\text{II.12})$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+\frac{1}{k})} \quad \text{où:}$$

Γ : la fonction Gamma donnée par l'équation (II.3) ;

\bar{v} : la vitesse moyenne du vent exprimée par la relation (I.3) ;

σ : l'écart type de la distribution de la vitesse du vent estimé par la relation:

$$\sigma = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v}) f(v_i) \quad (\text{II.13})$$

II-2-2 Méthode graphique

La méthode graphique appelée aussi méthode des moindres carrée est la méthode la plus simple. Elle est basée sur la fonction cumulative de Weibull, en la transformant sous la forme suivante [18, 22,25]:

$$\ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln(v) - k \ln(c) \quad (\text{II.14})$$

La vitesse étant connue, on peut connaître k et c par régression linéaire. En utilisant la méthode des moindres carrés qui consiste à ajuster les points expérimentaux à travers la relation :

$$y = ax + b \quad (\text{II.15})$$

où :

$$y = \ln(-\ln(1 - F(v))) \quad (\text{II.16})$$

$$x = \ln(v) \quad (\text{II.17})$$

En suite et par identification on trouve que :

$$k = a \quad \text{et} \quad (\text{II.18})$$

$$c = \exp(-b/a) \quad (\text{II.19})$$

Cette méthode présente deux inconvénients :

- elle n'est pas applicable si on tient compte de la vitesse nulle ($\ln(v) = 0$) est indéterminée).
- la valeur de y correspondant à la valeur maximale de la vitesse du vent est indéterminée car

$$\ln(1 - F(v_{max})) = \ln(0).$$

Pour éliminer ces indéterminations, on ne tient compte que du nombre de lecture des vitesses du vent non nulles et en négligeant la probabilité d'avoir $v = v_{max}$.

II-2-3 Méthode du Facteur d'énergie (Energy pattern factor method)

C'est une méthode récente suggérée par Akdag Ali(2009) [26]. Elle est liée aux valeurs moyennes des données de la vitesse de vent. C'est une méthode de formulation simple, facile à exécuter et nécessite moins de calcul. La méthode est définie par les équations suivantes :

$$E_{pf} = \frac{\bar{v}^3}{\bar{v}^3} = \frac{\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (\text{II.20})$$

$$k = 1 + \frac{3,69}{E_{pf}^2} \quad (\text{II.21})$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (\text{II.22})$$

Le facteur d'énergie du vent (E_{PF}) s'exprime comme le rapport entre la valeur moyenne de la vitesse au cube du vent et la vitesse moyenne du vent élevée à la puissance trois, selon la relation suivante [18]:

$$E_{PF} = \frac{\overline{v^3}}{\bar{v}^3} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^3}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i\right)^3} \quad (\text{II. 23}) \quad \text{où :}$$

N : nombre de données de vitesses de vent non nulles ;

$\overline{v^3}$: la moyenne de la vitesse au cube du vent donnée par l'équation (I.4);

\bar{v}^3 : vitesse moyenne du vent au cube;

v_i : vitesse du vent non nulle observée ;

Une fois le facteur d'énergie est calculée comme indiquée précédemment les deux paramètres k et c de la distribution de Weibull peuvent être déterminé approximativement par les deux équations (II.21) et (II.22)

II-2-4 Méthode du maximum de vraisemblance (MLM)

La méthode du maximum de vraisemblance est une méthode itérative utilisée pour déterminer le paramètre de forme k . Sa valeur est définie à l'aide de la formule suivante [18,22] :

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^N v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^N v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(v_i)}{N} \right)^{-1} \quad (\text{II.24})$$

avec :

v_i : La vitesse observée non nulle du vent;

N : Nombre des données des vitesses non nulles du vent.

k : Paramètre de forme à déterminer par calcul itératif en prenant une valeur initiale de $k = 2$

Ensuite, on détermine la valeur du paramètre d'échelle c à l'aide de la formule suivante [22] :

$$c = \left(\frac{\sum_{i=1}^N v_i^k}{N} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (\text{II.25})$$

Cette méthode est très utilisée mais elle a, cependant, un inconvénient majeur qui est la nécessité d'utiliser des vitesses de vent non nulles. En effet, pour les sites où la probabilité d'avoir des vitesses de vent nulles est importante, cette méthode risque de donner des résultats peu réalistes.

II-2-5 Méthode du maximum de vraisemblance modifiée (MMLE)

Lorsque les données de vitesses de vent sont disponibles sous forme fréquentielle, une variante de la méthode MLM peut être utilisée. Cette méthode est nommée : méthode de **maximum de vraisemblance modifiée** (MMLE). Le principe de cette méthode est le même et il est basé sur les relations suivantes [18,22 et 25] :

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^N v_i^k \ln(v_i) f(v_i)}{\sum_{i=1}^N [v_i^k f(v_i)]} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(v_i) f(v_i)}{f(v \geq 0)} \right)^{-1} \quad (\text{II.26})$$

$$c = \left(\frac{1}{f(v \geq 0)} \sum_{i=1}^N [v_i^k f(v_i)] \right)^{\frac{1}{k}} \quad (\text{II.27})$$

k est le paramètre de forme à déterminer par calcul itératif en prenant une valeur initiale de $k = 2$;

v_i est la vitesse observée du vent;

$f(v \geq 0) = 1$, est la probabilité que la vitesse de vent soit égale ou supérieure à zéro;

$f(v_i)$, est la probabilité d'avoir la vitesse de vent v_i .

II-3 Implémentation des calculs et résultats

Pour valider les méthodes d'ajustement nous avons choisis deux sites : Eindhoven ; une ville néerlandaise, située dans la province du Brabant-Septentrional et Valkenburg (en français : Fauquemont) ; une autre ville néerlandaise, située au sud de la province de Limbourg. Le choix est justifié par la disponibilité gratuite des données de la vitesse de vent. Les données sont extraites du site web [27]. Elles sont étalées sur une année (voir format des données dans le tableau III chapitre I). Les vitesses du vent sont triées dans un ordre croissant, puis réparties sur des classes qui sont des intervalles de longueur $1m/s$ allant de $0m/s$ jusqu'à la vitesse maximale mesurée. On calcule les fréquences relatives d'occurrence des vitesses de chaque classe. On trace ensuite un histogramme représentant la fréquence relative en fonction de la classe. L'histogramme ainsi obtenu illustre la densité de probabilité des classes de vitesses dans la période choisie (mois, saison ou année). Pour modéliser la distribution des vitesses de vent on a sélectionnée parmi plusieurs lois de probabilité la loi de Weibull à deux paramètres : le paramètre de forme k (sans dimension) et le paramètre d'échelle (m/s) , car elle est plus flexible donc ajustable à la distribution réelle et plus simple car elle dépend uniquement de deux paramètres [28]

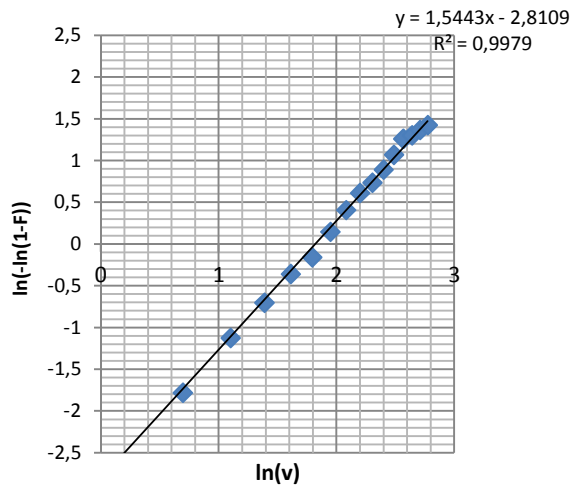
L'ajustement de la courbe de Weibull par conséquent, passe obligatoirement par la détermination de k et c . Dans les calculs qu'on a effectué, nous avons choisis deux méthodes d'ajustement ; en l'occurrence la méthode graphique et la méthode de l'écart type (méthode des moments) exposées plus haut (paragraphe II-2-1). Les résultats et les graphes obtenus sont cités ci-dessous.

II-3-1 Calcul de k et c par la méthode graphique pour le site de Valkenburg

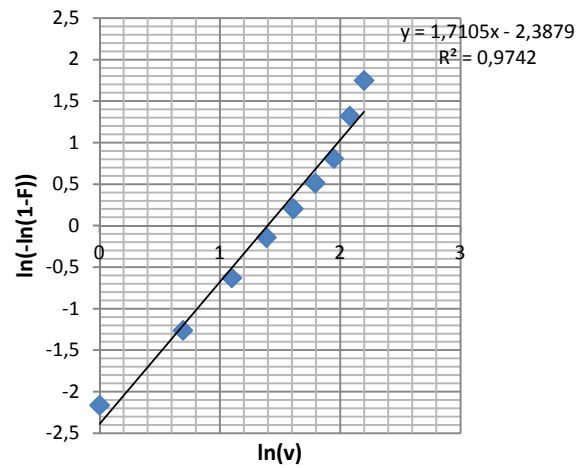
Dans une feuille de calcul Excel et après l'insertion des classes de vitesses et les fréquences correspondantes (relatives et cumulées), on a implémenté le calcul de $y = \ln(-\ln(1 - F(v)))$ et de $x = \ln(v)$ (**Tableau II.1**). Par une régression linéaire le nuage de points obtenu est représenté par une droite. Les valeurs de k et c sont déduites directement de la pente de la droite et de son ordonnée à l'origine. Sur la **Figure II.3 (a, b, c, d et e)** sont illustrées les droites de régression et les nuages de points correspondant, pour les quatre saisons (hiver, printemps, été et automne) et de l'année 2005 toute entière. On voit que la régression est excellente et le calcul de R^2 (coefficient d'estimation de l'erreur) le confirme, puisque il est très proche de l'unité. Néanmoins l'influence du point singulier du nuage qui représente la valeur de y à l'origine reste significative pour les valeurs de k et c . Les valeurs de k , c et V_{moy} saisonnières et annuelles calculées sont regroupées dans le **Tableau II.2**.

classe	v	f relative	F cumulée	1-F cumulée	$\ln(-\ln(1-F))$	$\ln(v)$
0—1	1	0,01567	0,01567	0,98433	-4,14812058	0
1—2	2	0,11589	0,13156	0,86844	-1,958592772	0,693147 18
2—3	3	0,18659	0,31815	0,68185	-0,959862371	1,098612 29
3—4	4	0,21634	0,53449	0,46551	-0,268374077	1,386294 36
4—5	5	0,17424	0,70873	0,29127	0,209859392	1,609437 91
5—6	6	0,11395	0,82268	0,17732	0,548005372	1,791759 47
6—7	7	0,07791	0,90059	0,09941	0,836599075	1,945910 15
7—8	8	0,04473	0,94532	0,05468	1,066866091	2,079441 54
8—9	9	0,02723	0,97255	0,02745	1,279652222	2,197224 58
9—10	10	0,01316	0,98571	0,01429	1,446494254	2,302585 09
10—11	11	0,00686	0,99257	0,00743	1,589690085	2,397895 27
11—12	12	0,00423	0,9968	0,0032	1,748261061	2,484906 65
12—13	13	0,0016	0,9984	0,0016	1,862179356	2,564949 36
13—14	14	0,00137	0,99977	0,00023	2,125541334	2,639057 33

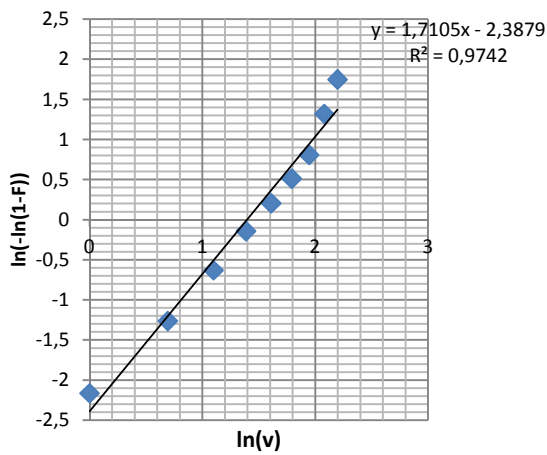
Tableau II.1: Tableau Excel pour calculer k et c par la méthode graphique



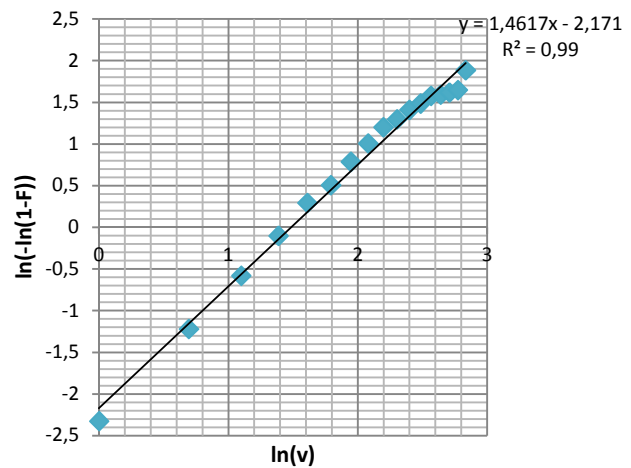
(a)-hiver



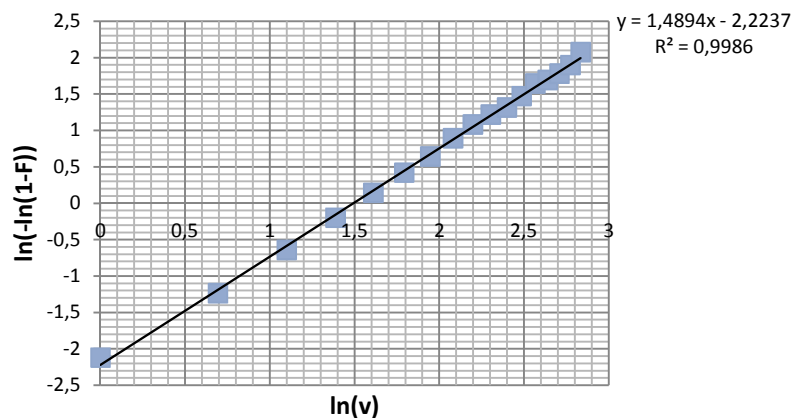
(b)-printemps



(c)-été



(d)-automne



(e)-année (2005)

Figure II.3 : Droites de régression linéaire servant à déterminer les valeurs de k et c saisonnières et annuelle pour le site de Valkenburg (méthode graphique)

	hiver	printemps	été	automne	année(2005)
$V_{moy} (m/s)$	5,55	3,59	3,12	4,38	4,02
k	1,54	1,71	1,53	1,46	1,48
$c(m/s)$	6,17	4,03	3,46	4,84	4,45

Tableau II.2: Valeurs saisonnières et annuelles de la vitesse moyenne et des paramètres k et $c(m/s)$ à 10m pour le site de Valkenburg ajustées par la méthode graphique

II-3-2 Calcul de k et c par la méthode des moments pour le site de Valkenburg

Cette méthode nécessite le calcul de la vitesse moyenne et l'écart type à partir de la série de données de la vitesse du vent. Dans le **Tableau II.3** on trouve les valeurs calculées des deux paramètres k et c pour les quatre saisons et l'an 2005 :

	hiver	printemps	été	automne	année(2005)
k	1,98	1,96	1,91	1,83	1,78
$c(m/s)$	7,04	5,22	4,56	5,31	5,53

Tableau II.3: Valeur de k et c saisonnière et annuelle estimée par la méthode des moments pour le site de Valkenburg

Les valeurs de k et c calculées par les deux méthodes nous a permis de déterminer les fonctions de densité de probabilité de Weibull correspondantes. Sur la **Figure II.4** sont illustrées les histogrammes des fréquences empiriques des vitesses de vent et les courbes de Weibull ajustées à ces histogrammes (saisonnière et annuelle). La figure montre bien que qualitativement il y a une bonne concordance entre les deux. Cependant, pour mieux estimer les erreurs d'ajustement, des tests doivent être effectués pour analyser la précision des deux méthodes (RMSE, R^2 , χ^2 , etc....)

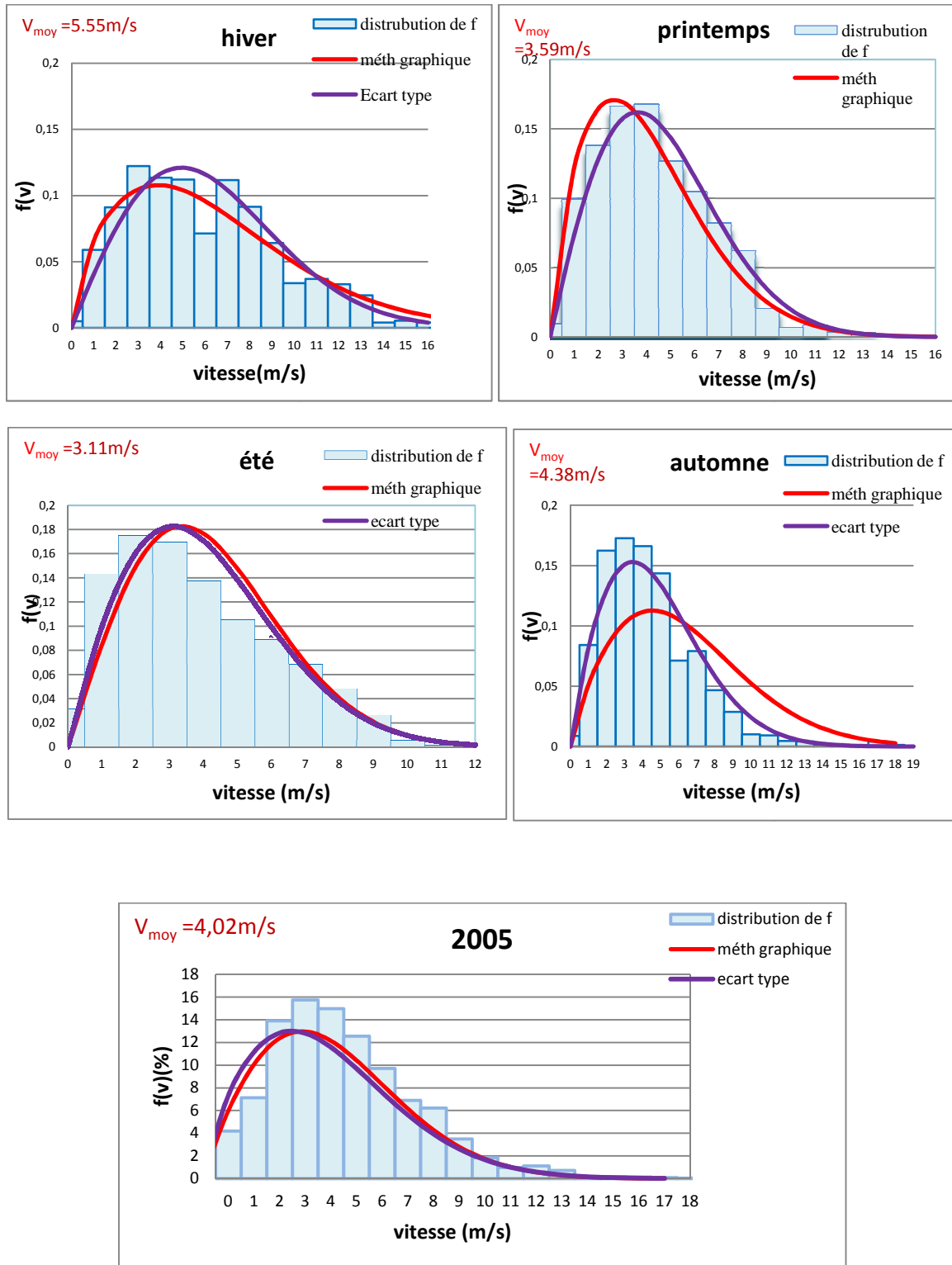


Figure II.4: Histogrammes des vitesses annuelles et saisonnières ajustés par la distribution de Weibull par deux méthodes à 10m du sol pour le site de Valkenburg.

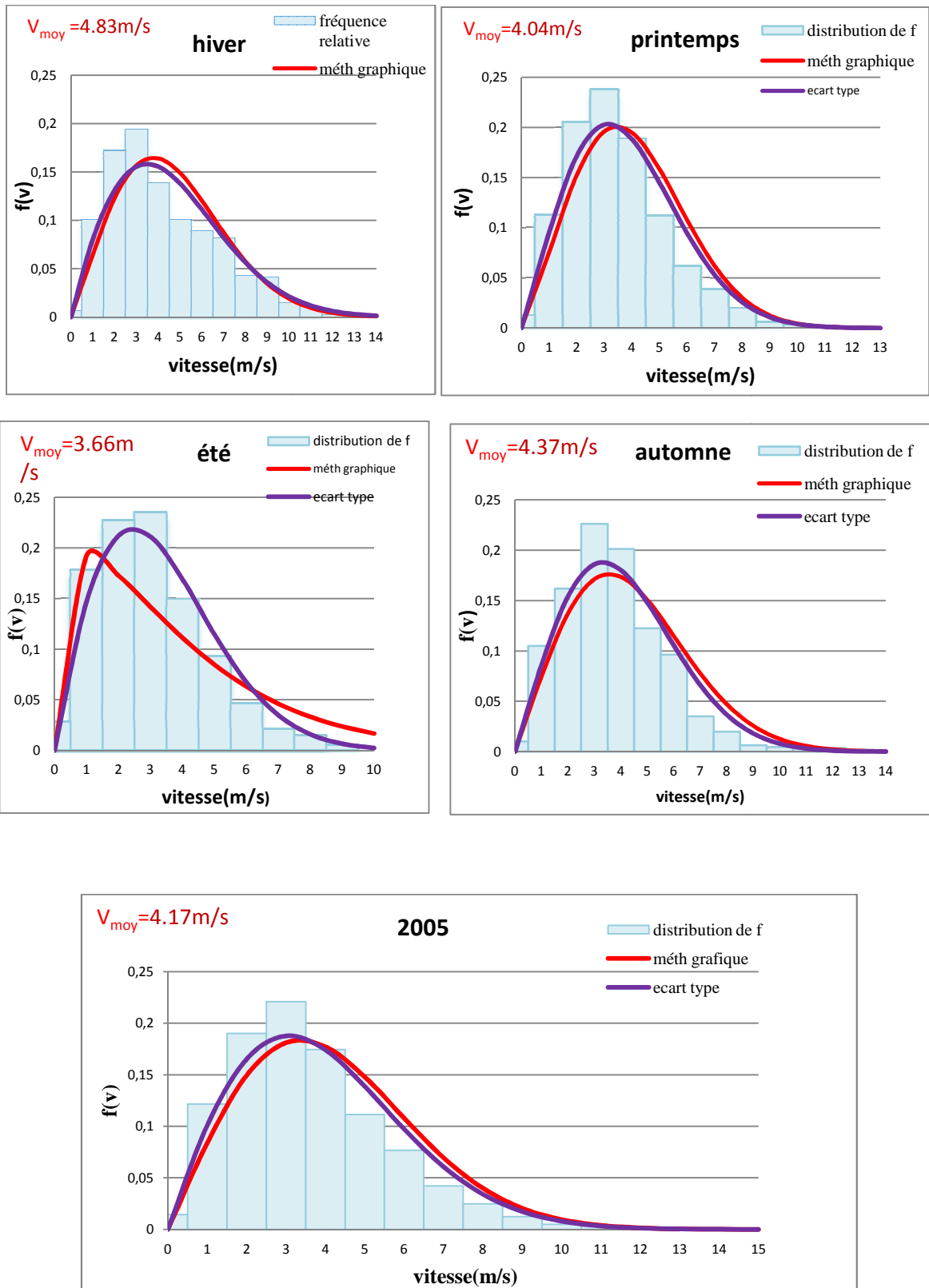


Figure II.5: Histogrammes des vitesses annuelles et saisonnières ajustés par la distribution de Weibull par les deux méthodes à 10m du sol pour le site d'Eindhoven.

L'étude du site d'Eindhoven par les deux méthodes a mené aux résultats enregistrés sur le **Tableau II.4** et **II.5** qui comprennent les valeurs saisonnières et annuelles de la vitesse moyenne et des deux paramètres de Weibull k et c . On constate Une légère différence entre les deux méthodes, mais qualitativement on voit que les valeurs de k et c par la méthode des moments est plus réaliste.

Une comparaison entre les quatre saisons pour les deux sites Valkenburg et Eindhoven indique que l'hiver est la saison la plus ventée avec une vitesse moyenne de 5,55m/s et 4,83m/s respectivement, cependant l'été est la moins venté, avec des vitesses moyennes de 3,12m/s et 3,66m/s respectivement. Le profil de la vitesse pour Eindhoven apparait légèrement plus élevé que celle de Valkenburg.

La valeur du paramètre de forme k sur le site d'Eindhoven est plus élevée que sa valeur sur le site de Valkenburg. Ce fait peut être interprété par des vents plus stables à Eindhoven.

Pour estimer le pourcentage de vitesses supérieures à un certain seuil v_0 , qui désigne en générale la vitesse de démarrage d'un aérogénérateur, on utilise la fonction cumulative de Weibull donnée par l'équation (II.8). La vitesse de démarrage v_0 est en générale indiquée parmi les caractéristiques opérationnelles dans la fiche technique de l'éolienne qu'on veut installer. À titre d'exemple, la vitesse de démarrage de l'éolienne Enercon E-82 E2 2.300 est de 3,0m/s. si le moyeu de l'éolienne se trouve à une hauteur de 80m, alors la vitesse v_1 du vent à 10m qui correspond 3,0m/s , peut se calculer par la relation (I.10) ou par (I.11) avec une longueur de rugosité $z = 0,03m$ ou avec un coefficient de friction

$\alpha = 0,15$:

$$v_1 = v_0 \left(\frac{z_1}{z_0} \right)^\alpha = 2,20m/s$$

Les valeurs saisonnières et annuelles calculées de $F(v \geq v_1)$ pour les deux sites de Valkenburg et Eindhoven sont classées dans le **Tableau II.6**

	Hiver	printemps	été	automne	année(2005)
$V_{moy} (m/s)$	4,83	4,04	3,66	4,37	4,17
k	2,03	2,2	1,21	2,04	2,02
c	5,37	4,56	3,9	4,93	4,71

Tableau II.4: Vitesse moyenne et paramètres de Weibull saisonniers et annuels à 10m du sol pour le site d'Eindhoven (méthode graphique).

	hiver	printemps	été	automne	année(2005)
<i>k</i>	1,88	2,07	1,85	2,04	1,93
<i>c(m/s)</i>	5,22	4,32	3,75	4,62	4,47

Tableau II.5: paramètres de Weibull saisonniers et annuels à 10m du sol pour le site d'Eindhoven (méthode des moments).

	hiver	printemps	été	automne	année(2005)	
<i>F(v ≥ v₁)</i>	0,82	0,70	0,61	0,73	0,70	Valkenburg
	0,85	0,82	0,61	0,64	0,81	Eindhoven

Tableau II.6: Pourcentage des vitesses supérieures à la vitesse de démarrage

Les résultats du **Tableau II.6** confirme bien l'interprétation de la valeur de *k* pour les deux sites étudiés.

II-4 Conclusions

- Malgré le caractère intermittent du vent, la distribution des vitesses peut être modélisée par une loi de probabilité.
- La loi de Weibull est une loi de probabilité, qui par sa flexibilité et sa simplicité est ajustable à la distribution empirique des fréquences des vitesses de vent, grâce aux méthodes d'ajustement, qui permettent la détermination des deux paramètres de Weibull *k* et *c*, de sorte que la distribution calculée soit la plus proche de la réalité.
- Le profil de la vitesse du vent sur un site donné est interprété par les valeurs que prennent les deux facteurs de Weibull.

Power		Rotor	
Rated power	2,300.0 kW	Diameter	82.0 m
Cut-in wind speed	3.0 m/s	Swept area	5,281.0 m ²
Rated wind speed	12.0 m/s	Number of blades	3
Cut-out wind speed	34.0 m/s	Rotor speed, max	18.0 U/min
Survival wind speed	-	Tipspeed	77 m/s
Wind zone (DIBt)	III	Type	AERO E-82
Wind class (IEC)	IIa	Material	GFK
Generator		Manufacturer	Enercon
Type	Synchronous multi-pole		
Number	1.0	Power density 1	435.5 W/m ²
Speed, max	18.0 U/min	Power density 2	2.3 m ² /kW
Voltage	690.0 V	Tower	
Grid connection	IGBT	Hub height	78/85/98/108/138 m
Grid frequency	50.0 Hz	Type	Steel tube/Hybrid
Hersteller	Enercon	Shape	conical
		Corrosion protection	painted
		Manufacturer	Enercon

Tableau II.7 : Fiche technique de l'éolienne Enercon E-82 E2 2.300

CHAPITRE III
CARACTÉRISTIQUES DU GISEMENT
ÉOLIEN EN ALGÉRIE

III-1 Gisement éolien en Algérie

En l'Algérie, la ressource éolienne (vent) varie beaucoup d'un endroit à un autre suite à la variation topographie et climatique. En effet, L'Algérie se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes ; le nord et le sud. Le nord méditerranéen qui est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien. entre elles s'intercalent des plaines et des hauts plateaux de climat continental. Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que celles du nord, particulièrement le sud ouest avec des vitesses qui dépassent 4 m/s et la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar comme le montre la **Figure III.1**.

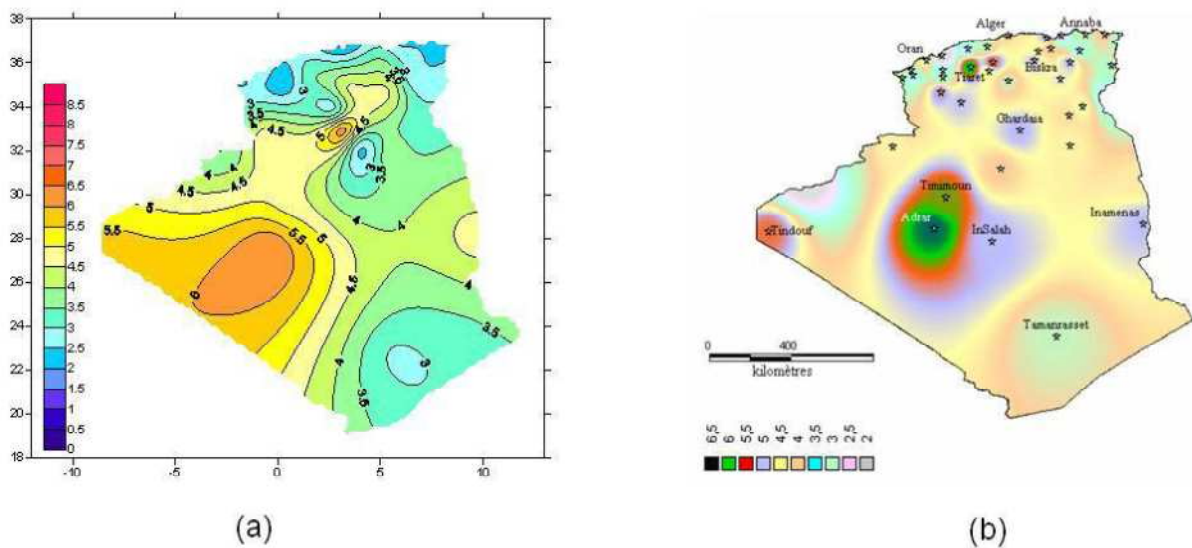


Figure III.1: Cartes annuelles des vents à 10m du sol

(a) Carte actualisée par Chellali et al.

(b) Carte réalisée par Kesbadji-Merzouk

Dans le nord, on constate globalement que la vitesse moyenne est peut élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud [29]. Le travail publié par M. A. Tabet Helal et N. Ghellai montre que la région de Benisaf présente un gisement éolien excellent; les vents soufflent d'une même direction, à des vitesses supérieures à 10 m/s très fréquents et constantes, ce qui fournit des puissances effectives élevées. Le potentiel énergétique éolien est disponible toute l'année, avec des maximum en hiver. La puissance effective énergétique moyenne annuelle pour une éolienne d'un mètre carré est d'environ de 860 Watt / m² [30]

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

Sur les atlas des vents saisonniers de l'Algérie illustrés sur la **Figure III.2** (été et printemps, hiver et automne), on remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année.

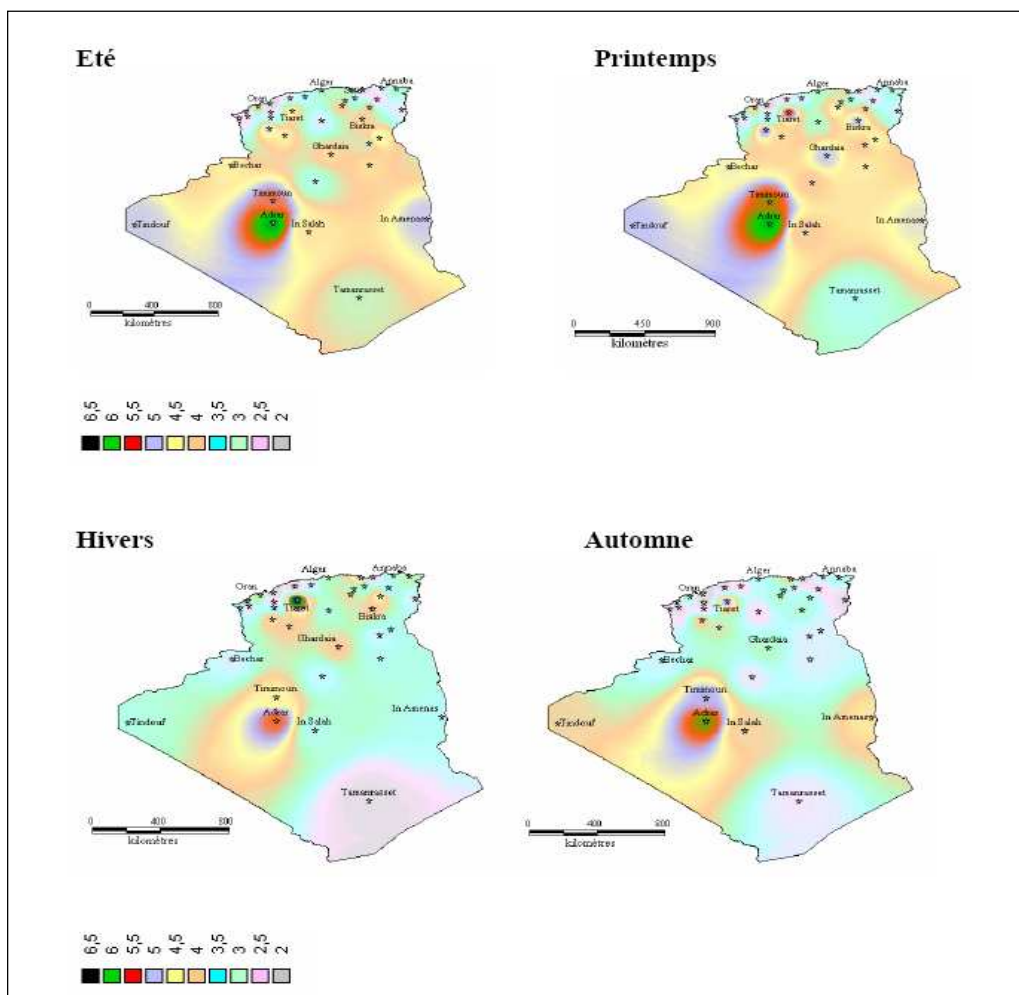


Figure III.2: Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (été et printemps, hiver et automne)

Toutefois, Une estimation du potentiel éolien ne doit pas se baser uniquement sur la vitesse moyenne de vent, mais aussi sur la distribution des vitesses au cours de l'année et les variations des paramètres caractérisant la distribution en fonction du lieu géographique. L'établissement d'un atlas éolien détaillé en Algérie est alors très indispensable pour mieux exploiter le gisement éolien national. Les premiers travaux dans ce sens remontent à 1984, les plus récents sont les travaux de N. Kasbadji Merzouk en 2000 [10] et de F. Chellali 2011[11]. Deux situations doivent être prises en considération lors de l'établissement d'un modèle de distribution des vitesses : Les sites avec un pourcentage des vents calmes supérieur à 15% et ceux avec un pourcentage inférieur à 15%.

Les Hauts plateaux sont généralement du premier groupe, ils sont balayés par des vents forts mais les fréquences calmes réduisent la vitesse moyenne à une moyenne annuelle de l'ordre de 3m/s. Ce groupe est représenté par les trois sites : Kasr-chellala, Msila et Tiaret. Les fréquences des vents calmes de ces trois sites sont 40%, 21% et 37% respectivement. La distribution hybride de Weibull est utilisée dans ce cas. Les paramètres de Weibull k et c et la vitesse moyenne sont donnés dans le **Tableau III.1** Les courbes de Weibull sont représentées sur la **Figure III.3**.

site	fréquence des vents calmes f_0 [%]	facteur d'échelle C [m/s]	facteur de forme k	Vitesse moyenne V [m/s]
Kasr-Chellala	40	7.7	2.34	3.9
M'sila	21	7.0	2.26	4.9
Tiaret	37	6.8	1.83	3.8

Tableau III.1: Les paramètres d'hybride Weibull et la vitesse moyenne, à 10m du sol.

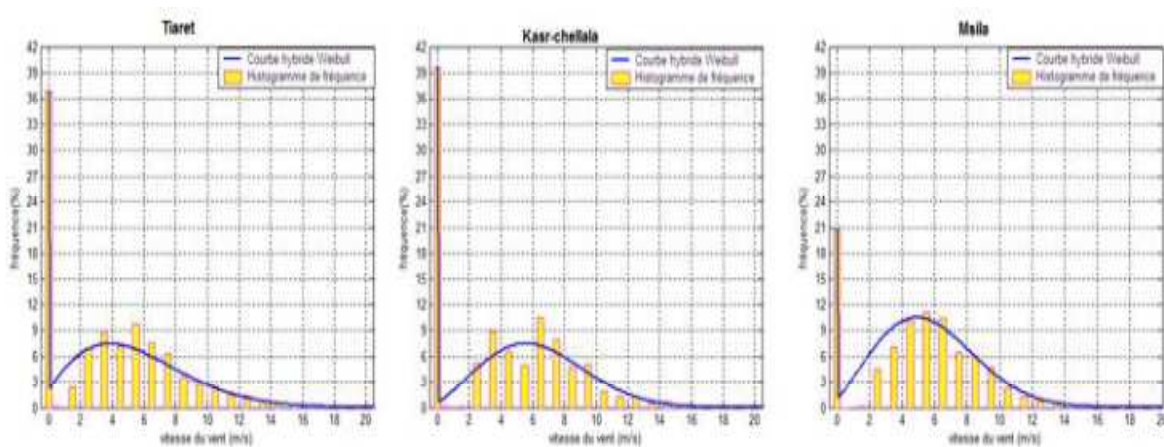


Figure III.3: Courbes d'Hybride Weibull et les histogrammes de fréquence, à 10 m du sol

L'analyse des facteurs d'échelle C , montre que le site Kasr-Chellala a la plus grande valeur de $C = 7.7\text{m/s}$, cependant, la fréquence des vents calmes qui est très importante de l'ordre de 40%, donne une vitesse moyenne de 3.9 m/s. Le site de M'sila est le plus venté avec un facteur C de 7m/s et une fréquence calme de l'ordre de 21%. Le site de Tiaret est le moins Venté avec un facteur C de 4.3m/s et une fréquence calme considérable de l'ordre de 37% [31].

Le deuxième groupe est constitué principalement par les sites côtiers. Oran, Bejaia et Annaba sont trois sites de ce groupe. Les paramètres de Weibull et la vitesse moyenne pour les trois sites

côtiers à 10m du sol sont donnés dans le **Tableau III.2**. La **Figure III.4** illustre les courbes de Weibull avec les histogrammes des fréquences correspondants à 10m du sol.

Site	facteur d'échelle C [m/s]	Facteur de forme k	Vitesse moyenne V [m/s]
Oran	4.9	1.84	4.4
Bejaia	4.8	2.64	4.2
Annaba	4.3	1.75	3.8

Tableau III.2: Les paramètres de Weibull et la vitesse moyenne, à 10m du sol.

La valeur du facteur de forme $k = 2.64$ pour Bejaia est maximale, ce qui montre que la distribution est la plus stable, alors que les deux autres sites ont un facteur k relativement faible, ce qui signifie que les vitesses de vent sont plus dispersées. Le site d'Oran est le plus venté avec $C = 4.9\text{m/s}$ [31].

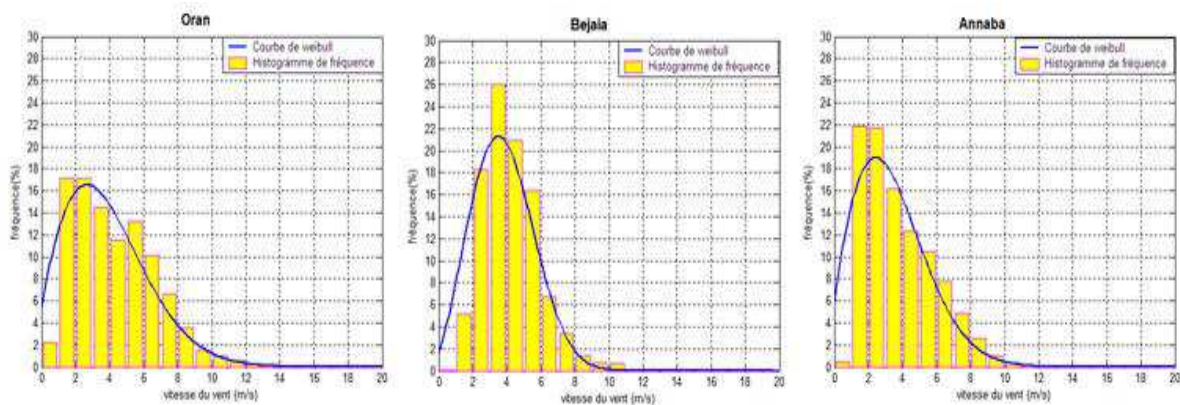


Figure III.4: Les courbes de Weibull et les histogrammes de fréquence, à 10m du sol.

III-2 Cartographie des microclimats de la vitesse moyenne de vent

Sur la **Figure III.5** sont reportées les évolutions de la vitesse moyenne de vent calculée à partir des paramètres k et c , avec un intervalle de 0.4 m/s , qui montre bien l'influence des caractéristiques du terrain (rugosité, orographie) sur la valeur de la vitesse. En effet, cette dernière varie de 3.8 à 6.2 m/s pour le site de Bordj Bou Arreridj, sur une région de 10 km^2 et est plus importante pour le site de Sétif, car elle oscille entre 2.4 et 6.8 m/s . Le même constat peut être fait pour les deux sites de Tlemcen et Oran de l'ouest.

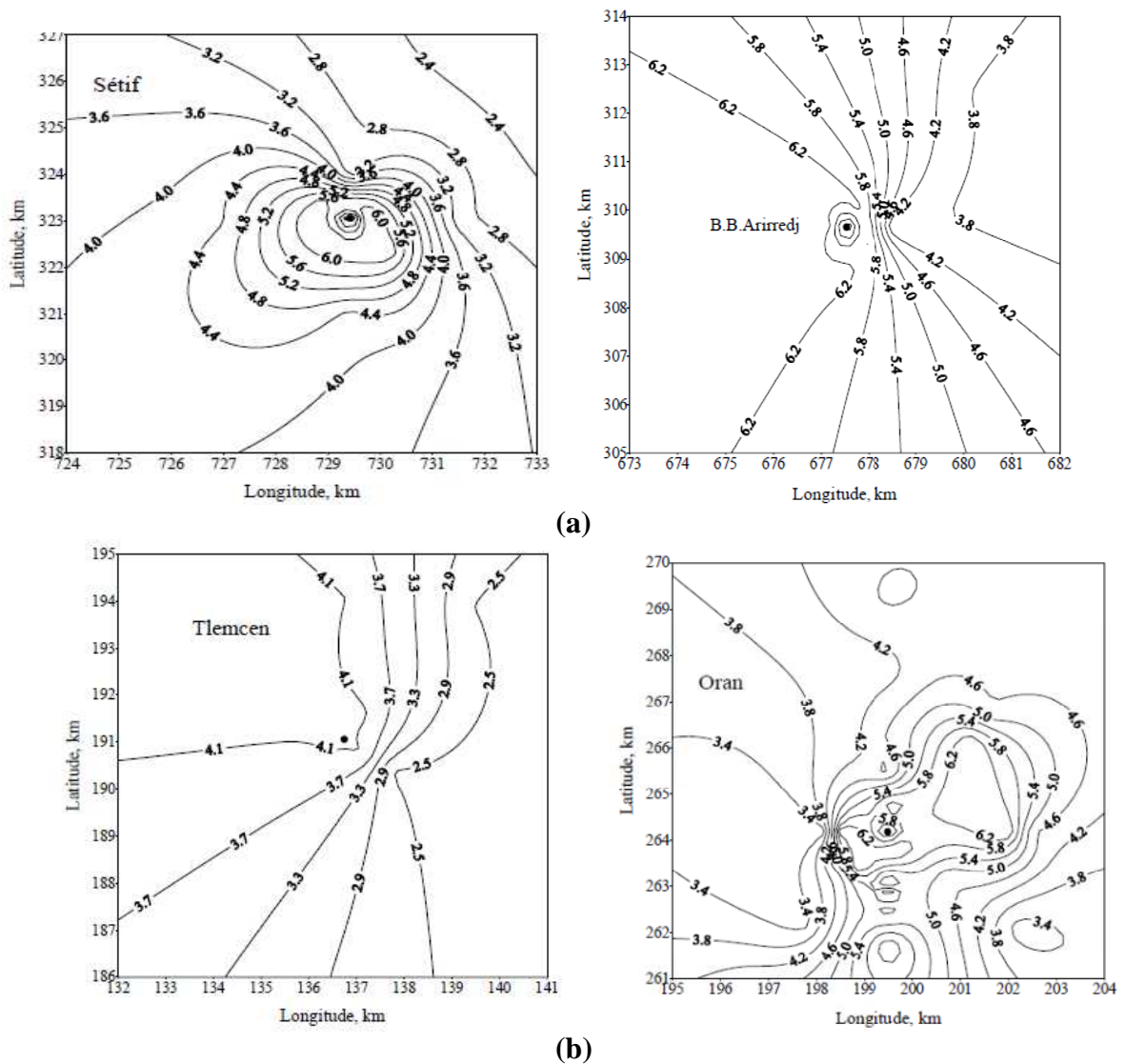


Figure III.5: cartographie des microclimats de la vitesse moyenne de vent pour les sites de Sétif et B.B.Arirredj à l'Est (a) et de Tlemcen et Oran à l'Ouest(b)

III-3 Cartographie des microclimats des paramètres k et c de Weibull

La Figure III.6 (a, b) illustre la variation des deux paramètres k et c en fonction de la longitude et de la latitude du site étudié. Une légère variation dans l'évolution du paramètre de forme k due à la faible gamme de variation des valeurs. En effet, il varie de 1.52 à 1.92 pour le site de Sétif. La valeur la moins élevée est recueillie à Tlemcen où elle est de l'ordre de 1.38. Pour le paramètre d'échelle c, le site de Sétif enregistre la variation la plus importante ; elle oscille entre la valeur de 2.8 et 7.2 m/s.

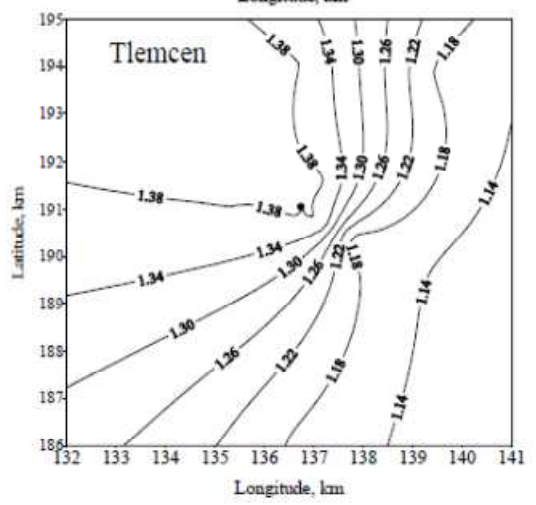
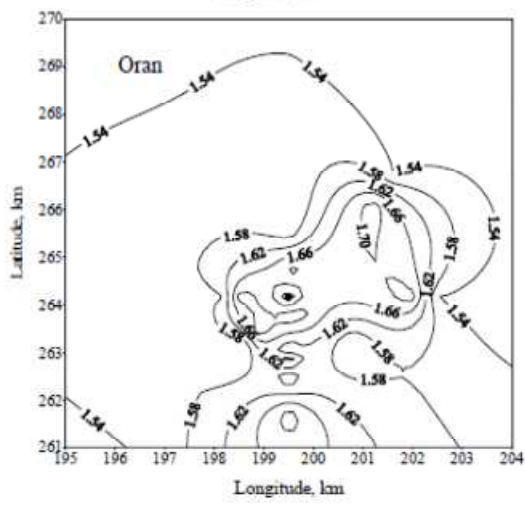
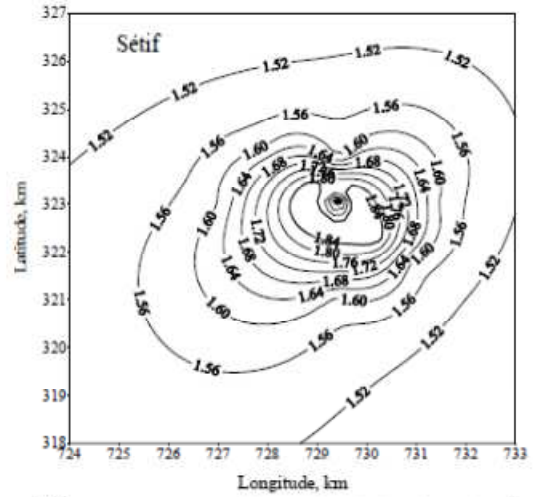
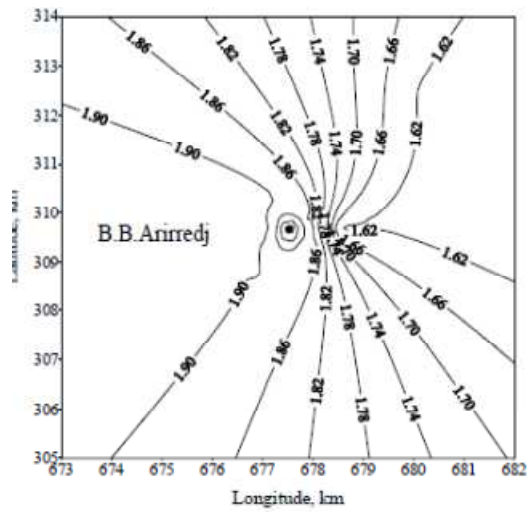


Figure III.6 (a): Cartographie du paramètre de forme k

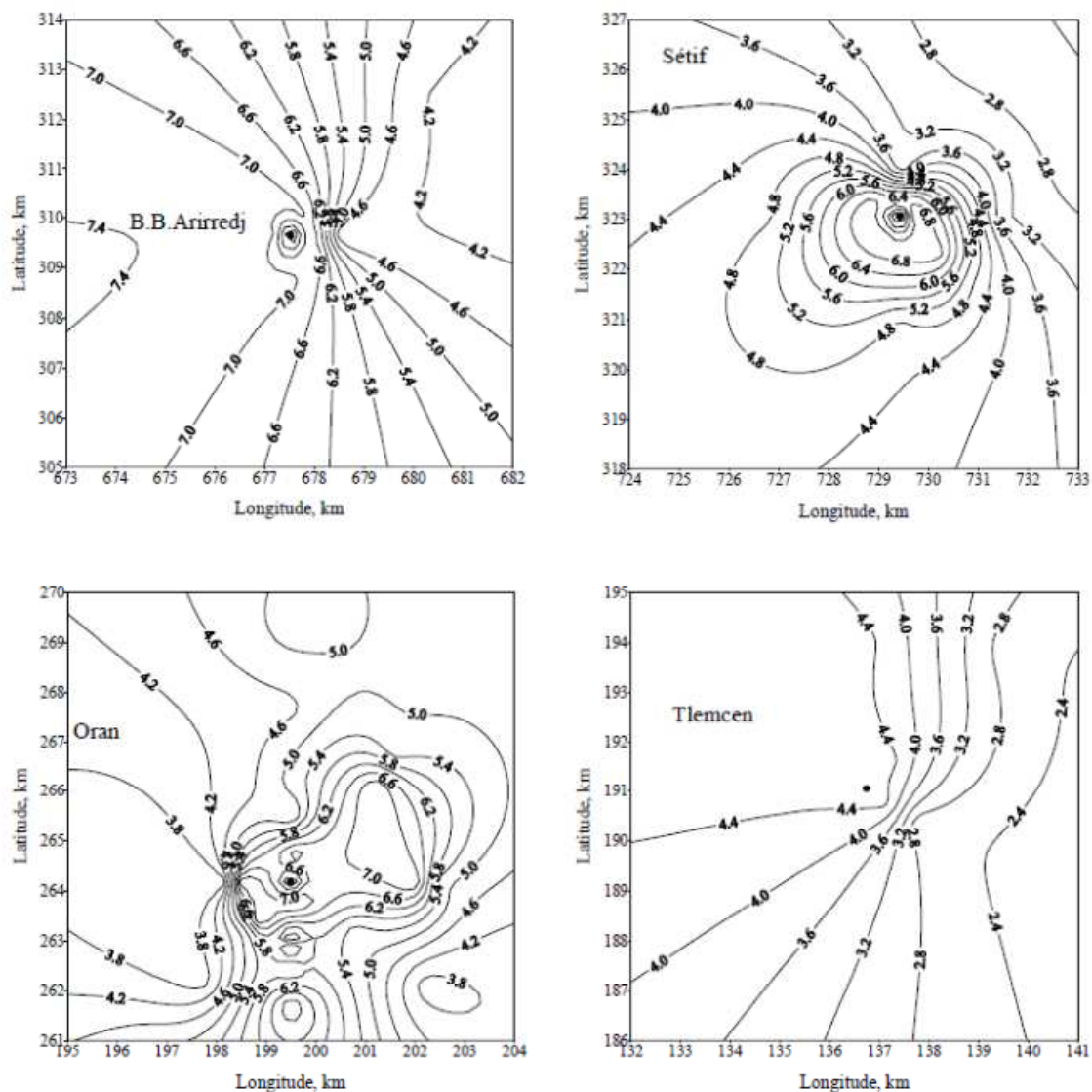


Figure III.6 (b): Cartographie du paramètre d'échelle c en m/s

L'étude des microclimats peut dévoiler des sites avec un potentiel éolien très important, comme celui de Benisaf [30]

III-4 Le vent dans la région de Msila

III-4-1 Vitesse de vent

La vitesse de vent sur un site donné varie de façon aléatoire, à titre d'exemple dans la région de Msila, le tracé de la variation de la vitesse du vent en fonction du temps sont illustrés sur les **Figures III.7, 8 et 9** selon la période et le pas des mesures. Ces données sont enregistrées à la station météorologique de Msila.

4-1-1 Vitesse de vent journalière

La vitesse du vent varie durant la journée, elle varie peu la nuit et augmente pendant la journée à partir du lever de soleil jusqu'au coucher de soleil. La **Figure III.7** illustre la variation

journalière de la vitesse du vent mesurée chaque heure durant la journée du 7 mars 2009. La vitesse maximale du vent est de 13 m/s ; enregistrée à 10 h, 11 h et 15 h respectivement (pendant la journée). Cependant, La vitesse minimale est de 5 m/s ; enregistrée à 4 h et 5 h respectivement (pendant la nuit).

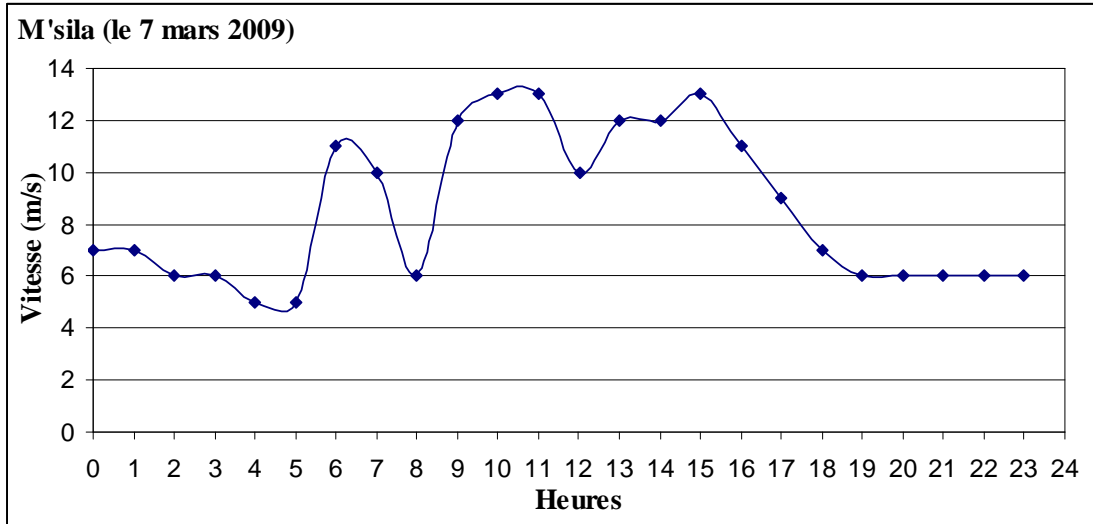


Figure III.7 : Variation de la vitesse moyenne journalière du vent à Msila.

4-1-2 Vitesse de vent mensuelle

La vitesse mensuelle du vent peut variée d'un mois à un autre durant la même année. La Figure III.8 montre la variation mensuelle de la vitesse du vent durant les deux mois de mars et juillet de l'année 2010. La distribution mensuelle de la vitesse du vent pour les deux mois n'est pas identique ; le mois de mars présente des vitesses journalières supérieures à celles du mois de juillet.

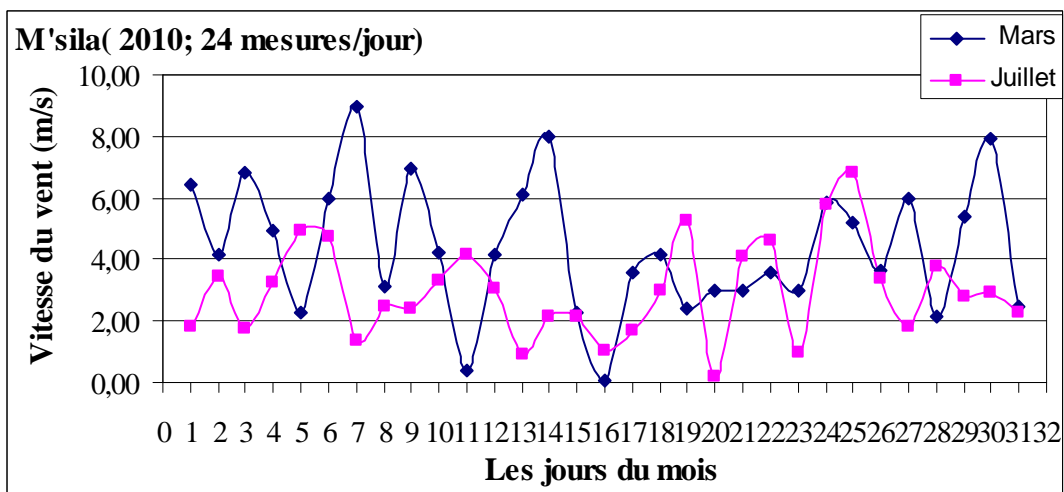


Figure III.8 : Variation mensuelle de la vitesse du vent à Msila.

4-1-3 Vitesse de vent Annuelle

La vitesse annuelle du vent diffère d'une année à une autre, la **Figure III.9** représente l'évolution sur cinq ans (2000-2005) de la vitesse annuelle du vent de la région de Msila. La vitesse moyenne annuelle est calculée pour 8 mesures chaque jour pendant toute l'année. L'année 2002 est la plus venteuse avec une vitesse moyenne de 4,69 m/s, cependant l'année 2004 la moins venteuse avec une vitesse moyenne de 4,18m/s.

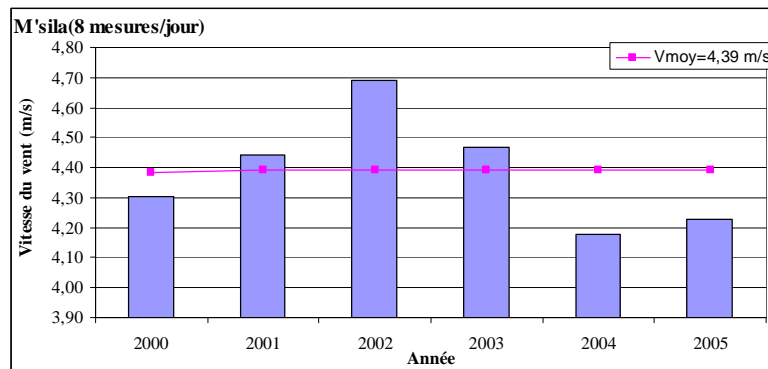


Figure III.9: Variation annuelle de la vitesse de vent à Msila (2000-2005).

Néanmoins et pour bien caractériser la potentiel éolien, la connaissance de la direction et la distribution des vitesses de vent est nécessaire, car elle joue un rôle décisif dans le choix du site approprié à l'installation d'un système ou d'un parc éolien. En ce qui concerne la direction du vent pour la région de Msila, l'étude statistique des données a permis de déterminer la rose des vents qui est la représentation graphique de la fréquence du vent en fonction de la direction dans un repère polaire [31] . Les résultats sont illustrés sur la **Figure III.10** qui montre bien que le secteur prédominant est l'Ouest avec 28%, le taux des fréquences dans la direction Est reste assez important avec un pourcentage de 25%.

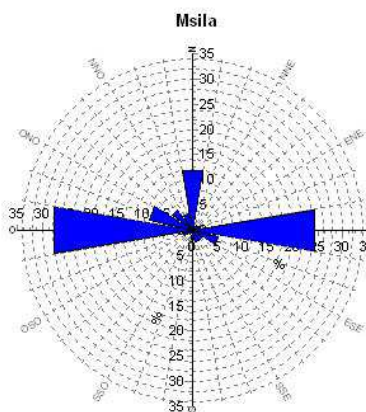


Figure III.10: Rose des vents pour la région de M'sila

L’histogramme représentant la distribution des vitesses (**Fig. III.11**) montre bien le taux assez élevé des vents calmes (vitesses nulles), qui atteint les 21% ($f_0 = 0,21$). Dans ce cas l’utilisation du modèle de Weibull hybride s’impose (voir chapitre II formule I.12). Le site de M’sila est balayé par des vents forts autour de la direction Ouest secteur dominant avec un facteur d’échelle c de $7.6m/s$. Le vent dans cette direction est stable car le facteur de forme k est important. Pour les autres directions les valeurs de c , k et v_{moy} à 10m du sol sont regroupées dans le tableau II.8

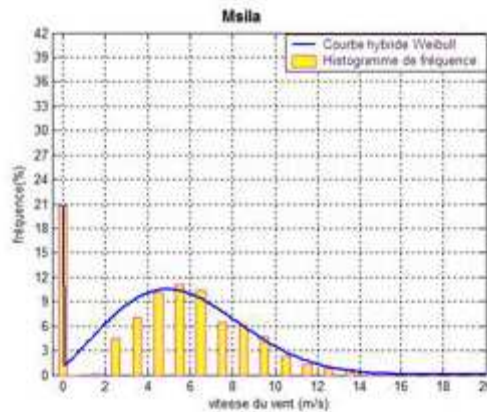


Figure III.11 : Histogramme et courbe hybride de Weibull des fréquences de la vitesse du vent pour la région de Msila

Notons enfin qu’une étude de réalisation d’un parc éolien dans la région de Msila a été effectuée [31]. Le parc envisagé est constitué de trois rangées orientées d’Ouest vers l’Est et séparées par une distance de $406m$. Chaque rangée est composée de cinq éoliennes séparées de $123 m$ suivant l’axe Nord – Sud. Le lieu géographique et la représentation virtuel du parc éolien sont illustrés sur les **Figures III.12** et **III.13**:

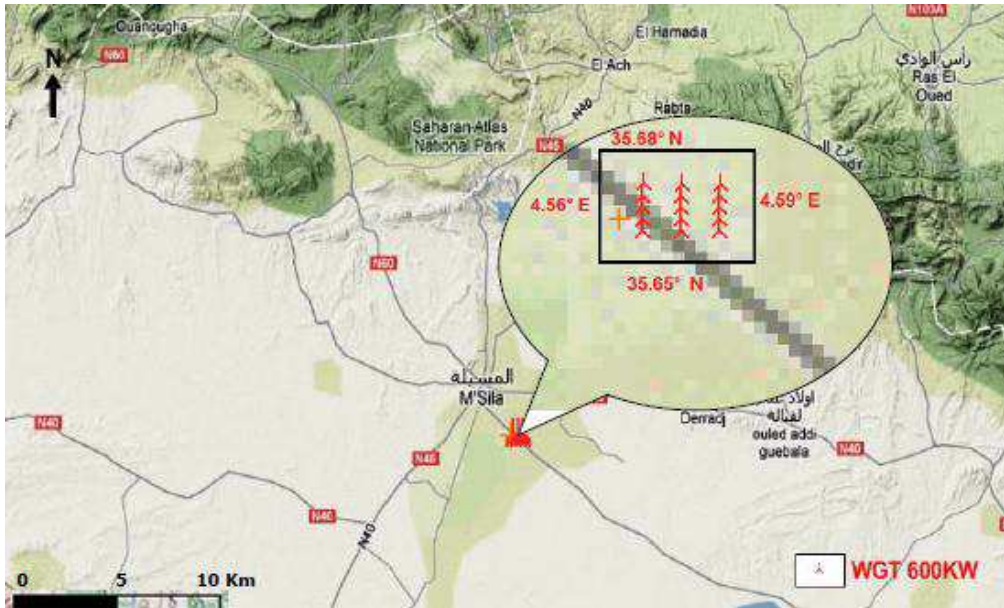


Figure III.12: Planification du parc éolien de 9MW à Msila.

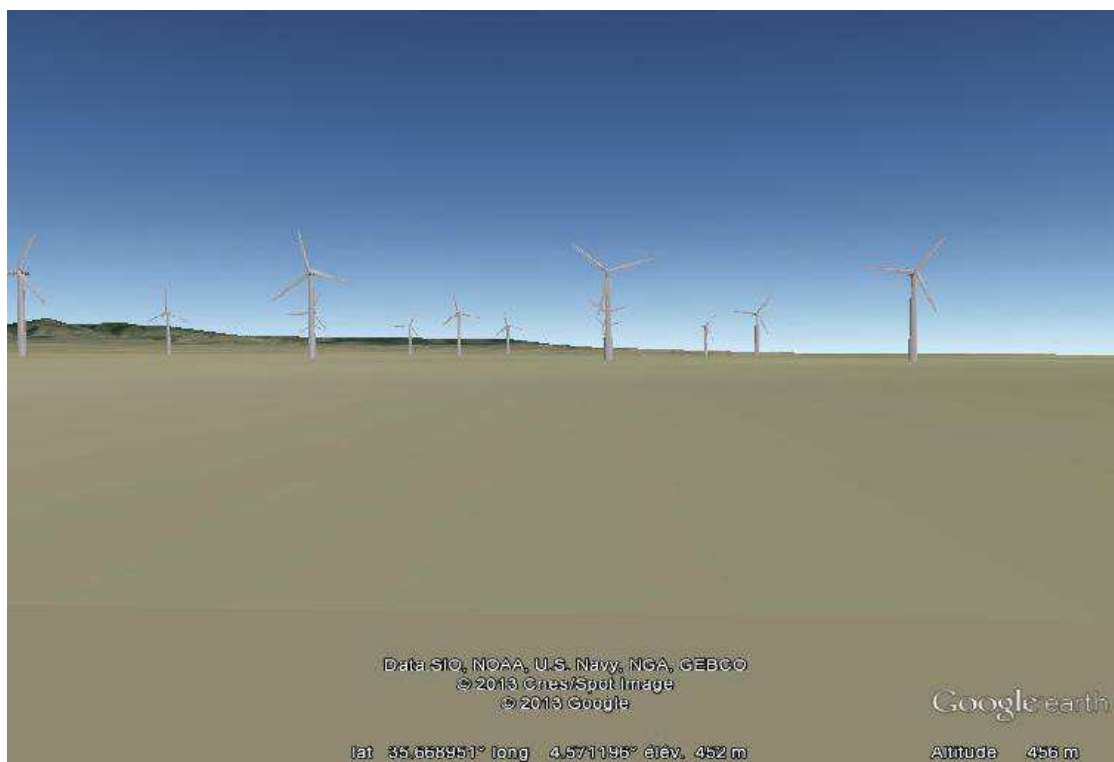


Figure III.13: Parc éolien virtuel à Msila.

Secteur	M'sila			
	C m/s	k	f %	V m/s
Nord	8.2	2.78	12	7.3
Nord Nord Est	7.2	2.75	1	6.4
Nord Est	5.5	2.21	1	4.9
Est Nord Est	5.5	1.96	1	4.9
Est	6.3	3.09	25	5.7
Est Sud Est	6	2	6	5.3
Sud Est	5.1	2.29	2	4.5
Sud Sud Est	6.5	2.67	2	5.8
Sud	5.6	1.84	2	5
Sud Sud Ouest	7.2	1.56	1	6.5
Sud Ouest	6	2.39	2	5.3
Ouest Sud Ouest	4.7	1.66	2	4.2
Ouest	7.6	2.25	28	6.8
Ouest Nord Ouest	7.1	1.74	8	6.4
Nord Ouest	7.6	2.11	4	6.7
Nord Nord Ouest	7.9	2.76	3	7.2

Tableau III.3: Paramètres de Weibull et la vitesse moyenne par secteur pour le site de Msila à 10m du sol.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Le thème de ce mémoire est d'actualité, mais aussi un thème de future, car c'est une préoccupation du monde entier. Les besoins en énergie dans le monde sont en croissance exponentielle, provoquant des crises énergétiques en cascade. La pollution est due en grande partie aux formes d'énergies conventionnelles (énergie fossile et nucléaire). Tous ces problèmes réunis ont poussé les autorités des différents pays et en particulier les pays industrialisés, qui sont des grands consommateurs de l'énergie, à exploiter d'autres formes d'énergie ; inépuisables et propres : Les énergies renouvelables. Le secteur de l'éolien fait parti de ce domaine. L'énergie éolienne est disponible partout dans le monde et en quantité énorme, qui peut avec les autres formes d'énergie renouvelables, en particulier photovoltaïques et thermiques, d'assurer l'indépendance énergétique des pays.

L'Algérie, en cherchant son indépendance énergétique, a entamé des investissements énormes dans ce domaine. Actuellement l'énergie éolienne occupe la deuxième position après le photovoltaïque. Mais cette indépendance doit obligatoirement passer par la maîtrise des technologies en relation directe ou indirecte avec le domaine de l'éolien. On peut citer dans ce sens la physique de l'atmosphère, la météorologie, physiques des matériaux, mécanique, électrotechnique et bien d'autres. Le choix du lieu d'installation des aérogénérateurs est lié directement au domaine de la physique de l'atmosphère et la météorologie. C'est dans ce sens qu'on a effectué notre étude. Le vent est un phénomène météorologique lié à la physique de l'atmosphère. Le problème qui se pose au cours de l'étude du vent est son caractère intermittent. Pour prévoir la vitesse du vent une étude statistique portant sur des données antérieures est nécessaires. Il a été prouvé que le modèle de Weibull est le meilleur qui peut interpréter la distribution des vitesses de vent au cours d'une période de temps. L'ajustement du modèle avec le comportement réel du vent dépend de deux paramètres k et c . Des calculs ont été implémentés sur deux sites néerlandais ; Valkenburg et Eindhoven pour valider les méthodes d'ajustement souvent utilisées en littérature. Le choix est fait pour deux méthodes : méthode graphique et méthode de la vitesse moyenne et l'écart type. Le choix est justifié par la simplicité des deux méthodes et demande moins de calcul. Une analyse qualitative montre que la méthode de la vitesse moyenne et l'écart type modélise la vitesse de vent mieux que la méthode dite graphique.

Une recherche bibliographique sur les études du gisement éolien en Algérie nous a révélé que des travaux ont été effectués pour établir un atlas éolien national. Quoique les atlas existant sont insuffisants, ils nous informent néanmoins que des régions possèdent un potentiel éolien considérable. L'exploitation efficace du potentiel éolien en Algérie, nécessite la mise en place d'un atlas éolien détaillé comportant tous les paramètres caractérisant le vent (vitesse moyenne,

paramètres de Weibull, densité de l'air, rugosité du terrain et bien d'autres) sur tout le territoire national. Une étude minutieuse des microclimats effectuée sur quelques régions du territoire national s'est avérée très importante, car elle nous a dévoilé des régions avec un potentiel de caractéristiques excellentes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. C. Mabel and E. Fernandez, "Growth and Future Trends of Wind Energy in India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 6, 2008, pp. 1745- 1757
- [2] N Kasbadji Merzouk, M Merzouk Perspectives du pompage éolien en Algérie Colloque International sur les Ressources en Eau Souterraines dans le Sahara CIRES Ouargla (Algérie) – 12 et 13 décembre 2005
- [3] I. Fyrippis, J. P. Axaopoulos and G. Panayiotou, "Wind Energy Potential Assessment in Naxos Island Greece," *Applied Energy*, Vol. 87, No. 2, 2010, pp. 577-586
- [4] World Wind Energy Report, "Report World Wind Energy Association (WWEA)," WWEA, Bonn, 2011, The European Wind Energy Association, "Wind in Power 2010 European Statistics," EWEA, Brussels, 2011
- [5] CSTEP_Wind_Power_in_Karnataka_and_Andhra_Pradesh_Report_2013
- [6] www.ren21.net/gsr : rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables 2016
- [7] Mohamed TERKMANI Ancien Directeur à la Sonatrach « Quelle place pour l'énergie éolienne en Algérie ? » Le quotidien Liberté paru le 17/04/2017
- [8] J. Wen, Y. Zheng and F. Donghan, "A Review on Reliability Assessment for Wind Power," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 9, 2009, pp. 2485- 2494
- [9] Mahyoub H. Al-Buhairi, Ahmed Al-Haydari Monthly and Seasonal Investigation of Wind Characteristics and Assessment of Wind Energy Potential in Al-Mokha, Yemen, *Energy and Power Engineering*, 2012, 4, 125-131)
- [10] REDJEM Radia, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », diplôme de magistère, 04/07/2009, Université de Constantine
- [11] L'énergie éolienne, PDF, 2012, chambre de commerce et d'industrie et territoriale de la Meuse
- [12] Dr Ouahiba GUERRI « L'Énergie éolienne en Algérie : Un bref aperçu » Bulletin des Energies Renouvelables - N° 21 2011 Centre de Développement des Energies Renouvelables, Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique
- [13] <http://www.ifremer.fr/lpo/cours/mouvement/images/profverttp.gif>
- [14] http://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_limite
- [15] R. Maouedj, S. Bousalem et B. Benyoucef : Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°2 (2008) 239– 250 (239 Juin 2008).
- [16] Benali Oussama, Evaluation de potentiel énergétique éolien dans la région sud-est du Sahara algérien, master académique, Spécialité : Energies Renouvelables, Université Kasdi Merbeh Ouargla, 2014/2015

- [17] Jean-Louis Rétiveau : « Analyse de données expérimentales et conception d'un générateur numérique de vitesse de vent » Mémoire de Recherche Université de Québec à Rimouski. 2006.
- [18] Seyit A. Akdag Ali Dinler. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management* 50, 2009, 1761-1766.
- [19] M. Boudia Sidi Mohammed " Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie', Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd
- [20] http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0001/travaux/optemf/bei_eol/pa_22.htm
- [21] Mahgoub H Al Buhairi. A statistical analysis of wind speed data and assessment of wind energy potential in Taiz-Yemen. *Ass. Univ. Bull. Environ Res.* vol.9 .No 2, Octob 2006.
- [22] H. Saleh , A. Abou El-Azmaly , S. Abdel-Hady, Assessment of different methods used to estimate Weibull distribution parameters for wind speed in Zafarana wind farm, Suez Gulf, Egypt, *Energy* 44 (2012) 710-719
- [23] Justus C.G., Hargraves W. H., Mikhail A., Graber D. Methods for estimating wind speed frequency distributions. *J Appl Meteorol* 1978; 17, 350-3.
- [24] Beurskens J. and Hjuler Jensen P. Economics of wind energy: prospects and directions, *Renewable Energy World* 4(4), 102-121, 2001.
- [25] Chang T.P., Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind speed energy application. *Appl Energy* 2011; 88: 272-82.
- [26] A.S. Akdag, A. Dinler, "A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications", *Energy Conversion and Management*, n. 50, pp. 1761–1766, 2009
- [27] <http://www.knmi.nl/samenw/hydra> (Royal Netherlands Meteorological Institute Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut)
- [28] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Mikhail, D. Graber, "Methods for estimating wind speed frequency distribution," *Journal of Applied Meteorology*, n°17, pp. 350-353, 1978.
- [29] L. Khettache «Etude et commande d'un système Eolien à base d'une Machine Electrique Double Alimentée » thèse de magister université de Batna
- [30] M. A. Tabet Helal et N. Ghellai. Le Gisement Eolien à Beni-Saf Région Côtière de l'Ouest Algérien *Rev. Energ. Ren.: ICPWE* (2003)143-146
- [31] Benmedjahed Miloud, Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur l'environnement, Thèse Docteur en Physique, Spécialité Énergies Renouvelables, Université Abou-bakr Belkaid Tlemcen, Algérie
- [32] The Global Wind Energy Council: dernier rapport annuel du GWEC

ملخص

في هذه المذكرة نتناول بالدراسة كيفية تصميم نموذج لتوزيع سرعات الرياح المقاسة خلال فترة زمنية معينة باستخدام قانون وايبول. للتحقق من صحة القانون طبقنا طريقتين في تعديل القانون على سلسلتين ساعيتين لسرعة الرياح التي تم قياسها في موقعين: فالكنبورغ وأيندهوفن. النتائج المحصل عليها جيدة نسبيا. تناقش المذكرة أيضا تقدم البحث في مجال موارد الرياح في الجزائر. كشفت الدراسة وجود منطقتين أساسيتين من حيث إمكانية توليد الطاقة من الرياح: الجنوب والشمال. تشمل الأولى على قدر أكبر من الموارد خاصة في موقعي أدرار وحاسي الرمل. بينما يحتوي الشمال على إمكانية متوسطة عموما، ومع ذلك دلت الدراسة على وجود مناخات محلية ذات إمكانات مماثلة لتلك التي في الجنوب وأكثر أهمية في بعض الأحيان كموقع بني صاف حيث الرياح مستقرة على مدار العام مع متوسط سرعة يقدر بـ 10m/s .

Résumé

Ce mémoire traite la modélisation de la distribution des vitesses de vent récoltées pendant une période de temps donnée, par la fonction de densité de probabilité de Weibull à deux paramètres. Pour valider cette loi on a appliqué deux méthodes d'ajustement sur deux série horaires de vitesses de vent mesurées sur deux sites ; Valkenburg et Eindhoven. Les résultats obtenus sont relativement bons.

Le mémoire traite aussi l'avancée des recherches sur le gisement éolien en Algérie. L'étude a mis en évidence deux régions principales en terme de potentiel éolien; le sud et le nord. Le premier présente un potentiel plus important avec des points culminants situés sur le site d'Adrar et celui de Hassi Rmel. Tandis que, le nord présente un potentiel généralement modéré, toutefois l'étude des microclimats a révélé des sites ayant un potentiel semblable à celui du sud et parfois plus importants comme celui de Benisaf où le vent est stable tout au long de l'année avec une vitesse moyenne de 10m/s .

Abstract

In this thesis, we study the modeling of the distribution of wind speed data recorded during a time period by the 2-parameter Weibull probability density function. To validate this law, two methods for determining the parameters of the Weibull distribution were applied on hourly wind speed data recorded at two stations; Valkenburg and Eindhoven. The results obtained are relatively good.

The thesis also deals with the progress of research on the wind resources in Algeria. The study revealed two major regions; the south and the north. The first one has more important potential, where some locations have the maximum one like those of Adrar and Hassi Rmel. While, the north has generally a moderate potential; however the study of microclimates revealed sites with a potential similar to that of the south and sometimes larger, such as Benisaf where the wind is stable throughout the year with average speed of 10m/s .