République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER en PHYSIQUE ENERGETIQUE

Thème

Etude statistique et énergétique d'une éolienne Dans la région de Laghouat

Soutenu le : 02 octobre 2014

Présent par :	Membres de jury :	
	Président :	
Mr BENBRIKA Omar	Mr T. BOUSSOUKAIA	Univ. D'ADRAR

Promoteur :		Examinateurs :	
Mr B. OMARI	Univ. D'ADRAR	Mr M. GHENFOUD	Univ. D'ADRAR

Remerciement

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin.

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **OMARI Boumedienne** mon encadreur de m'avoir fait confiance pour mener à bien de ce projet de recherche, ainsi que pour leur soutien et les conseils qu'ils m'ont donné au cours de ce travail.

C'est avec beaucoup de plaisir que j'exprime ici ma profonde gratitude à Monsieur **BENCHATTI Ahmed** (Professeur), mon co-encadreur de thèse, pour son encadrement et soutien, sa patience, sa disponibilité et la confiance qu'il m'a témoignée.

J'exprime mes sincères remerciements à madame **BOUCHIBA** et monsieur **BENARFA Adel** pour tout l'aide qu'ils m'ont fournier au quotidien, et pour m'avoir fait l'honneur de consacrer son temps précieux à la lecture de ce thèse.

Et finalement je remercie tous mes amis du laboratoire de département de génie de mécanique de Laghouat qui m'ont assuré le bon moral et pour les échanges d'informations sans oublier les fous rires et les discussions de gaieté pendant mon travail.

Dédicaces

A mes parents « Que dieu me les garde », qui m'a éclairé le chemin en me donnant la main tout au long de mes années d'étude.

A mes sœurs.

A toute ma famille.

A touts mes amis sans exception.

Sommaire :

Remerciement…… …...I

Dédicace…… II

Sommaire…….. .III

Liste des figures…… VI

Liste des tableaux……VII

Résumé…… VIII

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

1.1 .Introduction.....3

1.2 Eléments de physique atmosphérique.....3

1.2.1Structures atmosphériques 3

1.2.2 Couche Limite Atmosphérique (CLA) ……...3

1.3 .Type de vent.....6

1.3.1 Vents Globaux……6

1.3.2 Vents locaux.....8

1.3.3 Vent de surfaces.....9

1.4 .Propriétés du vent.....9

1.4.1 Accélération et Turbulence……9

1.4.2 Oscillations du vent.....9

1.5 .Mesure des paramètres du vent.....11

1.5.1 Indicateurs écologiques.....11

1.5.2 Anémomètres et Girouette.....13

1.5.3 La rose des vents.....14

1.6. Notions théorique 15

1.6.1 La variabilité temporelle……16

1.6.2 La variabilité spatiale……17

1.6 Caractérisation horizontale de la vitesse du vent 18

1.7.1. Distribution de Weibull.....18

1.7.2. Distribution hybride de Weibull.....19

1.7.3. Distribution de Rayleigh ……19

1.8 Conclusion……19

Chapitre 2 : Traitement des données réelles

2.1. Introduction.....20

2.2. Variabilité temporelle et spatiale de la vitesse de vent.....21

2.2.1. Etude statistique.....21

2.2.1-a Définition des paramètres vent.....21

2.2.1-b Forme de la distribution de Weibull.....22

2.2.1-c Variation des paramètres de weibull.....23

2.2.1-d Variation de distribution de weibull par la hauteur.....24

2.2.2. Etude journalière.....25

2.2.3. Etude mensuelle de la vitesse.....26

2.2.3-a Variation mensuelle.....26

2.2.3-b Traitement des données de la région de Laghouat.....27

- La région de hassi r'mel.....28
- La station métro de Laghouat.....31
- Traitement des données de la station de l'université.....34

2.2.4. Etude annuelle de la vitesse de vent 37

2.3 Conclusion……..…40

Chapitre 3 : Etude énergétique

3.1. Introduction.....41

3.2. Potentiel énergétique éolien.....41

3.2.1. Puissance énergétique disponible.....42

3.2.2. Potentiel énergétique éolien récupérable (théorème de Betz).....43

3.2.3. Puissance éolienne moyenne utilisable.....46

3.2.4. Puissance éolienne moyenne utile.....48

3.3. Conclusion.....50

Conclusion générale 51

Liste des figures :

Figure 1.1 : Vue schématique de couche limite atmosphérique ……3

Figure 1.2 : Vue schématique de la couche limite atmosphérique ……..6

Figure 1.3 : Mouvement général de l'air en atmosphère ……..7

Figure 1.4 : Forces de Coriolis……8

Figure 1.5 : Vents locaux……8

Figure 1.6 : Passage du flux d'air sur un obstacle ……..10

Figure 1.7 : Le spectre de la vitesse du vent basé sur les travaux de Van der Hoven……10

Figure1.8 : Schémas des différents types de dunes……11

Figure 1.9 : Dunes souvent rencontrées dans le Sahara Algérien [Google earth]……12

Figure 1.10 : Indicateurs biologiques……13

Figure1.11 : Ensemble d'un anémomètre et girouette……14

Figure 1.12 : La rose de vent……14

Figure 2.1 : Histogrammes des vitesses et courbes d'ajustement pour les lois de Weibull et hybride Weibull pour les trois régions de Laghouat……23

Figure 2.2 : Variation des paramètres de weibull……24

Figure 2.3 : Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull pour chaque altitude……25

Figure 2.4 : Variation journalière de la vitesse du vent pour les régions Est et Ouest De Laghouat.....26

Figure 2.5 : variation mensuelle de vitesse moyenne du vent.....27

Figure 2.6 : Histogrammes et courbes mensuelles représentatives ajustées selon la loi De Weibull pour la région de Hassi R'mel à 10m.....30

Figure 2.7: Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull, weibull hybrid pour chaque mois à de La station métro de Laghouat 10m.....33

Figure 2.8 : Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull pour chaque mois de la station de l'université à 10m.....36

Figure 2.9 : Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull pour chaque région à 10 m.....38

Figure 3.1 : Représentation schématique des dégradations successives de l'énergie Éolienne avant utilisation.....41

Figure 3.2 : Bilan sur une section de l'hélice.....43

Figure 3.3 : représentation des vitesses de démarrage, nominal et d'arrêt sur la courbe De distribution des vitesses.....47

Tableau 2.1 : Expressions des vitesses moyennes, cubiques moyennes et la variance selon le modèle utilisé.....22

Tableau 2.2 : Les résultats mensuels de traitement à 10 m.....28

Tableau 2.3 : les paramètres sont calcules pour la région Est de Laghouat à 10m.....31

Tableau 2.4 : Les paramètres de la région Ouest de Laghouat à 10m.....34

Tableau 2.5 : Les paramètres annuels des distributions de la région de Laghouat à 10 m.....39

Tableau 3.1 : Les énergies disponibles de la région de Laghouat à 10m en [W/m^2.S].....42

Tableau3.2 : Les énergies récupérables dans la région de Laghouat en [W/$m2s$] à 10m.....45

Tableau 3.3 : La densité d'énergie moyenne récupérable sur une année à 10m.....46

Ce travail est une contribution à l'étude statistique et énergétique des gisements éoliens dans la région de Laghouat ce qui va permettre à ceux qui ont la décision de lancer des projets énergétique basés sur des données réelles et de réaliser des parcs éoliens dans les zones les plus ventées de la région.

Dans cette optique la collecte des données réelles relatives au vent était nécessaire pour la détermination des différent paramètres liés au vent et à l'aide d'une modélisation mathématiques de la distribution des fréquences du vent utilisant celle weibull et weibull hybrid. La simulation nous a permit de déterminer la vitesse moyenne du vent ainsi que l'évaluation du potentiel éolien.

Notre travail est diviser on trois chapitres ; Le premier chapitre consacré aux études bibliographiques et l'exposé des motifs et nous proposons d'utiliser des indicateurs écologiques et biologiques. Après l'introduction d'éléments de physique atmosphérique et la définition des couches et des forces régissent le mouvement des masses d'air ; des généralités sur le vent et sur ses différentes sources et propriétés.

Le deuxième chapitre comporte le traitement microclimatique de la région de Laghouat, étude statistique, étude temporelle et spatial ; en suite le troisième chapitre qui présente une étude pour l'estimation du potentiel énergétique éolien utilisable. Et finalement une conclusion générale sur notre travail.

Mots clés :

Distribution de wiebull ; Energie renouvelable Vents ; Gisement éolien ; Puissance du vent ; éolien ; Energétique éolienne ; Cartes des vents de l'Algérie.

INTRODUCTION

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

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

L'énergie nucléaire offre plusieurs avantages par rapport au charbon (où le dioxyde de carbone et le dioxyde de soufre ne sont pas produits) ; les opérations minières sont à plus petite échelle. Le problème majeur est l'élimination des déchets radioactifs, qui est la raison essentielle des craintes de plusieurs écologistes parce qu'il n'aura jamais une solution satisfaisante (sûr et durable).En raison de ces problèmes, l'énergie éolienne et d'autres formes d'énergies durables sont fortement encouragées. L'énergie éolienne peut devenir une source majeure d'énergie en dépit des coûts légèrement plus élevés que le charbon ou que l'énergie nucléaire.

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

Globalement, l'énergie éolienne est devenue une source d'électricité très importante. Elle joue un rôle majeur dans les marchés énergétiques de la planète depuis la fin de l'année 2008 [1]. D'après l'Association Européenne de l'Energie Eolienne (EWEA), la capacité totale des nouvelles éoliennes mises en ligne dans toute l'Union Européenne en 2008 est de 64.948 GW Soit une augmentation de 15 % MW sur le total de l'année 2007 [2] .La capacité installée vers la fin de l'année 2009 permet d'éviter l'émission de plus de 90 millions de tonnes de CO_2 Chaque année.

Ce travail de recherche consiste à l'étude statistique et énergétique d'une phase au préalable, permettant d'apporter une aide efficace, à tous ceux qui ont à prendre des décisions concernant la planification et la réalisation de projets à Energie éolienne dans la région de Laghouat. Dans cette perspective la détermination des différents paramètres liés au vent, tel que la modélisation mathématique de la distribution des fréquences du vent « distribution de weibull sera faite », puis le traitement et la simulation des données réelles relatives au vent collectées pendant une période bien déterminée, et l'évaluation de son potentiel éolien.

1.7Introduction

Le vent est le résultat de la différence de pression résultant du chauffage inégal de la surface de la terre en raison de sa forme sphérique. L'angle d'incidence du rayonnement du soleil sur la surface de la terre dépend de la position géographique ; il est proche de zéro à l'équateur (faisceau du soleil normal à la surface de la terre) et prend une valeur plus importante aux pôles. Cela conduit à une énergie inégale reçue par la terre et donc à un chauffage inégal de l'air atmosphérique ; Comme la force motrice d'origine de ce mouvement est tirée du soleil, l'énergie éolienne est fondamentalement une forme indirecte de l'énergie solaire, Un à deux pour cent du rayonnement solaire total atteignant la surface de la terre est convertie en énergie éolienne [1].

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

1.8 Eléments de physique atmosphérique :

Il est nécessaire de connaitre ce facteur physique et atmosphérique pour pouvoir développer une idée complète sur cette puissante force naturelle.

1.2.1 Structures atmosphériques :

L'atmosphère standard se compose de deux parties essentielles (**voir figure 1.1**) [4], à savoir :

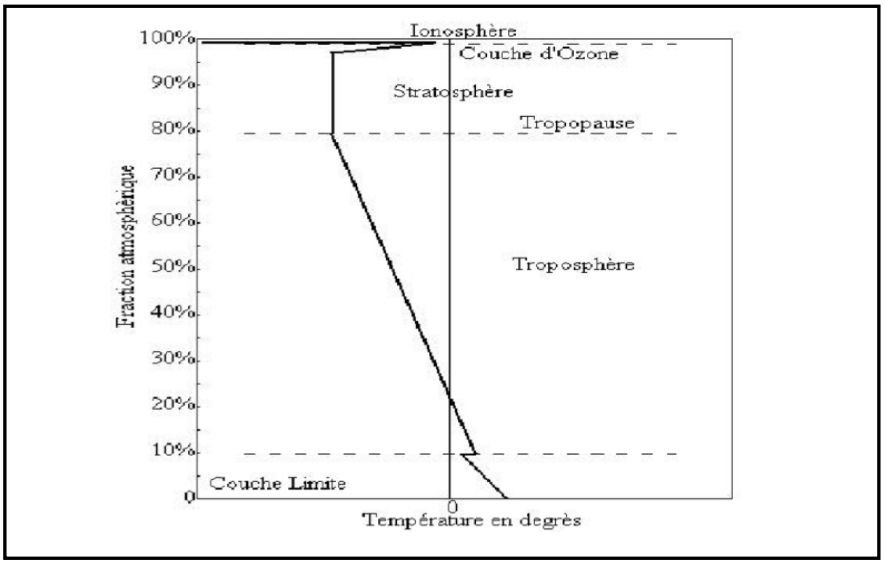


Figure 1.1 : Vue schématique de couche limite atmosphérique.

La stratosphère qui représente les 20% au-dessus de la tropopause et dont la limite supérieure est l'ionosphère. L'air qui constitue l'atmosphère terrestre est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides, concentrés dans la troposphère. Dans cette région, le déplacement de l'air, par rapport à la surface terrestre, appelé vent résulte de l'équilibre entre les forces en présence. Pour un observateur à l'arrêt par rapport au sol, il existe quatre forces majeures qui agissent sur une partie élémentaire d'air :

- la force gravitationnelle.
- la force due au gradient de pression.
- la force de Coriolis.
- et les forces de frottement.

a. Force gravitationnelle :

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

b. Force de pression :

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

c. Force de Coriolis

Cette force est le résultat de la rotation de la terre autour de son axe et est perpendiculaire à la

vitesse du vent. Elle intervient dans les déplacements atmosphériques en raison de la faiblesse des forces contribuant à mettre l'air en mouvement.

d. Forces de frottement

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air avec le sol. Elles interviennent dans la couche limite atmosphérique.

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

1.2.2 Couche Limite Atmosphérique (CLA) :

La couche limite atmosphérique [5] ; 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 est régi par le gradient de pression. Elle est contrôlée et modifiée partiellement par le frottement aérodynamique de la surface et par l'importance de la stratification de la densité d'air qui résulte des différences de températures entre la surface du sol et l'air ambiant. Elle est fonction de plusieurs paramètres, tel que :

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

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

a. Couche Limite de Surface (CLS)

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

Contact direct avec la surface terrestre. Dans cette région, les effets de la force de Coriolis sont négligeables devant les effets dynamiques engendrés par les frottements au sol ainsi que par la stratification thermique de l'air. Elle peut être départagée en deux sous couches :

- Une sous-couche inférieure située au-dessus du sol où les forces de frottement sont prédominantes, par rapport à la stratification thermique de l'air. Dans ce cas, le mouvement de l'air est turbulent et reste directement lié à la rugosité du sol.

- La seconde sous couche se situe juste au-dessus de la première. Les effets de frottement y sont négligeables devant la stratification thermique de l'air.

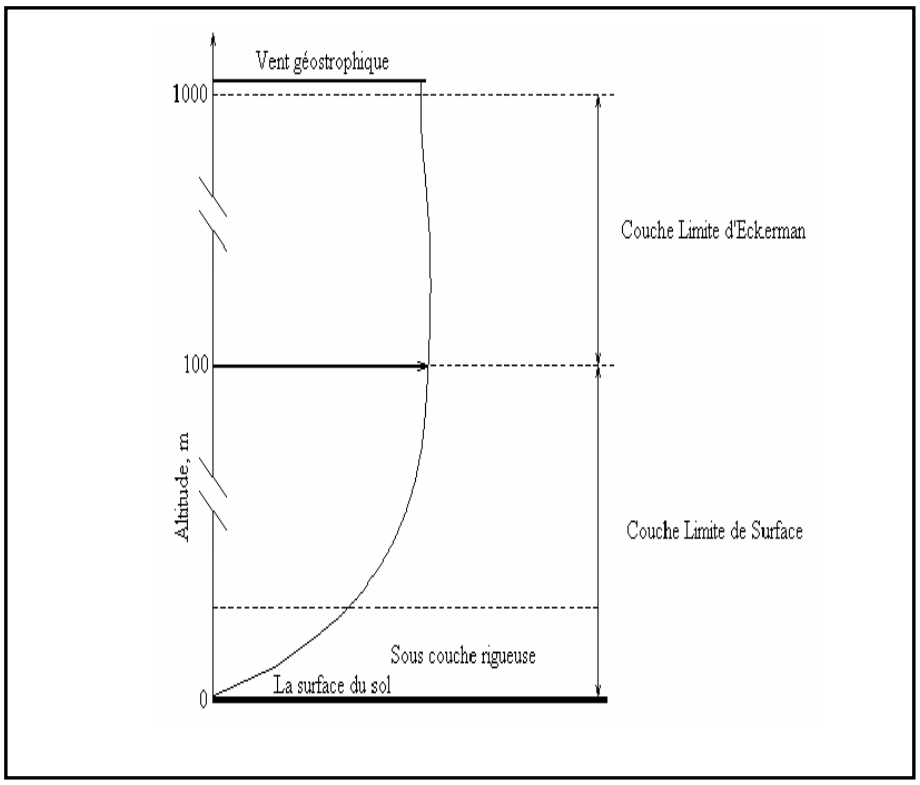


Figure 1.2 : Vue schématique de la couche limite atmosphérique.

b. Couche limite d'Eckerman

La couche limite d'Ekerman est la partie supérieure de la couche limite atmosphérique ; Le vent est alors influencé par le frottement au sol, la stratification thermique de l'air et la force de Coriolis. Avec l'altitude, les forces de frottement deviennent négligeables devant l'effet de la force de Coriolis, jusqu'à atteindre le vent géostrophique.

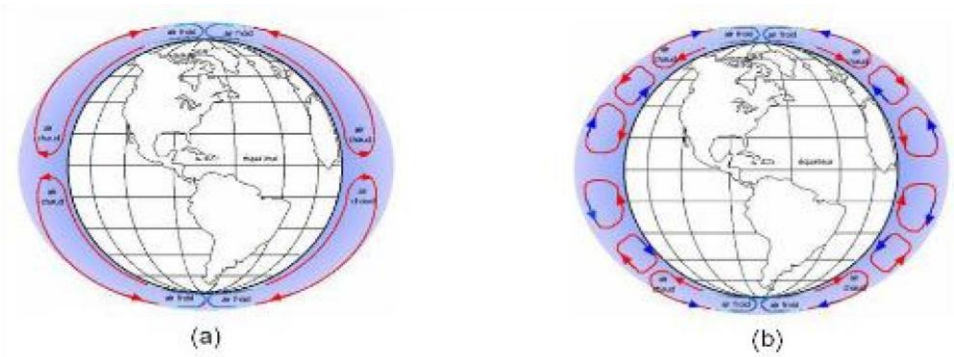
1.9.Type de vent

Il existe différents classement de vent dont on peut cités :

1.3.1 Vents Globaux

Les vents causés par la différence de température due au réchauffement inhomogène de l'air de l'atmosphère sont connus par les vents géostrophiques ou bien les vents globaux **(figure 1.3).**

Ces vents sont observés sur les hautes altitudes et ne sont pas affectés par la surface de la terre. Le réchauffement inégal de l'atmosphère terrestre varie suivant les latitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents. La (**figure1.3.a)** montre le mouvement général (global) de l'air en atmosphère. En réalité, l'air est déjà refroidi à 30o de latitude, alors il redescend au sol. De là, un autre cycle de 30o est formé et ainsi de suite **(figure 1.3.b)**. Dans le cas de l'Algérie, la bande de la différence de pression est localisée dans le Sud entre Bechar, Tindouf et Adrar.



(a)Mouvement théorique. (b) Mouvement réel (actuelle).

Figure 1.3 : Mouvement général de l'air en atmosphère.

La rotation de la terre provoque un autre phénomène près de sa surface dite forces de Coriolis [1] [4]. A cause de l'effet de ces forces, la trajectoire rectiligne de la masse d'air est Détournée **(figure 1.4.a).** Sous l'influence des forces de Coriolis, le vent a tendance à tourne vers la gauche dans le sens contraire de la montre dans l'hémisphère Nord et vers la droite dans le sens de la montre dans l'hémisphère sud [2]. Les flèches dans la (**figure 1.4.b)**

indiquent que les directions privilégiées des vents globaux ne sont pas verticaux (rectilignes) mais ils sont inclinées.

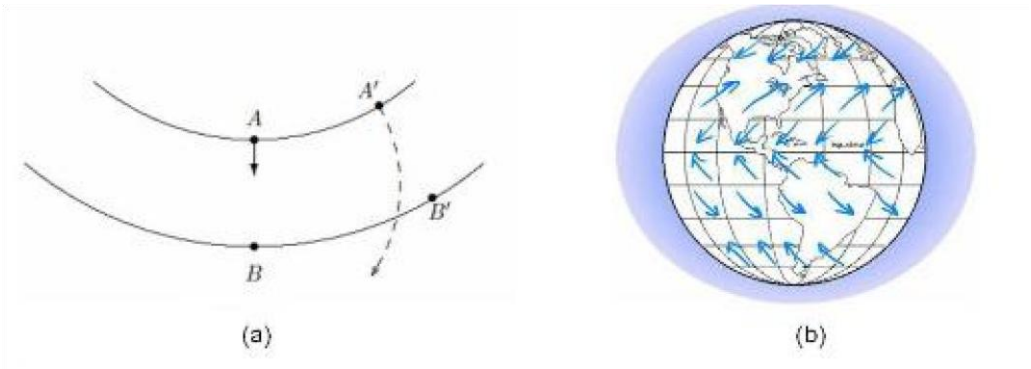
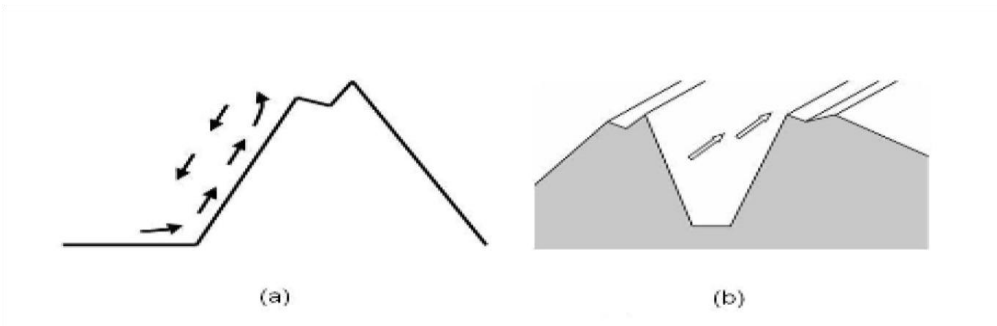


Figure 1.4 : Forces de Coriolis.

1.3.2 Vents locaux

Le changement de la vitesse et de la direction du vent pour des altitudes d'environ 100 m est très important pour les applications de la conversion d'énergie éolienne. Les vents locaux sont très influencés par des facteurs tels que la mer, la terre et les montagnes.

En cours de la journée, la terre se réchauffe plus rapidement que la mer, ce qui provoque un soulèvement de l'air chaud qui s'étend ensuite vers la mer. L'air froid provenant de la mer est tout de suite attiré par la dépression créée au niveau de la terre à cause de son réchauffement c'est la brise de la mer. La nuit, la direction de cette brise prend le chemin inverse (Brise de terre).



(a) Brise montante. (b) Effet tunnel.

Figure 1.5 : Vents locaux.

Les reliefs, notamment les montagnes, favorisent beaucoup de phénomènes climatologiques intéressants. L'air commence à s'élever vers le sommet de la montagne, produisant ce que l'on appelle une brise montante .La nuit, le phénomène s'inverse et une brise descendante se produit **(figure 1.5.a).**La (**figure1.5.b)** représente un autre phénomène causé par les montagnes et les collines, il est connu par l'effet tunnel ; la vitesse du vent augment d'une façon importante à l'intérieure du tunnel. Ce phénomène est souvent exploité dans l'installation des aérogénérateurs.

1.3.3 Vent de surfaces

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

1.10 .Propriétés du vent

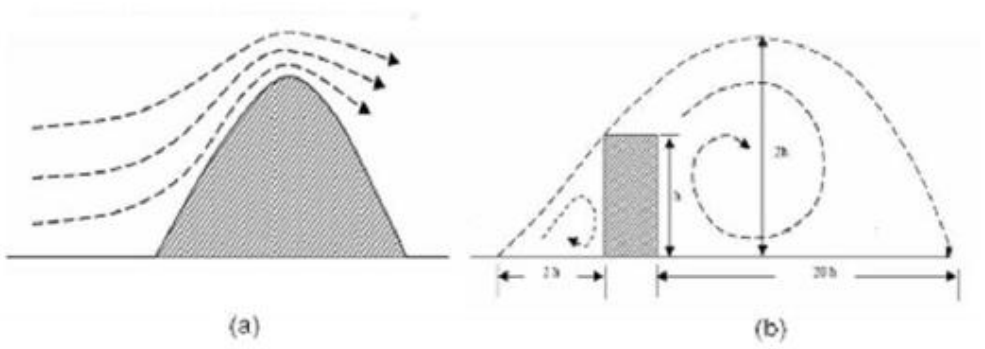
1.4.1 Accélération et Turbulence :

Le flux du vent est accéléré au passage d'un obstacle lisse tel que les collines. Cette accélération est due à la compression des couches de vent sur un support **(figure 1.6.a)**. Ce phénomène est pleinement exploité pour la production d'énergie et plus particulièrement si la pente de la crête se situe entre 6° et 16°. Les angles supérieurs à 27°et moins de 3° ne sont

pas favorables [1]. Pour des obstacles de plus de27°, des turbulences sont provoquées durant le passage du flux d'air **(figure 1.6.b)**.

1.4.2 Oscillations du vent :

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



(a)Effet d'accélération, (b) Effet de turbulence.

Figure 1.6 : Passage du flux d'air sur un obstacle.

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

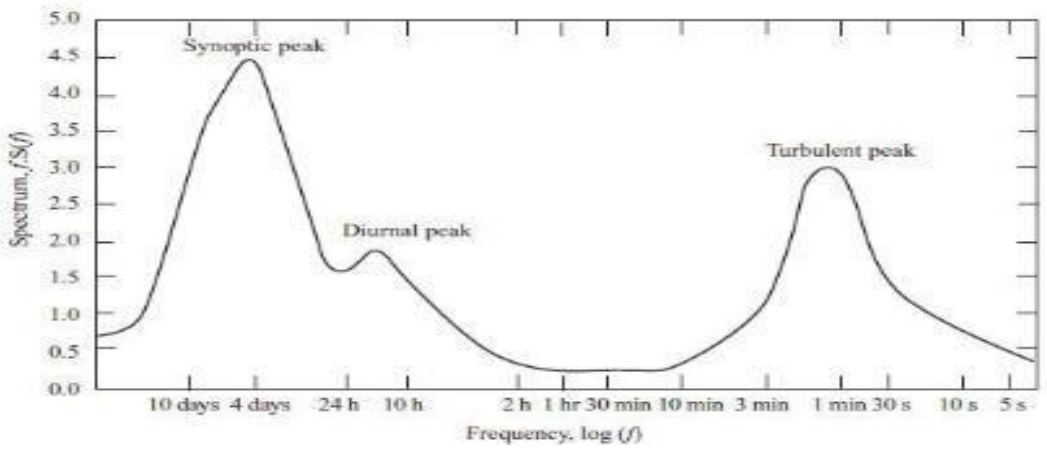


Figure 1.7 : Le spectre de la vitesse du vent basé sur les travaux de Van der Hoven [2].

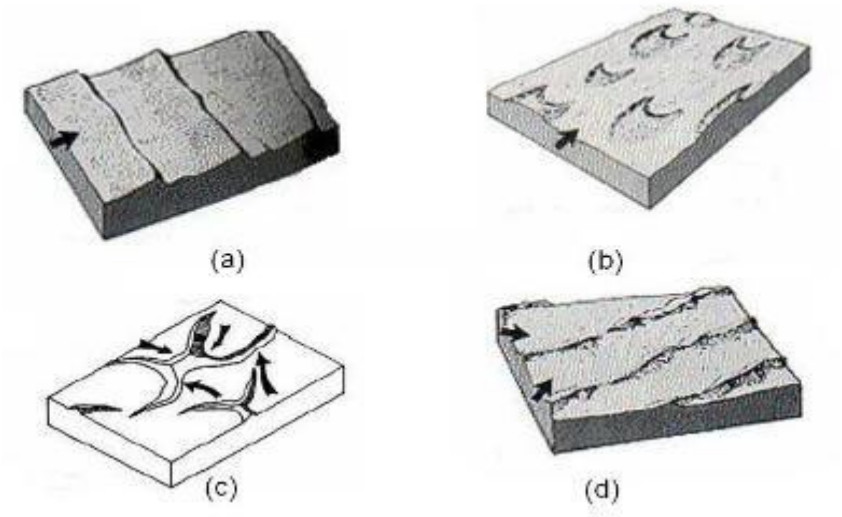
Une étude sur le comportement cyclique du vent remonte à 1957 lorsque Ven der Hoven [6]
a évalué le spectre de puissance de la vitesse du vent. La (**figure 1.7)** représente le spectre de la vitesse du vent obtenu par Van der Hoven (1957) à New York. Les pics dominants dans ce spectre correspondent aux variations turbulentes journalières et synoptiques.

Les oscillations synoptiques avec des périodes d'oscillations comprises entre 4 à 6 jours sont associées au passage des systèmes météorologiques (fronts froids ou chauds) à grande échelle.

1.11 .Mesure des paramètres du vent

1.5.1 Indicateurs écologiques :

Les indicateurs écologiques peuvent être utilisés afin de déterminer l'intensité du vent dominant dans une région. Les dunes de sable présentent un exemple pour la formation éolienne. Les particules de sable soulevées et transportées par l'écoulement du vent, sont déposées lorsque la vitesse du vent est plus faible. Les tailles des particules transportées et déposées ainsi que la distance peuvent nous donner des indications sur l'intensité moyenne du vent dans cette région [7]. Encore, les formes des dunes peuvent nous indiquer la direction du vent **(figure 1.8).** Des dunes sous forme de croissant se forment sous un régime du vent unidirectionnel " les Barkhanes ".



(a) Dune traverse. **(b)** Dune Barkhane. **(c)** Dune étoile. **(d)** Dune longitudinale.

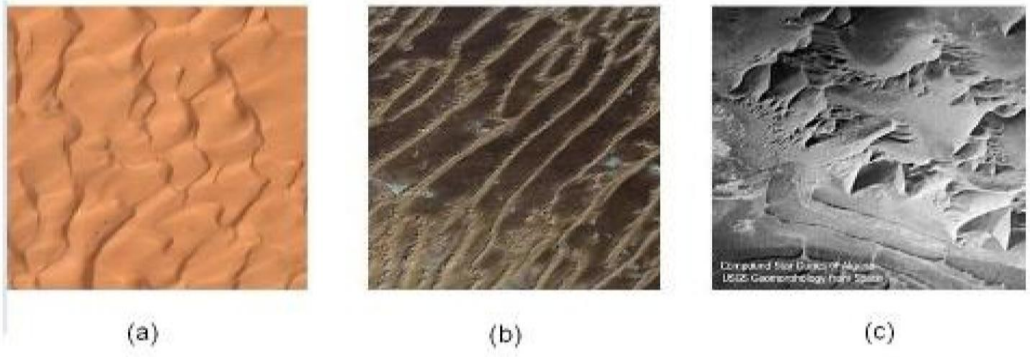
Figure1.8 : Schémas des différents types de dunes.

Les dunes (longitudinales) linéaires " les Sifs " sont formées par des vents bidirectionnels. Lorsque le régime du vent est multidirectionnel, des dunes en forme d'étoiles sont souvent observées. La **(figure 1.9)** montre les trois types des dunes souvent rencontrées dans le Sahara algérien.

Les dunes de type Barkhanes **(photo 1.9.a)** sont souvent observées près de la région El-Goléa.

Les dunes Sif **(photo 1.9.b)** peuvent être observées près de la région d'Adrar.

Les dunes étoiles **(photo 1.9.c)** sont localisées près de Hassi-Messaoud.



(a) Type Barkhane **(b)** Type Sif **(c)** Type étoile

Figure 1.9 : Dunes souvent rencontrées dans le Sahara Algérien [Google earth].

Dans les sites côtiers et montagneux, les arbres peuvent aussi être utilisés entant qu'indicateurs biologiques. Putnam [8] ; a classé les déformations des arbres et leurs branches en fonction de la puissance du vent **(figure 1.10).**

La (**figure 1.10)** montre des arbres dans les régions de Djelfa et de Chiffa respectivement. L'inclinaison des arbres du "barrage vert" indique que ce site est exposé à un couloir du vent d'une façon permanente. A partir de l'inclinaison des arbres, on peut en déduire que les directions privilégiées de ce couloir sont la direction Ouest et la direction Sud-Ouest. Concernant la (**photo 1.10.b)**, on note que les arbres situés dans la région de Chiffa endurent une inclinaison plus une déformation due à l'effet tunnel.

(a) Photo du barrage vert près de Djelfa **(b)** Photo des arbres près de Chiffa.

Figure 1.10 : Indicateurs biologiques.

1.5.2 Anémomètres et Girouette

Les capteurs les plus fréquemment utilisés pour mesurer la vitesse du vent sont les anémomètres à moulinet (**figure 1.11)**. Sous l'action du vent, les coupelles font tourner le moulinet avec une vitesse angulaire proportionnelle à la vitesse du vent. Le transducteur (détecteur de proximité) assure alors la conversion de la vitesse de rotation du moulinet en un signal exploitable pour la mesure. La vitesse du vent s'exprime en mètres par seconde (m/s), en kilomètres par heure (km/h) ou en nœuds (kt). 1 m/s correspond à 3.6 km/h et à 1.85 kt.

La direction du vent quant à elle, est mesurée au moyen de girouettes, généralement à18 directions de 20°. La girouette est constituée d'une queue d'orientation qui est reliée à un transducteur. La queue d'orientation entraîne dans sa rotation un jeu de frotteurs mettant en circuit un nombre de résistances en fonction de la direction du vent par rapport au Nord géographique. Souvent les quatre points cardinaux sont indiqués par les lettres N, S, E, W pour nous servir du repère. La direction est mesurée en degrés par rapport au Nord géographique.

Figure1.11 : Ensemble d'un anémomètre et girouette.

1.5.3 La rose des vents

La rose des vents est construite pour avoir une idée de la distribution des vitesses et des directions du vent, elle est construite à partir des observations météorologiques faites dans une région sur une ou plusieurs années. La rose des vents que nous voyons sur la (**figure 1.12)** est composée de huit secteurs, N, NE, E, SE, S, SO, O, NO. Lors de la localisation d'un site éolien, la rose des vents nous donne une idée sur la direction des vents dominants. Il faut avoir alors peu d'obstacles et une rugosité moindre dans cette direction.

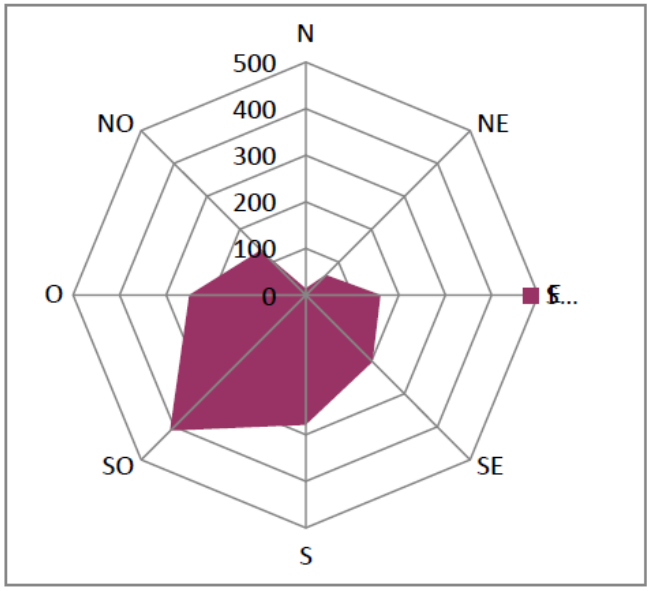


Figure 1.12 : La rose de vent.

1.6. Notions théorique

Même si des études ponctuelles sur les variations temporelles et spatiales de la vitesse du vent ont été publiées dès 1942, le premier atlas des ressources énergétiques éoliennes n'a été réalisé qu'en 1981 à Washington (USA), par le Pacific Northwest Laboratory, [9]. En 1989, une équipe danoise de Riso Laboratry, a publié l'Atlas Européen, [10]. Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés par Said et all, [11] en 1984, suivis par Benssad, en 1985, [12], Hammouche, en 1990 [6], Kasbadji Merzouk en 1994 [14] et F. Youcef Ettoumi en 2002, [15].

Pour quantifier l'énergie éolienne disponible dans les différents sites en Algérie, plusieurs études ont été menées. Ces études s'adressent principalement à la cartographie de la vitesse du vent à différentes altitudes [2], [9], à l'évaluation du potentiel du vent et à l'étude et au dimensionnement des systèmes de conversion de l'énergies éolienne [7],[8] et [17].

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

Le vent est un phénomène aléatoire qui présente de grandes variabilités qu'on peut donc classer en deux groupes : **la variabilité temporelle** et **la variabilité spatiale.**

1.6.1 La variabilité temporelle

La variabilité temporelle comprend trois sous-groupes :

- à basses fréquences : les variations annuelles, saisonnières, mensuelles.
- à moyennes fréquences : les variations journalières, horaires.
- hautes fréquences : les variations à la seconde ou à plus haute fréquence (Au-dessus de 1 Hz) caractéristiques de la turbulence du vent.

Pour chaque type de variabilité temporelle des problématiques différentes sont rencontrées.

La variabilité annuelle est très importante dans l'estimation du potentiel éolien d'un site. Habituellement, pour caractériser un site, il est nécessaire de s'appuyer sur des données de vent qui ont été mesurées pendant une certaine période, en général un an. Mais la variation annuelle entraîne un problème d'estimation pour une plus longue durée. En effet, il faut être capable d'évaluer si l'année de mesure peut servir de référence et si oui, jusqu'à quel point.

Les variabilités saisonnière et mensuelle, quant à elles, ont pour principaux impacts les problèmes de sous-production et surtout de surproduction durant des périodes spécifiques de l'année. En se basant sur des données de température et de pression annuelle plutôt que sur

des données saisonnières ou mensuelles, on ne prend pas en compte les différences de production causées par les variations de la densité de l'air qui peuvent être significatives [3].

Les variabilités journalière et horaire affectent le fonctionnement et plus particulièrement le taux d'utilisation quotidien de l'éolienne. En effet, l'éolienne subit toute une série de contraintes, aussi bien mécaniques qu'électriques, qui seront plus ou moins accentuées sur des périodes de longueur variable. Des journées ou des heures de fonctionnement à plein régime imposent de gros efforts sur les différentes structures etpeuvent être la cause de bris non prévus par une étude de la valeur moyenne du vent. Enfin, la variabilité à haute fréquence aussi désignée par le terme de turbulence, est la plus difficile à quantifier.

Pour ce type de variation, il faut particulièrement considérer les phénomènes de charges électriques. En effet, les rafales de vent peuvent engendrer sur plus d'une seconde, des pics de puissance supérieurs à la puissance maximale théorique de l'éolienne et donc causer de graves Répercussions sur les composants électriques et électroniques, comme par exemple déclencher un feu dans le tableau de puissance. Du côté des charges mécaniques, les rafales de vent peuvent engendrer d'importants couples dans le rotor de l'éolienne et ainsi causer des échauffements anormaux et même des bris dans l'arbre de transmission. On parle donc d'une problématique liée au contrôle de l'éolienne et à la régulation. Il s'agit alors de mettre en place des outils permettant de réagir aussi rapidement que possible à ces phénomènes de rafales.

1.6.2 La variabilité spatiale

La variabilité spatiale concerne principalement la variation verticale et le champ des directions du vent. La variation spatiale amène une dimension tout à fait différente au problème d'étude du vent. La problématique qui sera particulièrement abordée est celle de la variation verticale, le cisaillement vertical du vent.

En effet, la technologie évoluant, les tours éoliennes sont de plus en plus hautes pour capter le plus de vent possible. Elles atteignent maintenant 100 m dans certains cas et leur hauteur ne cesse d'augmenter. La plupart du temps, des longues périodes s'écoulent entre le moment des mesures de la vitesse du vent et celui de l'installation des éoliennes. Très souvent

alors, les mesures sont prises à une hauteur différente de celle à quelle sont installées les éoliennes.

Il est donc nécessaire de déterminer une relation liant les vitesses de vent pour différentes hauteurs. Plusieurs relations existent [24] et [25] mais dépendent des paramètres caractéristiques des sites comme la topographie et la rugosité. Il est donc nécessaire d'étudier l'influence de ces différents paramètres afin de déterminer les types de mesures qui doivent être prises afin de mieux évaluer le potentiel du site.

L'étude de la rose des vents est dans la plupart des cas une étude essentielle lorsque l'on veut évaluer le potentiel d'un site. Plus que pour l'évaluation du potentiel, cette étude permettra d'optimiser le choix de l'emplacement des éoliennes sur le site afin qu'elles soient exposées au meilleur vent possible.

1.7 Caractérisation horizontale de la vitesse du vent

Les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle, les modèles usuels étant :

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

1.7.1. Distribution de Weibull

La fonction de Weibull permet de caractériser la distribution fréquentielle des vitesses de vent sur une période donnée : une année, un mois ou une journée par exemple. Cependant, dans la majorité des cas, cette distribution est utilisée pour une période d'un an. Elle est définie par l'équation suivante [9], [14] :

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right)\left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \; exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^{k}\right] \quad \text{.....} \; (1.1)$$

Où :

- $f(V)$ est la fonction de densité de probabilité de Weibull qui représente la distribution en fréquences de vitesses mesurées

- k est le facteur de forme de la loi de Weibull, décrivant la distribution de la vitesse des vents (caractérise la forme de la distribution de fréquence).

- C, en m/s, est le facteur d'échelle de la loi de Weibull. Il est relié à la vitesse moyenne du vent par le facteur de forme k qui détermine la qualité du vent.

- La fonction de distribution cumulative associée (La fonction de répartition) est donc :

$$F(V) = 1 - exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \text{.....(1.2)}$$

La relation entre le facteur d'échelle de la loi de Weibull et la vitesse moyenne des vents s'établit par la formule suivante :

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1+{}^{1}/_{k})} \text{ ..... (1.3)}$$

Γ: la fonction gamma.

$\bar{V}$: la vitesse moyenne de vent en m /s.

1.7.2. Distribution hybride de Weibull

La distribution hybride de Weibull,[24] est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est supérieure ou égale à 15%. En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit :

$$f(V) = (1 - ff_0)\left(\frac{k}{C}\right)\left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \; exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \text{Pour } V > 0 \text{..... (1.4)}$$

$$f(V) = ff_0 \text{ Pour } V < 0 \text{ ..... (1.5)}$$

Où ff_0 représente la fréquence des vents calmes.

1.7.3. Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2. Sa densité de probabilité est donnée par :

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

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites.

1.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de fournir une synthèse sur les systèmes éoliens, et les outils nécessaires au choix et à l'optimisation des machines en tout point du territoire au bais des atlas permettant de détecter les zones ventées, et les puissances éoliennes disponibles au niveau de l'hélice.

De tous ce qui précède nous avons opté de faire une modélisation et une simulation d'un système de conversion éolienne sur le site de Laghouat en utilisant les paramètres météorologique, et puis la détermination des paramètres de Weibull k et c et donc la puissance

2.1. Introduction

Dans un monde de plus en plus conscient de l'état peu glorieux de son environnement. L'utilisation d'éoliennes et par conséquent l'installation de parcs éoliens est donc devenue de réalités incontournables. Dans ce dernier cas le choix du site et la caractérisation statistique de la vitesse de vent de ce site représentent les facteurs les plus importants dans le processus d'implantation d'un parc éolien. En effet, la valeur moyenne de la vitesse du vent sur une année ou une période étudie et sa variation dans le temps sont les facteurs qui ont le plus grand impact sur la rentabilité économique d'un parc éolien. Ainsi l'analyse de la vitesse du vent sur un site représente la première étape de tout projet éolien permettant d'estimer la capacité de production de ce dernier. Comme le vent présente un caractère aléatoire son analyse doit se baser sur des méthodes statistiques. Ainsi les paramètres qui vont caractériser

le régime des vents sur un site seront la valeur de la vitesse moyenne du vent et les lois statistiques permettant de représenter sa variation temporelle.

Parmi ces lois on retrouve la loi de Weibull qui permet de caractériser la distributiot des fréquences de vitesses de vent. L'analyse des d ux paramètres qui caractérisent cette loi est à l'origine de nombreuses études ([5], [6], [11] et [12]). En effet, ces deux paramètres que sont le facteur de forme k et le facteur d'échelle C dictent la manière dont la vitesse du vent varie statistiquement durant une période donnée et sont caractéristiques de chaque site.

Si la loi de Weibull nous permet de déterminer le comportement statistique de la vitesse du vent dans le temps, il existe d'autres lois qui nous permettent de mesurer la variabilité du vent au même endroit, au même moment mais à des hauteurs différentes. Des lois dites de cisaillement vertical permettent d'évaluer cette variabilité, elle est d'une importance particulière et croissante car la nécessité de produire plus d'énergie implique une élévation de la hauteur des éoliennes devant celle des appareils de mesures qui est en général moindre.

L'objectif principal de l'analyse des données de vent est une meilleure compréhension de sa variation temporelle et spatiale, Pour cela plusieurs étapes spécifiques sont identifiées.

Tout d'abord, on a utilisé en place des algorithmes pour des simulations en (Matlab) permettant de calculer les différents facteurs identifiés comme représentatifs de la variation du vent, une caractérisation statistique de la variation de chacun de ces facteurs, il sera alors possible de créer des résultats graphiques permettant d'analyser ces différentes variations.

Cette analyse permettra d'identifier l'influence des paramètres physiques et temporels (influence des années, des saisons, des mois....) sur les différents facteurs qui caractérisent la variabilité de la vitesse du vent.

2.2. Variabilité temporelle et spatiale de la vitesse de vent

2.2.1. Etude statistique

Les trois méthodes statistiques utilisées pour la modélisation des distributions statique du vent sont :

- la loi de Weibull. (équation 1.2). [26]
- la loi hybride de Weibull. (équation 1.5). [27]
- la loi de Rayleigh. (équation 1.5). [26]

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

- la vitesse moyenne du vent.
- la vitesse cubique moyenne du vent.

2.2.1-a Définition des paramètres vent [30]

a. Vitesse moyenne

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

$$\langle \boldsymbol{V} \rangle = \int_{\mathbf{0}}^{\infty} \boldsymbol{V f(V) dV} \quad \text{.....} \quad (2.1)$$

b. Vitesse cubique moyenne

Alors que la vitesse cubique moyenne se détermine par :

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

Les expressions relatives aux différents modèles sont portées dans le **tableau 2.1.** Γ étant la fonction gamma donnée par :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} exp(-t) t^{x-1} dt \quad \text{.....} \quad (2.3)$$

c. La variance et l'écart type : La variance est donné par :

$$\partial^2 = \int_0^{\infty} (V - \langle V \rangle) f(V) dV \quad \text{.....} \quad (2.4)$$

La racine carrée de la variance est l'écart quadratique moyen

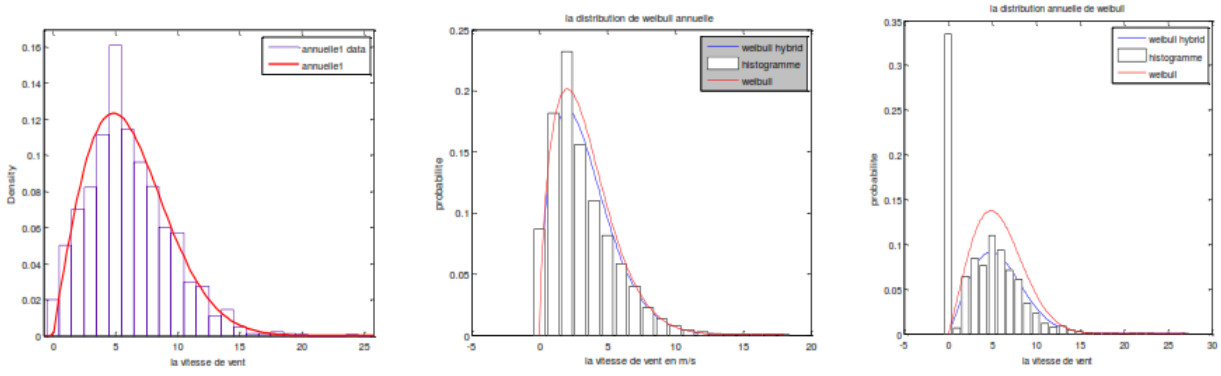
Tableau 2.1 : Expressions des vitesses moyennes, cubiques moyennes et la variance selon le modèle utilisé.

Distributions	$\langle \boldsymbol{V} \rangle$	$\langle V^3 \rangle$	∂_2
Weibull	$C\,\Gamma\,(1+\frac{1}{k})$	$C^3\Gamma\,(1+\frac{1}{k})$	$C^2[\Gamma\,(1+\frac{2}{k})$- $\Gamma^2(1+\frac{1}{k})]$
Hybrid Weibull	$(1-ff_0)C\,\Gamma\,(1+\frac{1}{k})$	$(1-ff_0)C^3\,\Gamma\,(1+\frac{3}{k})$	$(1-ff_0)C^2[\Gamma\,(1+\frac{2}{k})$- $\Gamma^2(1+\frac{1}{k})]$
Rayliegh	0.886 C	$1.32C^3$	$0.2146C^2$

2.2.1-b Forme de la distribution de Weibull

La (**figure 2.1)** représente les distributions des fréquences du vent par classes pour les trois sites étudies, a savoir les régions Sud (hassi r'mel), Ouest (station de mesure de l'université de Laghouat) et Est (station météo de Laghouat).

On remarque que la distribution des fréquences des trois sites est différente. En effet, avec 33% de vent ou la vitesse est de 0m/s, la distribution hybride de Weibull s'applique à la région Est de Laghouat alors que la distribution de Weibull convient au région Ouest et sud de Laghouat qui totalise une fréquence de faibles vitesses inférieure à 9% et 2% consécutif.



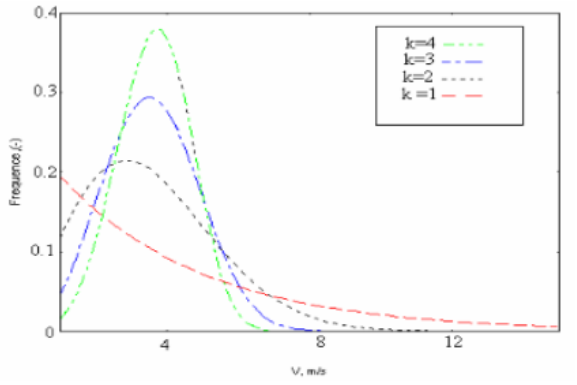
(a) Sud (b) Ouest (c) Est

Figure 2.1 : Histogrammes des vitesses et courbes d'ajustement pour les lois de Weibull et hybride Weibull pour les trois régions de Laghouat.

L'effet du facteur de forme k sur l'allure de la distribution est mis en évidence à travers la (**figure 2.2)**. De même l'effet du facteur d'échelle C sur l'allure de la distribution est mis en évidence grâce à la (**figure 2.3)**, ou on remarque que pour k>1 le maximum de la fonction s'éloigne de l'axe des y alors que pour k=1 la distribution prend la forme d'une loi exponentielle Lorsque k=2, on retrouve la distribution de Rayleigh alors que pour k>3 la fonction se rapproche d'une loi binomiale [9].

2.2.1-c Variation des paramètres de weibull

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



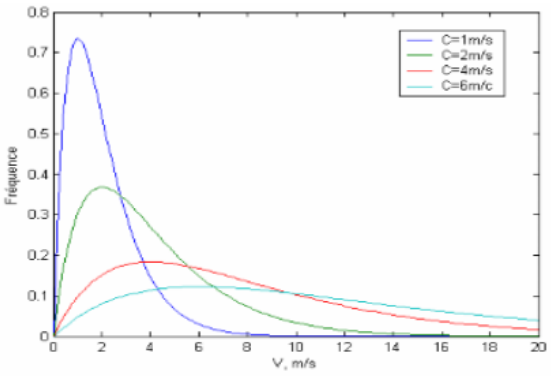


Fig.2.2.a: Variation du facteur de forme *k*. d'échelle Pour C=4m /s

Fig.2.2.b. Variation du paramètre C pour k=2

Figure 2.2 : Variation des paramètres de weibull.

Ainsi, le facteur de forme k suggère la forme de la courbe, une valeur élevée de k implique une distribution étroite avec des vents concentrés autour d'une valeur, alors qu'une faible valeur de k implique des vents largement dispersés. Le facteur d'échelle C indique de la position du mode de la courbe comme montré par (**figure 2.2)**, sa valeur est élevée pour des sites ventés et faibles pour les sites peu ventés.

2.2.1-d Variation de distribution de weibull par la hauteur

Les paramètres (facteur de forme k et facteur d'échelle C) sont calculés pour chaque niveau, Le facteur d'échelle et la vitesse moyenne du vent passent du simple au double lorsque l'altitude des points de mesure varie de 2m à 10m. À partir de cette altitude la variation prend une allure asymptotique [15].

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

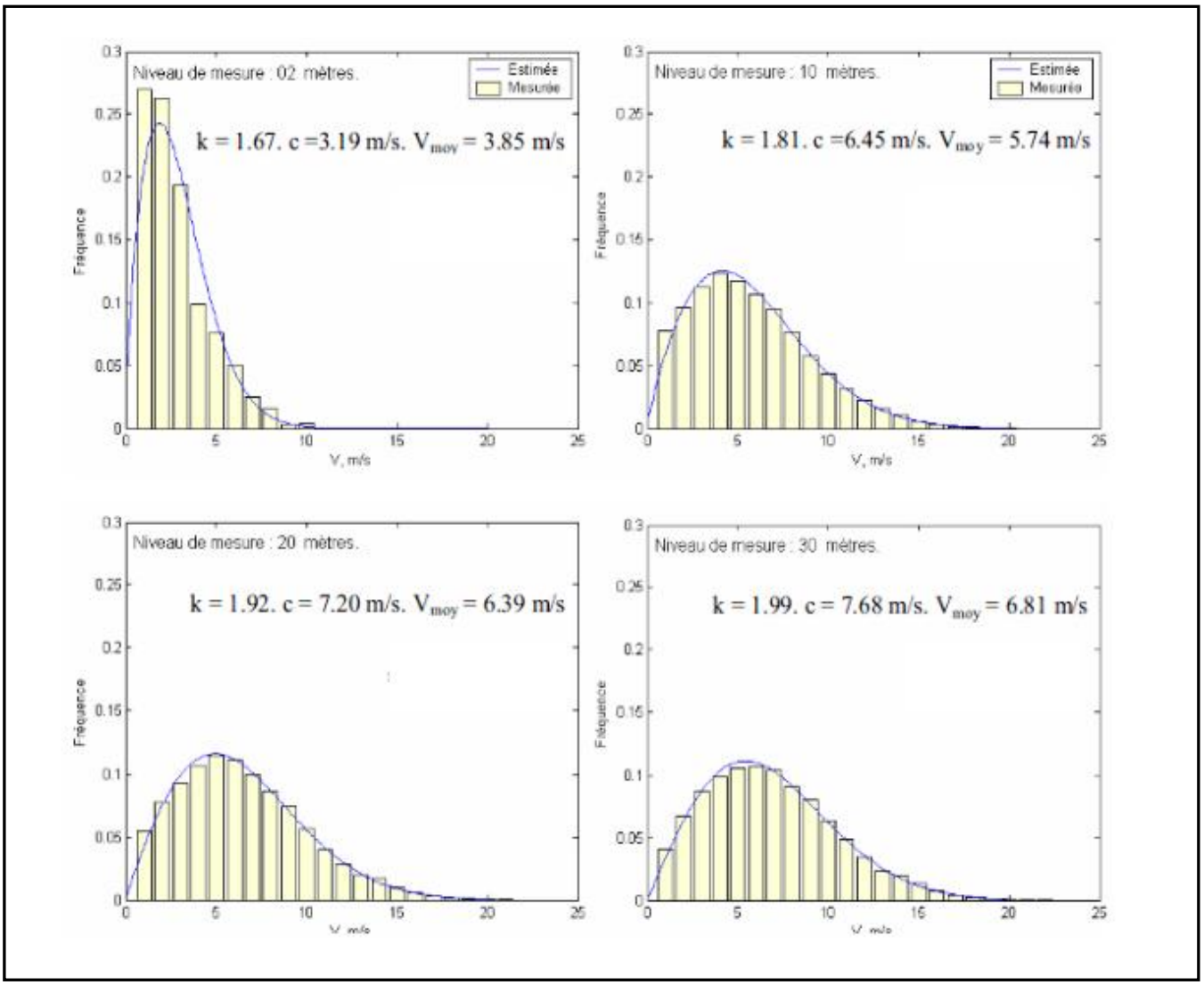
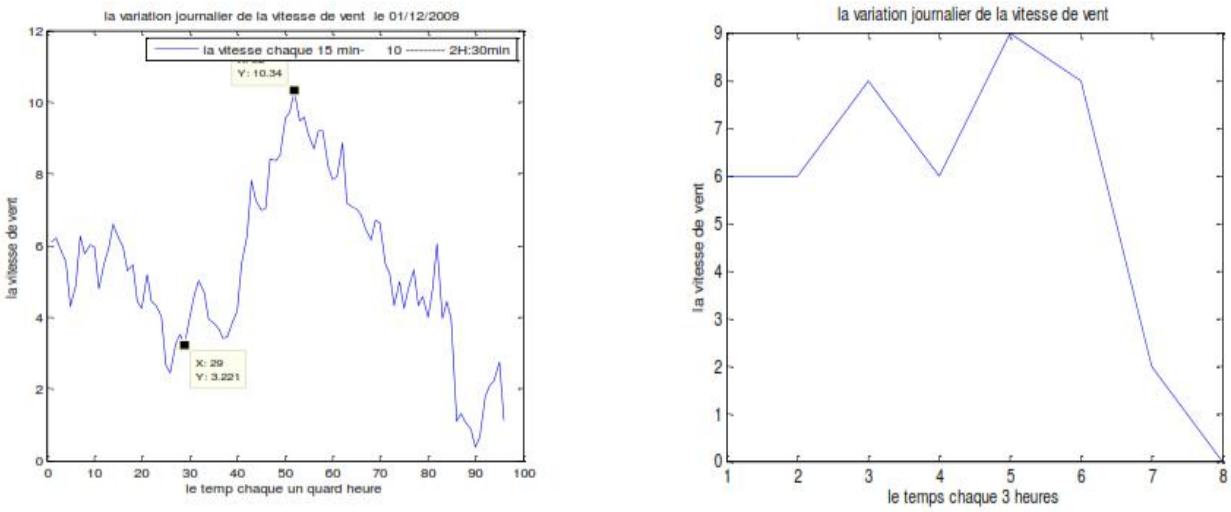


Figure 2.3 : Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull. pour chaque altitude.

2.2.2. Etude journalière:

La variation journalière de la vitesse du vent est due aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire. La vitesse moyenne du vent varie peu la nuit et augmente pendant la journée à partir du lever du soleil. La **(figure 2.4)** montre la variation journalière de la vitesse pour les stations Est et Ouest de Laghouat. Pour ces deux régions les maximums sont atteints vers 15 h à l'Est entre 13h et 15h:30 à l'Ouest.



(a) l'Ouest de la région (b) l'Est de la région

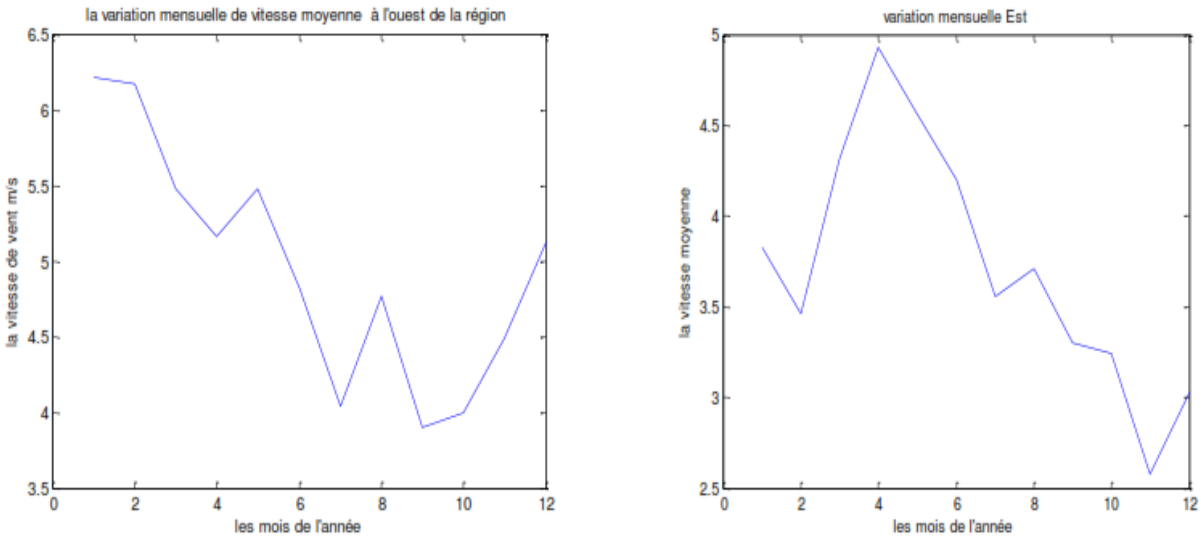
Figure 2.4 : Variation journalière de la vitesse du vent pour les régions Est et Ouest de Laghouat.

2.2.3. Etude mensuelle de la vitesse

2.2.3-a Variation mensuelle

Les variations saisonnières ou mensuelles de la vitesse moyenne du vent dépendent du lieu géographique et différent d'un site à un autre. Seuls les relevés météorologiques des paramètres vent sur une longue période peuvent caractériser ces variations.

La (**figure 2.5)** montre la variation mensuelle de la vitesse du vent pour les trois régions étudies. On remarque que l'amplitude des variations est nettement supérieure à Hassi R'mel.



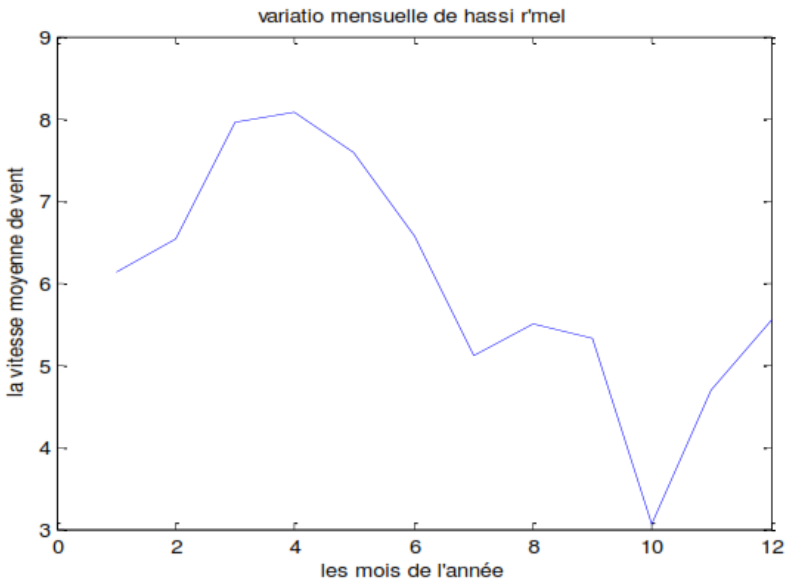


Figure 2.5 : variation mensuelle de vitesse moyenne du vent.

2.2.3-b Traitement des données de la région de Laghouat :

La vitesse moyenne du vent va permettre d'avoir des informations non seulement sur l'importance mais aussi sur l'évolution de cette source d'énergie tout au long de l'année. En effet, il est indispensable lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne de connaître les périodes pour lesquelles ces systèmes seront plus ou moins productifs.

Ceci permettra aussi de déduire leurs disponibilités en fonction des besoins énergétiques qui varient selon les saisons.

- **La région de hassi r'mel :**

Les mesures sont des mesures journaliers prélevées pendant 4 ans (2004,2005, 2006 et 2007) par la station météo de l'aéroport de Hassi R'mel au sud de Laghouat. Dans la (**figure 2.6)** sont représentés les histogrammes en fréquences de la vitesse du vent calculée pour un pas de 1 m/s pour des mesures à 10m avec les courbes représentatives obtenues par l'ajustement au sens du maximum de vraisemblable, en utilisant la distribution de Weibull. Les paramètres (facteur de forme k et facteur d'échelle C) sont calculés pour chaque mois.

Tableau 2.2 : Les résultats mensuels de traitement à 10 m

Mois	Vitesse moyenne [m/s]	Vitesse cubique moyenne	Vitesse max [m/s]	Facteur d'échelle c [m/s]	Facteur de forme k	Calme %
Janvier	6.1323	444.45	24	6.9184	1.982	11.88
Février	6.5407	579.2269	24	7.3644	1.8531	4.42
Mars	7.9569	919.6945	20	8.9837	2.0954	0.81
Avril	8.0748	773.2056	17	9.0707	2.7802	0
mai	7.5921	694.7848	15	8.5586	2.4779	0.81
Juin	6.5706	465.1574	17	7.4134	2.3751	0
Juillet	5.1101	261.5763	14	5.7630	1.9495	2.42
Aout	5.5076	270.5143	13	6.2736	2.5220	1.30
Septembre	5.3159	254.3488	14	6.0010	2.2823	0.83
octobre	3.0686	257.7195	14	5.7147	1.9316	0
Novembre	4.6911	218.8221	12	5.2791	1.8146	1.67
Décembre	5.5588	337.8666	15	6.2684	1.9430	2.42

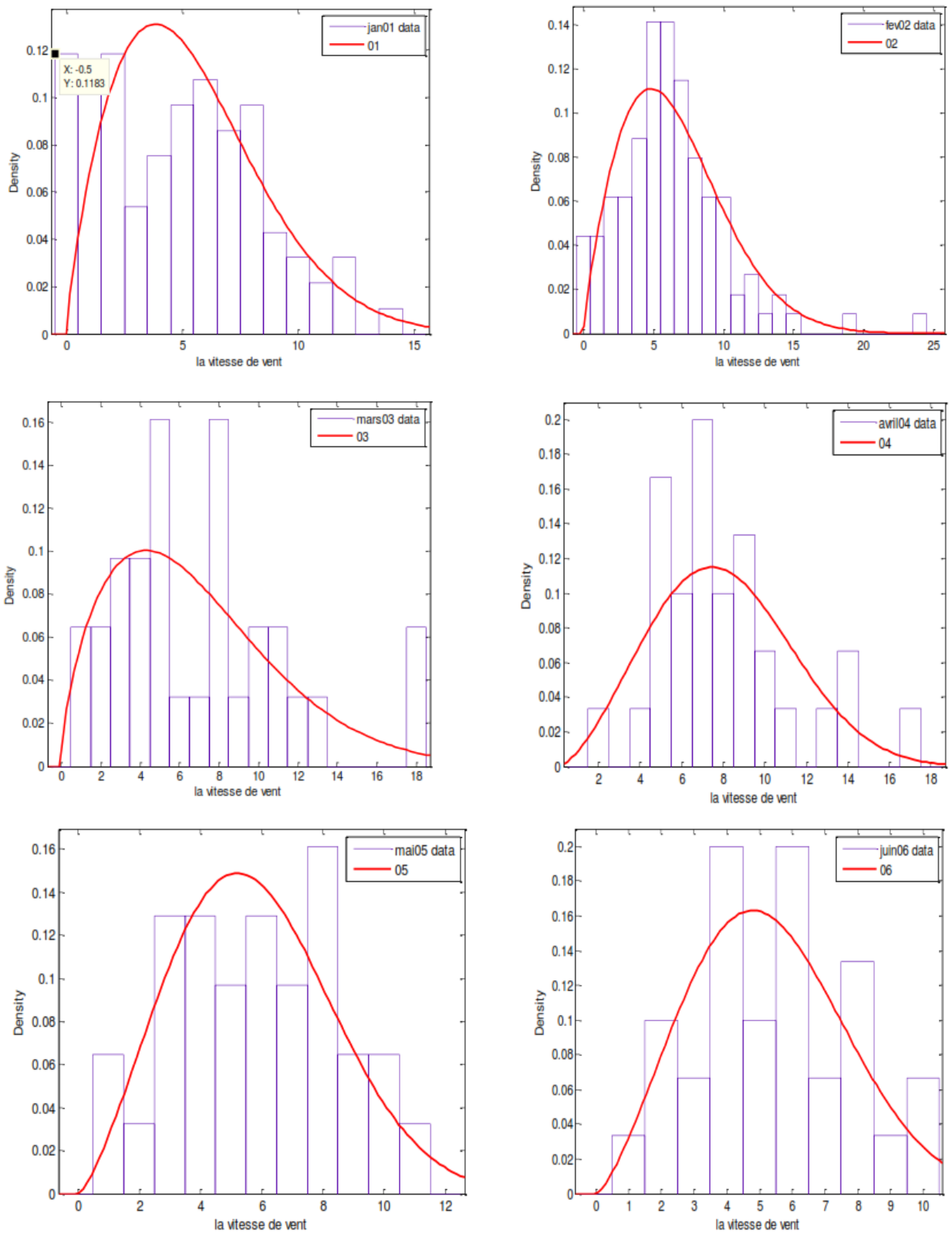


Figure 2.6 : Histogrammes et courbes mensuelles représentatives ajustées selon la loi de Weibull pour la région de Hassi R'mel à 10m.

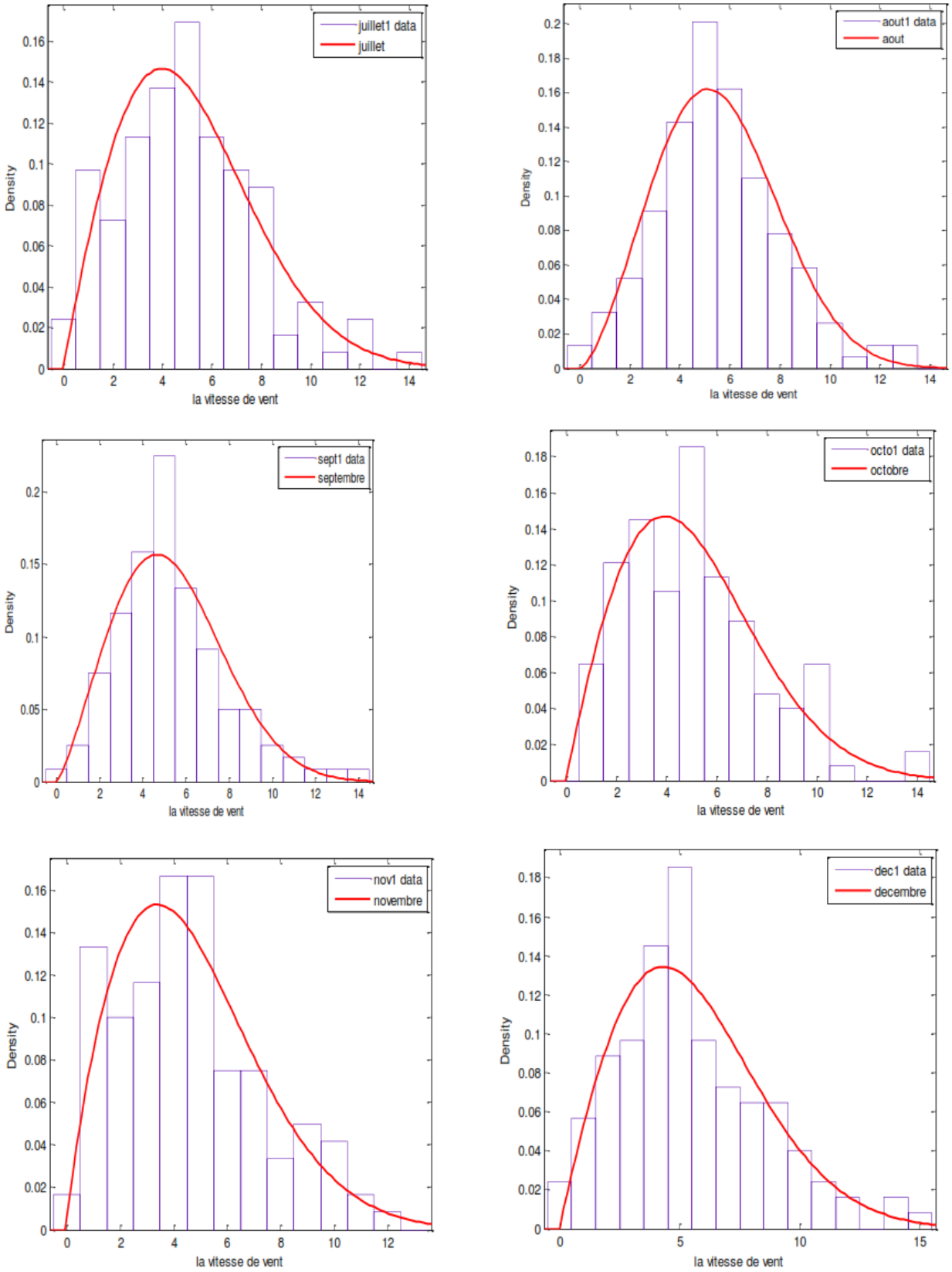


Figure 2.6 : Histogrammes et courbes mensuelles représentatives ajustées selon la loi deWeibull pour la région de Hassi R'mel à 10m.

Les mois types sont le mois d'avril et le mois de mars ou on à k=2.7802, C=9.070m/set V=8.07m/s pour le mois d'avril et k=2.095, C=8.98m/s, V=7.956m/s pour le mois de mars.

La vitesse max égale à 17,20 respectivement pour les mois avril et mars.

- **La station métro de Laghouat :**

Les mesures sont prélevées chaque trois heures pendant 4 ans (2006, 2007, 2008 et 2009) par la station météo de l'aéroport de Laghouat.

En (**figure 2.7)** sont représentés les histogrammes en fréquences de la vitesse du vent calculée pour un pas de 1 m/s pour des mesures à 10m avec les courbes représentatives obtenues par l'ajustement au sens du maximum de vraisemblable en utilisant la distribution de Weibull hybride car L'évaluation de ces histogrammes a révélé que les fréquences des vents calmesdans les régions Est sont supérieures à 15%. Afin de prendre cela en compte des distributions hybrides seront considérées pour cette région.

Les paramètres (facteur de forme k et facteur d'échelle C) sont calculés pour chaque mois.

Tableau 2.3 : les paramètres sont calcules pour la région Est de Laghouat à 10m

Les mois	Vitesse moyenne [m/s]	Vitesse cubique moyenne	Vitesse max [m/s]	Facteur d'échelle c [m/s]	Facteur de forme k	Calme %
Janvier	3.8240	349.3886	22	7.2151	1.7505	40.38
Février	3.46	214.2982	18	6.21	1.88	37.21
Mars	4.32	380.3706	27	7.4086	1.8841	34.19
Avril	4.93	367.8160	19	7.4511	2.2519	25.27
Mai	4.5620	281.5183	21	6.8785	2.3363	25.15
Juin	4.20	213.850	13	6.5680	2.7282	28.02
Juillet	3.5573	160.9549	18	5.9770	2.4311	32.80
Aout	3.7128	183.8942	19	6.0483	2.2308	30.69
Septembre	3.3028	145.1907	13	5.8812	2.4185	36.66
octobre	3.2422	139.7812	14	5.8463	2.4442	37.46
Novembre	2.5773	116.4630	15	5.9087	2.3597	50.78
Décembre	3.0286	169.6992	16	6.4247	2.2239	45.06

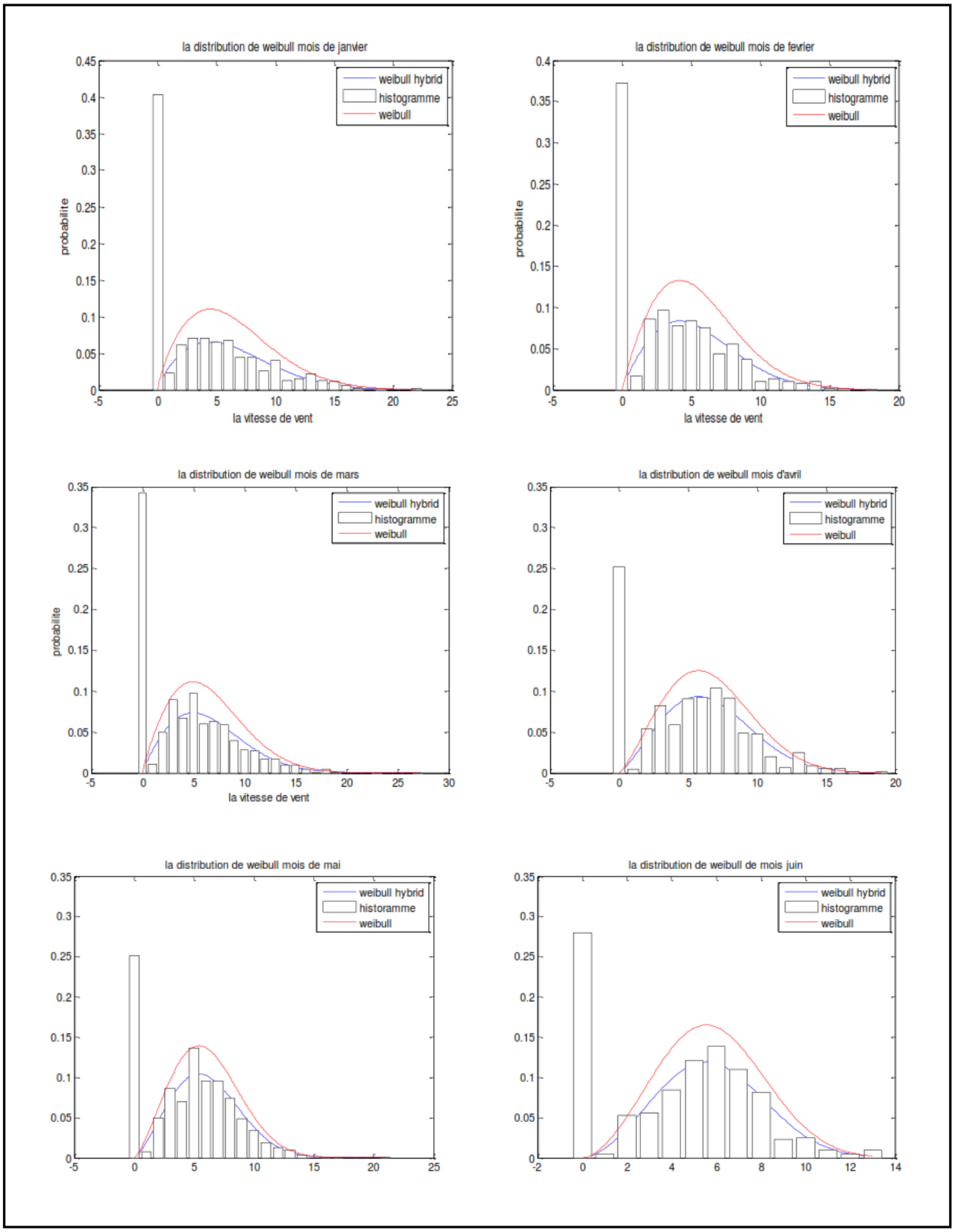

la distribution de weibull mois de janvier
weibull hybrid
histogramme
weibull
probabilite
la vitesse de vent
la distribution de weibull mois de fevrier
weibull hybrid
histogramme
weibull
probabilite
la vitesse de vent
la distribution de weibull mois de mars
weibull hybrid
histogramme
weibull
probabilite
la vitesse de vent
la distribution de weibull mois d'avril
weibull hybrid
histogramme
weibull
la distribution de weibull mois de mai
weibull hybrid
historamme
weibull
la distribution de weibull de mois juin
weibull hybrid
histogramme
weibull

Figure 2.7: Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull, weibull hybrid pour chaque mois à de La station métro de Laghouat 10m.

.

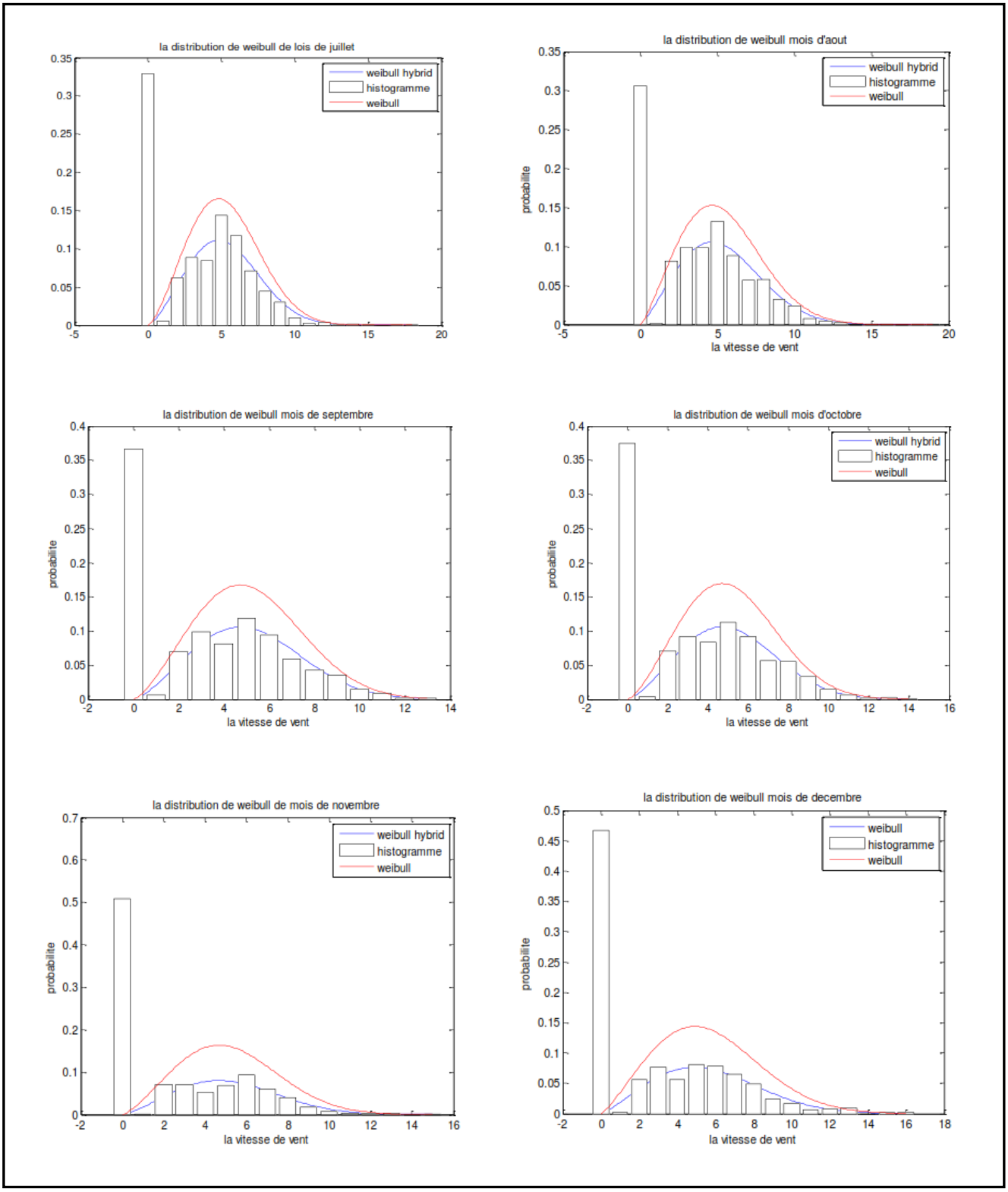


Figure 2.7: Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull, weibull hybrid pour chaque mois à de La station métro de Laghouat 10m.

❖ Traitement des données de la station de l'université :

La station de l'université est située à l'ouest de la région de Laghouat. les mesures traitées sont mesurées à 10m d'altitude.

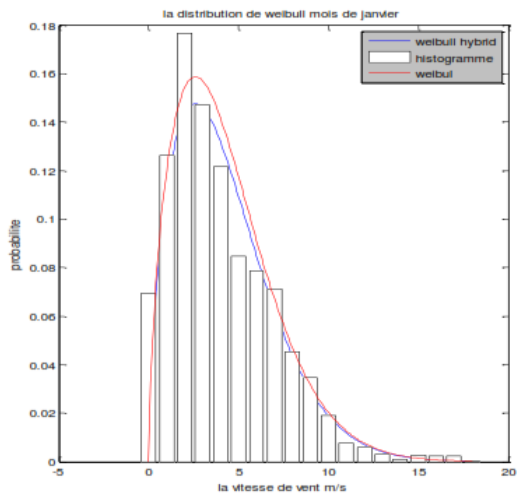
Les mesures sont prélevées chaque 15minutes pendant 15mois par la station météo de l'université Amar Thelidji Laghouat.

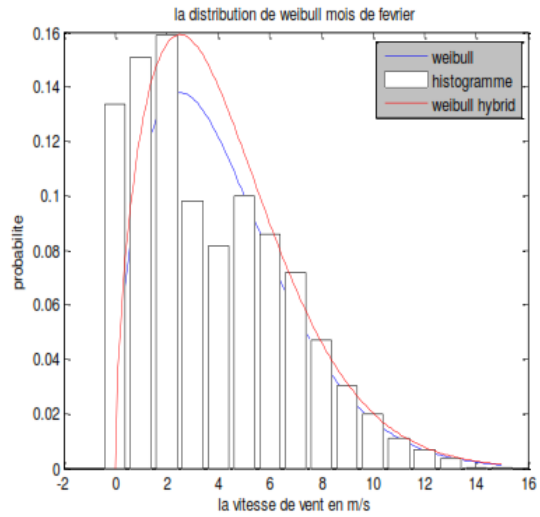
La (**figure 2.8)** représente les histogrammes en fréquences de la vitesse du vent calculée pour des pas de vitesse de 1 m/s pour des mesures à 10m d'altitude avec les courbes représentatives obtenues par une simulation en Matlab utilisant l'ajustement au sens du maximum de vraisemblable avec la distribution de Weibull. Les paramètres (le facteur de forme k et le facteur d'échelle C) sont calculés pour chaque mois.

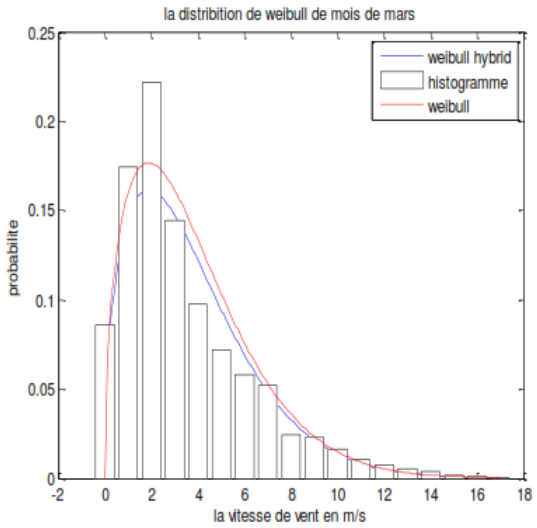
Tableau 2.4 : Les paramètres de la région Ouest de Laghouat à 10m.

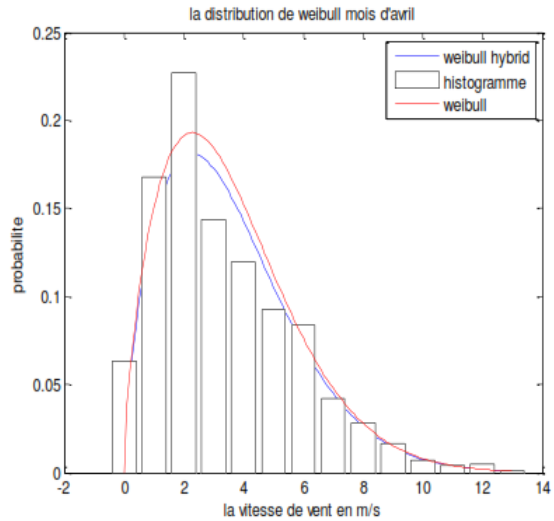
Mois	Vitesse moyenne [m/s]	Vitesse cubique moyenne	Vitesse max [m/s]	Facteur d'échelle c[m/s]	Facteur de forme k	Calme %
Janvier	5.5452	367.149	18	6.23386832	1.7907	6.96
Février	5.4866	320.83	15	6.18898774	1.9668	13.36
Mars	4.9330	292.82	17	5.50823925	1.6261	8.56
Avril	4.6966	214.451	13	5.2886997	1.8531	6.32
mai	4.970	225.671	12	5.61178131	2.0809	4.40
Juin	4.4232	168.957	14	4.98876931	1.9573	4.41
Juillet	3.7785	96.6011	11	4.26650693	2.1397	7.41
Aout	4.3821	162.233	13	4.94389393	1.9814	4.92
Septembre	3.6394	101.983	15	4.09435452	1.8175	8.14
octobre	3.7213	111.507	12	4.18266889	1.7826	14.52

Novembre	4.1166	174.943	10	4.58814563	1.5873	23.51
Décembre	4.6379	160.252	14	5.14016534	1.5062	15.93
Annuelle	4.4617	192.027	17	5.0149	1.7838	8.69









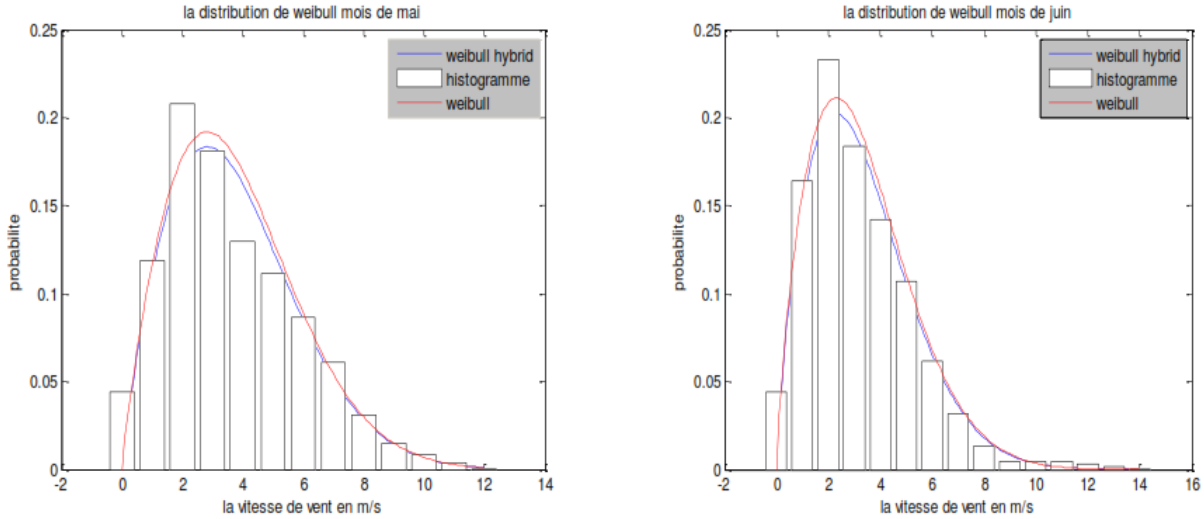
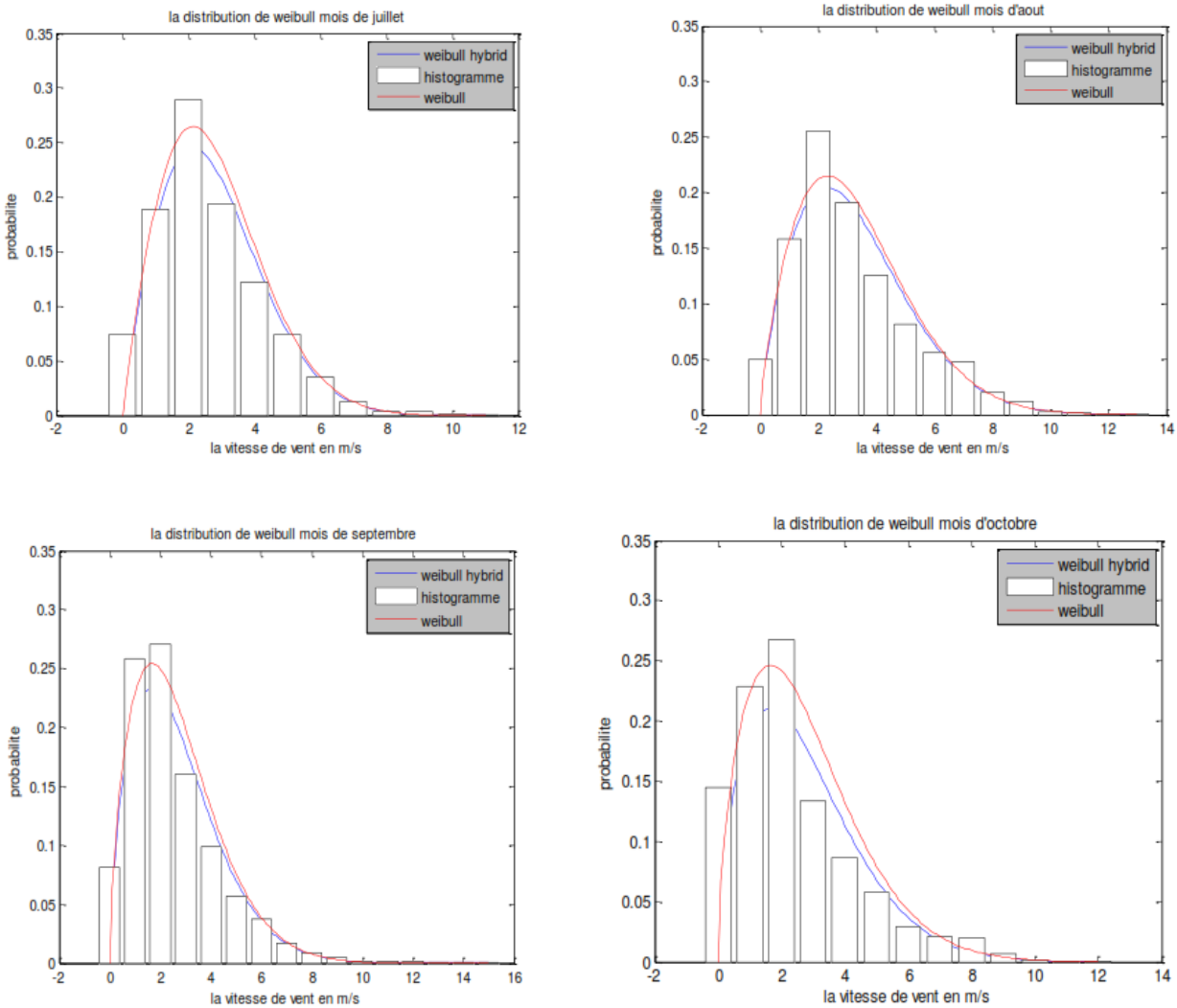


Figure 2.8 : Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull pour chaque mois de la station de l'université à 10m.



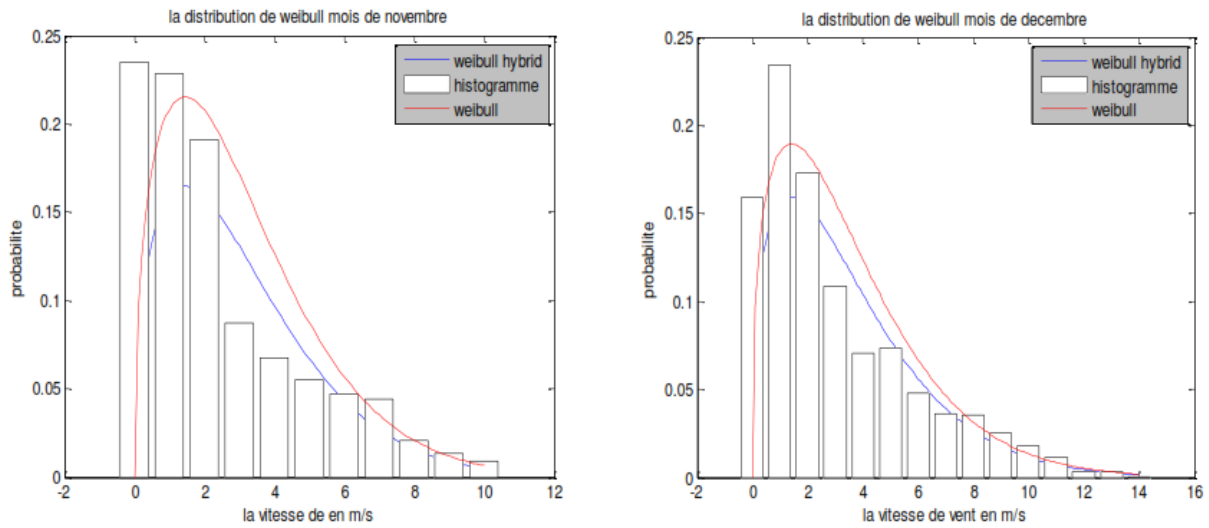


Figure 2.8 : Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull pour chaque mois de la station de l'université à 10m.

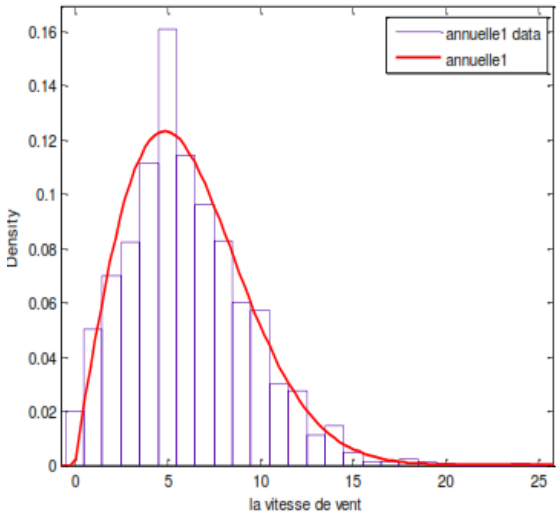
Les courbes de la distribution statistique des fréquences mensuelles des vitesses du vent des mois janvier, février, juillet et septembre de la région Ouest de Laghouat sont représentées par la (**figure2.8)**. L'évolution de la distribution mensuelle diffère d'un mois à l'autre, la région Ouest de Laghouat présente un régime de vent pouvant atteindre 18 m/s en janvier et 10 m/s en novembre.

On remarque que les mois novembre et septembre restent des mois particulier de l'année. Et que tous les distributions sont étroite autour de la moyenne, car les mesures ont été prélèves à
10m de distance [21].

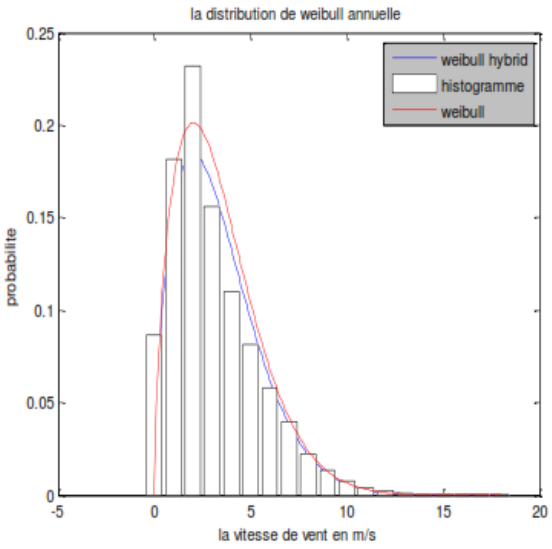
2.2.4. Etude annuelle de la vitesse de vent :

En (**figure 2.9)** sont représentés les histogrammes en fréquences de la vitesse du vent annuelle calculée pour un pas de 1 m/s avec les courbes représentatives obtenues par l'ajustement au sens du maximum de vraisemblable en utilisant la distribution de Weibull.

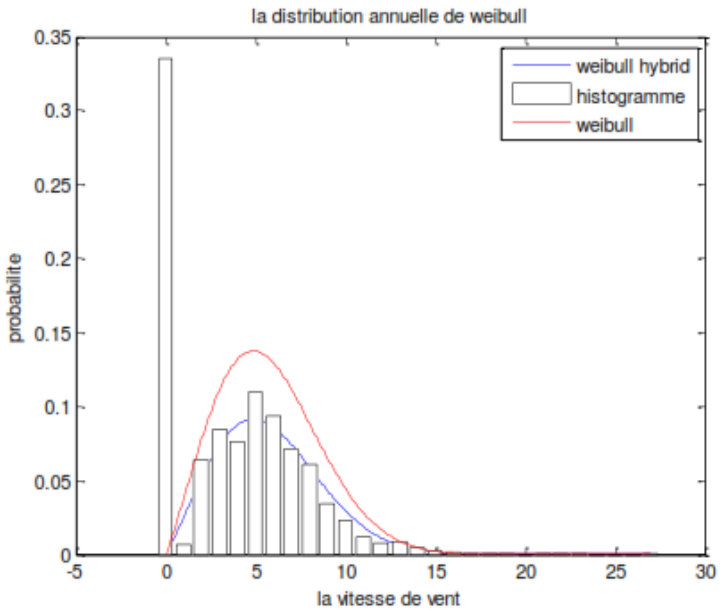
Les paramètres (facteur de forme k et facteur d'échelle C) sont calculés pour une période Données.



Hassi R'mel



L'Ouest de Laghouat



L'Est de Laghouat

Figure 2.9 : Histogrammes et courbes représentatives ajustées selon la loi de Weibull pour chaque région à 10 m.

La vitesse de vent

Les courbes de la distribution statistique des fréquences annuelles des vitesses du vent pour la région de Laghouat sont représentées en (**figure 2.9)**. L'évolution de la distribution annuelle diffère d'une région de l'autre. La région Ouest de Laghouat présente un régime de vent pouvant atteindre 18 m/s et la courbe de fréquence tend vers zéro pour une vitesse de vent égale à 12m/s avec une vitesse moyenne annuelle égale à 4.8853m/s.

La région Est de Laghouat présente un régime de vent pouvant atteindre 27m/s et la courbe de fréquence tend vers zéro pour une vitesse de vent égale 15m/s avec une vitesse moyenne annuelle égale à 3.8503m/s.

La région de Hassi R'mel présente un régime de vent pouvant atteindre 24 m/s et. La courbe
de fréquence tend vers zéro pour une vitesse de vent égale à 20m/s avec une vitesse moyenne annuelle égale à 6.12m/s.

On remarque que la région de Hassi R'mel reste le plus ventes de point de vue. Vitesse et puissance disponible.

Tableau 2.5 : Les paramètres annuels des distributions de la région de Laghouat à 10 m.

La région	Vitesse moyenne [m/s]	Vitesse cubique moyenne	Vitesse max [m/s]	Facteur d'échelle c[m/s]	Facteur de forme k	Calme %
Hassi R'mel	6.1290	446.1282	24	6.9139	1.9715	2.03
Est	3.8503	230.7384	27	6.5424	2.1471	33.55
Ouest	4.4617	192.0270	18.44	5.0149	1.7838	8.69

2.3 Conclusion

On peut constater que le vent à la région de Laghouat obéit une même variation mensuelle.il est alors de classer les moins ventés aux plus ventés. En effet, on remarque que les mois de printemps sont les plus ventés particulièrement dans les régions avec une variation de ca valeur moyenne qui varie d'une région à l'autre. La vitesse moyenne du vent, enregistrées dans la région de Hassi R'mel est parmi les plus élevées en Algérie et permettent une rentabilité intéressante des systèmes éoliens.

3.1 Introduction

Une étude statistique des données du vent a été utilisée pour le calcul du potentiel énergétique éolien disponible sur le site de Laghouat permettant le choix des couloires ventés, on compte tenu des nécessités de conversion du mouvement de l'air (vitesse du vent) en mouvement de rotation de l'éolienne, il y a nécessairement une suite de pertes d'énergie, en cascade, avant d'arriver à l'utilisation (génératrice, pompe,). En effet en introduisant les limites des machines, on calcule le potentiel utile réellement utilisable.

3.2 Potentiel énergétique éolien

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'éolienne) l'énergie disponible (potentiel) subit une suite de pertes en cascades, jusqu'à la sortie machine, (limite de Betz, seuils machine et pertes

de conversion). [19] Cette dégradation de l'énergie est représentée schématiquement en (**figure3.1)**.

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

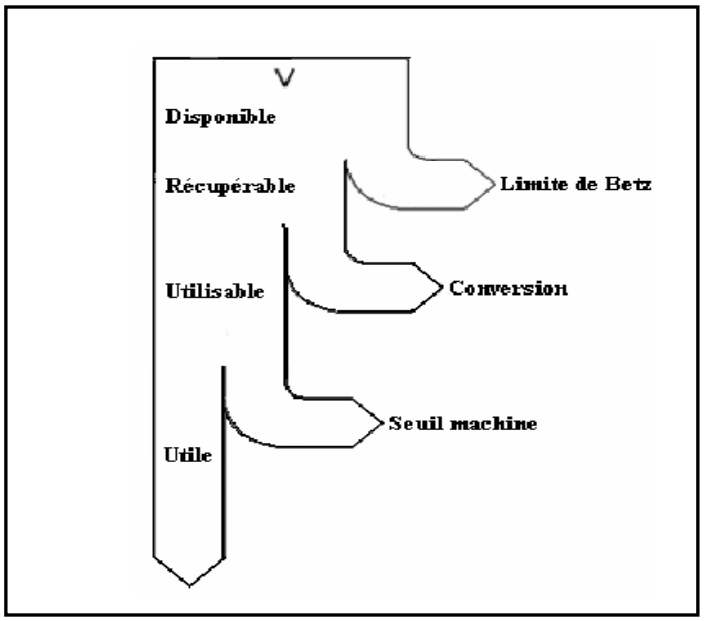


Figure 3.1 : Représentation schématique des dégradations successives de l'énergie Éolienne avant utilisation

3.2.1Puissance énergétique disponible

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

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2}\rho\langle V^3 \rangle \quad \text{..... (3.1)}$$

La détermination de la vitesse moyenne et cubique moyenne se fait à partir de l'étude statistique de la distribution des fréquences par classes de la vitesse du vent [31].

Tableau 3.1 : Les énergies disponibles de la région de Laghouat à 10m en [W/m^2.S].

mois	L'ouest de Laghouat	L'est de Laghouat	Le sud de Laghouat (Hassi rmal)
Janvier	229.468	218.3417	277.7823
Février	320.831	133.9364	362.0168
Mars	183.051	237.7316	574.8090
Avril	134.032	229.8850	483.2535
Mai	141.04	175.9489	434.2485
Juin	105.59	133.3656	290.6984
Juillet	60.3757	100.5968	163.4864
Aout	101.395	114.9339	169.0715
Septembre	63.7397	90.7442	158.8680
Octobre	69.6919	87.3632	161.0747
Novembre	109.3399	72.7894	136.7638
Décembre	100,1589	106.0620	211.1666
annuelle	120.0169	144.2115	278.8301

3.2.2. Potentiel énergétique éolien récupérable (théorème de Betz)

L'énergie cinétique disponible est convertie en énergie mécanique en utilisant une machine à aubes (où pâles) dite communément éolienne. La vitesse du vent en aval de la roue n'étant jamais nulle, ceci implique que la puissance éolienne disponible n'est pas entièrement récupérée au niveau de l'hélice, [20].

Soit une masse d'air traversant un disque de surface A, à une vitesse V et soient V_{am} et V_{av} les vitesses respectives en amont et en aval de la surface voire (**figure 3.2**). L'équation de conservation de la quantité de mouvement permet d'écrire que la force qui s'exerce sur le disque est égale à la variation de la quantité de mouvement, soit :

$$F = \rho V A (V_{av} - V_{am}) \quad \text{.....} \quad (3.2)$$

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

$$\mathrm{P} = FV = \rho V^2 A (V_{av} - V_{am}) \quad \text{.....} \quad (3.3)$$

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

$$P = \frac{1}{2} \rho A V \left({V_{av}}^2 + {V_{am}}^2 \right) \quad \text{.....} \quad (3.4)$$

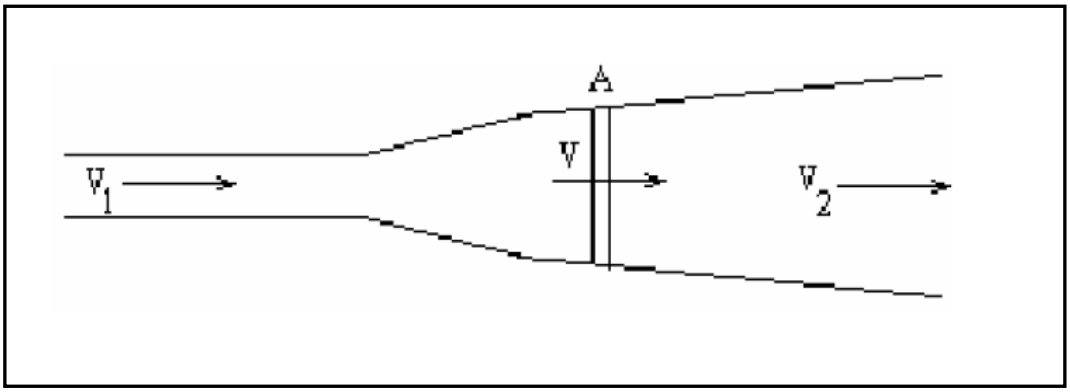


Figure 3.2 : Bilan sur une section de l'hélice.

Par identification, il vient : $V = \frac{V_{av} + V_{am}}{2}$ ..... (3.5)

En remplaçant V dans l'équation (3-1), on obtient :

$$P = \frac{1}{2}\rho A\left({V_{av}}^2 + {V_{am}}^2\right) \quad \text{..... (3.6)}$$

Le maximum récupéré par la roue est obtenu pour :

$$\frac{\partial P}{\partial V_{am}} = 0 \quad \text{Et} \quad \frac{\partial^2 P}{V_{am}^2} < 0 \quad \text{..... (3.7)}$$

Soit pour :

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

(3.8)

Equation dont la solution est donnée par :

$$V_{am} = \frac{1}{3}\, V_{av} \quad \text{.....}$$

(3.9)

En remplaçant dans l'équation (3.6), la puissance maximale qui peut être extraite par une roue est égale à :

$$P_{max} = \frac{1}{2} A\, \rho \left[V_{av}^2 - \left(\frac{V_{av}}{3}\right)^2\right]\left[\frac{V_{av}}{2} + \frac{V_{am}}{6}\right] \quad \text{.....}$$

(3.10)

En se référant à l'équation (3-1), on obtient :

. $$\langle P_{max} \rangle = \frac{16}{27} \langle P \rangle \quad \text{.....} \quad (3.11)$$

Cette limite (environ 0.59) est appelée 'limite de Betz' ; En prenant en considération la limite de Betz et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable par unité de surface est donnée par:

$$\langle P_r \rangle = 0.37 \langle V^3 \rangle \quad \text{.....} \quad (3.12)$$

Tableau3.2 : Les énergies récupérables dans la région de Laghouat en [W/$m2s$] à 10m.

Le site	L'ouest de Laghouat	L'est de Laghouat	Le sud de Laghouat (Hassi rmal)
Janvier	135,84513	129.273782	164.4465
Février	118,7071	79.290334	214.313953
Mars	108,3434	140.737122	340.286965
Avril	79,34687	136.09192	286.086072
Mai	83,49827	104.161771	257.070376
Juin	62,51409	79.1245	172.108238
Juillet	35,742407	59.553313	96.783231
Aout	60,02621	68.040854	100.090291
Septembre	37,73371	53.720559	94.109056
Octobre	41,25759	51.719044	95.356215
Novembre	64,72891	43.09131	80.964177
Décembre	59,29324	62.788704	125.010642
annuelle	71,04999	85.373208	165.067434

Enfin la densité d'énergie moyenne récupérable sur une année. AEB est égale à [19] :

$$\langle E \rangle = \langle P_r \rangle \Delta t = 0.37 * 24 * 365.25 * \langle V^3 \rangle \quad \text{.....} \quad (3.13)$$

Soit en kWh/m^2 :

$$\langle E \rangle = 3.25 \langle V^3 \rangle \quad \text{.....} \quad (3.14)$$

Tableau 3.3 : La densité d'énergie moyenne récupérable sur une année à 10m.

Le site	L'ouest de laghouat	L'est de laghouat	Hassi r'mel (le sud de laghouat)
$\langle E \rangle$ [kWh/m^2]	624,08775	749,8998	1449,91665

3.2.3. Puissance éolienne moyenne utilisable :

Etant donné que :

- ✓ la vitesse du vent est variable.
- ✓ et que chaque machine éolienne est caractérisée par la vitesse de démarrage V_i.

Une vitesse nominale Vn et une vitesse d'arrêt Vs spécifiques, la puissance éolienne utilisable est donnée par :

$$\langle P_u \rangle = \frac{1}{2} \rho A \langle V_u^3 \rangle \quad \text{.....} \quad (3.15)$$

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

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

Enfin, lorsque la vitesse d'arrêt V_s est atteinte, le système est stoppé et les vitesses qui lui sont supérieures n'interviennent pas pour le calcul de V_u. Voir (**figure 3.3**). [32]

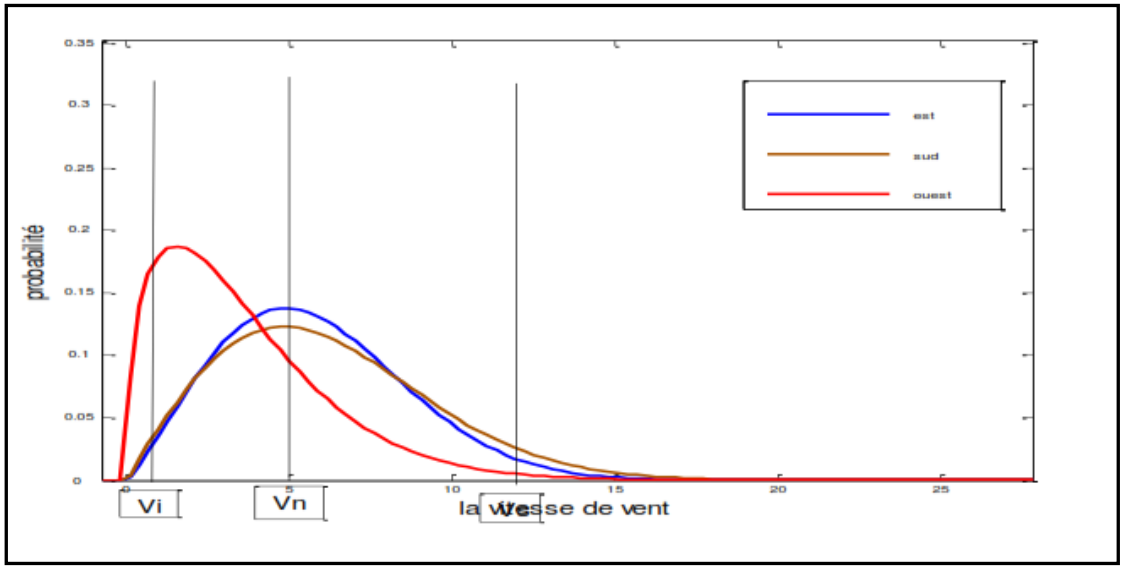


Figure 3.3 : représentation des vitesses de démarrage, nominal et d'arrêt sur la courbe de distribution des vitesses.

Le vent étant très irrégulier, les éoliennes sont dotées d'un système de régulation (pas variable) permettant de garder une vitesse de rotation plus constante. Cette vitesse-seuil dépend de l'éolienne elle est de l'ordre de [32]:

- ✓ 12 à 15 m/sec pour les éoliennes " industrielles "
- ✓ 10 à 12 m/sec pour les éoliennes " artisanales "

A cette vitesse-seuil (ou nominale, Vn), correspond une puissance nominale (Pn) de l'éolienne.

C'est la puissance donnée par les constructeurs. Ainsi, l'éolienne " industrielle " débite quasiment autant d'électricité par un vent de 12,5 m/s que par un vent de 25 m/s. La densité de puissance utilisable est donnée par :

$$\langle P_u \rangle = \begin{cases} 0 & \text{pour} \quad V < V_i \\ \frac{1}{2}\rho\langle V^3 \rangle & \text{pour} \quad V_i < V < V_n \\ \frac{1}{2}\rho V_n^3 & \text{pour} \quad V_n \leq V \leq V_s \\ 0 & \text{pour} \quad V \geq V_s \end{cases} \quad \text{.....} \quad (3.16)$$

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

$$\langle V_u \rangle = \int_{V_i}^{V_n} f(V)\, V^3 dV + V_n^3 \int_{V_n}^{V_s} f(V)\, dV \quad \text{.....} \quad (3.17)$$

Soit après intégration et en utilisant la fonction gamma normalisée :

$$\langle \overline{V_u^3} \rangle = \left[\Gamma_n \left(\left(\frac{V_n}{c}\right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) - \Gamma_n \left[\left(\frac{V_i}{c}\right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right] \right] \overline{V^3} + V_n^3 \left[exp\left(\left(\frac{V_n}{c}\right)^k \right) - exp\left(-\left(\frac{V_s}{c}\right)^k \right) \right] \quad \text{.....} \quad (3.18)$$

Avec :

$$\Gamma_n(x, a) = \Gamma(x, a)/\Gamma(x) \quad \text{.....} \quad (3.19)$$

On a dans le cas : $V_i < V < V_n$

$$\langle P_u \rangle = \frac{1}{2}\rho\langle V^3 \rangle \quad \text{.....} \quad (3.20)$$

La puissance utilisable c'est la puissance récupérable qui à été déjà calculer dans le (**tableau3.2**) pour la valeur de V égale à la vitesse moyenne annuelle.

3.2.4. Puissance éolienne moyenne utile :

La puissance éolienne moyenne réellement utile s'écrit :

$$\langle P_e \rangle = \eta \langle P_u \rangle \quad \text{.....} \quad (3.21)$$

Où : η représente le rendement machine.

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

$$\eta = \frac{\langle P_n \rangle}{\langle P_{théorique} \rangle} \quad \text{.....} \quad (3.22)$$

Avec :

$$P_{théorique} = \frac{1}{2} \rho \, A \langle V_n^3 \rangle \quad \text{.....} \quad (3.23)$$

La puissance utile (pratique) (Pe) d'une éolienne est inférieure à Pu Ceci est dû au fait que, du vent à la distribution sur le réseau, il y a plusieurs étapes de conversion d'énergie, chacune avec un rendement propre : hélice (85%), multiplicateur (95%), générateur (98%), transformateur (98%) - redresseur 98%), stockage, distribution. Bref, le rendement optimal est de 70 à 60%.

Cependant, en pratique, tous les organes ne sont pas à leur rendement maximum en même temps, ce qui réduit encore le rendement global. On considère celui entre 55 - 50% pour une éolienne "industrielle" et 40 - 25 % pour une éolienne "artisanale". [32]

Éolienne industrielle :

$$P_e \sim 0{,}627 * r^2 * v^3 = P_e /m^2 \sim 0{,}20 \langle V_n^3 \rangle \quad \text{.....} \quad (3.24)$$

Éolienne artisanale :

$$P_e \sim 0{,}456 * r^2 * v^3 = P_e /m^2 \sim 0{,}15 \langle V_n^3 \rangle \quad \text{.....} \quad (3.25)$$

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

3.3. Conclusion

La densité de puissance moyenne annuelle récupérable sur le site de Laghouat à 10 m est estimée à 1450 kWh/m^2.an a Hassi r'mel par contre a la région Est est estimé à 750kWh/m^2.an et 624 kWh/m^2.an à la région Ouest ; Généralement les vitesses sont mesurées à une hauteur normalisée égale à 10m du sol.

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans ce mémoire avait comme objectif d'apporter une aide efficace, à prendre des décisions dans la planification et la réalisation de projets à énergie éolienne dans la région de Laghouat, déterminer avec exactitude les différents paramètres liés au vent était décisive.

Afin d'atteindre ces objectifs, on a présenté brièvement l'état de l'art sur les différents types distributions fréquentielle des vitesses de vent sur une période donnée (celle de Weibull, hybride de Weibull et de Rayleigh) et exposé les calcules des paramètres de ces distributions, afin de détecter les zones ventées.

on a établi le calcul mathématique des paramètres de vent (celle de weibull déterminant la vitesse moyenne de vent, et vitesse cubique moyenne de vent) en choisissant en premier le modèle de distribution statistique de Weibull, - il faut noté que les facteurs de forme et de l'échelle étaient calculés pour un niveau qui égale a 10 m de hauteur dans les trios régions.

Il faut dire que malgré l'emplacement non adapté des instruments de mesure de la vitesse de vent ou ils sont généralement situés soit sur des aérodromes soit dans des centres urbains. Ces stations sont utilisées pour la navigation aérienne et elles ne sont pas nécessairement installées dans les régions les plus ventées. Ceci signifie que le potentiel peut être supérieur ailleurs, particulièrement dans des sites isolés et éloignés.

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique l'énergie disponible subit une suite de pertes en cascades, jusqu'à la sortie de la machine. En effet, seule une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné, appelée puissance utile est réellement obtenue en fin de processus, soit à la sortie de l'éolienne.

Cependant, en pratique, tous les organes ne sont pas à leur rendement maximum en même temps, ce qui réduit encore le rendement global. Le potentiel énergétique éolien à 10m d'où nous avons pu constater que la région de Hassi R'mel présente un potentiel énergétique relativement important ou il atteint les 1450 kWh/m^2 en revanche le potentielle est 750kWh/m^2 et 624 kWh/m^2 dans les deux autre régions.

À travers cette étude, une pu contribuer à l'actualisation du potentielle éoliens de la région étudiée celle de Laghouat avec ces trois directions qui l’entoure, il faut noter que cette région sous estimé avant montre un potentielle énergétique non négligeable avec une vitesse.

Nomenclature

A : Surface de la roue (m^2)

C : Facteur d'échelle de Weibull ($m\ s^{-1}$)

$\langle E \rangle$: Densité d'énergie moyenne récupérable sur une année (MWh m^2)

Iv : Indice de variation

$\langle P \rangle$: Puissance énergétique éolienne moyenne disponible(W)

$\langle PMax \rangle$: Puissance récupérable par la roue (W)

$\langle Pr \rangle$: Densité de Puissance récupérable par la roue (W m^2)

$\langle Pu \rangle$: Densité de Puissance éolienne utile (W m^2)

$\langle Pe \rangle$: Densité de Puissance éolienne réellement utilisable(W m^2)

$\langle P_n \rangle$: Puissance nominale (W)

$P_{theorique}$: Puissance calculée à la vitesse nominale W

$\langle V \rangle$: Vitesse moyenne du vent m s^{-1}

V : Vitesse du vent m s^{-1}

V , V_n , V_s : Vitesses de démarrage, nominale et d'arrêt m s^{-1}

$\langle Vu \rangle$: Vitesse moyenne utile m s^{-1}

ff_0 : Fréquence de vents calmes

f(V) : Fréquences des vitesses moyennes tri horaires

g : Accélération de la pesanteur m s^{-2}

k : Facteur de forme de Weibull

Γ : Fonction gamma

ρ : Masse volumique de l'air kg m^{-3}

BIBLIOGRAPHIE

[1] Global Wind Energy Council (GWEC). http ://www.gwec.net.

[2] Kasbadji-Merzouk , M. Merzouk et B. Benyoucef « Extrapolation verticale des paramètres de Wei Bull pour l'estimation du potentiel récupérable» Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007) 193 – 198 193.

[3] F. Chellali F, A. Khellaf, A. Belouchrani and A. Recioui. « Contribution to wind mapping in Algeria via the study ofWind behavior and wind energy in Hassi R'Mel, Algeria». Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15 (February 2011) pages 993-1002.

[4] H. Bensaid. «The Algerian Programme on Wind Energy». Proceeding of WEAC, Oxford (1958) pages 21-27.

[5] Al-Hasan, Mohammed and Nigmatullin, Raoul R. «Identification of the generalized Weibull distribution in wind speed data by the Eigen-coordinates method». Renewable Energy. 2003 Jan;28(1):93-110.

[6] R. Hammouche, Atlas Vent de l'Algérie». Publication Interne de ONM, Office National de Météorologie, Alger (1990).

[7] Y. Himrib, S. Rehmana, B. Draouic, S. Himrid. Renewable and Sustainable Energy Reviews,Volume 12, Issue 9, December 2008, Pages 2495-2504.

[8] Y. Himri, S. Himri, A. Boudghene Stambouli. «Assessing the wind energy potential projects in Algeria». Renewable and Sustainable Energy Reviews,Volume 13, Issue 8, October 2009, Pages 2187-2191.

[9]. Pacific Northwest Laboratory, « Wind Energy Ressource Atlases », Vol. 1 et 2 PNL– 3194. Pacific Northwest Laboratory Richland, Washington, D.C., USA, 1981

[10] Troen I. et E.L. Petersen, « European Wind Atlas », Riso National Laboratory, Roskilde, Danmark, 1989.

[11]. Said M et A. Ibrahim, « Energy in the Arab World. Energy », N° 9-3, pp. 21738,1984.

[12]. Bensaid H., « The Algerian Programme on Wind Energy ». Proceeding of WEAC,pp. 21-27, Oxford, 1985.

[13]. M. Said and A. Ibrahim, « Energy in the Arab world». Energy 9 3 (1984), pp. 217U″ 238.

[14]. Kasbadji Merzouk N., « An Evaluation of Wind Energy Potential in Algeria ». Proceeding of EWEC'94 congress, Thessaloniki, Grèce, 1994.

[15] N. Kasbadji-Merzouk, M. Merzouk and B. Benyoucef, **«***Model of Vertical Wind Speed Extrapolation in a Semi-Arid Region* **»**, Proceeding du World Renewable Energy CongressIX, Florence,Italie,19-22 Août2006.

[16]. Monin A.S. et A.M. Obukov, « Basic Regularity in Turbulent Mixing Surfaces Layer of the Atmospheric », Akad. Nauk. S.S.S.R., Trusd Geof. Inst, 24, 151, 1954.

[17] Y. Himri, S. Arif, A. Malik, A. Boudghene Stambouli , S. Himri, B. Draouie. **«**Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development». Renewable and Sustainable Energy Reviews,Volume 13, Issues 6-7, August-September 2009,Pages 15841591.

[18]. TenneekesA., «Thelogarithmicwind profile»J.of Atmosphericsciences,vol.30,pp 234:238,1973.

[19]. Justus C.G. et A. Mikhail, « Height Variation of Wind speed and Wind Distributions Statistics ». Geophysical Research Letters, vol. 3, N° 5, 1976.

[20]. Mikhail A.S. et C.G. Justus, « Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis » Wind Engineering, Vol. 5, N° 02, 1981.

[21] Poje S. et B. Cividini, « Assessment of Wind Energy Potential in Croatia » Solar Energy vol.41 N°6 pp 543 554, 1988.

[22]. Mikhail A.S, « Height Extrapolation of Wind Data » Transaction of ASME, vol.107, pp. 10- 14, 1985.

[23]. Dr. Gary L. Johnson **«** Wind Energy Systems » October 10, 2006

[24] Doran, J. C. and Verholek, M. G. **«**A note on vertical extrapolation formulas for Weibull velocity distribution parameters». Journal of Applied Meteorology. 1978 Mar; 17:410-412.

[25] Mathew, S.; Pandey, K. P., and Kumar, **«**A. Analysis of Wind Regimes for Energy Estimation». Renewable Energy. 2002 Mar; 25(3) :381-399.

[26]. Youcef Ettoumi F., « Ressources Energétiques Renouvelables en Algérie », Thèse de Doctorat d'état, USTHB, 2002.

[27] Rehman, Shafiqur and Al-Abbadi, Naif M. **«**Wind shear coefficients and their effect on energy production». Energy Conversion and Management. 2005 Sep; 46(15-16):25782591

[28] Stevens, M. J. M. and Smulders, P. T. **«**The estimation of the parameters of the Weibull Wind speed distribution for wind energy utilization purposes». Wind Engineering. 1979; 3(2).

[29] Yang, 2. L. and Xie, M. «Efficient Estimation of the Weibull Shape Parameter Based on a Modified Profile Likelihood». Journal of Statistical Computation and Simulation. 2003 Feb; 73(2):115-123.

[30] Troen Ib, « On Diagnostic Wind Field Models ». College on atmospheric BoundaryPhysics', ICTP, Trieste, 1990.

[31] Turbelin G., « Modélisation de la Structure Atmosphérique en vue de l'Etude du Chargement Aérodynamique des Structures Soumises aux Effets de Vent ».Université d'Evry Val d'Essone, U.F.R. De sciences et Technologie, 2000.

[32] http://users.swing.be/sw085390/eolienne/articles/art5.htm