

FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE
N° :...../2020.....



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIÈRE : Physique
OPTION : Physique Énergétique et
Énergie Renouvelable

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : OUELDMAKHLOUFI Yasmine

Et

ZELOUF SAMEH

Intitulé

**ÉVALUATION ET CARACTÉRISATION DU
POTENTIEL ÉOLIEN DE LA RÉGION DE M'SILA**

Soutenu le /09 /2020 devant le jury composé de :

NAHOUI Azzedine M.C.B.	Université Mohamed BOUDIAF M'sila	Président
BOURSAS Abdelhakim M.C.A	Université Mohamed BOUDIAF M'sila	Rapporteur
MADRAK DRADJI doctorant	Université Mohamed BOUDIAF M'sila	Co-encadreur
HADDED Zakaria M.C.B.	Université Mohamed BOUDIAF M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos chers parents,

Nos mères et pères pour leur patience,

Leur amour, leur soutien et

Leurs encouragements.

A nos frères.

A nos amies et nos collègues.

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du
primaire, du moyen, du secondaire ou de
l'enseignement supérieur.*

Fasmine et Sameh

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, volonté et patience afin d'élaborer ce modeste travail jusqu'à son terme.

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre gratitude au directeur de cette note, M. BOURSAS, pour sa patience, sa disponibilité et, surtout, ses sages conseils, qui ont contribué à enrichir notre pensée.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères au corps professoral et administratif de l'Université, MOHAMED BOUDIAF pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenons également à remercier M. DARADJI pour sa précieuse coopération en nous fournissant des informations sur le programme (WASP).

Nous remercions infiniment nos très chers parents, puisse Dieu les protéger, sans omettre nos frères et sœurs pour leurs sacrifices et leur aide précieuse, Et un grand merci aux amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre approche.

Fasmine et Samah

Table des matières	page
Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Tables des matières.....	III
Listes des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VI
Nomenclature.....	VII
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I : DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE ÉOLIEN	
I-1 Introduction.....	6
I-2 Différents types d'énergies renouvelables exploitées sur notre terre.....	6
2-1 Énergie solaire.....	6
2-2 Énergie géothermique.....	8
2.3 Énergie hydraulique.....	9
2.4 Énergie marine.....	10
2.5 Énergie de la Biomasse.....	11
I.3 Énergie éolienne.....	12
I.3.1 Origine du vent.....	13
I.3.2 Caractéristiques du vent.....	13
a. Direction du vent.....	13
b. Vitesse du vent.....	14
c. Pression du vent.....	14
I.3.3 Échelle de Beaufort.....	15
I.3.4 Mesure du vent et instruments de mesure.....	15
a. La girouette.....	16
b. La manche à air.....	16
c. L'anémomètre.....	17
I.3.5 Forces influant sur le vent.....	17
- Force de gravité.....	18
- Force de gradient de pression.....	18
- Force de Coriolis.....	19
- Force de friction.....	20
- Force centrifuge.....	20
- Force centripète.....	21
I.3.6 Circulations atmosphériques.....	22
I.3.7 Paramètres météorologiques influant sur l'énergie portée par le vent.....	23
- Température.....	23
- Pression de l'air.....	24
- Précipitations.....	24
- Humidité.....	24
- Nuages.....	24
I.3.8 Vents locaux.....	25
- Brises de mer et brises de terre.....	25
- Brise de pente.....	26
- Effets des vallées (goulets).....	26
- Effets des montagnes.....	27
- Effets de méso-échelle.....	27
- Effet venturi.....	28
I.3.9 Profil de vent en fonction de l'altitude.....	29
I.3.10 Vents dans la couche limite atmosphérique.....	29
a. Définition.....	29
b. Couche limite de surface (CLS).....	30
c. Couche limite d'Eckerman.....	30

I.3.11 Vent géostrophique.....	30
I.3.12 Impact du vent sur l'environnement	31
- Rôles du vent dans la nature.....	31
- Dégâts provoqués par le vent	31
- Utilisation du vent	32
I.4 conclusion.....	32
CHAPITRE II : ÉNÉRGIE ÉOLIENNE - CARATÉRISTIQUES ET ÉVALUATION	
II.1 Forme de l'énergie transportée par le vent.....	34
II.2 Le vent une variable chaotique (aléatoire).....	34
II.3 Vitesse du vent.....	36
II.4 Direction du vent.....	37
4.1 Rose des vents.....	37
II.5 Modélisation de la vitesse du vent.....	38
5.1 Fonction de Weibull.....	38
5.2 Fonction de distribution cumulative de Weibull.....	39
II.6 Modélisation de la direction du vent.....	40
II.7 Rugosité du sol et cisaillement du vent.....	40
7.1 Longueur de rugosité.....	41
II .8 Modélisation de la rugosité.....	43
8 .1 la rose des rugosités.....	43
II.9 Méthodes d'évaluation du gisement éolien.....	43
II.10 Méthodes de détermination des paramètres de Weibull k et c.....	44
10 .1 Méthodes des moindres carrées.....	44
10.2 Méthode de la médiane et les quartiles.....	45
10.3 Méthode de la vitesse moyenne et la variance.....	45
10.4 Méthode de la vitesse moyenne et de la variabilité des vents.....	46
II .11 Vitesse moyenne.....	46
II.12 Puissance disponible.....	46
II.13 Énergie disponible pendant une période de temps T.....	47
II.14 Puissance récupérable.....	47
II .15 Extrapolation de k et c en altitude.....	48
II.16 Vitesse du vent au niveau du moyeu de la turbine éolienne.....	48
CHAPITRE III : ÉVALUATION DU GISEMENT ÉOLIEN DANS LA RÉGION DE M'SILA	
III-1 Introduction.....	50
III-2 Géographie et climat de la région de M'sila.....	50
III-2-1 Position et caractéristiques géographiques de M'sila.....	50
III-2-2 Relief et orographie de la région de M'sila.....	50
III-2-3 Climat de la région de M'sila.....	51
III-2-4 Les vents soufflants sur la région de M'sila.....	51
III-3 Modélisation du vent dans la région de M'sila.....	52
3-1 station météorologique de M'sila.....	53
3-2 Présentation du logiciel WAsP.....	54
3-3 Présentation de l'assistant OWC.....	54
3-4 Résultats et discussion.....	55
3-4-1 Distribution de la direction du vent à 10m de haut.....	55
a- Annuelle.....	55
b- Saisonnière.....	56
c- Mensuelle.....	57
3-4-2 Distribution de la vitesse du vent à 10m de haut	58
a- mensuelle.....	58
b- Saisonnière.....	61
c- Annuelle.....	62
III-4 Conclusion.....	63
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	64
RÉFÉRENCE.....	65

Liste des figures	pages
Figure I.1 : installation solaire.....	8
Figure I.2 : Schéma d'une centrale géothermique.....	9
Figure I.3 : centrale hydraulique.....	10
Figure I.4 : centrale hydrolienne.....	11
Figure I.5 : centrale de biomasse.....	11
Figure I.6 : Schéma d'une éolienne horizontale.....	12
Figure I.7 : Rose des vents et les 16 directions cardinales.....	13
Figure I.8 : Satellite QuikSCAT qui mesure les vents grâce à un diffusomètre.....	16
Figure I.9 : la girouette.....	16
Figure I.10 : La manche à air.....	17
Figure I.11 : L'anémomètre.....	17
Figure I.12 : Force du gradient de pression (F_{GP}).....	19
Figure I.13 : Influence de la force de Coriolis sur la direction du vent.....	19
Figure I.14 : Influence de la force centripète sur la direction du vent.....	21
Figure I.15 : Schéma des circulations atmosphériques terrestres.....	23
Figure I.16 : Brise de mer et brise de terre.....	26
Figure I.17 : Brises de vallée de gauche à droite : matin, mi-journée et soir.....	27
Figure I.18 : Effet d'ondulation avec amortissement sur un vent suite à une montagne.....	27
Figure I.19 : Schéma explicatif de l'effet Venturi.....	28
Figure I.20 : Vitesse du vent enregistrée au pylône de mesures du KFK à Karlsruhe.....	29
Figure I.21 : l'équilibre entre la force de gradient de pression et la force de Coriolis.....	30
Figure II.1 : Vitesse du vent enregistrée du 3 au 5 juin 1994 à la station de recherche du Kastelberg.....	36
Figure II.2 : Fréquence des vitesses du vent enregistrées de 1987 à 1997 à la station d'Aubure.....	37
Figure II.3 : Rose des vents.....	38
Figure II.4 : Fréquences des vitesses et des directions du vent pour 18 secteurs de la rose des vents	40
Figure II.5 : Cisaillement du vent pour une longueur de rugosité $z_0 = 0,1m$	41
Figure III.1 : position de la station météorologique de M'sila sur la carte géographique.....	53
Figure III.2 : Démarrage de l'assistant OWC.....	55
Figure III.3 : Distribution annuelle des directions du vent à 10m du sol.....	56
Figure III.4 : Distribution saisonnière des directions du vent à 10m de haut.....	56
Figure III.5 : Distribution mensuelle des directions du vent à 10m de haut.....	57
Figure III.6 : Histogrammes mensuelles de la vitesse du vent à 10m du sol ajusté par la distribution de Weibull...	59
Figure III.7 : Histogrammes saisonniers de la vitesse du vent à 10m du sol ajustés par la distribution de Weibull	61
Figure III.8 : Histogramme annuelle de la vitesse du vent à 10m du sol ajusté par la distribution de Weibull.....	62

Liste des tableaux	page
Tableau I.1 : échelle de beaufort.....	15
Tableau II.1 : Les noms des 16 directions de la rose des vents et les angles correspondants.....	38
Tableau II.2 : Table des classes et longueurs de rugosité.....	42
Tableau III.1 : Coordonnées géographiques de M'sila.....	50
Tableau III.2 : Données sur la station météorologique de M'sila.....	53
Tableau III.3 : caractéristiques moyennes mensuelle du vent à 10 m du sol.....	60
Tableau III.4 : vitesse et puissance moyenne mensuelle du vent à 10m, 25m et 50m du sol.....	60
Tableau III.5 : caractéristiques moyennes Saisonnière du vent à 10 m du sol.....	62
Tableau III.6 : caractéristiques moyennes annuels du vent 10 m du sol.....	62
Tableau III.7 : vitesse et puissance moyenne annuelle du vent à 10m, 25m et 50m du sol.....	63

Nomenclature	Unité
ρ : Densité de l'air	$[kg/m^3]$
V : vitesse du vent	$[m/s]$
P : pression du vent	$[N/m^2]$
m : masse du volume d'air	$[kg]$
v : vitesse instantanée du vent	$[m/s]$
(v) : fonction de densité de probabilité de Weibull	$[-]$
v_1 : vitesse du vent à la hauteur h_1	$[m/s]$
v_2 : vitesse du vent à la hauteur h_2	$[m/s]$
Z_0 : longueur de rugosité	$[m]$
k : facteur de forme	$[-]$
A : facteur d'échelle	$[m/s]$
(v) : fonction de distribution cumulée de Weibull	$[-]$
Γ : fonction gamma	$[-]$
V_{moy} : vitesse moyenne	$[m/s]$
S : section du cylindre d'air considéré	$[m^2]$
E : Energie produite par une éolienne	$[W/h]$
T : temps de production de l'énergie éolienne	$[h]$
d : Nombre du jour	$[-]$
E_m : Energie mensuelle	$[W/m^2/mois]$
E_s : Energie saisonnière	$[W/m^2/saison]$
d_m : Nombre de jour de mois	$[-]$
d_s : Nombre de jour de saison	$[-]$
p_{dis} : La puissance théorique portée par le vent	$[W]$
c_p : Coefficient de puissance	$[-]$
α : Le coefficient de cisaillement du vent	$[-]$
n : Nombre de données de vitesse de vent non nulles	$[-]$
v_x : Vitesse non nulle du vent a un instant x	$[-]$

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'évolution de nos sociétés humaines est très étroitement liée à la découverte de l'énergie. En apprenant à maîtriser le feu, la force du vent et de l'eau, à utiliser le bois, le charbon, le pétrole... les hommes ont sans cesse cherché à améliorer leur bien-être. Mais, selon la façon dont l'énergie est produite, partagée ou utilisée, elle peut aussi être un facteur de régression [1]. En effet, le défi est de taille : répondre aux besoins énergétiques croissants, voire même exponentiels dans certaines zones du monde, alors que les énergies fossiles se raréfient et que la sonnette d'alarme en matière environnementale est tirée depuis plusieurs décennies. Nous savons que nous devons compter à l'avenir sur un bouquet énergétique regroupant plusieurs sources d'énergies : fossiles, nucléaire, solaire, éolien, géothermie, hydraulique, biomasse, énergies marines [1].

Le vent fait partie des sources propres, libres et inépuisables. Il a servi l'humanité pendant des siècles pour faire avancer des navires, broyer des grains ou pomper de l'eau [2]. L'homme ne s'est pas arrêté à ce stade dans l'utilisation du vent, mais a commencé à penser à l'invention et le développement de machines et d'outils qui peuvent le servir dans sa vie. L'énergie éolienne sert aujourd'hui à produire de l'électricité, et si le discours actuel sur la puissance de l'air signifie souvent son utilisation dans ce sens, on ne cesse de découvrir son utilité à de nombreuses fins [2].

Une course acharnée s'est installée dans le monde pour l'exploitation de l'énergie éolienne. En juin 2014, l'énergie éolienne représentait 4 % de la production mondiale en électricité. Cette proportion continue à augmenter très rapidement [3]. Aujourd'hui, près de 200000 turbines électriques, dont 432 GW sont produites fin 2015. En septembre 2012, la production de l'UE à elle seule était de plus de 100 GW. Aux États-Unis, la production de l'énergie éolienne a augmenté de 30% au cours des 10 dernières années. Jusqu'en 2010, les États-Unis se classaient au premier rang mondial, mais aujourd'hui la Chine est devenue le géant de l'éolienne grâce à son programme adopté, qui lui a permis d'aller rapidement loin dans l'utilisation de toute sorte d'énergie renouvelable [3].

L'Algérie est l'un des pays qui ont accordé une grande importance à l'investissement dans ce domaine. Le pays, disposant d'un énorme potentiel en terme d'énergies renouvelables et en particulier dans la filière du solaire et de l'éolienne, encourage vivement les investissements hors hydrocarbures [2]. Le programme national de développement des énergies renouvelables compte atteindre une transition énergétique stable et régulière. Dans cette optique le

programme estime produire d'ici à 2030 une puissance de 22GW d'électricité propre pour répondre aux besoins nationaux [2].

Selon des études récentes, les régions de Sétif, EL-oued, Bordj Bou Arreridj, Tiaret ont été choisies comme sites favorables à l'installation de parcs éoliens. Notant que plusieurs régions du pays sont qualifiées d'éligibles à une utilisation optimale de l'énergie éolienne à l'instar des régions méridionales de Tindouf, Bechar et Timimoune [2].

Le but de ce travail est de mettre en évidence l'un de ces endroits ; la région de M'sila. L'étude comprend une évaluation mensuelle, saisonnière et annuelle du gisement éolien de la région en se basant sur des données collectées au niveau de l'ONM (Office National de Météorologique) de M'sila sur une période de 2 années : 2015 et 2016.

Les données utilisées en termes de vitesse et de direction du vent ont été enregistrées à 10m de haut, toutes les 3 heures. En outre, pour traiter et analyser ces données, nous avons utilisé l'outil informatique WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), utilisé à grande échelle dans le monde de l'éolien et reconnu valable quel que soit le type du terrain étudié (accidenté ou plat). Il a été utilisé en grande partie dans notre travail pour créer les différentes courbes d'ajustement de Weibull, les roses des vents, l'extrapolation de ces résultats pour différentes hauteurs, ainsi que l'estimation de la puissance éolienne disponible à différents niveaux.

Le premier chapitre englobe deux parties. La première est une fenêtre sur les diverses énergies renouvelables adoptées dans la production d'électricité. Le but est de mieux situer la filière de l'éolienne parmi les autres. La deuxième partie est consacrée au phénomène éolien. Ici sont exposés l'origine du vent, les forces influant sur sa vitesse et sa direction et les instruments de mesure permettant de caractériser le vent. La concurrence de ces forces définissent trois niveaux du phénomène éolien : macro-échelle ou global, méso-échelle ou régional et micro-échelle ou local. Ce dernier joue un rôle déterminant dans l'évaluation du potentiel éolien d'un site donné du moment que le vent local souffle le plus proche du sol. En effet, la connaissance de la géographie d'une localité donnée est indispensable pour déterminer quel est le type du vent local présent et dans quelle direction souffle-t-il.

Le deuxième chapitre traite les méthodes mathématiques permettant de modéliser la distribution de la vitesse du vent, le calcul de la rugosité du sol et l'extrapolation verticale de la distribution (loi de cisaillement). La distribution de Weibull est la plus utilisée dans l'état de l'art. C'est une fonction de densité de probabilité (pdf) définie par le biais de deux paramètres k et c . Ces deux paramètres permettront de caractériser le potentiel du site étudié par le calcul

de la vitesse moyenne, la probabilité d'occurrence d'une vitesse spécifique comme la vitesse de démarrage d'une éolienne, le type du climat régnant sur le site, la densité de puissance disponible et autre.

Le dernier chapitre comprend l'évaluation proprement dite du gisement éolien dans la région de M'sila. Au début on a exposé une description du milieu naturel de la région en l'occurrence le relief, le type de climat et les différents vents soufflant sur la région. L'évaluation et la caractérisation du potentiel éolien sont effectuées par l'exécution du logiciel WAsP, sur les données empiriques de la vitesse et la direction du vent collectées au cours des deux années 2015 et 2016 à 10m de haut. L'ensemble des résultats relatifs à l'étude statistique (annuelle, saisonnière et mensuelle) sont présentés sous forme de courbes et de tableaux avec leur interprétation nécessaire à identifier le profil du vent dans cette région. Nous y présenterons de même les résultats de l'étude statistique du dit potentiel établie pour deux niveaux différents 25m et 50m.

CHAPITRE I

DESCRIPTION DU

PHÉNOMÈNE ÉOLIEN

I-1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Elles regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Plusieurs types de sources d'énergies renouvelables sont répertoriés. On peut citer à titre d'exemples : l'énergie hydroélectrique, l'énergie de la biomasse, l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne. Ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera [8].

Le vent est une force de la nature exploitée par l'homme depuis l'aube des temps, pour faire avancer les bateaux par exemple. Aujourd'hui il sert à créer de l'électricité ou une force mécanique : c'est l'énergie éolienne. C'est une source propre, renouvelable, quasi instantanée et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre. Cependant et pour mieux cerner le phénomène éolien on a consacré ce chapitre à la description de l'origine du vent et les éléments de la physique atmosphérique, en insistant sur les forces régissant le mouvement des masses d'air au sein des différentes couches de l'atmosphère. La concurrence de ces forces naturelles sur les masses d'air et en fonction des particularités géographiques des régions subdivise le phénomène éolien en plusieurs catégories : des phénomènes synoptiques à grande échelle, des phénomènes régionales et ceux observés localement [7].

I-2 Différents types d'énergies renouvelables exploitées sur notre terre

2-1 Énergie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la plus abondante et la mieux partagée sur terre. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure suffira à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de cette énergie rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367W/m^2 [6].

Plusieurs solutions technologiques sont mises au point pour capter et convertir l'énergie solaire. Trois filières principales regroupent les différentes techniques d'exploitation de cette énergie :

➤ **Le solaire thermique**

L'énergie solaire est convertie en chaleur. Les atomes constituant le capteur solaire sont excités par les photons solaires se trouvant dans un état énergétique plus élevé et qui se traduit par une agitation thermique importante. Les atomes vont alors libérer le surplus d'énergie sous forme d'énergie thermique à un fluide caloporteur (eau, gaz...), qui va pouvoir distribuer sa chaleur (plancher chauffant par exemple), ou la stocker (ballon d'eau chaude par exemple) pour un usage ultérieur.

➤ **Le solaire thermodynamique**

L'énergie solaire est convertie initialement en chaleur comme pour le solaire thermique, puis en électricité dans un second temps. Des capteurs sont portés à des températures élevées (de 250°C à 1000°C) en concentrant les rayons du soleil par un système de miroirs (réflecteurs). Un fluide caloporteur transmet cette chaleur à un fluide thermodynamique. Un gradient de température (et donc de pression) est établi au sein du fluide thermodynamique qui va produire des forces de poussée (énergie mécanique), activant une génératrice reliée à un alternateur, permettant ainsi de convertir l'énergie initiale en électricité.

➤ **Le solaire photovoltaïque**

Cette technologie convertit directement l'énergie solaire en électricité. Les photons solaires vont exciter des électrons dans le matériau des capteurs, en leur transférant une partie de leur énergie et en les rendant mobiles. Ces électrons mis en mouvement vont ainsi produire un courant continu, pouvant alimenter un réseau électrique. Un onduleur convertit ce courant continu en courant alternatif, qui pourra être injecté dans un réseau électrique ou utilisé localement par un particulier pour alimenter des appareils électriques (électroménagers etc.) [9].

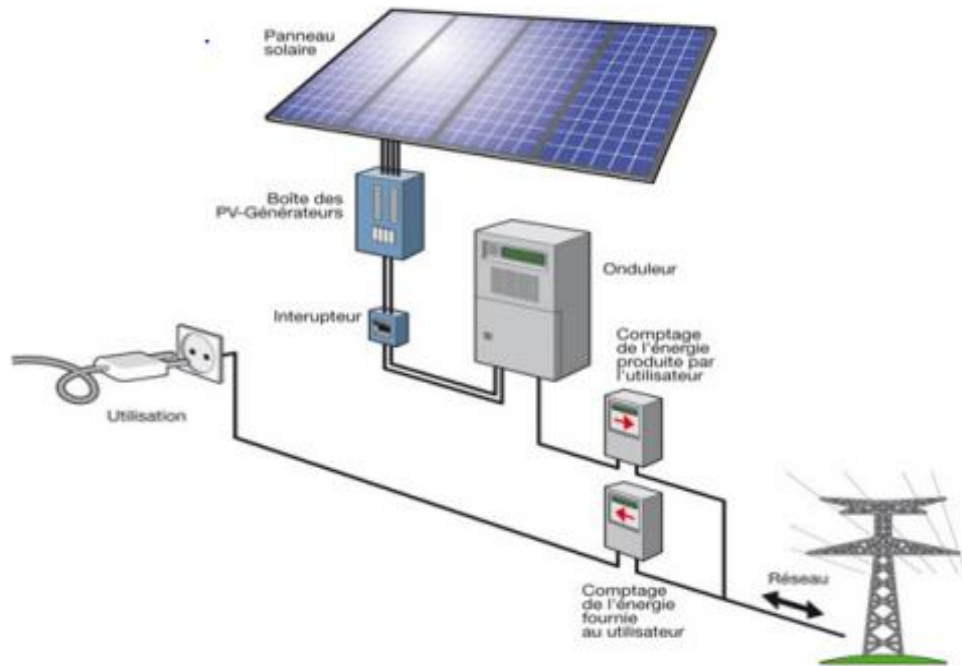


Figure I.1 : installation solaire

2-2 Énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité. Depuis des millénaires l'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude (par exemple : en Chine, dans la Rome antique et le bassin méditerranéen) [12]. La figure I.2 schématise Une centrale géothermique pour produire de l'électricité grâce à la chaleur de la Terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet ainsi de faire tourner une turbine et un alternateur [13]

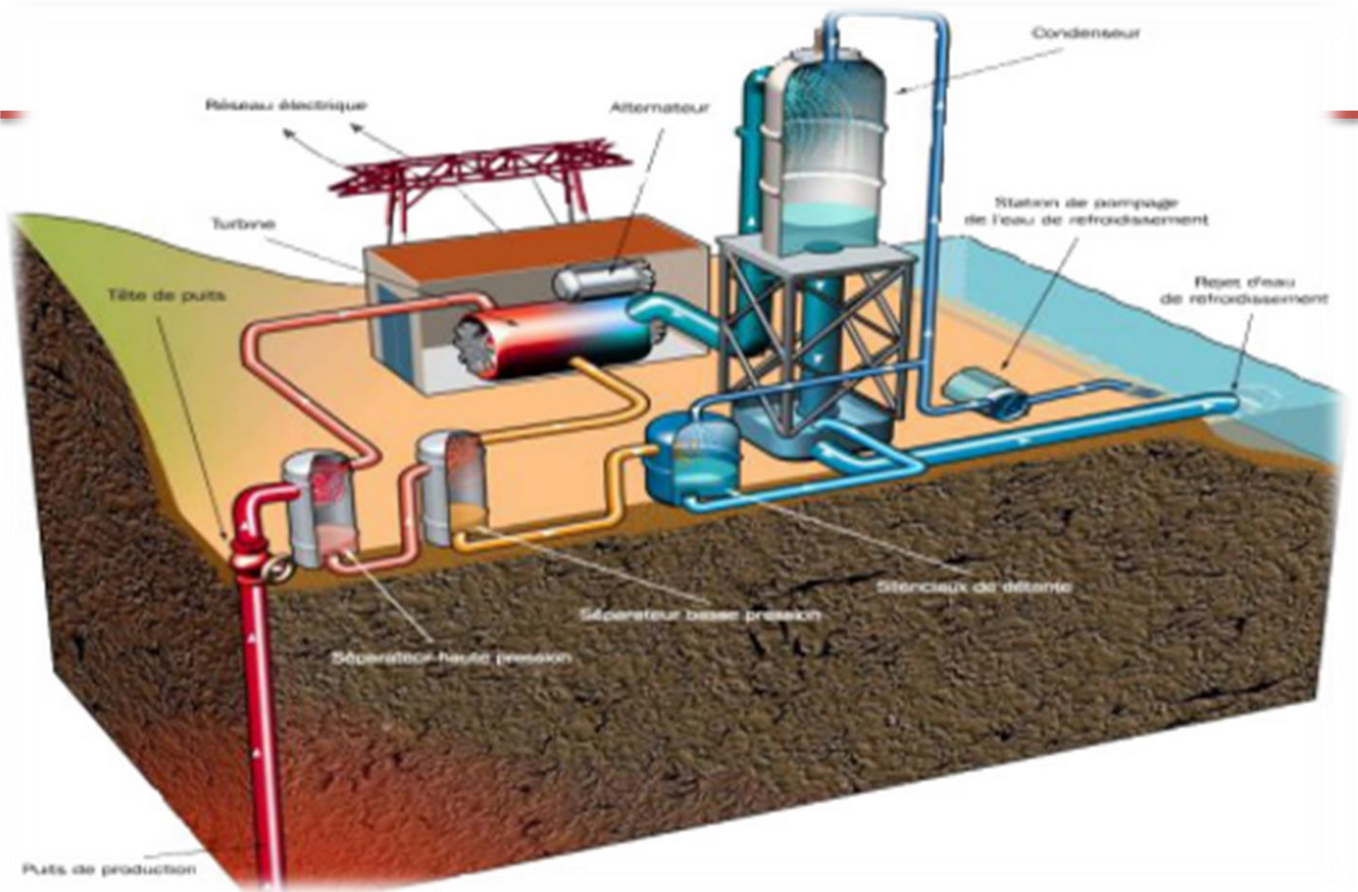


Figure I.2 : Schéma d'une centrale géothermique

2.3 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Cette source exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins. Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermo haline, etc.), les centrales hydrauliques exploitent l'énergie mécanique de l'eau pour la convertir dans la plupart du temps en électricité (hydroélectricité) [10].

Le fonctionnement d'une centrale hydraulique reliée à un barrage comme le montre la figure I.3 consiste à utiliser l'énergie de l'eau en mouvement (énergie cinétique) pour produire de l'énergie électrique. Quand on veut produire de l'électricité, on ouvre des vannes au niveau du barrage pour permettre à l'eau de passer par une conduite. Une chute artificielle est ainsi créée et l'eau acquiert une certaine vitesse dont la grandeur est fonction de la hauteur de la chute. En faisant passer l'eau à travers une turbine reliée à un alternateur qui va produire de l'électricité. L'eau est ensuite libérée au pied du barrage et reprend son cours normal [11].

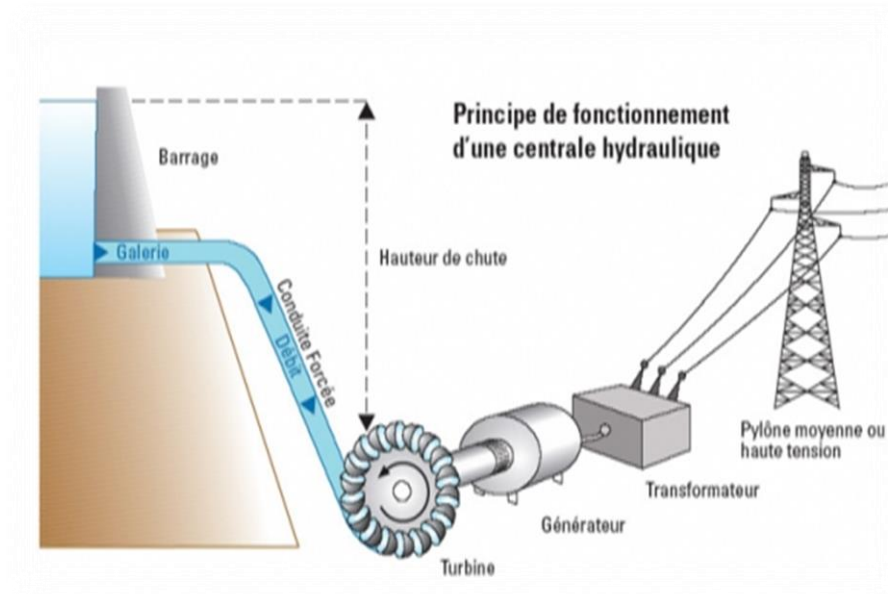


Figure I.3 : centrale hydraulique

2.4 Énergie marine

L'énergie marine est une source d'énergie renouvelable qui dépend des ressources naturelles des eaux de la mer et des océans. Elle permet de fabriquer de l'électricité, essentiellement grâce aux mouvements incessants de ces eaux. L'eau recouvre en grande partie notre planète, principalement à travers les océans et les mers. Elle constitue donc une source d'énergie importante, aujourd'hui encore peu exploitée. Les énergies marines n'émettent aucun gaz à effet de serre et leurs ressources sont disponibles dans de nombreux pays du monde [12].

Plusieurs technologies sont mises au point pour exploiter l'énergie marine, permettant de produire de l'électricité à partir de différentes forces ou ressources du milieu marin : la houle, les courants, les marées, le gradient de température entre les eaux de surface chaudes et les eaux froides en profondeur, l'énergie osmotique et la biomasse marine. Actuellement la technologie la plus répandue dans le monde est celle des hydroliennes. L'hydrolienne est une turbine hydraulique, qui utilise l'énergie des courants marins à l'instar d'une éolienne, qui utilise l'énergie du vent. La turbine de l'hydrolienne permet la 4 Chapitre1 Généralités sur les énergies renouvelables transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique qui peut alors être convertie en énergie électrique par un alternateur [13].

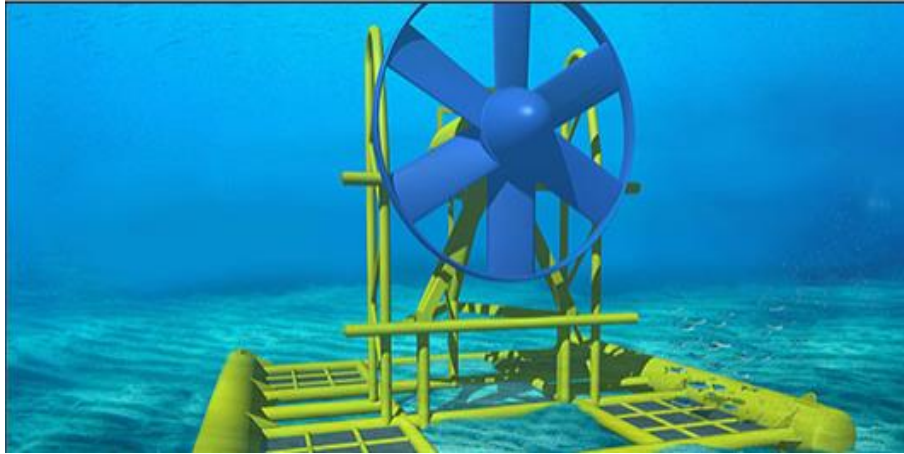


Figure I.4 : centrale hydrolienne

2.5 Énergie de la Biomasse

Le terme de biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique (champignons) pouvant devenir source d'énergie par combustion (du bois par exemple), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (agro-carburant) [9]. Dans une centrale classique de biomasse, l'énergie de la biomasse est transformée en énergie thermique par combustion. Cette énergie transforme de l'eau en vapeur, celle-ci actionne ensuite une turbine à vapeur accouplée à un alternateur, qui transforme enfin l'énergie mécanique en énergie électrique. Une partie de la vapeur ou énergie thermique restante peut être utilisée, par exemple, pour alimenter un circuit de chauffage. Il s'agit alors de cogénération [15].

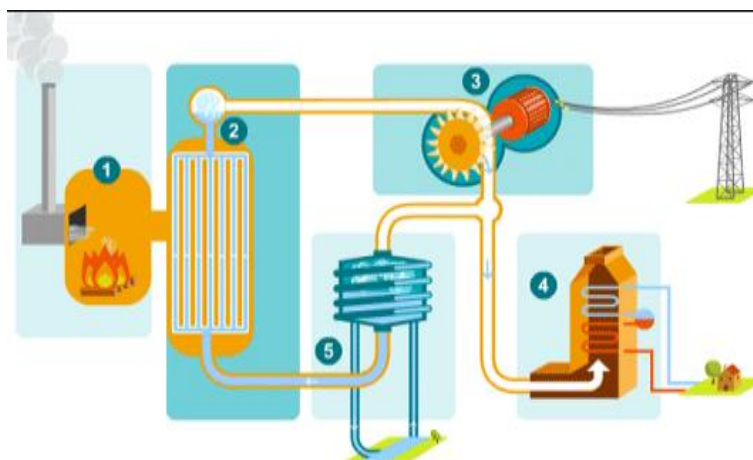


Figure I.5 : centrale de biomasse

I.3 Énergie éolienne

L'énergie éolienne tire son nom du mot grec Éole qui signifie dieu des vents. C'est une source d'énergie renouvelable issue du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pressions atmosphériques différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements de masses d'air, appelés vent. Le vent est alors dû essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Ces masses d'air en mouvement portent une quantité d'énergie sous forme d'énergie cinétique appelée communément le potentiel éolien. Cette énergie exploitée depuis l'antiquité, permet aujourd'hui principalement à fabriquer de l'électricité. Dans la littérature on trouve une gamme assez importante de technologies dans le but est non seulement d'augmenter le rendement des machines éoliennes, mais aussi de diversifier leurs applications (pour des fins industrielles ou pour des particuliers) [16]. L'éolienne, appelée aussi aérogénérateur, la plus ancienne et la plus répandue dans le monde est l'éolienne à axe horizontal schématisée sur la figure I.6 [9]. C'est une machine constituée d'un mât maintenu verticalement au sol grâce à une fondation en béton et est de hauteur de sorte à conquérir des vitesses du vent de plus en plus élevées selon les besoins énergétiques demandés. Le mât porte à son extrémité supérieure une nacelle dotée d'un axe placé horizontalement appelé le moyeu. Celui-ci porte des pales (l'hélice), qui sous l'effet du vent de direction horizontale se met en marche entraînant avec lui l'axe, qui est lui-même relié à un multiplicateur à fin d'augmenter la vitesse de rotation. À la sortie du multiplicateur est relié un alternateur (génératrice) permettant ainsi à convertir le mouvement de rotation du rotor en courant électrique. En fin l'adaptation de la tension se fait par le biais d'un transformateur situé au pied et à l'intérieur du mât pour élever la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour l'injecter en suite dans le réseau électrique.

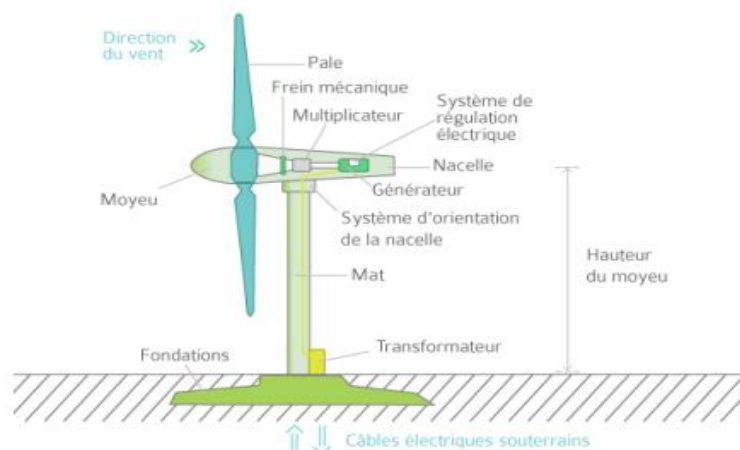


Figure I.6 : Schéma d'une éolienne horizontale

I.3.1 Origine du vent

Le vent est généralement relié aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de températures. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et dans un second ordre aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par-dessus l'air le plus froid (le plus lourd) [17]. La vitesse et la direction du vent généré de cette façon sont généralement grandement modifiées par des forces naturelles. La concurrence de ces forces est influencée principalement par l'altitude où le vent souffle. Voyons de plus près les caractéristiques du vent et ces forces agissant sur lui [7].

I.3.2 Caractéristiques du vent

a. Direction du vent

Le terme direction du vent désigne le côté d'où le vent souffle, et il est exprimé en degrés mesurés dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord géographique, et en conséquence il y a 16 directions principales ou 32 directions principales et secondaires du vent. Les 16 directions principales sont représentées sur la rose des vents de la figure I.9 : par exemple un vent de nord-ouest, c'est de l'air qui nous provient du nord-ouest. Cet usage semble très sage, du moment que l'important est d'abord de savoir ce que va nous apporter le vent plutôt que l'endroit où il ira ensuite. Lorsque les vents se répètent à partir d'une direction spécifique à l'emplacement observée nous disons que ce sont des vents dominants.

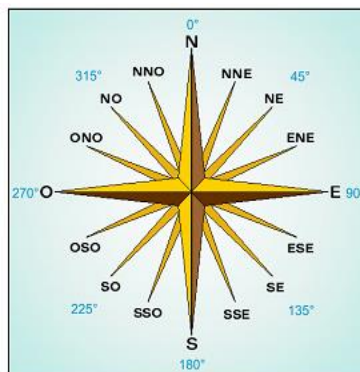


Figure I.7 : Rose des vents et les 16 directions cardinales

b. Vitesse du vent

La vitesse du vent signifie la distance parcourue par les particules d'air pendant un temps spécifique, et est généralement mesurée en mètres / seconde, ou km / heure, ou en nœuds, qui est un synonyme approximatif du mille marin qui est de 1,143 milles / heure, ce qui signifie que le nœud équivaut à 1,84 km/heure. Le vent est un mélange de gaz qui ne sont pas compatibles lors de leur déplacement. Ils se déplacent selon des faisceaux de pression d'air et se présentent sous la forme d'éclairs ou d'odeurs. Ils sont une cascade d'étapes d'immobilité et de calme, ce qui s'exprime par la vitesse moyenne du vent.

La vitesse du vent est indiquée par un symbole de plume, chaque lame représentant une vitesse de 8 à 12 nœuds/heure. La moitié de la plume représente une vitesse de 3 à 7 nœuds/heure. Le triangle représente une vitesse de 48 à 52 nœuds/heure.

c. Pression du vent

La pression du vent P est définie comme la force par laquelle le vent affecte l'unité des zones d'objets qui entrent en collision avec lui, et peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{I. 1})$$

Où : ρ = densité de l'air, V = vitesse du vent

La pression du vent (en N/m^2) peut être déterminée approximativement par :

$$P = 0,613V^2 \quad (\text{I. 2})$$

Si par exemple la vitesse du vent est de 30 m/s, sa pression sera de $0,613 \times 900 = 550 \text{ N/m}^2$. Pour estimer la pression du vent, Buys-Ballot a utilisé comme règle approximative pour désigner la zone de haute pression et la zone de basse pression dans la direction du vent. Il déclare : «Si une personne s'arrête avec son dos face à la direction du vent, la haute pression est à sa droite et à son dos, et la basse pression est à sa gauche et vers l'avant, dans l'hémisphère nord, mais dans l'hémisphère sud c'est la règle inverse qui s'applique »

I.3.3 Échelle de Beaufort

C'est une échelle servant à estimer la force et la vitesse du vent. Elle comporte 12 niveaux de force. Chacune de ces forces est associée à une vitesse approximative du vent ainsi qu'à des effets observables [18].

Tableau I.1 : échelle de beaufort

Force	Vitesse approximative du vent (km/h)	Effets observables
0	0 à 2	La fumée provenant d'une cheminée ou d'un feu s'élève en ligne droite verticalement.
1	2 à 5	La fumée provenant d'une cheminée ou d'un feu s'élève selon la même direction que le vent. Toutefois, la girouette ne bouge pas.
2	6 à 11	On perçoit le vent sur son visage. La girouette tourne pour indiquer d'où vient le vent. Les feuilles des arbres bougent légèrement.
3	12 à 19	Les feuilles et les petites branches des arbres s'agitent constamment. Les drapeaux se déploient.
4	20 à 29	La poussière, les feuilles et les petits objets sont soulevés.
5	30 à 39	Les arbustes bougent légèrement. Des vagues se forment sur les plans d'eaux intérieures.
6	40 à 50	Les grosses branches d'arbres s'agitent. Les parapluies se tournent à l'envers. Les fils téléphoniques se balancent.
7	51 à 61	Les arbres se balancent. Marcher contre le vent est difficile.
8	62 à 74	Marcher contre le vent est une épreuve.
9	75 à 87	Les bardeaux, les antennes des maisons et autres structures sont arrachés.
10	88 à 101	Les arbres sont déracinés. Les maisons subissent de graves dommages.
11	102 à 116	Une violente tempête s'abat et les ravages sont étendus.
12	Plus de 116	Un ouragan se manifeste et il y a dévastation.

I.3.4 Mesure du vent et instruments de mesure

Au sol, en mer et en altitude, le vent est mesuré en km/h, en m/s ou en nœuds. La mesure directe du vent se fait dans des stations météorologiques sur une terre ferme ou en mer grâce à un anémomètre (mécanique en général), qui en donne la vitesse, et une girouette, qui en donne la direction. Il existe d'autres versions dont celles dites à fil chaud où le changement de température d'un thermistor causé par le flux d'air correspond à la vitesse de ce dernier [19].



Figure I.8 : Satellite QuikSCAT qui mesure les vents grâce à un diffusomètre

a. La girouette

C'est un instrument qui indique la direction de provenance du vent. C'est un pointeur (une flèche, un coq etc.) qui est monté sur un axe rotatif placé verticalement (figure I.11). 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 [20].

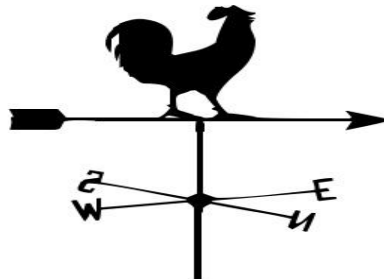


Figure I.9 : la girouette

b. La manche à air

C'est un instrument qui indique l'origine du vent et qui donne une mesure approximative de la vitesse du vent (figure I.12). C'est un tube de toile souple fermé à l'une des extrémités (le manchon) fixé à un mât. 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 une approximation de la vitesse du vent. Chaque bande correspond à une vitesse de 5 nœuds (environ 9 km/h). Ainsi, quand il y a cinq bandes du tube de toile complètement à l'horizontal, il y a un vent d'au moins 25 nœuds (environ 45 km/h). Le tube de toile peut aussi pivoter sur son axe, ce qui permet de connaître la direction du vent. Le manchon pointe vers où le vent se dirige [18].



Figure I.10 : La manche à air

c. L'anémomètre

C'est un instrument qui mesure la vitesse du vent (figure I.13). Il a été inventé par l'architecte italien Leon Battista Alberti en 1450. Il est composé de coupelles en forme de demi-sphères vides orientées dans le même sens 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 [18].



Figure I.11 : L'anémomètre

I.3.5 Forces influant sur le vent

Le mouvement des masses d'air dans l'atmosphère, dont la direction et la vitesse, est régi par plusieurs forces. Pour l'imaginer, supposons que nous avons un échantillon d'air de masse m . Cet échantillon sera affecté par ce qui suit :

- Force de gravité

C'est une force qui exprime le poids d'un échantillon d'air, c'est la force d'attraction entre la terre et cet échantillon. Mais cette force est équilibrée par la force de gradient de pression verticale

- Force de gradient de pression

C'est une force qui résulte des différences de pression d'air, que ce soit horizontalement ou verticalement, de sorte qu'elle pousse l'air de la haute pression vers la basse pression.

➤ Verticalement

Comme nous savons que la pression atmosphérique diminue avec la hauteur et qu'il y a donc une force qui pousse l'échantillon d'air de la haute pression (surface) vers la basse pression en haut et cette force en cas d'homogénéité de l'air la densité de l'échantillon avec le milieu environnant (la température de l'échantillon d'air est égale à la température du milieu) est égale à la force de gravité (poids), donc un équilibre s'établit entre les deux forces.

En l'absence d'homogénéité des vents appelés Vents ancrés naissent sous la forme d'un flux d'air ascendant (chaud) de bas en haut ou de haut en bas sous la forme d'un courant d'air descendant (bar). Selon les conditions de chaleur. Ce type est peu commun sauf dans les pentes abruptes et entre les hautes montagnes et les vallées

➤ Horizontalement

Elle résulte des différences de pression de l'air de surface de sorte qu'ils poussent l'air horizontalement de la haute pression (H) vers la basse pression (L)(figure I.7). La différence de pression dans ce cas est due au gradient de température et aux différences des propriétés thermiques du sol (la terre et la mer par exemple) [21]. C'est la cause principale qui pousse le vent à souffler sur terre. C'est donc la différence de pression entre deux points du sol qui crée la force nommée force du gradient de pression $\vec{F}_{GP}$. Sur une carte de surface cette force est dirigée des hautes pressions vers les basses pressions perpendiculairement aux lignes isobares proportionnellement et de sens contraire au gradient de pression $\vec{\nabla}_P$ et inversement proportionnelle à la densité ρ de l'air. Donc elle est donnée par :

$$\frac{\vec{F}_{GP}}{m} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla}_P = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial P}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial P}{\partial z} \vec{k} \right) \quad (I.3)$$

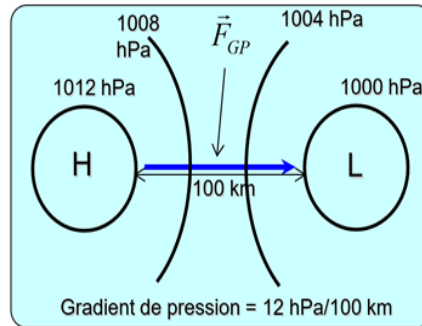


Figure I.12 : **Force** du gradient de pression (F_{GP})

Plus la différence de pression entre deux points est grande ou plus les deux points sont rapprochés plus la force du gradient de pression est grande et plus le vent souffle plus fort.

Ordre de grandeur :

$$\left| \frac{\vec{F}_{GP}}{m} \right| = \left| -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p \right| = \frac{1}{1[kg/m^3]} \frac{10^3[Pa]}{10^6[m]} = 10^{-3} m/s^2$$

Un gradient de pression de l'ordre de $10 hPa$ sur une distance de $1000 km$ crée une force de l'ordre de un centième de la force de gravité.

- Force de Coriolis

Une force qui découle de la rotation de la Terre autour d'elle même ; elle dépend de la vitesse angulaire planétaire si la planète ne tournait pas il n'aurait pas de force de Coriolis. Elle agit sur la direction du vent. Celui-ci est dévié à droite de sa direction dans l'hémisphère nord et à gauche dans l'hémisphère sud (figure I.8). Pour la même vitesse du vent elle est maximale aux pôles et nulle à l'équateur. Cette force dépend aussi bien de la vitesse de rotation de la planète supposée constante que de la vitesse propre du vent par rapport au référentiel de la terre. Plus la vitesse du vent est grande plus la force de Coriolis est importante.

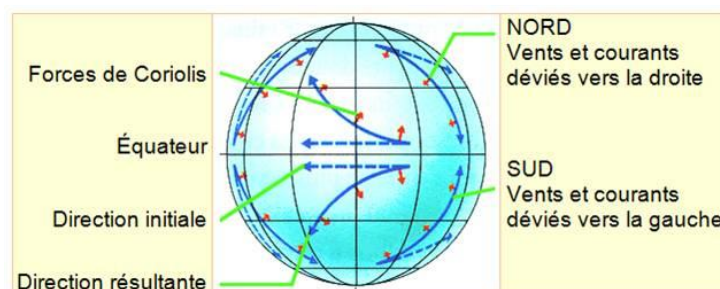


Figure I.13 : Influence de la force de Coriolis sur la direction du vent

L'expression de la force de Coriolis $\vec{F}_C$ est donnée par :

$$\left| \frac{\vec{F}_C}{m} \right| = 2\Omega \sin \varphi |\vec{V}| \quad (I.4)$$

Où Ω est la vitesse angulaire de la terre, $\vec{V}$ la vitesse du vent et φ l'angle de la latitude. Pour la même vitesse elle est nulle à l'équateur ($\varphi = 0^\circ$) et maximum aux pôles $\varphi = 90^\circ$. Donc c'est une force qui modifie la direction du vent mais jamais la grandeur de sa vitesse.

- Force de friction

C'est une force dont l'effet sur le vent est plus sensible près de la surface de la terre (à une altitude inférieure à 1 km) en raison de la rugosité du terrain. Sa grandeur est fonction de la vitesse du vent et de direction opposée. Elle est donnée par :

$$\vec{F}_f = K f(V) \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} \quad (I.5)$$

K est le coefficient de frottement qui dépend de la rugosité de la surface. Il est plus élevé autant que la surface est plus rugueuse.

** La force de friction diminue la vitesse du vent, elle réduit donc l'effet de Coriolis pour augmenter la force de gradient de pression.

** En l'absence de frottement, un équilibre se produit entre la force de gradient de pression horizontale et la force de Coriolis, ce qui signifie un mouvement du vent parallèle aux lignes isobares. Cela se produit autant qu'on s'éloigne du sol. C'est le vent Géostrophique.

- Force centrifuge

Un point fixe de la planète en rotation décrit un cercle dont le rayon R dépend de la latitude. La vitesse tangentielle de la Terre, V , est constante en grandeur à chaque latitude. Rappelons que, en physique, le mouvement circulaire uniforme caractérise le déplacement d'un point matériel dont la trajectoire dans le référentiel considéré est un cercle et dont la vitesse est constante en norme. La force est purement centripète (perpendiculaire à la trajectoire). Dans le référentiel en rotation on définit l'accélération centrifuge comme :

$$\vec{F}_{centrifuge} = -\vec{F}_{centripète} = \frac{V^2}{R} \frac{\vec{R}}{|\vec{R}|} = \Omega^2 R \frac{\vec{R}}{|\vec{R}|} \quad (I.6)$$

- Force centripète

Les isobares présentent très souvent une courbure plus ou moins importante. La courbure des isobares cause un déséquilibre entre la force du gradient de pression et la force de Coriolis, causant à son tour un changement dans la direction du vent. La force nette se nomme force centripète, puisqu'elle agit vers le centre du système de haute pression ou de basse pression afin de changer la direction du vent (figure I.14)

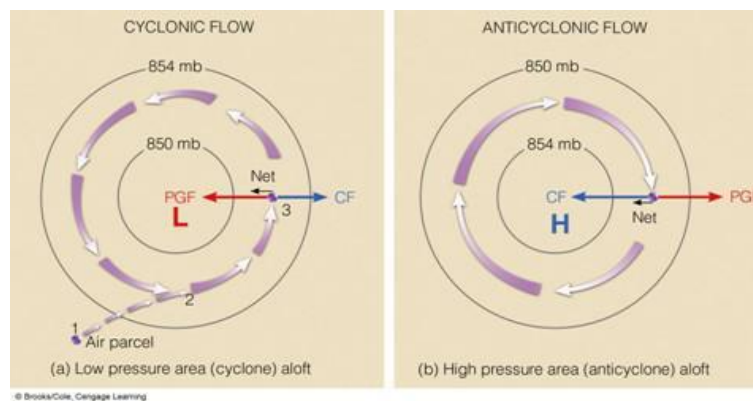


Figure I.14 : Influence de la force centripète sur la direction du vent [22]

En résumé l'évolution de la vitesse du vent et sa direction est régie par la concurrence des forces citées précédemment. Sur la base des forces prépondérante on divise généralement les phénomènes climatologiques en trois zones selon le rayon sur lequel on observe le phénomène :

- Micro-échelle ou locale : Il s'étend sur un rayon allant jusqu'à 2km et peut durer de quelques secondes jusqu'à quelques heures comme celui de l'effet de Bergeron et les cumulus. Les forces prépondérantes dans la détermination de l'intensité et la direction de la vitesse du vent sont la force de gradient de pression, la force de friction et la force de gravitation
- Mésos-échelle ou régionale : observable sur un rayon qui peut atteindre 2000km et qui peut durer jusqu'à quelques jours à quelques semaines comme les orages. Dans ce cas se sont la force de gradient de pression, la force de Coriolis et la force de gravitation qui jouent un rôle déterminant pour le vent.
- Macro-échelle, globale ou synoptique : englobe les phénomènes à l'échelle planétaire comme le Cyclone tropical, le Cyclone extratropical et les ondes planétaires. En altitude La vitesse du vent est quasi constante à cause de l'équilibre qui s'établit entre la force de gradient de pression et la force de Coriolis.

On note que dans une zone de basses pressions comme le cas des cyclones les isobares sont des lignes fermées avec une pression minimale au centre. Le vent dans ce cas acquiert un mouvement de rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et en se dirigeant vers ce centre, à cause de l'équilibre entre la force centripète et la force de gradient de pression d'une part et la force de Coriolis d'autre part :

$$\vec{F}_{centripète} + \vec{F}_{GP} = -\vec{F}_C \quad (I.7)$$

Dans une zone de haute pression comme c'est le cas des anticyclones les isobares sont des lignes fermées avec une pression maximale au centre. Le vent dans ce cas acquiert un mouvement de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre, mais en s'éloignant de ce centre, à cause de l'équilibre entre la force de Coriolis et la force centripète d'une part et la force de gradient de pression d'autre part :

$$\vec{F}_{centripète} + \vec{F}_C = -\vec{F}_{GP} \quad (I.8)$$

Pour l'hémisphère sud c'est le phénomène inverse qui se produit [107'].

I.3.6 Circulations atmosphériques

On distingue trois zones de circulation des vents entre l'équateur et les pôles. La première zone est celle de Hadley qui se situe entre l'équateur et 30 degrés Nord et Sud où l'on retrouve des vents réguliers soufflant du nord-est (circulation directe) dans l'hémisphère nord et du sud-est dans celui du sud. Ces vents réguliers sont appelés les alizés. Les navigateurs à voile ont depuis longtemps utilisé cette zone de vents réguliers pour traverser les océans. La seconde se situe aux latitudes moyennes et est caractérisée par des systèmes dépressionnaires transitoires où les vents sont surtout d'ouest (circulation inverse), c'est la cellule de Ferrel. Finalement, la cellule polaire se trouve au nord et au sud du 60^e parallèle avec une circulation de surface généralement d'Est (donc à nouveau directe). Entre ces trois zones, on retrouve les courants-jets, des corridors de vents circulant autour de la planète à une altitude variant entre 10 et 15 km et qui sont le lieu de frontogénèses.

Ces traits généraux de la circulation atmosphérique se subdivisent en sous-secteurs selon le relief, la proportion mer/terre et d'autres effets locaux. Certains donnent des vents ou des effets sur de grandes étendues alors que d'autres sont très locaux [19].

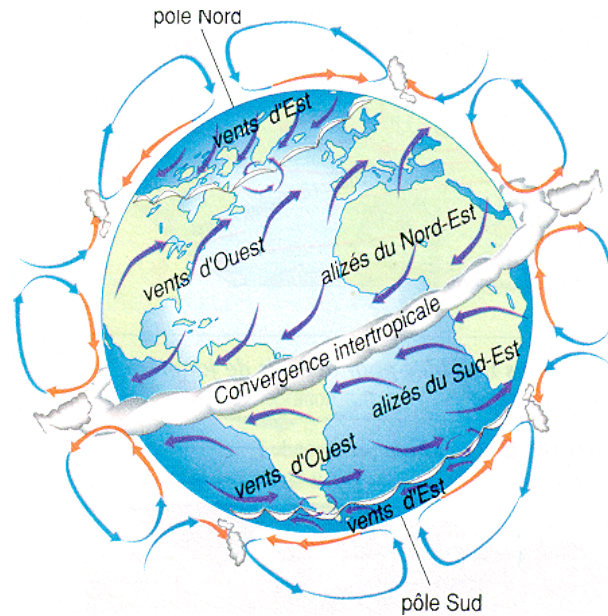


Figure I.15 : Schéma des circulations atmosphériques terrestres [24]

I.3.7 Paramètres météorologiques influant sur l'énergie portée par le vent

Le terme météorologie provient des mots grecs *meteor*, désignant les particules en suspension dans l'atmosphère, et *logos*, qui signifie connaissance. Ainsi, la météorologie est la science qui étudie les phénomènes atmosphériques, tels que les nuages, les précipitations ou le vent. On utilise autant l'observation que l'expérimentation pour analyser ces phénomènes. Différents paramètres tels que la pression atmosphérique, la température ou l'humidité relative, nous permettent de prévoir le temps à venir. Anciennement fondée uniquement sur l'observation, la météorologie s'appuie de nos jours sur des modèles mathématiques dans le but d'établir des prévisions de l'évolution du temps à court et à long terme. La météorologie se compose d'une variété d'éléments qui interagissent entre eux de manière permanente pour déterminer l'état du temps et plus particulièrement la force et la direction du vent. Ces éléments sont les suivants :

- Température

La température de l'air varie entre le jour et la nuit, d'une saison à l'autre et d'un endroit à un autre en raison des changements dans le réchauffement du soleil, il y a plus de vents pendant la journée. Les masses d'air diffèrent également en température. Un front chaud précède une masse d'air froid, donc l'air chaud monte et dépasse l'air froid, provoquant des vents.

- **Pression de l'air**

La pression atmosphérique est le poids d'une colonne d'air atteignant le sommet de l'atmosphère depuis le sol. La pression atmosphérique diminue avec l'augmentation de l'altitude et fluctue à la surface de la terre en raison des différentes élévations du sol. A la surface de la terre, le vent souffle horizontalement des zones de haute pression aux zones de basse pression. La vitesse est déterminée par le taux de changement de pression atmosphérique, ou gradient entre les deux zones de pression. Plus la différence de pression est grande, plus les vents sont violents.

- **Précipitations**

Le terme Précipitations se réfère à la précipitation de l'eau dans l'atmosphère à la surface de la terre, qui est généralement formée comme un résultat de la condensation rapide de l'humidité dans l'air. Dans l'atmosphère, des nuages se forment dans le ciel, puis la pluie tombe sur le sol, et le terme précipitation ne se limite pas à la pluie seulement. Il peut également s'agir de neige, de grêle, de givre ou de brouillard, qui est l'un des principaux éléments de la météo, et ses observations et mesures visent à déterminer dans quelle mesure les activités extérieures peuvent être mises en œuvre ou non.

- **Humidité**

Le terme humidité fait référence à la quantité de vapeur d'eau dans l'air ou dans la basse atmosphère de la terre, et l'humidité affecte les conditions météorologiques pendant la journée en la rendant de plus en plus chaude. Les scientifiques utilisent la mesure de l'humidité pour prédire les tempêtes à venir, et le niveau d'humidité dans une région particulière affecte l'écosystème existant.

- **Nuages**

Les nuages dans l'atmosphère représentent l'un des éléments du temps, et ils sont l'un des facteurs qui indiquent la nature du temps et ses différentes conditions. Par exemple, lorsque les nuages sont clairs et de couleur claire, ils indiquent l'exclusion des précipitations, tandis que les nuages d'intensité et de couleur foncée indiquent une possibilité accrue de fortes pluies ou d'orages.

I.3.8 Vents locaux

Certains types de vents apparaissent sur de petites étendues à cause de certaines caractéristiques géographiques spécifiques ; on les appelle alors les vents locaux. À une zone géographique plus ou moins restreinte et plus ou moins nettement délimitée peut fréquemment être associé à un régime de vent particulier, qui ne souffle sur cette zone que lorsque s'y installe un certain type de temps, descriptible à l'aide de certaines caractéristiques telles que sa direction, les ordres de grandeur de sa force et de sa turbulence, l'humidité et la température.

Un vent local est un élément déterminant du climat de la zone géographique sur laquelle il souffle, et en conséquence il agit directement sur la flore, la faune, le paysage naturel comme l'érosion éolienne et l'économie agricole de cette zone. Pareille action, lentement sensible aussi sur le relief, s'exerce indirectement sur le paysage rural à travers la conception et la disposition des habitations et des terrains ; la géométrie urbaine et les matériaux de construction. L'étude et caractérisation des vents locaux s'avère aussi très important dans la conception et la réalisation des parcs éoliens du moment que les régions siège de ces vents locaux peuvent dévoiler un potentiel considérable en terme d'énergie éolienne.

Ci-dessous sont énumérés les différents types de vents locaux :

- Brises de mer et brises de terre

Les brises de terre et de mer sont des vents locaux qui se produisent sur les zones côtières. Elles sont engendrées par la différence de température entre la surface de la terre et la surface de la mer. Le sol, du sable par exemple, a une capacité calorifique beaucoup plus faible que la mer. En plus, la surface de l'eau n'est pas immobile, il y a un transport d'eau chaude vers les profondeurs, par brassage. C'est-à-dire que le sol se réchauffe beaucoup plus vite que la mer, car cette dernière peut absorber beaucoup d'énergie solaire avant de se réchauffer [25].

Durant le jour, près des côtes d'un lac ou de la mer, le soleil réchauffe alors plus rapidement le sol que l'eau. L'air prend donc plus d'expansion sur terre et s'élève en créant une dépression locale (figure I.16). Cette différence de pression se crée sur une distance très faible et ne peut être contrebalancée par les forces de Coriolis. Une brise de mer (lac) s'établit donc. La même chose se produit la nuit mais en direction inverse ; la brise de terre.

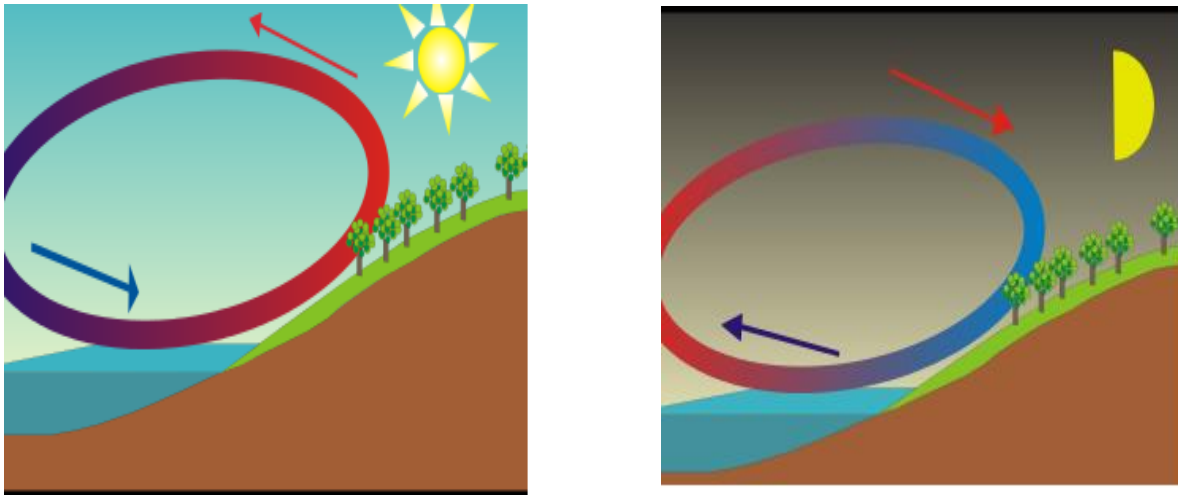


Figure I.16 : Brise de mer et brise de terre

- Brise de pente

Durant la journée toute pente exposée est réchauffée par rayonnement solaire. L'air en contact avec la surface de la pente est à son tour réchauffé alors qu'au même niveau mais à une certaine distance de la pente, la température de l'air ne varie pratiquement pas. L'air plus chaud, donc plus léger, remonte la pente : c'est le vent anabatique. Il est remplacé par de l'air qui, à l'origine, se trouvait à une certaine distance de la pente. Après un certain temps, une circulation fermée s'établit. La nuit, une circulation inverse s'organise en raison du refroidissement du sol. La brise de pente porte alors le nom de vent catabatique.

- Effets des vallées (goulets)

Dans certaines conditions de contraintes, par exemple dans des vallées très encaissées (Figure I.17), l'air ne peut que suivre un chemin. Si le gradient de pression devient perpendiculaire à la vallée, le vent sera généré exclusivement par la différence de pression ; c'est le vent antitriptique. On trouve aussi des accélérations dans les resserrements par effet Venturi (voir ci-dessous) qui donne un « vent de goulet » et un « courant-jet de sortie de vallée » alors que l'air descendant la vallée envahit la plaine [19].

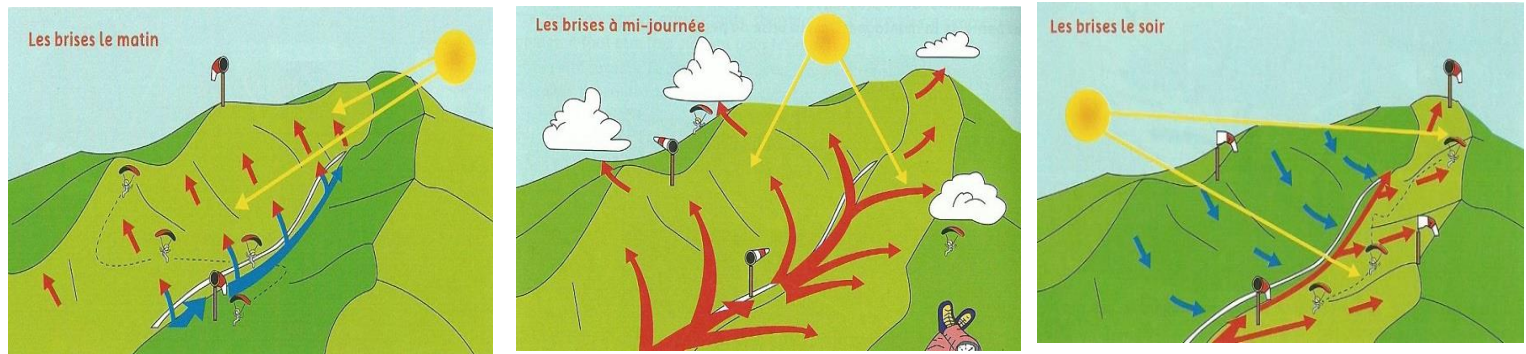


Figure I.17 : Brises de vallée de gauche à droite : matin, mi-journée et soir

- Effets des montagnes

Les montagnes ont différents effets sur les vents. Le premier est l'onde orographique lorsque le vent soufflant perpendiculairement à une barrière montagneuse doit remonter la pente (soulèvement orographique). Si l'environnement est stable, la masse d'air redescendra du côté aval de l'obstacle et entrera en oscillation autour d'une hauteur qui peut être largement supérieure au sommet de celui-ci (Figure I.18). Par contre, si l'air est instable, l'air continuera de s'élever, avec ou sans oscillation. Dans ces conditions, la friction et la poussée d'Archimède doivent être prises en compte lors de la modélisation du vent [19].

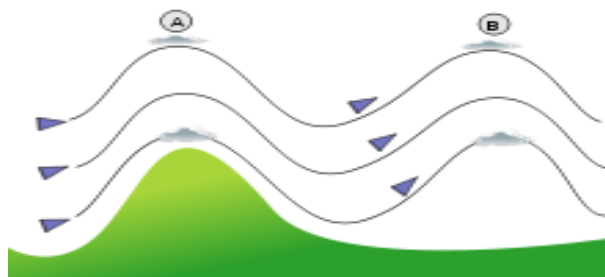


Figure I.18 : Effet d'ondulation avec amortissement sur un vent suite à une montagne

- Effets de méso-échelle

Dans d'autres cas, la balance s'exerce entre la pression et la force centrifuge. C'est le cas des tornades et des tourbillons de poussières où le taux de rotation est trop grand et la surface de la trombe est trop petite pour que la force de Coriolis ait le temps d'agir. Finalement, dans le cas de nuages convectifs comme les orages, ce n'est pas la différence de pression mais l'instabilité de l'air qui donne les vents. La précipitation ainsi que l'injection d'air froid et sec dans les niveaux moyens amènent une poussée d'Archimède négative (vers le bas) dans le nuage. Cela donne des vents descendants qui forment des fronts de rafales localisés [19].

- Effet venturi

L'effet Venturi (du nom du physicien italien Giovanni Battista Venturi) est le nom donné à un phénomène de la dynamique des fluides où les particules gazeuses ou liquides se retrouvent accélérées à cause d'un rétrécissement de leur zone de circulation (Figure I.19).

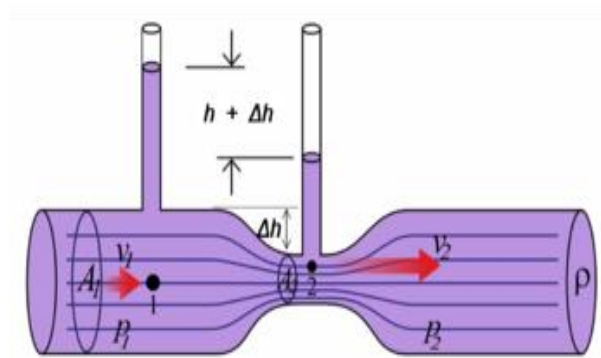


Fig. I.19 : Schéma explicatif de l'effet Venturi La pression au point1 est plus grande qu'au point2 et la vitesse du fluide au point2 est plus grande qu'au point1

Dans les zones montagneuses, l'effet Venturi est fréquemment présent. Quand l'air à proximité de la surface du terrain, en circulation globalement horizontale, rencontre une montagne (ou tout terrain surélevé), il est obligé, pour franchir cet obstacle, de passer par-dessus s'il ne peut pas passer sur les côtés. Le poids des couches d'air supérieures, non perturbées dans leur déplacement par l'obstacle, et le caractère local de cet obstacle, impliquent que l'air concerné ne possède d'autres degrés de liberté que sa vitesse horizontale et sa propre compressibilité. Cette seconde est en général faible. La zone de circulation étant moindre, l'air se retrouve dès lors accéléré de manière à conserver le même débit qu'avant (quantité d'air passant par un point par unité de temps). Un détroit maritime entre deux côtes montagneuses crée aussi un puissant effet Venturi. On observe le même effet dans les vallées où il y a un rétrécissement du terrain dans cet endroit.

Il est également à noter que l'accélération du vent occasionne une chute de la température (décompression adiabatique) et favorise la condensation dans un milieu gazeux. On peut comprendre cet effet avec le théorème de Bernoulli : si le débit de fluide est constant et que le diamètre diminue, la vitesse augmente nécessairement ; du fait de la conservation de l'énergie, l'augmentation de l'énergie cinétique se traduit par la diminution de l'énergie élastique, c'est-à-dire une dépression [19].

I.3.9 Profil de vent en fonction de l'altitude

Au sol, le vent est fortement freiné par des obstacles et par des accidents de terrain. A une certaine hauteur, dans les couches géostrophiques (à env. 5 km de hauteur), le vent ne subit plus l'influence de la surface du sol. Entre les deux, la vitesse du vent varie en fonction de la hauteur. Ce phénomène est connu sous la désignation de cisaillement vertical du vent. Au-dessus d'un terrain plat et avec une stratification atmosphérique neutre, le profil logarithmique du vent permet une bonne approximation du cisaillement vertical :

$$v_2 = v_1 \frac{\ln(\frac{h_2}{Z_0})}{\ln(\frac{h_1}{Z_0})} \quad (I. 9)$$

La vitesse de référence v_1 est mesurée à la hauteur de référence h_1 . v_2 est la vitesse du vent à la hauteur h_2 . Z_0 est la longueur de rugosité [26].

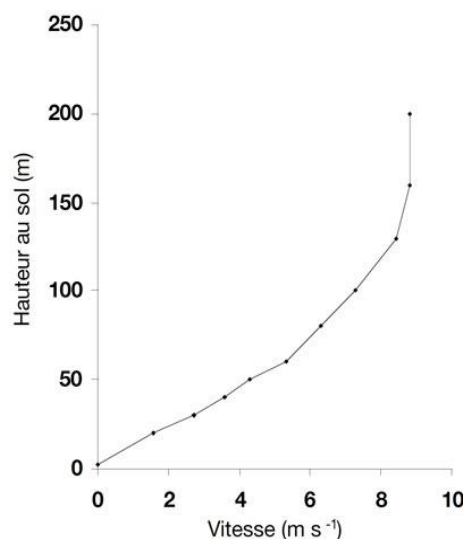


Figure I.20 : Vitesse du vent enregistrée au pylône de mesures du KFK à Karlsruhe (Allemagne) le 16 septembre 1992 à 1 heure du matin

I.3.10 Vents dans la couche limite atmosphérique

a. Définition

La couche limite atmosphérique CLA est la couche de la troposphère dont l'épaisseur est d'environ 1000m, est la couche qui contient 10% du recouvrement de la masse d'air totale et où le déplacement d'air est régi par le gradient de pression. La couche limite atmosphérique, peut être divisée en deux sous couches, la couche limite de surface et la couche limite d'Eckerman.

b. Couche limite de surface (CLS)

Cette couche dont l'épaisseur varie entre 50 et 100m, est la partie basse de la CLA. Elle est en contact direct avec la surface terrestre. Dans cette région, les effets de la force de Coriolis (Chapitre I Généralités sur le vent 8) sont négligeables devant les effets dynamiques engendrés par les frottements au sol ainsi que par la stratification thermique de l'air.

c. Couche limite d'Eckerman

La couche limite d'Eckerman est la partie supérieure de la couche limite atmosphérique. Le vent est alors influencé par le frottement au sol, la stratification thermique de l'air et la force de Coriolis. Avec l'altitude, les forces de frottement deviennent négligeables devant l'effet de la force de Coriolis, jusqu'à atteindre le vent géostrophique [7].

I.3.11 Vent géostrophique

Le vent géostrophique se définit comme le vent qui résulterait de l'équilibre géostrophique entre la force de Coriolis et la force du gradient de pression atmosphérique agissant sur une parcelle d'air (figure I.21). Ce vent soufflerait parallèlement aux isobares dans l'atmosphère. La plus grande partie de l'écoulement atmosphérique, au-dessus de la couche limite en dehors des tropiques, est proche de l'équilibre géostrophique, ce qui en fait une approximation communément utilisée en météorologie. Toutefois, cet équilibre est rarement exact, en raison d'autres forces qui agissent sur le vent comme la friction (près du sol) ou la force centrifuge dans un écoulement courbé [7].

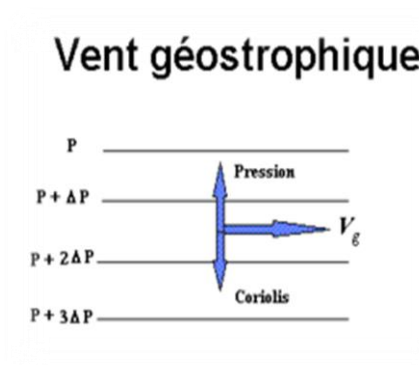


Figure I.21 : l'équilibre entre la force de gradient de pression et la force de Coriolis crée des vents de vitesse quasi-constante V_g et parallèles aux isobares

I.3.12 Impact du vent sur l'environnement

- Rôles du vent dans la nature

Le vent est essentiel à tous les phénomènes météorologiques et donc au cycle de l'eau sans lequel nulle vie à base d'eau, comme nous la connaissons sur Terre, ne serait possible hors des océans. Le vent a un rôle multidisciplinaire. L'oxygénation des océans est principalement le résultat de l'agitation par le vent de leurs surfaces. La circulation engendrée par les vents permet de disperser de nombreux agents minéraux et organiques, les graines des plantes et organismes immobiles (spores et pollen), de façonner les plantes et de provoquer le déplacement des insectes volants et la migration des oiseaux. Les vents sont aussi un agent principal dans la fertilisation des terrains via une variété de phénomènes d'érosion éolienne. Un autre type d'érosion éolienne a une influence sur le type de végétation, suite à une forte érosion du sol et amincissement de celui-ci. Les végétaux qui sont mieux enracinés développent alors des formes résistantes aux vents.

- Dégâts provoqués par le vent

Bien que le vent est dans la plupart des cas un élément indispensable pour l'équilibre de l'écosystème, il devient parfois une force destructrice et dévastatrice du moins à notre échelle et du moins par notre perception des choses. Un vent déchainé dans une tempête, comme le cas d'un cyclone tropical ou un ouragan peut endommager ou détruire des véhicules, des bâtiments, des ponts, des installations du réseau électrique (comme les poteaux et les fils électriques), y compris les éoliennes dans les fermes éoliennes. Parfois des régions entières sont détruites quand il s'agit d'une tempête très violente. L'érosion éolienne est un autre impact causé par le vent et qui peut aller jusqu'à la roche et par conséquent désertifier une région complètement. Un autre effet négatif sur l'environnement est celui de la dispersion des polluant (radioactifs comme le cas de Tchernobyl) ou l'acidification des océans ou encore plus les maladies et les infections que ce soient virales, bactériennes ou fongiques, pour les êtres humains, les animaux ou les plantes (rouille noire). Le vent a aussi des effets sur l'ampleur des feux de forêt, tant par l'alimentation plus ou moins abondante en oxygène des flammes que par le transport d'éléments enflammés ou incandescents permettant ainsi à l'incendie de « sauter » les obstacles [19].

- Utilisation du vent

Les vents sont une source d'énergie renouvelable, et ont été utilisés par l'homme à travers les siècles à divers usages, comme les moulins à vent, la navigation à voile, le vol à voile ou plus simplement le séchage. Différents sports utilisent le vent dont le char à voile, le cerf-volant, la planche à voile et le kit surf. Il sert également à aérer, assainir, rafraîchir les milieux urbains et les bâtiments. Le vent est une de nos plus anciennes sources d'énergie et une grande partie de toutes nos productions tire parti du vent ou lui est adapté. Aujourd'hui encore, il est un intense sujet de recherche car son potentiel d'utilisation demeure encore largement inutilisé tant via des éoliennes que des systèmes de pompe à chaleur ou pour assainir l'air urbain par une urbanisation raisonnée des villes en tenant compte du vent [19].

I.4 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types d'énergies renouvelables et leur principe de fonctionnement. Nous avons traité à part l'énergie éolienne et ses ressources. Il a été souligné son importance parmi les autres types d'énergie renouvelables étant donné qu'elle est disponible partout dans le monde avec un potentiel énorme qui reste peu exploité relativement à son abondance et la maîtrise des technologies s'y attachant. C'est dans cette optique que nous avons exposé plus au moins en détail le vent et ses caractéristiques, les forces naturelles (forces de frottement et forces de Coriolis etc.) affectant son profil, ainsi que l'influence de l'orographie du terrain sur la formation des vents locaux qui sont déterminants non seulement dans l'étude de l'impact du phénomène sur les activités humaines dans ces différentes formes, mais aussi dans le choix du site approprié pour une installation éolienne.

CHAPITRE II
ÉNERGIE ÉOLIENNE -
CARACTÉRISTIQUES ET
ÉVALUATION

II.1 Forme de l'énergie transportée par le vent

L'énergie instantanée fournie par le vent est sous forme d'énergie cinétique, à cause de la vitesse acquise par les différentes particules constituant l'atmosphère où siège le vent étudié. Et comme toute énergie cinétique l'énergie portée par le vent est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air considéré. L'énergie cinétique E_c (en Joules) de la masse d'air en mouvement est alors donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{II. 1})$$

m : masse du volume d'air (en kg)

v : vitesse instantanée du vent (en m/s)

Si cette masse d'air vient heurter une surface A (m^2) comme par exemple la surface balayée par les pâles d'une éolienne horizontale, alors la puissance instantanée disponible au niveau de cette surface sera exprimée par :

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (\text{II. 2})$$

Ou bien la puissance instantanée par unité de surface exprimée en W/m^2 sera :

$$p = \frac{P}{A} = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (\text{II. 3})$$

Où $\rho(\frac{kg}{m^3})$ est la densité de l'air. À une approximation près si ρ est constante alors on voit que la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent c.-à-d. si la vitesse du vent double alors la puissance est multipliée par huit [27].

II.2 Le vent une variable chaotique (aléatoire)

Le vent est un phénomène aléatoire et intermittent qui présente une grande variabilité temporelle et spatiale. En fait il n'existe pas une loi déterministe pour prévoir la vitesse ou la direction du vent sur un site donné en un temps déterminé. C'est pour cette raison que les prévisions sont de caractère probabiliste. La prévision météorologique est une application des connaissances en météorologie et des techniques modernes de prises de données et d'informatique pour prédire l'état de l'atmosphère et le vent en particulier à un temps ultérieur. Elle s'est cependant affirmée avec le développement des moyens techniques modernes comme le radar, les télécommunications et les ordinateurs.

La grande variabilité spatiale et temporelle du vent exige quelques recommandations pour l'installation d'un mât de mesure. Effectivement et Comme le vent est une variable

particulièrement délicate à mesurer, le site doit être bien dégagé et se situer loin de tout bâtiment ou d'arbres, de façon à éliminer les effets thermodynamiques qu'ils induisent. En général on préconise de s'éloigner d'une distance égale à 10 fois la hauteur des obstacles les plus proches. De plus, la surface terrestre exerce dans la couche limite de surface (CLS) une influence très importante sur la vitesse du vent, qui est considérablement freinée par la rugosité du sol, ce qui entraîne une chute de vitesse par effet de cisaillement (voir chap. I paragraphe I.3.9). Donc pour procéder aux mesures, il faut s'éloigner au maximum du sol. La hauteur standard recommandée est de 10m. En outre, le vent étant extrêmement variable dans l'espace, il est très difficile d'extrapoler les données collectées en un endroit, ce qui pose également le problème de la représentativité des mesures. Pour pallier cet inconvénient il faut multiplier fortement le nombre de postes pour espérer rendre compte des phénomènes qui se produisent sur un espace donné. Dans cette logique l'atmosphère doit être surveillée constamment par un réseau de mesures le plus dense possible, d'une manière à quadriller au mieux le territoire. A titre d'exemple le réseau synoptique français comprend des stations de mesures tous les 60 km et moins pour les autres types de réseaux [28]. Les données sur le vent collectées sur les stations météorologiques sont présentées sous forme d'une série chronologique étalée en générale sur plusieurs année allant jusqu'à 30 ans pour des études plus représentatives. Les séries temporelles sont en générale divisées en trois sous-groupes de fréquences :

- basses fréquences : désignent les variations annuelles, saisonnières et mensuelles.
- moyennes fréquences : incluent les variations journalières, diurnes et nocturnes, les variations de quelques heures et horaires.
- hautes fréquences : les variations à la seconde ou à plus haute fréquence (au-dessus de 1 Hz) qui sont nécessaires pour étudier le caractère turbulent du vent. Les données représentées sur la figure II.2 sont des moyennes obtenues toutes les 2 minutes 30 secondes. L'agrandissement en médaillon montre les fluctuations par rapport à la moyenne horaire (données lissées).

La variabilité spatiale désigne principalement la variation verticale et le champ des directions du vent, mais aussi peut inclure les variations horizontales en fonction de la géographie pour dresser une carte de vent du territoire considéré [29].

II.3 Vitesse du vent

Le caractère intermittent du vent se reflète sur l'intensité de sa vitesse qui varie en permanence. Pour pouvoir évaluer le potentiel éolien du site étudié ou prévoir la production d'énergie d'une éolienne, il faut connaître la force et la fréquence d'occurrences des différentes vitesses du vent. Néanmoins, ces données ne peuvent pas être déterminées avec exactitude. Les vitesses collectées sur une période donnée sont traitées par des méthodes statistiques à caractères probabiliste. On mesure la vitesse instantanée du vent ou la vitesse moyenne toutes les 10 minutes selon les performances des équipements installées (dans notre cas les données sont tri horaires). Les données représentées sur la figure II.1 sont des moyennes obtenues toutes les 2 minutes 30 secondes. L'agrandissement en médaillon montre les fluctuations par rapport à la moyenne horaire (données lissées).

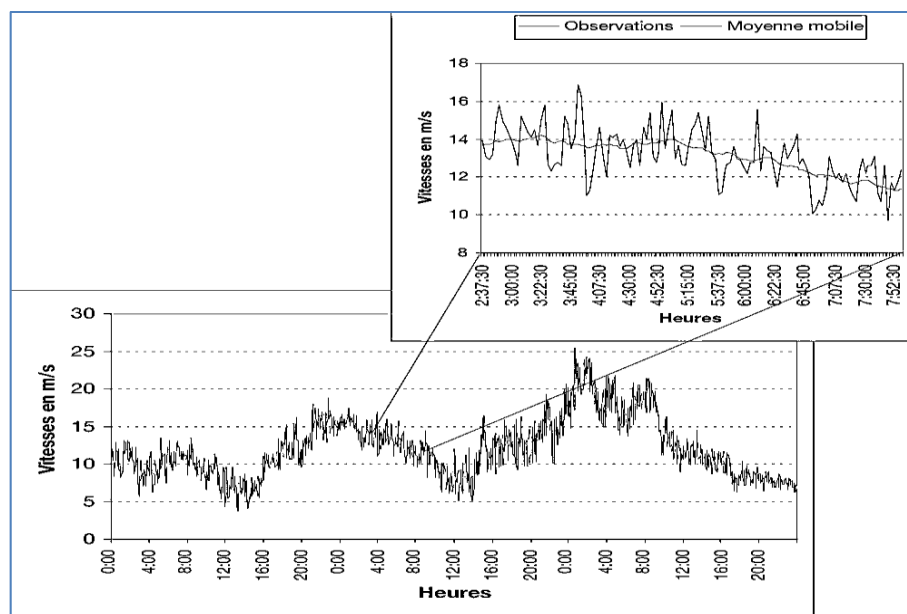


Figure II.1 : Vitesse du vent enregistrée du 3 au 5 juin 1994 à la station de recherche du Kastelberg (1 350 m, Alsace)

Les valeurs mesurées obtenues ne sont pas classées par ordre chronologique, mais sont réparties en différentes classes de largeur 1 m/s et parfois moins selon le nombre des éléments constituant l'ensemble des données ou la précision avec laquelle les vitesses sont mesurées. Les classes ainsi obtenues sont représentées sous forme d'histogramme (Fig. II.2) pour pouvoir comparer entre les différentes classes et par conséquent distinguer celles qui sont les plus probables c.-à-d. celles qui ont la fréquence d'occurrence la plus importante. On peut alors exprimer le potentiel énergétique en fonction de la fréquence des différentes classes de vitesse.

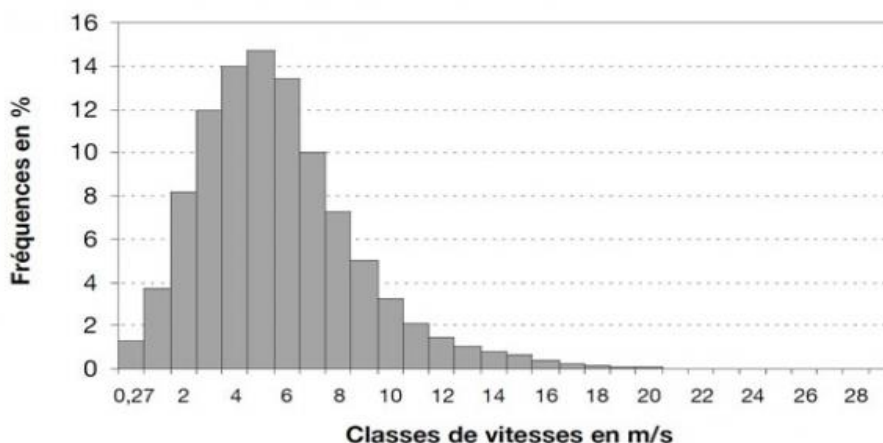


Figure II.2 : Fréquence des vitesses du vent enregistrées de 1987 à 1997 à la station météorologique d'Aubure (1100m, Alsace)

II.4 Direction du vent

La direction du vent, comme la vitesse, est de caractère chaotique dans le temps et dans l'espace. Elle est indiquée par une flèche orientée de la direction d'où souffle le vent vers le centre du petit cercle qui représente le lieu de mesure. Le cercle est appelé la rose des vents (Fig.II.3)

4.1 Rose des vents

Une rose des vents est une figure indiquant les points cardinaux : nord, sud, est, ouest et les orientations intermédiaires, jusqu'à 32 directions. En fait, les roses initiales n'indiquaient pas quatre directions mais huit directions. Depuis l'antiquité les marins utilisaient la navigation astronomique qui nécessite l'usage de la rose des vents. Les Phéniciens ont été les premiers à faire usage de la rose. Plus tard, elle a été utilisée dans la Grèce antique et améliorée par les marins italiens. Le principe d'utilisation d'une rose des vents consiste à trouver sa route selon la direction du vent afin de pouvoir naviguer ensuite.

La rose des vents est d'abord un cercle imaginaire figurant la Terre et comportant 360 degrés. Chacun de ces degrés correspond à une direction. Elle comporte principalement les quatre points cardinaux : le Nord, l'Est, le Sud et l'Ouest. En plus des quatre points cardinaux, il en existe plusieurs autres. En réalité, il en existe 360..., mais on se tire d'affaire avec beaucoup moins. On parle de subdivisions de la rose des vents. Ceux qui sont utilisés régulièrement sont au nombre de 16. Voici leurs appellations et les degrés auxquels ils correspondent (Tableau II.1) :

Tableau II.1 : Les noms des 16 directions de la rose des vents et les angles correspondants
[30]

Direction	Angle (degrés)	Direction	Angle (degrés)
Nord	0° ou 360°	Sud	180°
Nord-Nord-Est	22,5°	Sud-Sud-Ouest	202,5°
Est-Nord-Est	45°	Sud-Ouest	225°
Nord-Est	67,5°	Ouest-Sud-Ouest	247,5°
Est	90°	Ouest	270°
Est-Sud-Est	112,5°	Ouest-Nord-Ouest	292,5°
Sud-Est	135°	Nord-Ouest	315°
Sud-Sud-Est	157,5°	Nord-Nord-Ouest	337°

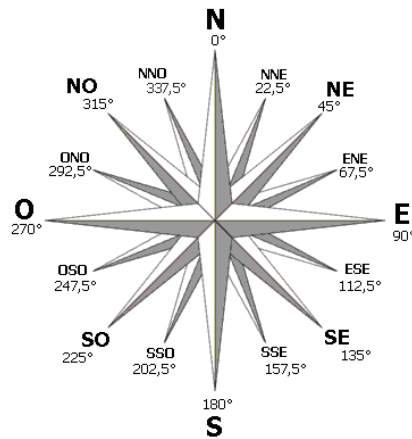


Figure II.3 : Rose des vents

II.5 Modélisation de la vitesse du vent

5.1 Fonction de Weibull

La fonction de Weibull est une fonction qui exprime la densité de probabilité d'occurrence d'une classe de vitesses du vent et est donnée par :

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (\text{II. 4})$$

La distribution de Weibull permet souvent une bonne approximation de la distribution empirique de la vitesse du vent. C'est une distribution à deux paramètres k et c . L'objectif est

de chercher les valeurs de k et c qui donne une courbe optimale vis-à-vis l'histogramme des valeurs des vitesses mesurées. c est appelé le facteur d'échelle de Weibull exprimé en m/s ; il permet d'exprimer la chronologie d'une vitesse caractéristique. c est proportionnel à la vitesse moyenne du vent. k est le facteur de forme de Weibull. Il donne la forme de la distribution et admet des valeurs allant de 1 jusqu'à 3. Une valeur plus faible impliquerait un vent très variable, donc un climat instable, alors qu'un vent constant impliquerait une valeur k plus élevée [31].

5.2 Fonction de distribution cumulative de Weibull

La fonction de distribution cumulée de Weibull correspondante $F(v)$ s'écrit sous la forme suivante :

$$F(v) = \int f(v)dv = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (\text{II. 5})$$

La fréquence cumulative $F(v)$ représente la probabilité d'avoir une vitesse de vent inférieure ou égale à v . On en déduit que La probabilité d'avoir une vitesse du vent 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 :

$$F(v_1 \leq v \leq v_2) = \int_{v_1}^{v_2} f(v) dv = \exp\left[-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k\right] \quad (\text{II. 6})$$

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 [29] :

$$F(v \geq v_0) = \int_{v_0}^{\infty} f(v) dv = \exp\left[-\left(\frac{v_0}{c}\right)^k\right] \quad (\text{II. 7})$$

II.6 Modélisation de la direction du vent

La direction du vent est enregistrée en parallèle avec la vitesse. Étant donné que la direction est mesurée par l'angle d'orientation de la girouette par rapport au nord (positif dans le sens des aiguilles d'une montre), les mesures collectées sont sous forme d'une série chronologique comprenant des angles qui varient dans l'intervalle de 0° jusqu'à 360° , sachant que 0° ou 360° correspond au nord géographique. Les angles de la série sont ensuite regroupés en classes de directions dont le nombre dépend du volume des données et la précision avec laquelle les angles sont mesurés. Les classes ainsi obtenues sont représentées sur la rose des vents constituée de plusieurs cercles concentriques représentant chacun une fréquence donnée selon une échelle choisie au préalable. Sur la même rose on représente quand il est nécessaire la fréquence du vent, c'est à dire le pourcentage du temps durant lequel le vent souffle dans ce secteur, La vitesse moyenne du vent multiplié par sa fréquence et la puissance disponible dans le vent (Figure II.4)

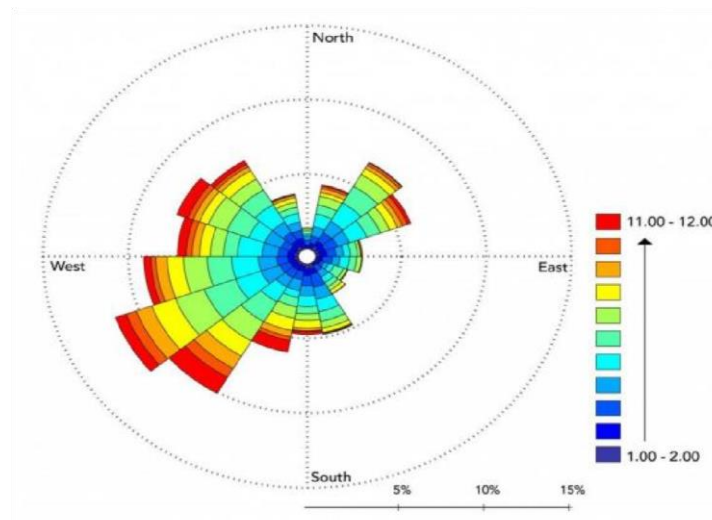


Fig. II.4 : Fréquences des vitesses et des directions du vent pour 18 secteurs de la rose des vents

II.7 Rugosité du sol et cisaillement du vent

L'influence de la surface de la terre (dans la limite de la CLS) sur l'écoulement du vent, donc sur sa vitesse, est très importante à cause de la friction engendrée par le vent contre la surface du terrain. Par contre en s'éloignant du sol et à des altitudes assez élevées, à environ 1km au-dessus du sol, l'influence de la surface de la terre sur l'écoulement du vent est pratiquement nulle. C'est l'effet de cisaillement. On parle normalement du cisaillement du vent pour désigner la variation de la vitesse du vent en fonction de la distance à la surface de la terre. La figure II.5 montre l'effet de cisaillement sur la vitesse du vent pour un terrain constitué de

terre agricole cultivée, avec de rares maisons et clôtures, distantes les unes des autres de quelque 500m [32].

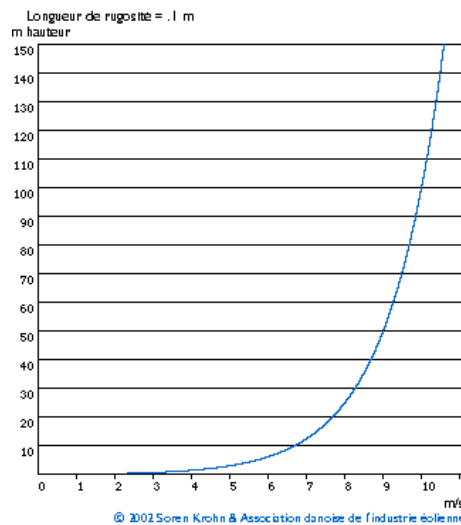


Fig. II.5 : Cisaillement du vent pour une longueur de rugosité $z_0 = 0,1m$

C'est la nature du sol et les végétations qui le couvrent, et la hauteur des constructions y installées qui déterminent la rugosité. En règle générale, une rugosité forte freine considérablement la vitesse du vent. Ainsi, les forêts et les grandes villes freinent évidemment beaucoup le vent, tandis qu'une piste d'atterrissage en béton n'influe que peu sur la vitesse du vent. La surface de la mer a une rugosité encore plus faible que les pistes d'atterrissage ce qui fait qu'elle influe encore moins sur l'écoulement de l'air, alors que l'herbe longue, les buissons et les arbrisseaux freinent considérablement le vent. On signale qu'un effet inverse (cisaillement inverse) s'installe quand on se trouve aux sommets des collines (effet de collines)

7.1 Longueur de rugosité

La longueur de rugosité est la hauteur au-dessus du sol du plan où s'applique la condition d'adhérence, c'est-à-dire où le vecteur vent moyen est égal au vecteur nul. Elle dépend, pour chaque direction, de l'homogénéité du terrain, du type d'obstacles et de la distance sur laquelle ces deux conditions s'appliquent. Il peut y avoir des variations significatives de la longueur de rugosité selon les saisons, dues par exemple aux feuilles ou à une couverture neigeuse. Une des caractéristiques d'un site de mesure du vent est donc sa longueur de rugosité dans chaque direction. Le calcul exact de la longueur de rugosité étant difficile, le tableau ci-dessous fournit une classification qui peut être utilisée.

Le calcul de la longueur de rugosité est dans la plus part des cas très délicat. Pour cette raison on se réfère en général à deux notions lorsque l'on veut évaluer le potentiel éolien d'un

endroit donné : la classe de rugosité et la longueur de rugosité. Les paysages ayant une forte rugosité - avec beaucoup d'arbres ou d'immeubles - sont rattachés à la classe de rugosité 3 ou 4 tandis que la surface de la mer est classée 0. Voir tableau II.2 ci-dessous [33] :

Tableau II .2 : Table des classes et longueurs de rugosité

Type de paysage	Classe de rugosité	Longueur de rugosité en (m)
Mer ouverte, "Fetch" d'au moins 5 km		0 ,00002
Surface d'eau	0	0 ,0002
Terrain complètement dégagé avec une surface lisse	0,5	0,0024
Terrain agricole dégagé, sans clôtures ou haies vives, et avec très peu de constructions. Seulement des collines doucement arrondies	1	0, 3
Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 1.250 m les unes des autres	1,5	0,055
Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 500 m les unes des autres	2	0,1
Terrain agricole avec beaucoup de constructions, arbrisseaux et plantes, ou des haies vives de 8 m de haut situées à environ 250 m les unes des autres	2,5	0,2
Villages, petites villes, terrain agricole avec de nombreuses ou de hautes haies vives, des forêts et un terrain très accidenté	3	0 ,4
Grandes villes avec de hauts immeubles	3,5	0,8
Très grandes villes avec de hauts immeubles et des grattes ciel	4	1 ,6

II.8 Modélisation de la rugosité

La rugosité, intuitivement, définirait des obstacles vus de loin, ou un ensemble de très petits obstacles ramenés à l'échelle du vent. Ses données sont empiriques et il n'existe pas de formules de calcul assez précises pour représenter toute la variété mouvante et vivante des brins d'herbe, des arbres qui poussent et des villes qui se construisent.

La rugosité d'un terrain est très souvent paramétrée par une échelle de longueur appelée longueur de rugosité et notée Z_0 et exprimée en (m). Une relation empirique simple entre les éléments de rugosité et la longueur de rugosité a été formulée par Lettau en 1969.

$$Z_0 = \frac{0,5hs}{A_H} \quad (\text{II. 8})$$

où h est la hauteur de l'élément de rugosité en (m), S sa section transversale face au vent en (m^2) et A_H la surface horizontale moyenne en (m^2) délimitant la répartition de l'élément de rugosité en question [34].

8.1 la rose des rugosités

Il est possible d'estimer de façon très précise la production d'énergie si la vitesse du vent a été mesurée pendant une longue période sur le site prévu et à une hauteur qui correspond à celle du moyeu de l'éolienne à implanter. Cependant, il est souvent nécessaire de se contenter de recalculer des mesures du vent réalisées sur d'autres sites dans la région en question. Il est effectivement possible de faire des estimations très précises, sauf lorsqu'il s'agit de paysages très complexes (p.ex. un terrain très ondulé). Tout comme on se sert de la rose des vents pour déterminer la distribution des vents sur un site donné, on peut se servir d'une rose des rugosités pour décrire la rugosité du terrain dans les différentes directions du vent.

La rose est normalement divisée en douze secteurs de 30 degrés chacun, mais d'autres divisions sont également possibles. De toute façon, le nombre de secteurs doit évidemment correspondre à celui de la rose des vents. Pour chaque secteur, on fait une estimation de la rugosité du terrain en employant le tableau ci-dessus avec bien évidemment une bonne caractérisation du terrain dans chaque secteur de la rose. En principe, il sera ensuite possible d'utiliser le programme de calcul de la vitesse du vent pour estimer de quelle manière la rugosité du terrain influe sur la vitesse moyenne du vent dans chaque secteur [35].

II.9 Méthodes d'évaluation du gisement éolien

L'évaluation du gisement éolien d'un site se déroule en deux étapes. D'abord, des mesures de vent sont réalisées sur le site du futur parc éolien puis, ces mesures sont rapprochées

de celles recueillies par plusieurs sources de données de vent sur le long terme dans la région environnante du projet éolien. Le croisement de l'ensemble de ces données permet d'obtenir une évaluation cohérente du gisement éolien sur le long terme, statistiquement représentative pour la durée de vie du futur parc éolien. Ce gisement éolien long terme sera ensuite utilisé comme référence pour l'étude du potentiel éolien du parc envisagé [36].

Le gisement éolien se définit par l'accumulation du vent dans une région que nous pouvons exploiter ; l'un des modèles le plus utilisé pour analyser le vent est la distribution de Weibull.

II.10 Méthodes de détermination des paramètres de Weibull k et c

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer les paramètres de Weibull c et k à partir des données statistiques du vent. Parmi les plus utilisées, on peut retenir :

10.1 Méthodes des moindres carrées

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

$$p(v \leq v_x) = \int_0^{v_x} f(V) dv = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v_x}{c}\right)^k\right) \quad (\text{II. 9})$$

$$p(v \geq v_x) = \int_{v_x}^{\infty} f(v) dv = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v_x}{c}\right)^k\right) \quad (\text{II. 10})$$

La relation (II.10) peut être linéarisée en écrivant :

$$\log[-\log p(v \geq v_x)] = k \log v_x - k \log c \quad (\text{II. 11})$$

Et en posant :

$$y = \log[-\log f(v \geq v_x)] \quad (\text{II. 12})$$

Et

$$x = \log v_x \quad (\text{II. 13})$$

Il vient :

$$y = ax + b \quad (\text{II. 14})$$

Avec :

$$k = a \quad \text{et} \quad b = -k \log c \quad (\text{II. 15})$$

D'où :

$$c = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \quad (\text{II. 16})$$

10.2 Méthode de la médiane et les quartiles

Une autre méthode, pratique si l'on connaît la médiane $V_{mé}$ et les quartiles $V_{0,25}$ et $V_{0,75}$ des vitesses de vent, consiste à écrire :

$$k = 1,573 \ln \frac{V_{0,75}}{V_{0,25}} \quad (\text{II. 17})$$

$$C = \frac{V_{mé}}{(\ln 2)^{\frac{1}{k}}} \quad (\text{II. 18})$$

Les quartiles sont définis par $p(V \leq V_{0,25}) = 0,25$ et $p(V \leq V_{0,75}) = 0,75$

10.3 Méthode de la vitesse moyenne et la variance

Si la vitesse moyenne V_{moy} et la variance σ d'un site, sont connus, (on peut les déterminer à partir de la distribution statistique), le paramètre de forme, k est déterminé en posant l'approximation suivante :

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_{moy}} \right)^{-1,086} \quad (\text{II. 19})$$

Le facteur d'échelle est alors déterminé par :

$$c = \frac{V_{moy}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (\text{II. 20})$$

Où Γ est la fonction GAMMA qui est définie par la relation suivante :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t)t^{x-1}dt \quad \text{avec } x > 0 \quad (\text{II.21})$$

La vitesse cubique moyenne du vent est calculée par la relation suivante :

$$(V^3)_{moy} = \int_0^{\infty} V^3 P(V) dV = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (\text{II. 22})$$

La variance :

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (V - V_{moy})^2 f(V) dV = c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) \right] - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (\text{II. 23})$$

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

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

$$k = 1,05\langle V \rangle^{0,5} \quad \text{variabilité du vent faible} \quad (\text{II.24})$$

$$k = 0,94\langle V \rangle^{0,5} \quad \text{variabilité du vent moyenne} \quad (\text{II.25})$$

$$k = 0,73\langle V \rangle^{0,5} \quad \text{variabilité du vent élevée} \quad (\text{II.26})$$

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

II .11 Vitesse moyenne

La vitesse moyenne du vent est calculée à partir de l'intégrale du produit de la vitesse du vent et de la fonction de distribution de Weibull. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$V_{moy} = \int_0^{\infty} V f(V) dV \quad (\text{II. 27})$$

où $f(v)$ est la distribution de Weibull donnée dans la relation (II.4). On remarque qu'elle est fonction du facteur de forme k (sans dimension) et du facteur d'échelle c (m/s).

L'intégration de l'équation (II.27), introduit la fonction gamma. Ainsi, la vitesse moyenne se met sous la forme :

$$v_{moy} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \quad [\text{m/s}] \quad (\text{II. 28})$$

où Γ est la fonction gamma dans la relation (II.21) [6].

II.12 Puissance disponible

La puissance théorique portée par le vent (disponible) est la puissance d'un échantillon de l'atmosphère contenue dans un cylindre de section $A(\text{m}^2)$ (l'aire balayée par le rotor d'une éolienne par exemple)

$$P_{theoriaue} = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (\text{II. 29})$$

ρ est la masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1.23 kg/m^3 à 15°C et à pression atmosphérique normale équivaut à 1.0132 bar). Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (sur les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne. V est la vitesse du vent en m/s [37].

II.13 Énergie disponible pendant une période de temps T

L'énergie E produite par une éolienne est plus faible que l'énergie éolienne totale disponible sur un site donné. L'énergie éolienne extraite peut-être calculée en fonction du nombre d'heures dans une période T par la relation suivante :

$$E = P_m T \quad \left(\frac{W}{h} \right) \quad (II. 30)$$

Où T est le temps de la production donné par :

$$T = d \times 24 \quad (h) \quad (II. 31)$$

d représente le nombre de jour.

Par ailleurs, le calcul de l'énergie E , annuelle ainsi que l'énergie mensuelle E_m et E_s saisonnière produites s'effectue par les relations suivantes [37] :

$$E = \sum_{i=1}^{12} E_m = \sum_{i=1}^4 E_s \quad \left(\frac{W}{h} \right) \quad (II. 32)$$

$$E_m = 24 \times d_m \times P_{moy} \quad (W/m^2/mois) \quad (II. 33)$$

$$E_s = 24 \times d_s \times P_{moy} \quad (W/m^2/saison) \quad (II. 34)$$

Avec :

d_m : Nombre de jour dans un mois

d_s : Nombre de jour dans une saison

II.14 Puissance récupérable

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance $P_{réc}$ inférieure à la puissance disponible P_{disp} .

$$P_m = \frac{1}{2} c_p \rho s v^3 \quad (II. 35)$$

c_p est un coefficient positif, sans dimension et est inférieure à 1, appelé aussi rendement. Ce dernier est propre à chaque éolienne. C'est le rapport entre la puissance fournie par l'éolienne et la puissance disponible à l'entrée de la voilure par la relation suivante [38] :

$$c_p = \frac{p_m}{p_{th}} \quad (II. 36)$$

II .15 Extrapolation de k et c en altitude

L'extrapolation verticale des paramètres de Weibull peuvent être ajustés pour une hauteur désirée h_2 en utilisant les expressions suivantes :

$$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^n \quad (\text{II. 37})$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_2}{10}\right)}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)} \quad (\text{II. 38})$$

L'exposant n est calculé par :

$$n = \frac{0.37 - 0.088 \ln(c_1)}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)} \quad (\text{II. 39})$$

A savoir que k_1 et c_1 sont les paramètres de Weibull à la hauteur h_1 et k_2 et c_2 ceux à la hauteur h_2 .

II.16 Vitesse du vent au niveau du moyeu la turbine éolienne

La vitesse du vent ainsi que les paramètres de Weibull varient proportionnellement en fonction de la hauteur. Justus et Mikhail ont exprimés la vitesse du vent (v_2) à la hauteur désirée (h_2) comme suit [38] :

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (\text{II. 40})$$

Où α est le coefficient de cisaillement du vent et est donné par :

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(v_1)}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)} \quad (\text{II. 41})$$

CHAPITRE III

ÉVALUATION DU GISEMENT

ÉOLIEN DANS LA RÉGION DE

M'SILA

III-1 Introduction

Le vent est un élément important dans la caractérisation du climat. Malheureusement il est aussi un élément dont l'étude s'avère très complexe, car plusieurs paramètres y interviennent tels que la mesure de la vitesse du vent et de sa direction, l'effet de la rugosité du sol, des obstacles, de la stabilité de l'atmosphère, etc. Dans ce chapitre, nous allons faire une étude du gisement éolien de la région de m'sila en utilisant les données météorologiques en termes de vitesse et direction du vent. Ceci en utilisant le logiciel WAsP. Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes et les courbes de Weibull ajustées, de roses des vents et de tableaux [1].

III-2 Géographie et climat de la région de M'sila

III-2-1 Position et caractéristiques géographiques de M'sila

La Wilaya de M'sila, dans ses limites actuelles, occupe une position privilégiée dans la partie centrale de l'Algérie du nord dans son ensemble, elle fait partie de la région des Haut Plateaux du Centre et s'étend sur superficie de 18175 km² pour une population estimée à 1 210 952 habitants, soit une densité moyenne de 66 hab./km². Sa morphologie et sa position géographique confèrent à cette région un aspect écologique unifié représenté par la prédominance de la steppe qui couvre 1 200 000 ha (soit 63 % de la superficie totale) de la wilaya. La superficie affectée à l'agriculture représente 20 % de la surface totale, consacrées essentiellement à la céréaliculture, à l'arboriculture et au maraîchage. Elle est située à 35°40' latitude Nord et 04°30' longitude Est, sur une altitude d'environ 441m. Elle est située au Sud Est d'Alger, limitée au Nord par les Wilayas de Médéa, Bordj Bou –Arreridj, Sétif et Bouira ; l'Ouest par Djelfa ; à l'Est Batna et au Sud par Djelfa et Biskra [2]. Wilaya principalement agropastorale, les principales agglomérations sont M'sila, Bou-Saadâ, Sidi-aïssa et Aïn-elmelh. Le tableau III-1 Ci-dessous regroupe la localisation géographique de la wilaya.

Tableau III.1 : Coordonnées géographiques de M'sila

Localisation de	Latitude(°)	Longitude(°)	Altitude(m)
M'sila	35°39' N	04°29'E	497

III-2-2 Relief et orographie de la région de M'sila

Le territoire de la Wilaya constitue une zone charnière et de transition entre les deux grandes chaînes de montagnes ; l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien [2]. La configuration géographique y est comme suit :

- Une zone de montagnes de part et d'autre du chott El-Hodna qui atteint son point culminant à 1890m d'altitude.
- Une zone centrale constituée essentiellement de plaines et de hautes plaines ;
- Une zone de chotts et de dépression avec le Chott El Hodna au centre Est et le Zahrez Chergui au centre Ouest ;
- Une zone de dunes de sable éolien dans sa partie sud [39].

III-2-3 Climat de la région de M'sila

Le climat présent à M'Sila est de caractère steppique et semi-aride. Tout au long de l'année, il y a peu de précipitations. La carte climatique de Köppen-Geiger y classe le climat comme étant de type BSk (Climats froids semi-arides). M'Sila affiche une température annuelle moyenne de 15.8 °C. Chaque année, les précipitations sont malheureusement faibles et irrégulières et sont en moyenne de 229 mm sur le territoire de la wilaya, tandis que les régions montagneuses présentent un taux de pluviométrie nettement supérieur avec une couverture neigeuse assez importante pendant l'hiver. Ce sont les précipitations de cette région en y ajoutant celles des autres régions montagneuses des wilayas limitrophes du nord, qui alimentent l'immense bassin versant constituant les plaines de Msila, le chott d'El-Hodna et les nappes phréatiques. Plusieurs barrages sont construits sur le territoire de la wilaya dont le but est d'exploiter ces immenses quantités d'eaux provenant des hautes montagnes. On peut citer le barrage de ksob de capacité de rétention de 50 millions de m³, le barrage de Soubella (17,4 M de m³) et celui de Medjedel (15 M de m³). Ces barrages peuvent être sujet d'étude pour évaluer le gisement éolien sur les zones adjacentes et éventuellement l'installation de fermes éoliennes, qui si elles sont couplées à des stations hydroélectriques installées aux pieds de ces barrages permettrait l'utilisation des techniques de pompage – turbinage qui servirait à stocker le surplus de l'énergie électrique produite par les éoliennes sous forme d'énergie potentielle gravitationnelle.

III-2-4 Les vents soufflants sur la région de M'sila

Les vents dominants qui soufflent dans la région de M'Sila sont [2] :

- **Le vent d'ouest (W)**, dit « DAHRAOUI » est le plus pluvieux et est fréquent en Automne, en hiver et au printemps.
- **Le vent du nord (N)**, dit « BAHRI » est moins fréquent, il est froid et sec.
- **Le vent du Nord-est** : bien réparti sur toute l'année accède facilement dans la cuvette d'El-Hodna par vallée d'Ouest Biskra
- **Les vents à directions variables** : soufflent surtout pendant les saisons sèches.

- **Le sirocco** : Il est aussi appelé **shehili**. C'est un vent chaud et sec, souffle en général du sud ou sud-est avec des rafales brûlantes. Le sirocco naît à cause des dépressions qui se forment sur la mer Méditerranée. L'air tropical chaud (anticyclone) qui stationne au-dessus du Sahara peut être aspiré par la dépression qui se creuse au-dessus de la mer Méditerranée et par conséquent il touche l'Afrique du nord, la Sicile, la Corse, voire le sud-est de la France. Le sirocco entrave le développement des cultures et constitue la cause du faible tapis végétal dans la wilaya de M'Sila

III-3 Modélisation du vent dans la région de M'sila

Le vent est une ressource aléatoire. Les éoliennes produisent donc de l'électricité de façon intermittente sur un réseau électrique. La bonne utilisation de l'énergie éolienne nécessite alors un choix très judicieux du site en fonction des vitesses moyennes de vent, des rafales, des directions des obstacles etc. Par conséquent le site est très souvent une donnée du problème en particulier quand on utilise des aérogénérateurs de petite et moyenne puissance. Par ailleurs et pour construire un profil représentatif du vent du site étudié, on doit disposer d'une quantité énorme de données météorologiques collectées pendant une durée qui peut s'étendre sur plusieurs années, par le biais d'un pylône de mesure installé sur place ou offertes par une station météorologique sous forme de séries chronologiques ou des images satellitaires obtenues par les différentes techniques existantes dans le monde de la météorologie comme le SODAR ou le LIDAR.

Dans cette section, nous avons présenté les résultats de l'étude sur le vent relatif à la région de M'sila. Tout d'abord nous avons traité et analysé les données de la vitesse et la direction du vent collectées sur un pylône de mesure de hauteur standard de 10m de haut. Dans un deuxième temps nous avons extrapolé ces résultats pour différentes hauteurs en l'occurrence 25m et 50m de haut. L'étude basée sur l'utilisation du logiciel WAsP conçu pour cet effet, comprend la distribution annuelle, saisonnière et mensuelle de la direction du vent, l'histogramme des vitesses du vent ajusté par la distribution de Weibull, qui nécessite la détermination de deux paramètres dont dépend la fonction de densité de probabilité de Weibull (pdf). Les deux paramètres notés k et c ; le facteur de forme (sans dimension) et le paramètre d'échelle (en m/s) respectivement, sont indispensables non seulement pour déterminer la forme de la courbe ajustée sur l'histogramme, mais aussi pour calculer la vitesse moyenne et la densité de puissance moyenne ; annuelle, saisonnière ou mensuelle.

3-1 station météorologique de M'sila

Les données utilisées dans cette étude sont issues de la station météorologique de M'sila antenne de l'office national de météorologie (ONM) (voir Tableau III.2 et Fig. III.1) dans le cadre d'un contrat de coopération signé entre l'université Mohamed BOUDIAF de M'sila d'une part et l'ONM de M'sila d'autre part. Les données comprennent la vitesse et la direction du vent pendant une période de 12 ans. Les données sont sous forme d'une série chronologique, dont l'intervalle d'enregistrement est de trois heures. Tandis que les données effectivement exploitées dans la présente étude sont limitées sur deux ans ; 2015 et 2016. En effet la quantité d'évènements analysée est de 5840 valeurs pour chacune des deux grandeurs (vitesse et direction). L'ensemble de ces données est ensuite transformé en fichier format texte, puis traité et analysé par le logiciel WASP. Dans le paragraphe ci-dessous une description sommaire du logiciel est exposée, comprenant le mode de fonctionnement les données d'entré indispensable pour le processus de calcul, les données à la sortie (l'ensemble des grandeurs calculées), ainsi que les graphes et les cartes représentatives du gisement éolien de la région d'étude.

Tableau III.2 : Données sur la station météorologique de M'sila [40]

Indicatif	60467
Altitude	441 mètres
Coordonnées	35,67°N 4,50°E
Début des archives	1er janvier 1981
Fuseau horaire	Africa/Algiers
Type de station	METAR/SYNOP



Figure III.1 : position de la station météorologique de M'sila désignée par étoile sur la carte géographique

3-2 Présentation du logiciel WAsP

Le logiciel WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), a été établi et commercialisé par le Laboratoire National Risø au Danemark en 1987. C'est un outil servant à analyser des données éoliennes, créer des cartes de vent, évaluer le potentiel éolien et optimiser le positionnement des turbines éoliennes pour minimiser l'effet de sillage. A travers les années, le programme a été largement utilisé dans l'industrie éolienne pour l'évaluation de la ressource éolienne [3, 5].

3-3 Présentation de l'assistant OWC

Lors du calcul d'un atlas des vents à partir des données du site, WAsP n'utilise pas la série chronologique des données. Au lieu de cela, WAsP a besoin d'un résumé tabulaire de la fréquence d'occurrence de la vitesse du vent par rapport à direction du vent. Ce résumé tabulaire est contenu dans un fichier climat vent observé (fichier OWC ou TAB).

L'assistant OWC est un programme utilitaire qui produit des fichiers OWC à partir des mesures brutes la vitesse et de la direction du vent. Les séries chronologiques des données de la vitesse et de la direction du vent sont transformées en un tableau qui décrit un résumé indépendant du temps et des conditions rencontrées sur le site de mesure [4]. La figure III.2 représente deux fenêtres de l'interface de WAsP. La première est une fenêtre d'accueil, tandis que la deuxième permet d'insérer les coordonnées géographiques du site avec une barre en bas servant à introduire un court texte décrivant le site.

WAsP est constitué de cinq blocs principaux :

- l'analyse des données brutes ;
- la génération d'atlas de vent ;
- l'estimation des conditions du vent ;
- l'estimation de la production éolienne ; et,
- le calcul de la production d'une centrale éolienne.

Premièrement, l'analyse des données brutes permet d'obtenir un résumé statistique d'une série de données temporelles observées sur un site spécifique. Ce résumé consiste principalement en la construction de la rose des vents ainsi qu'une distribution de Weibull pour chacun des secteurs de la rose des vents. Par la suite, la génération d'atlas de vent convertit les conditions de vent d'un site spécifique en conditions de vent régional ou en atlas de vent. À l'aide des modèles de changement de rugosité, d'écoulement en terrain complexe et des obstacles, WAsP transforme les conditions de vent de manière à ce qu'elles soient indépendantes de la topographie du site. Puis, en utilisant l'atlas de vent calculé par WAsP ou tout autre atlas de

CHAPITRE III : ÉVALUATION DU GISEMENT ÉOLIEN DANS LA RÉGION DE M'SILA

vent, l'estimation des conditions de vent d'un site spécifique peut être déterminée en effectuant le calcul inverse de celui pour la génération de l'atlas de vent.

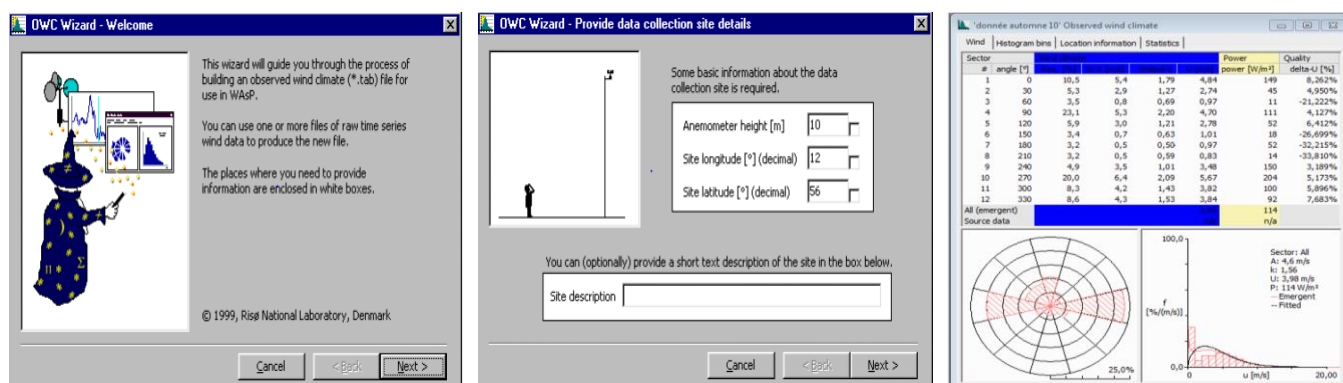


Figure III.2 : Démarrage de l'assistant OWC

3-4 Résultats et discussion

3-4-1 Distribution de la direction du vent à 10m de haut

a- Annuelle

La rose des vents de la Figure III.3 ci-dessous représente la distribution des directions du vent tout au long de l'année. On remarque que la direction ouest est prédominante avec une fréquence de 19% c'est le vent DAHRAOUI qui est fréquent pendant l'Automne, en hiver et au printemps, puis celle de l'est avec une fréquence de 16 %. C'est le vent nord-est qui est présent tout au long de l'année et qui arrive à la vallée d'El-Hodna de l'ouest de Biskra. Le vent EL-BAHRI qui souffle du nord est moins fréquent avec une fréquence de 10%. En fin Le vent provenant du sud-est (le sirocco) avec une fréquence qui peut atteindre 18%, qui est aussi très fréquent sur la région de M'sila. La distribution des directions du vent comme indiquée sur la figure III.3, montre bien que les directions prédominantes sont globalement dans la direction Nord-ouest avec un angle de dispersion de 60° de part et d'autre et dont la fréquence au total atteint 51%, tandis que la direction Sud-est englobe des vents avec une dispersion de 90° et une fréquence de 35%. Lors de l'installation d'une ferme éolienne l'orientation optimale des rangés est la direction Nord-est, pour minimiser au maximum l'effet de parc.

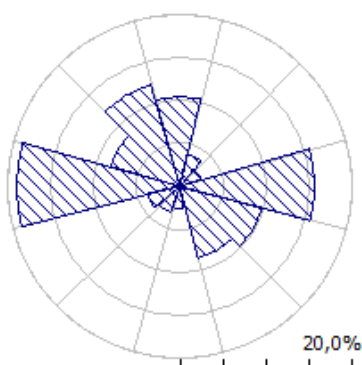


Figure III.3 : Distribution annuelle des directions du vent à 10m du sol

b- Saisonnière

La figure III.4 représenté les roses des vents des quatre saisons. On remarque que la direction dominante commune entre l'automne et l'hiver et le printemps est l'ouest avec des fréquences 19%, 24% et 19% respectivement. Alors que pendant le printemps et l'été l'est présente des fréquences de 19% et 21% respectivement. On conclue que le vent est stable dans sa direction ouest au cours des trois saisons ; l'automne, l'hiver et le printemps, alors que la stabilité dans sa partie est atténuée pendant l'hiver.

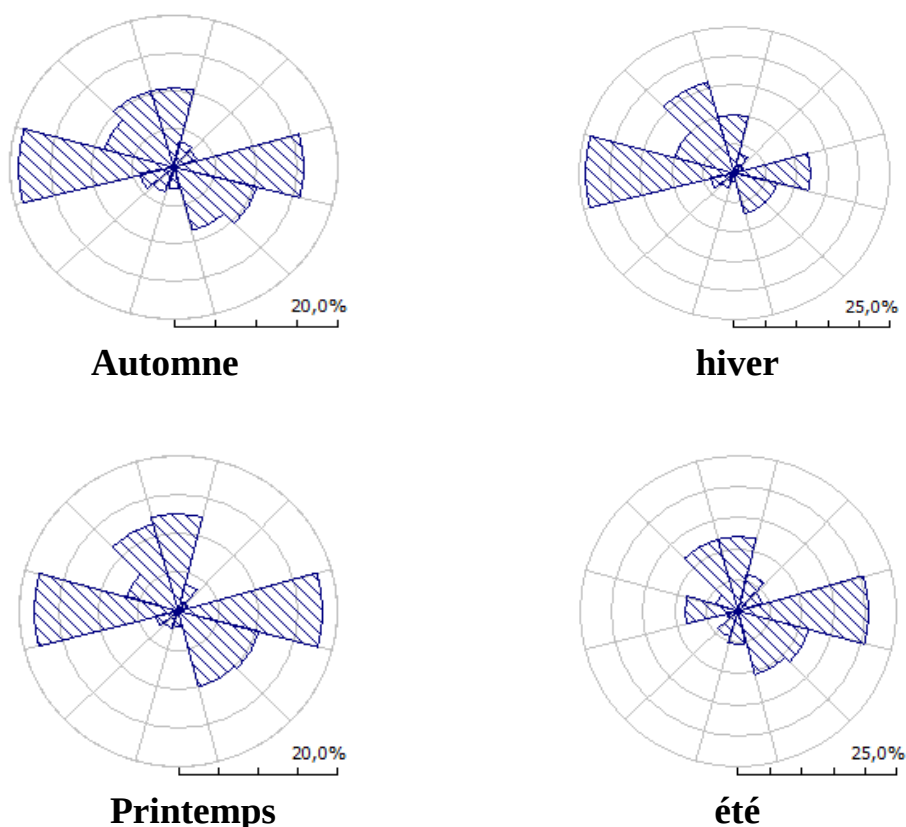


Figure III.4 : Distribution saisonnière des directions du vent à 10m de haut

c- Mensuelle

La figure III.5 comprend les roses des vents mensuelles. Tel qu'elles sont représentées sur la figure, on constate que l'Ouest est la direction prédominante dans les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre. En revanche c'est la direction Est qui prédomine dans les mois d'avril, juillet, août et octobre. D'autre part et en plus des deux directions Ouest et Est, le Nord apparaît comme une troisième direction dominante avec une fréquence de 15% durant les mois de mai et juin.

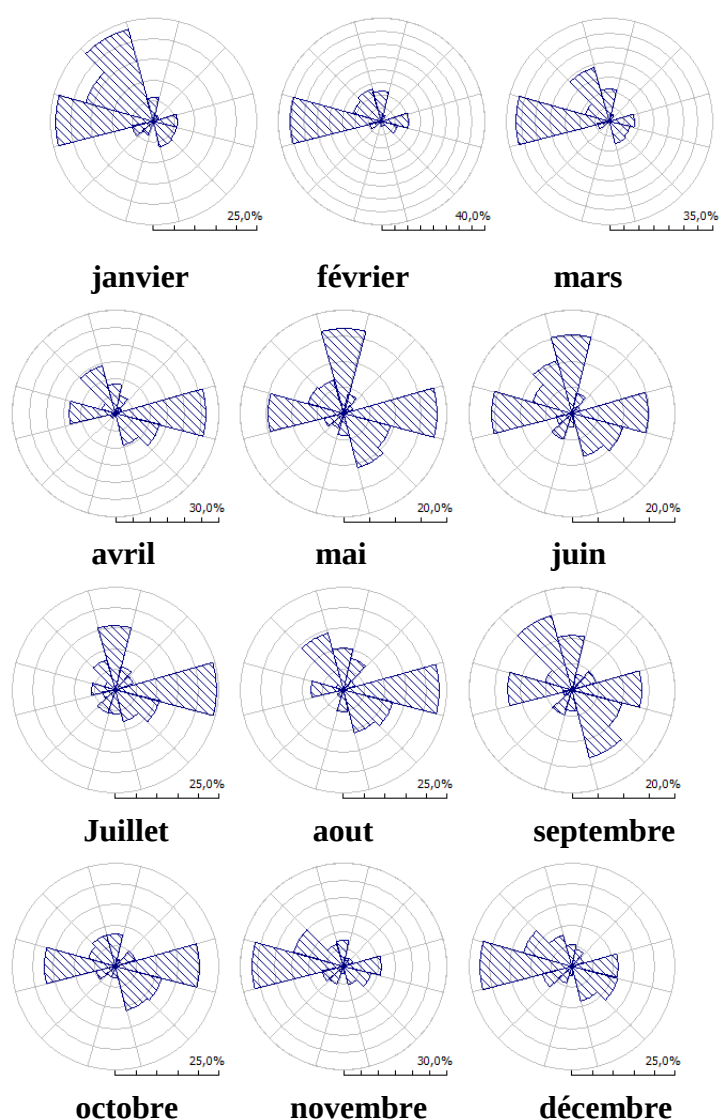


Figure III.5 : Distribution mensuelle des directions du vent à 10m de haut

Remarque : Les roses des vents annuelle, saisonnière et mensuelle à 25m et 50m de haut sont en réalité légèrement modifiées par rapport à celles obtenues à 10m de haut à cause de la diminution de la force de friction et l'effet d'ombre des obstacles car dans ce cas la turbulence

du vent diminue avec la hauteur. Donc on admet avec une bonne approximation que les roses des vents sont les mêmes.

3-4-2 Distribution de la vitesse du vent à 10m de haut

a- mensuelle

La distribution mensuelle consiste à construire un histogramme à partir des données de la vitesse se rapportant au même mois, tout secteur confondu (sans prendre en considération la direction du vent). Une courbe de Weibull ajustée à l'histogramme est ainsi obtenue avec les deux paramètres caractérisant la courbe, en l'occurrence k et A ainsi que la vitesse moyenne U et la densité de puissance moyenne P . La figure III.6 regroupe les courbes correspondant aux mois de l'année. Dans chaque graphe sont indiquées les valeurs calculées des paramètres cités ci-dessus. On voit que le vent est globalement stable (valeurs de k aux alentours de 2), néanmoins il présente des fluctuations d'un mois à un autre on remarque à titre d'exemple que les mois d'hiver ont des valeurs de k les plus basses, ce qui signifie que le vent est moins stable durant ces mois. On peut voir aussi que les mois de novembre et décembre présentent un taux de vitesses nulles (vents calmes) assez élevé.

Le tableau III.3 Résume les valeurs calculées des deux paramètres de Weibull, la vitesse moyenne et la densité de puissance moyenne pour les mois à 10m de haut. On remarque que la vitesse moyenne maximale de 6.43m/s et la densité de puissance moyenne maximale de 400W/m² sont obtenues en mois de février. En revanche la vitesse moyenne minimale de 3.29m/s et la densité de puissance minimale de 49W/m² sont calculées pour le mois de décembre. Quant aux deux paramètres de Weibull, le facteur de forme k atteint sa valeur maximale de 2.44 en mois de septembre, alors que le facteur d'échelle A est maximum en mois de mars avec une valeur de 7.2m/s.

CHAPITRE III : ÉVALUATION DU GISEMENT ÉOLIEN DANS LA RÉGION DE M'SILA

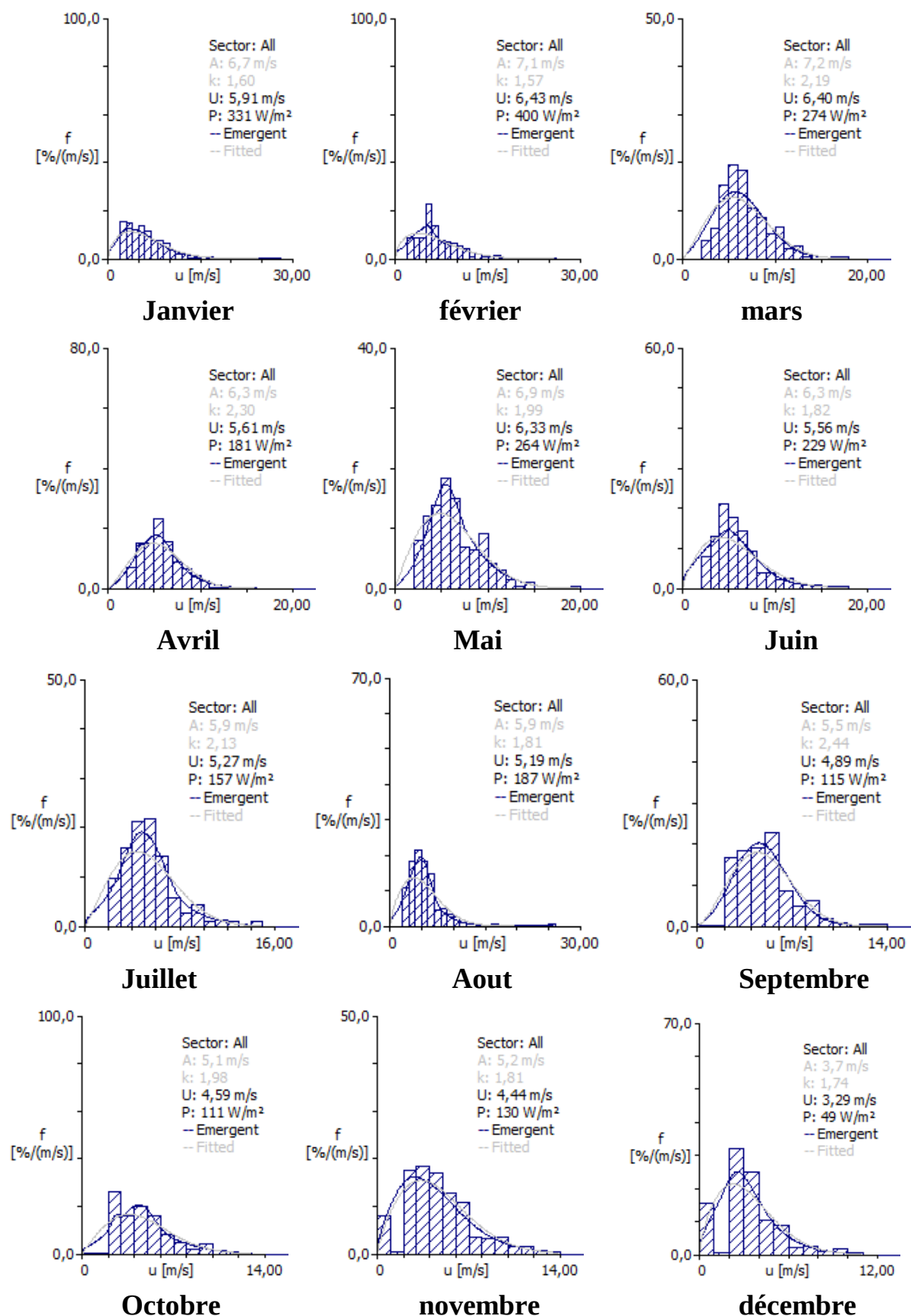


Figure III.6 : Histogrammes mensuelles de la vitesse du vent à 10m du sol ajusté par la distribution de Weibull

CHAPITRE III : ÉVALUATION DU GISEMENT ÉOLIEN DANS LA RÉGION DE M'SILA

Tableau III.3 : caractéristiques moyennes mensuelle du vent à 10 m du sol

Paramètre mois	$A \text{ (m/s)}$	k	$U \text{ (m/s)}$	$P \text{ (W/m}^2\text{)}$
Janvier	6.7	1.6	5.91	331
Février	7.1	1.57	6.43	400
Mars	7.2	2.16	6.4	274
Avril	6.3	2.30	5.61	181
Mai	6.9	1.99	6.33	264
Juin	6.3	1.82	5.56	229
Juillet	5.9	2.13	5.27	157
Aout	5.9	1.81	5.19	187
Septembre	5.5	2.44	4.89	115
Octobre	5.1	1.98	4.59	111
Novembre	5.2	1.81	4.44	130
Décembre	3.7	1.74	3.29	49

Tableau III.4 représente la vitesse moyenne et la densité de puissance moyenne du vent Pour les mois à 10m, 25m et 50m de haut. On remarque que les vitesses moyennes maximales pour les hauteurs 10m, 25m et 50m sont 6.43m/s 7.71m/s et 8.65m/s respectivement. Quant aux densités de puissance moyennes maximales pour 10m, 25m et 50m sont $400W/m^2$, $625W/m^2$ et $845W/m^2$ respectivement. On constate que le mois de décembre présente les valeurs les plus faibles avec des vitesses moyennes 3.29m/s, 3.94m/s et 4.55m/s et des densités de puissance moyennes minimales $49W/m^2$, $78W/m^2$ et $109W/m^2$ pour les hauteurs 10m, 25m et 50m respectivement. Nous remarquons notamment que la vitesse moyenne et la densité de puissance moyenne augmentent avec la hauteur. Ce résultat est une conséquence directe de la loi de cisaillement de la vitesse du vent.

Tableau III.4 : vitesse et puissance moyenne mensuelle du vent à 10m, 25m et 50m du sol

Hauteur Grandeur mois	10m		25m		50m	
	$U \text{ (m/s)}$	$P \text{ (W/m}^2\text{)}$	$U \text{ (m/s)}$	$P \text{ (W/m}^2\text{)}$	$U \text{ (m/s)}$	$P \text{ (W/m}^2\text{)}$
Janvier	5.91	331	6.96	515	7.87	699
Février	6.43	400	7.55	625	8.49	845
Mars	6.40	274	7.58	437	8.65	612
Avril	5.61	181	6.68	291	7.67	413
Mai	6.33	264	7.71	422	8.57	594
Juin	5.56	229	6.69	360	7.51	496
Juillet	5.27	157	6.27	254	7.21	361
Aout	5.19	187	6.17	298	7.07	415
Septembre	4.89	115	5.85	188	6.75	272
Octobre	4.59	111	5.49	179	6.32	255
Novembre	4.44	130	5.3	203	6.09	279
Décembre	3.29	49	3.94	78	4.55	109

b- Saisonnière

De la même manière les histogrammes saisonniers des vitesses du vent mesurées à 10m de haut avec les courbes ajustées de Weibull sont obtenues pour les quatre saisons. Les graphes correspondant aux quatre saisons sont représentés sur la figure III.7. La courbe couvre une gamme de vitesse qui s'étend jusqu'à 16m/s pendant l'automne et l'été, cependant elle atteint 18m/s en hiver et 17m/s au printemps. On voit de nouveau en se référant aux paramètres indiqués sur les graphes que le vent pendant l'hiver est le moins stable du moment que la valeur de $k = 1,64$.

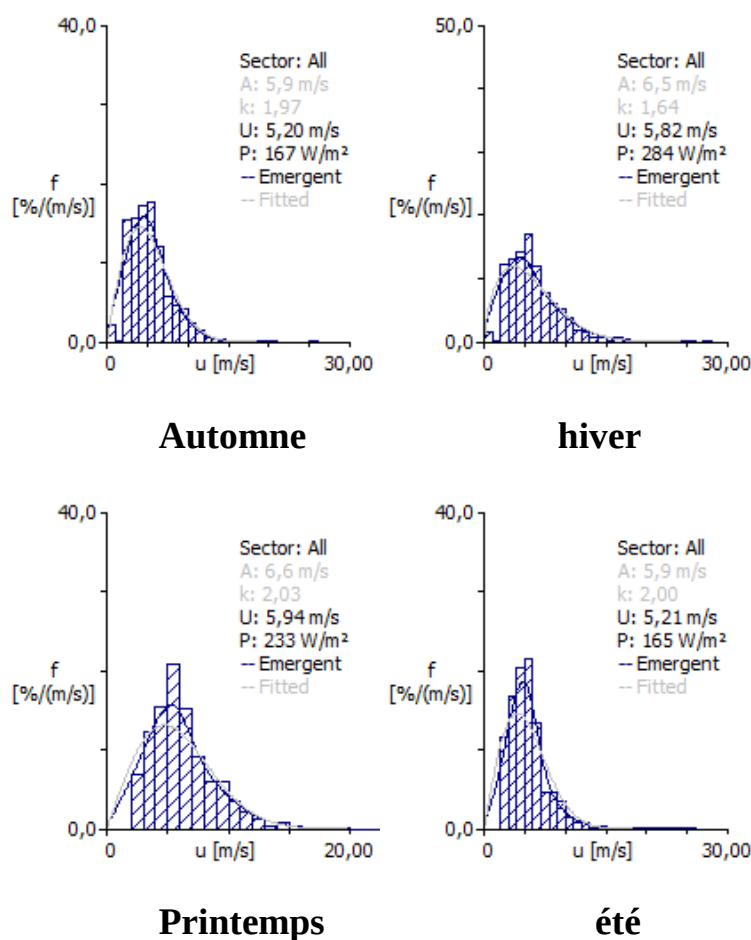


Figure III.7 : Histogrammes saisonniers de la vitesse du vent à 10m du sol ajustés par la distribution de Weibull

D'après le tableau III.5 l'automne et l'été présentent un potentiel éolien plus faible en comparaison avec l'hiver et le printemps puisque c'est le facteur d'échelle qui est déterminant dans ce cas. Cependant le vent est plus stable durant le printemps et l'été avec un facteur de forme de valeur 2,03 et 2 respectivement qu'en hiver et automne, dont les valeurs de k sont plus petites 1,64, 1,97 respectivement.

CHAPITRE III : ÉVALUATION DU GISEMENT ÉOLIEN DANS LA RÉGION DE M'SILA

Tableau III.5 : caractéristiques moyennes Saisonnière du vent à 10 m du sol

Paramètre Saison	$A (m/s)$	k	$U(m/s)$	$P(W/m^2)$
Automne	5.9	1.97	5.20	167
Hiver	6.5	1.64	5.82	284
Printemps	6.6	2.03	5.94	233
Été	5.9	2.00	5.21	165

c- Annuelle

La figure III.8 représente l'histogramme la distribution annuelle de la vitesse du vent mesurée à 10m du sol et ajusté par la distribution de Weibull. Nous constatons que la fréquence des vitesses supérieures à 4m/s dépasse les 80%.

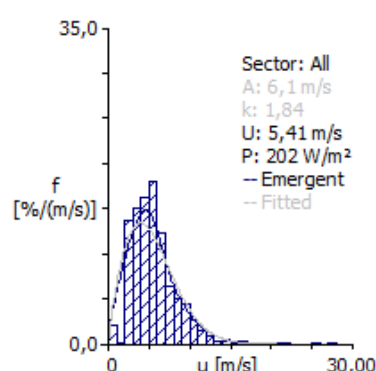


Figure III.8 : Histogramme annuelle de la vitesse du vent à 10m du sol ajusté par la distribution de Weibull

Le tableau III.6 récapitule les valeurs des deux paramètres de Weibull, de la vitesse moyenne et de la puissance moyenne à 10m du sol. Tel que indiqué dans le tableau ci-dessous, la vitesse moyenne est de 5.41 m/s, la densité de puissance moyenne est de 202 w/m² et avec un facteur de forme $k = 1.84$ nous concluons que la vitesse du vent est assez variable dans la région.

Tableau III.6 : caractéristiques moyennes annuels du vent 10 m du sol

Période	$A (m/s)$	k	$U(m/s)$	$P (W/m^2)$
2015-2016	6.1	1.84	5.41	202

Le tableau III.7 donne une extrapolation de la vitesse moyenne du vent et de la densité de puissance à 25m et 50m de haut. Nous remarquons que la vitesse et la puissance augmentant avec la hauteur, selon la loi de cisaillement que l'on a déjà signalé.

Tableau III.7 : vitesse et puissance moyenne annuelle du vent à 10m, 25m et 50m du sol

10m		25m		50m	
$U(m/s)$	$P(W/m^2)$	$U(m/s)$	$P(W/m^2)$	$U(m/s)$	$P(W/m^2)$
5.41	202	6.41	318	7.31	437

Remarque : U figurant sur les graphes et les tableaux désigne la vitesse moyenne notée précédemment V_{moy} .

III-4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats relatifs à l'étude du gisement éolien dans la région de m'sila. Nous avons utilisé le programme WAsP pour calculer les différents paramètres nécessaires à l'évaluation du gisement éolien, tels que : la rose des vents, les deux paramètres de Weibull, la vitesse moyenne du vent ainsi que la densité de puissance moyenne annuelle, saisonnière et mensuelle et pour différentes hauteurs.

On résume les résultats comme suit :

- La vitesse moyenne annuelle à 10m de haut est de 5.41m/s avec une densité de puissance moyenne peut atteindre $202W/m^2$. Ces valeurs augmentent avec la hauteur.
- L'étude mensuelle a mis en évidence que les mois de février, mars et mai sont les plus importants en termes de vitesse moyenne et de densité de puissance moyenne.
- L'étude saisonnière nous a révélé que le potentiel éolien est plus important pendant l'automne et le printemps que durant l'hiver et l'été.
- Les valeurs des deux paramètres de Weibull indiquent que les vents dans la région de M'sila sont relativement stables.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire avait pour ambition d'évaluer et de caractériser le gisement éolien de la région de M'sila. La Wilaya occupe dans son ensemble une position privilégiée dans la partie centrale de l'Algérie du nord. On s'est demandé si cette zone est-elle suffisamment venteuse pour accueillir une ferme éolienne. Il a fallu au départ énumérer les énergies renouvelables citées en littérature afin de bien situer l'importance de l'énergie éolienne dans la région. On a constaté que M'sila dispose d'un potentiel solaire considérable en raison de son climat semi-aride. Mis à part cette énergie, aucune autre énergie renouvelable n'est en mesure, du moins pour le moment, de la concurrencer, ou plutôt de la compléter. C'est dans cette perspective que nous avons jugé utile d'évaluer les potentialités de la wilaya en termes d'énergie éolienne. Pour se faire nous avons fait appel au logiciel WASP largement utilisé dans ce domaine. Dans ce contexte nous avons exploité deux années (2015 et 2016) de données empiriques de la vitesse et de la direction du vent mesurées à 10m du sol. Elles sont collectées auprès de l'ONM de M'sila et puis traitées par le biais du logiciel qui nous a permis de déterminer les deux paramètres k et c de la fonction de densité de probabilité de Weibull, et en conséquence la vitesse moyenne et la densité de puissance mensuelles, saisonnières et annuelles. La vitesse moyenne annuelle est estimée à 5.41m/s avec une puissance moyenne annuelle de 202W/m². L'étude mensuelle indique qu'il y a une divergence plus au moins importante entre les mois. Tandis que février, mars et mai sont les mois les plus venteux avec des vitesses moyennes de 6.43m/s, 6.4m/s et 6.33m/s respectivement et des densités de puissances moyennes de 400W/m², 274W/m² et 264W/m², on a constaté que le mois de novembre et décembre présentent les plus faibles vitesses avec respectivement 4,44m/s et 3,29m/s et des densité de puissance remarquablement faibles ; 130 W/m² et 49 W/m². En ce qui concerne l'étude saisonnière nous remarquons que le printemps et l'automne prédominent sur l'hiver et l'été. Les directions dominantes sont l'ouest avec une fréquence de 19% et l'est avec 16%.

L'extrapolation des caractéristiques du vent à deux hauteurs 25m et 50m a été implémentée. Les résultats obtenus qui sont en accord avec la loi de cisaillement ont dévoilé un potentiel considérable estimé à 7,31m/s en termes de vitesse et 437W/m² en termes de puissance

Les valeurs des deux paramètres de Weibull indiquent que le vent dans la région est stable en termes d'occurrence, mais variable en intensité. On peut conclure finalement que M'sila est une région favorable à accueillir des projets éoliens de grande envergure.

RÉFÉRENCES

- [1] Berrached Sidahmed, « Analyse Technico-économique des Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne Appliquée sur la Région de Tlemcen » Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master En Electrotechnique Option : Réseaux Electriques et Réseaux Electriques Intelligent, Université de Tlemcen Aboubekr Belkaid Faculté de Technologie Soutenue le 14/06/2015.
- [2] Hamidat Amel et Boudraa Sabah « biodiversité des arbres d'alignements de la ville de M'sila » Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme Master Académique Université Mohamed Boudiaf - M'sila année universitaire : 2016 /2017
- [3] Kherba Nabila « Estimation de la Production Electrique d'une Ferme Eolienne Application à la Région de Ténès » 2011. Thèse de doctorat. Université Hassiba Ben Bouali de Chleff
- [4] Wind Atlas Analysis and Application program (WAsP) Vol. 3 : Utility programs Mortensen, Niels Gylling; Landberg, Lars; Troen, Ib; Lundtang Petersen, Erik; Rathmann, Ole; Nielsen, Morten.
- [5] LOUASSA Samira, Cartographie des ressources éoliennes à l'aide du logiciel WAsP : Bulletin_025_04 Division Energie Eolienne – CDER
- [6] Tetsuya Taima, Susumu Toyoshima, Kohjiro Hara, Kiyoshi Yase « Control of measurement environment for high-efficiency organic photovoltaic cells» Japanese Journal of applied physics vol. 45 n° 8-2006.
- [7] Hamadha Latifa, Slama Kaltoum « Évaluation du gisement énergétique éolienne de la région des hauts-plateaux » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en physique énergétique Université Ahmed Draia ADRAR Soutenu Mai 2017.
- [8] Alayat Mahmoud, Boucetta Issam « Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master, Université Badji Mokhtar – Annaba soutenu 11/2017
- [9] <http://jeunes.edf.com/> le 18/02/2020
- [10] <http://www.futura-sciences.com/> le 02/aout/2020
- [11] <https://prezi.com/> le 21/02/2020
- [12] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_\(énergie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_(énergie))
- [13] <http://fr.wikipedia.org/> le 18/02/2020
- [14] http://www.voltalia.com/fr/biomasse/presentation_88.html le 21/02/2020

- [15] ALLAL Fatima « étude des modèles d'évaluation verticale de la vitesse du vent» Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique Université Mohamed Boudiaf – M'sila, Soutenu le 04/ 09/2018.
- [16] <http://vent-et-aerodynamisme-de-l-eolienne.e-monsite.com/pages/l-eolienne/page-1.html> 21/02/2020
- [17] <http://www.alloprof.qc.ca/BV/Pages/s1597.aspx> le 21/02/2020
- [18] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Vent-page-2.html> le 21/02/2020
- [19] <http://www.alloprof.qc.ca/BV/Pages/s1597.aspx>
- [20] https://bouhoot.blogspot.com/2017/01/blog-post_402.html le 21/02/2020
- [21] <https://slideplayer.fr/slide/3022861/> le 02/aout/2020
- [22] <https://www.facebook.com/Ps.Weather/posts/1105700089443259> le 21/02/2020
- [23] <https://eduscol.education.fr/obter/appliped/circula/theme/atmos32.htm>
- [24] http://meteocentre.com/intermet/vent/p_vent9_brise.htm le 18/02/2020
- [25] <https://wind-data.ch/tools/profile.php?lng=fr> le 21/02/2020
- [26] <http://mberder.free.fr/partie1.htm> le 27/02/2020
- [27] <https://journals.openedition.org/rge/4093#tocto1n3> le 20/08/2020
- [28] HAMEDI Somia « étude qualitative et quantitative du potentiel éolien et fonctions mathématiques utilisées pour sa modélisation » Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique Université Mohamed Boudiaf – M'sila, Soutenu le 06/ 06/2017.
- [29] http://www.toujourspret.com/techniques/orientation/topographie/rose_des_vents.php2 7/02/2020
- [30] <https://wind-data.ch/tools/weibull.php?lng=fr> le 21/02/2020
- [31] <http://drømstørre.dk/wpcontent/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/wres/shear.htm> le 21/02/2020
- [32] <https://eolienne.f4jr.org/rugosite> le 28/02/2020

- [33] M. Kazet 1, R. Mouangue 2, A. Kuitche 1, J.M. Ndjaka 3 et S. Takam « Modélisation et simulation numérique des données du vent en vue d'une prédiction de l'énergie électrique d'origine éolienne : cas d'un site de la ville de Ngaoundéré au Cameroun » Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 527-538
- [34] <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/wres/rrose.htm> le 28/02/2020
- [35] <https://www.futuren-group.com/experts/levaluation-du-potentiel-eolien-dun-site> le 28/02/2020
- [36] Achouri Mahdia, Khelfa Sara « évaluation du gisement éolien dans deux régions de l'est de l'Algérie, Jijel et Tébessa » Mémoire de Fin d'Études En vue de l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique Spécialité : Conversion d'Énergie Université M'hamed Bougara Boumerdès faculté des sciences de l'ingénieur département : énergétique
- [37] TOUAMA Nour el Houda « Évaluation du gisement éolien en Algérie à l'aide du logiciel RETScreen » Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique Université Mohamed Boudiaf – M'sila faculté des sciences département de physique filière Physique option : Physique Energétique et Energies Renouvelables Soutenu en 06/2018
- [38] K. BEDOUD^{*(1, 2)}, M. ALI-RACHEDI⁽³⁾, T. BAH⁽¹⁾, H. MERABET⁽²⁾ « Modélisation Statistique pour l'Evaluation de l'Energie Eolienne » 3^{ème} I.C.M'2017 Annaba 26-27 Avril 2017
- [39] Annuaire Statistique de la Wilaya de M'sila 2014
- [40] <https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/temps-reel/m-sila/60467.html?graphiques> 01/09/2020
- [41] <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/98744> Le16/08/2020
- [42] <https://www.alarabiya.net/ar/qafilah/> Le16/08/2020
- [43] <https://www.reseau-canope.fr/docsciences/L-energie-au-fil-des-temps.html>

ملخص

نهدف من خلال هذا العمل إلى تقييم وتحديد مميزات طاقة الرياح في منطقة مسيلة. نستند في هذه الدراسة على المعالجة الإحصائية لسنتين من القياسات لسرعة الرياح واتجاهها بمعدل كل ثلاث ساعات، والتي تم جمعها من المحطة الجوية بالمسيلة التابعة للديوان الوطني للأرصاد الجوية. استخدمنا في ذلك برنامج WAsP الذي يعتبر أداة حسابية واسعة الاستعمال في ميدان طاقة الرياح. لقد كانت أداة فعالة في حساب معاملي فايبول k و c ومتوسط سرعة الرياح ومتوسط الطاقة المتاحة وكذا زهرة الرياح. أظهرت نتائج الحسابات أن منطقة المسيلة شديدة الرياح نسبيًا بمتوسط سرعة سنوي يبلغ 5.41 م/ثا وبمتوسط كثافة طاقة يبلغ 202 وات/م²، وفيما يخص الاتجاه، فإن الرياح السائدة تأتي من الشرق بنسبة 19% ثم الغرب بنسبة 16%. بالإضافة إلى ذلك، كشفت لنا الدراسة الموسمية أنه خلال الشتاء والربيع تصبح الرياح أكثر انتظامًا وبسرعات أعلى. تم إجراء استنباط لخصائص الرياح من أجل ارتفاعين مختلفين 25م و50م. لوحظ أن متوسط السرعة السنوي عند ارتفاع 50 مترًا يبلغ 7.31 م/ثا ويمكن أن يصل إلى 8.65 م/ثا في شهر مارس، لكنه يظل منخفضًا في ديسمبر.

Résumé

Le présent travail consiste à évaluer et caractériser le potentiel éolien de la région de m'sila. L'étude est basée sur le traitement statistique de deux années de mesures tri horaires de la vitesse et de la direction du vent, collectées au niveau de la station météorologique de M'sila. Le logiciel WAsP est un outil de calcul très répandu dans le monde de l'éolien. Il nous a été de grande utilité dans le calcul des deux paramètres de Weibull k et c , la vitesse moyenne du vent, la puissance disponible moyenne ainsi que la rose des vents. Les résultats des calculs montrent que M'sila est une région relativement venteuse avec une vitesse moyenne annuelle de 5,41m/s et une densité de puissance moyenne de 202W/m², tandis qu'en termes de direction le vent dominant est celui provenant de l'Est avec une fréquence de 19%, puis l'Ouest avec 16%. Par ailleurs, l'étude saisonnière nous a révélé que durant l'hiver et le printemps le vent devient régulier avec des vitesses plus élevées. L'extrapolation des caractéristiques du vent a été réalisée pour deux hauteurs 25m et 50m. On note que la vitesse moyenne à 50m de haut est de 7.31m/s et peut atteindre 8,65m/s en mois de mars, mais elle demeure faible en décembre.

Abstract

The present work consists in evaluating and characterizing the wind potential in M'sila region. The study is based upon the statistical processing of tri-hourly measurements of wind speed and direction along two years, collected at M'sila weather station. WAsP software is a very popular calculation tool in the world of wind power. It was of great use in the calculation of the two Weibull parameters k and c , the average wind speed, the average available power as well as the wind rose. Calculation results show that M'sila is a relatively windy region with an average annual speed of 5.41m/s and an average power density of 202W/m², while in terms of direction the prevailing wind is that coming from the East with a frequency of 19%, then the West with 16%. In addition, the seasonal study revealed that during winter and spring the wind becomes regular with higher speeds. The extrapolation of the wind characteristics was carried out for two heights 25m and 50m. We note that the average speed at 50m high is 7.31m/s and can reach 8.65m/s in March, but it remains low in December.