

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : ENERGETIQUE

Présenté par :

BENHAMED ahmed abdessalem & LAMINE khalil

Thème

**Une étude de choix de densité de probabilité dans le calcul de la
fréquence de la vitesse du vent**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BEN KHARBACHE SOUAD	MCA	Président
ZERGANE SAID	MCA	Encadreur
AMIRAT BELKACEM	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2021

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.*

Ahmed et Khalil

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 mon encadreur Dr. Zergane

Saïd, 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 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.

Ahmed et Khalil

Table des matières

Liste des figures.....	7
Liste des tableaux.....	9
CHAPITRE 01 GENERALITE SUR LE VENT	12
Introduction.....	13
I. Le vent	13
I.1. Origine du vent	13
I.2. La force du gradient de pression.....	13
I.3. Force de Coriolis	14
I.4. Les forces de frottements	14
I.5. Types de vent	15
I.5.1.Vents dominants	15
I.5.2.Vents saisonniers.....	15
I.5.3.Vents locaux	15
I.6. variation du vent en vitesse et en direction.....	16
I.6.1 La variabilité temporelle.....	16
I.6.2 La variabilité spatiale.....	16
I.7. Mesurer la vitesse du vent et la direction du vent:.....	17
I.7.1. Histoire de mesure du vent.....	17
I.7.2. Les instruments de mesure	18
I.7.2.1 La girouette	18
I.7.2.2La manche à air (manche à vent)	18
I.7.2.3. Anémomètre	19
I.7.2.4. Data logger	20
I.8 L'ENERGIE EOLIENNE	20
I.8.1 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	20
I.8.2 DESCRIPTIF D'UNE EOLIENNE	21
I.8.3 PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE	22
I.8.4 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE	24
I.8.5 LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES.....	25

I.8.5.1 Les éoliennes à axe vertical	25
I.8.5.2 Les éoliennes à axe horizontale.....	26
I.8.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE.....	28
I.8.6.1 LES AVANTAGES.....	28
I.8.6.2 LES INCONVENIENTS.....	29
I.9. conversion de l'énergie du vent	30
I.9.1 principe de conversion de l'énergie éolienne	30
I.10 chaîne de conversion de l'énergie éolienne.....	31
I.11 Conclusion	32
CHAPITRE 02 CHOIX DE MODELES.....	33
Introduction :	34
II.1. Représentation de la variation du vent.....	34
II.1. 1 INFLUENCE DE LA FORME DU RELIEF SUR L'INTENSITE DU VENT	34
II.1.2 Vitesse moyenne et distribution statistique	36
II.1.2.1 Modèle général des variations de la vitesse du vent	36
II.1.2.2 Description statistique des vitesses du vent	36
II.1.2.3 Equilibrage de la distribution de Weibull	38
II.2.2 Variations cycliques temporelles.....	38
II.2.3. Variation journalière.	40
II.2.4. Les variations du vent en fonction de l'altitude :	40
II.2.5 Turbulence.....	42
II.3 La fréquence du vent.....	43
II.3.1 Vitesse du vent	43
II.4. La rose des vents	46
II-5 Modèles de densités de la probabilités de la vitesse du vent	49
II.5.1 Distribution de Weibull	50
II.5.2 Distribution hybride de Weibull	50
II.5.3 Distribution de Rayleigh	50
Conclusion	51
CHAPITRE 03 RESULTATS ET DISCUSSIONS	52
Introduction.....	53
Paramètres des modèles.....	53
III.1.1.Fonction de Wei bull	53
III.1.2.La loi de Rayleigh.....	54

III.1.3. Distribution hybride de Weibull	55
III.1.4. La vitesse moyenne du vent.....	55
III.2 Calcul des paramètres	56
III.2.1 Représentation des tableaux.....	56
III.2 Résultats et discussions.....	60
III.2.1 Définition du Matlab	60
Conclusion	70
Conclusion général	71

Liste des figures

Figure I.1: gradients de pression ;b) direction des vents	14
Figure I.2: : Les forces de frottements.	15
Figure I.3: Rose des vents.	17
Figure I.4: Girouette.....	18
Figure I.5: Manche à air	19
Figure I.6: Anémomètre avec une girouette à gauche.	20
Figure I.7: Data logger.....	20
Figure I.8: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur.....	21
Figure I.9: Tour d'une turbine	23
Figure I.10 : Constitution d'une nacelle.	23
Figure I.11 : éoliennes à axe vertical	26
Figure I.12 : éolienne à axe horizontal.	27
Figure I.13 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	30
Figure I.14: principe de la conversion de l'énergie éolienne	31
Figure II.1: Accélération du vent sur les collines	35
Figure II.2: la distribution de Weibull.....	36
Figure II.3: Moyenne mensuelles de la vitesse du vent dans la région d'Adrar	38
Figure II.4: la probabilité que le vent souffle à une vitesse donnée pendant 1 % des heures d'une année.38	
Figure II.5: Spectre de Van der Hoven	40
Figure II.6: Vitesse du vent enregistrée du 3 au 5 juin 1994 à la station de recherche du Kastelberg (1 350 m, Alsace).....	44
Figure II.7: Fréquence des vitesses du vent enregistrées de 1987 à 1997 à la station météorologique d'Aubure (1100m, Alsace)	45
Figure II.8: histogramme des fréquences et la courbe de Weibull pour Adrar.....	46
Figure II.9: Rose des vents pour la station de Desrosiers (directions à 20 m).....	47
Figure II.10 : rose de vent pour le site d'Adrar.	49
Figure III.1 représente logiciel matlab.....	60
Figure III.2: représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de rayleigh.....	61
Figure III.3: représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull	61
Figure III.4: représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull hybride. 62	
Figure III.5: distribution de la vitesse du vent	62
Figure III.6: représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de rayleigh.....	63
Figure III.7: représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull	63
Figure III.8: représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull hybride.64	
Figure III.9: distribution de la vitesse du vent.....	64
Figure III.10 : représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de rayleigh.....	65
Figure III.11 : représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull.....	66

Figure III.12 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull hybride.....	66
Figure III.13: distribution de la vitesse du vent.....	67
Figure III.14: représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de rayleigh.....	68
Figure III.15: représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull.....	68
Figure III.16: représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull hybride.....	69
Figure III.17 distribution de la vitesse du vent.....	69

Liste des tableaux

Tableau II.1: Les paramètres des sites donnant l'évolution de la vitesse du vent.....	41
Tableau II.2 : Les noms des 16 directions de la rose des vents et les angles correspondants.....	48
Tableau III.1 représente la fréquence du vent en fonction de la vitesse.....	56
Tableau III.2 représente la fréquence du vent en fonction de la vitesse (ain ouassara).....	57
Tableau III.3 représente la fréquence du vent en fonction de la vitesse (oran).....	58
Tableau III.4 représente la fréquence du vent en fonction de la vitesse (Kaberten-Adrar).....	59

Introduction générale

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires et l'entraînement des moulins à vent. Ces dernières utilisations sont basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable.

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité, comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les générateurs électriques, que le savant danois appelé **Poul La Cour** a construit pour la première fois en 1891 des turbines à rotation rapide qui génèrent davantage d'électricité que des turbines plus lentes composées de plusieurs pales. Après la fabrication du premier aérogénérateur, ce savant a amélioré cette technologie durant la 1^{ère} et la 2^{ème} guerre mondiale avec une grande échelle.][1]

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés). Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte. [1]

Dans l'Antiquité, le vent était utilisé, plus particulièrement en agriculture avec les moulins à vent pour moudre le blé. Les Perses de l'Antiquité utilisaient déjà l'énergie éolienne pour pomper de l'eau. On a exploré le monde à l'aide de navires entraînés par le vent bien avant l'invention du moteur. Pas plus tard qu'en 1920, plus d'un million d'éoliennes servaient à pomper de l'eau et à fournir l'électricité aux entreprises agricoles de l'Amérique du Nord. Dans les années 50, des centaines d'éoliennes étaient encore utilisées en Algérie pour le pompage de l'eau. Aujourd'hui, l'énergie électrique d'origine éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire. En 2005, 6183MWh ont été installés dans les pays de la communauté européenne (1808MWh pour l'Allemagne et

INTRODUCTION GENERALE

1764MWh pour l'Espagne), soit une production électrique de 83TWh, égale à 2.8% de la consommation électrique de 2004 [2] .

De nos jours, le vent et l'énergie qu'il véhicule sont l'objet d'études et d'applications multiples dans divers domaines. La volonté de réduire les émissions de gaz responsables de l'effet de serre, a poussé beaucoup de pays à s'intéresser aux énergies renouvelables dont fait partie l'éolienne.

Avant toute installation éolienne, il faut faire une étude précise sur le vent ; la vitesse et la direction puisque elle est très importante .Dans ce but on présente ce modeste travail une étude de choix de densité de probabilité dans le calcul de la fréquence de la vitesse du vent .

Le travail présenté est structuré en n chapitres :

Le premier chapitre, comprend des généralités sur le vent et l'éolienne .On présente une définition sur le vent et l'origine du vent et une définition sur l'énergie éolienne en manière générale, en suite ; nous abordons les variations temporelle du vent en vitesse et en direction puis la conversion d'énergie du vent et les chaines de conversion d'énergie enfin une petite conclusion pour résumé les concepts de ce chapitre.

CHAPITRE 01 GENERALITE SUR LE VENT

Introduction

Le vent est une force de la nature découverte par l'homme depuis les temps anciens, ce vent est capable de créer de l'électricité ou une force mécanique : c'est l'énergie éolienne. Le vent est une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre.

Ce chapitre sera consacré à la description de l'origine du vent, à l'introduction ainsi que les forces qui régissent le mouvement des masses d'air et les causes principales des vents ensuite variation du vent en vitesse et en direction et l'énergie du vent.

I. Le vent

I.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) . La vitesse et la direction du vent générées 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 [1].

I.2. La force du gradient de pression

C'est la différence de pression entre 2 points qui crée une force nommée force du gradient de pression. Mathématiquement, le gradient de pression est la différence de pression existant entre deux points divisée par la distance qui séparent ces deux points.

$$\text{gradient de pression} = (\text{Pression point 1} - \text{Pression point 2}) / (\text{Distance point 1 à point 2})$$

$$\text{gradient de pression} = \frac{(\text{pression point 1} - \text{pression point 2})}{(\text{distance point 1 à 2})}$$

Ainsi plus les isobares (lignes reliant entre eux les points de pression identiques) sont rapprochées, plus la force du gradient de pression sera forte. Sa direction va de la haute pression à la basse pression. Plus la latitude s'élève, plus le vent sera faible [2]

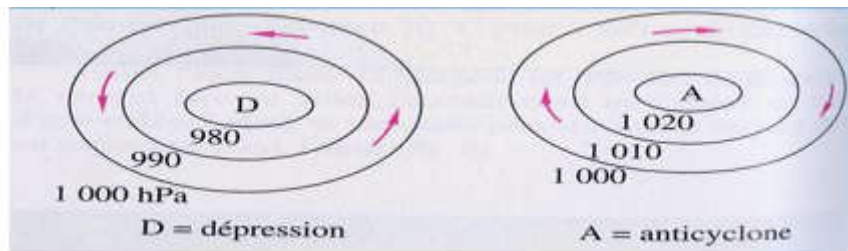


Figure I.1: gradients de pression ;b) direction des vents

I.3. Force de Coriolis

Est une force inertielle agissant perpendiculairement à la direction du mouvement d'un corps en déplacement dans un milieu (un référentiel) lui-même en rotation uniforme, tel que vu par un observateur partageant le même référentiel. Cette force est nommée ainsi en l'honneur de l'ingénieur français Gaspard-Gustave Coriolis.

.Elle n'est pas en fait une force au sens strict, soit l'action d'un corps sur un autre, mais plutôt une force fictive résultant du mouvement non linéaire du référentiel lui-même. C'est l'observateur qui change de position par l'action de l'accélération centripète du référentiel et qui interprète tout changement de direction de ce qui l'entoure comme une force inverse.

L'introduction de cette force permet de simplifier les équations du mouvement dans ce genre de repère, au même titre que celui de la force centrifuge [3].

I.4. Les forces de frottements

Lors de son mouvement, l'air frotte contre les autres particules d'air et le sol. Cela entraîne des forces s'opposant à son mouvement. Elles ne le dévient pas mais le freinent. L'action de ces trois forces a pour conséquence de stabiliser la direction du vent [4]:

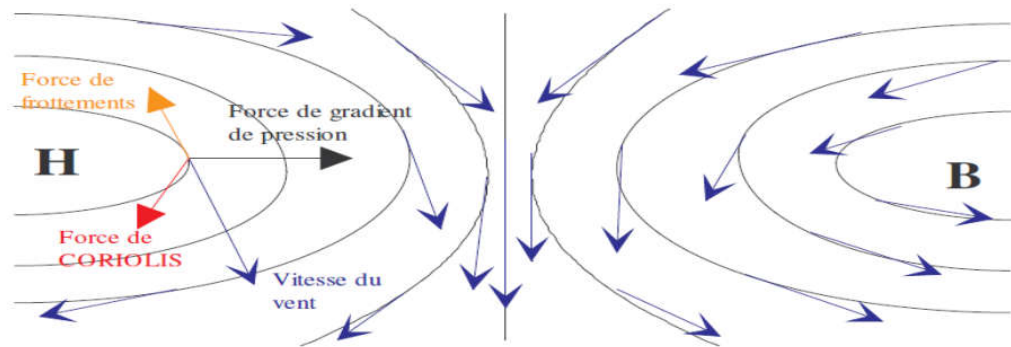


Figure I.2 : Les forces de frottements [4]

I.5. Types de vent :

- Il existe trois (03) grandes familles des vents : les vents dominants, les vents saisonniers et les vents locaux.

I.5.1.Vents dominants :

Les vents dominants sont des phénomènes observables sur plusieurs centaines de kilomètres et ils fluctuent sur des périodes de l'ordre de la journée. Ils sont considérés comme des phénomènes climatiques de grande échelle

I.5.2.Vents saisonniers

- Les vents saisonniers sont des vents qui soufflent par saison. Les masses d'air qui se trouvent au-dessus des continents sont plus chaudes l'été et plus froides l'hiver que les masses d'air situées au-dessus des océans voisins. En été, les continents deviennent des zones de basses pressions, avec des vents provenant des océans plus froids. En hiver, les continents deviennent des zones de hautes pressions, avec des vents dirigés vers les océans plus chauds.

I.5.3.Vents locaux

Ce type de vents agissent sur de petites étendues et sont le résultat de la géographie particulière à une région; on les nomme alors les vents locaux comme des brises de terre/mer ou de montagne/vallée

- Les brises de terre et de mer:

Ce sont des vents locaux spécifiques qui se produisent à proximité des littoraux. Ils sont engendrés par la différence de température entre la surface de la terre et la surface de la mer[5].

I.6. variation du vent en vitesse et en direction

I.6.1 La variabilité temporelle

Le vent est une source d'énergie qui n'est pas stable vue le changement brusque et rapide de sa vitesse et de sa direction par rapport au temps. En accord avec ces changements, la puissance et l'énergie éolienne disponibles dans un site donné varient. Dans ce cas, et selon la fréquence, nous distinguons trois types de variabilités:

- Variabilités à haute fréquence, où la vitesse peut varier de plus de 2m/s durant une dizaine de seconde.
- Variabilités à moyenne fréquence qui sont déterminées par les **vitesse journalières** ou horaires.
- Variabilités à basse fréquence qui concernent les variations **annuelles, saisonnières et mensuelles**.

I.6.2 La variabilité spatiale

En plus de la variabilité temporelle, le vent peut varier dans l'espace, d'un endroit à un autre. Ainsi, nous distinguons, deux types de variabilité spatiale [7]:

- Variabilité spatiale régionale**: qui est en fonction de la latitude de la région ainsi que de l'ensoleillement et des reliefs.
- Variabilité spatiale locale** : qui est en fonction de la topographie, des obstacles et de la rugosité du sol[6].

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.3 : 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[8].

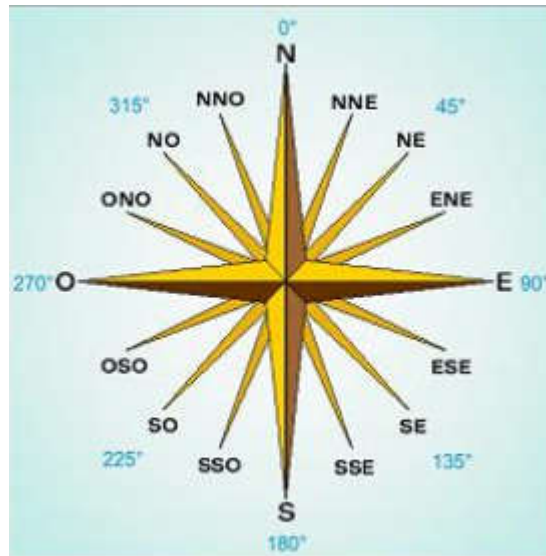


Figure. I.3 Rose des vents[8]

a. 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[8].

I.7. Mesurer la vitesse du vent et la direction du vent:

I.7.1. Histoire de mesure du vent :

Le premier instrument de mesure du vent est celui de la girouette, invention de la Grèce antique destinée à indiquer la direction du vent. Nous devons la première description scientifique des phénomènes éoliens à Evangelista Torricelli qui mit en évidence la pression atmosphérique de l'air avec son baromètre et à Blaise Pascal qui fut le premier à décrire le vent comme un mouvement de l'air, un courant d'air plus ou moins puissant ainsi que la diminution de pression avec l'altitude puis Robert Hooke construira le premier anémomètre. Benjamin Franklin se lancera lui dans les premières descriptions et analyses de vents dominants et de systèmes météorologiques [7].

I.7.2. Les instruments de mesure:

I.7.2.1 La girouette

La girouette est un instrument qui nous indique l'origine du vent (c.-à-d. l'orientation du vent). C'est un pointeur (une flèche, un coq...etc.) qui est monté sur un axe rotatif. 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. Puisque l'usage des girouettes s'est répandu en Europe durant le moyen-âge et qu'il en existait même 4000 ans auparavant, on ne peut pas dire qui en est l'inventeur précisément[6].

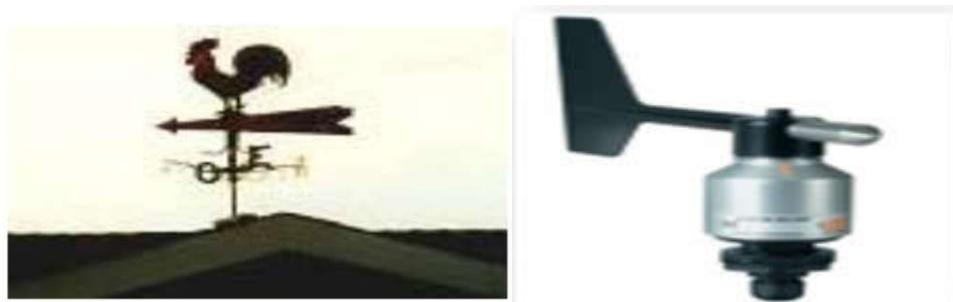


Figure I.4 : Girouette

Unités de mesure : Les points cardinaux ou les degrés d'orientation par rapport au nord géographique [6].

I.7.2.2 La manche à air (manche à vent)

La manche à air est un instrument qui nous indique l'origine du vent et nous donne aussi une approximation de la vitesse du vent. C'est un tube de toile souple fermé à l'une des

extrémités que l'on appelle manchon et 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). Alors quand il y a cinq bandes du tube de toile complètement à l'horizontal on peut dire qu'il y a un vent d'au moins 25 nœuds (environ 45 km/h). Le tube de toile peut aussi pivoter sur son axe alors il nous permet de connaître la direction du vent. Le manchon pointe vers où le vent se dirige [6]



Figure I .5 : Manche à air[6]

1.7.2.3. Anémomètre :

Est un terme du XVIII^e siècle, composé du préfixe « anémo » (en grec « *anemos* », en français « vent ») et du suffixe « mètre » (« mesure »). Il s'agit donc d'un appareil permettant de mesurer la vitesse ou la pression du vent. Il en existe plusieurs variantes qui peuvent être regroupées en deux types principaux : à mesure du déplacement de l'air et à variation de pression causé par ce mouvement. Les anémomètres sont le plus souvent disposés sur un pylône baptisé mât anémométrique dont la hauteur dépend à la fois de la nature du site d'observation (par exemple sur une bouée météorologique par rapport à une station météorologique terrestre) et de l'objectif des mesures (par exemple des recherches sur les échanges sol-atmosphère ou pour l'aviation [6].



Figure I.6 : Anémomètre avec une girouette à gauche[6]

I.7.2.4. Data logger :

Permet l'enregistrement des données mesurées sur un intervalle spécifié. Toutes les 10 minutes par exemple il calcule les données moyennes des mesures de chaque instrument et les stocke dans sa mémoire. Suite à la campagne de mesures, le data logger est connecté à un ordinateur afin d'en extraire les données sous format d'un tableau Excel [9].



Figure I.7 : Data logger

I.8 L'ENERGIE EOLIENNE

I.8.1 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE

L'humanité utilise le vent de puis la nuit des temps (bateau à voile, moulin à vents...). C'est certainement la forme d'énergie renouvelable qui connaît le plus fort développement les éoliennes ayant fait de gros progrès depuis une dizaine d'années (plus 55% en productivité, moins 50% en niveau de bruit) [10]. Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique [11]. Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents

de forces moyennes fréquemment rencontrées. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale (atteinte dès 50 km/h) tout en limitant les efforts sur la structure. Au delà d'un certain seuil (90 km/h, soit 25 m/s), la régulation ne suffit plus. La machine est alors stoppée afin de lui éviter de subir des charges trop importantes [12]. Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet. Mais le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance. Le vent ne souffle pas forcément quand on en a besoin ! En moyenne, une éolienne tourne à sa puissance nominale 1/5 du temps sur une année. Il convient alors de diviser par 5 la puissance installée pour obtenir la puissance réelle moyenne [12].

I.8.2 DESCRIPTIF D'UNE EOLIENNE

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique [13].

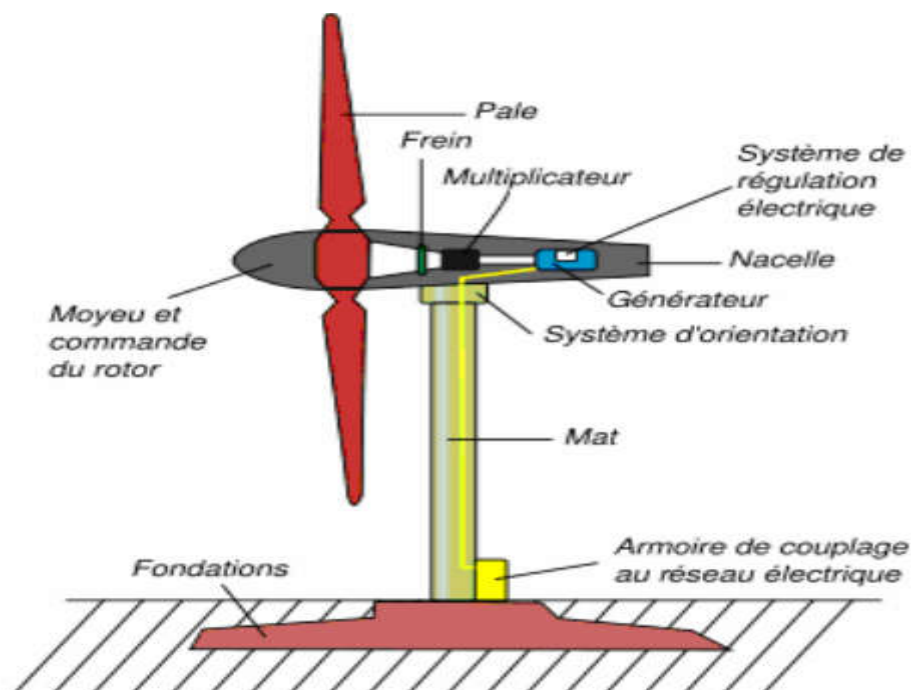


Figure I.8 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol. S'agissant du mât, il doit être dimensionné précisément en fonction de la machine, des fondations... Plusieurs systèmes existent : haubané, haubané basculant, treillis, autoporteur... Pour qu'une éolienne produise... Quelques notions importantes Diapositives Plusieurs éléments doivent être pris avant installation. L'éolienne doit être adaptée au site et à ses besoins.

Il faut vérifier le vent, on considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10m. La donnée 'vent' est essentielle à l'installation d'une éolienne, cependant le coût d'une étude précise, à l'aide d'un anémomètre peut se révéler élevé. Il faut que cela reste cohérent avec le prix global de votre projet. L'observation du site (la présence de moulins, d'éoliennes altitude, vents dominants, végétation...) et l'intuition peuvent se révéler de bons indicateurs du potentiel éolien dans un premier temps.

Ce potentiel conditionnera le choix d'une machine de puissance nominale adaptée. Un autre critère important reste l'évaluation de ses besoins en électricité au regard de ces consommations journalières et annuelles. Cette étape permettra également de réfléchir plus largement à maîtriser ses consommations électriques. Pratiquement, c'est beaucoup plus complexe : les éoliennes doivent résister à des tempêtes aussi violentes que celles que nous connaissons en Bretagne. Les principaux avantages de l'énergie éolienne sont l'autonomie en électricité, la possibilité de produire de jour comme de nuit et un impact environnemental réduit par des précautions simples vis à vis de la population et du paysage. L'énergie produite peut être soit stockée dans des batteries, soit injectée aux normes dans le réseau. Cette dernière solution étant économiquement et techniquement beaucoup plus pertinente [14].

I.8.3 PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de :

- le mât, généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde

semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont-elles si haut perchées C'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons... Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [15].



Figure I.9 : Tour d'une turbine.

une nacelle montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [15]. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

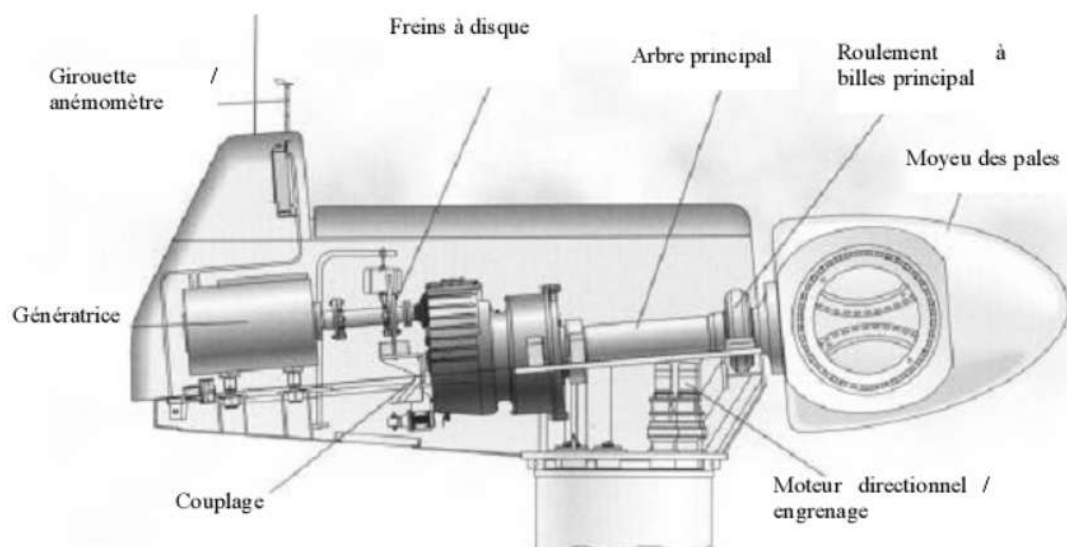


Figure I-10 Constitution d'une nacelle

Les différents composants d'une nacelle [13] :

Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

- La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

- Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile. Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

- dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite [13].

I.8.4 LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de

puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF). La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants... La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [14].

I.8.5 LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES

Généralement il y a deux types d'installations des éoliennes : l'éolienne qui n'est pas raccordée au réseau dite « individuelle » est installée en site isolé ; le deuxième mode concerne les éoliennes regroupées sous forme de fermes éoliennes installées sur la terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes « offshore » où la présence du vent est plus régulière, Avec les fermes « offshore » on réduit les nuisances sonores et on améliore l'esthétique, Du point de vue structure, on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont :

I.8.5.1 Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical

de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [19].

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre. Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées [20].



Figure I.11 : éoliennes à axe vertical [20].

I.8.5.2 Les éoliennes à axe horizontale :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent, Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation.

Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien C_e , type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.

Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères, Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [19].

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe verticale, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un cout moins important[16].



Figure 1-12: éolienne à axe horizontal[16].

I.8.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.8.6.1 LES AVANTAGES

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement .

- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc.

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable .

- Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique .

- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance .

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs .

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique .

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [Site 1].

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales [Site 1].

- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles .

- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, selon l'article le coût de l'éolienne à diminuer presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines].

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà .

- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [Site 1].

1.8.6.2 LES INCONVENIENTS

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Ca reste néanmoins un thème subjectif . Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien .

- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.

- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce

risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux [Site 1].

- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [17].

I.9. conversion de l'énergie du vent

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure.I.13) [18].

[6]

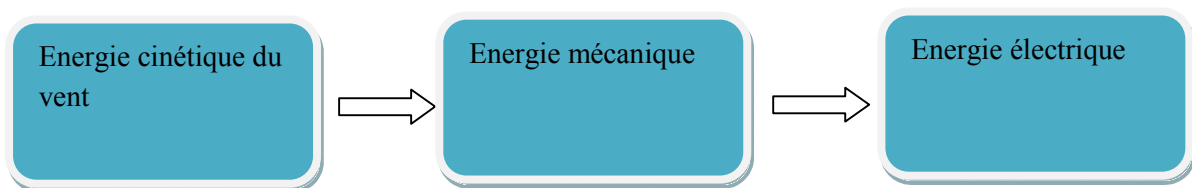


Figure .I.13: Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.9.1 principe de conversion de l'énergie éolienne :

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 parties de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public[16].

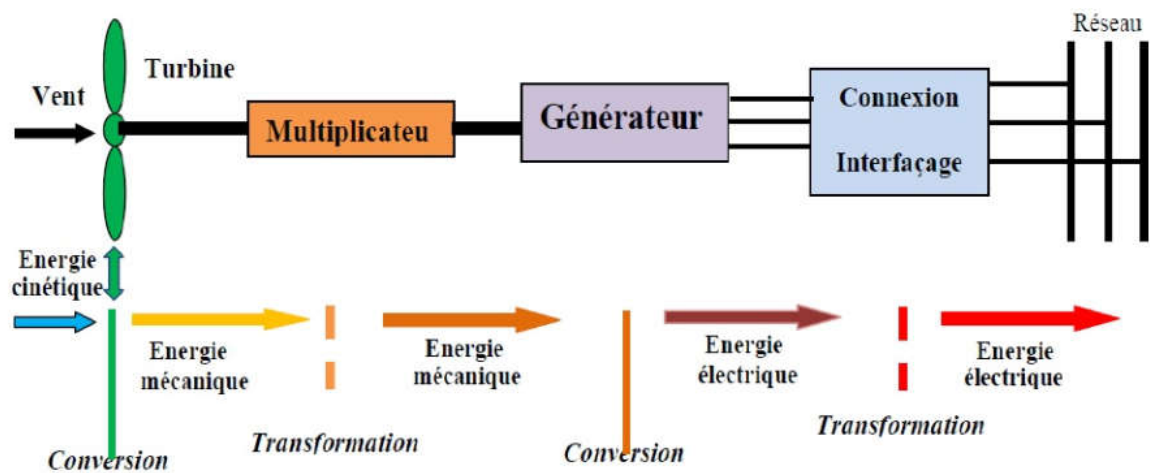


Figure I.14 : principe de la conversion de l'énergie éolienne[16]

I.10 chaîne de conversion de l'énergie éolienne :

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base à savoir :

- Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Une transmission mécanique.
- Une génératrice.
- Un système de liaison électrique.

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éoliennes:

- Les éoliennes raccordées au réseau.
- Les éoliennes autonomes[16].

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une généralité sur le vent dans cette généralités nous avons présenté l'origine du vent et les caractéristiques du vent (la vitesse et la direction) et l'énergie du vent .

Nous pouvons conclure que le vent c'est un phénomène naturel utilisé comme énergie renouvelable pour assuré les besoins en énergie.

CHAPITRE 02 CHOIX DE MODELES

Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents modèles utilisés pour la modélisation de la vitesse du vent et pour l'estimation de la production énergétique d'une éolienne normalisée.

Dans un premier temps nous aborderons l'étude du variation du vent.. L'influence des paramètres de weibull sur la distribution statistique des vitesses du vent sera donnée . La deuxième partie abordera la fréquence relative (statistique) est tracée en fonction de la vitesse du vent. Dans la troisième partie de ce chapitre nous présenterons la rose du vent et l'analyse de la variation des directions du vent pour une station .

Dans la quatrième partie nous aborderons de l'étude du modèles de densités de la probabilités de a vitesse du vent (weibull , weibull hybride et Rayleigh).

II.1. Représentation de la variation du vent

Le vent est hautement variable, à la fois géographiquement et dans le temps. Il varie d'un endroit à l'autre, d'une année à l'autre, d'une journée à l'autre, d'une seconde à l'autre. Ces fluctuations étant influencées par le déplacement des masses d'air en altitude, mais également par le relief, le type de recouvrement du sol et la stabilité thermique de l'atmosphère. Le vent varie en direction et en intensité, mais pour les besoins du modèle, on se limite à l'étude de la variation du vent en intensité, dans une seule direction.

Les caractéristiques du vent seront présentées afin de déterminer comment reproduire par la suite une séquence valable et représentative de vents réels. Pour la production en site isolé mais également pour les aérogénérateurs sont couplés au réseau, il est nécessaire de connaître les statistiques de vitesse du vent tout au long de l'année. Cela requiert une caractérisation préalable des sites sur au moins une année et une mise à jour continue des bases de données [1].

II.1. 1 INFLUENCE DE LA FORME DU RELIEF SUR L'INTENSITE DU VENT

L'intensité du vent est influencée par le relief. En général, la vitesse du vent est plus élevée sur les collines que les fonds de vallée. Les collines situées près des côtes constituent

des sites favorables à l'implantation d'installations éoliennes principalement lorsqu'elles sont dénudées et à pentes douces et progressive.

Les collines et les falaises de très forte pente sont par contre beaucoup moins favorables du fait des turbulences qu'elles engendrent. Les pitons aigus et isolés notamment ne constituent pas en général des sites intéressants.

Des études montrent que l'accélération du vent au sommet était beaucoup plus importante sur les lignes de crêtes arrondies que sur les collines circulaires. L'augmentation de vitesse au moment peut atteindre 40 à 80% pour les chaînes de collines présentant une ligne de crête continue et 20 à 40% pour des collines de forme circulaire.

L'effet d'accélération s'atténue au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sommet. Il faut cependant souligner que les études effectuées ne tenaient pas compte du gradient vertical ni du gradient de température.

En pratique, les effets accélérateurs peuvent être atténués. Mais malgré cela, les collines dénudées à pente douce et progressive constituent toujours des sites privilégiés pour l'installation des éoliens en raison de l'accroissement de la vitesse du vent.

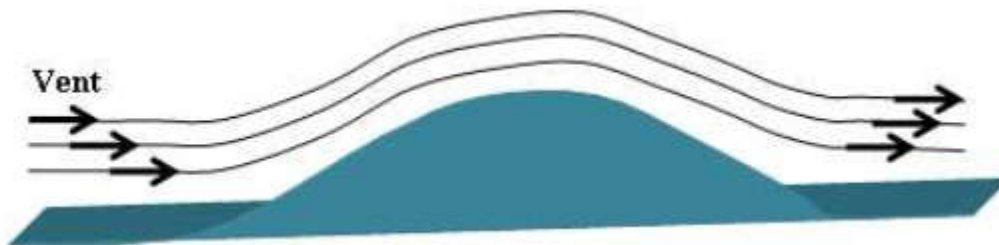


Figure II.1: Accélération du vent sur les collines.

Dans le cas des installations des petits aérogénérateurs, il est souhaitable de les implanter près du lieu d'utilisation, pour limiter la longueur des fils électriques.

Cela restreint donc le site à une zone de quelques hectares qu'il faudra prospecter afin de choisir le point le plus favorable.

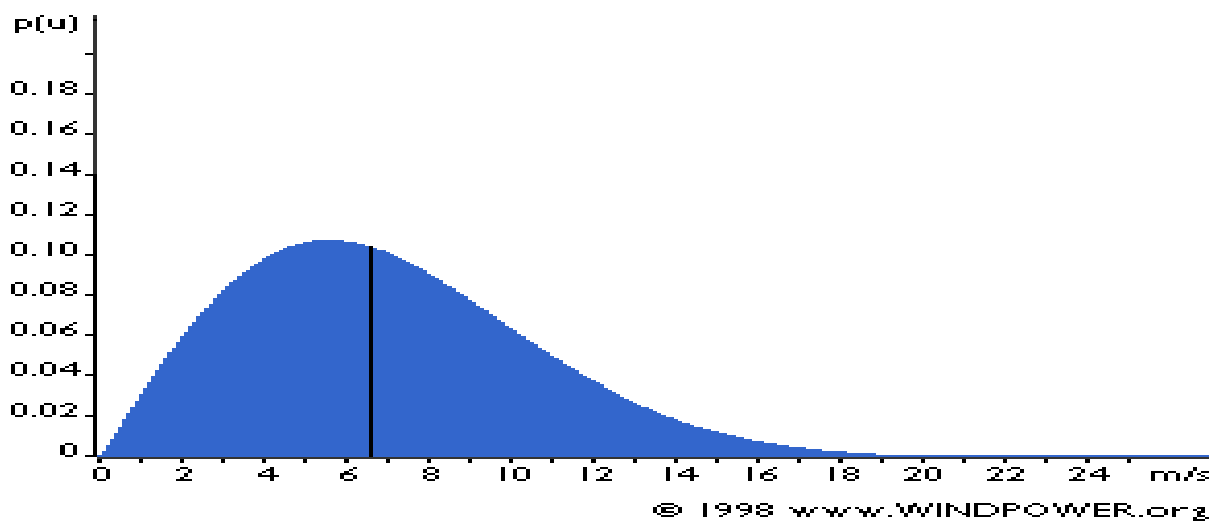
Si le sol est très accidenté et qu'il n'est pas possible de placer la machine hors de cette zone, il faudra placer l'éolienne à une certaine altitude par rapport au sol (au moins 15 m) pour

éviter d'une part les turbulences produites par des buissons, des roches et pour profiter de l'augmentation de la vitesse du vent avec l'altitude[2].

II.1.2 Vitesse moyenne et distribution statistique

II.1.2.1 Modèle général des variations de la vitesse du vent

Il est très important pour l'industrie éolienne d'être en mesure de décrire les variations de la vitesse du vent. Les fabricants utilisent ces informations pour optimiser la conception des éoliennes dans le but de minimiser les coûts liés à la production d'électricité. Les investisseurs, eux, ont besoin de ces informations afin de pouvoir estimer le revenu lié à la production d'électricité.



FigureII.2. la distribution de Weibull

Si vous mesurez la vitesse du vent durant une année, vous remarquerez que, dans la plupart des régions du monde, les vents extrêmes sont très rares alors que des vents frais ou modérés sont assez fréquents.

On décrit normalement les variations du vent sur un site donné en utilisant une distribution de Weibull comme celle que vous voyez sur l'image ci-dessus. Sur le site en question, la vitesse moyenne du vent est de 7 m/s, et la forme de la courbe est déterminée par ce qu'on appelle un paramètre de forme égal à 2.

II.1.2.2 Description statistique des vitesses du vent

Ceux qui sont déjà habitués à travailler avec des statistiques se rendront tout de suite compte que ce que le graphe ci-dessus représente est une distribution de probabilité (distribution fréquentielle). La probabilité que le vent souffle à une vitesse quelconque (zéro

inclus) étant obligatoirement égale à 100 %, la zone au-dessous de la courbe sera toujours égale à exactement 1.

La moitié de la zone bleue se trouve à gauche de la ligne verticale noire située à 6,6 m/s. On dit alors que 6,6 m/s est la médiane de la distribution. Cela signifie que le vent souffle à moins de 6,6 m/s la moitié du temps, et à plus de 6,6 m/s pendant l'autre.

Vous vous demandez peut-être pourquoi nous avons alors fixé la vitesse moyenne à 7 m/s. Voici l'explication : la vitesse moyenne est en fait la moyenne des vitesses de vent enregistrées sur le site en question.

Comme vous pouvez le voir sur le graphe, la distribution des vitesses du vent est oblique, donc asymétrique. Parfois il y aura des vents très forts, mais ce ne sera que très rarement. En revanche, les vitesses de vent de 5,5 m/s sont les plus fréquentes. On dit alors que 5,5 mètres par seconde est la valeur modale de la distribution. Si nous multiplions chaque petit intervalle de vitesse par la probabilité de l'occurrence de cette vitesse de vent particulière, et que nous totalisons ensuite tous les résultats, nous obtiendrons la vitesse moyenne du vent.

La distribution statistique des vitesses du vent varie d'un endroit à l'autre vu qu'elle dépend des conditions climatiques locales, le paysage et sa surface. La distribution de Weibull tend donc à varier, tant en forme qu'en valeur moyenne.

Dans le cas où le paramètre de forme est égal à exactement 2, comme c'est le cas pour le graphe ci-dessus, on parle d'une distribution de Rayleigh. Les fabricants fournissent souvent les calculs de performance en utilisant la distribution de Rayleigh[3].

La vitesse moyenne du vent est le plus simple indicateur de la qualité des ressources éoliennes d'une région. Les vitesses moyennes mensuelles de la vitesse du vent et sont présentées, sur la figure (II-3).

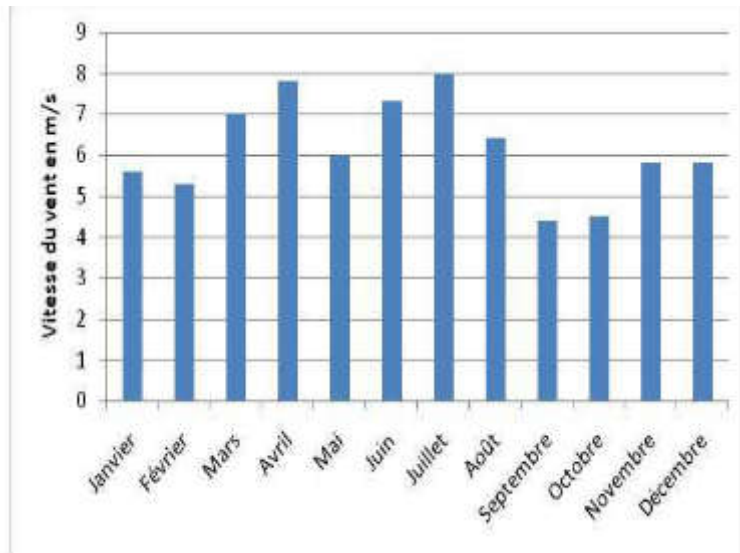


Figure II.3 : Moyenne mensuelles de la vitesse du vent dans la région d'Adrar [1]

II.1.2.3 Equilibrage de la distribution de Weibull

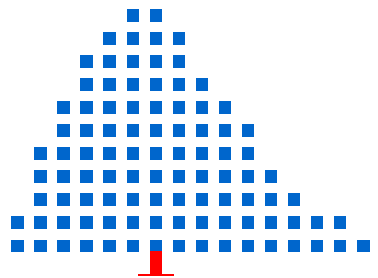


Figure II.4 représente la probabilité que le vent souffle à une vitesse donnée pendant 1 % des heures d'une année

Une autre façon de connaître la vitesse moyenne du vent est d'équilibrer la pile de cubes bleus vers la droite de façon à montrer exactement la même image que le graphe ci-dessus. Chaque cube représente la probabilité que le vent souffle à une vitesse donnée pendant 1 % des heures d'une année. Les vitesses de vent de 1 m/s ont été rangées dans la colonne la plus à gauche alors que ceux de 17 m/s correspondent à la colonne la plus à droite. Dans notre cas, c'est dans la septième colonne que la pile se trouve complètement en équilibre, ce qui nous signale que la vitesse moyenne du vent est égale à 7 m/s[3].

II.2.2 Variations cycliques temporelles

Pour un même endroit, les vitesses moyennes horaires, journalières, annuelles et même décennales peuvent varier d'une période à l'autre. Les météorologistes se basent généralement

sur trente années de mesures afin de conclure sur le climat d'une région [8]. Cependant, il a été avancé qu'on peut se baser statistiquement sur les mesures d'une seule année et obtenir des résultats ayant une précision de 10%, et un niveau de confiance de 90% [4]. À une échelle de temps plus petite que l'année, les variations saisonnières sont mieux connues et plus prévisibles [5], mais pour des périodes plus courtes, les variations restent difficiles à prévoir plus que quelques jours à l'avance, étant reliés aux passages des systèmes météorologiques. À l'échelle de la journée, on retrouve bien souvent un cycle diurne, correspondant à la variation régulière du vent d'une journée à l'autre. Elle est occasionnée par la différence de température entre le jour et la nuit. On peut ainsi diviser la variation de la vitesse du vent dans le temps en cinq catégories :

- a. interannuelle;
- b. annuelle ou saisonnière;
- c. synoptique ;
- d. diurne ou journalière;
- e. court terme, coup de vent et turbulence .

Van der Hoven [5] a présenté la densité spectrale du vent, calculée à partir d'enregistrements à court et long terme (Figure II.5). On peut voir clairement trois composantes cycliques, ayant trois périodes bien distinctes : le sommet turbulent, le sommet diurne et le sommet synoptique. La figure montre qu'il y a peu d'énergie entre le cycle diurne et le sommet turbulent, signifiant que le cycle diurne peut être traité de façon indépendante des fluctuations de turbulence.

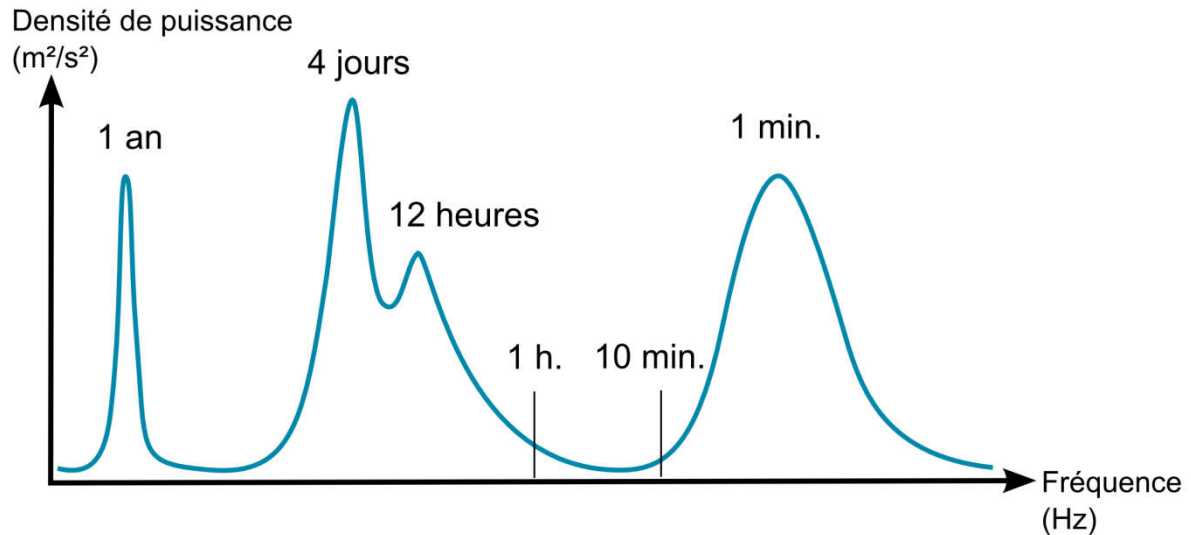


Figure II.5 : Spectre de Van der Hoven

On constate qu'une partie importante de l'énergie est concentrée sur une période de l'ordre de la minute, correspondant à l'échelle des mouvements turbulents. On observe également un trou d'énergie pour des périodes comprises entre 10 minutes et une heure. Par conséquent, sur une période incluse dans ce trou d'énergie, la vitesse du vent pourra être localement considérée comme un processus stationnaire.

On pourra alors considérer la vitesse du vent comme la somme d'une composante moyenne et d'une composante fluctuante [1].

II.2.3. Variation journalière.

Les vents subissent des fluctuations journalières qui sont dues à des effets convectifs qui s'expliquent par l'échauffement du sol qui est plus rapide que celui des mers. Hormis les variations journalières, nous retiendrons que dans les laps de temps la direction du vent peut varier de 20° et la vitesse de 3 m/s et même davantage [6].

II.2.4. Les variations du vent en fonction de l'altitude :

L'augmentation de la vitesse du vent au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol, est un phénomène bien connu. Ainsi de 2 m/s à 20 m d'altitude à Paris, la vitesse du vent atteint 7 à 8 m/s à 300 m d'altitude. La réduction de vitesse au voisinage du sol est due au freinage de l'air par la végétation, les habitations et les obstacles de toutes sortes.

Les relevés météorologiques montrent que l'accroissement relatif de la vitesse du vent avec l'altitude par rapport au sol varie d'un point à un autre.

Différents auteurs ont proposé pour représenter la loi de variation de la vitesse du vent l'expression suivante:

$$\frac{V'}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^{2n} \quad (\text{II.1})$$

V_0 : La vitesse observée à la hauteur h_0 ,

V' : La vitesse observée à la hauteur h .

Généralement, on prend pour h_0 la valeur 10m, n est un coefficient qui caractérise le terrain comme dans le tableau ci-dessous, il varie de 0,08 à 0,4 (les valeurs les plus faibles correspondent généralement aux régions venteées et les plus fortes aux zones de faible intensité).

Tableau II.1: Les paramètres des sites donnant l'évolution de la vitesse du vent.

Nature du terrain	Inégalité du sol \bar{h} en cm	Exposant n
Plat : neige, glace, mer, marécages, herbes courtes	0 à 20	0,08 à 0,12
Peu accidenté : champs et pâturages, cultures	20 à 200	0,13 à 0,16
Accidenté : bois, zones peu habitées	1 000 à 1 500	0,20 à 0,23
Très accidenté : villes	1 000 à 4 000	0,25 à 0,4

L'énergie susceptible d'être extraite est proportionnelle au cube de la vitesse. il en résulte que le rapport des énergies disponibles à h mètres et à h_0 mètres au-dessus du sol, s'élève à :

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^{3n} \quad (\text{II.2})$$

avec $0.30 < 3n < 1.20$

Les sites les plus intéressants pour la récupération d'énergie éolienne sont les sites peu ou pas accidentés pour lesquels l'exposant n est faible. On bénéficie dans ce cas des vitesses de vent près du sol élevées et une variation de la vitesse du vent avec l'altitude faible (les vitesses du vent en haut et en bas de la machine sont sensiblement les mêmes), ce qui a pour conséquence de diminuer les contraintes cycliques sur les pales du moteur éolien (d'autant plus important lorsque le diamètre de l'hélice est grand).

On aura donc intérêt pour recueillir le maximum de puissance à placer le moteur éolien le plus haut possible par rapport au sol, au sommet d'une tour, par exemple et au moins à 6 mètre de hauteur pour les sites les plus favorable.

Il y aura lieu d'effectuer un calcul économique, le prix du support de l'installation croissant avec la hauteur dans des proportions non négligeables. Dans tous les cas afin d'éviter des déboires, on aura intérêt étant donné la variabilité du coefficient n d'un point à un autre, à effectuer les mesures aux emplacements susceptibles d'être retenus pour l'implantation du groupe éolien [6].

II.2.5 Turbulence

Les mesures de vent sont généralement faites à la seconde et sont moyennées ensuite sur des périodes de 10 minutes. Ces variations de vent, en deçà d'une période de 10 minutes, ont un caractère stochastique et sont appelées "turbulence". Ces variations, de courtes périodes, doivent être considérées lors de la conception des éoliennes afin de calculer les charges dynamiques; nécessaires pour les prédictions en fatigue, le contrôle de l'éolienne et l'étude de la qualité de l'onde. La turbulence, c'est-à-dire la vitesse du vent sur une courte période de temps, est définie par :

- a. une intensité de turbulence;
- b. une distribution statistique;
- c. une auto corrélation;
- d. une longueur de turbulence;
- e. une densité spectrale.

Distribution statistique et intensité de turbulence : Le vent peut être décomposé en trois composantes; les composantes longitudinales, latérales et verticales. La composante longitudinale étant dans la direction principale de propagation. Chaque composante peut être vue comme étant constituée d'une valeur moyenne U et d'une valeur aléatoire \tilde{u} normalement distribuée autour de 0. La turbulence peut être ainsi vue comme une variation aléatoire autour d'une valeur moyenne. La distribution statistique qui représente le mieux le comportement de la turbulence est donc la distribution normale.[5].

$$u=U+\tilde{u} \quad (\text{II.3})$$

II.3 La fréquence du vent

La fréquence du vent, c'est à dire le pourcentage du temps durant lequel le vent souffle dans ce dernier.

II.3.1 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.6) 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).

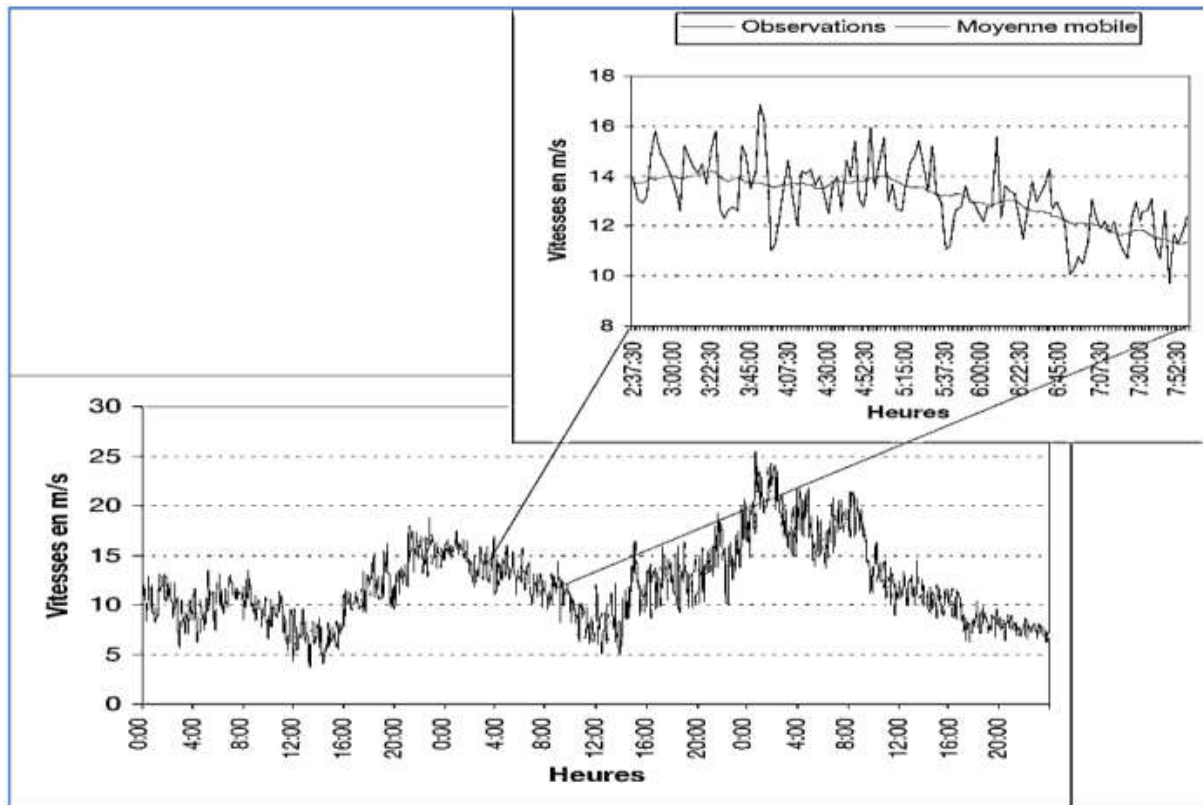


Figure II.6 : Vitesse du vent enregistrée du 3 au 5 juin 1994 à la station de recherche du Kastelberg (1 350 m, Alsace).

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 (Figure II.7) 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.[7] .

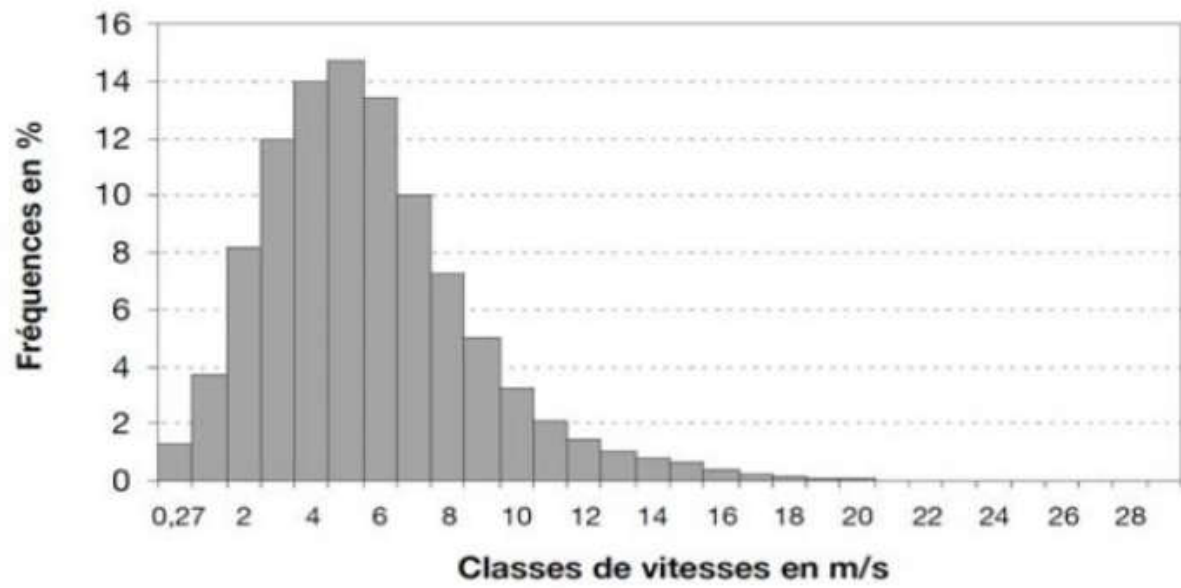


Figure II.7: Fréquence des vitesses du vent enregistrées de 1987 à 1997 à la station météorologique d'Aubure (1100m, Alsace)

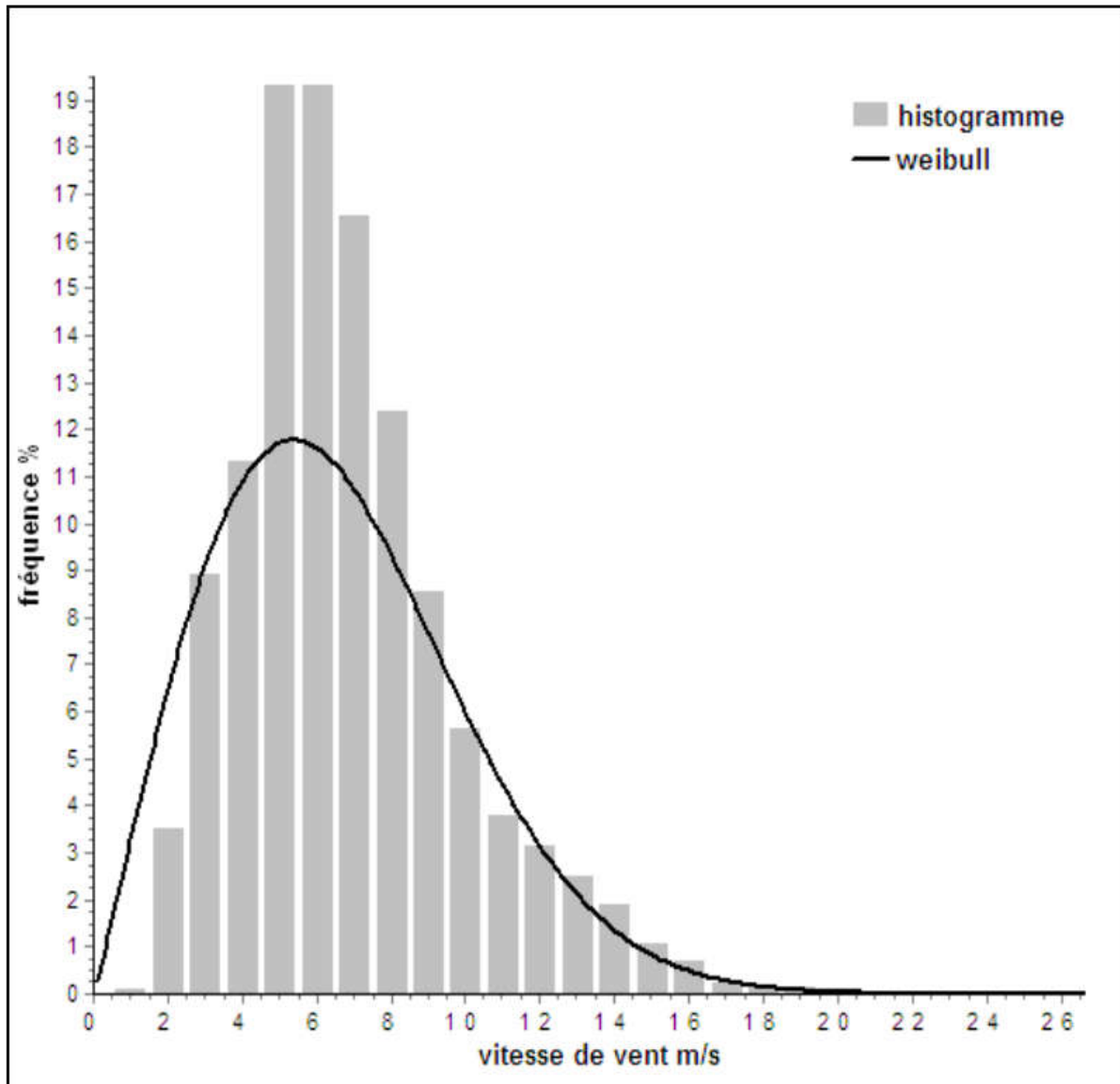


Figure II.8 : histogramme des fréquences et la courbe de Weibull pour Adrar

II.4. La rose des vents

La réalisation de la rose des vents correspond à l'analyse de la variation des directions du vent pour une station, une analyse d'autant plus intéressante puisqu'elle représente géographiquement le vent. En effet, lors de l'installation d'éoliennes sur un site, il est nécessaire de connaître la ou les directions principales du vent afin, notamment, de limiter l'interaction négative entre plusieurs éoliennes ou avec des obstacles. Les roses des vents donnent plusieurs informations. On peut, par exemple, déterminer la répartition de la fréquence des vents ou alors la valeur moyenne des vents pour chaque direction et faire cela pour huit ou seize directions différentes. Dans le cadre de ce travail, une rose des vents a été réalisée pour chaque station où nous

avons des données de vent valides. Cependant, les objectifs de ce travail étant reliés à la conception d'un générateur de numérique de vitesses de vent comme entrée d'un simulateur de turbine éolienne, nous avons préféré nous concentrer sur l'étude des variations de la vitesse du vent plutôt que sur l'étude des variations de sa direction. De plus, peu de données de directions de vent étaient disponibles et n'auraient pas permis d'approfondir cet aspect de l'étude. La (Figure II.9). montre un exemple de rose des vents réalisée pour la station de Desrosiers à l'aide des données de directions de vent à une hauteur de 20 m. Elle donne les pourcentages de répartition du vent suivant seize directions. On peut alors observer que, pour cette station, les deux directions principales sont OSO (Ouest-Sud-Ouest) et NE (Nord-Est) [8].

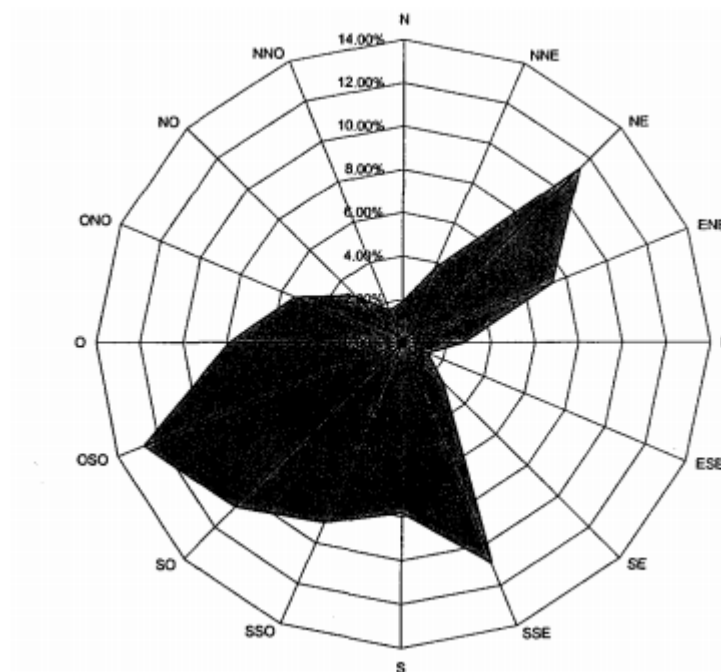


Figure II.9.: Rose des vents pour la station de Desrosiers (directions à 20 m)

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.2) :

Tableau II.2 : Les noms des 16 directions de la rose des vents et les angles correspondants
[9]

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°

Une rose des vents est un peu comme un compas de navigation qui divise l'horizon en secteurs angulaires. Pour chaque secteur, sont présentés [10,11]:

- La fréquence du vent, c'est à dire le pourcentage du temps durant lequel le vent souffle dans ce dernier
- La vitesse moyenne du vent multiplié par sa fréquence.
- La puissance disponible dans le vent.

La rose des vents joue un rôle très important dans la localisation de sites appropriés à l'installation d'éoliennes. Si une grande partie de l'énergie contenue dans le vent provient d'une direction particulière, il faut chercher à avoir aussi peu d'obstacles et un terrain aussi peu perturbé que possible dans cette direction.

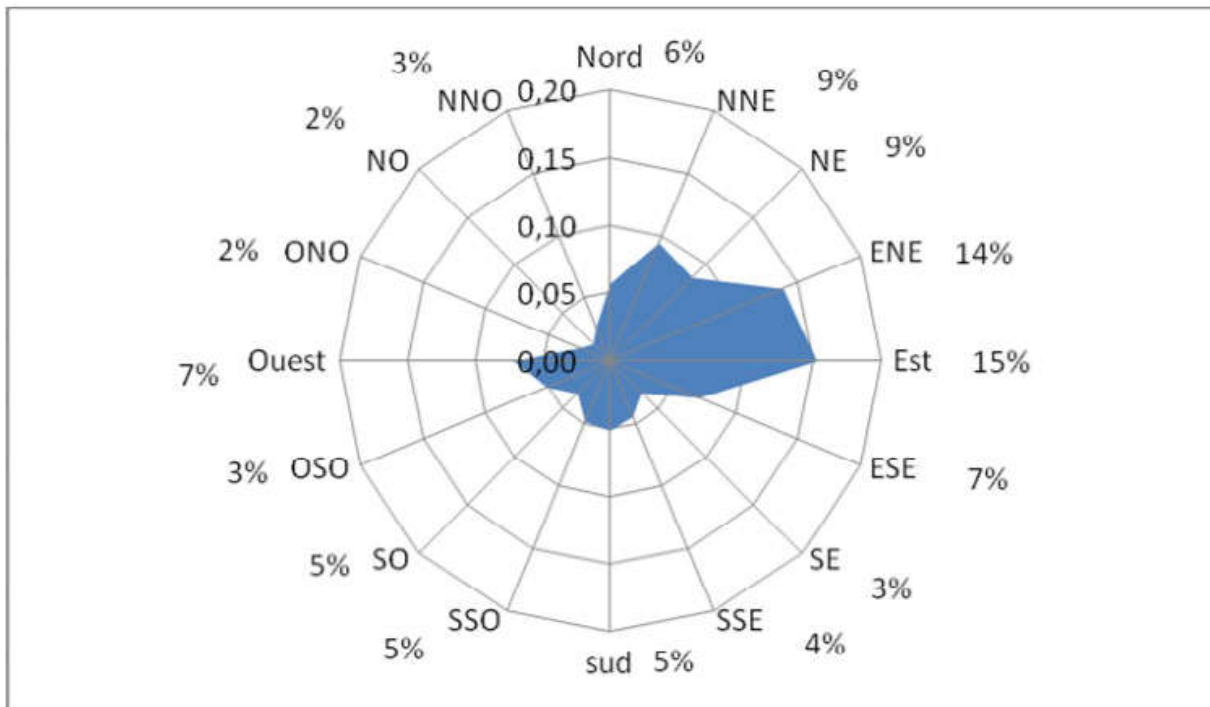


Figure II.10: rose de vent pour le site d'Adrar

Les secteurs prédominants sont (voir la Figure III.5) :

- les secteurs Nord Nord Est (NNE) et Nord Est avec un pourcentage de 9% pour chaque direction.
- le secteur Ouest et Est Sud Est (ESE) compte 7% pour chaque secteur et 6% pour le secteur Nord.
- le secteur Sud, Sud Ouest et Sud Sud Ouest (SSO) avec 5% des observations.

Le secteur dominant est :

- le secteur Est qui représente et secteur Est Nord Est (ENE) compte respectivement 15% et 14%.

Les faibles secteurs sont :

- le Sud Sud Est (SSE) repasant 4% de vent et Sud Est, Ouest Sud Ouest (OSO) et Nord Nord Ouest (NNO) avec un pourcentage de 3% pour chaque direction.
- enfin on a 2% pour les directions Nord Ouest et Ouest Nord Ouest (ONO).

II-5 Modèles de densités de la probabilités de la vitesse du vent

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

- La distribution de Weibull ;

- La distribution hybride de Weibull;
- La distribution de Rayleigh.

II.5.1 Distribution de Weibull

La distribution de Weibull a été utilisée pour l'étude statistique des données mesurées au sol. La densité de probabilité et la fréquence cumulée de cette distribution [12] est donnée par:

$$f(V) = \left(\frac{K}{A}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- $f(V)$: la distribution en fréquences des vitesses mesurées.
- K : facteur de forme sans dimension ($k > 0$) qui caractérise la forme de la distribution de fréquence.
- A : facteur d'échelle (m/s) et $A > 0$.

II.5.2 Distribution hybride de Weibull

La distribution hybride de Weibull [12], est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est supérieure ou égale à 15%. En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit:

$$f(V) = (1 - ff_0) \left(\frac{K}{A}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right) \quad (\text{II.5})$$

$$f(V) = ff_0$$

ff_0 : fréquence de vents calmes

II.5.3 Distribution de Rayleigh

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

Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(V) = 2 \frac{V}{A^2} \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^2\right) \quad (\text{II.6})$$

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

La modélisation de Weibull est générale, en ce sens qu'elle englobe les distributions exponentielles [14]. La fonction de Weibull peut être décrite par deux ou trois paramètres. Les avantages de l'utilisation de la fonction de Weibull à deux paramètres ont été mis en évidence [15,16].

Afin de nous conformer aux standards de l'industrie éolienne, nous utilisons la fonction de Weibull à deux paramètres [16].

La distribution de Weibull représente bien le fait que, sur un site donné, les vents de faible intensité seront plus courants que ceux de forte intensité. Cette courbe est très intéressante pour les concepteurs de parc éolien comme pour les investisseurs car elle est significative du potentiel éolien du site [17].

Conclusion

Dans ce chapitre on conclure que Les caractéristiques du vent dans un site (vitesses moyenne, fréquences, directions..) aident à estimer la quantité d'énergie extraite effectivement du gisement éolien, puisque ces paramètres influent directement sur le fonctionnement des éoliennes.

CHAPITRE 03 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

Dans le but d'établir un modèle informatique empirique visant à prédire l'évolution temporelle de la vitesse de vent qu'est-il indispensable du fait que la production de l'énergie éolienne liée directement à la variation de la vitesse du vent.

Dans ce chapitre, nous allons présenter tableaux des quatre sites. Ces tableaux représentent la probabilité en fonction de vitesse et on fait des calculs avec matlab pour choisis la bonne distribution de vitesse .

Paramètres des modèles

III.1.1.Fonction de Wei bull

Le potentiel éolien se détermine à partir des distributions de la vitesse moyenne du vent. La fonction qui modélise le mieux cette distribution est celle de Wei bull [8]. Elle s'exprime mathématiquement par sa fonction densité de probabilité donnée par:

$$f(V) = \left(\frac{K}{A}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right) \quad III.1$$

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer ces paramètres. Parmi les plus utilisées, on retient celle de l'écart type et de la vitesse moyenne. Le paramètre de forme k est déterminé par l'approximation suivante :

$$K = \left(\frac{\delta}{v}\right)^{-1.086} \quad III.2$$

δ : écart type (m/s).

v : vitesse moyenne (m/s).

Le facteur d'échelle est déterminé par:

$$c = \left(\frac{v}{1 + \frac{1}{k}}\right) \quad III.3$$

La fonction gamma est définie par la relation:

$$T(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dx \quad III.4$$

Lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée sur un site donné est supérieure ou égale à 15 %, la distribution hybride de Wei bull est utilisée [1, 2]. Elle est donnée par:

$$f(V) = (1 - ff_0) \left(\frac{K}{A}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \exp \left(-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right) \quad III.5$$

Où représente la fréquence des vents calmes.

Dans le tableau ci-après les différentes expressions des vitesses moyennes et cubiques moyennes ainsi que les variances selon le modèle utilisé sont données.

Tableau I .1. Ajustement de la vitesse moyenne, cubique et de l'écart type.

Distri butions	\bar{v}	\bar{v}^3	σ^2
Weibull	$c\Gamma(1+1/k)$	$c^3 \Gamma(1+3/k)$	$c^2 [\Gamma(1+2/k) - \Gamma^2(1+1/k)]$
Hybride Weibull	$(1-F_0)c\Gamma(1+1/k)$	$(1-F_0)c^3 \Gamma(1+3/k)$	$(1-F_0)c^2 [\Gamma(1+2/k) - \Gamma^2(1+1/k)]$

III.1.2.La loi de Rayleigh

Certaines études de vent ne se basent pas sur la loi de Wei bull mais sur une loi qui en découle directement en utilisant un paramètre de forme k égal à 2. Ce cas particulier de la loi de Wei bull est appelé loi de Rayleigh. La distribution cumulative de la loi de Rayleigh est :

$$f(V) = 1 - \exp \left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{A}\right)^2\right) \quad III.6$$

Et la fonction de densité de probabilité correspondante est :

$$f(V) = 2 \frac{V}{A^2} \exp \left(-\left(\frac{V}{A}\right)^2\right) \quad III.7$$

Le principal avantage de la loi de Rayleigh réside dans sa simplicité. En effet, de par sa définition utilisation d'un paramètre de forme k égal à 2 la loi de Rayleigh ne dépend plus que de la valeur moyenne du vent sur le site. Cette forme simplifiée de la loi de Wei bull a été étudiée à partir de données enregistrées sur de longues périodes et correspond assez bien, selon certains résultats, aux vitesses de vent observées. Elle est utilisée dans plusieurs études de sites comme alternative à la loi de Wei bull. Cependant, le principal désavantage de la loi

de Rayleigh est aussi lié à l'utilisation du paramètre de forme k fixé à 2. En effet, si cette utilisation permet une simplification, elle ne permet pas de s'adapter au mieux au régime de vent rencontré sur le site étudié puisque seule la valeur de la moyenne du vent est prise en compte. Par conséquent, pour deux sites ayant des valeurs de moyenne de vitesses de vent égales on obtiendrait deux distributions identiques alors que dans la réalité elles pourraient être significativement différentes, ce qui engendrerait des écarts importants sur le calcul de la valeur de puissance disponible .

III.1.3. Distribution hybride de Weibull

La distribution hybride de Weibull, est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est supérieure ou égale à 15%. En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien [9]. Cette distribution s'écrit :

$$f(V) = (1 - ff_0) \left(\frac{K}{A}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right) \quad \text{pour } V > 0 \quad \text{III.8}$$

$$f(V) = ff_0 \quad \text{pour } V = 0 \quad \text{III.9}$$

III.1.4. La vitesse moyenne du vent

La vitesse moyenne du vent est calculée à partir de l'intégrale du produit de la vitesse de vent et de la fonction de la distribution de Weibull [3]. Elle s'écrit sous la forme suivante:

$$v = \int_0^{\infty} V f(V) dV \quad \text{III.10}$$

En remplaçant $f(V)$ par sa formule on obtient:

$$v = \int_0^{\infty} V \left(\frac{K}{A}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right) dV \quad \text{III.11}$$

En arrangeant cette formule, la vitesse moyenne du vent en fonction des deux paramètres de Weibull peut s'écrire sous la forme suivante [2]:

$$v = AI \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad \text{III.12}$$

Avec I la fonction du gamma.

III.2 Calcul des paramètres

III.2.1 Représentation des tableaux

On a quatre tableaux représentant la fréquence du vent en fonction de la vitesse et le nombre des jours, chaque tableau définit un site différent que l'autre c'est-à-dire on a quatre sites différents. On observe qu'il y a des différentes valeurs de fréquence par rapport aux nombres des jours même si que la vitesse est la même pour chaque tableau et chaque site .

Tableau III.1 représente la fréquence du vent en fonction de la vitesse [5]

Tableau 1		
V (m/s)	Nbe_Jrs	%_P
0	0	0
1	25,5675	0,0626
2	36,525	0,0926
3	45,291	0,1166
4	54,7875	0,1426
5	47,4825	0,1226
6	43,83	0,1126
7	36,525	0,0926
8	27,3938	0,0676
9	21,915	0,0526
10	18,2625	0,0426
11	14,9753	0,0336
12	10,5923	0,0216
13	7,67025	0,0136
14	5,47875	0,076
15	4,01775	0,036
16	2,922	0,008
17	1,82625	0,005
18	0,36525	0,001
19	0	0
20	0	0

Donc on va calculer les paramètres de ce tableau :

La vitesse moyenne :

$$V_m = 6.04 \text{ m/s}$$

Le paramètre de forme k :

$$K = \left(\frac{6}{6.04}\right)^{-1.086} = 1.95$$

Le facteur d'échelle est déterminé par:

$$c = \left(\frac{v}{1+\frac{z}{k}}\right) = 6.74$$

Tableau III.2 représente la fréquence du vent en fonction de la vitesse (ain ouassara)[5]

Tableau 2 (Ain Ouassara)		
V (m/s)	Nbe_Jrs	%_P
0	0	0
1	146,1	0,3968
2	25,9328	0,0678
3	36,1598	0,0958
4	26,6633	0,0698
5	32,142	0,0848
6	32,5073	0,0858
7	25,9328	0,0678
8	15,3405	0,0388
9	9,13125	0,0218
10	7,305	0,0168
11	6,5745	0,0148
12	5,47875	0,0118
13	4,383	0,088
14	4,01775	0,078
15	2,922	0,005
16	2,55675	0,003
17	1,461	0,004
18	0,7305	0,001
19	0,36525	0,001
20	0	0

La vitesse moyenne :

$$V_m = 4.43 \text{ m/s}$$

Le paramètre de forme k :

$$K = \left(\frac{\delta}{V}\right)^{-1.086} = 1.33$$

Le facteur d'échelle est déterminé par:

$$c = \left(\frac{v}{1+\frac{z}{k}}\right) = 4.84$$

Tableau III.3 représente la fréquence du vent en fonction de la vitesse (oran)[6]

Tableau 3 (Oran)		
V (m/s)	Nbe_Jrs	%_P
0	20,454	0,0523
1	107,74875	0,2863
2	40,1775	0,1013
3	51,135	0,1313
4	31,04625	0,0763
5	27,39375	0,0698
6	27,759	0,0723
7	18,993	0,0483
8	18,2625	0,0463
9	9,13125	0,0213
10	9,13125	0,0213
11	7,305	0,0163
12	6,93975	0,0153
13	5,47875	0,0113
14	40,1775	0,073
15	2,922	0,007
16	2,55675	0,007
17	1,82625	0,004
18	0,36525	0,001
19	0,36525	0,001
20	0,36525	0,001

La vitesse moyenne :

$$V_m = 4.53 \text{ m/s}$$

Le paramètre de forme k :

$$K = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.086} = 1.21$$

Le facteur d'échelle est déterminé par:

$$c = \left(\frac{v}{1 + \frac{v}{k}}\right) = 4.72$$

Tableau III.4 représente la fréquence du vent en fonction de la vitesse (Kaberten-Adrar)[6]

Tableau 4 (Kaberten-Adrar)		
V (m/s)	Nbe_Jrs	%_P
0	0,37	0,001
1	18,99	0,042
2	6,94	0,009
3	29,22	0,070
4	39,08	0,097
5	65,75	0,170
6	58,81	0,151
7	47,48	0,120
8	35,79	0,094
9	27,39	0,075
10	16,80	0,046
11	12,05	0,033
12	12,05	0,033
13	9,13	0,025
14	5,11	0,014
15	3,29	0,009
16	1,83	0,005
17	1,46	0,004
18	0,73	0,002
19	0,00	0
20	0,00	0

La vitesse moyenne :

$$V_m = 7.21 \text{ m/s}$$

Le paramètre de forme k :

$$K = \left(\frac{V}{V_m}\right)^{-1.088} = 2.10$$

Le facteur d'échelle est déterminé par:

$$c = \left(\frac{V}{1 + \frac{V}{K}}\right) = 7.87$$

III.2 Résultats et discussions

III.2.1 Définition du Matlab

Matlab (Matrix laboratory) est un langage de calcul scientifique très performant intégrant le calcul, la programmation et la visualisation dans un environnement simple à utiliser. C'est un système interactif qui permet de manipuler directement des données structurées (matrices et vecteurs), ce qui n'est pas le cas de C, Java, Fortran ou Pascal par exemple.[4]

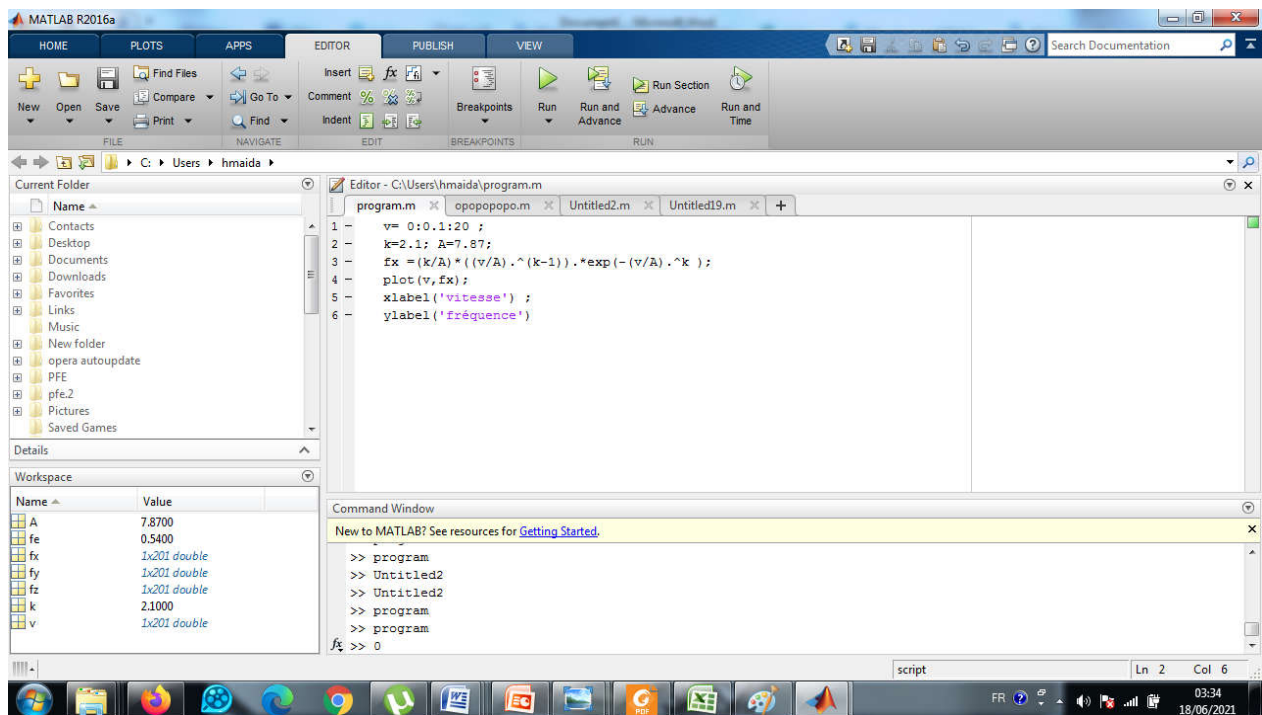


Figure III.1 représente logiciel matlab

III.2.1.1 Tableau I

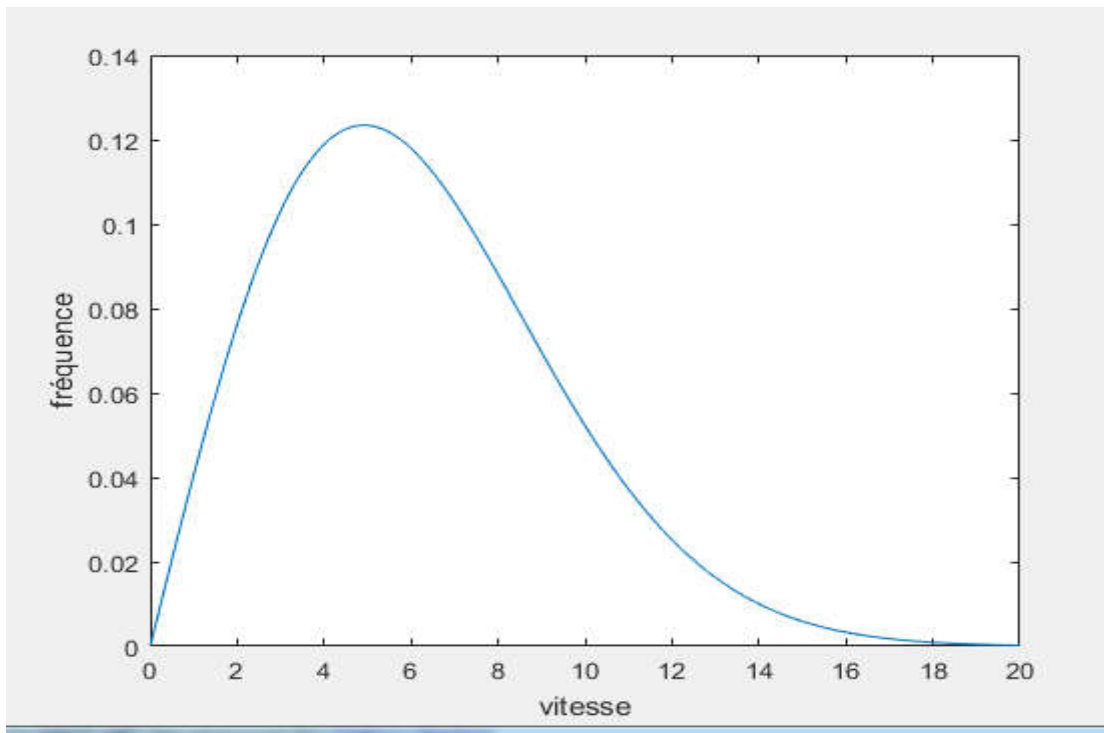


Figure III.2 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de rayleigh

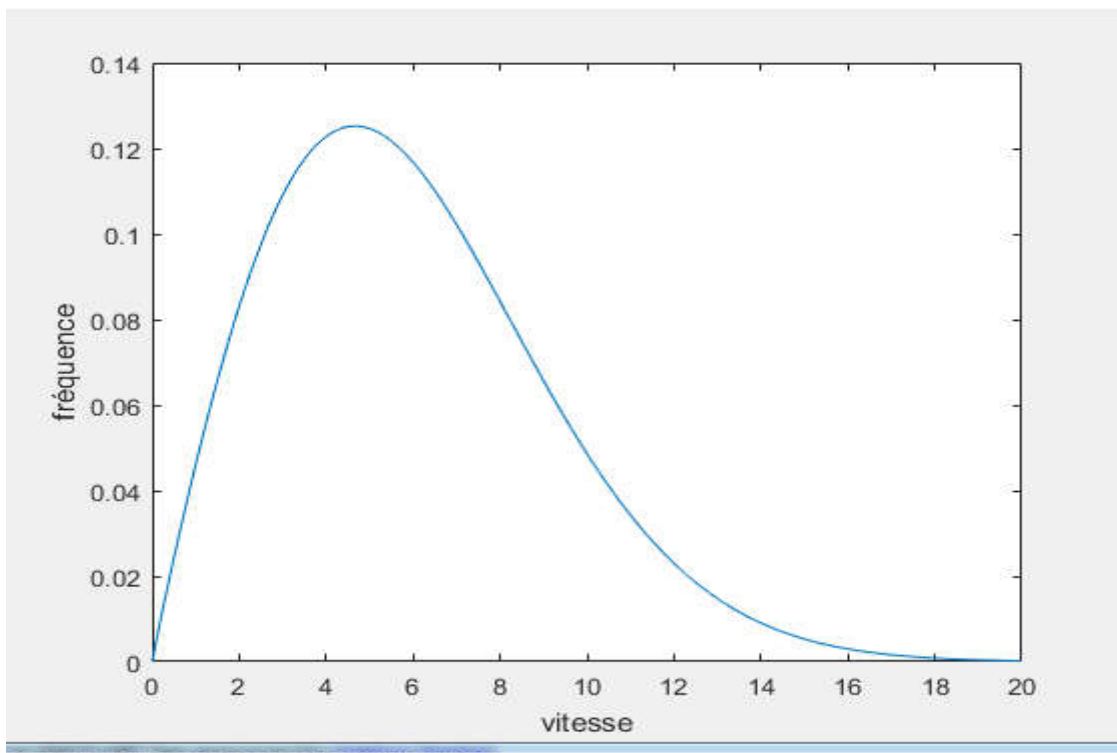


Figure III.3 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull

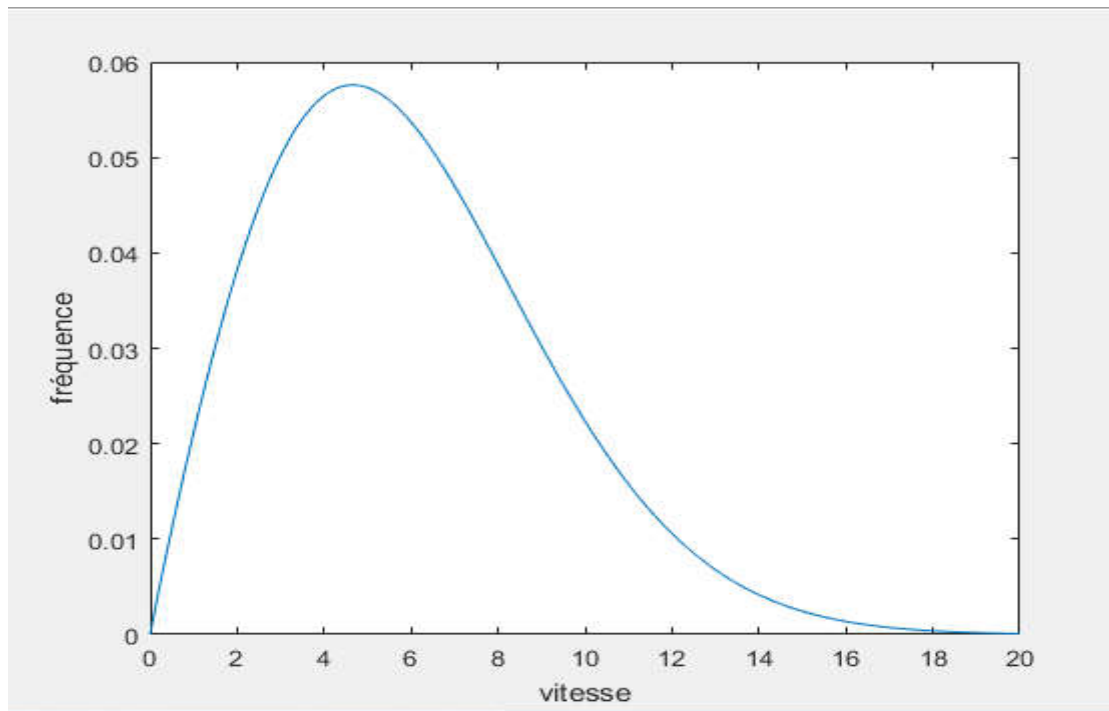


Figure III.4 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull hybride

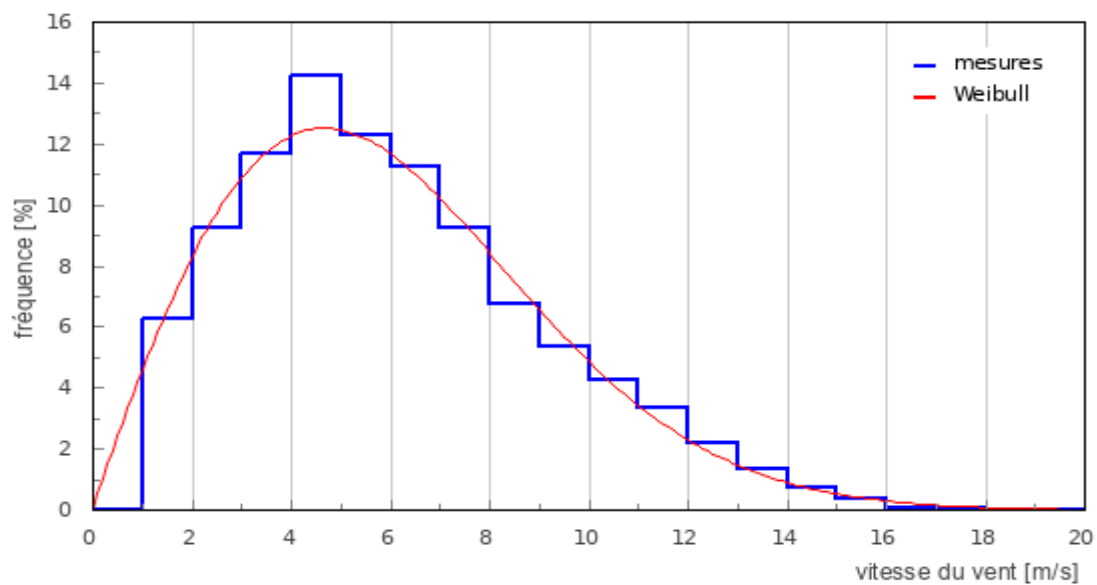


Figure III.5 distribution de la vitesse du vent

-Discussion :

On observe que tout les courbes sont déférent au l'histogramme sauf la courbe de distribution de weibull est presque en proportion direct avec l'histogramme .

-Résultat :

On a conclue que la distribution de weibull qui modélise la probabilité qu'un vent souffle à telle vitesse sur ce site.

III.2.1.2 Tableau2

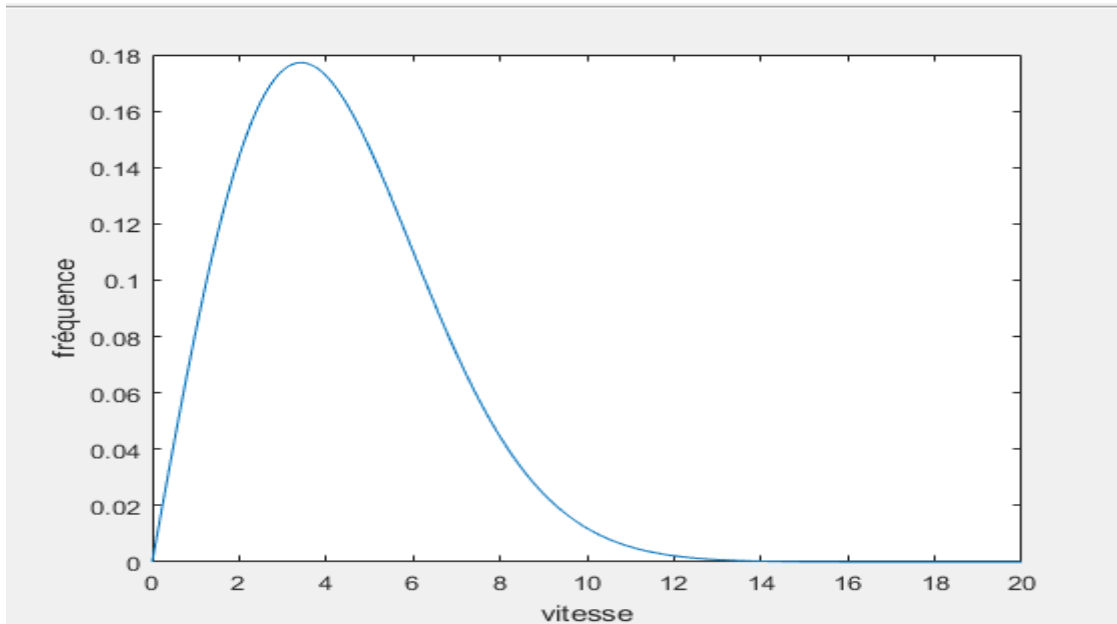


Figure III.6 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de rayleigh

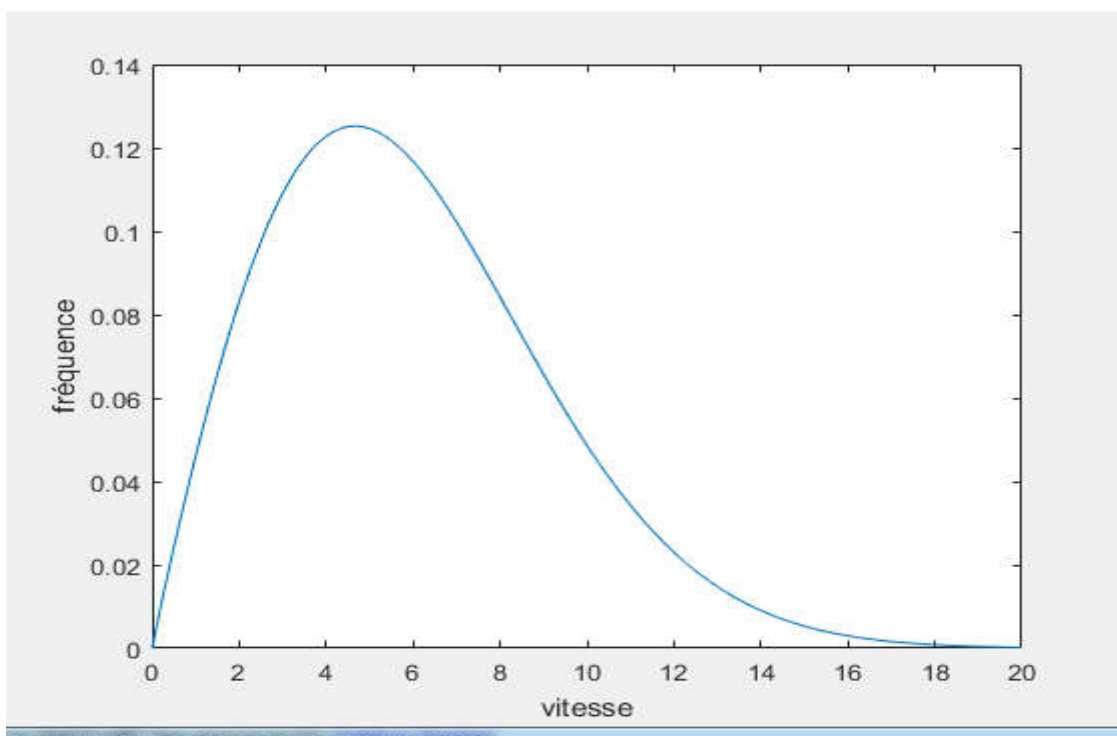


Figure III.7 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull

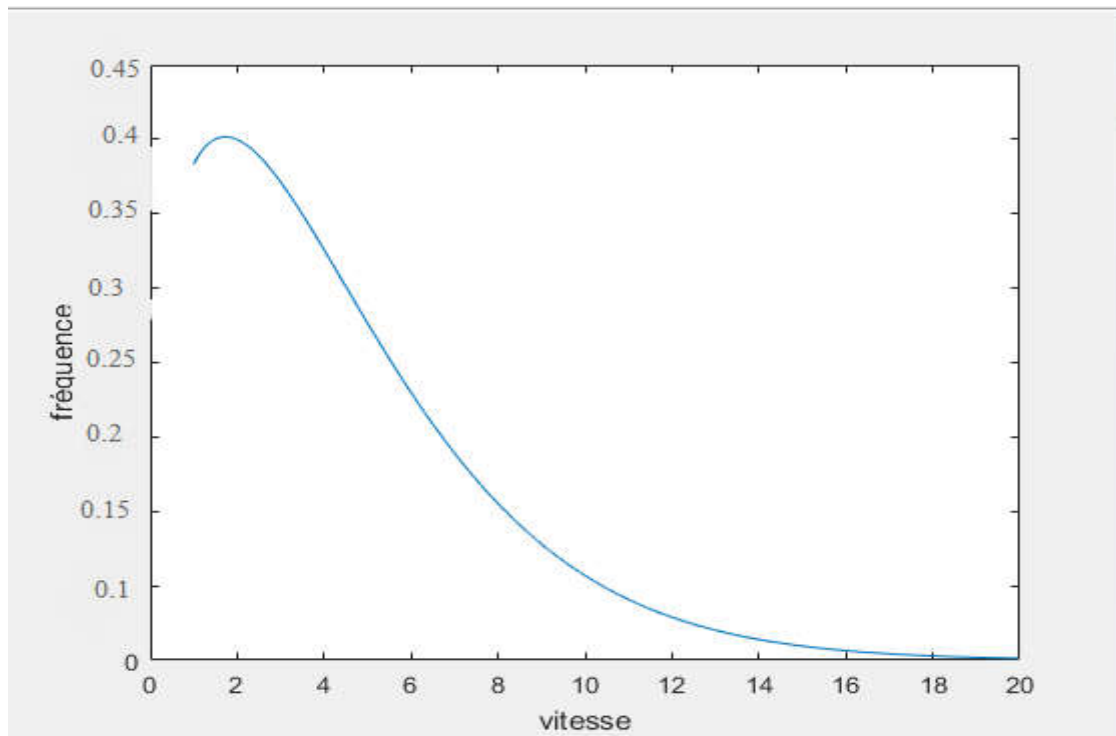


Figure III.8 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull hybride

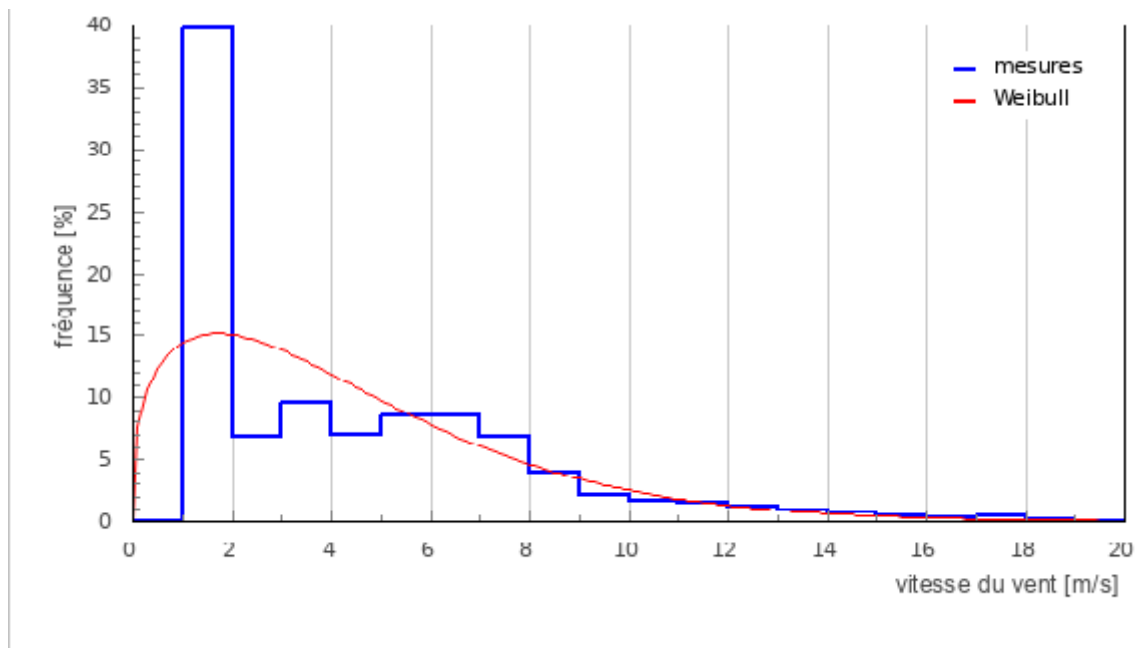


Figure III.9 distribution de la vitesse du vent

Discussion :

On observe que tout les courbes sont déférent au l’histogramme sauf la courbe de distribution de weibull hybride est presque en proportion direct avec l’histogramme .

Résultat

On conclue que la distribution de weibull hybride qui modélise la probabilité qu'un vent souffle à telle vitesse sur ce site.

III.2.1.3 Tableau 3

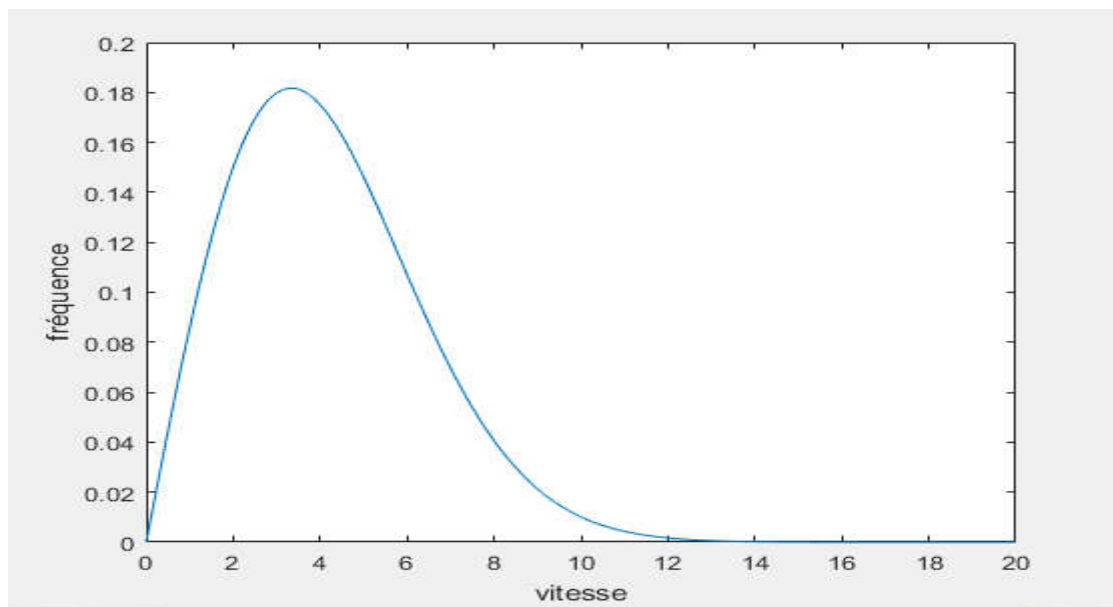


Figure III.10 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de rayleigh

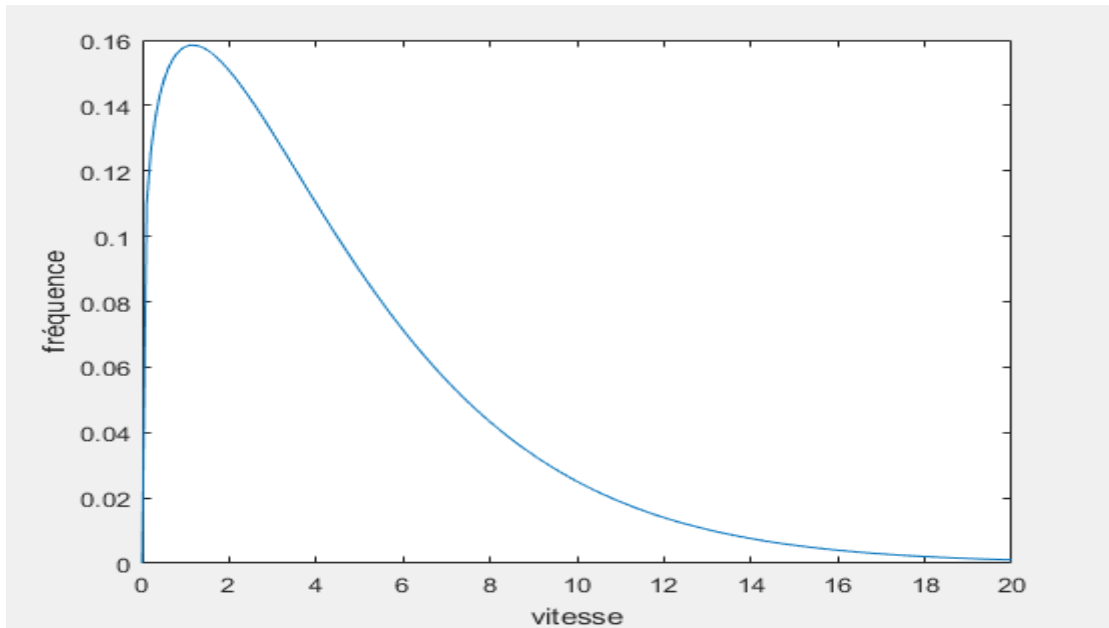


Figure III.11 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull

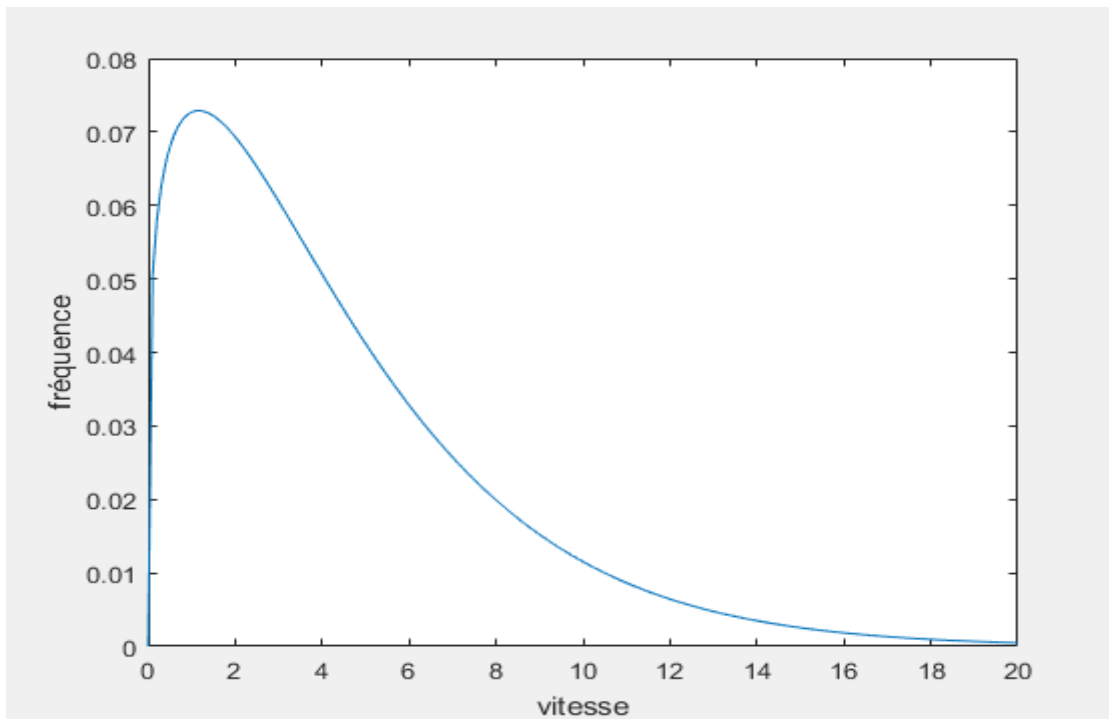


Figure III.12 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull hybride

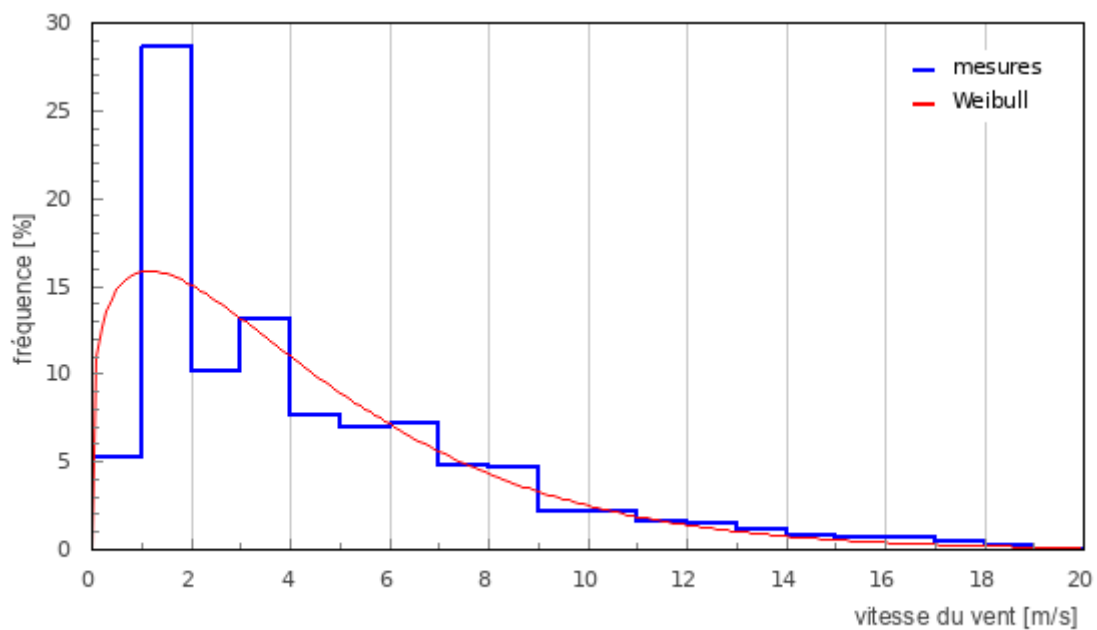


Figure III.13 distribution de la vitesse du vent

-Discussion :

On observe que toutes les courbes sont différentes de l'histogramme sauf la courbe de distribution Weibull hybride qui est presque en proportion directe avec l'histogramme.

-Résultat :

On a conclu que la distribution Weibull hybride qui modélise la probabilité qu'un vent souffle à telle vitesse sur ce site.

III.2.1.4 Tableau 4

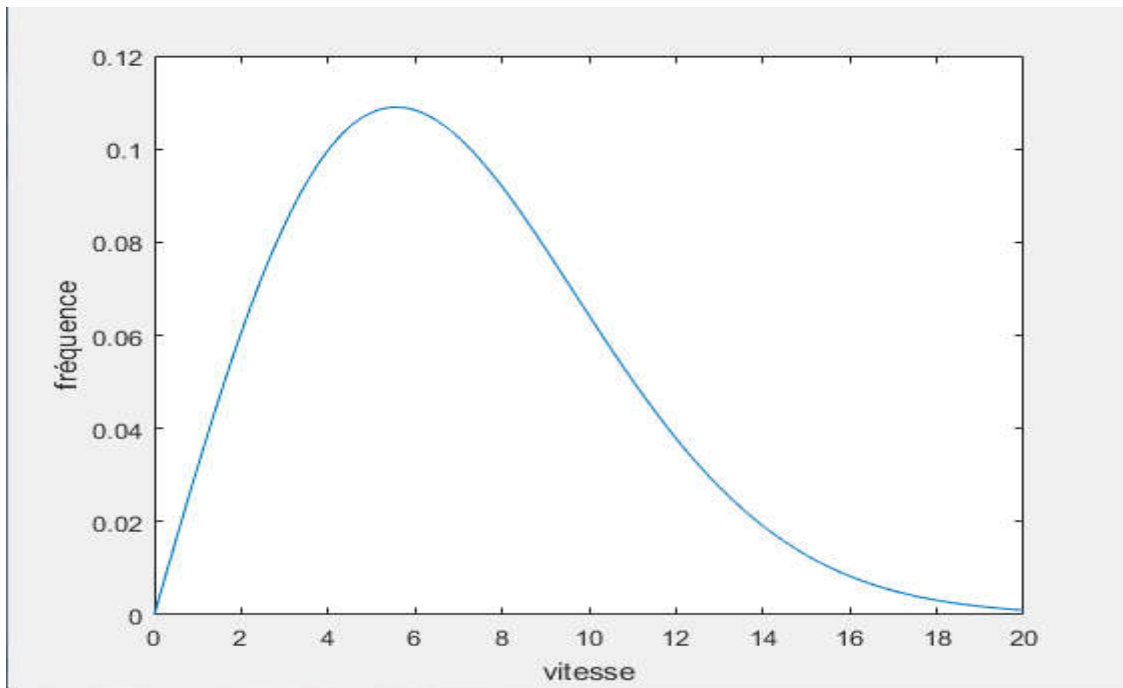


Figure III.14 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de rayleigh

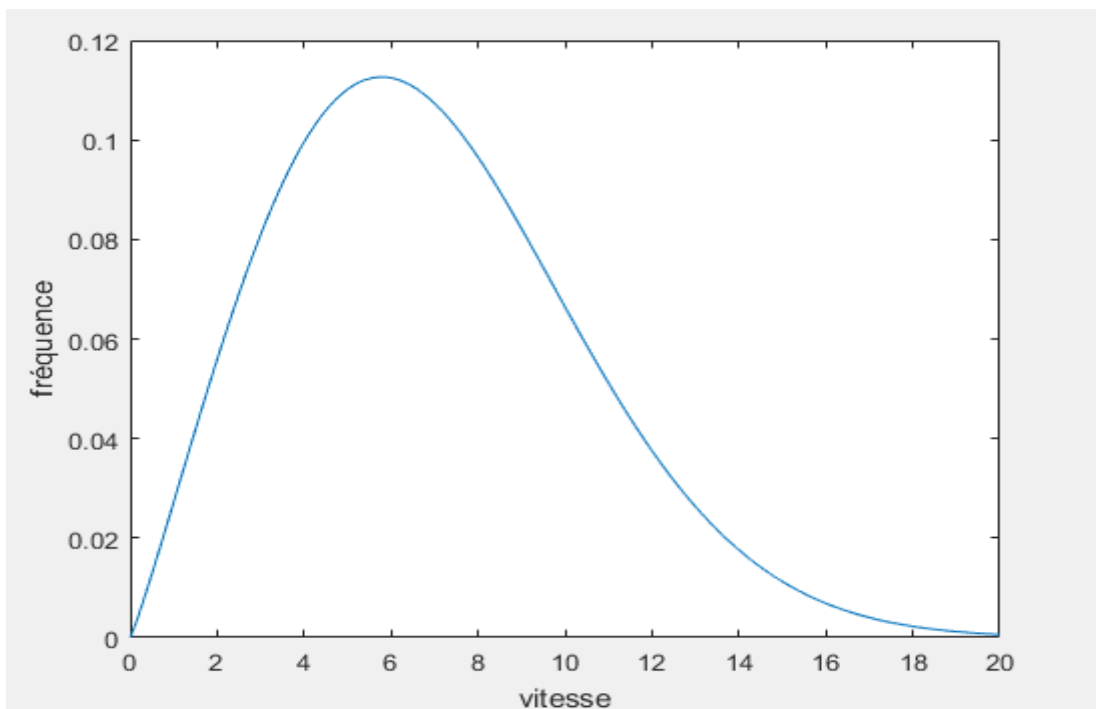


Figure III.15 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull

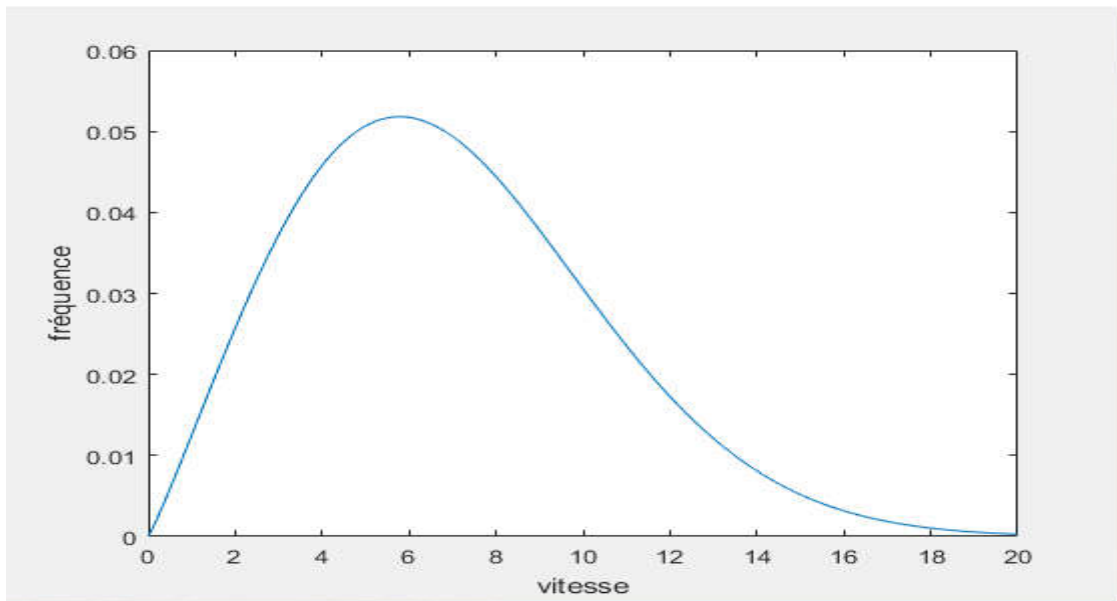


Figure III.16 représente la courbe du fréquence en fonction de vitesse par distribution de weibull hybride

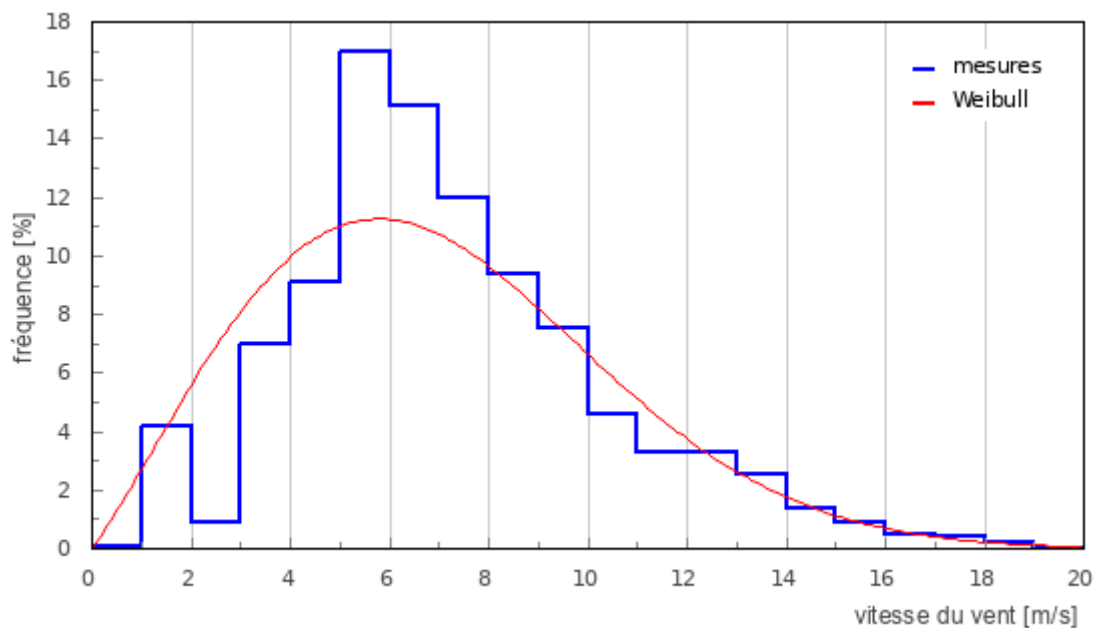


Figure III.17 distribution de la vitesse du vent

Discussion :

On observe que tout les courbes sont déférent au l’histogramme sauf la courbe de distribution de rayleigh est presque en proportion direct avec l’histogramme .

Résultat

On a conclue que la distribution de rayleigh qui modélise la probabilité qu'un vent souffle à telle vitesse sur ce site.

Conclusion

Dans ce troisième chapitre nous avons présenté es tableau la mesure de la vitesse de vent et la probabilité. Nous avons par la suite présenté la distribution de Weibull et Weibull hybride et Rayleigh avec ses deux paramètres Par ailleurs, nous avons donné la variation de la vitesse de vent durant une année de quatre région déférent, Les résultats des valeurs obtenus peuvent êtrer ésumés comme suit:

- la distribution de la vitesse du vent est changée par rapport le site puisque la fréquence des vent est variable .
- les distributions de weibll et weibull hybride et rayleigh sont utilisées pour estimer le potentiel éolien d'un site. Elle modélise la probabilité qu'un vent souffle à telle vitesse sur ce site.
- Ce chapitre a été consacré à la calcule des vitesses et des probabilités avec L'utilisation du logiciel MATLAB pour créer des modèles de prédiction le réseau de distribution de vitesse.

Conclusion général

Le vent comme phénomène aléatoire et chaotique, est une grandeur variable en direction et en vitesse tout au long de l'année, il peut être mesuré de façon périodique; annuel, mensuel, journalière et horaire. Pour le modéliser et l'évaluer comme source de l'énergie éolienne on a fait des calculs pour déterminer des sites que le vent a une vitesse acceptable pour installer une station éolienne. Plusieurs méthodes ont été utilisées à cet effet, parmi ces méthodes de calcul « la distribution de Weibull, Weibull hybride et Rayleigh », on cite cette étude qui fait l'objet de notre travail en vue de l'obtention du diplôme de Master option énergétique.

Tout d'abord, l'origine du vent et ses caractéristiques comme phénomène variable ainsi que le développement de l'énergie d'origine éolienne ont été rappelés, en survolant l'évolution de l'énergie du vent depuis l'antiquité aux grands aérogénérateurs, suivi d'un bref rappel sur les différents paramètres et caractéristiques des éoliennes. Ensuite, nous avons présenté des méthodes pour le calcul de la variation du vent sur une période donnée. Ces méthodes ont été utilisées et introduites dans un programme sous Matlab pour prédire la vitesse du vent afin de déterminer la fréquence du vent sur un site connu. Les résultats de calcul obtenus ont montré de bonne concordance avec ceux mesurés dans quatre sites différents.

Comme perspective et continuité de la présente étude, nous proposons d'élargir ces méthodes à toutes les grandeurs de phénomènes variables, telles que: le rayonnement solaire, la précipitation de pluies, la prédiction de la température d'une région.

REFERENCES

REFERENCES

CHPITRE I

- [1] I. Troen, E. L. Petersen, « European wind atlas ». Risoe National Laboratory, Roskilde, Danemark, pp. 656. 1989.
- [2] Tennekes A., « The logarithmic wind profile ». J. of Atmospheric sciences, vol. 30, pp: 234: 238, 1973.
- [3] wikipedia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Force_de_Coriolis, consulté le : 18/06/2021
- [4] ciras.ac-lille, <http://ciras.ac-lille.fr/ressources-pedas/ressources-bia/les-cours/meteorologie/meteorologie-v4-01.ppt>
- [5] Aogab Adnane, Merzougui Rami, Etude et Evaluation De Ventilation Naturelle Dans les Climats Humides, Référence Particulière à la Conception Hôtelière : Cas de la ville d'Alger,(Master), Université l'Aarbi Ben Mhidi de Oum El Bouaghi Algérie,2016.
- [6] ALLAL Fatima, Etude Des Modèles D'évaluation Verticale De La Vitesse Du Vent, (Master),Universite Mohamed Boudiaf – Msila Algérie,2018.
- [6] Said, Zergane, et al. "Configuration of wind farm in Kaberten region: wind potential and optimal capacity." *SN Applied Sciences* 1.12 (2019): 1-7.
- [7] Wikipedia, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Vent> , consulté le 17/06/2021.
- [8] Ould Makhlof Yasmine,Zelouf Samah, Évaluation et caractérisation du potentiel éolien de la région De M'sila,(Master), Universite Mohamed Boudiaf - M'sila Algérie,2020.
- [9] Gokcek M, Bayulken A, Bekdemir S, « Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kirklareli, Turkey ». *Renew. Energy*; 32, 1739–52. 2007.
- [10] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directlycoupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [11] L. Söderlund, JT. Erikson, J. Salonen, H. Vihriälä ans R. Perälä, « A permanent-magnet generator for wind power applications », *IEEE transaction on magnetics*, vol 32, N° 4, july 1996.
- [12] Technique de l'ingénieur D 3 960.
- [13] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [14] R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin, « Strong winds on the horizon:
- [15] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen, « Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines », Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, december 2001.

REFERENCES

- [16], Khelfat Lotfi, Maataoui Lakhdar, (Master), Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, Université Badji Mokhtar- Annaba Algérie, 2017.
- [17] REDJEM. R, " Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne ", Département d'Electrotechnique Université de Constantine 2009.
- [18] Solari G., « Wind Speeds Statistics », Collège on atmospheric Boundary Layer and Air Pollution. ICTP, Trieste, Italie 1994.
- [19] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, « Axial flux, modular, permanent magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications », IEEE industry applications conference, St Louis, November 5-8, 1998.
- [20] SEI Aïmani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL). 2002.

REFERENCES

CHAPITRE II

[1] docplayer ,<https://docplayer.fr/205182762-Memoire-de-fin-d-etude-en-vue-de-obtention-du-diplome-de-master-en-physique-energetique-et-energie-renouvelable.html?fbclid=IwAR2sQ6OamUav9z3EAIKm-wurUD0Dv-NLLYu6hbKgalPueLtEeI5IdM5zW-4> .

[2] Randria Félix , conception et réalisation d'un aérogénérateur a axe vertical ;(diplôme d'études approfondies) ,université d'Antananarivo, 06 janvier 2015.

[3]drømstørre ,<http://drømstørre.dk/wpcontent/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/wres/weibull.htm>.

[4] Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L. (2002), Wind energy explained : theory, design and application. Chichester ; New York : Wiley.

[5] Burton, T. (2001), Wind energy handbook. Chichester ; New York : John Wiley and Sons.

[6]C. N. EBEY, " Etude d'une éolienne lente pour l'entraînement d'une pompe à piston simple effet ", Université Kinshasa, 2005.

[7] Ould Makhlof Yasmine,Zelouf Samah, Évaluation et caractérisation du potentiel éolien de la région De M'sila,(Master), Université Mohamed Boudiaf - M'sila Algerie,2020.

[8]Jean-louis , réniveau analyse de données expérimentales et conception d'un générateur numérique de vitesses de vent ;(l'obtention du grade de maître es sciences appliquées), l'université du québec à rimouski ;janvier 2006.

[9] <https://wind-data.ch/tools/weibull.php?lng=fr>le 21/02/2020.

[10] B. Yousef, G. Aymeric Collecte, organisation, traitement, analyse de mesures éoliques et modélisation énergétique. Thèse doctorat;Université Tecnica Federico Santa Maria, UTFSM, Valparaso , Chili;2005

[11] GENIVAR. analyse des vents et des surcotes de tempêtes. projet de réhabilitation du brise-lames à l'entrée du port de mer de la compagnie minière Québec cartier Société en commandite ; 2007.

REFERENCES

[12] G. Solari, « Wind Speeds Statistics », Collège on atmospheric Boundary Layer and Air Pollution. ICTP, Trieste, Italie 1994.

[13] E. G. Pavia, J. J. O'Brien, "Weibull statistics of wind speed over the ocean," *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 25, pp. 1324-1332, 1986.

[14] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Yalcin, "Nationwide assessment of potential output from wind-powered generators," *Journal of Applied Meteorology*, n°15, pp. 673-678, 1976.

[15] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Mikhail, D. Graber, "Methods for estimating wind speed frequency distribution," *Journal of Applied Meteorology*, n°17, pp. 350-353, 1978.

[16] I. Troen et E. L. Petersen, *European Wind Atlas*. Laursen Toender ed., Danemark, 1989, ISBN 87-550-1482-8, pp. 656.

[17] G. Faure et A. Bourdeau, « Rapport de projet, comparaison de modèles d'estimation éolienne sur le Liban en vue de leur intervalidation sur ce territoire » Institut National des Sciences Appliquées Département de génie Mathématique et Modélisation 2009.

REFERENCES

CHPITRE III

[1] J. Coulombe, 'Évaluation de la modélisation et des prévisions de la vitesse du vent menant à l'estimation de la production d'énergie annuelle d'une turbine' Mémoire Maître ès sciences (M.Sc.) en statistique, Université de Montréal, avril 2015.

[2] S. Khelfa, M. Achoui, 'Evaluation du gisement éolien dans deux régions de l'est de l'Algérie : Jijel et Tébessa', Mémoire de fin d'étude, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2016, 2017.

[3] A. M. SYLLA, 'Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation', Mémoire de maîtrise de l'université du Québec à Trois-Rivières, 2013.

[4] mcours, http://www.mcours.net/cours/pdf/info/MATLAB_LOGICIEL_DE_CALCUL_SCIENTIFIQUE_ET_LANGAGE_DE_PROGRAMMATION.pdf, consulté le 17/06/2021

[5] ZERGANE, Saïd, SMAILI, Arezki, et MASSON, Christian. Optimization of wind turbine placement in a wind farm using a new pseudo-random number generation method. *Renewable Energy*, 2018, vol. 125, p. 166-171.

Résumé

Ce travail de recherche a pour but de présenter une étude de choix de densité de probabilité dans le calcul de la fréquence de la vitesse du vent . Le vent comme phénomène chaotique peut être mesuré sur une période conventionnelle de 10 ans, il est variable annuellement, mensuellement et journalière. Pour faire une installation d'une parc éolienne ou une station éolienne sur un site ;il faut faire des calcules avec les lois de distribution de rayleigh et weibull et weibull hybride sur la distribution de la vitesse . Ces méthodes consistent à introduite les données de la vitesse du vent et la probabilités dans un programme sous Matlab. Les résultats obtenus de cette méthode sont comparés avec mesurés.

Abstract

The purpose of this research work is to present a study of the choice of probability density in the calculation of the frequency of the wind speed. The wind as a chaotic phenomenon can be measured over a conventional period of 10 years, it is variable annually, monthly and daily. To install a wind farm or a wind station on a site; it is necessary to make calculations with the distribution laws of Rayleigh and Weibull and hybrid Weibull on the speed distribution. These methods consist in entering the data of the wind speed and the probabilities in a program under Matlab. The results obtained from this method are compared with measured.

الملخص :

الغرض من هذا العمل البحثي هو تقديم دراسة لاختيار كثافة الاحتمال في حساب تردد سرعة الرياح . يمكن قياس الرياح كظاهرة فوضوية على مدى فترة تقليدية مدتها 10 سنوات ، فهي متغيرة سنوياً وشهرياً ويومياً . لنتثبيت مزرعة رياح أو محطة رياح في الموقع ؛ من الضروري إجراء حسابات بقوانين التوزيع الخاصة بـ Rayleigh و weibull و hybride على توزيع السرعة . تتكون هذه الطرق في إدخال بيانات سرعة الرياح والاحتمالات في برنامج تحت Matlab . يتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من هذه الطريقة مع المقاسة