

# Université Assane Seck de Ziguinchor



**UFR Sciences et Technologies  
Département de Physique**

## **Mémoire de Master**

**MENTION : Physique et Applications  
SPECIALITE : Sciences de l'atmosphère et de l'océan**

redigé par :

**Makhmouth GUEYE**

sous la direction de :

**Prof. Moctar CAMARA**

---

# **Evaluation du potentiel d'énergie éolienne à Diembéring en Basse Casamance**

---

soutenu publiquement le 12 Avril 2024 devant le jury composé de :

<b>Prénom et Nom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>	<b>Etablissement</b>
M. Bamol Ali SOW	Maitre de Conférences	Président	UASZ
M. Moustapha THIAME	Maitre de Conférences	Rapporteur	UASZ
M. Joseph S. DIATTA	Maitre de Conférences	Examineur	UASZ
M. Moctar CAMARA	Professeur titulaire	Directeur de mémoire	UASZ

# DEDICACES

Je tiens à dédier ce mémoire à mes chers parents, qui, bien que physiquement absents aujourd'hui, ont toujours été présents dans chaque étape de ma vie, y compris celle-ci.

Leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs valeurs m'ont guidé tout au long de ce parcours académique. Ils ont été mes premiers enseignants, m'insufflant le désir de connaissances et d'excellence. Malgré leur absence physique, leur héritage intellectuel et émotionnel continue de me guider.

Chaque page de ce mémoire porte l'empreinte de leurs encouragements silencieux et de leur fierté éternelle. Leur influence continue de sculpter ma compréhension du monde et de stimuler ma quête de savoir.

Je suis profondément reconnaissant envers eux pour les sacrifices consentis, les leçons enseignées et les valeurs inculquées. Bien que le chemin sans eux soit souvent difficile, je suis convaincu que leur héritage perdurera dans mes réussites futures.

À **El Hadj Hamidou GUEYE** et **Mame Yacine NIANG**, dont la mémoire est une source inépuisable d'inspiration, de force et d'amour. Ce travail leur est dédié.

Que leur âme repose en paix. Amine.

# REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, le Professeur Moctar CAMARA, pour son soutien inestimable, ses conseils éclairés et son engagement constant tout au long de ce travail. Sa guidance a été cruciale pour la réalisation de ce mémoire et son expertise a été une source d'inspiration pour moi.

Je souhaite également remercier les membres du jury avec à sa tête M. Bamol Ali SOW, à M. Joseph Sambassène DIATTA et à M. Moustapha THIAME, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail : leur temps, leurs précieux commentaires et leur expertise ont enrichi ce mémoire et contribué à son excellence.

À tous les chercheurs du Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC), en particulier, M. Hamady Ngansou Sabaly et M. Birane Ndom, je suis reconnaissant pour l'atmosphère collaborative et stimulante dans laquelle j'ai pu travailler. Votre soutien logistique, vos discussions enrichissantes et votre esprit d'équipe ont grandement facilité cette aventure académique.

À ma famille, mes frères et sœurs, je suis profondément reconnaissant pour leur soutien indéfectible et leur compréhension tout au long de cette période intense. Leur soutien inconditionnel a été ma source de force et de motivation.

Un merci tout particulier à ma très chère Aissatou DIOUF, à tous mes amis ainsi qu'à tous mes camarades de promotion qui ont partagé cette aventure avec moi. Vos encouragements, vos discussions et vos moments de détente ont été essentiels pour maintenir mon équilibre et ma motivation tout au long de ce parcours.

Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, je vous adresse ma plus profonde reconnaissance. Vos efforts et votre soutien ont été d'une importance capitale pour l'achèvement de ce travail.

Merci à chacun d'entre vous pour avoir fait de cette expérience une étape enrichissante et inoubliable de ma vie académique.

# Table des matières

Dédicaces . . . . .	i
Remerciements . . . . .	ii
Table des matières . . . . .	iv
Table des figures . . . . .	v
Liste des tableaux . . . . .	vi
Liste des acronymes et des symboles . . . . .	vii
Résumé/Abstract . . . . .	viii
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>1 GENERALITES SUR LE VENT, SUR L'ATMOSPHERE ET SUR LE CLIMAT OUEST AFRICAIN</b>	<b>3</b>
1.1 Le vent : son origine et sa variation . . . . .	3
1.1.1 L'origine du vent . . . . .	3
1.1.2 L'influence mécanique . . . . .	4
1.1.3 La fluctuation temporelle du vent . . . . .	5
1.2 Description de l'atmosphère . . . . .	7
1.2.1 Les différentes couches atmosphériques . . . . .	7
1.2.2 La couche limite atmosphérique (CLA) . . . . .	8
1.2.3 La stabilité de la couche limite atmosphérique . . . . .	10
1.3 Les caractéristiques du climat ouest africain . . . . .	10
1.3.1 La mousson ouest africaine . . . . .	10
1.3.2 Le Jet d'Est Africain (JEA) . . . . .	12
1.3.3 Le Jet d'Est Tropical (JET) . . . . .	12
1.3.4 La zone de convergence intertropicale (ZCIT) . . . . .	13
1.3.5 Les systèmes convectifs . . . . .	13
1.3.6 Les lignes de grains . . . . .	14
<b>2 DONNEES ET METHODES</b>	<b>15</b>
2.1 Présentation du site . . . . .	15
2.2 Description des données exploitées . . . . .	16
2.3 Outils utilisés pour le traitement de données . . . . .	17
2.3.1 WAsP . . . . .	17

2.3.2	Matlab ( <a href="http://www.mathworks.com/">http://www.mathworks.com/</a> ) . . . . .	18
2.4	Méthode d'étude et de modélisation du potentiel éolien . . . . .	19
2.4.1	Caractéristiques moyennes des vents . . . . .	19
2.4.2	Caractéristiques statistiques du vent . . . . .	20
<b>3</b>	<b>RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>	<b>22</b>
3.1	Caractéristiques moyennes du vent sur le site . . . . .	22
3.1.1	Variabilités intra-annuelle et inter-annuelle . . . . .	22
3.1.2	Vitesses moyennes saisonnières du vent . . . . .	25
3.1.3	Variabilité diurne de la vitesse moyenne du vent . . . . .	27
3.2	Caractéristiques statistiques du vent sur le site . . . . .	28
3.2.1	Variabilité inter-annuelle . . . . .	28
3.2.2	Variabilité intra-saisonnière . . . . .	30
	<b>CONCLUSION</b>	<b>34</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>39</b>

# Table des figures

1.1	<b>Influence mécanique du relief [1]</b> . . . . .	5
1.2	<b>Les brises en montagne [2]</b> . . . . .	6
1.3	<b>Les brises de mer et de terre [2]</b> . . . . .	7
1.4	<b>Différentes couches de l’atmosphère terrestre [3]</b> . . . . .	8
1.5	<b>Couche limite atmosphérique [4]</b> . . . . .	9
1.6	<b>Vents de basses couches (à 925 hPa, vecteurs, échelle en m/s indiquée en bas), pression réduite au niveau de la mer (contours, hPa moins 1000) et rayonnement de grande longueur d’onde sortant mesuré au sommet de l’atmosphère (couleurs, W/m<sup>2</sup>) en moyenne d’été (juillet-septembre). (La Météorologie-Spécial AMMA-octobre2012)</b> . . . . .	12
1.7	<b>Représentation schématique d’une ligne de grains [5]</b> . . . . .	14
2.1	<b>Zone d’étude [6]</b> . . . . .	15
2.2	<b>Station météorologique de Diembering (Source : LOSEC)</b> . . . . .	16
2.3	<b>Accueil de l’application OWC Wizard de WAsP</b> . . . . .	18
2.4	<b>Interface principale de Matlab</b> . . . . .	18
3.1	<b>Cycle annuel de la vitesse moyenne mensuelle.</b> . . . . .	23
3.2	<b>Variabilité inter-annuelle de la vitesse moyenne du vent de 2016 à 2020</b> . . . . .	24
3.3	<b>Histogramme des vitesses moyennes saisonnière</b> . . . . .	26
3.4	<b>Variation diurne de la vitesse moyenne annuelle du vent.</b> . . . . .	27
3.5	<b>Rose des vents inter-annuelle.</b> . . . . .	28
3.6	<b>Variabilité inter-annuelle des fréquences de la vitesse moyenne du vent.</b> . . . . .	29
3.7	<b>Rose des vents saisonniers.</b> . . . . .	30
3.8	<b>Distribution saisonnière des fréquences de la vitesse moyenne du vent.</b> . . . . .	31
3.9	<b>Evolution intra-annuelle de la densité de puissance.</b> . . . . .	33

# Liste des tableaux

1.1	<b>Classification des types des terrains selon la longueur et la classe de rugosité [7].</b>	4
2.1	<b>Nombre d'échantillon et taux de couverture selon les années.</b>	17
3.1	<b>Vitesses moyennes et écarts types mensuelles sur les cinq années.</b>	25
3.2	<b>Vitesses moyennes et écarts types saisonnières moyennées sur 5 ans (2016-2020).</b>	26
3.3	<b>Récapitulatif des paramètres de Weibull et de la densité de puissance annuelles.</b>	30
3.4	<b>Récapitulatif des paramètres de Weibull et de la densité de puissance saisonnières.</b>	32

# LISTE DES ACRONYMES ET DES SYMBOLES

<b>AMMA</b>	Analyse Multi-disciplinaire de la Mousson Africaine
<b>ANACIM</b>	Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie
<b>CLA</b>	Couche Limite Atmosphérique
<b>CLS</b>	Couche Limite de Surface
<b>FIT</b>	Front InterTropical
<b>JEA</b>	Jet Est Africain
<b>JET</b>	Jet Est Tropical
<b>LOSEC</b>	Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat
<b>UASZ</b>	Université Assane Seck de Ziguinchor
<b>ZCIT</b>	Zone de Convergence Inter Tropicale
$\bar{P}$	densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )
$\rho$	masse volumique de l'air (kg/m <sup>3</sup> )
<b>V</b>	vitesse du vent (m/s)
<b>k</b>	paramètre de forme (sans unité)
<b>A</b>	paramètre d'échelle (m/s)
<b>f(v)</b>	fonction de densité de probabilité de Weibull
<b>F(v)</b>	fonction de distribution cumulée
$\sigma(V)$	écart-type des variations des vitesses (m/s)
<b>Z<sub>0</sub></b>	longueur de rugosité (m)



# Résumé / Abstract

## Résumé

Ce présent travail a pour but d'étudier et d'évaluer le potentiel éolien de Diembéring, situé dans la Basse-Casamance, au Sénégal. Dans cette étude, les caractéristiques du vent sont analysées grâce aux logiciels WAsP et Matlab en utilisant les données horaires de la vitesse et de la direction du vent recueillies sur une période de couverture de cinq (5) ans (2016-2020). Ces données proviennent de la station météorologique implantée par le laboratoire d'océanographie, des sciences de l'environnement et du climat (LOSEC) à Diembéring.

Les résultats obtenus ont permis de déterminer les périodes les plus ventées dans ce site. Ainsi, on montre que l'année 2020 et la période AMJ (Avril-Mai-Juin) sont les plus favorables pour l'exploitation de l'énergie éolienne avec respectivement des vitesses moyennes de 5,53 m/s et de 6,16 m/s. On note aussi des variations diurnes manifestes, avec des vitesses moyennes du vent plus élevées pendant la journée par rapport à la nuit.

Les paramètres de Weibull, calculés sur une période de cinq (5) ans pour le site, présentent une moyenne de 6,0 m/s pour le paramètre d'échelle et 2,73 pour le paramètre de forme, ce qui correspond à une densité de puissance moyenne de 137 W/m<sup>2</sup>. Aussi une densité de puissance plus importante pendant la saison des pluies (147 W/m<sup>2</sup>) que la saison sèche (132 W/m<sup>2</sup>).

L'étude montre aussi que les vents dominants sont orientés dans les directions Nord et Nord-Ouest.

**Mots-clés :** Potentiel éolien, densité de puissance, distribution de Weibull, Diembéring.

## **Abstract**

This present work aims to study and assess the wind potential of Diembering, located in Basse-Casamance, Senegal. In this study, wind characteristics are analyzed using WAsP and Matlab software using hourly wind speed and direction data collected over a five (5) year coverage period (2016-2020). These data come from the meteorological station installed by the LOSEC laboratory in Diembering.

The results obtained allowed to determine the windiest periods in this site. Thus, we show that the year 2020 and the AMJ period (April-May-June) are the most favorable for the exploitation of wind energy with average speeds of 5.53 m/s and 6.16 m/s. We also note manifest diurnal variations, with higher average wind speeds during the day compared to night.

Weibull parameters, calculated over a five (5) year period for the site, have an average of 6.0 m/s for the scale parameter and 2.73 for the shape parameter, corresponding to an average power density of 137 W/m<sup>2</sup>. Also higher power density during the rainy season (147 W/m<sup>2</sup>) than the dry season (132 W/m<sup>2</sup>).

The study also shows that the prevailing winds are oriented in the North and Northwest directions.

**Keywords :** Wind potential, power density, Weibull distribution, Diembering.

# INTRODUCTION

La demande mondiale d'énergie a tendance à augmenter en raison de la croissance démographique, de l'urbanisation rapide, du développement économique et de l'élévation du niveau de vie dans de nombreuses régions du monde. Les énergies fossiles, telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, ont été les principales sources d'énergie pendant une grande partie de l'histoire industrielle. En 2022, celles-ci ont compté pour près de 82% de la consommation d'énergie [8]. Cependant, elles présentent plusieurs inconvénients significatifs tels que la libération d'importantes quantités de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère, contribuant ainsi au changement climatique et au réchauffement de la planète, la production également des polluants atmosphériques et des particules fines, qui peuvent avoir des effets nocifs sur la qualité de l'air et la santé humaine. Les énergies fossiles sont également des ressources non renouvelables qui peuvent s'épuiser avec le temps. En raison de ces inconvénients, de nombreux pays et entreprises cherchent à diversifier leur mix énergétique en faveur de sources d'énergie plus propres et renouvelables afin de réduire les impacts environnementaux négatifs associés aux énergies fossiles. Au cours de la dernière décennie, l'énergie éolienne est la source d'énergie qui s'est développée le plus rapidement [9]. Cette forme d'énergie émerge comme une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques croissants tout en réduisant les inconvénients qu'engendrent les énergies fossiles. Le Sénégal a l'intention de réduire conditionnellement ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'au moins 23% d'ici 2030. Les contributions déterminées par le pays au niveau national (CDN) au titre de l'Accord de Paris définissent des objectifs principaux relatifs à la transition énergétique et parmi ces derniers : faire passer la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique national à 40% d'ici 2035 en augmentant la capacité d'énergie renouvelable [10]. Ce qui conduit à un investissement du plus grand parc éolien d'Afrique de l'Ouest, le Parc éolien Taiba N'Diaye (PETN), qui est devenu opérationnel en 2020.

L'énergie éolienne dépend du vent, donc des conditions météorologiques, ce qui peut entraîner une production d'électricité intermittente. Les périodes de vents faibles ou excessivement forts peuvent réduire l'efficacité des éoliennes. Ce caractère de dépendance de l'énergie éolienne suscite de nombreux travaux de chercheurs à travers le monde pour une modélisation et évaluation du potentiel éolien et notamment une optimisation des systèmes éoliens. Parmi ces travaux on peut citer (Youm et al., 2005)[11], (Bilal et al., 2011)[12] et (Akinsanola et al., 2017)[13].

Dans cette perspective, l'étude du potentiel éolien revêt une importance particulière, offrant la possibilité d'exploiter une source d'énergie propre et renouvelable. Notre attention se tourne

vers Diembéring, une localité située dans la Basse Casamance au Sénégal. Cette région, caractérisée par ses vastes étendus de terres et son riche patrimoine naturel, représente un cadre propice à l'exploration du potentiel éolien en vue de contribuer à la diversification du bouquet énergétique sénégalais.

Ce mémoire vise à évaluer le potentiel éolien de Diembéring aux échelles intra et inter-annuelles. Ainsi nous avons caractérisé la moyenne et l'écart type du vent, les paramètres de Weibull ( $k$  et  $A$ ) et la densité de puissance disponible à différentes échelles temporelles.

Le document s'articule autour de trois (3) chapitres. Le premier chapitre porte sur les généralités sur le vent, l'atmosphère et le climat ouest africain. Le second chapitre est consacré à la description des données utilisées et de la méthodologie adoptée. Enfin, le troisième chapitre est réservé à l'analyse des résultats obtenus.

# Chapitre 1

## GENERALITES SUR LE VENT, SUR L'ATMOSPHERE ET SUR LE CLIMAT OUEST AFRICAIN

Dans ce chapitre nous abordons d'abord l'aspect théorique sur le phénomène du vent ainsi que les éléments qui le régissent, ensuite nous décrivons l'atmosphère notamment la couche limite atmosphérique et enfin nous établissons une généralité sur le climat ouest africain.

### 1.1 Le vent : son origine et sa variation

#### 1.1.1 L'origine du vent

Tout comme la majorité des énergies renouvelables, le vent doit son énergie au soleil. En effet le vent, étant le mouvement des masses d'air, résulte du réchauffement inégal de la Terre par le soleil. Ces mouvements de masse d'air sont provoqués par deux phénomènes se produisant simultanément : un réchauffement inégalement réparti à la surface de la planète par l'énergie solaire et la rotation de la planète [14]. Le déplacement des masses d'air, donc du vent se fait à l'équilibre de plusieurs forces majeures :

- **La force gravitationnelle :**

elle est liée à la masse de l'air et est dirigée de manière perpendiculaire à la surface de la terre. Elle est en général largement compensée par les forces des gradients de pression qui elles se dirigent vers le haut.

- **La force de pressions :**

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

- **La force de Coriolis :**

cette force est liée à la rotation de la terre sur son axe. Elle est perpendiculaire à la vitesse du

vent et orientée vers l'Est dans l'hémisphère Nord. Elle n'est significative que pour les déplacements atmosphériques de haute altitude en raison de la faiblesse relative des autres forces en présence.

• **La force de frottement :**

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

### 1.1.2 L'influence mécanique

Dans la couche limite, le vent est très fortement influencé mécaniquement par les aspérités du sol (rugosité) qui a tendance à décélérer la vitesse du vent voire même l'annuler mais aussi par le relief, de la topologie du terrain comme dans le cas d'une haute chaîne de montagne.

• **La rugosité du sol :**

la longueur de la rugosité est la hauteur au-dessus du sol, à partir de laquelle la vitesse moyenne du vent est non nulle. Elle dépend, pour chaque direction, de l'homogénéité du terrain, du type d'obstacles et de la distance sur laquelle ces deux conditions s'appliquent [15]. Le calcul exact de la longueur de rugosité étant difficile, le Tableau 1-1 fournit une classification qui peut être utilisée. Une rugosité forte freine considérablement la vitesse du vent, par exemple une forêt ou un paysage urbain freinera beaucoup plus le vent qu'un paysage de plaine.

TABLEAU 1.1 – Classification des types des terrains selon la longueur et la classe de rugosité [7].

Type de terrains	Description	Rugosité $Z_0$ (m)
Plat	Plage, glace, neige et océan.	<0.005
Ouvert	Aéroports, terre vide de récolte, herbe basse.	0.04
Peu rugueux	Herbes hautes et récoltes basses.	0.05
Très rugueux	Forêts et vergers.	0.25
Fermé	Villages et banlieues.	1
Ville	Centres villes, espaces ouverts dans la forêt.	>2

• **Obstacles isolés :**

- **Les montagnes :**

les obstacles au vent, tels que les montagnes, peuvent freiner considérablement la vitesse du vent, tout en provoquant souvent de la turbulence qui est plus forte derrière l'obstacle que devant celui-ci. La figure 1-1 (a) représente le mouvement de l'air le long d'un obstacle orographique. Sur le versant dit « au vent » l'air s'élève en donnant naissance à un courant

ascendant, nommé de pente, qui est souvent utilisé pour le vol à voile. Poursuivant son mouvement, l'air redescend, ensuite le long du versant opposé, dit « sous le vent », il est animé d'une turbulence plus au moins grande formant des courants rabattants et des tourbillons.

#### - Effet goulet :

Entre les grands bâtiments ou dans un couloir étroit, le vent se trouve comprimé sur le côté exposé au vent du bâtiment ou de la montagne, ce qui fait accélérer considérablement sa vitesse, On parle alors d'un « effet goulet » qui est représenté à la figure 1-1 (b).

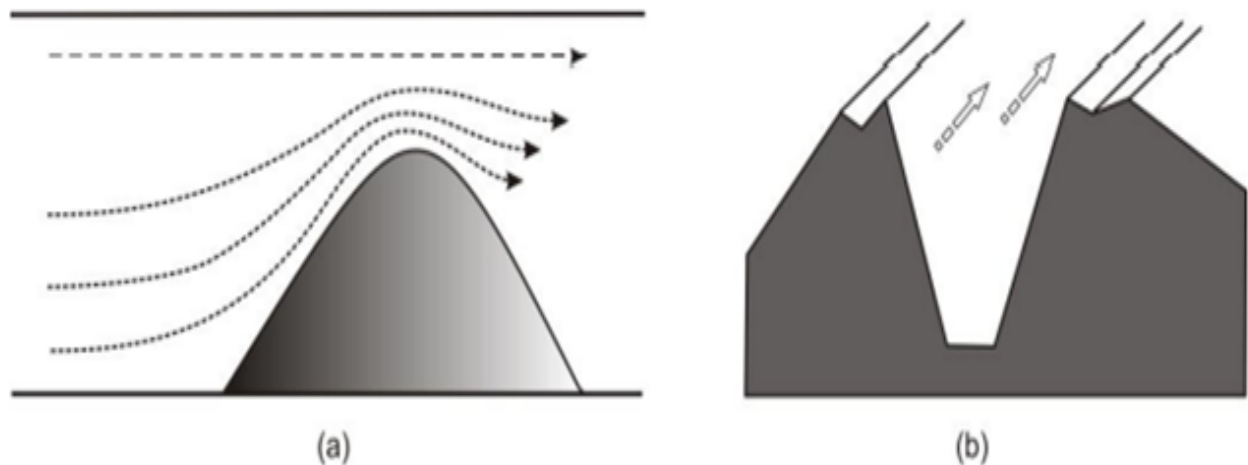


FIGURE 1.1 – Influence mécanique du relief [1]

### 1.1.3 La fluctuation temporelle du vent

#### • Les brises en montagne :

De jour, l'air au contact des pentes ensoleillées s'échauffe plus vite que l'air situé à la même altitude au-dessus de la vallée. L'air chaud s'élève le long de la pente tandis que l'air au-dessus de la vallée s'effondre [4]. De nuit, on assiste aux effets inverses où l'air en contact avec le sol se refroidit et s'écoule le long de la pente.

La figure 1-2 représente les brises en montagnes ; En (a), les pentes d'une vallée sont plus exposées au Soleil et donc plus réchauffées que le fond de la vallée. Cet air chaud (du rouge au bleu) s'élève et crée une zone de basse pression. L'air du fond de la vallée y est donc attiré. Il remonte les pentes : c'est la brise de vallée.

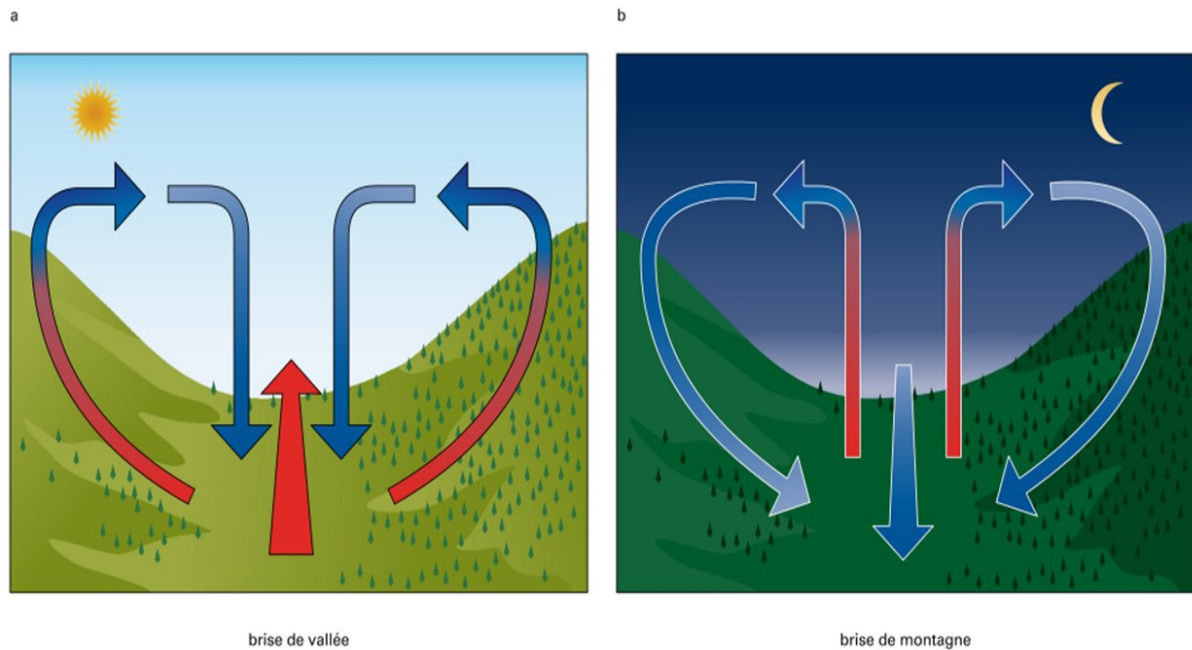


FIGURE 1.2 – Les brises en montagne [2]

En (b), la nuit, l'air des pentes se refroidit plus vite que celui du fond de la vallée. L'air froid (en bleu) redescend dans la vallée, créant souvent de la brume ou du brouillard : c'est la brise de montagne.

• **Les brises de mer et de terre :**

la vitesse de la brise de terre est moins forte que celle de la brise de mer, étant donné que la différence de température entre la terre et la mer est moins importante la nuit.

La figure 1-3 représente les brises de mer et de terre ; En a, le jour, lorsqu'il fait beau, la terre se réchauffe plus vite que l'eau de mer. L'air « terrestre », plus chaud et donc plus léger (en rouge), s'élève en créant une zone de basse pression à la surface du sol. L'air marin y est attiré, générant un vent qui souffle donc de la mer vers la terre : c'est la brise de mer.



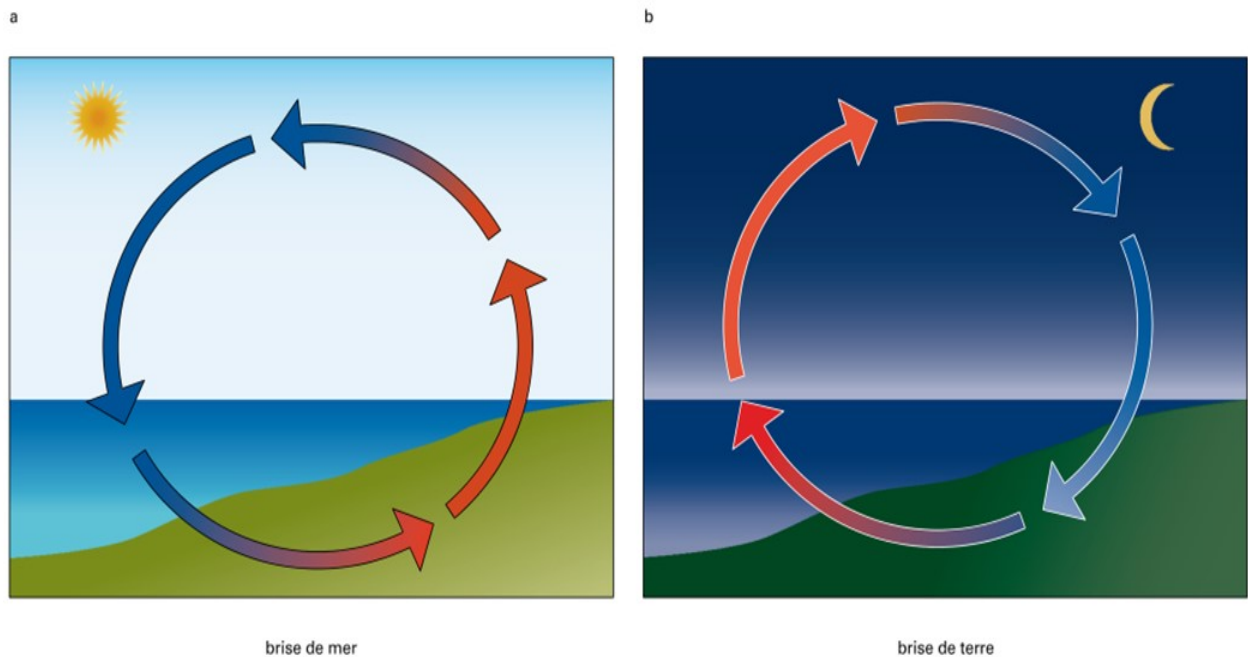


FIGURE 1.3 – Les brises de mer et de terre [2]

En b, la nuit, le phénomène est inversé : la terre se refroidit plus vite que l'eau. L'air terrestre, plus frais (en bleu), est attiré vers la mer où l'air, plus chaud, s'élève : c'est la brise de terre.

## 1.2 Description de l'atmosphère

L'atmosphère est un mélange de gaz et de particules qui entourent le globe. L'atmosphère est constituée de couches qui forment des anneaux autour de la Terre. Elle s'étend sur quelques centaines de kilomètres d'altitude, mais elle est confinée en majeure partie sur une hauteur de 50 kilomètres au-dessus de la surface terrestre [16].

### 1.2.1 Les différentes couches atmosphériques

L'atmosphère est d'une épaisseur qui avoisine 10 000 km et est divisée en 5 couches superposées [17], comme montré sur la figure 1-4.

- **La troposphère :**

c'est la couche la plus proche de la surface de la Terre. Sa température diminue de 6,5°C par km d'altitude. Son épaisseur moyenne est de 13 km.

- **La stratosphère :**

elle représente la couche qui monte jusqu'à une altitude de 50 km, où la température est proche de celle de la surface terrestre. La température augmente progressivement dans la stratosphère car la couche d'ozone absorbe le rayonnement solaire.

- **La mésosphère :**

cette dernière se situe entre 50 et 80 km d'altitude. La température diminue jusqu'à -140°C.

- **La thermosphère :**

elle s'étend entre 80 et 600 km d'altitude. Les molécules d'air deviennent très rares et les températures à l'intérieure sont très élevées (jusqu'à 1200°C).

• **L'exosphère :**

cette couche s'étend jusqu'à 10 000 km d'altitude, là où s'arrête l'atmosphère et où commence l'espace.

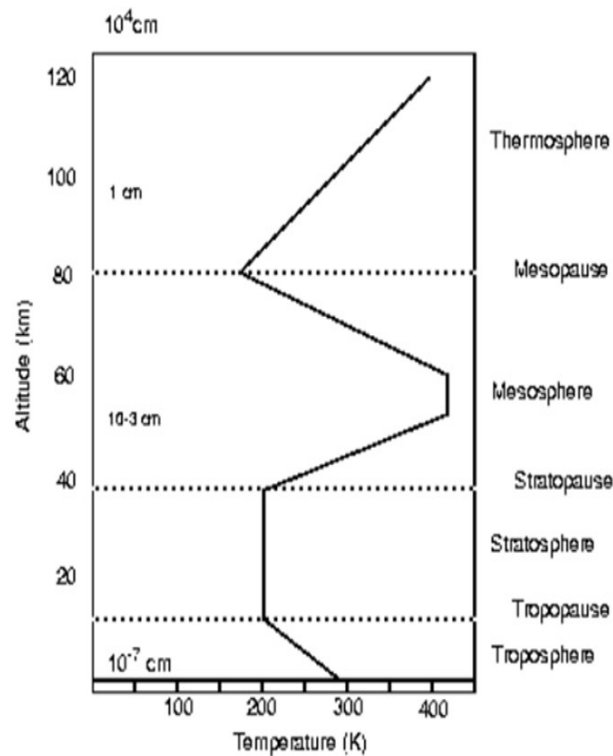


FIGURE 1.4 – Différentes couches de l'atmosphère terrestre [3]

Etant donné que les éoliennes standards d'aujourd'hui dépassent rarement une hauteur de 100m, cette section donne un aperçu sur la couche la plus proche de la terre, dite la Couche Limite Atmosphérique (CLA) en basse troposphère.

### 1.2.2 La couche limite atmosphérique (CLA)

Initiée par Ludwig Prand en 1904 [18], la théorie de la couche limite fut utilisée pour caractériser l'écoulement d'un fluide aux abords d'une paroi. En moyenne, la couche limite atmosphérique est comprise entre la surface terrestre et une hauteur généralement de quelques centaines de mètres à 1500m, parfois jusqu'à 2000m. C'est un lieu d'échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau et de quantité de mouvement. Son épaisseur varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres [1].

Comme montré sur la figure 1-5, cette partie basse de la troposphère se divise en trois grandes parties :

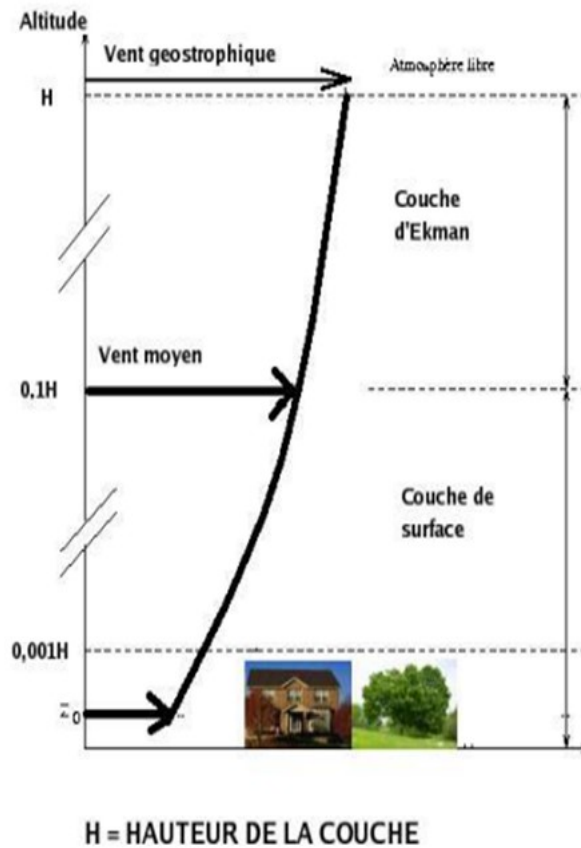


FIGURE 1.5 – Couche limite atmosphérique [4]

- **La couche d'Ekman :**

qui est la partie supérieure de la CLA. Dans cette zone, la structure du champ de vent est influencée par les frottements sur la surface, la stratification thermique et la force de Coriolis.

- **La couche de surface :**

qui est directement en contact avec la surface terrestre dont l'épaisseur varie entre 50 et 100 m. Dans cette couche, la force de Coriolis est négligeable devant les forces de frottements et les effets thermiques.

- **La sous-couche rugueuse :**

qui est la partie inférieure de la couche de surface, juste au-dessus de la surface du sol. Son épaisseur varie de quelques dizaines de millimètres sur une surface de mer plane à quelques dizaines de mètres en ville. Ceci est caractérisé par le paramètre de longueur de rugosité aérodynamique globale.

Par ailleurs, la couche limite atmosphérique CLA est fonction de plusieurs paramètres, tel que la vitesse du vent, la rugosité des sols et l'ensoleillement variable suivant les lieux et l'heure de la journée [1].

### 1.2.3 La stabilité de la couche limite atmosphérique

Dans la couche de surface, les forces de Coriolis sont négligeables devant les forces de frottement. On distingue de la turbulence d'origine mécanique, générée par les obstacles, et de la turbulence d'origine thermique, générée par la distribution verticale de température. Cette variation de la température entraîne une stratification verticale des masses d'air engendrant des mouvements qui influent sur la stabilité de l'atmosphère [18, 1].

Le rapport entre le gradient de température et le gradient adiabatique (taux de décroissance d'une masse d'air s'élevant adiabatiquement) détermine la sensibilité de l'atmosphère à la turbulence d'origine thermique [19, 20] :

- **L'atmosphère est stable**

si la température de l'air décroît moins vite avec l'altitude que le gradient adiabatique. Dans ce cas, les masses d'air qui s'élèvent se refroidissent plus vite que le milieu environnant et ont tendance à redescendre par effet de gravité. Cet état entraîne l'atténuation, voire la disparition de la turbulence.

- **L'atmosphère est instable**

si la température de l'air décroît plus vite avec l'altitude que le gradient adiabatique. Dans ce cas, les masses d'air qui s'élèvent se refroidissent moins vite que le milieu environnant et ont tendance à continuer leur ascension, tandis qu'elles sont remplacées, près du sol par des masses d'air froides issues des couches supérieures. Cet état est source de turbulence.

- **L'atmosphère est neutre**

si le taux de décroissance de la température de l'air avec l'altitude est égal au gradient adiabatique. Cet état ne génère aucune turbulence d'origine thermique. Par extension, on dit que l'atmosphère est neutre dès que la convection thermique est négligeable.

## 1.3 Les caractéristiques du climat ouest africain

L'Afrique de l'Ouest est caractérisée par une succession de deux saisons qui sont étroitement liées à la mousson Ouest africaine : une saison sèche qui s'étend d'Octobre à Mai et une saison hivernale pendant laquelle tombe la quasi-totalité des pluies de la région de Juin à Septembre. Le cycle saisonnier du climat Ouest Africain est modulé par une dynamique complexe de flux et jets dans les basses couches troposphériques, dans les hautes et moyennes couches ainsi que de plusieurs systèmes convectifs [21].

### 1.3.1 La mousson ouest africaine

La mousson ouest-africaine est un phénomène climatique majeur qui se produit chaque année dans la région de l'Afrique de l'Ouest. Elle est caractérisée par des vents saisonniers qui apportent des précipitations abondantes pendant une période spécifique de l'année.

Le gradient horizontal de température est un des mécanismes de base qui pilote la circulation

de mousson [22]. Pendant la saison estivale, les terres à l'intérieur du continent africain se réchauffent plus rapidement que les océans environnants. Cette différence de température crée une zone de basse pression au-dessus des terres, tandis que les océans conservent une pression relativement plus élevée. La différence de pression atmosphérique crée un gradient de pression qui est le moteur principal de la mousson.

La zone de convergence intertropicale (ZCIT), qui est une bande de convergence des vents située près de l'équateur, se déplace vers le nord en été. Elle atteint généralement la région du Sahel, située au sud du Sahara, pendant la saison des pluies. Lorsque la ZCIT atteint cette région, elle amène avec elle des vents humides provenant de l'océan Atlantique.

Les vents dominants soufflent du sud-ouest, venant de l'océan Atlantique vers les terres. Ils sont appelés les vents de mousson du sud-ouest. Ces vents chauds et humides transportent l'humidité de l'océan et se dirigent vers les terres, apportant ainsi les précipitations de la mousson.

Dans l'ensemble, le mécanisme de la mousson ouest-africaine repose sur l'interaction complexe entre les différences de température entre les terres et les océans, le déplacement de la zone de convergence intertropicale et les vents de mousson du sud-ouest. Ces facteurs combinés créent un système atmosphérique qui apporte des pluies essentielles à la région, soutenant ainsi l'agriculture et l'écosystème dans toute l'Afrique de l'Ouest.

La figure 1-6 montre pour l'été (juillet-septembre) les zones de plus forte convection (en couleur) caractérisées par un rayonnement infrarouge minimal issu du sommet des nuages les plus froids, c'est-à-dire les plus élevés. On reconnaît le puissant signal de la mousson d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Les contours représentent les valeurs de la pression réduite au niveau de la mer ainsi que le vent à 925 hPa, niveau fréquemment utilisé pour caractériser la mousson africaine. La circulation du système de mousson africain s'organise donc par les anticyclones de Sainte-Hélène et des Açores, situés respectivement sur l'Atlantique tropical sud et nord, l'anticyclone de Libye sur l'Afrique du Nord et la dépression thermique saharienne que l'on voit centrée vers 20° N sur l'Afrique de l'Ouest, soit environ 10° plus au nord que la ZCIT [23].

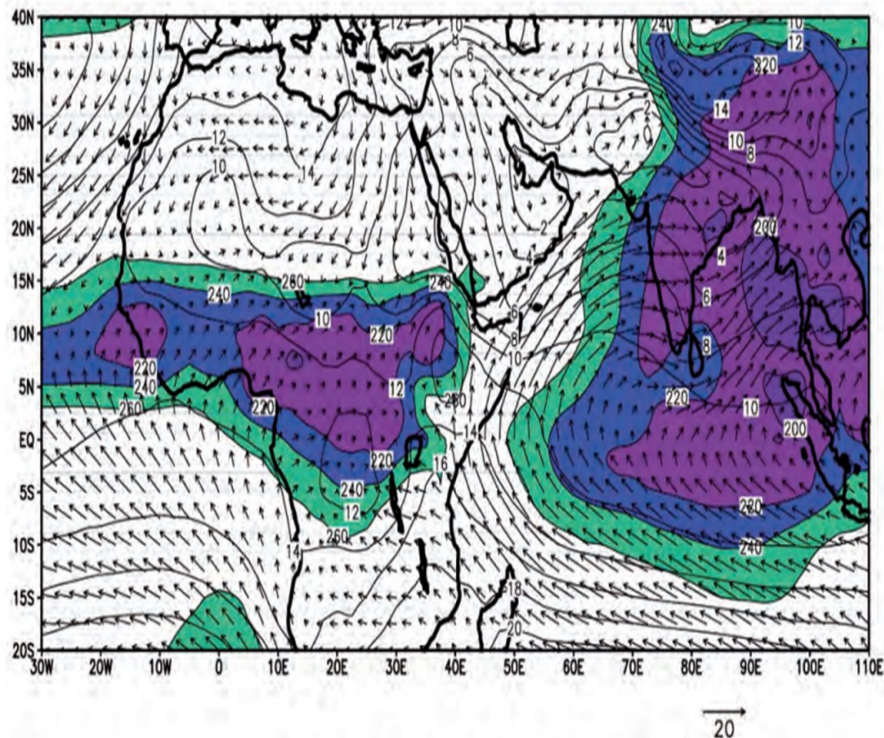


FIGURE 1.6 – Vents de basses couches (à 925 hPa, vecteurs, échelle en m/s indiquée en bas), pression réduite au niveau de la mer (contours, hPa moins 1000) et rayonnement de grande longueur d'onde sortant mesuré au sommet de l'atmosphère (couleurs, W/m<sup>2</sup>) en moyenne d'été (juillet-septembre). (La Météorologie-Spécial AMMA-octobre2012)

### 1.3.2 Le Jet d'Est Africain (JEA)

C'est un courant-jet atmosphérique qui se forme dans la moyenne troposphère (500-700 hPa) pendant l'été boréal et qui est principalement généré par le contraste thermique entre l'air tropical chaud et sec du Sahara et l'air plus frais et humide du golfe de Guinée (l'océan Atlantique). Ce contraste thermique crée une zone de forte instabilité atmosphérique, qui conduit à la formation du courant-jet. Son domaine s'étend du golfe de Guinée à l'est jusqu'au sudan à l'ouest, et du sahel au nord jusqu'à l'océan atlantique au sud avec des intensités maximales de l'ordre de 15 m/s.

Des études plus récentes (Pytharoulis and Thorncroft, 1999 [24]; Hsieh and Cook 2008 [25]) ont montré des relations entre les caractéristiques du JEA, le gradient thermique et hydrique entre le Nord et le Sud, les ondes d'Est et la convection sèche au Nord de la ZCIT et humide au Sud.

### 1.3.3 Le Jet d'Est Tropical (JET)

C'est un courant-jet atmosphérique qui se forme dans la troposphère (100 et 200hPa) à des latitudes subtropicales avec une intensité maximale de l'ordre de 20 m/s pendant l'été boréal et qui s'installe entre les plateaux tibétains et les côtes ouest africaines. Le JET peut être alimenté



par la chaleur latente libérée par les systèmes convectifs associés aux moussons indiennes et ouest africaines [26].

### 1.3.4 La zone de convergence intertropicale (ZCIT)

La ZCIT est une région atmosphérique située près de l'équateur où les alizés du nord et du sud se rencontrent. Cette bande de convection, à orientation presque zonale, dessine l'équateur météorologique. La météorologie en Afrique de l'Ouest est caractérisée par un déplacement de la ZCIT entre 5° et 18° de latitude Nord qui est ondulation méridienne significative.

La position de la ZCIT varie au cours de l'année favorisée par l'ensoleillement en suivant le mouvement zénithal du soleil dont la position la plus méridionale est atteinte en janvier-février et la plus septentrionale au mois d'aout.

Le lieu des pressions minimales dans la dépression thermique continentale représente une confluence de la mousson d'été, qui, par le développement des vents de sud-est humides issus de l'anticyclone de Sainte-Hélène tournent au sud-ouest en passant l'équateur sous l'effet du changement de sens de la force de Coriolis, et de l'Harmattan (vent nord-est sec venant du Sahara) dans les basses couches et est appelé front intercontinental (FIT).

### 1.3.5 Les systèmes convectifs

Les systèmes convectifs en Afrique de l'ouest peuvent être divisés en 3 grandes parties sur la base de leurs capacités à s'alimenter continuellement en masses d'air instable et humide :

- **Les systèmes unicellulaires (ou isolés) :**

ce sont des nuages constitués d'une cellule unique avec des précipitations au sol limitées. Leur durée de vie est de quelques heures avec une forte signature diurne.

- **L'orage multicellulaire :**

c'est un système qui est composé de plusieurs cellules convectives à différents stades de développement. Pour qu'un orage multicellulaire se forme, on doit être en présence d'une atmosphère marquée par une forte humidité dans les basses couches, un fort cisaillement de vent dans les basses couches et un environnement instable sur le plan thermodynamique.

- **Les systèmes convectifs de méso-échelles :**

ce sont les systèmes convectifs les plus développés. Selon Houze (1977) [27] : « un système convectif de méso-échelle est un système nuageux qui apparaît en association avec des orages produisant une zone continue de précipitations d'extension horizontale de l'ordre de 100 km ou plus dans au moins une direction ».

Ces systèmes regroupent les lignes de grains qui sont responsables de la majeure partie de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'ouest et peuvent aussi se transformer en cyclones sur l'Atlantique Nord.

### 1.3.6 Les lignes de grains

Ce sont des perturbations mobiles propres aux régions tropicales de l'Afrique de l'Ouest et centrales. Elles se déplacent d'Est en Ouest avec une vitesse d'environ 15 m/s. Les lignes de grains évoluent entre deux courants d'Est (Jet d'Est Africain et le Jet d'Est Tropical). Elles sont constituées de cumulus et de cumulo-nimbus orientés Sud-Nord à l'avant et d'une traîne diffuse à l'arrière (figure 1-7).

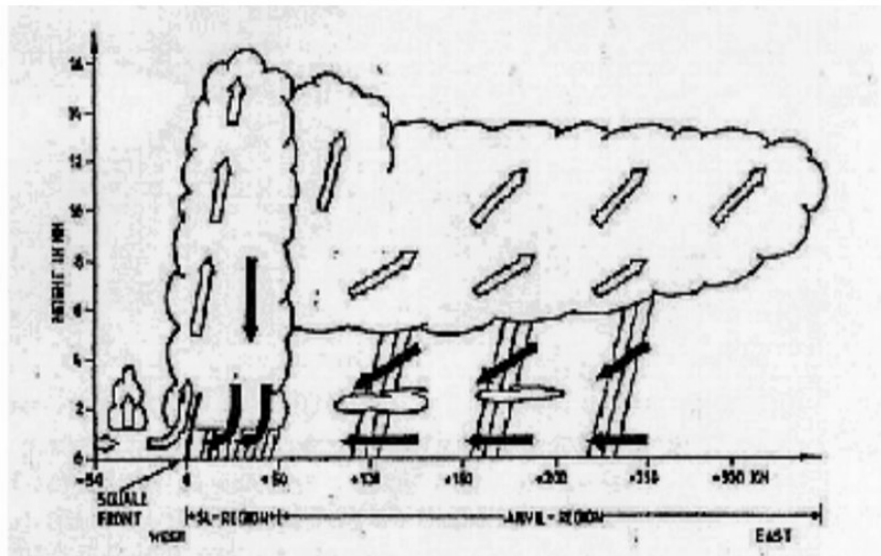


FIGURE 1.7 – Représentation schématique d'une ligne de grains [5]

Les lignes de grains sont importantes en juillet-août quand la mousson est épaisse. C'est donc de la convection avec des formations nuageuses, qui peut avoir pour origine la situation synoptique (JEA et JET) ou des particularités géographiques comme les reliefs (sur la boucle du fleuve Niger, l'Oshogbonhills et le mont Adamaoua). Près de 75% des précipitations sont dues aux lignes de grains dans la zone sahélienne [28, 29, 30] et à peu près la moitié dans la zone soudanienne plus humide [31].



## Chapitre 2

# DONNEES ET METHODES

Dans ce chapitre nous allons faire une présentation de la zone d'étude qui sera suivie d'une description des données exploitées dans cette étude et enfin une présentation de la méthodologie utilisée pour une caractérisation de la modélisation du potentiel éolien.

### 2.1 Présentation du site

Le site étudié, à savoir Diembéring, est situé en Basse Casamance (à environ 10 km au nord de Cap-Skiring et à 60 km de Ziguinchor) et couvre une superficie de 237 km<sup>2</sup> avec des coordonnées géographiques de 12.28°N et 16.46°O [32]. Diembéring est une région marquée par une saison chaude et pluvieuse au cours de laquelle circule la mousson de juillet à octobre et une saison sèche soumise aux alizés continentaux, de novembre à juin. La figure 2-1 montre la localisation géographique du site.

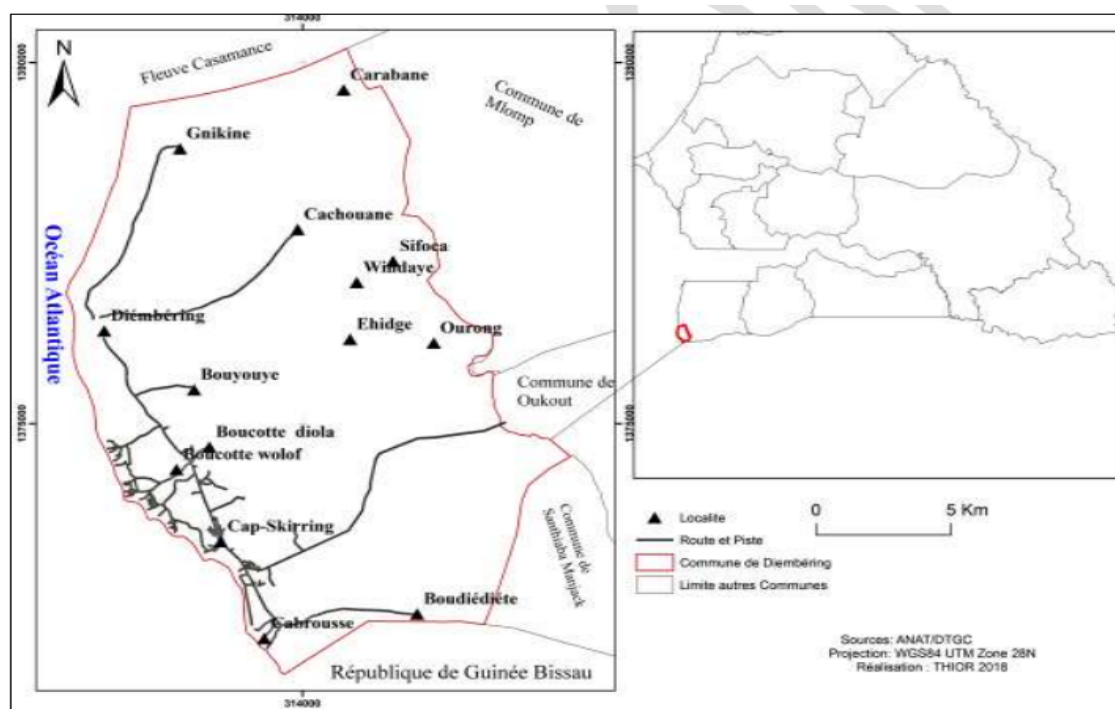


FIGURE 2.1 – Zone d'étude [6]

## 2.2 Description des données exploitées

Les données météorologiques (particulièrement le vent) constituent la matière première de toute œuvre d'analyse de potentiel de tout site. Celles utilisées dans cette étude couvrent une période de cinq (5) ans (2016-2020) et sont collectées au niveau de la station météorologique de Diembéring qui a été installée près de la mairie de la commune par une équipe du LOSEC (figure 2-2).

La figure 2-2 montre la station météorologique de Diembering comprenant entre autre :

- **un anémomètre** : qui est un appareil utilisé pour mesurer la vitesse du vent. Il est constitué de plusieurs pales ou coupelles qui tournent sous l'effet du vent. Plus le vent souffle fort, plus rapidement les pales tournent.
- **une girouette** : qui est un dispositif qui comporte une flèche pointant dans la direction d'où vient le vent.
- **un coffret pour la centrale de mesure** : qui permet d'enregistrer les données collectées par les différents instruments de la station météorologique.

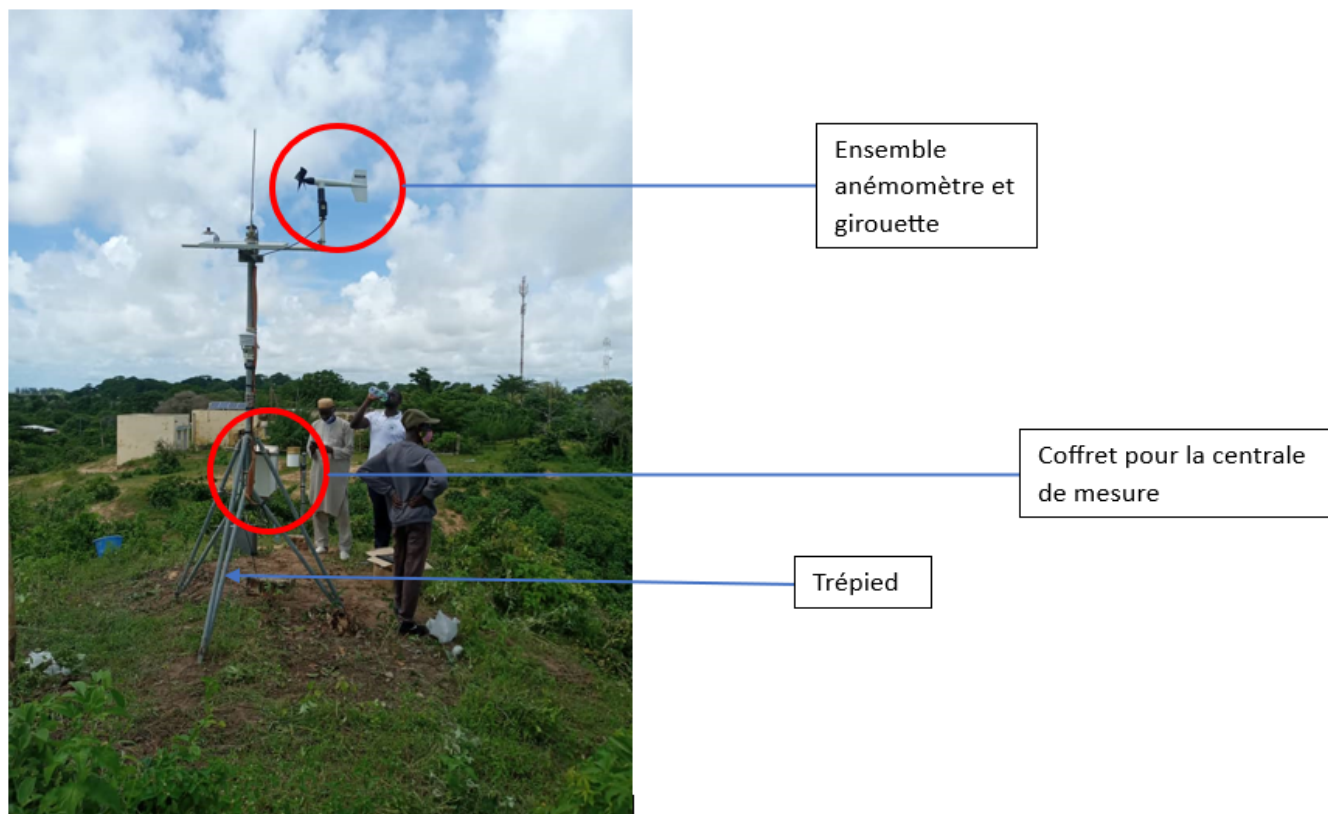


FIGURE 2.2 – Station météorologique de Diembering (Source : LOSEC)

Ces données sont présentées sous forme de tableau, regroupant une série de mesures horaires de direction et de vitesse de vent. Le traitement des données collectées a montré un taux de couverture complet que pendant les années 2016 et 2017 (tableau 2-1).

TABLEAU 2.1 – Nombre d'échantillon et taux de couverture selon les années.

Années	2016	2017	2018	2019	2020	Données globales
Nombre d'échantillon	8784	8760	8741	6785	8197	41267
Taux de couverture (%)	100.0	100.0	99.78	77.45	93.31	94.11

## 2.3 Outils utilisés pour le traitement de données

### 2.3.1 WAsP

Le traitement statistique suivant la distribution de Weibull est effectué à l'aide du module de WAsP, pour le calcul de la vitesse moyenne et la représentation de la rose des vents. En effet, en utilisant l'utilitaire Observed Wind Climate, 'OWC', le module prend en considération les caractéristiques de la station, à savoir la hauteur du mât (10 m), les coordonnées du lieu de mesure (longitude 12.28°, latitude : 16.46°) et les données brutes de vent. Il opère alors un calcul statistique pour estimer la distribution des fréquences des vitesses, la densité de puissance et les paramètres de Weibull  $k$  et  $A$  [33].

WAsP utilise le modèle de Jackson et Hunt (1975) avec la modification de Walmsley et al. (1982) pour la résolution de l'écoulement. La différence principale de WAsP par rapport à MS-Micro est l'utilisation de modèles différents de rugosité et de stabilité de l'atmosphère. Ce modèle a été introduit dans l'industrie éolienne en 1987 par Risø. Au fil des années, WAsP est devenu un des standards de l'industrie en matière d'extrapolation de la ressource éolienne. Ce modèle est présentement utilisé dans plus de 110 pays à travers le monde. WAsP est constitué de cinq blocs principaux [34] :

- L'analyse des données brutes ;
- La génération d'atlas de vent ;
- L'estimation des conditions du vent ;
- L'estimation de la production éolienne ; et
- Le calcul de la production d'une centrale éolienne.

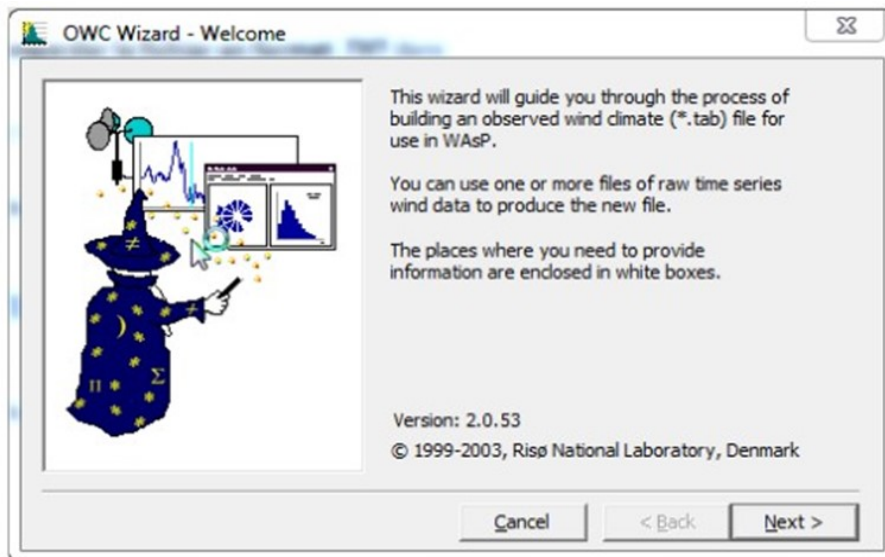


FIGURE 2.3 – Accueil de l'application OWC Wizard de WAsP

D'une manière générale, WAsP donne de bons résultats. Mais comme tous les modèles numériques, la précision de ses résultats dépend à la fois de la résolution des calculs, de la validité des données et des erreurs dans l'approximation des distributions.

### 2.3.2 Matlab (<http://www.mathworks.com/>)

Matlab est un logiciel de calcul numérique commercialisé par la société MathWorks. Il a été initialement développé à la fin des années 70 par Cleve Moler, professeur de mathématique à l'université du Nouveau-Mexique puis à Stanford, pour permettre aux étudiants de travailler à partir d'un outil de programmation de haut niveau et sans apprendre le Fortran ou le C. Matlab

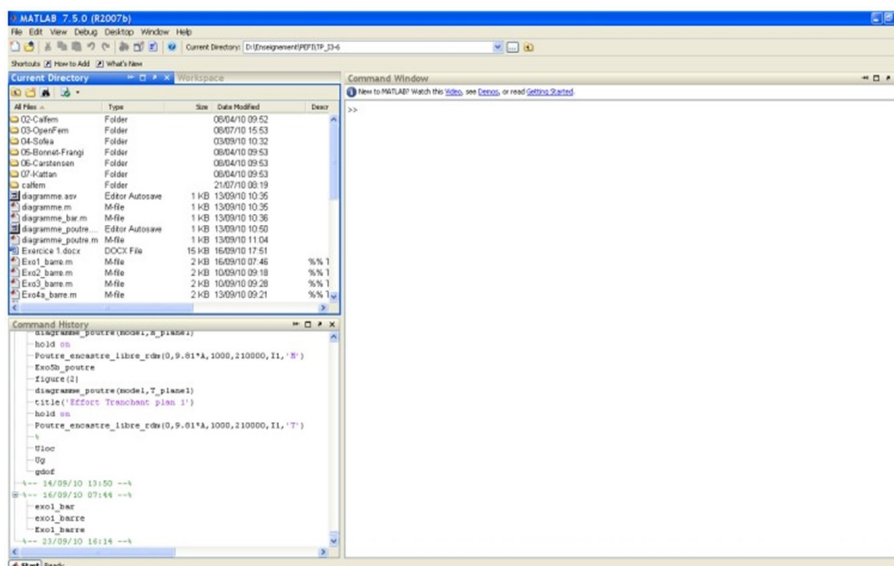


FIGURE 2.4 – Interface principale de Matlab

signifie Matrix laboratory. Il est un langage pour le calcul scientifique, l'analyse de données, leur visualisation, le développement d'algorithmes, etc. Son interface propose, d'une part, une

fenêtre interactive type console pour l'exécution de commandes, et d'autre part, un environnement de développement intégré (IDE) pour la programmation d'applications. Matlab trouve ses applications dans de nombreuses disciplines. Il constitue un outil numérique puissant pour la modélisation de systèmes physiques, la simulation de modèles mathématiques, la conception et la validation (tests en simulation et expérimentation) d'applications. Le logiciel est un outil idéal aussi bien pour l'estimation des conditions du vent que pour le calcul de la production d'une centrale éolienne.

## 2.4 Méthode d'étude et de modélisation du potentiel éolien

L'analyse statistique du vent a été réalisé en étudiant les caractéristiques moyennes et de turbulence des vents sur le site.

### 2.4.1 Caractéristiques moyennes des vents

#### a) Vitesse moyenne du vent

La connaissance de la vitesse moyenne est nécessaire pour l'évaluation du potentiel éolien. Il s'agit de calculer la moyenne temporelle aussi bien dans la journée que d'une saison à l'autre. La moyenne est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_i^n V_i \quad (2.1)$$

#### b) L'écart-type

L'écart-type des variations des vitesses, noté  $\sigma(V)$ , caractérise la variation la turbulence globale du vent horizontal sur toute la gamme de fréquence (tout le spectre). Il est donné par :

$$\sigma(V) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (V_i - \bar{V})^2} \quad (2.2)$$

## 2.4.2 Caractéristiques statistiques du vent

### a) La rose des vents

La roses des vents est construite pour avoir une idée de la distribution des vitesses et des directions du vent. Elle est formée à partir des observations météorologiques faites dans une région sur une ou plusieurs années. Elle peut être composée de plusieurs secteurs, comme huit, douze ou bien seize secteurs [35]. Si une grande partie de l'énergie contenue dans le vent provient d'une direction particulière, il faut chercher à avoir peu d'obstacles et un terrain aussi peu perturbé que possible dans cette direction [36].

### b) Distribution de Weibull et densité de puissance du vent disponible

#### • La distribution de Weibull :

Les vitesses du vent mesurées sur un site donné peuvent être classifiées suivant le nombre de fois où le vent souffle à une vitesse donnée, permettant de définir les fréquences des vitesses [37]. Ces dernières peuvent être approchées par une fonction de densité de probabilité des vitesses, à savoir par la fonction de distribution de Weibull. La fonction de densité de probabilité Weibull et la distribution cumulative sont données par les équations suivantes [38] :

$$f(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \quad (2.3)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \quad (2.4)$$

$$k = \left[ \left( \frac{\sum v_i^k \cdot \ln(v_i)}{\sum v_i} \right) \right] - \left[ \left( \frac{\sum \ln(v_i)}{n} \right)^{-1} \right] \quad (2.5)$$

$$A = \left( \frac{\sum v_i^k}{n} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.6)$$

$f(v)$  est la fréquence d'occurrence de la vitesse du vent,  $k$  et  $A$  sont les paramètres de Weibull :

k est le facteur de forme représentatif de la dissymétrie de la fonction, et A (m/s) le paramètre d'échelle représentatif de la valeur pour laquelle la fonction admet un maximum. Cette distribution a été utilisée tout d'abord, pour le calcul des contraintes exercées par le vent par Davenport en 1963. C'est en 1974 que Justus a introduit une distribution à deux paramètres pour l'étude de l'énergie éolienne.

• **La densité de puissance :**

L'élévation de la puissance du vent par unité de surface (densité de puissance du vent) est d'une importance fondamentale dans l'évaluation des projets d'énergie éolienne. La distribution de la vitesse du vent à long terme  $f(v)$  est combinée avec la puissance disponible du vent pour donner la densité de puissance moyenne, qui peut être exprimée comme suit [38] :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \int_0^{\infty} v^3 \cdot f(v) \cdot dv \quad (2.7)$$

## Chapitre 3

# RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre est consacré à l'interprétation et à la discussion des résultats des simulations effectuées à l'ensemble des données présentées dans le chapitre précédent.

### 3.1 Caractéristiques moyennes du vent sur le site

Dans cette partie, il s'agit d'analyser les variabilités mensuelles, diurnes et inter-saisonnières de quelques caractéristiques moyennes (vitesse moyenne et écart-type) appliqués au vent.

#### 3.1.1 Variabilités intra-annuelle et inter-annuelle

Le traitement des données nous a permis de déterminer les vitesses moyennes mensuelles et annuelles puis les écarts types observés sur chaque mesure de vitesse moyenne mensuelle. La figure 3-1 illustre le cycle annuel de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour une année quelconque comparée à la moyenne sur la période de couverture (5 ans).



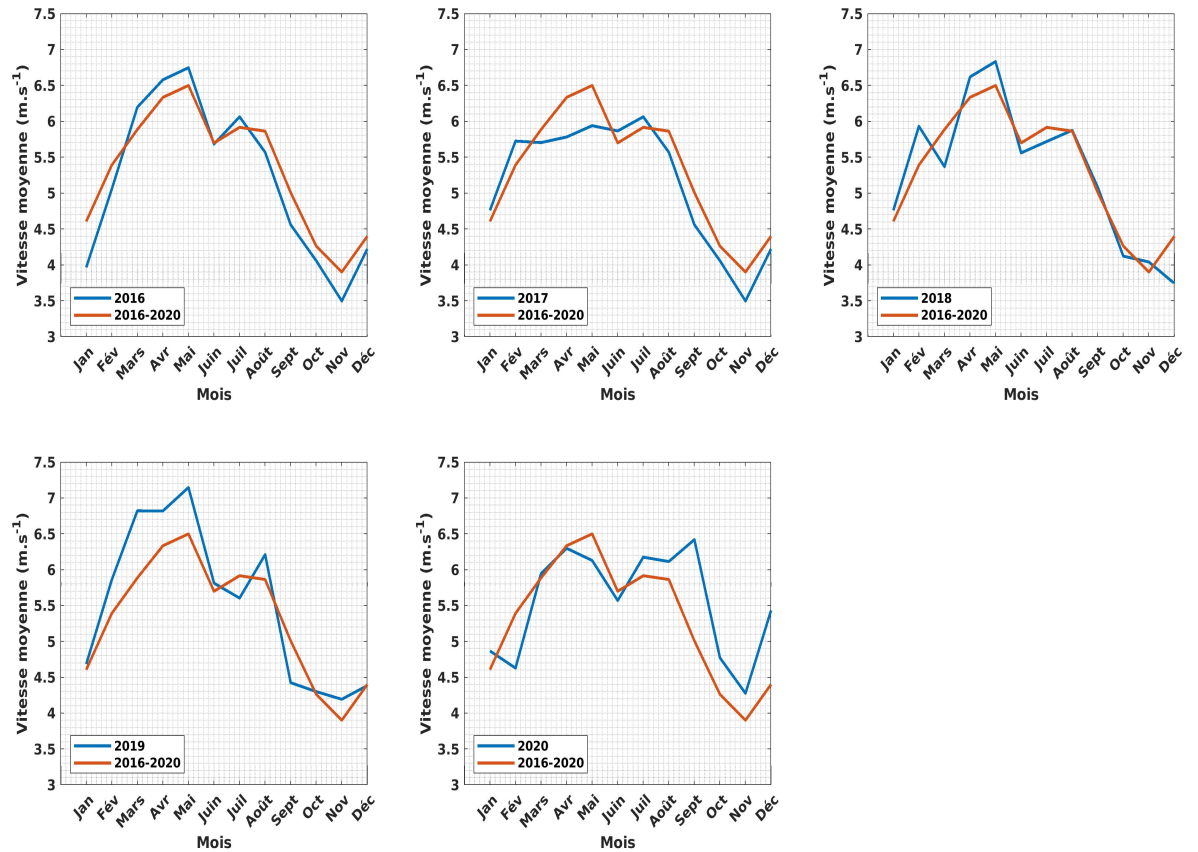


FIGURE 3.1 – Cycle annuel de la vitesse moyenne mensuelle.

La figure 3-1 montre que les courbes suivent pratiquement la même tendance avec des régimes de vents forts d’Avril à Mai ponctués par des vitesses moyennes mensuelles de 6,41 m/s et 6,55 m/s respectivement et des régimes de vents faibles d’Octobre à Novembre avec des vitesses moyennes mensuelles de 4,26 m/s et 3,9 m/s respectivement. On peut en déduire que le potentiel éolien devrait être plus important pour les mois d’Avril et de Mai. Ces vents forts se produisent plus précisément en front de système convectif avant l’arrivée de la pluie et au début de la pluie [39].

On note aussi que l’année 2020 présente une vitesse moyenne annuelle de 5,53 m/s représentant ainsi l’année la plus favorable contrairement à l’année 2017 qui est la plus défavorable avec une vitesse moyenne annuelle de 5,15 m/s comme l’illustre la figure 3-2. Cette figure met en évidence aussi une certaine variabilité intra-annuelle de la vitesse moyenne mensuelle.

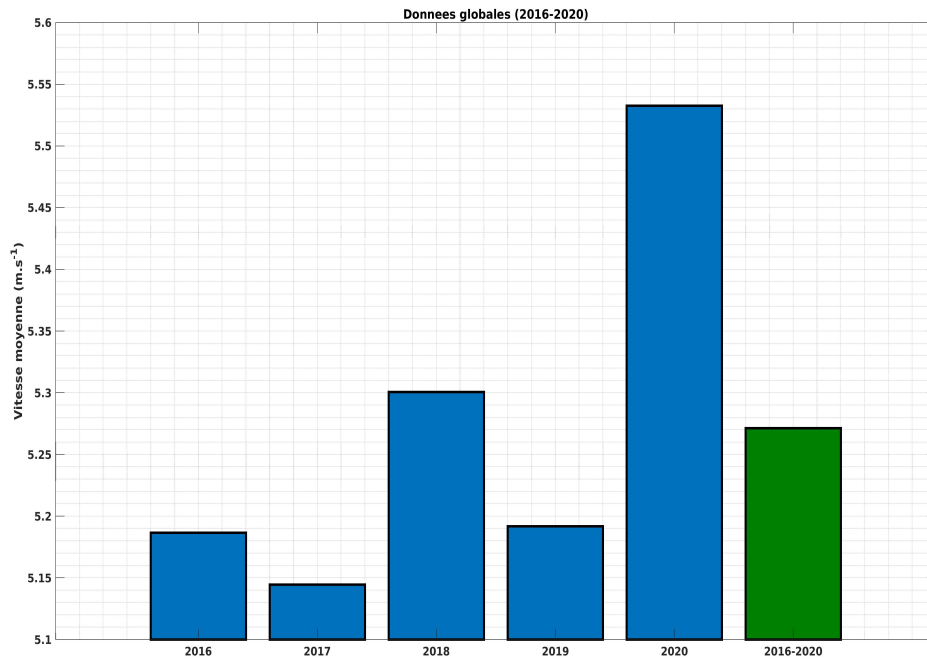


FIGURE 3.2 – Variabilité inter-annuelle de la vitesse moyenne du vent de 2016 à 2020

Nous présentons dans le tableau 3-1, les écarts types des vitesses moyennes mensuelles de la période des cinq années. On remarque que l'écart type est plus important pendant les mois de Juillet (pour les années 2016 et 2017) et Septembre (pour les années 2018, 2019 et 2020). Par contre l'écart type est moins important pendant les mois de Mai (pour les années de 2018, 2019 et 2020) et de Juin (pour les années de 2016 et 2020).

TABLEAU 3.1 – Vitesses moyennes et écarts types mensuelles sur les cinq années.

Mois	2016		2017		2018		2019		2020	
	$\bar{v}(m/s)$	$\sigma(V)$	$\bar{v}(m/s)$	$\sigma(V)$	$\bar{v}(m/s)$	$\sigma(V)$	$\bar{v}(m/s)$	$\sigma(V)$	$\bar{v}(m/s)$	$\sigma(V)$
Janvier	3,958	1,806	4,75	1,92	4,75	1,92	4,67	1,67	4,86	2,21
Février	5,044	2,124	5,71	1,79	5,92	1,73	5,84	1,63	4,61	2,35
Mars	6,193	1,78	5,68	1,87	5,36	1,606	6,78	2,05	5,94	1,88
Avril	6,58	1,56	5,77	1,85	6,61	1,74	6,82	1,42	6,28	1,94
Mai	6,74	1,63	5,94	1,49	6,83	<b>1,504</b>	7,13	<b>1,36</b>	6,13	<b>1,46</b>
Juin	5,68	<b>1,53</b>	5,86	<b>1,47</b>	5,56	1,66	5,8	1,38	5,58	2,24
Juillet	6,05	<b>2,21</b>	6,05	<b>2,21</b>	5,71	2,102	5,6	1,96	6,22	2,09
Août	5,57	1,99	5,57	1,99	5,87	2,18	6,21	1,97	6,1	2,07
Septembre	4,56	2,12	4,56	2,12	5,08	<b>2,58</b>	4,41	<b>2,19</b>	6,43	<b>3,36</b>
Octobre	4,06	1,72	4,06	1,72	4,12	1,81	4,3	1,95	4,77	2,03
Novembre	3,5	1,62	3,5	1,62	4,04	1,55	4,19	1,55	4,28	1,87
Décembre	4,2	1,97	4,2	1,97	3,74	1,78	4,37	1,94	5,43	1,93

Renseignant sur la régularité du vent, les écarts types avec une valeur maximales/minimales (en gras) présentent alors, la plus forte/faible déviation de la distribution des vents sur la station. Par conséquent il serait important de noter qu'une estimation de la vitesse moyenne du vent basée uniquement sur les variations saisonnières de la vitesse moyenne sans tenir compte des variations horaires peut entrainer un surdimensionnement ou un sous-dimensionnement d'un système éolien.

### 3.1.2 Vitesses moyennes saisonnières du vent

L'appartenance de Diembéring à la Basse-Casamance et donc au domaine climatique sud-soudanien lui confère des caractéristiques climatiques particulières dont deux saisons bien distinctes, l'une allant de novembre à juin (saison sèche) et l'autre de juillet à octobre (saison des pluies), d'après les données pluviométriques de l'ANACIM en 2010. La figure 3-3 représente la variabilité de la vitesse moyenne en janvier-février-mars (JFM), avril-mai-juin (AMJ), juillet-aout-septembre (JAS), octobre-novembre-décembre (OND) mais notamment en saison sèche et en saison des pluies pendant la période des cinq années.

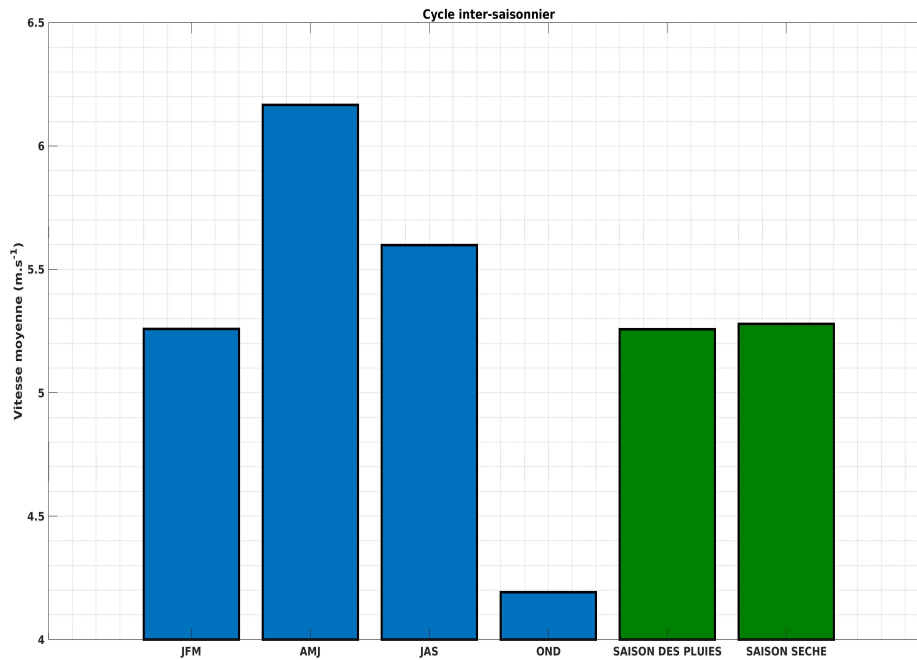


FIGURE 3.3 – **Histogramme des vitesses moyennes saisonnière**

Les résultats obtenus montrent que la vitesse moyenne calculée est plus élevée pendant la période d’avril à juin (AMJ), en pleine saison sèche, avec une valeur de 6,16 m/s tandis que sa valeur minimale est observée en OND. Plus généralement, on note une vitesse moyenne saisonnière légèrement plus élevée pendant la saison sèche (5,279m/s) que pendant la saison des pluies (5,257m/s). On rappelle que la saison des pluies, dans notre zone d’étude couvre les mois de Juillet à Octobre et la saison sèche de Novembre à Juin.

Ces vitesses moyennes saisonnières sont présentées, avec leurs écart-types dans le tableau 3-2. La plus faible valeur des écart-types est notée pendant la période AMJ et la plus forte en JAS. Ces résultats sont en parfaite accord avec les travaux de Sow (2018)[40]. La saison sèche présente la plus petite déviation de la distribution des vents d’où un faible écart-type par rapport à la saison des pluies, là où on note une présence d’un vent moins régulier. Une telle distribution (faible écart type et donc présence d’un vent régulier) est favorable à une bonne production électrique de l’aérogénérateur si bien entendu le vent présente une intensité suffisante [41].

TABLEAU 3.2 – **Vitesses moyennes et écarts types saisonnières moyennées sur 5 ans (2016-2020).**

Périodes	JFM	AMJ	JAS	OND	Saison sèche	Saison des pluies
$\bar{v}(m/s)$	5,25	6,16	5,59	4,19	5,27	5,25
$\sigma(V)$	2,03	<b>1,72</b>	<b>2,33</b>	1,88	2,04	2,29

Comme noté plus haut, une estimation de la vitesse moyenne basée uniquement sur les variations saisonnières peut causer un mauvais dimensionnement d’un système éolien. Dans la

partie qui suit nous étudierons la variation horaire du vent pour une meilleure précision d'un dimensionnement d'une potentielle installation d'un système éolien dans la zone d'étude.

### 3.1.3 Variabilité diurne de la vitesse moyenne du vent

La variation diurne de la vitesse moyenne du vent est associée à l'étude des caractéristiques moyennes du potentiel éolien sur le site de Diembéring (figure 3-4). La variation diurne de la vitesse moyenne est due à un couplage de la circulation générale de l'atmosphère et des phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire dans la région. L'étude de cette variation diurne du vent montre d'une part un régime de vent fort pendant la journée et d'autre part un régime de vent faible pendant la nuit. Cela correspond aux phénomènes de la brise de mer et de la brise de terre respectivement (voir Fig. 1-3). Cette remarque est observée aussi bien pour les données de chaque année que pour les données de cinq ans. On peut en conclure, qu'en principe une éolienne installée sur la station produira plus d'énergie pendant la journée que pendant la nuit.

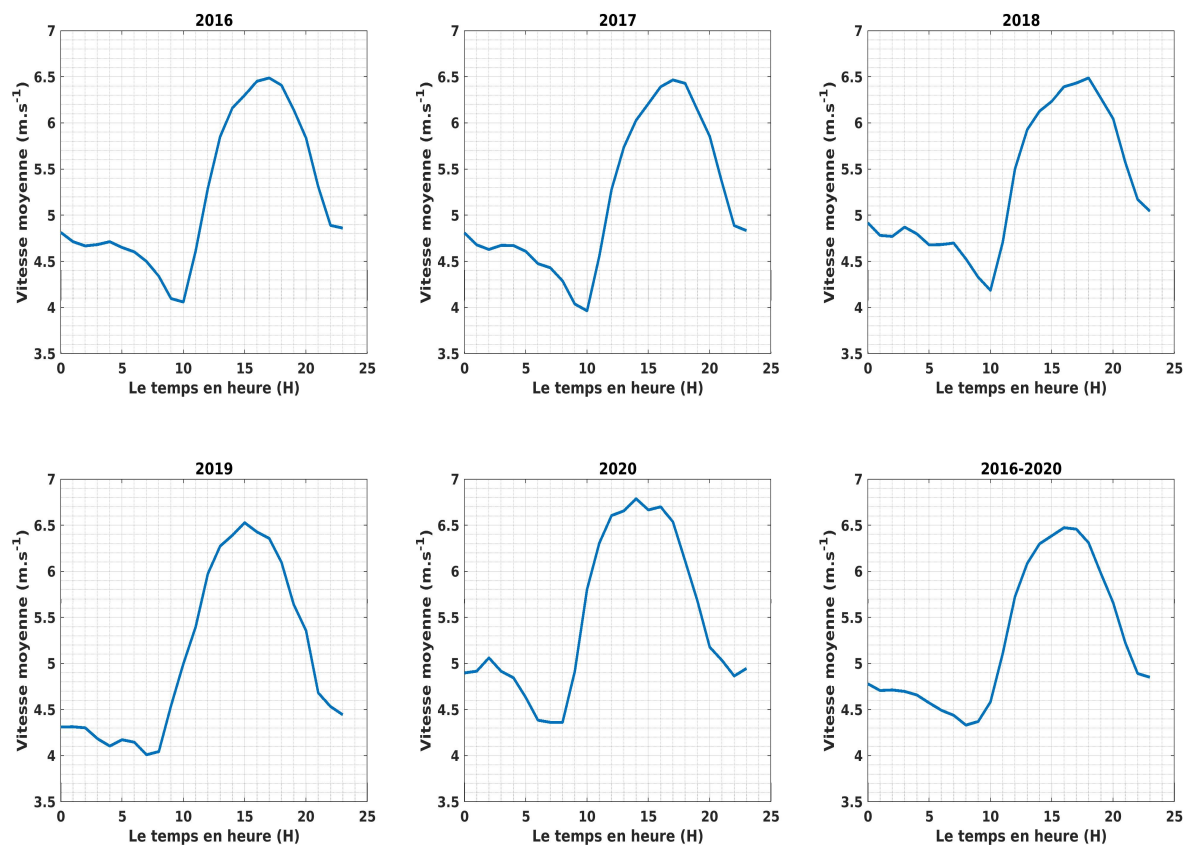


FIGURE 3.4 – Variation diurne de la vitesse moyenne annuelle du vent.

## 3.2 Caractéristiques statistiques du vent sur le site

L'étude des caractéristiques statistiques du vent est associée à la détermination de la rose des vents qui est la représentation graphique de la fréquence de la vitesse moyenne du vent en fonction de la direction dans un repère polaire mais aussi à la modélisation des paramètres du vent par la distribution de Weibull.

La fonction de distribution de probabilité de la vitesse du vent est essentielle pour évaluer la disponibilité de l'énergie éolienne sur un site. Il permet également de sélectionner des éoliennes appropriées pour exploiter l'énergie éolienne [13].

### 3.2.1 Variabilité inter-annuelle

#### a) La rose des vents

La rose des vents est déterminée pour chaque année et pour l'ensemble des données sur 5 ans sur la zone d'étude montrant la direction des vents dominants (figure 3-5).

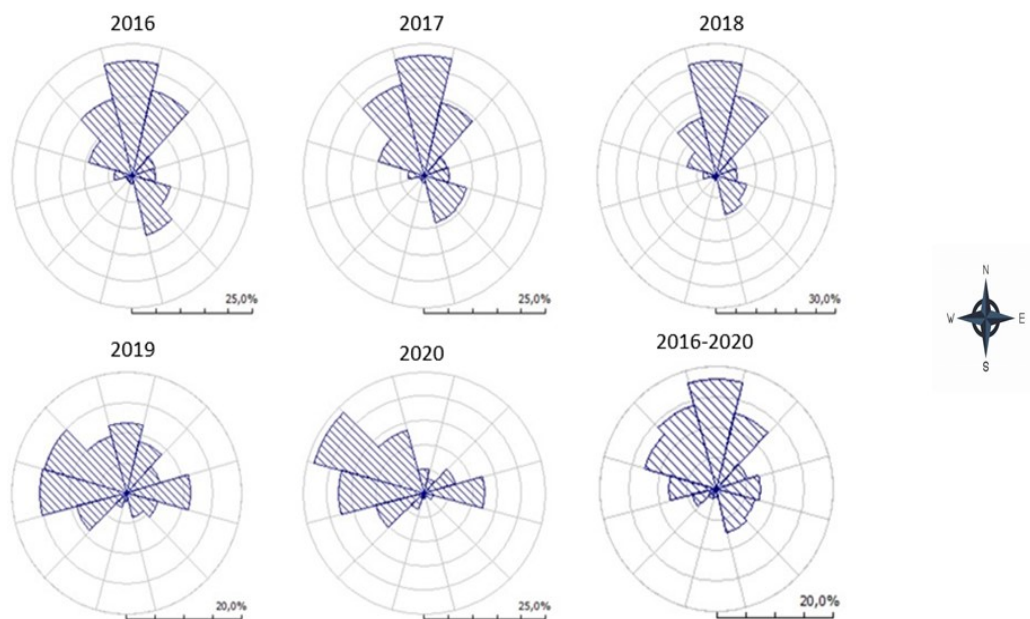


FIGURE 3.5 – Rose des vents inter-annuelle.

Les directions dominantes du vent sur le site de Diembéring sont le nord et le nord-ouest tout au long de la période des cinq années. Cette direction correspond au régime des alizés, qui soufflent quasi constamment, surtout pendant la saison sèche dans le pays. Le nord est la direction dominante du vent pendant les années 2016, 2017 et 2018 mais aussi sur l'ensemble des données cinq ans. En 2019 et 2020 les vents dominants prennent la direction nord-ouest. La forte direction NNO (nord à nord-ouest) observée est associée à l'installation d'alizé maritime. Une composante sud-ouest apparaît en raison de la présence du vent de mousson du sud.

**b) Paramètres de Weibull**

Les données collectées pour toute la période de cinq ans sur le site de Diembéring sont aussi ajustées à la loi de Weibull. La vitesse moyenne, les paramètres de Weibull (A et k) et la densité de puissance sont calculés.

La figure 3-6 représente les histogrammes des fréquences associés à la courbe de distribution de Weibull pour chaque année et pour l'ensemble des données.

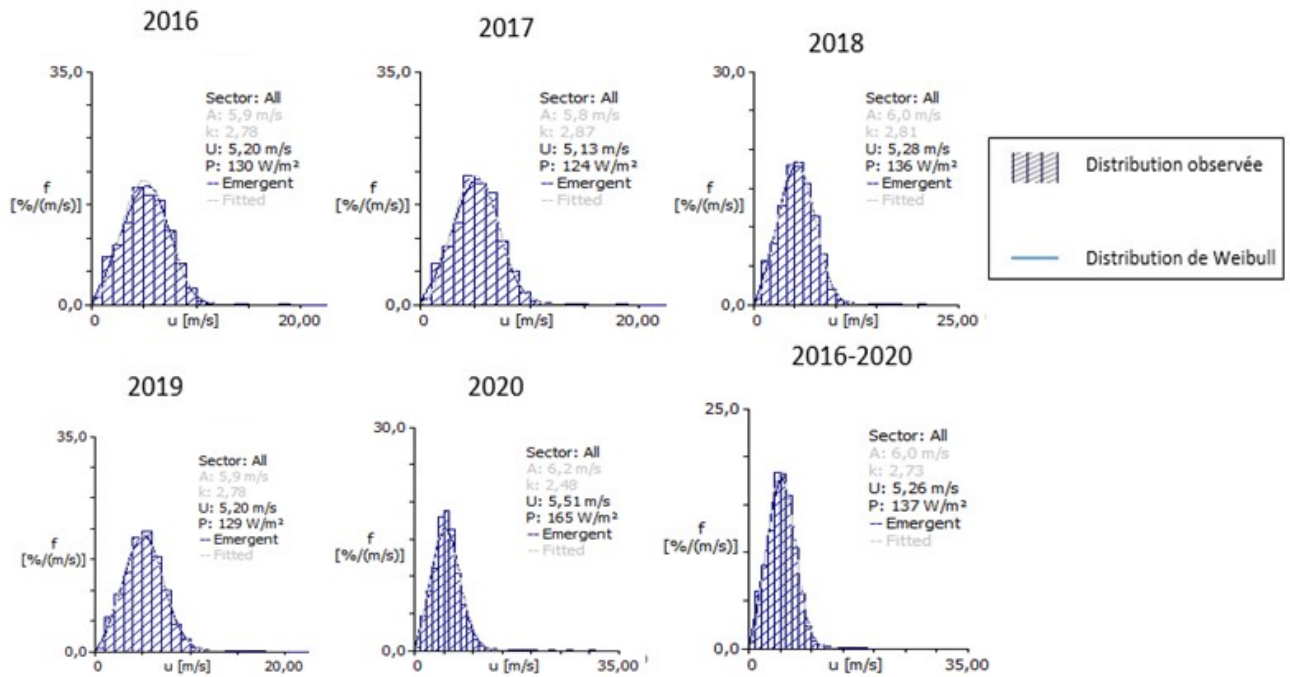


FIGURE 3.6 – Variabilité inter-annuelle des fréquences de la vitesse moyenne du vent.

Les résultats de la figure 3-6 montrent que la distribution observée suit bien la distribution de Weibull aussi bien pour les données de chaque année que pour les données de la période de cinq ans.

Dans le tableau 3-3, nous présentons le résumé des paramètres de Weibull et de la densité de puissance des différentes années de notre période de couverture.

La plus grande densité de puissance est observée en 2020 avec une valeur de 165 W/m² et la plus faible valeur est notée en 2017 qui est égale à 124 W/m². Ces années correspondent respectivement à la plus favorable et à la plus défavorable en termes de production d'énergie dans le site. Les paramètres de Weibull A et k sont approximés par des lois qui dépendent de l'écart type et de la vitesse moyenne : le facteur de forme k nous informant sur la régularité du vent et le facteur d'échelle A, sur la vitesse moyenne du vent. L'année 2020 présente le paramètre d'échelle le plus grand dans le site qui est de l'ordre de 6,0 m/s et inversement le facteur de forme le plus petit qui est de 2,48 (contrairement à l'année 2017 dont A=5,8m/s et k=2,87). Enfin, les moyennes annuelles calculées à une hauteur de 10 m du sol montrent que le



TABLEAU 3.3 – Récapitulatif des paramètres de Weibull et de la densité de puissance annuelles.

Années	Paramètre d'échelle(m/s) (A)	Facteur de forme (k)	Vitesse moyenne (m/s)	Densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )
2016	5,9	2,78	5,20	130
2017	5,8	2,87	5,13	124
2018	6,0	2,81	5,28	136
2019	5,9	2,78	5,20	129
2020	6,2	2,48	5,51	165
2016-2020	6,0	2,73	5,26	137

site étudié est régulièrement venté.

### 3.2.2 Variabilité intra-saisonnière

#### a) La rose des vents

L'étude statistique a aussi permis la détermination de la rose des vents de la saison des pluies et de la saison sèche mais aussi des périodes de JFM, AMJ, JAS et OND. La figure 3-7 illustre la direction dominante de ces différentes périodes.

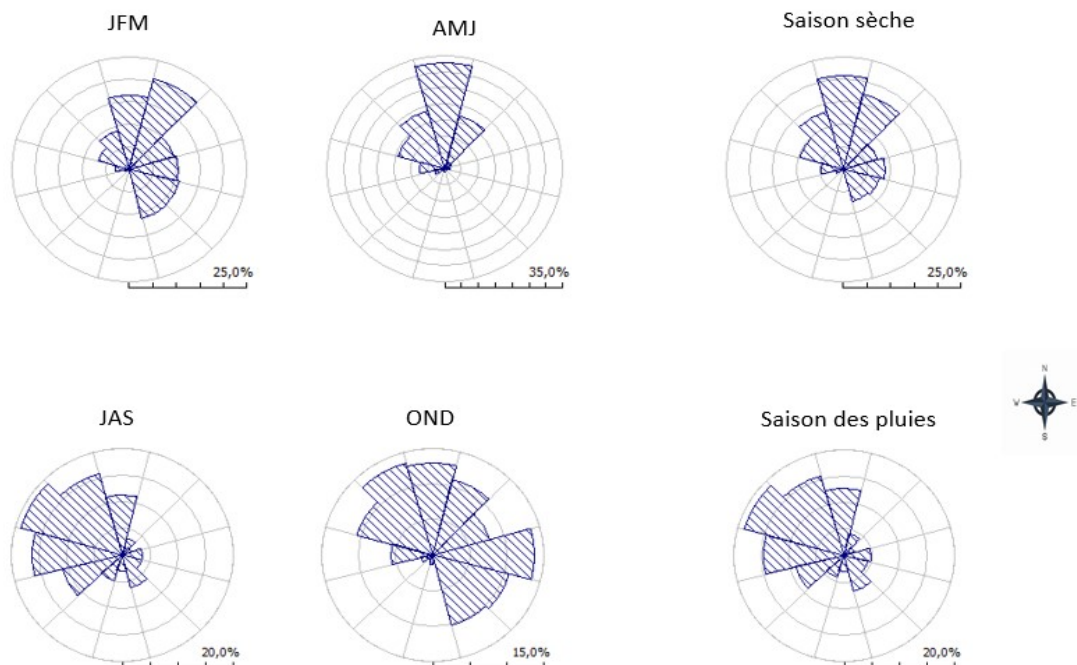


FIGURE 3.7 – Rose des vents saisonniers.

On note pendant les périodes de JFM, AMJ, JAS une distribution privilégiée de la vitesse moyenne dans les directions Nord-Est, Nord et Nord-Ouest respectivement. Contrairement à la période OND, on remarque une distribution de la vitesse moyenne plutôt hétérogène avec deux



directions accentuées que sont le Nord-Est et l'Est.

La direction du vent comme l'humidité relative de l'air permettent d'identifier deux types de temps : la période d'harmattan avec des vents du nord est très secs et la période de mousson avec des vents au sol du sud-ouest chargés d'humidité [42]. La direction dominante notée pendant la saison sèche des cinq années confondues est le Nord et celle de la saison des pluies est le Nord-Ouest. Ces directions de vent observées sur la zone d'étude sont en partie modulées par les brises de mer de l'océan Atlantique, tandis que l'inversion saisonnière du vent (mousson) est responsable du vent dominant du Sud-Ouest pendant la saison des pluies. Cependant, durant les mois secs de décembre et janvier, l'alizé du Nord-Est se dirige vers l'océan en raison du retrait de la mousson, ce qui explique le fort vent du Nord observé pendant les mois secs (saison sèche) [13].

### b) Paramètres de Weibull

Les courbes d'ajustement de la distribution statistique des fréquences saisonnières et inter-saisonnière des vitesses du vent obtenues à partir de la distribution de Weibull sur la zone d'étude sont représentées sur la figure 3-8. Les paramètres de Weibull (A et k) et la densité de puissance sont aussi calculés.

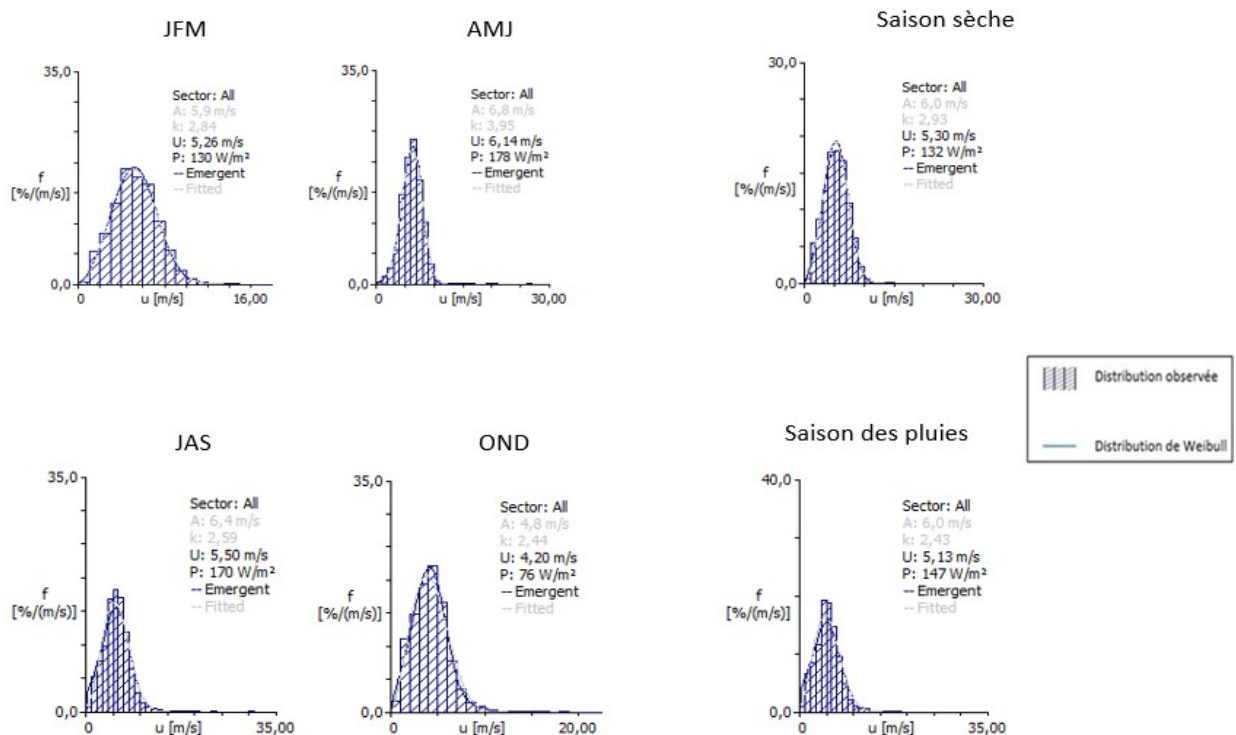


FIGURE 3.8 – Distribution saisonnière des fréquences de la vitesse moyenne du vent.

La similitude des deux tendances (la distribution observée et la distribution de Weibull) illustre la bonne représentation offerte par une telle distribution qu'est celle de Weibull par

rapport aux données réelles mesurées directement du site étudié, comme le montre bien la figure 3-8.

Le tableau 3-4 présente le résumé des paramètres de Weibull et de la densité de puissance des différentes saisons de notre période de couverture.

**TABEAU 3.4 – Récapitulatif des paramètres de Weibull et de la densité de puissance saisonnières.**

Années	Paramètre d'échelle(m/s) (A)	Facteur de forme (k)	Vitesse moyenne (m/s)	Densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )
JFM	5,9	2,84	5,26	130
AMJ	6,8	3,95	6,14	178
JAS	6,4	2,59	5,50	170
OND	4,8	2,44	4,20	76
Saison sèche	6,0	2,93	5,30	132
Saison des pluies	6,0	2,43	5,13	147

On constate la période AMJ présente à la fois le paramètre d'échelle le plus grand (6,8 m/s) et le facteur de forme le plus grand qui est de 3,95. La plus petite densité puissance est observée en OND (76W/m<sup>2</sup>) et la plus grande en AMJ (178W/m<sup>2</sup>) qui est due à la régularité du vent (écart-type petit et k plus grand).

La saison des pluies présente une densité de puissance plus grande (147W/m<sup>2</sup>) que le saison sèche (132W/m<sup>2</sup>). La densité de puissance observée en saison des pluies est due à son facteur de forme faible (2,43) par rapport à la saison sèche (2,93) car à facteur d'échelle égal, la saison avec un facteur de forme faible produit plus d'énergie qu'une saison avec un facteur de forme fort, mais cependant plus irrégulièrement [40].

La figure 3-9 met plus remarquablement en évidence les densités de puissance observées pendant les différentes saisons.

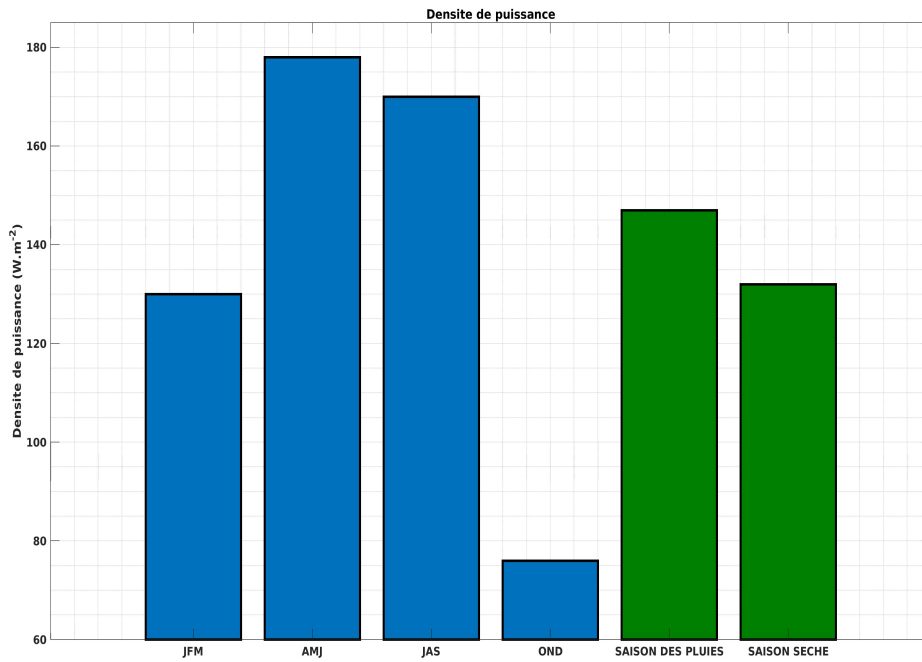


FIGURE 3.9 – Evolution intra-annuelle de la densité de puissance.

Compte tenu de la valeur des densités de puissance, on peut dire que les périodes en ordre de la plus favorable à la plus défavorable en termes de productions d'énergie sont respectivement AMJ (178W/m<sup>2</sup>), JAS (170W/m<sup>2</sup>), JFM (130W/m<sup>2</sup>) et OND (76W/m<sup>2</sup>). Ces valeurs de la densité de puissance éolienne élevées sont généralement une indication positive pour le développement de projets éoliens.

# CONCLUSION

Cette étude a permis la détermination du potentiel de l'énergie éolienne disponible à Diembéring.

A partir des données statistiques disponibles et des calculs réalisés, nous avons déterminé la moyenne, l'écart type, la distribution de Weibull, la densité de puissance du vent disponible et la rose des vents pour caractériser la variabilité du vent.

Ces données utilisées ont une résolution horaire et couvrent une période de 5 ans (de 2016 à 2020).

L'étude des caractéristiques moyennes et statistiques du vent a permis de déterminer le potentiel éolien disponible en mettant en évidence l'impact des variations saisonnières, annuelles, mensuelles et diurnes de la vitesse du vent sur ce potentiel.

L'analyse des résultats obtenues a montré ce qui suit :

- Les vitesses moyennes annuelles du vent ont culminé en 2020 à 5,53 m/s et étaient au plus bas en 2017 à 5,15 m/s. Une variabilité inter-annuelle a été observée avec pratiquement la même tendance durant les cinq (5) ans. L'année 2020 présente le plus fort écart-type (en septembre).
- L'analyse de la variabilité saisonnière a montré un minimum de 4.19 m/s en OND en période d'Harmattan et un maximum de 6.16 m/s obtenu en AMJ en période de mousson en Afrique de l'Ouest. On note aussi un écart-type plus grand en saison des pluies qu'en saison sèche.
- Le profil journalier type du vent a été déterminé et montre une vitesse moyenne diurne plus importante pendant le jour que la nuit.
- La direction annuelle et saisonnière des vents dominants sur la zone d'étude était principalement du nord et du nord-ouest. Cela peut être attribué à la proximité de l'océan Atlantique.
- L'estimation des paramètres de Weibull (A et k) pour tout le site, montre que le vent est suffisant durant les 5 années de couvertures surtout les mois secs (AMJ) de l'année pour une importante production d'énergie.
- La densité de puissance annuelle du vent maximale estimée (165 W/m<sup>2</sup>) était observée en 2020 et minimale en 2017 avec 124 W/m<sup>2</sup>. Le potentiel éolien est plus important pour la période de AMJ avec 178 W/m<sup>2</sup> et faible en OND avec 76 W/m<sup>2</sup>. Pour la variabilité saisonnière, la densité de puissance minimale est observée pendant la saison sèche (132 W/m<sup>2</sup>) et le maximum pendant la saison des pluies avec 147 W/m<sup>2</sup>.

Cependant, le présent travail n'est qu'une étude préliminaire visant à estimer le potentiel éolien de Diembéring. Pour une étude approfondie préalable à la construction et à l'installation des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, nous devons effectuer des études plus détaillées.

Dans la suite du travail, il serait intéressant de mener l'étude sur une base de données plus large et d'évaluer le gisement éolien sur d'autres sites de la région afin d'arriver à établir une carte du potentiel éolien de toute la zone casamançaise. Il serait aussi intéressant de faire des études approfondies sur les types d'éoliens adaptés à ce site et de faire une analyse technico-économique d'un système éolien destiné à la production d'électricité pour le site en question.

# Bibliographie

- [1] B. S. Mohammed, *Optimisation de l'évaluation Temporelle du Gisement énergétique éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie*. PhD thesis, Thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat en physique énergies . . . , 2013.
- [2] “Brises de mer et de terre.” <https://www.universalis.fr>. Consulté le : 14-06-2023 12 :55 :57.
- [3] R. Chandrappa, U. Chandra Kulshrestha, R. Chandrappa, and U. Chandra Kulshrestha, “Major issues of air pollution,” *Sustainable Air Pollution Management : Theory and Practice*, pp. 1–48, 2016.
- [4] F. ALLAL, “Étude des modèles d'évaluation verticale de la vitesse du vent,” Master's thesis, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila, 2018.
- [5] M. Peters and G. Tetzlaff, “The structure of west african squall lines and their environmental moisture budget,” *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 39, pp. 74–84, 1988.
- [6] M. Thior, O. Sy, T. Sané, I. Mballo, A. Badiane, and L. Descroix, “Contraintes à la production rizicole et reconversion socioéconomique dans la commune de diembéring (sénégal),” *RIGES, Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes*, 2019.
- [7] N. K. Merzouk and M. Merzouk, *Gisement Energetique Eolien : Profil vertical de la vitesse du vent*. Éditions universitaires européennes, 2015.
- [8] “Statistical review of world energy 2023 : chiffres clés en infographies | connaissances des énergies.” <https://www.connaissancedesenergies.org/statistical-review-world-energy-2023-chiffres-cles-en-infographies-230627>. Consulté le 11-12-2023 03 :47 :17.
- [9] B. O. Bilal, C. Kébé, V. Sambou, M. Ndongo, and P. Ndiaye, “Étude et modélisation du potentiel éolien du site de nouakchott,” *Journal des sciences pour l'ingénieur*, vol. 9, pp. 28–34, 2008.
- [10] EITI, “senegal energy transition factsheet.” [https://eiti.org/sites/default/files/attachments/senegal\\_energy\\_transition\\_factsheet\\_fr.pdf](https://eiti.org/sites/default/files/attachments/senegal_energy_transition_factsheet_fr.pdf). Consulté le 11-12-2023 04 :44 :28.
- [11] I. Youm, J. Sarr, M. Sall, A. Ndiaye, and M. M. Kane, “Analysis of wind data and wind energy potential along the northern coast of senegal,” *Journal of Renewable Energies*, vol. 8, no. 2, pp. 95–108, 2005.

- [12] B. O. Bilal, M. Ndong, V. Sambou, P. Ndiaye, and C. Kebe, "Diurnal characteristics of the wind potential along the north-western coast of senegal," *Int. J. Phys. Sci*, vol. 6, pp. 7950–7960, 2011.
- [13] A. A. Akinsanola, K. Ogunjobi, A. T. Abolude, S. Sarris, and K. Ladipo, "Assessment of wind energy potential for small communities in south-south nigeria : Case study of koluama, bayelsa state," *J. Fundam. Renew. Energy Appl*, vol. 7, no. 02, 2017.
- [14] A. Tamaarat, "Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une mada," *Université Mohamed Khider, Biskra*, 2015.
- [15] M. Dahman and M. Mokeddem, "Prévision à court terme de la vitesse du vent en utilisant le modèle rna pour la production de l'énergie électrique," Master's thesis, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2021.
- [16] "Les différents couches de latmosphère terrestre – apprendre en ligne." <https://www.clicours.com/les-differents-couches-de-latmosphere-terrestre/>. Consulté le 11-06-2022 16 :02 :02.
- [17] "Andrée otte." [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5734019/mod\\_resource/content/1/PQI5776-AULA4-PARTE2-2009.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5734019/mod_resource/content/1/PQI5776-AULA4-PARTE2-2009.pdf). consulté le 17-06-2022 09 :01 :12.
- [18] L. Prandtl, "Über flüsigkeitsbewegung bei sehr kleiner reibung, d. iii internat," *Math. Kongr. Heidelberg*, 1904.
- [19] "Couche limite atmosphérique." [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Couche\\_limite&oldid=188486036](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Couche_limite&oldid=188486036). Consulté le : 18-06-2022 12 :32 :57.
- [20] R. B. Stull, *An introduction to boundary layer meteorology*, vol. 13. Springer Science & Business Media, 2012.
- [21] B. Korgo, *Caractérisation optique et microphysique des aérosols atmosphériques en zone urbaine ouest africaine : Application aux calculs du forçage radiatif à Ouagadougou*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II; Université Ouaga 1 Professeur ..., 2014.
- [22] R. A. Plumb and A. Y. Hou, "The response of a zonally symmetric atmosphere to subtropical thermal forcing : Threshold behavior," *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 49, no. 19, pp. 1790–1799, 1992.
- [23] S. Janicot, J.-L. Redelsperger, and T. Lebel, "La mousson ouest-africaine : introduction à quelques contributions du programme d'étude multidisciplinaire amma," *La Météorologie*, vol. 8, no. 2, 2012.
- [24] I. Pytharoulis and C. Thorncroft, "The low-level structure of african easterly waves in 1995," *Monthly Weather Review*, vol. 127, no. 10, pp. 2266–2280, 1999.
- [25] J.-S. Hsieh and K. H. Cook, "On the instability of the african easterly jet and the generation of african waves : Reversals of the potential vorticity gradient," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 65, no. 7, pp. 2130–2151, 2008.

- [26] D. Pattanaik and V. Satyan, "Fluctuations of tropical easterly jet during contrasting monsoons over india : A gcm study," *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 75, pp. 51–60, 2000.
- [27] R. A. Houze, "Structure and dynamics of a tropical squall–line system," *Monthly Weather Review*, vol. 105, no. 12, pp. 1540–1567, 1977.
- [28] M. Fortune, "Properties of african squall lines inferred from time-lapse satellite imagery," *Monthly Weather Review*, vol. 108, no. 2, pp. 153–168, 1980.
- [29] V. Mathon, H. Laurent, and T. Lebel, "Mesoscale convective system rainfall in the sahel," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 41, no. 11, pp. 1081–1092, 2002.
- [30] C. Aspliden, A. Lynn, R. De Souza, and G. Rudder, "Diurnal and semi-diurnal low-level wind cycles over a tropical island," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 12, pp. 187–199, 1977.
- [31] A. Fink, D. Vincent, and V. Ermert, "Rainfall types in the west african sudanian zone during the summer monsoon 2002," *Monthly weather review*, vol. 134, no. 8, pp. 2143–2164, 2006.
- [32] "Diembéring." <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diemb%C3%A9ring&oldid=203100246>. Consulté le 28-01-2024 13 :04 :56.
- [33] S. Adjiri, H. D. Nedjari, and S. Haddouche, "Estimation du potentiel éolien pour la région d'in salah," *Journal of Renewable Energies*, vol. 16, no. 4, pp. 657–666, 2013.
- [34] J. Dorval, "Évaluation des méthodes d'estimation du productible des parcs éoliens," Master's thesis, École de technologie supérieure, 2011.
- [35] F. Chellali, *Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie*. PhD thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2011.
- [36] J. O. Jaber, "Prospects and challenges of small hydropower development in jordan.," *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, vol. 6, no. 2, 2012.
- [37] H. D. Nedjari, *Etude numérique du Gisement Eolien-Modélisation de la Turbulence Autour d'un Obstacle-Application à un Site Algérien*. PhD thesis, Master thesis, USTHB, (jull 2010), 2010.
- [38] B. Bilal, *Méthodologie de dimensionnement d'un système hybride éolien-solaire-batterie optimisé : Analyse de l'influence du taux de non couverture de la charge, des potentiels éolien et solaire et des profils de charge sur la configuration optimale*. PhD thesis, Thèse de 3ème Cycle, ESP-UCAD.
- [39] A. A. Touré, J.-L. Rajot, Z. Garba, R. Guillon, T. Didier, B. Marticorena, C. Petit, and D. Sebag, "Six années de suivi du flux d'érosion éolienne sur un sol sableux cultivé au sahel : Impacts des résidus de culture et de l'encroûtement," *Etude et gestion des sols*, vol. 20, no. 2, pp. 57–69, 2013.
- [40] M. S. Sow, "Étude des potentiels d'énergies renouvelables et impact des conditions météorologiques en basse casamance," Master's thesis, Université Assane Seck de Ziguinchor, 2018.



- [41] H. N. Sabaly, “Étude du potentiel éolien sur les côtes sénégalaises à l’aide des réanalyses de dernière génération du cephmt : Era-intérim,” Master’s thesis, Université Assane Seck de Ziguinchor, 2015.
- [42] J.-P. Lafore, N. Asencio, D. Bouniol, C. Flamant, F. Guichard, N. Hall, S. Janicot, C. Kocha, C. Lavaysse, S. Leroux, *et al.*, “Évolution de notre compréhension du système de mousson ouest-africain,” *La Météorologie*, no. Octobre, Spécial AMMA, pp. 11–16, 2012.