



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté De Technologie

Année 2025

Département d'Électromécanique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT

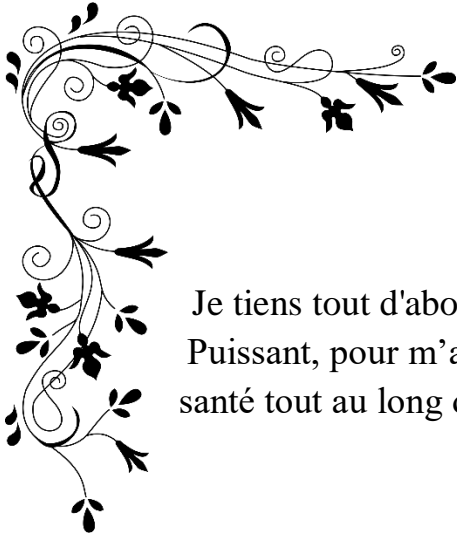
**Modélisation des efforts instationnaires appliqués
aux rotors d'éolienne à axe horizontal**

Présentée par :

BARKAT IBTISSEM

Soutenu publiquement le 18 /02/2025 devant le jury:

| | | | |
|-----------------------------|-------------------|-------------|---------------------------|
| HEROUS LAZHAR | Président | Prof | U.ANNABA |
| BENRETEM ABDELOUAHAB | Rapporteur | Prof | U. ANNABA |
| BOUZAOUIT AZZEDDINE | Examineur | Prof | U. SKIKDA |
| FARAH LOTFI | Examineur | MCA | U.ANNABA |
| SMILI KARIMA | Examineur | MCA | ECOLE ENSTI.ANNABA |



Remerciement

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Allah (الله), le Tout-Puissant, pour m'avoir doté du courage, de la volonté, de la patience et de la santé tout au long de ces années d'étude. C'est grâce à Lui que ce travail a pu être mené à bien.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance toute particulière à mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Abdelouahab BENRETEM, pour avoir accepté de m'encadrer. Je le remercie également pour ses qualités humaines exceptionnelles et ses conseils précieux qui ont jalonné toutes les étapes de ce travail. Il mérite toute ma considération et ma profonde gratitude.

Mes remerciements s'adressent aussi à mon co-directeur de thèse, Monsieur le Professeur Fawaz MASSOUH.

Je tiens également à remercier tous les membres du jury de thèse pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer à ma soutenance.

- ✧ Monsieur HEROUS Lazhar , Professeur à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.
- ✧ Monsieur BOUZAOUIT Azzedine , Professeur à l'Université 20 Aout 1955 de Skikda, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.
- ✧
- ✧ Monsieur FAREH Lotfi, Maître de conférences -A- à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.
- ✧ Mme Karima SMILI, Maître de conférences -A- à l'École ENSTI d'Annaba, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Barkat ibtisseem



Dédicace

À la mémoire de ma mère adorée,

dont la présence bienveillante a été un pilier inébranlable dans ma vie. Son amour inconditionnel, sa sagesse et sa douceur ont illuminé mes jours les plus sombres et m'ont guidé dans les moments de doute. Bien qu'elle ne soit plus physiquement à mes côtés, son esprit continue de veiller sur moi, et ses enseignements résonnent encore dans mon cœur. Que Dieu, Allah, l'accueille dans Son paradis et la comble de Sa miséricorde infinie.

À mon père bien-aimé, AZEDDINE,

dont la force, la générosité et la bonté ont façonné la personne que je suis aujourd'hui. Son soutien indéfectible et ses conseils avisés ont été une source inépuisable de motivation. Bien qu'il ne soit plus parmi nous, son souvenir reste vivant en moi, gravé à jamais dans mon cœur. Que Dieu, Allah, lui accorde une place parmi les bienheureux et l'entoure de Sa paix éternelle.

À mes sœurs, SANA et MOUFIDA, à mon frère, ADEL, et à sa femme, LEILA, pour leur présence constante et leur exemple de courage et de dévouement.

À ma famille toute entière, avec une pensée particulière pour ma cousine chère à mon cœur, HADIA.

À mes amis, et plus spécialement à AHLEM, dont la présence a toujours été une source précieuse d'encouragement et d'amitié.

Résumé

Le but principal de ce travail de thèse est d'étudier les forces appliquées aux rotors des éoliennes avec un axe horizontal. L'aérodynamique de la turbine est contrôlée par le flux d'air autour du rotor et l'estimation des charges d'air sur les pales du rotor dans diverses circonstances de fonctionnement. La compréhension de l'interaction entre ces forces et la dynamique structurelle du rotor est cruciale pour construire une turbine efficace. Parmi les problèmes dans l'aérodynamique des éoliennes est d'anticiper les forces sur la pale. Cela peut être accompli à l'aide d'approches telles que la théorie des moments d'élément de pale (BEM), qui est largement utilisée pour simuler l'aérodynamique des éoliennes, et la dynamique des fluides computationnelle (CFD), qui représente précisément l'écoulement autour du rotor. Dans notre recherche, nous avons proposé une technique de modélisation et de simulation pour examiner les forces appliquées aux rotors des éoliennes à axe horizontal. Notre approche consiste à modéliser le rotor en utilisant la méthode des éléments de pale et à intégrer une approche vortex pour représenter le sillage. Cette méthode vise à développer un modèle de rotor applicable à la recherche et à l'optimisation des parcs éoliens.

Mots clés : Modélisation, Puissance du vent, Forces sur la pale, Méthode tourbillonnaire, Méthode de l'élément de pale.

Abstract

The primary aim of this thesis is to investigate the forces exerted on the rotors of horizontal-axis wind turbines. This involves analyzing the turbine's aerodynamics, which are influenced by the airflow around the rotor, and assessing the aerodynamic loads on the rotor blades under various operating conditions. Understanding the interaction between these forces and rotor structural dynamics is crucial to building an efficient turbine. Among the problems in wind turbine aerodynamics is anticipating the forces on the blade. This can be accomplished using approaches such as the blade element moment theory (BEM), which is widely used to simulate wind turbine aerodynamics, and computational fluid dynamics (CFD), which precisely represents the flow around the rotor. In our research, we proposed a modeling and simulation technique to examine the forces applied to the rotors of horizontal axis wind turbines. Our approach is to model the rotor using the blade element method and integrate a vortex approach to represent the wake. This method aims to develop a rotor model for wind farm research and optimization.

Keywords: Modeling, Wind power, Forces on the blade, Vortex method, Method of the blade element.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو دراسة القوى المطبقة على دوارات توربينات الرياح ذات المحور الأفقي. يتم التحكم في الديناميكا الهوائية للتوربين من خلال تدفق الهواء حول الدوار وتقدير أحمال الهواء على شفرات الدوار في ظل ظروف تشغيل مختلفة. يعد فهم التفاعل بين هذه القوى والديناميكيات الهيكلية للدوار أمرًا بالغ الأهمية لبناء توربين فعال. من بين المشاكل في الديناميكا الهوائية لتوربينات الرياح توقع القوى على النصل. يمكن تحقيق ذلك باستخدام مناهج مثل نظرية عزم عنصر النصل (BEM)، والتي تستخدم على نطاق واسع لمحاكاة الديناميكا الهوائية لتوربينات الرياح، وديناميكيات السوائل الحسابية (CFD)، والتي تمثل بدقة التدفق حول الدوار. في بحثنا، اقترحنا تقنية النمذجة والمحاكاة لفحص القوى المطبقة على دوارات توربينات الرياح المحورية الأفقية. نهجنا هو نمذجة الدوار باستخدام طريقة عناصر الشفرة ودمج نهج الدوامة لتمثيل الاستيفاض. تهدف هذه الطريقة إلى تطوير نموذج دوار لأبحاث مزرعة الرياح وتحسينها.

الكلمات المفتاحية: النمذجة، طاقة الرياح، القوى على النصل، طريقة الدوامة، طريقة عنصر النصل

Table des matières

| | |
|--|-------------|
| Remerciement..... | I |
| Dédicace..... | II |
| Résumé..... | III |
| Table des Matières..... | V |
| Liste des Figures..... | VIII |
| Liste des Tableaux..... | X |
| Liste des Symboles..... | XI |
| Liste des Abréviations..... | XIII |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
| CHAPITRE I : État de l’art sur l’énergie éolienne | |
| I.1 Introduction..... | 4 |
| I.2 Historique de l’énergie éolienne..... | 4 |
| I.2.1 Avantages et les inconvénients de l’énergie éolienne..... | 5 |
| a) Avantages | 5 |
| b) Inconvénients | 5 |
| I.3 Le système éolienne..... | 6 |
| I.3.1 Définition de l’énergie éolienne..... | 6 |
| I.3.2 Les principaux composants d'une éolienne..... | 7 |
| I.3.3 Les différentes types d'éoliennes..... | 8 |
| I.3.3.1 Éolienne à axe vertical..... | 9 |
| I.3.3.2 Éoliennes à axe horizontal..... | 10 |
| A.Les types des éoliennes à axe horizontal | 11 |
| B.Les Systèmes de contrôle des éolienne a axe horizontal..... | 13 |
| I.3.4 Comparaison..... | 15 |
| I.3.5 Classification des turbines éoliennes..... | 15 |
| I.3.6 Fonctionnement de la conversion d’énergie éolienne..... | 16 |
| I.3.7 Zones de fonctionnement des éoliennes..... | 17 |
| I.4 Critères de sélection de site pour l’installation d’éoliennes..... | 17 |
| I.4.1 La disponibilité du vent..... | 17 |
| I.4.1.1 Extrapolation verticale des parametres du vent..... | 18 |
| I.4.2 La classe du vent..... | 19 |
| I.4.3 La nature du sol..... | 20 |
| I.4.4 La nature de profil de site..... | 20 |
| I.4.5 La position de site..... | 20 |

| | |
|--|----|
| I.5 Conclusion..... | 21 |
| CHAPITRE II :Étude aérodynamique du rotor éolien a axe horizontal | |
| II.1 Introduction..... | 23 |
| II.2 Description géométrique et aérodynamique du rotor..... | 23 |
| II.3 Aérodynamique de rotor..... | 24 |
| II.4 La théorie de Froude-Rankine..... | 25 |
| II.4.1 Limite de Betz..... | 29 |
| II.4.2 Stratégies innovantes pour dépasser la limite de Betz dans la conception des éoliennes..... | 30 |
| II.5 La méthode de la ligne active..... | 31 |
| II.6 La théorie de l'élément de pale..... | 32 |
| II.7 Théorie de Glauert..... | 32 |
| II.7.1 Correction de Glauert..... | 33 |
| II.8 Méthodes (CFD)..... | 33 |
| II.9 Le sillage éolien..... | 34 |
| II.9.1 Caractéristiques du sillage éolien..... | 35 |
| II.10 Méthodes tourbillonnaires..... | 37 |
| II.11 Le sillage prescrit | 37 |
| II.12 Le sillage libre..... | 38 |
| II.13 Conclusion..... | 38 |
| CHAPITRE III: Effets instationnaires sur les rotors éoliens | |
| III.1 Introduction..... | 41 |
| III.2 Aérodynamique instable des éoliennes..... | 41 |
| a) Vitesse et direction du vent..... | 42 |
| b) Rafales..... | 42 |
| c) Couche limite terrestre..... | 42 |
| d) Effet du mât..... | 42 |
| e) Turbulence..... | 43 |
| f) Induction du sillage..... | 43 |
| g) Fonctionnement en lacet..... | 43 |
| III.3 Caractéristiques des écoulements instationnaire autour des rotors éoliens..... | 43 |
| III.3.1 Définition des écoulements instationnaires..... | 43 |
| III.3.2 Importance des écoulements instationnaire dans la conception et la performance..... | 43 |
| III.3.3 Revue bibliographique des phénomènes instationnaires dans les écoulements..... | 44 |
| a) Formation de vortex et de tourbillons dans les sillage des éoliennes..... | 44 |
| b) Effets de la variation périodique de la vitesse du vent sur la charge du rotor..... | 45 |
| c) Caractéristiques des écoulements instationnaires..... | 47 |

| | |
|--|-----------|
| III.4 Analyse des écoulements instationnaire : techniques et outils..... | 47 |
| III.5 Conclusion..... | 48 |
| CHAPITRE IV: Modélisation des efforts appliqués au rotor horizontal | |
| IV.1 Introduction..... | 50 |
| IV.2 Méthodes numériques pour la modélisation..... | 50 |
| IV.2.1 Analyse du Sillage éolien..... | 50 |
| IV.2.1.1 Vitesses générées par le tube tourbillonnaire semi-infini..... | 52 |
| IV.2.2 Intégration d'un modèle tourbillonnaire au sein d'une simulation CFD pour l'analyse du.. sillage éolien..... | 52 |
| IV.2.2.1 Cas du sillage hélicoïdal..... | 53 |
| IV.3. Méthode de l'élément de pale..... | 54 |
| IV.4 Présentation du modèle..... | 54 |
| IV.4.1 Modélisation du sillag..... | 54 |
| IV.4.1.1 Vitesse générée par un anneau tourbillonnaire..... | 54 |
| IV.4.2 Modélisation des pales. Type your text..... | 58 |
| IV.4.3 Schéma d'intégration temporelle..... | 59 |
| IV.5 Conclusion..... | 63 |
| Conclusion générale..... | 65 |
| Références bibliographiques..... | 67 |

Liste des figures

CHAPITRE I

| | |
|---|----|
| Figure I-1 : Évolution des Technologies Éoliennes..... | 5 |
| Figure I-2 : Processus de conversion de l'énergie éolienne..... | 6 |
| Figure I-3 : Mâts tubulaire d'un parc éolien..... | 7 |
| Figure I-4 : Mâts en treillis..... | 7 |
| Figure I-5 : Éléments Clés d'une Installation Éolienne..... | 8 |
| Figure I-6 : Différents Modèles d'Éoliennes selon l'Axe..... | 9 |
| Figure I-7 : Éolienne Savonius à Axe Vertical..... | 9 |
| Figure I-8 : Éolienne Darrieus à Axe Vertical..... | 10 |
| Figure I-9 : Schéma d'une Éolienne à Axe Horizontal..... | 10 |
| Figure I-10 : Schéma des Éoliennes Orientées Amont et Aval..... | 11 |
| Figure I-11 : Éolienne à Vitesse Fixe..... | 12 |
| Figure I-12 : Représentation de l'Éolienne à Vitesse Variable : Machine Asynchrone à Cage..... | 13 |
| Figure I-13 : Représentation de l'Éolienne à Vitesse Variable : Machine Asynchrone à double alimentation..... | 13 |
| Figure I-14 : Courbe de puissance avec controle..... | 14 |
| Figure I-15 : Étapes de la Conversion de l'Énergie Éolienne..... | 16 |
| Figure I-16 : Profil de production énergétique d'une éolienne | 17 |
| Figure I-17 : Analyse de la Distribution de Weibull..... | 18 |
| Figure I-18 : Représentation de la rose du vent..... | 18 |

CHAPITRE II

| | |
|--|----|
| Figure II-1 : Description géométrique d'un rotor | 23 |
| Figure II-2 : Illustration du profil aérodynamique d'une pale..... | 24 |
| Figure II-3 : Profil des vitesses d'écoulement sur le rotor éolien..... | 25 |
| Figure II-4 : Représentation de la pale segmentée | 25 |
| Figure II-5 : Application d'un disque perméable dans le rotor éolien..... | 26 |
| Figure II-6 : Écoulement au travers le disque actif..... | 26 |
| Figure II-7 : La variation de C_p et C_t en fonction du facteur d'induction a | 28 |
| Figure II-8 : Comparatif des performances énergétiques entre diverses technologies éoliennes..... | 29 |
| Figure II-9 : Les different approche utilisé pour dépasser la limite de Betz..... | 31 |
| Figure II-10 : Méthode de la ligne active..... | 31 |
| Figure II-11 : Vue Schématique de l'Élément de Pale du Rotor..... | 32 |
| Figure II-12 : Section transversale d'une pale et profil de l'anneau balayé..... | 33 |
| Figure II-13 : Visualisation du flux aérodynamique d'une éolienne via simulation CFD..... | 34 |
| Figure II-14 : Sillage proche et sillage lointain | 34 |
| Figure II-15 : Modèle physique du sillage d'une éolienne..... | 35 |
| Figure II-16 : Les racines des turbulences qui surviennent dans la trajectoire d'une éolienne..... | 37 |
| Figure II-17 : Schéma du sillage cylindrique prescrit généré par une éolienne..... | 38 |
| Figure II-18 : Structure du sillage tourbillonnaire d'une éolienne : Tourbillons générés aux extrémités et au pied de chaque pale..... | 38 |

CHAPITRE III

| | |
|---|----|
| Figure III-1 : Origines des forces instationnaires sur le rotor éolien..... | 41 |
| Figure III-2 : Impact de la Couche Limite Terrestre sur les Flux Éoliens..... | 42 |
| Figure III-3: Observation du Comportement du Sillage des Éoliennes à l'Aide de Fumée..... | 45 |

CHAPITRE IV

| | |
|---|----|
| Figure IV.1 : Évolution des structures du sillage | 51 |
| Figure IV.2 : substitution du sillage hélicoïdal par des structures vortex dans l'éolien | 51 |
| Figure IV.3 : Intégration d'un modèle tourbillonnaire au sein d'une simulation CFD..... | 52 |
| Figure IV.4 : Discrétisation du sillage hélicoïdal..... | 53 |
| Figure IV.5 : Décomposition de la pale en plusieurs section | 54 |
| Figure IV.6 : (a) Visualisation du sillage éolien , (b) Représentation de la trajectoire hélicoïdale..... formées par des vortex tourbillonnaires..... | 55 |
| Figure IV.7 : Géométrie de l'anneau tourbillonnaire dans le plan xy..... | 55 |
| Figure IV.8 : Vitesse axiale induite avec et sans le paramètre de régularisation..... | 56 |
| Figure IV.9 : Distribution de la vitesse radiale le long du sillage de l'anneau tourbillonnaire..... | 57 |
| Figure IV.10 : Distribution de la vitesse axiale à travers le sillage..... | 58 |
| Figure IV.11 : Représentation du triangle de vitesse dans l'analyse des pales de rotor..... | 58 |
| Figure IV.12 : Organisation des anneaux tourbillonnaires dans le sillage..... | 60 |
| Figure IV.13 : Variation de l'Intensité Γ le long de la pale..... | 61 |
| Figure IV.14 : Répartition des forces dans le plan rotor..... | 62 |
| Figure IV.15 : Puissance produite par Gamesa G58 en fonction du vent rapide..... | 62 |

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et Inconvénients des Éoliennes à Axe Horizontal et Vertical.....15
Tableau I.2 : Classifications des Éoliennes : Puissance et Dimensions du Rotor.....16
Tableau I.3 : Critères de Classement Éolien (IEC).....20
Tableau II.1 : Impact des Sources de Turbulence sur le Sillages Éolien.....36
Tableau IV.1: Caracteristiques techniques de l'éolienne Gamessa58.....63
Tableau IV.2: Caractéristiques du profil NACA 441263

Liste des symboles

Ct Coefficient de poussée axiale

Cp Coefficient de puissance

$E(s(z))$ intégrale elliptique de 2^{ème} espèce

$K(s(z))$ intégrale elliptique de 1^{er} espèce

R Rayon de la pale [m]

Rr Rayon du tourbillon [m]

Rc rayon du tube tourbillonnaire semi-infini [m]

N Nombre de pale

p Pas [m]

r_n^i Position radiale de l' $i^{\text{ème}}$ anneau tourbillonnaire à la $n^{\text{ème}}$ itération [m]

r_i^* Position radiale de l' $i^{\text{ème}}$ anneau tourbillonnaire à l'étape intermédiaire [m]

$s(z)$ Paramètre de l'intégrale elliptique

T Force axiale [N]

t Temps [s]

U_0 Vitesse du vent [m/s]

Γ Intensité tourbillonnaire [m²/s]

Δt Temps de passage de pale (pas temporel) [s]

V_r Vitesse radiale induite par l'anneau [m/s]

V_a Vitesse de déplacement axiale de l'anneau [m/s]

$V_{r\text{-ind}}$ Vitesse radiale induite dans le sillage [m/s]

$V_{z\text{-ind}}$ Vitesse axiale induite dans le sillage [m/s]

Z_n^i Position axiale de l' $i^{\text{ème}}$ anneau tourbillonnaire à la $n^{\text{ème}}$ itération [m]

Z_i^* Position axiale de l' $i^{\text{ème}}$ anneau tourbillonnaire à l'étape intermédiaire [m]

Δt Temps de passage de pale (pas temporel) [s]

Symboles Grecs

Γ Intensité tourbillonnaire [m^2/s]

α Angle d'incidence [rad]

γ Vorticité [m/s]

θ Angle de vrillage local de l'élément de pale [rad]

Δt Temps de passage de pale (pas temporel) [s]

ρ Masse volumique [kg/m^3]

φ Angle de l'écoulement [rad]

Ω Vitesse angulaire [rad/s]

Liste des abréviations

BEM : Blade Element Momentum (Méthode de l'élément de pale-quantité de mouvement)

CFD : Computational Fluid Dynamics (Simulations informatiques de dynamique des fluides)

RANS : Renolds Average Navier-Stocke.

NREL : National Renewable Energy Laboratory (Laboratoire National de l'Energie Renouvelable).

NACA : National Advisory Committee for Aeronautics .

INTRODUCTION GENERALE

L'exploitation de l'énergie éolienne en tant que source d'énergie renouvelable a connu une progression significative au cours du XXe siècle, avec une intégration croissante de la production éolienne dans les réseaux électriques [1], [2]. Lanchester était le principal prédicateur de la plus grande puissance d'un vent parfait [3]. L'un des principaux défis en aérodynamique des éoliennes réside dans la capacité à prédire avec précision les forces agissant sur les pales. Ces forces peuvent être modélisées par différentes méthodes, chacune ayant des niveaux de complexité et de précision variés. Actuellement, le modèle d'ingénierie fondé sur la méthode BEM est couramment utilisé pour évaluer les performances aérodynamiques. Ce modèle repose sur l'hypothèse d'un flux d'air normal et uniforme et considère les forces aérodynamiques comme agissant sur une surface continue plutôt que sur un nombre fini de pales[4]. Hansen et al. [5] indiquent que la méthode BEM fournit une précision satisfaisante dans des conditions de charge normales, à condition que des données aérodynamiques adéquates soient appliquées. Cette méthode est considérée comme une avancée par rapport à la théorie dynamique de Rankine-Froude , [6], et ce fut le premier modèle utilisé pour prédire la vitesse de l'afflux du rotor, en supposant que le rotor pouvait être représenté par un disque uniformément chargé. La méthode CFD, quant à elle, consiste à résoudre numériquement les équations différentielles qui régissent la mécanique des fluides. Cela est accompli à l'aide de divers algorithmes et techniques numériques [7]. Une analyse approfondie est discutée dans l'étude de Sanderse et ses coll [8], concernant l'application des codes CFD pour simuler les éoliennes. Les techniques d'analyse sont ajustées selon la méthode de modélisation de la turbulence utilisée, ce qui est crucial pour la simulation des sillages éoliens. Les méthodes vortex sont une autre approche, qui est plus fiable que la théorie du momentum et moins coûteuse que la CFD. Les méthodes fondées sur la vorticité ont diverses formulations, allant des modèles analytiques de base aux méthodes numériques plus complexes [9]. La théorie du vortex peut également être utilisée pour estimer l'efficacité aérodynamique des éoliennes, en fonction du débit potentiel non-visqueux . L'avantage de la méthode est qu'elle réduit la complexité du flux et qu'elle a généralement été utilisée pour l'analyse aérodynamique des aérodromes et des aéronefs. Les méthodes de sillage vortex libre se sont développées comme des outils robustes et flexibles pour modéliser les charges aérodynamiques[10]. Yu et coll. [11] ont mis au point une méthode de sillage libre qui utilise un modèle d'anneau de tourbillon avec un tube de tourbillon cylindrique semi-infini où la proximité du sillage est simplifiée dans une série d'anneaux de tourbillon et le sillage lointain avec un tube de tourbillon cylindrique semi-infini. Branlard et Gaunaa [12] ont élaboré une approche fondée sur l'utilisation de méthodes tourbillonnaires, y compris des modèles de sillage cylindriques et hélicoïdaux, pour étudier les effets instables du lacet, du cisaillement et des écoulements turbulents. Un autre travail de Vaal [13] propose un modèle aérodynamique combinant la théorie de Kutta-Joukowski et la méthode BEM. Ce

modèle offre la possibilité de déterminer avec précision les charges sur les pales en prenant en compte l'évolution des vitesses induites dans le temps. Des travaux récents de Jing Dong et al [14] ont suggéré une méthode modifiée d'anneaux tourbillonnaires à sillage libre pour modéliser la charge aérodynamique autour des éoliennes à axe horizontal, appliquée à des structures de support fixes et flottantes.

Cette thèse est organisée en quatre chapitres distincts :

Dans le premier chapitre, nous présenterons une étude sur l'état de l'art sur l'énergie éolienne. En premier lieu, nous débiterons par une revue de la littérature, puis nous procéderons à une analyse approfondie des différentes catégories d'éoliennes, en examinant leurs caractéristiques spécifiques, avantages et limites. Enfin, nous conclurons ce chapitre par les critères de sélection des sites pour l'installation d'éoliennes.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de l'aérodynamique du rotor éolien à axe horizontal. La première partie est dédiée à la représentation géométrique et aérodynamique du rotor. Les concepts clés et les paramètres pertinents sont introduits. Ensuite, différentes théories aérodynamiques utilisées pour calculer les forces sur le rotor sont examinées, en mettant en avant les avancées récentes dans ce domaine de recherche.

Le troisième chapitre se penche sur les effets instationnaires et leur influence sur la performance ainsi que sur la stabilité des rotors éoliens. Cette analyse approfondie vise à éclaircir comment ces phénomènes transitoires peuvent affecter l'efficacité et la fiabilité des systèmes éoliens.

Le quatrième et dernier chapitre se concentrera sur la modélisation des forces appliquées au rotor d'une éolienne à axe horizontal, ainsi que sur la discussion des résultats de notre simulation. En conclusion, nous résumerons les résultats obtenus et explorerons les perspectives pour les futures recherches dans ce domaine.

CHAPITRE I :
ÉTAT DE L'ART SUR L'ÉNERGIE
ÉOLIENNE

I.1 Introduction

Les sources d'énergie renouvelable, inépuisables et toujours disponibles présentent une opportunité majeure pour générer de l'électricité tout en réduisant notre dépendance aux ressources non renouvelables.

L'utilisation de l'énergie éolienne est une forme importante d'énergie renouvelable. Son intérêt grandissant en fait une solution prometteuse. L'objectif principal de ce chapitre est d'explorer le domaine de l'énergie éolienne, en mettant en lumière les avancées les plus récentes tout en offrant une compréhension approfondie des principes fondamentaux sous-jacents à cette source d'énergie renouvelable. Nous commencerons par un bref historique suivi d'une explication approfondie du concept même de l'énergie éolienne. Ensuite, nous étudierons plus en détail les différents types d'éoliennes utilisées, et nous conclurons ce chapitre par les critères permettant le choix optimal du site pour implanter une éolienne.

I.2 Historique de l'énergie éolienne

Bien que l'énergie éolienne soit exploitée depuis des millénaires, son utilisation de manière significative a commencé au XIXe siècle. À l'époque, elle était principalement exploitée pour fournir de l'énergie mécanique, surtout pour le pompage de l'eau et le broyage des grains[15].

Les moulins à vent ont commencé à apparaître en Europe au XIe siècle, se répandant dans toute la région près de mille ans après. Les mouliniers se sont inspirés des modèles d'éoliennes verticales pour construire ces moulins [16]. L'année 1888 est marquée par la construction de la première turbine éolienne pouvant générer de l'énergie électrique, faite par un scientifique américain nommé Charles.F.Brush [17]. Ce système éolien a par la suite été ensuite développé par Poul La Cour qui a conçu plusieurs éoliennes industrielles. Ces éoliennes étaient spécifiquement conçues pour produire de l'hydrogène en utilisant l'énergie éolienne pour le convertir en énergie chimique grâce à un processus d'électrolyte .

La première crise pétrolière en 1973 a déclenché un fort engouement pour l'énergie éolienne dans divers pays. Cela a motivé plusieurs d'entre eux à investir dans le développement de cette technologie. Au cours des années 1980, l'énergie éolienne a connu ses premières innovations. De 1980 à 1986, l'industrie éolienne a prospéré en Californie, qui est devenue le premier marché véritablement important. L'aide financière a diminué aux États-Unis tandis qu'elle augmentait en Europe. Par conséquent, on observe une croissance notable de l'industrie éolienne dans certains pays comme l'Allemagne et le Danemark. En augmentant de 200 à 5500 mégawatts par an entre 1990 et 2001, la demande mondiale a connu une augmentation significative[18]. En 2019, la capacité installée des parcs éoliens a augmenté de 19 %, atteignant ainsi près de 651 GW à l'échelle mondiale.

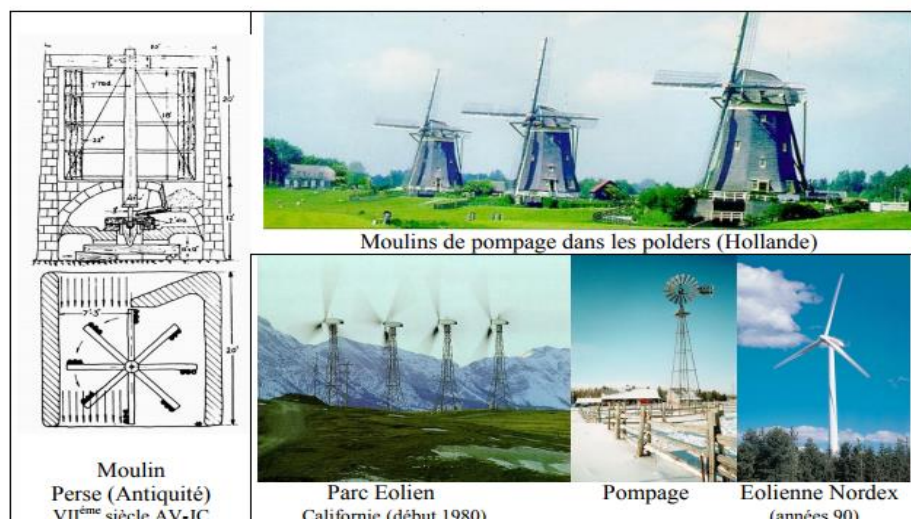


Figure I-1: Évolution des Technologies Éoliennes [15].

I.2.1 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

Chaque forme de production d'énergie possède ses propres avantages et ses inconvénients. En ce qui concerne l'énergie éolienne, qui a connu une évolution et une expansion remarquables, elle ne fait pas exception à cette règle, bénéficiant de multiples atouts qui ont favorisé son essor. Néanmoins, il est crucial d'examiner également les désavantages liés à cette forme d'énergie pour en anticiper les possibles répercussions sur son développement futur.

a) Avantages [19], [20], [21]

- L'énergie éolienne se distingue par ses nombreux avantages, en tant qu'énergie respectueuse de l'environnement, fiable, écologique et économique.
- Contrairement aux centrales thermiques et nucléaires, où la production d'énergie peut être maintenue de manière continue, l'énergie éolienne est caractérisée par sa nature intermittente, pouvant subir des interruptions à tout moment en fonction des variations du vent.
- Le parc éolien est facile à démonter sans aucune trace.
- Parmi les différentes sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est la plus économique. Comparée aux sources d'énergie plus conventionnelles, elle nécessite peu d'investissement initial et est simple à intégrer dans les systèmes électriques existants.

b) Inconvénients [20], [22]

- Le bruit : Le bruit mécanique, autrefois un problème notable, a été considérablement réduit grâce aux avancées technologiques dans les systèmes de multiplication. Quant au bruit aérodynamique, il est directement associé à la vitesse de rotation du rotor, nécessitant une régulation pour en minimiser les effets.

- Le risque sur la vie des oiseaux, en particulier les oiseaux migrateurs.
- Qualité de l'électricité : l'intermittence de l'énergie éolienne, due à la variabilité du vent, entraîne une production électrique qui n'est pas constante. Cette irrégularité peut avoir un effet sur la qualité de l'électricité générée.
- Le coût de production de l'énergie éolienne, par rapport aux sources d'énergie traditionnelles, fluctue en fonction des sites présentant des conditions optimales, où le vent est abondant. L'énergie éolienne peut être compétitive en termes de coût avec la plupart des sources d'énergie conventionnelles. Cependant, dans les zones où le vent est moins fort, le coût de l'énergie éolienne est généralement plus élevé que celui des sources d'énergie traditionnelles.

I.3 Le système éolien

I.3.1 Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est une source d'énergie renouvelable inépuisable qui présente de nombreux avantages écologiques. Contrairement aux combustibles fossiles et à l'énergie nucléaire, l'éolienne ne produit pas d'émissions atmosphériques néfastes ni de déchets radioactifs. Son fonctionnement repose sur l'utilisation directe de la force du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateurs. Ce système vise à capter l'énergie cinétique du vent et à la convertir en énergie mécanique, qui est ensuite transformée en électricité [23].

Ce processus de conversion s'effectue en deux étapes distinctes : d'abord, le rotor capte l'énergie cinétique du vent et la transforme en énergie mécanique. Ensuite, la génératrice reçoit cette énergie mécanique, la convertit en énergie électrique et l'achemine vers le réseau électrique.

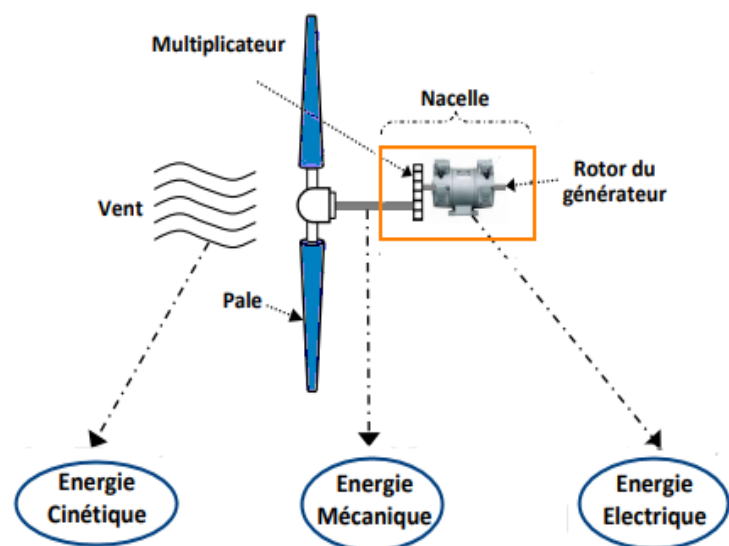


Figure I-2: Processus de conversion de l'énergie éolienne

I.3.2 Les principaux composants d'une éolienne

1. **Le mât** : Composé d'un tube d'acier ou d'une structure en treillis, qui a pour rôle de soutenir l'ensemble de l'éolienne (rotor + nacelle). Sa hauteur est optimisée pour capter efficacement l'énergie cinétique du vent tout en réduisant les interférences au niveau du sol.

Il existe plusieurs types de mâts utilisés dans la construction d'éoliennes, chacun présentant des caractéristiques spécifiques adaptées à différentes applications :

- **Mâts en acier tubulaire** : ces mâts sont composés de sections tubulaires en acier assemblées sur place. Ils offrent une construction robuste et sont souvent utilisés pour les éoliennes terrestres de moyenne à grande taille.
- **Mâts en béton** : les mâts en béton sont fabriqués en coulant du béton armé dans des moules sur place. Ils sont généralement utilisés pour les éoliennes terrestres de taille moyenne et grande .
- **Mâts en acier hybride** : ces mâts combinent des sections en acier tubulaire avec des parties en béton préfabriqué.
- **Mâts en treillis** : les mâts en treillis sont constitués de sections d'acier assemblées en treillis, ce qui les rend légers, mais néanmoins robustes. Ils sont principalement utilisés pour les éoliennes offshore en raison de leur facilité de transport et d'installation en mer.



Figure I-3 : Mâts tubulaire d'un parc éolien



Figure I-4 : Mâts en treillis.

2. **La nacelle**: cette structure est supportée par le mat et comprend tous les composants mécaniques nécessaires pour connecter le rotor au générateur électrique. Elle inclut divers composants importants:

- ❖ **L'arbre**: est le composant qui relie le moyeu du rotor au multiplicateur et comporte un mécanisme de freinage aérodynamique hydraulique intégré.
- ❖ **Le multiplicateur** : ajuste la vitesse de rotation de l'éolienne pour correspondre aux exigences du générateur électrique.

- ❖ **Le générateur** : sa fonction est de convertir l'énergie mécanique produite par l'éolienne en énergie électrique.
- ❖ **Les roulements** : ils assurent le bon fonctionnement et une rotation fluide des différentes parties de l'éolienne.
- 3. **Le rotor** : est constitué de pales fixées à un moyeu. Ces pales sont conçues pour être robustes, légères et résistantes aux conditions météorologiques.

Ces éléments interagissent de manière coordonnée, permettant à l'éolienne de capter efficacement l'énergie éolienne et de la transformer en électricité de façon durable et performante [24].

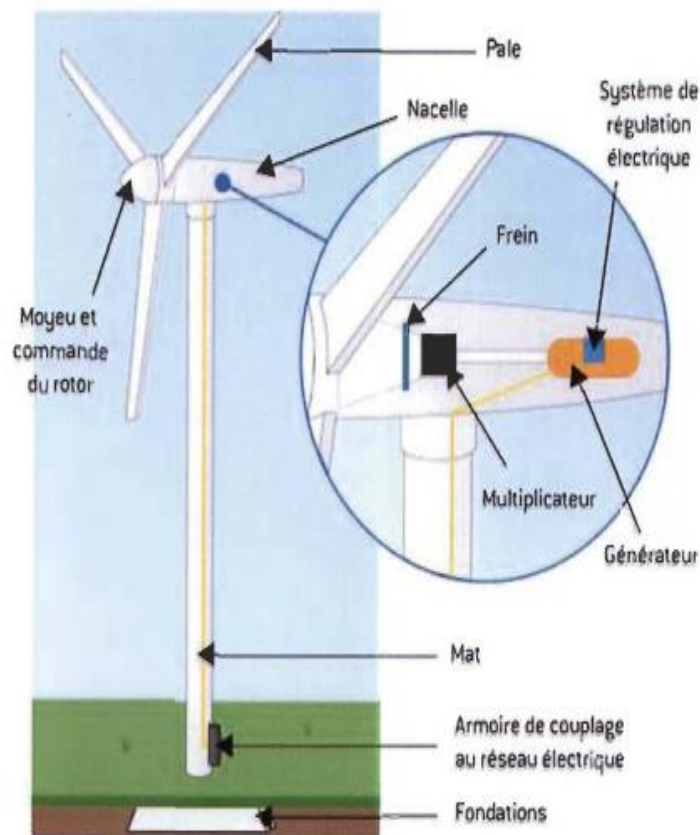


Figure I-5: Éléments Clés d'une Installation Éolienne[25].

I.3.3 Les différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'axe des pales, les éoliennes se répartissent en deux catégories [26] :

- ❖ Les éoliennes à axe horizontal
- ❖ Les éoliennes à axe vertical

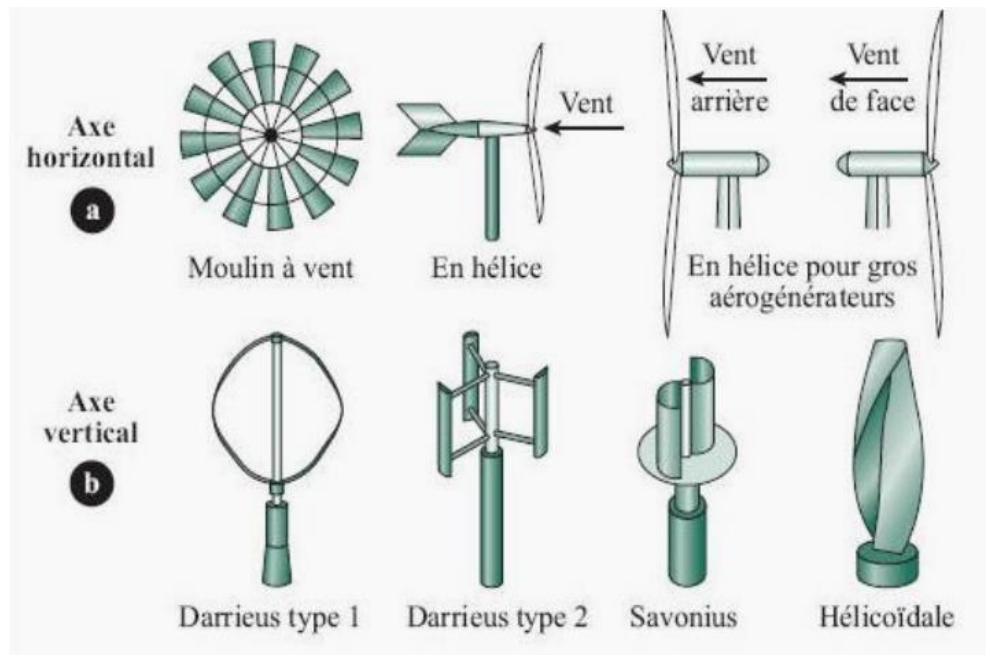


Figure I-6 : Différents Modèles d'Éoliennes selon l'Axe [27]

I.3.3.1 Éolienne à axe vertical

- ❖ Les premiers dispositifs pour la production d'électricité étaient des éoliennes à axe vertical, dotées d'un axe de rotation qui est perpendiculaire à la direction du vent et vertical au sol. Plusieurs prototypes ont été testés, mais jusqu'à présent, seuls deux d'entre eux ont été industrialisés.
- ❖ **Rotor SAVONIUS** : est principalement composé de deux demi-cylindres positionnés avec leurs axes délibérément mal alignés [28]. Son fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différenciée, où le vent exerce des forces d'intensité variable de chaque côté de la structure, entraînant ainsi un mouvement rotatif [29].

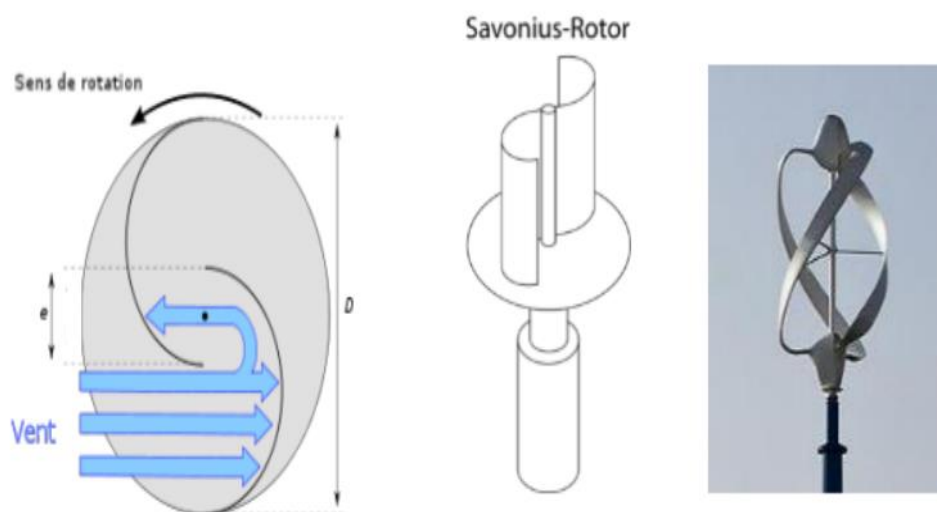


Figure I-7: Éolienne Savonius à Axe Vertical [30].

- ❖ **Rotor DARRIEUS** : fonctionne sur le principe de changement cyclique d'angle d'attaque. Dans cette configuration, un profil et exposé au flux d'air est positionné à différents angles, ce qui entraîne des forces variables dans différentes directions et intensités. Ces forces se combinent pour générer le couple moteur qui propulse la rotation du dispositif [31].

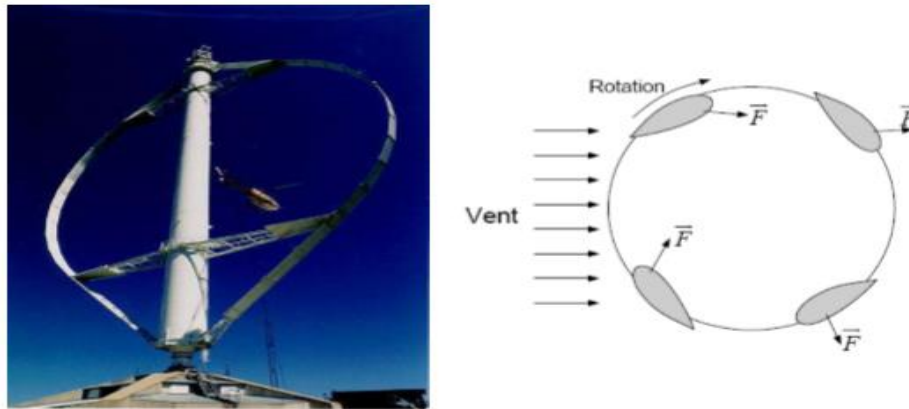


Figure I-8 : Éolienne Darrieus à Axe Vertical [30].

I.3.3.2 Éoliennes à axe horizontal

L'industrie éolienne est largement dominée par l'emploi courant des éoliennes à axe horizontal, influencées par le concept traditionnel des moulins à vent. Ces éoliennes sont équipées de pales conçues pour maximiser la production de couple. Cela entraîne la rotation de l'éolienne. Les modèles à trois pales sont les plus largement adoptés. Cette configuration particulière favorise l'optimisation du coefficient de puissance, tout en maintenant un équilibre entre les coûts de production et l'efficacité de la capture du vent. En conséquence l'adoption d'un rotor à trois pales augmente l'efficacité de la production d'énergie éolienne en améliorant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utilisable [31].



Figure I-9: Schéma d'une Éolienne à Axe Horizontal.

Dans le contexte actuel, il y a deux catégories distinctes d'éoliennes à axe horizontal, en fonction de l'orientation du vent par rapport aux pales et à la nacelle. (Figure I-10).

La première catégorie comprend les éoliennes où le vent souffle directement le devant des pales, dirigé vers la nacelle située en amont. Dans ce cas, le vent est capté en amont des pales, ce qui permet une interaction plus directe avec le système de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.

La deuxième catégorie rassemble les éoliennes qui captent le vent sur l'arrière des pales, celui-ci provenant de la nacelle, et qui sont généralement désignées sous le terme éoliennes à vent en aval. Cette configuration présente des avantages particuliers en matière de conception et de performance aérodynamique. Elle permet d'optimiser le rendement énergétique en exploitant de manière efficace les caractéristiques aérodynamiques du flux d'air autour des pales.

Ces deux types d'éoliennes à axe horizontal adoptent des méthodes différentes pour convertir l'énergie éolienne en électricité, prenant en compte la direction du vent et son interaction avec les pales.

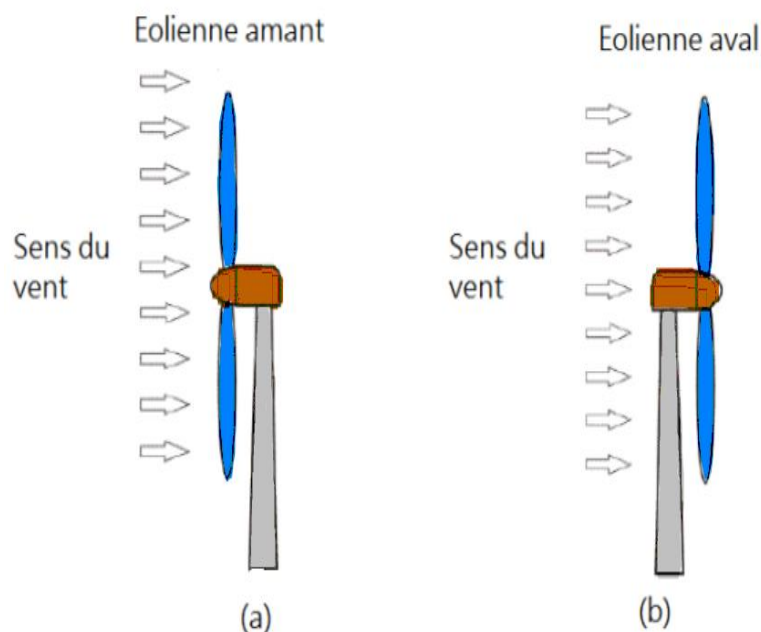


Figure I-10 : schéma des éoliennes orientées amont et aval.

A. Les types des éoliennes à axe horizontal :

1. Éoliennes à vitesse fixe

La puissance de ces éoliennes est remarquable, car elles utilisent une machine asynchrone à cage directement connectée au réseau électrique. Cette machine fonctionne avec une vitesse de rotation Ω Sync (1-g), où g représente le glissement, dont la valeur est inférieure à zéro. De plus, elle est liée à un multiplicateur de vitesse, ce qui permet de préserver une vitesse de rotation des turbines assez stable (Figure I.11). L'ajustement de l'orientation des pales est géré par ce que l'on nomme le système de

contrôle du pas. Parfois, ce type d'équipement comprend un convertisseur fixe qui limite l'ampleur du courant consommé lorsqu'il est connecté au réseau. Une batterie de condensateurs est utilisée pour compenser l'énergie consommée en raison de l'effet de magnétisation.

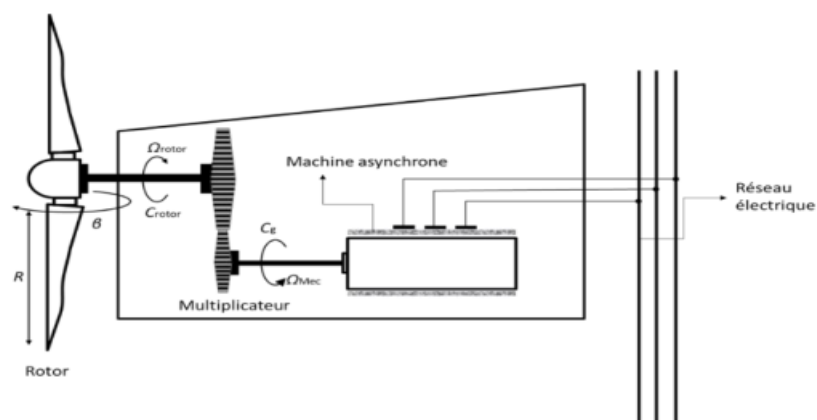


Figure I-11 : Éolienne à vitesse fixe [32]

Cette approche technologique particulière se distingue par trois d'avantages : une durabilité élevée, une fiabilité et une conception simplifiée. De plus, son principal atout est la capacité de se connecter directement au réseau électrique sans avoir besoin d'un système de stockage. Cette caractéristique est révélatrice de ses faibles coûts de production. Toutefois, il est important de souligner que la puissance de sortie de ce type d'éolienne n'est pas entièrement optimisée et qu'elle n'atteint son efficacité maximale qu' à une vitesse de vent particulière, appelée « vitesse de conception ».

2. Éolienne à vitesse variable :

Actuellement, cette technologie est proposée en deux configurations différentes, dont la première utilise une machine à cage asynchrone. Comme le montre la figure (I.12) dotée d'un stator contrôlé par des convertisseurs statiques, permettant une opération à vitesse variable. La seconde configuration utilise une machine asynchrone à double alimentation combinée à un rotor bobiné, comme décrit dans la figure (I.13). Cette méthode est caractérisée par la régulation de la vitesse à l'aide de convertisseurs de puissance intégrés dans le circuit du rotor, offrant une flexibilité dans la gestion de la vitesse [32].

Les éoliennes à axe horizontal avec des capacités de variation de vitesse présentent l'avantage significatif de générer une puissance optimale sur une large gamme de vitesses de vent. Toutefois, cette flexibilité comporte certains inconvénients, comme le fait de ne pas pouvoir être directement connectée au réseau. Cela nécessite la mise en place d'un système de régulation et de stockage énergétique fiable et efficace.

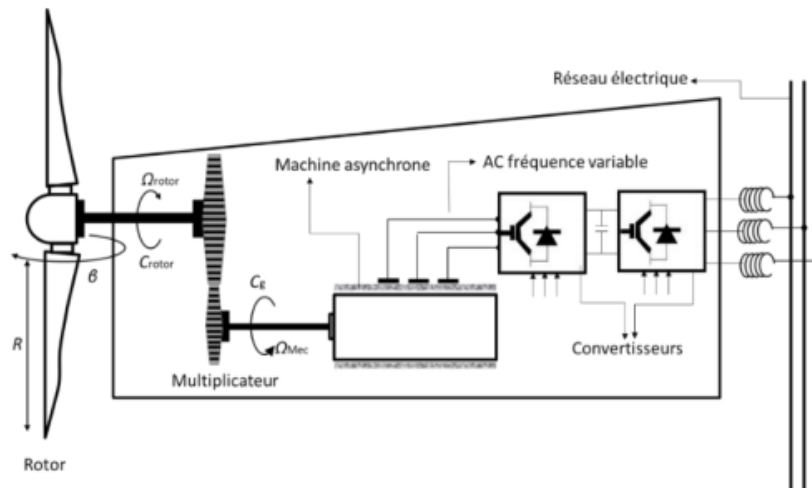


Figure I-12: Représentation de l'éolienne à vitesse variable : machine asynchrone à cage[32]

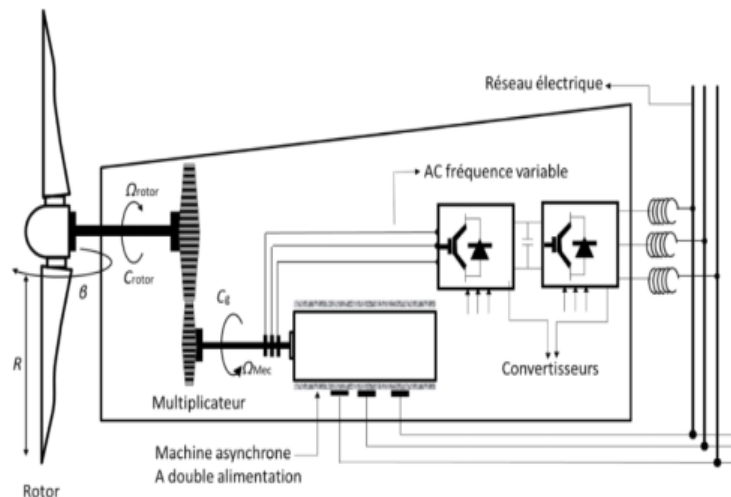


Figure I-13: Représentation de l'éolienne à vitesse variable machine asynchrone à double alimentation[32].

B. Les Systèmes de contrôle des éoliennes à axe horizontal

1. Contrôle de calage des pales :

La configuration de l'orientation des pales s'appuie sur un capteur électronique qui contrôle en permanence. Si cette puissance dépasse un seuil de sécurité prédéfini, un mécanisme intégré aux pales entre en action, les faisant pivoter par rapport à leur axe longitudinal vers une position hors du vent. Ce mécanisme, doté d'une conception intelligente, peut être actionné soit par un système électronique, soit par un système hydraulique.

2. Contrôle de décrochage passif :

Dans le système de contrôle de décrochage passif, les pales sont fabriquées avec une légère torsion le long de leur axe longitudinal et sont attachées directement au moyeu selon un angle spécifique étudié. Lorsque la vitesse du vent dépasse un seuil de sécurité prédéfini, l'angle d'attaque des pales est ajusté, où la force de portance sur les pales cesse progressivement de maintenir leur rotation. La conception des pales garantit dans ce cas un décrochage progressif lorsque la vitesse du vent atteint sa valeur critique.

3. Contrôle de décrochage actif :

Cette approche, appelée contrôle de décrochage actif, est principalement mise en œuvre dans les éoliennes de forte puissance. Le système utilise une machine à vitesse ajustable reliée aux pales. Lorsque la vitesse du vent diminue, il modifie la position des pales pour garantir un couple moteur adéquat, similaire à un système de contrôle de calage, mais avec un nombre limité de positions. En revanche, lorsque la vitesse du vent augmente et que l'éolienne atteint sa puissance nominale, une méthode différente est adoptée. Pour réduire la charge, l'angle d'attaque des pales est augmenté, provoquant un décrochage plus important qui dissipe l'excès d'énergie éolienne.

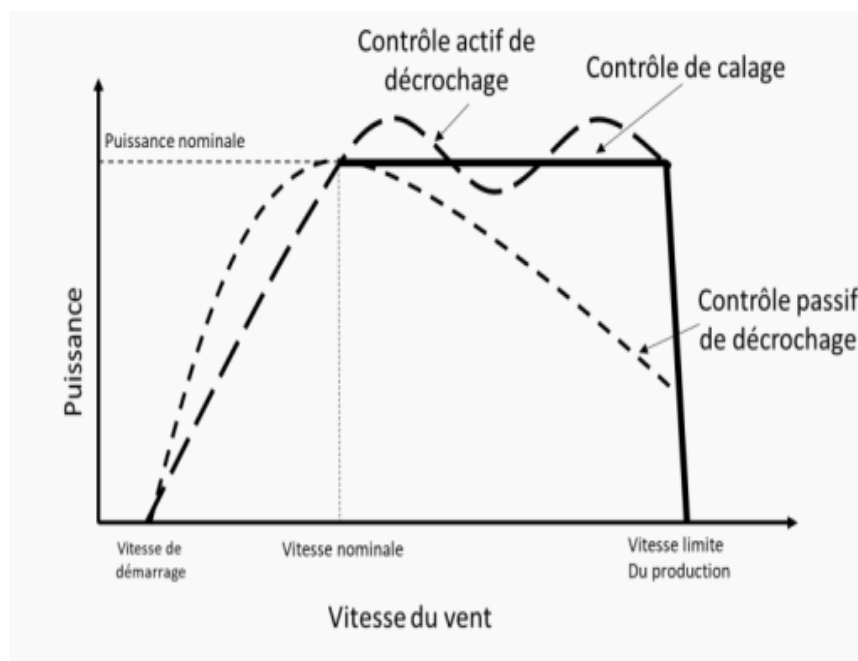




Figure I-14: Courbe de puissance avec contrôle

I.3.4 Comparison

Le tableau I.1 examine les avantages et inconvénients de chaque type d'éolienne, en prenant en compte le contexte actuel. Les éoliennes à axe horizontal se distinguent sur le marché grâce à leurs performances élevées et à leur capacité à exploiter des vents forts. Elles sont considérées comme plus performantes que les éoliennes à axe vertical. Toutefois, en ce qui concerne des aspects tels que l'esthétique, la maintenance et l'utilisation de l'espace, l'éolienne à axe vertical présente des avantages. Elle est plus adaptée aux applications domestiques où l'aspect visuel, la facilité d'entretien et l'utilisation d'un espace réduit sont des considérations importantes. Ainsi le choix entre une éolienne à axe horizontal et une à axe vertical dépendra donc des critères spécifiques. [33].

Tableau I.1: Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et vertical[33].

| Types des éoliennes | Avantages | inconvénients |
|--|---|--|
| Éoliennes à axe horizontal  | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Rendement aérodynamique élevé ❖ Accès au vent fort ❖ Autodémarrage possible | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Coût d'installation élevé ❖ Moins résistante aux vents forts. ❖ Bruit |
| Éoliennes à axe vertical  | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Sa conception est basique, robuste et son entretien minimal. ❖ appropriées pour les applications sur le toit de l'immeuble ❖ Coût d'installation réduit | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Faible rendement ❖ Fortes vibrations mécaniques ❖ Complexité technique |

I.3.5 Classification des turbines éoliennes

Les éoliennes peuvent être catégorisées en fonction de leur puissance nominale en trois principales classes :

- Éoliennes de faible puissance : avec une puissance nominale ne dépassant pas 40 kW.
- Éoliennes de puissance intermédiaire : dont la puissance nominale varie entre 40 kW et plusieurs centaines de kW.
- Éoliennes de grande puissance : caractérisées par une puissance nominale excédant 1 MW.

Le tableau suivant classe les turbines en fonction de leur capacité de production d'énergie et de la taille de leur rotor [34].

Tableau I.2: Classifications des éoliennes : puissance et dimensions du rotor [34].

| Échelle | Puissance d'hélice | Diamètre de l'hélice |
|---------|--------------------|----------------------|
| Petite | Moins de 40 KW | Moins de 12 m |
| Moyenne | De 40 KW a 999 KW | 12 m à 45 m |
| Grande | 1 MW et plus | 46 m et plus |

I.3.5 Fonctionnement de la conversion d'énergie éolienne

La conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité constitue le principe fondamental du système éolien, où les pales jouent un rôle essentiel dans ce processus. Cette conversion est réalisée par les pales de l'éolienne. Par la suite, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique par un générateur. La liaison entre la turbine éolienne et le rotor du générateur est assurée par une transmission mécanique. Ensuite, la connexion entre le générateur et le réseau peut se faire de deux manières différentes : on peut établir une connexion directe entre le générateur et le réseau électrique, ou utiliser une interface d'électronique de puissance pour cette connexion. Ces options visent à optimiser la conversion de l'énergie éolienne en électricité et à l'intégrer efficacement dans le réseau électrique [35].

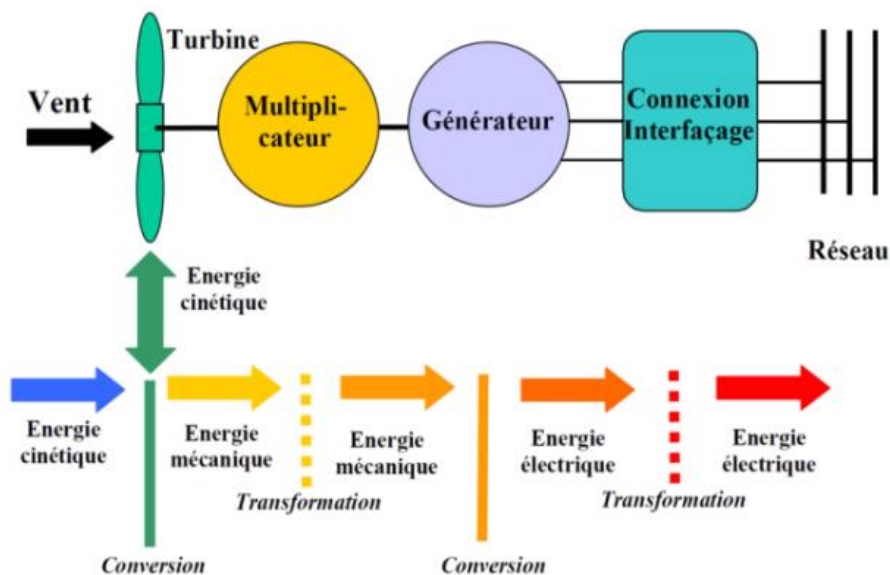


Figure I-15: Étapes de la Conversion de l'Énergie Éolienne[36].

I.3.6 Zones de fonctionnement des éoliennes

La figure (I.16) illustre les différentes phases de fonctionnement d'une éolienne. Dans la zone I, la puissance générée est très faible, ce qui limite la production d'électricité. En zone II, l'éolienne utilise efficacement la puissance maximale de sa turbine. La zone III correspond à une plage où la puissance est stabilisée au niveau nominal de la chaîne de conversion énergétique. Enfin, la zone IV concerne des conditions de vent très intenses, où l'objectif est de désaccoupler complètement l'éolienne du vent.

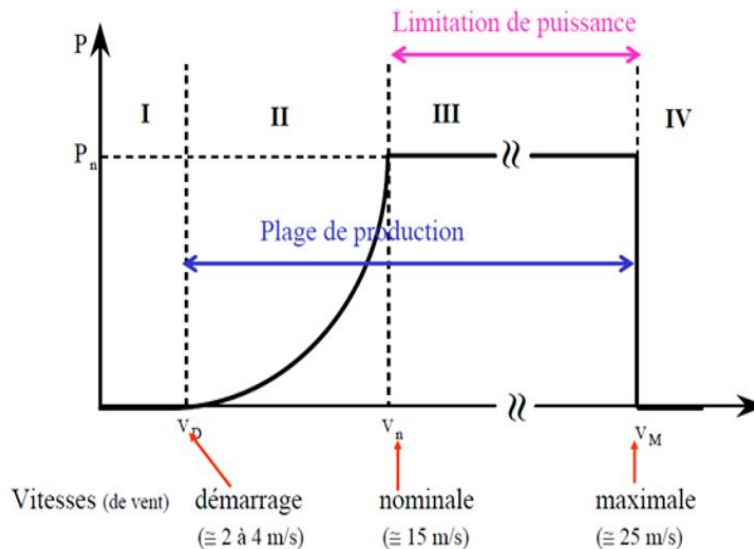


Figure I-16: Profil de production énergétique d'une éolienne [36].

I.4 Critères de sélection de site pour l'installation d'éoliennes

Lorsqu'on envisage l'installation d'une éolienne, il est crucial de considérer plusieurs éléments déterminants. Premièrement, il est essentiel d'analyser les caractéristiques du vent, notamment sa vitesse et sa direction, pour assurer l'adéquation du site avec les exigences d'un projet éolien. En outre, les restrictions environnementales et réglementaires doivent être soigneusement examinées et respectées.

I.4.1 La disponibilité du vent

La performance de l'éolienne est influencée par sa position et la puissance s'accroît proportionnellement avec la vitesse du vent. Les lieux d'installation sont sélectionnés en tenant compte de la vitesse et de la fréquence du vent, en recourant à des techniques comme la distribution de Weibull (figure I.17). Les variations annuelles de la direction du vent jouent un rôle crucial dans la performance et la conception des éoliennes (figure I.18).

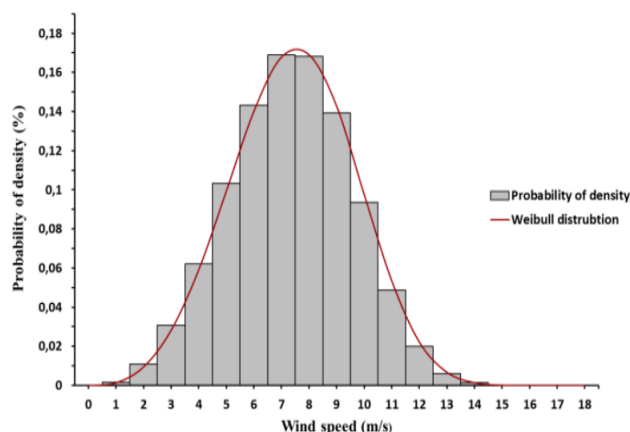


Figure I-17 : Analyse de la Distribution de Weibull [37].

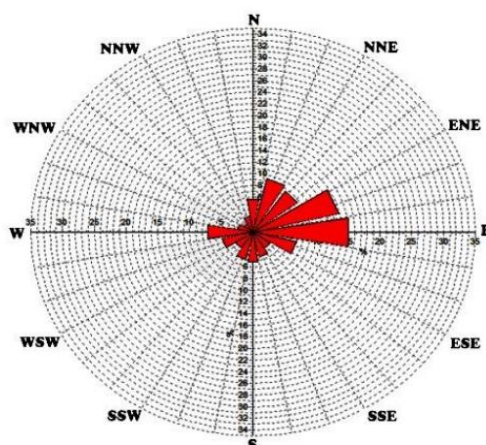


Figure I-18: Représentation de la rose du vent [37].

I.4.1.1 Extrapolation verticale des paramètres du vent

La vitesse du vent est calculée à une hauteur de 10 mètres, conformément aux normes établies par les services météorologiques, ce qui implique souvent la nécessité d'extrapoler cette valeur à d'autres hauteurs d'intérêt, telles que la hauteur du rotor d'une éolienne. Pour ce faire, deux méthodes principales sont couramment employées :

➤ **Loi logarithmique :**

Le profil logarithmique est établi en se basant sur le rapport du profil vertical du vent. Pour extrapoler la vitesse mesurée V_1 d'un point Z_1 à un niveau Z_2 , cela se formulerait ainsi :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right) - \psi_m\left(\frac{Z_1}{L}\right)}{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{Z_2}{L}\right)} \quad (\text{I.1})$$

Avec

- Ψ_m : fonction universelle
- Z_0 : rugosité du sol, m.

Sous des conditions neutres, où la fonction universelle est nulle, l'équation précédente se simplifie en :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)} \quad (\text{I.2})$$

➤ Loi de puissance

L'extrapolation de la vitesse du vent et des paramètres de la distribution de Weibull peut être réalisée comme suit :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^n \quad (\text{I.3})$$

La relation suivante est proposée par Reed pour extrapoler la vitesse du vent d'un niveau 1 à un niveau 2, selon Justus et Mikhail ::

$$V_2 = \alpha V_1^\beta \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$$\alpha = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^{0,27960+0,03265\ln Z_1} \quad (\text{I.5})$$

$$\beta = 0,90169 + 0,10528\ln Z_1 - 0,05502\ln Z_2 - 0,006424 \frac{\ln Z_1}{\ln Z_2} \quad (\text{I.6})$$

I.4.2 la classe du vent

Évaluer la classe de vent est une étape clé dans la planification de l'implantation d'une ferme éolienne. Cette classification détermine quelle éolienne est appropriée aux conditions de vent moyennes à un endroit spécifique. Les classes de vent sont déterminées principalement en analysant la vitesse moyenne annuelle du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne, ainsi que l'intensité des turbulences et la vitesse des rafales de vent extrêmes potentielles sur le site, sur une période de 50 ans [38].

Selon les directives émises par la Commission électrotechnique Internationale (CEI) (Tableau.II.3), la classification des éoliennes en trois classes de vent différentes est établie [38]. Cette classification, telle que décrite dans la référence [39], est la suivante :

-

Tableau I 3: Critères de Classement Éolien (IEC) [39].

| Classe d'éolienne | IEC I haut vent | IEC II vent moyen | IEC III basse vent |
|--|-----------------|-------------------|--------------------|
| Vitesse de vent moyen annuel | 10 m/s | 8.5 m/s | 7.5 m/s |
| Intensité de turbulence | 18% | 18% | 18% |
| Extrême vitesse mesurée de vent aux 50 ans | 70 m/s | 59.5 m/s | 52.5 m/s |

I.4.3 La nature du sol

La fondation d'une éolienne doit être conçue pour résister aux conditions particulières du sol présentes sur le site d'installation et pour supporter le poids et les charges de l'éolienne. Le cas des terrains meubles revêt à cet égard une importance particulière. Ce critère a un impact important sur le coût global de pose, notamment si le sol est instable et nécessite un renforcement supplémentaire à l'aide de pieux.[38]

I.4.4 La nature de profil de site :

Les différences de température et de pression atmosphérique engendrent le vent, dont le comportement varie selon les particularités du terrain, ainsi que par la présence d'obstacles et d'aspérités du terrain qui peuvent à la fois gêner sa circulation et modifier sa direction. De plus, les plaines sont connues pour leurs vents forts en raison de leur manque d'obstacles, et les cols de montagne sont également connus pour leurs vitesses de vent élevées qui résultent du vent qui les traverse à haute altitude. Ainsi, pour maintenir une vitesse et une direction du vent optimales, les éoliennes sont idéalement installées dans des zones plates ou à des altitudes plus élevées [38].

I.4.5 La position de site :

La proximité du réseau électrique et des installations de stockage d'énergie revêt une importance capitale dans la planification de l'installation d'éoliennes, ces derniers étant plus pertinents en termes de coûts d'installation [38]. Généralement, la distance entre les éoliennes et les zones résidentielles est d'environ 500 mètres, ils sont inaudibles ou à peine audibles et le bruit du vent masque souvent leur bruit.

I.5 Conclusion

Ce chapitre a débuté par un aperçu historique et une exploration de l'évolution de l'énergie éolienne à travers le monde. Ensuite, nous avons brièvement décrit les composants essentiels des éoliennes et exploré les concepts fondamentaux nécessaires pour comprendre la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Nous avons aussi étudié les divers types d'éoliennes, notamment les modèles à axe vertical et à axe horizontal, et nous avons effectué une analyse comparative entre ces deux catégories. Par ailleurs, les différentes phases de fonctionnement d'une éolienne ont été exposées. Dans le prochain chapitre, nous nous focalisons principalement sur l'étude aérodynamique du rotor éolien ainsi que sur les principes et les théories employés pour les calculs aérodynamiques du rotor éolien.

CHAPITRE II :

ÉTUDE AÉRODYNAMIQUE DU ROTOR ÉOLIEN À AXE HORIZONTAL

II.1 Introduction

La pale de l'éolienne est une partie importante et nécessaire de l'éolienne, et sa conception doit être basée sur une étude aérodynamique approfondie. La conception d'éoliennes nécessite une modélisation en soufflerie pour créer un modèle aérodynamique de la pale. Ce chapitre débute en abordant la modélisation géométrique aérodynamique du rotor éolien, suivie de l'exposition des théories aérodynamiques utilisées pour estimer les forces exercées sur le rotor.

II.2 Description géométrique et aérodynamique du rotor

Le composant principal d'une éolienne est le rotor, qui se définit par sa géométrie et les qualités aérodynamiques de ses pales. La conception exacte du rotor est représentée à la figure (II.1).

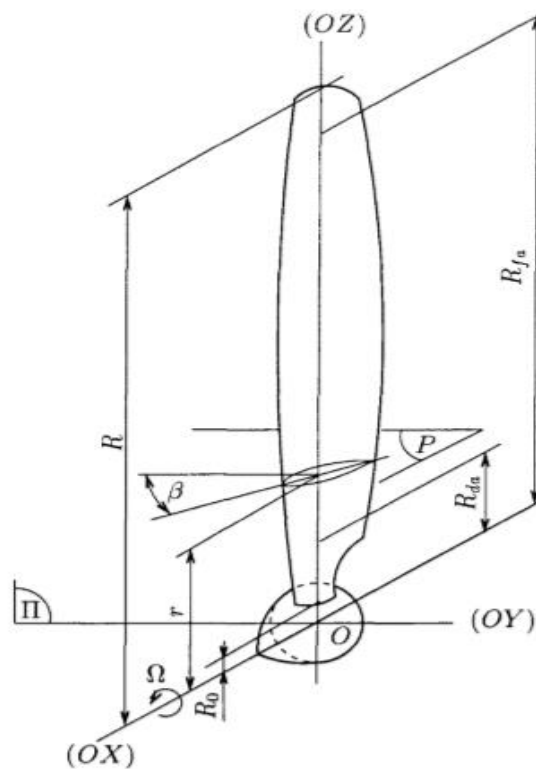


Figure II-1 : Description géométrique d'un rotor [40]

(axe OX) : l'axe autour duquel tourne le rotor,

(axe OZ) : l'axe sur lequel une pale tourne pour ajuster son angle de calage β ,

Voici les paramètres qui déterminent la forme du rotor [41] :

- ❖ Le profil des pales exp NACA, EPPLER
- ❖ Le rayon extérieur du rotor R
- ❖ Le rayon du moyeu R_0
- ❖ Le NP qui possède le rotor

- ❖ Le calage des pales
- ❖ La variation de la corde L et du vrillage en fonction de l'envergure d'une pale, ainsi que la disposition et le positionnement des pales.

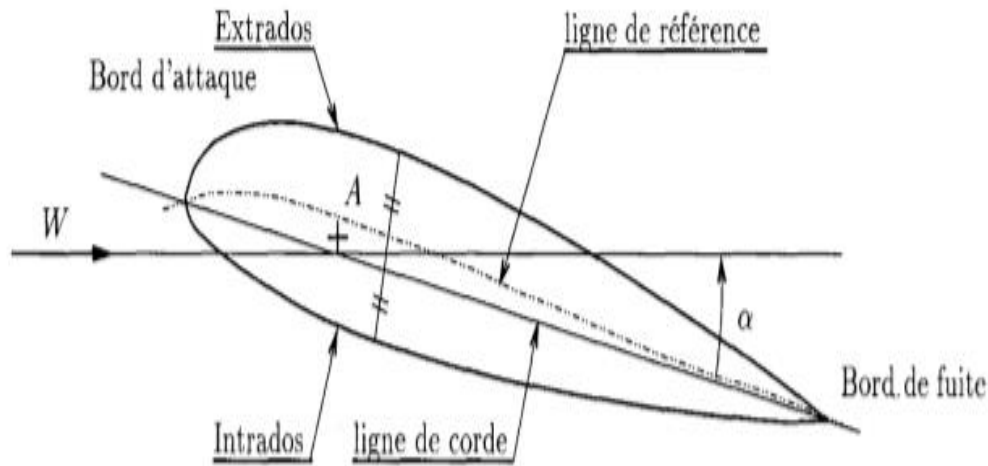


Figure II-2 : Illustration du profil aérodynamique d'une pale [40]

Les propriétés aérodynamiques d'un rotor sont établies de la manière suivante [41] :

- ✚ Les caractéristiques du profil soulignent la relation entre les coefficients aérodynamiques de portance (C_L), de traînée (C_D) et de moment de tangage (C_M) en fonction de l'angle d'attaque (α).
- ✚ Lorsqu'on considère une pale dont la zone aérodynamique est incluse entre R_o et R , cette zone commence par le début R_{da} et se termine par la fin R_{fa} .
- ✚ L'envergure du foyer aérodynamique A , défini comme le point où le moment résultant des forces aérodynamiques est équilibré, est sujette à des variations temporelles.

II.3 Aérodynamique de rotor

Les concepts aérodynamiques appliqués aux pales des turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT) partagent principalement des similitudes avec ceux des ailes traditionnelles. Cependant, des variations spécifiques existent, influençant l'aérodynamique et l'aéroélasticité du rotor, ce qui engendre des défis complexes [41].

Lorsqu'un profil aérodynamique pivote autour d'un axe, il crée une force de portance perpendiculaire à la direction de l'écoulement, ainsi qu'une force de traînée qui s'aligne avec cette direction. (Figure II.3).

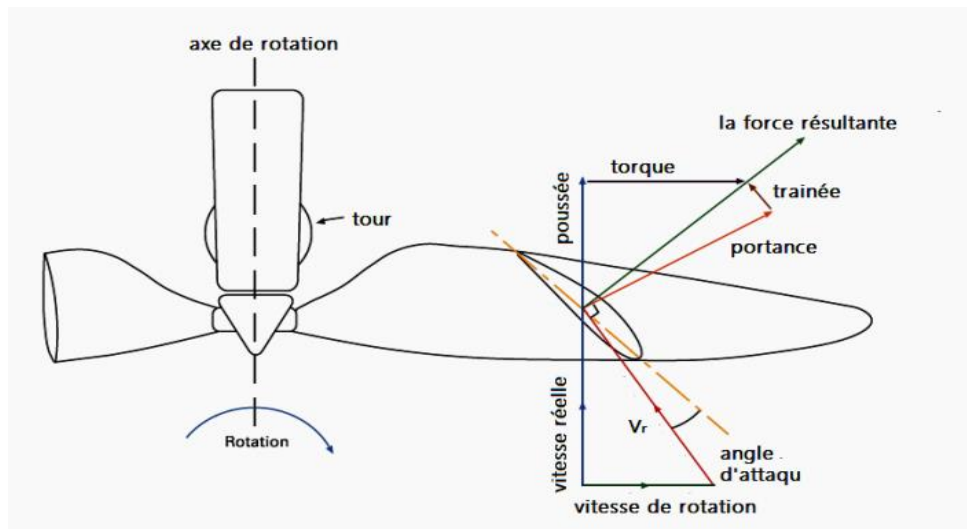


Figure II-3 : Profil des vitesses d'écoulement sur le rotor éolien [41]

Chaque segment (élément) d'une pale d'éolienne à axe horizontal possède un angle d'attaque déterminé, où la production d'électricité dépend surtout du couple. L'angle d'attaque (AoA) évolue le long de la pale, selon la vitesse réelle du vent (V_0) et la composante périphérique de la vitesse du vent (V_r), qui est générée par la rotation du rotor figure II.4. Par conséquent, les pales sont conçues avec une torsion structurelle pour compenser ce changement d'angle d'attaque.

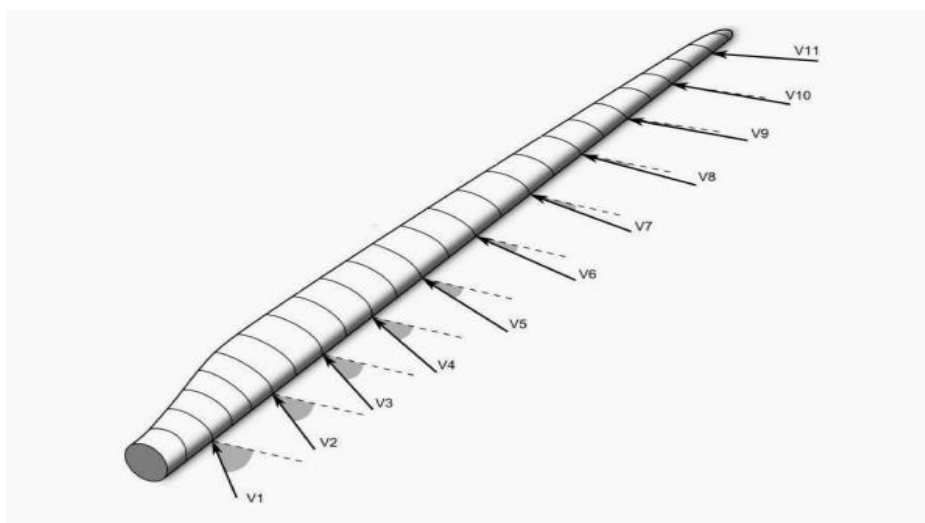


Figure II-4 : Représentation de la pale segmentée [41]

II.4 La théorie de Froude-Rankine

Pendant l'évaluation des performances d'un rotor, les experts s'appuient généralement sur le théorème de Froude-Rankine comme outil analytique de base. Cette formule tient compte de la façon dont le déplacement de la pression du fluide à travers le rotor affecte la vitesse en aval. Le rotor lui-même est représenté comme un disque perméable qui accélère le flux. Elle repose sur l'hypothèse d'un flux unidimensionnel, incompressible et constant traversant le rotor. Lorsque le vent s'écoule à travers le

rotor des éoliennes, le diamètre du flux d'air autour du disque augmente progressivement de haut en bas, conformément aux prévisions de l'équation de continuité .

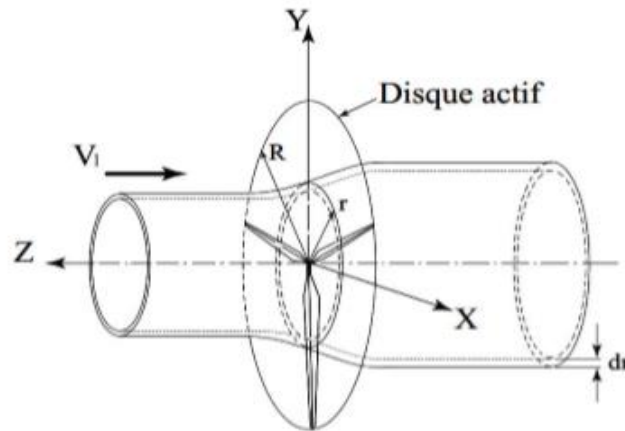


Figure II-5: Application d'un disque perméable dans le rotor éolien[41]

La définition d'un disque actif est une surface qui contient de multiples irrégularités qui affectent l'écoulement. De plus, ce modèle repose sur les hypothèses suivantes: [42,43,44]

- Le remplacement de la géométrie du rotor s'effectue en utilisant un disque de diamètre D et d'épaisseur négligeable.
- Le fluide ne subit aucune compression et ne présente aucune viscosité.
- V_1 est uniforme lorsqu'il atteint l'amont infini. De même pour les vitesses de V_d sur le plan du disque ainsi que celle de la veine infinie d'aval appelée V_2 qui sont toutes deux également uniformes et axiales.
- L'écoulement possède deux composantes d'énergie spécifiques : cinétique et potentielle de pression.

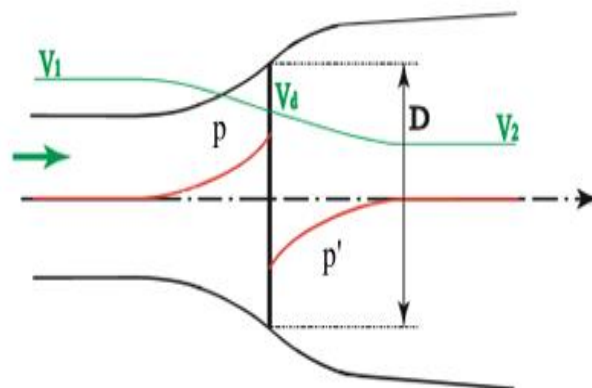


Figure II-6 : Écoulement au travers le disque actif

Le facteur d'induction est :

$$V_d = (1 - a)V_1 \quad (\text{II.1})$$

En appliquant l'équation de continuité, on peut formuler :

$$\rho A_1 V_1 = \rho A_d V_d = \rho A_2 V_2 \quad (\text{II.2})$$

La variation de pression est la suivante:

$$(P - P') A_d = (V_1 - V_2) \rho A_d V_d \quad (\text{II.3})$$

On a aussi :

$$V = V (1 - a) \quad (\text{II.4})$$

Alors :

$$(P - P') A_d = (V_1 - V_2) \rho A_d V_1 (1 - a) \quad (\text{II.5})$$

Nous pouvons utiliser l'équation de Bernoulli pour déterminer la variation de pression $(P - P')$.

A l'amont ,

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P + \frac{1}{2} \rho V_d^2 \quad (\text{II.6})$$

A l'aval,

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 = P' + \frac{1}{2} \rho V_d^2 \quad (\text{II.7})$$

D'où :

$$\Delta P = P - P' = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.8})$$

A partir des équations (II.1), (II.5) et (II.7) on trouve que :

$$V_2 = (1 - 2a) V_1 \quad (\text{II.9})$$

L'équation suivante représente la force appliquée sur le disque actif :

$$F_{\text{force}} = (P - P') A_d = 2 \rho A_d V_1^2 a (1 - a) \quad (\text{II.10})$$

Le disque reçoit une puissance exprimé par :

$$P = F_{\text{force}} V_d = 2 \rho A_d V_1^3 a (1 - a) \quad (\text{II.11})$$

Le facteur de force est défini en fonction de la force transférée au disque actif et d'une valeur de référence égale à celle produite par les vents de surface traversant la même zone du disque actif :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} V_1^3 a (1-a)} = \frac{2 A_d V_1^3 a (1-a)^2}{\frac{1}{2} V_1^3 a (1-a)} \quad (\text{II.12})$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (\text{II.13})$$

La force appliquée sur l'actionneur du disque en raison de la diminution de pression, telle qu'exprimée dans l'équation (II.10), peut également être convertie en coefficient de poussée C_T en effectuant une analyse dimensionnelle.

$$C_T = \frac{P}{\frac{1}{2} V_1^2 A_d} \quad (\text{II.14})$$

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (\text{II.15})$$

Dans la représentation graphique des équations (II.13) et (II.15), on peut voir la variation du facteur de puissance en fonction du facteur de poussée, comme indiqué dans la figure (II.7).

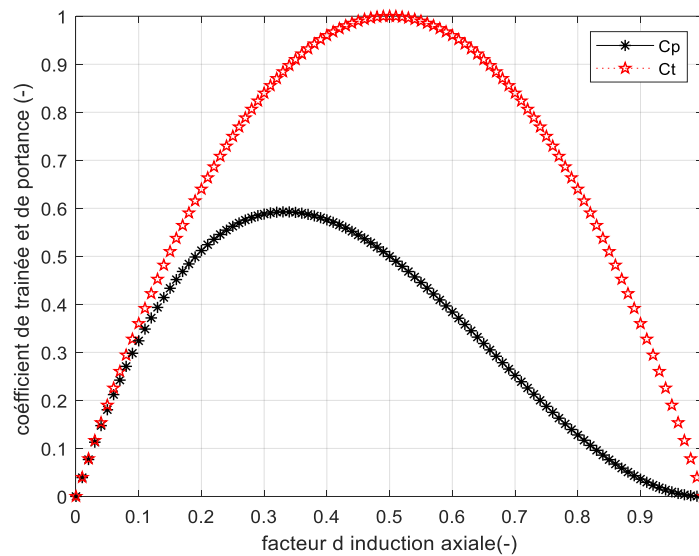


Figure II-7 : La variation de C_p et C_t en fonction du facteur d'induction a

II.4.1 Limite de Betz

Il est impossible pour une éolienne d'absorber toute l'énergie du vent compte tenu de la vitesse qui persiste en aval du rotor. Cependant, une partie de cette énergie cinétique du vent est perdue car elle n'est pas capturable.

La valeur maximale théorique du coefficient de puissance, limite de Betz, est calculée C_p/a :

$$\frac{dC_p}{da} = 4a(1-a)(1-3a) = 0 \quad (\text{II.16})$$

Ce qui donne :

$$a = \frac{1}{3} \quad (\text{II.17})$$

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.59259 \quad (\text{II.18})$$

Autour de 59,3 % représente le taux de rendement maximal envisageable pour une éolienne idéale.

Le rendement ne peut être atteint dans la pratique en raison des effets suivants [45].

- Un flux d'air rotatif est créé par la rotation du rotor.
- En raison des frictions, la force de traînée ne peut jamais être réduite à zéro.
- Le nombre de pales dans l'hélice est défini.

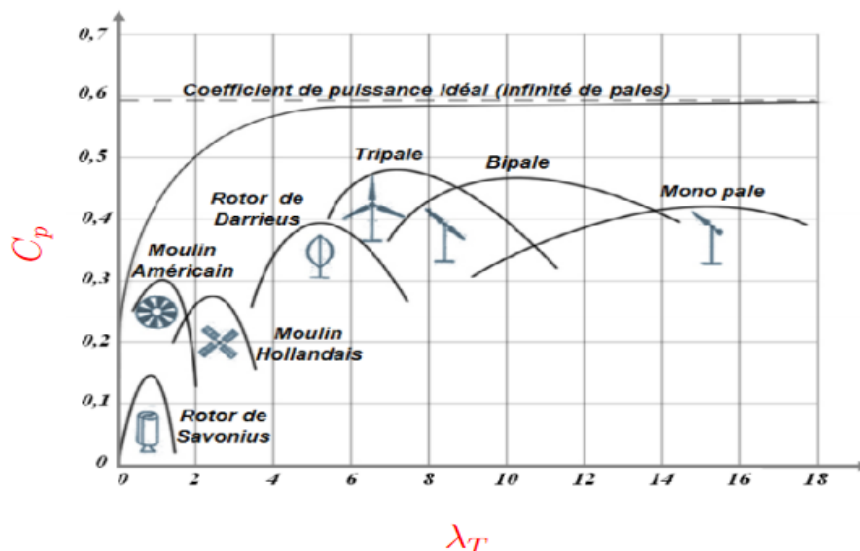


Figure II-8 : Comparatif des performances énergétiques entre diverses technologies éoliennes [46]

En général, les éoliennes à faible régime de rotation possèdent un nombre important de pales, qui se situe souvent entre 20 et 40. En raison de leur rendement élevé, leur diamètre se rétrécit à environ huit mètres. Se référant à la figure (II.8), l'efficacité de ces turbines augmente fortement pendant l'accélération et diminue fortement par la suite.

Les éoliennes rapides sont maintenant très répandues et la plupart d'entre elles sont utilisées uniquement pour la production d'électricité. Ces turbines ont généralement une à trois pales fixes ou ajustables pour contrôler la rotation. Pour les éoliennes de plusieurs mégawatts, les pales peuvent mesurer jusqu'à 45 mètres de long [47].

II.4.2 Stratégies innovantes pour dépasser la limite de Betz dans la conception des éoliennes

Dépasser la limite de Betz représente un défi majeur dans la conception des éoliennes, encourageant ainsi l'exploration de diverses techniques et stratégies pour contourner cette contrainte. Voici un aperçu de quelques-unes de ces approches :

1. **Venturi** : une méthode consiste à intégrer un dispositif Venturi autour de l'éolienne, favorisant ainsi l'accélération du flux d'air à travers le rotor. Cela se traduit par une augmentation de la puissance récupérée.

2. **Circulation autour du profil annulaire** : une alternative envisagée implique l'utilisation d'un profil aérodynamique annulaire pour envelopper le rotor, engendrant ainsi une circulation d'air qui accroît la masse d'air interceptée par le disque de l'éolienne. Bien que moins complexe à mettre en œuvre que le Venturi, cette approche reste onéreuse et est rarement adoptée pour les éoliennes de grande taille.

3. **Profil en bout de pale** : une évolution de l'approche précédente consiste à concentrer les profils aérodynamiques uniquement à l'extrémité des pales. Cette configuration simplifie le système et réduit les coûts associés à la conception et à l'installation des éoliennes.

4. **Éolienne contrarotative** : une autre proposition explore l'utilisation d'un système contrarotatif, où une éolienne est disposée dans le sillage d'une autre sur le même pylône. Les éoliennes tournent alors en sens inverse, tirant parti de l'écoulement d'air perturbé de l'autre. Bien que cette approche présente des défis techniques et économiques, elle suscite un intérêt croissant et nécessite une évaluation approfondie de son efficacité et de sa rentabilité.

Ces diverses stratégies illustrent les efforts variés pour améliorer les performances des éoliennes, offrant ainsi de nouvelles opportunités pour l'avenir de cette technologie.

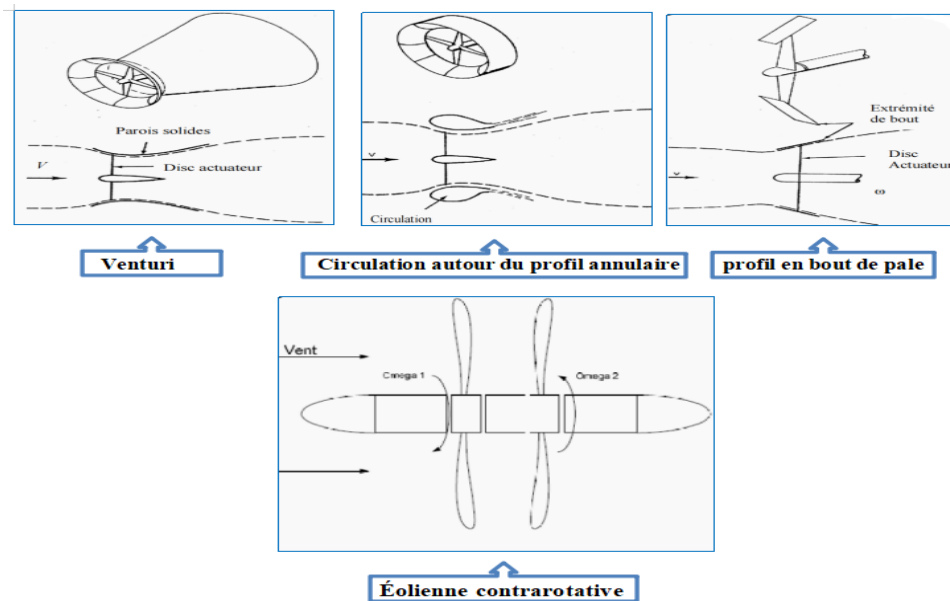


Figure II.9 :Les différents approches utilisé pour dépasser la limite de Betz [48]

II.5 La méthode de la ligne active

Cette technique répartit uniformément les forces le long de la direction azimutale du disque actif, sans offrir une représentation distincte pour chaque pale. Les pales sont intégrées dans la direction azimutale, ce qui peut poser des problèmes. Pour pallier cette lacune et mieux évaluer l'impact des pales, Sørensen et Shen ont utilisé la méthode de la ligne active, qui permet d'introduire les forces exercées par chaque pale de manière distincte [49].

La méthode de la ligne active consiste à diviser chaque pale en n points le long d'une ligne. Les forces sont alors réparties autour de chaque point dans un plan perpendiculaire à cette ligne active, selon une loi de distribution définie figure II.10. Par exemple, dans le travail de Mikkelsen, la distribution gaussienne est utilisée. Une autre approche est l'utilisation d'une distribution uniforme, comme dans le modèle de cylindre actif [50, 51].

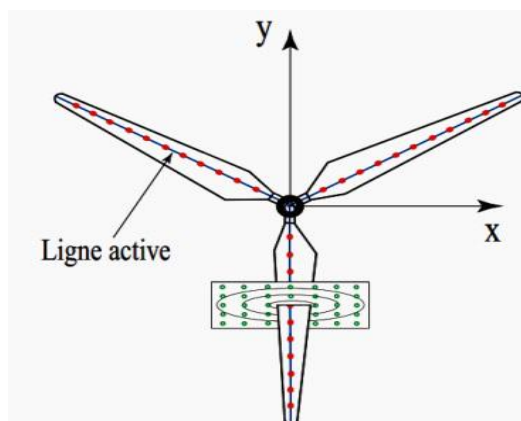


Figure II.10 : Méthode de la ligne active .

II.6 La théorie de l'élément de Pale

Dans les années 1930, Glauert a développé la théorie des éléments de pale [52], où la pale est subdivisée en différentes surfaces cylindriques pour évaluer l'écoulement de chaque tranche individuellement (représenté à la figure II.11).

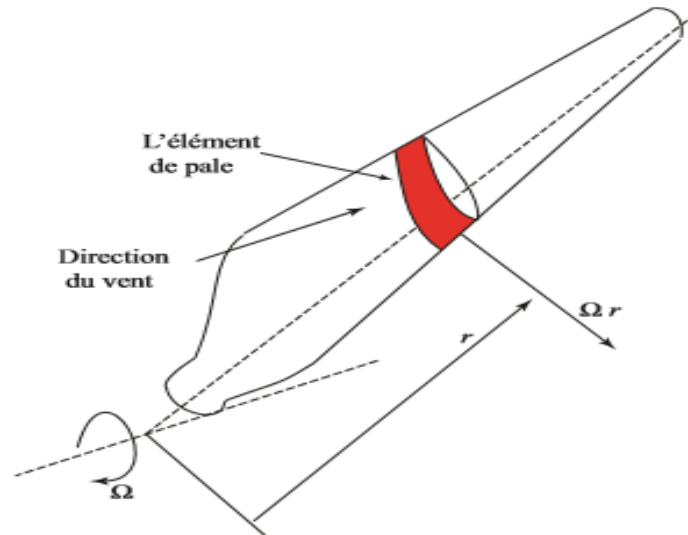


Figure II-11 : Vue schématique de l'élément de pale du rotor[53]

Les paramètres géométriques, y compris le profil aérodynamique, constituent les fondements de la théorie des éléments de pale. De plus, la corde et l'angle d'incidence permettent de déterminer les valeurs élémentaires de couple et de portance. Ce calcul a pour but d'évaluer les performances de l'hélice, où la puissance produite est le résultat de l'interaction entre la poussée et le couple total du rotor.

II.7 Théorie de Glauert

La théorie de Glauert, développée en 1935 [54]. Le modèle d'écoulement du rotor repose sur la théorie de la quantité de mouvement et la théorie des éléments de pale. Ce processus comprend le calcul des vitesses induites, tant axiales que tangentielles, pour chaque élément de pale, en utilisant respectivement le théorème du moment et le théorème du moment cinétique. En tenant compte de ces vitesses induites, les forces aérodynamiques peuvent être déterminées en référence à la vitesse relative du profil au niveau du plan de rotation. Cette théorie fonctionne bien dans les situations simples. Cependant, ces résultats ne conviennent pas aux écoulements complexes.

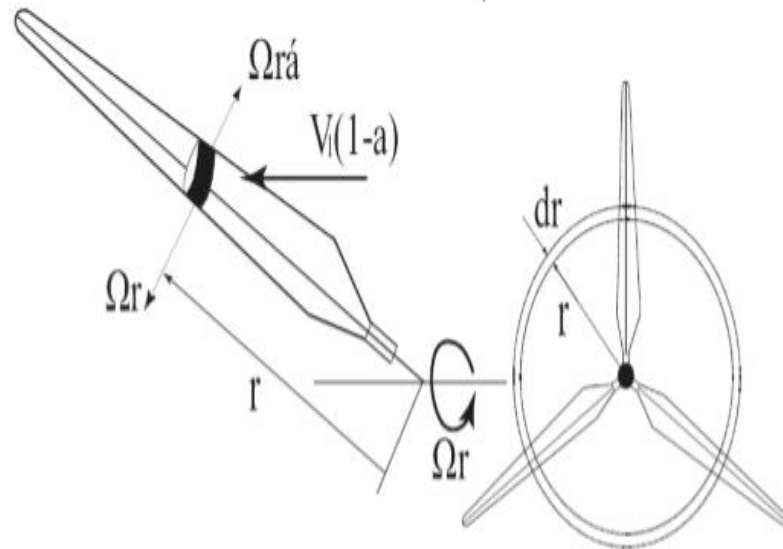


Figure II-12 :Section transversale d'une pale et profil de l'anneau balayé[53].

II.7.1 Correction de Glauert

L'augmentation de l'induction axiale entraîne une augmentation du coefficient de force axial en pratique. D'après les données issues des expérimentations, sous des charges axiales significatives, très importantes, cela peut être corrigé en utilisant cette relation :

$$C_T \begin{cases} 4a(1-a), & \text{si } 0 \leq a \leq \frac{1}{3} \\ \frac{41}{30}a + \frac{13}{30}, & \text{si } \frac{1}{3} < a \leq 1 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

En prenant en compte la rotation d'une éolienne dans son sillage, la correction de Glauert [54] permet de calculer plus précisément ses capacités théoriques.

II.8 Méthodes (CFD)

Il est possible de calculer très précisément le flux d'air entourant les rotors éoliens en simulant intégralement leurs pales et leur géométrie. Et en s'appuyant sur les équations de Navier-Stokes, les méthodes CFD permettent une analyse précise et fiable des écoulements autour de formes complexes, même dans des scénarios d'une grande complexité. [54]

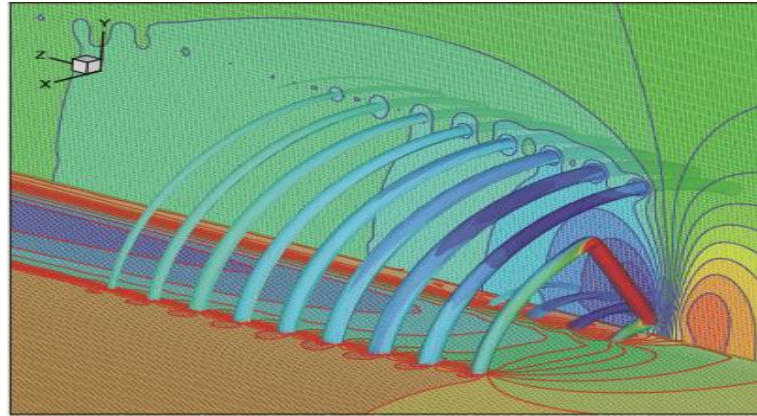


Figure II-13: Visualisation du flux aérodynamique d'une éolienne via simulation CFD [55].

Pour le calcul rationnel des charges aérodynamiques il est recommandé de construire une fine grille autour du rotor qui prend en considération les dimensions et les profils des pale pour les modéliser de manière physique.

II.9 Le sillage éolien

Le sillage de l'éolienne se compose principalement d'une structure tourbillonnaire provenant des pales du rotor en rotation. À mesure que ce système tourbillonnaire se déplace vers l'aval, des tourbillons limites se forment. On distingue souvent les zones proches et lointains Figure II.14.

Le sillage proche est un élément crucial dans le processus de ventilation. En outre, il établit un point de départ pour l'expansion de sillage lointain. Une analyse approfondie de ce phénomène aide à optimiser la conception des parcs éoliens en diminuant les interférences entre les éoliennes.

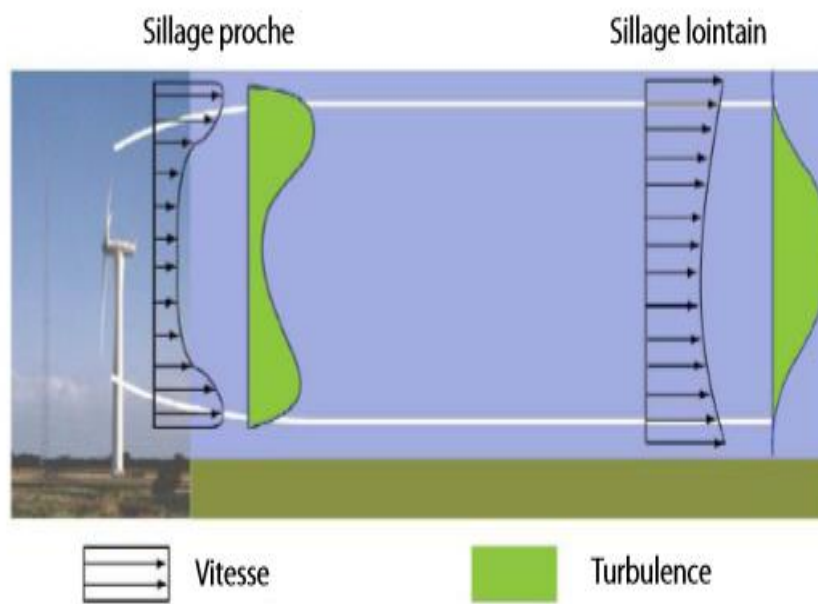


Figure II-14: Sillage proche et sillage lointain [56]

À cause des pales en rotation constante sur leur axe central dans une éolienne horizontale, le système tourbillonnaire diffère de celui créé par une aile fixe. Les tourbillons de traînée forment un flux vortex qui suit un chemin hélicoïdal derrière le rotor. Également, il est essentiel de mettre en évidence les tourbillons marginaux générés aux extrémités des pales, reconnaissables par leur mouvement hélicoïdal en aval du rotor. Par ailleurs, des vortex similaires se forment au niveau du moyeu et se propagent essentiellement en ligne droite le long de l'axe de rotation [56].

Contrairement à une aile fixe, le système tourbillonnaire d'une éolienne horizontale est influencé par la rotation constante des pales autour de leur axe central. Le vortex généré par les tourbillons de traînée suit une trajectoire hélicoïdale derrière le rotor. Quant aux tourbillons marginaux, les flux qui se déplacent en aval du rotor proviennent des extrémités des pales et présentent également un mouvement hélicoïdal. De plus, les vortex marginaux commencent au niveau du moyeu et se déplacent principalement en trajectoire rectiligne le long de l'axe de rotation.

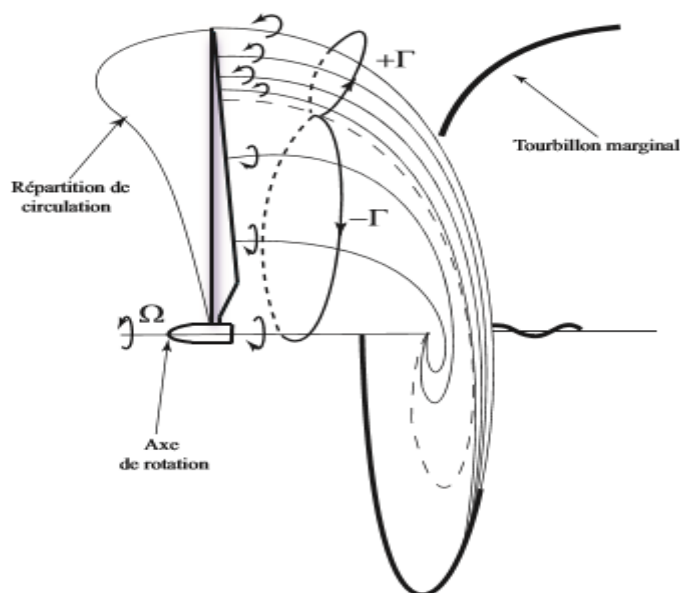


Figure II-15 : Modèle physique du sillage d'une éolienne [57].

II.9.1 Caractéristiques du sillage éolien

La détermination de l'efficacité d'une éolienne peut être réalisée en testant soit un modèle du rotor, soit une paroi poreuse présentant des propriétés de traînée correspondantes. Cependant, effectuer des mesures à l'extérieur peut s'avérer difficile en raison de la nature fluctuante des conditions atmosphériques. D'un autre côté, les expériences en soufflerie présentent des avantages considérables. Ils facilitent l'analyse des écoulements laminaires et turbulents, la simulation de vitesses de vent constantes, ainsi que l'étude des caractéristiques de la couche limite atmosphérique. D'autre part, les essais en soufflerie permettent de mener rapidement divers tests, tels que l'examen de différentes configurations, vitesses de rotation et vitesses du vent.

Quand une éolienne est placée dans un flux d'air uniforme, son sillage se divise généralement en trois zones [58]. En conséquence, ces phénomènes provoquent des variations notables de pression et de vitesse, ainsi qu'une intensification de la turbulence. Ainsi, le rayon du sillage est établi comme la distance entre le point où la vitesse atteint 99 % de celle à l'infini et l'axe de symétrie de l'écoulement, selon Alfredsson et al. [59] qui ont observé qu'une corrélation se manifeste entre l'intensité de la turbulence dans l'écoulement incident et la vitesse à laquelle les vitesses dans le sillage se stabilisent à leurs valeurs initiales non perturbées.

L'existence de turbulences dans la trajectoire d'une éolienne peut être attribuée à quatre origines distinctes [58, 60] lorsqu'elle est mise en pratique.

- ❖ Le niveau de turbulence présent dans l'environnement environnant.
- ❖ La turbulence résulte des forces de cisaillement générées par le champ de vitesse durant le processus de production.
- ❖ Les pales jouent un rôle clé dans la génération ou la dissipation des turbulences.
- ❖ L'influence du terme d'Archimède sur la stratification thermique peut être observée à travers la création ou la diminution de l'énergie cinétique turbulente.

Tableau II.1: Impact des sources de turbulence sur le sillage éolien

| TURBULANCE | Région | | | | |
|---|----------------|------------|-----|------------------|-----|
| | Sillage proche | transition | | Sillage lointain | |
| | | début | fin | début | fin |
| Ambiante | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ |
| Travail de force de cisaillement | ++ | ++ | + | + | - |
| Turbine | ++ | + | - | - | - |

Tableau II.1 illustre l'importance des différentes sources de turbulence dans ces régions.

++ : effet principal,

+ : effet secondaire,

- : effet mineur.

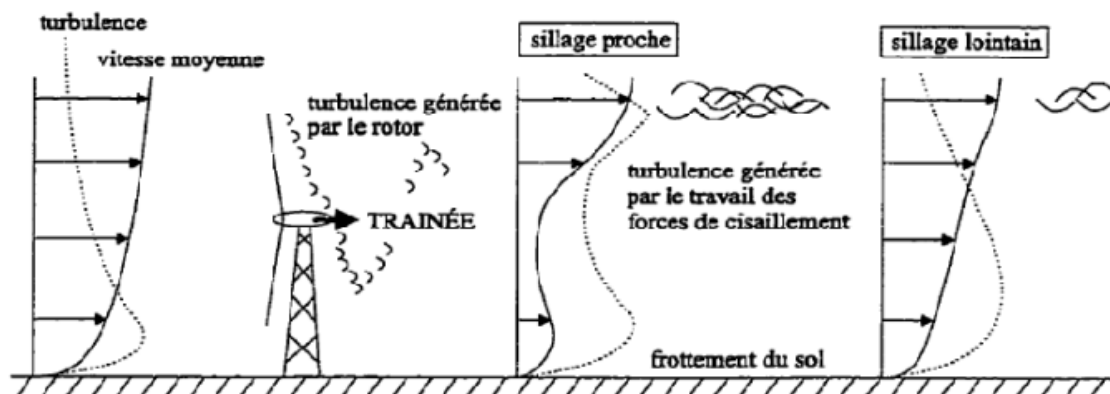


Figure II-16 : Les racines des turbulences qui surviennent dans la trajectoire d'une éolienne [62]

II.10 Méthodes tourbillonnaires.

Le concept des méthodes de vortex est enraciné dans la substitution du flux de fluide réel à travers la turbine par un flux de fluide parfait qui passe à travers un système tourbillonnaire équivalent. [58]

Il existe deux méthodes différentes pour représenter la structure du sillage tourbillonnaire.

II.11 Le sillage prescrit.

L'application des méthodes spécifiques pour modéliser le sillage suppose que la configuration du sillage a déjà été définie. Néanmoins, lorsqu'il s'agit d'éoliennes, les nappes de vortex sont soumises à des déformations dues aux vitesses induites amplifiées, ce qui est expliqué dans la figure (II.17). Lorsqu'il s'agit de scénarios stationnaires ou de rotors qui ne sont pas soumis à une charge importante, il est courant de supposer que la forme du sillage est déjà établie par une expérimentation préalable ou des calculs approximatifs. Cependant, dans le cas des éoliennes en situation instationnaire, où les vitesses induites sont importantes, le contour des surfaces tourbillonnaires varie avec le temps. En conséquence, les méthodes de sillage prescrites ne sont pas pratiques à utiliser. Dans ces situations, il est recommandé d'opter pour le deuxième ensemble de méthodes, appelées méthodes de sillage libre [56].

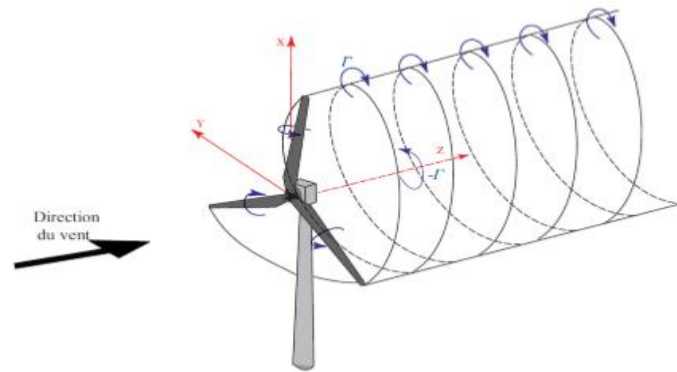


Figure II-17 : Schéma du sillage cylindrique prescrit généré par une éolienne [56].

II.12 Le sillage libre

Schéma du sillage cylindrique prescrit produit par une éolienne [57, 58, 64]. Plus tard, Gohard [65] a modifié ces modèles pour l'évaluation des rotors de vent. Cette approche implique le mouvement de tourbillons libres comme s'il s'agissait de lignes physiques à la vitesse du sillage, ce qui respecte la deuxième loi de Helmholtz.

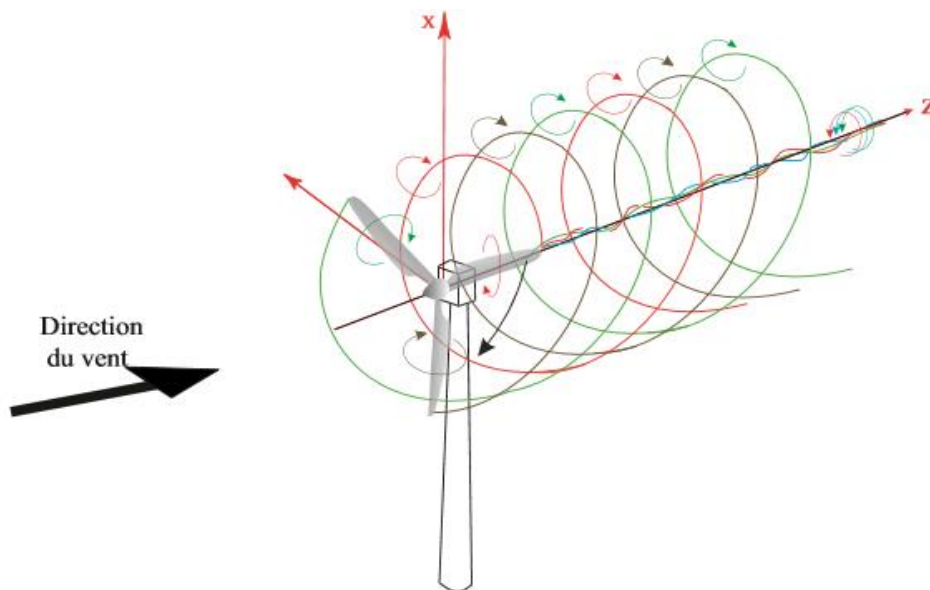


Figure II-18 : Structure du sillage tourbillonnaire d'une éolienne : Tourbillons générés aux extrémités et au pied de chaque pale [56]

II.13 Conclusion

Le chapitre est consacré à l'introduction des principes de base de l'aérodynamique qui permettent d'étudier le flux du rotor éolien. La première théorie présentée, celle de Froude-Rankine, permet de calculer la vitesse du rotor en fonction de sa charge aérodynamique. En revanche, la théorie des

éléments de pale, plus simple, décompose le rotor en plusieurs sections et considère chaque section comme étant indépendante des autres en divisant le rotor en éléments annulaires. L'équilibre des forces aérodynamiques est atteint en s'appuyant sur des données tabulées existantes, ce qui permet des calculs précis de l'efficacité et des limites à l'aide de modèles simples. Bien que la méthode de Glauert produise des résultats précis dans des conditions d'écoulement simples, elle est insuffisante dans le cas général et dans des conditions non stationnaires.

CHAPITRE III:
EFFETS INSTATIONNAIRES SUR LES
ROTORS ÉOLIENS

III.1 Introduction

Les éoliennes opèrent dans un environnement complexe et instable, où des changements constants de la vitesse et de la direction du vent les affectent. De plus, les obstacles tels que les tours ou la topographie naturelle augmentent l'instabilité du flux de vent. En plus de ces conditions environnementales, il est prévu que des changements dans le fonctionnement de la turbine provoqueront une instabilité pour contrôler sa charge et sa puissance [66]. En conséquence, les pales des éoliennes subissent des forces aérodynamiques qui engendrent des flux très complexes.

III.2 Aérodynamique instable des éoliennes

Les pales en rotation constituent un obstacle majeur pour les chercheurs lorsqu'ils tentent d'estimer les charges sur une éolienne. Le champ d'écoulement auquel il est fait référence est très instable et de nature tridimensionnelle, et il n'a pas encore fait l'objet de recherches approfondies [67 68 69 70]. La figure III.1 montre que l'écoulement au-dessus d'un rotor d'éolienne est rendu encore plus complexe en raison de divers phénomènes.

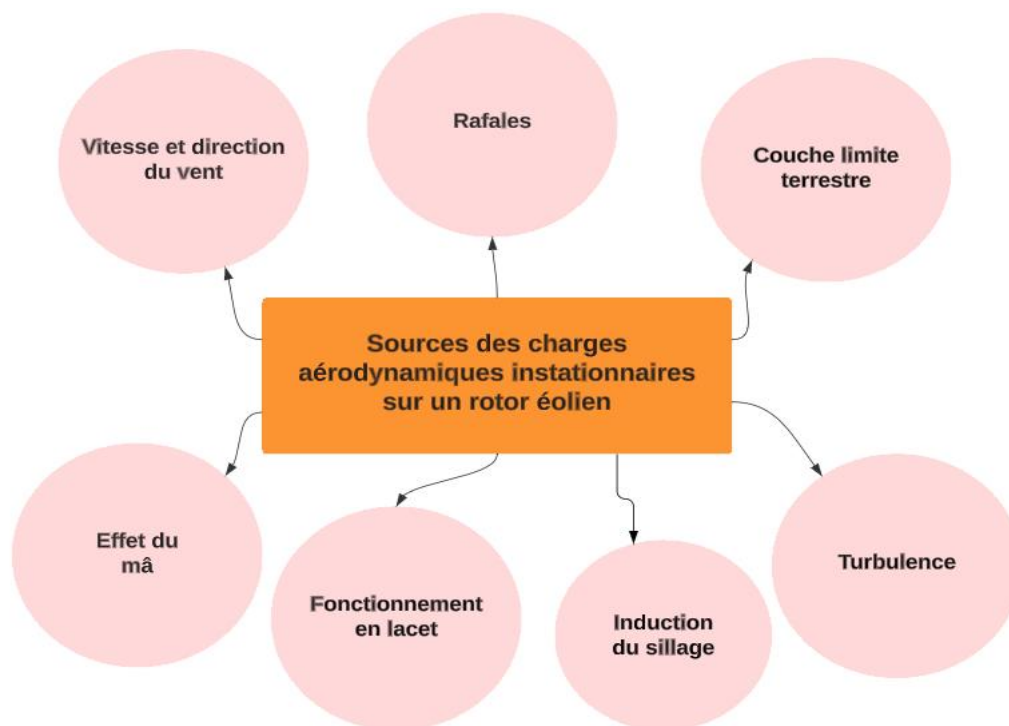


Figure III-1 : Origines des forces instationnaire sur le rotor éolien

- a) **Vitesse et direction du vent** : le vent souffle à des vitesses variables, ce qui peut entraîner des fluctuations importantes dans l'angle d'incidence des profils de pale. Ce déplacement est crucial, car il est lié à la vitesse du vent, ce qui impacte la forme du sillage et, en conséquence, la rapidité avec laquelle il se déplace. Cela conduit à une fluctuation continue des forces agissant sur le rotor, ce qui se traduit par des variations de la puissance générée au fil du temps.
- b) **Rafales** : en fonctionnement, l'éolienne peut être affectée par des rafales de vent, entraînant une augmentation temporaire de la vitesse du vent, qui dépasse la moyenne pendant quelques secondes. Ces variations soudaines affectent considérablement les composants mécaniques et électriques. Ces pics de vent sont des éléments cruciaux qui influencent le couple dans le rotor de l'éolienne.
- c) **Couche limite terrestre** : lorsque l'éolienne est en marche, surtout si elle est grande, capte un vent moins fort dans la partie inférieure que sa partie supérieure (figure III.2). Cela s'explique par l'effet de la couche limite terrestre, influencée par la rugosité du sol, le relief environnant, voire la présence de vagues dans le cas des installations en mer. Le flux d'air est ralenti à proximité de la surface.

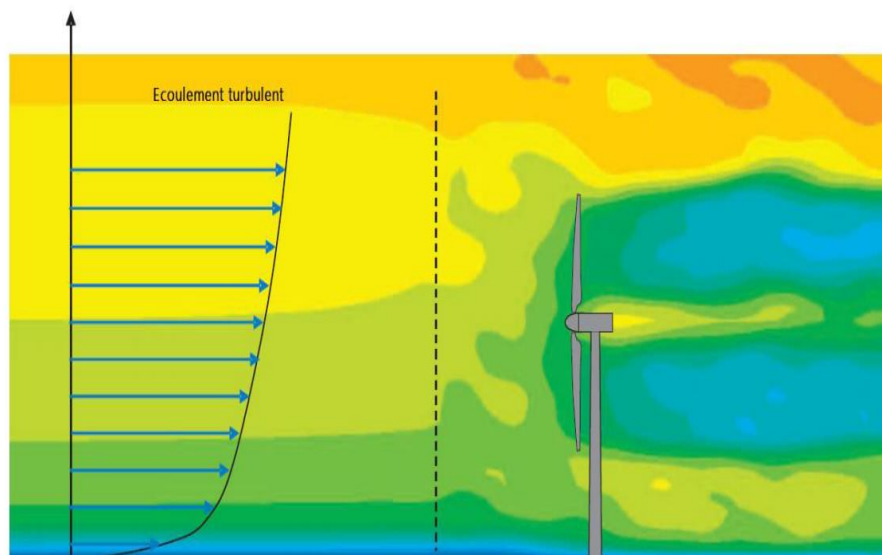


Figure III-2: Impact de la Couche Limite Terrestre sur les Flux Éoliens[71].

- d) **Effet du mât** : au moment où les pales traversent son sillage, le mât a un impact significatif sur l'état des charges aérodynamiques [72 73 74]. En effet, chaque fois que les pales traversent le voisinage du mât, elles croisent une région où la vitesse du vent diminue. Cette interaction crée une zone de ralentissement de l'écoulement avant et après le mât, la variation de cette réduction de vitesse dépend du type de mât (tubulaire en acier, haubané ou en treillis) et de ses dimensions. Ainsi, à chaque passage des pales, l'angle d'attaque de chaque section de pale est modifié, ce qui engendre des variations dans les forces aérodynamiques exercées.

- e) **Turbulence** : la présence de turbulence atmosphérique, intensifiée par les mouvements aériens et les variations thermiques, surtout dans des régions marquées par une topographie complexe et l'obstruction par des éléments naturels ou artificiels, est une donnée fondamentale dans l'étude des dynamiques environnementales [75]. Ainsi, l'une des stratégies clés adoptées consiste à surélever les tours éoliennes pour minimiser l'impact des turbulences à basse altitude.
- f) **Induction du sillage** : lorsque le rotor tourne, les conditions aérodynamiques fluctuent en termes de vitesse, d'angle d'attaque et de circulation . Ces variations affectent à la fois la force exercée et le mouvement des tourbillons émis derrière l'éolienne. Au fil du temps, l'évolution du sillage est influencée par ce processus continu, entraînant un effet qui se perpétue.
- g) **Fonctionnement en lacet** : Cela survient quand l'éolienne est tournée vers l'extérieur par rapport à la direction du vent entrant. Cela se produit souvent lorsque le système de lacet de la turbine est lent à réagir aux changements soudains de vent. Pour compenser, la turbine doit fonctionner en régime de virage pendant un certain temps. Un autre facteur pourrait être un manque de précision dans l'alignement du système de lacet avec la direction du vent. Schepers [76] a identifié deux effets principaux qu'une turbine subit lors d'un écoulement en lacet [77].

III.3 Caractéristiques des écoulements instationnaires autour des rotors éoliens

III.3.1 Définition des écoulements instationnaire

Les écoulements qui se caractérisent par des oscillations et des changements dans des paramètres comme la vitesse et la pression sont considérés comme des écoulements instationnaires. Ces flux sont définis par des hypothèses en constante évolution et consistent en des possibilités temporaires dans différentes circonstances [78]. Pour améliorer l'efficacité et la conception des éoliennes, on peut examiner les écoulements instationnaires causés par le rotor en rotation à l'aide de simulations numériques.

III.3.2 Importance des écoulements instationnaires dans la conception et la performance des éoliennes.

Nous ne pouvons ignorer l'importance de l'écoulement du vent pour un système de rotor d'éolienne, car il a le potentiel de réduire considérablement les performances et la production d'une éolienne est affectée par un écoulement turbulent, dont les variations de vitesse et de direction du vent causent des fluctuations dans la quantité d'énergie éolienne générée.

Meyers et Meneveau Meyers [79] ont constaté que la distance optimale entre les éoliennes dépend de paramètres tels que la vitesse du vent, l'espacement entre les éoliennes, ainsi que le coût des éoliennes

par rapport au coût de la surface, qui un rôle crucial. peut être significativement plus élevé que celui des éoliennes typiques.

Une autre étude de Barthelmie et Jensen Barthelmie [80] ont analysé l'efficacité des parcs éoliens offshore et les pertes dues aux turbulences et aux débits irréguliers leurs modèles ont montré que les pertes dues à L'écoulement du vent est modifié par les variations de vitesse.

Les travaux de recherche sur les éoliennes soulignent la nécessité de prendre en compte l'écoulement instable pour assurer leur construction et leur exploitation durables. Une bonne compréhension des effets des variations de vitesse et de direction du vent peut optimiser le rendement des éoliennes et améliorer l'efficacité du parc éolien.

- ❖ **Optimisation de la conception** : l'optimisation de la conception pour un débit instable a démontré des bénéfices dans le développement des rotors d'éoliennes. En approfondissant notre compréhension des impacts de l'énergie éolienne[81]
- ❖ **Réduction du bruit** : pour diminuer le bruit émis par les éoliennes, l'utilisation d'un flux d'air instable s'avère efficace. Les recherches ont montré que l'utilisation de pales de rotor flexibles peut réduire considérablement les vibrations du vent et le bruit produits par les éoliennes [82]
- ❖ **Efficacité énergétique** : les éoliennes sont élaborées afin de transformer l'énergie cinétique du vent en électricité. L'instabilité de l'écoulement affecte directement la façon dont le rotor interagit avec le vent. En comprenant ce flux, nous pouvons optimiser des paramètres tels que l'angle d'incidence et la vitesse de rotation pour maximiser le rendement et la production d'énergie [83].

III.3.3. Revue bibliographique des phénomènes instationnaires dans les écoulements éoliens

a) Formation de vortex et de tourbillons dans le sillage des éoliennes.

Le sillage d'une éolienne est constitué de tourbillons créés par la rotation des pales. Cette structure se développe en aval du rotor et donne naissance à des tourbillons marginaux. Le sillage se divise en deux zones principales : proche et lointain. Le sillage proche joue un rôle clé dans l'évaluation des performances aérodynamiques du rotor et établit les conditions de base pour la formation du sillage lointain. La formation de cette structure tourbillonnaire peut être visualisée à l'aide de fumée, comme le montre la figure III.3 du Laboratoire national de Risoe, qui illustre le sillage proche dans des conditions réelles.



Figure III-3: Observation du Comportement du Sillage des Éoliennes à l'Aide de Fumée [84]

Contrairement aux ailes fixes, les éoliennes à axe horizontal présentent un système tourbillonnaire distinct. Les tourbillons de traînée, générés au bord de fuite des pales suivent un trajet hélicoïdal derrière le rotor. Par ailleurs, des tourbillons marginaux se forment au niveau du moyeu et suivent principalement une trajectoire linéaire le long de l'axe de rotation. Ainsi, les tourbillons générés dans le sillage des éoliennes sont fréquents et résultent de la rotation des pales, entraînant des zones de basse pression et des turbulences. Ces structures tourbillonnaires peuvent réduire l'efficacité des éoliennes en perturbant le flux d'air et en générant des zones de faible pression derrière les pales.

Le positionnement optimal des éoliennes dans un parc est influencé par la formation de vortex. Des études, telles que celles de Meyers et Meneveau [79], ont montré que l'espacement optimal entre les éoliennes et les facteurs de charge associés peut contribuer à définir le positionnement optimal des turbines.

Les vortex peuvent également poser des problèmes significatifs pour les éoliennes, notamment en créant des charges instables sur les pales, ce qui peut compromettre leur efficacité et entraîner des problèmes de fatigue. Les travaux de Widnall [85] ont suggéré la présence de multiples instabilités dans les tourbillons hélicoïdaux [86], soulignant la complexité et l'instabilité des tourbillons dans les systèmes éoliens.

b) Effets de la variation périodique de la vitesse du vent sur la charge du rotor.

Les changements périodiques de la vitesse du vent impactent de manière significative les charges que le rotor de l'éolienne reçoit. Une étude menée par Abo-Khalil et al [87] a montré que la vitesse variable du vent a un impact majeur sur le rotor de la turbine. Ces oscillations périodiques causent des changements dans la tension du générateur et la puissance produite. En outre, elles influencent de manière significative les charges appliquées au rotor, y compris la poussée et le couple. Selon Bergua

et al [88]. Les variations de la vitesse du vent jouent un rôle clé dans les fluctuations des charges sur le rotor. Elles peuvent également modifier la vitesse de rotation et l'angle de pas des pales, ce qui a des conséquences sur les performances globales de l'éolienne.

Il est crucial de prendre en considération les effets d'entrée dynamiques chaque fois qu'il y aura des changements dans les conditions d'écoulement causés par la vitesse du rotor ou le pas des pales Bergua et al]. De plus, il est remarqué que les ombres des tours et le cisaillement du vent causent des fluctuations régulières de la puissance des éoliennes. La fréquence de ces variations est directement liée au nombre de pales du rotor, ce qui est connu sous le nom d'effet "3p" pour les éoliennes à trois pales. Das et al [89] a été tenté d'utiliser le rotor de l'éolienne comme un anémomètre généralisé pour détecter les variations des conditions de vent. Les mesures des charges exercées sur les pales peuvent être utilisées pour estimer la vitesse réelle du vent au niveau du rotor (REWS) ainsi que d'autres paramètres comme les variations de cisaillement du vent et de lacet. Cependant, les algorithmes actuels de détection de charge ne peuvent pas tenir compte du vent qui se produit périodiquement. Un meilleur compte de l'écoulement et de la turbulence sur les pales individuelles peut être fourni, ce qui peut être important pour l'amélioration des méthodes de contrôle.

C) Caractéristiques des écoulements instationnaires

Les écoulements instationnaires autour des rotors éoliens présentent plusieurs caractéristiques distinctives, qui influencent la performance et la conception des éoliennes. Voici un aperçu des principales caractéristiques.

1. Fluctuations de la vitesse du vent

Les écoulements instables sont définis par des fluctuations de la vitesse du vent au niveau du rotor. Ces fluctuations peuvent résulter de changements rapides des conditions météorologiques, de turbulences ou d'altérations dans la direction du vent.

2. Turbulences et Vortex

La rotation des pales engendre des turbulences et des vortex, se manifestant par des tourbillons marginaux et un sillage turbulent. Ces structures tourbillonnaires résultent de la différence de pression entre le dessus et le dessous des pales, créant des zones de turbulence qui peuvent perturber le flux d'air et affecter l'efficacité du rotor.

3. Effet de Sillage

Le sillage est la traînée tourbillonnaire laissée par les pales après leur passage. Ce sillage se compose de deux zones principales : le sillage proche, qui se forme immédiatement derrière les pales, et le sillage lointain, qui évolue à mesure que le flux d'air se déplace plus loin du rotor. Le sillage proche est crucial pour évaluer les performances aérodynamiques immédiates, tandis que le sillage lointain peut interagir avec les éoliennes situées en aval.

4. Instabilité du sillage

Les tourbillons et vortex dans le sillage sont souvent instables, avec des structures qui évoluent et se dissipent avec le temps. Cette instabilité peut entraîner des variations dans le flux d'air reçu par les autres éoliennes du parc, affectant leur performance et augmentant les charges fluctuantes sur les structures.

5. Interactions avec les éoliennes voisines

Le sillage instationnaire d'une éolienne peut avoir des impacts significatifs sur les éoliennes situées en aval. Les turbulences et les vortex créés par une éolienne peuvent réduire l'efficacité des turbines suivantes en perturbant leur flux d'air.

6. Variabilité temporelle

Les écoulements instationnaires varient avec le temps, entraînant des changements dans les caractéristiques du vent et du sillage. Cette variabilité temporelle peut résulter de variations dans la vitesse du vent, de changements dans les conditions météorologiques locales ou de fluctuations dans les conditions atmosphériques.

7. Effets sur la fatigue des structures

Les variations de charges causées par les écoulements instationnaires peuvent accroître la fatigue des composants de l'éolienne, tels que les pales et le rotor. Ces charges instables peuvent diminuer la durabilité des matériaux et imposer des exigences de maintenance plus strictes.

III.4 Analyse des écoulements instationnaire : techniques et outils.

Diverses méthodologies et technologies sont utilisées pour étudier l'écoulement de fluide instable, permettant la compréhension et l'identification des mouvements sur une durée spécifiée. La recherche des flux instables peut être réalisée de plusieurs manières, parmi lesquelles figure la dynamique des fluides computationnelle (CFD). L'analyse des écoulements de fluides, notamment ceux qui sont instables, utilise généralement cette technique de modélisation. La capacité du CFD à résoudre numériquement les équations qui contrôlent le mouvement des fluides peut donner une idée considérable du comportement des flux instables Smith & Glezer [90]

L'évaluation des propriétés aérodynamiques des pales est primordiale dans le domaine de la conception d'éoliennes. Les méthodes de modélisation, telles que les méthodes BEM (Pale Element Momentum), sont couramment employées à cette fin.

Aussi les modèles informatiques, basés sur des méthodes CFD, ont été élaborés pour analyser les caractéristiques aérodynamiques instables des sections d'aile, notamment pour les profils de pales d'hélicoptères [91]. L'utilisation combinée de méthodes CFD et d'autres approches de modélisation joue un rôle crucial dans l'étude et l'amélioration des écoulements de fluides instables, particulièrement dans le contexte spécifique de la conception des éoliennes.

III.5 Conclusion

Les éoliennes opèrent au sein d'un environnement dynamique et imprévisible, marqué par une multitude de facteurs tels que les variations de vitesse et de direction du vent, les rafales intenses, l'influence de la couche limite atmosphérique, l'effet du sillage causé par le mât, ainsi que les phénomènes de turbulence et d'induction de sillage, sans oublier les défis posés par le fonctionnement en lacet. Ces éléments soulignent la complexité des conditions dans lesquelles ces turbines doivent opérer pour convertir l'énergie éolienne en électricité.

Au cœur de cette conversion d'énergie se trouvent les rotors éoliens, composants clés dont l'efficacité et la longévité peuvent être compromises par l'exposition à des conditions non stationnaires. En effet, Les phénomènes tels que les rafales soudaines et les changements rapides de direction du vent augmentent les contraintes mécaniques sur les structures des rotors. Ces contraintes peuvent provoquer des vibrations excessives, accélérer le processus de fatigue des matériaux, et, dans certains cas, conduire à des défaillances structurelles critiques.

CHAPITRE IV :

**MODELISATION DES EFFORTS
APPLIQUES AU ROTOR HORIZONTAL**

IV. 1 Introduction

Les pales d'une éolienne subissent des charges aérodynamiques qui entraînent des flux d'air extrêmement complexes. Dans ce chapitre, on présente la modélisation des efforts appliqués aux rotors d'éolienne à axe horizontal. L'objectif du modèle utilisé est d'évaluer l'impact des forces aérodynamiques sur les pales des éoliennes, en se fondant sur la théorie aérodynamique. La modélisation de ces forces permet d'optimiser l'efficacité des éoliennes.

IV. 2 Méthodes numériques pour la modélisation

Les méthodes numériques pour modéliser les éoliennes sont des techniques efficaces pour analyser leur performance et améliorer leur conception. En recourant à des outils informatiques comme la CFD, la théorie BEM et la méthode des éléments finis, les chercheurs peuvent obtenir des informations précieuses sur le fonctionnement des éoliennes et améliorer leurs performances. Bien que les méthodes numériques aient des limites, elles sont un outil important pour faire avancer l'industrie éolienne et augmenter l'efficacité et la fiabilité des éoliennes.

Pour modéliser les forces appliquées au rotor horizontal, les ingénieurs se reposent fréquemment sur des simulations numériques en dynamique des fluides. Les simulations CFD permettent aux ingénieurs la possibilité d'analyser le flux d'air autour des pales du rotor, ce qui leur permet de prédire les forces de portance et de traînée associées au système rotor. En modélisant avec précision les forces appliquées au rotor horizontal, les ingénieurs peuvent optimiser la conception du système rotor pour des performances et une efficacité maximale.

Un des buts majeurs de la modélisation du sillage par CFD est d'étudier les structures d'écoulement complexes et les interactions qui se produisent dans la région du sillage. En simulant avec précision le sillage, les ingénieurs peuvent optimiser la conception d'un système pour réduire la traînée, améliorer la portance ou améliorer l'extraction d'énergie. Par exemple, dans le cas des éoliennes, il est essentiel de comprendre le sillage derrière chaque turbine pour positionner les turbines suivantes afin de maximiser la production d'énergie.

IV. 2.1 Analyse du Sillage éolien

La plupart des recherches sur le sillage classifient généralement le champ en deux régions principales : la zone près du sillage (sillage proche) et la zone éloignée [92].

La première région importante du rotor éolien se situe juste derrière le rotor lui-même, où l'influence des caractéristiques spécifiques du rotor, telles que la conception des pales, est prédominante. Cette influence s'exerce par l'application d'un gradient de pression axial, ce qui conduit au développement d'un déficit de sillage. Le sillage proche, qui s'étend généralement jusqu'à un diamètre de 1 D en aval [92 93], est déterminant pour l'évaluation des performances aérodynamiques du rotor. Certaines études

suggèrent que le sillage proche peut s'étendre jusqu'à $4 D$ en aval [94]. Au-delà de cette zone, on trouve le sillage éloigné, caractérisé par des effets plus globaux, typiquement observés à l'échelle d'un parc éolien, et où l'influence de la géométrie du rotor devient moins significative. La figure IV.1 fournit une représentation visuelle du sillage proche et lointain derrière une éolienne.

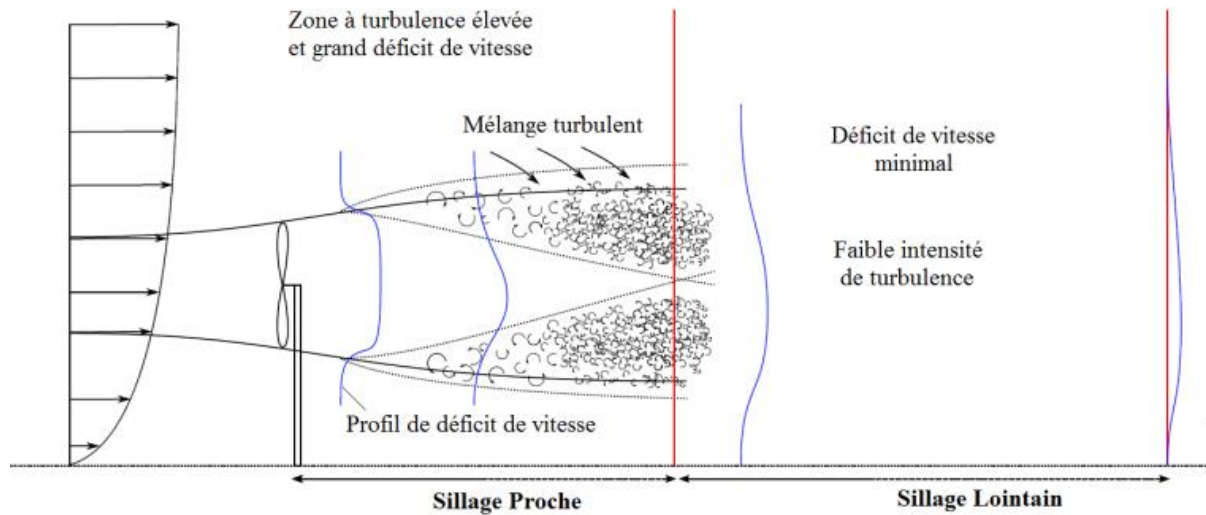


Figure IV.1 : Évolution des structures du sillage [95]

La modélisation du sillage éolien comprend l'analyse des vitesses générées dans le plan du rotor, en tenant compte du sillage hélicoïdal formé. Cette analyse se base sur l'hypothèse que les pales du rotor fonctionnent comme des lignes de vortex de force constante, Γ , créées uniquement aux pointes de la pale. Pour représenter le sillage à proximité immédiate de l'éolienne, il est nécessaire de procéder à une modélisation appropriée [96]

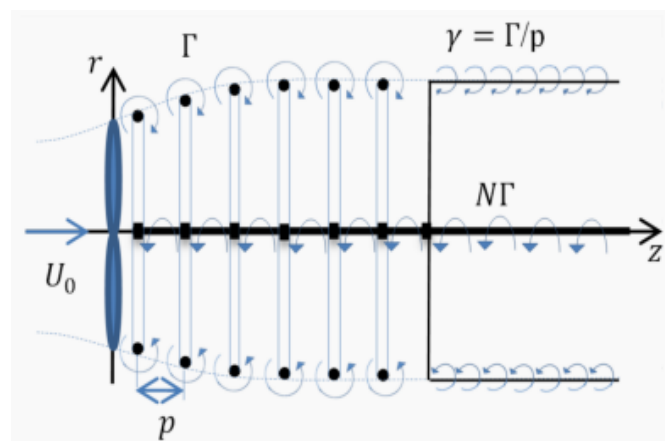


Figure IV.2: Substitution du sillage hélicoïdal par des Structures Vortex dans l'éolien [96]

IV. 2.1.1 Vitesses créées par le tube tourbillonnaire semi-infini.

$$U_r (r,z) = \frac{\Gamma}{2\pi} \sqrt{\frac{R_c}{r}} \left[\frac{2-s(z)}{\sqrt{s(z)}} \left(K(s(z)) - \frac{2}{\sqrt{s(z)}} E(s(z)) \right) \right] \tag{IV.1}$$

$r \neq R_c$

$$U_z (r,z) = \frac{\Gamma}{2} \left[\frac{R_c-r+|R_c-r|}{2|R_c-r|} \right] + \frac{\Gamma}{2} \left[\frac{z\sqrt{s(z)}}{2\pi\sqrt{R_c}r} \left(K(s(z)) + \frac{R_c-r}{R_c+r} \Pi(s(0), s(z)) \right) \right] \tag{IV.2}$$

$r=R_c$

$$U_z (r,z) = \frac{\Gamma}{4} + \frac{\Gamma}{2} \left[\frac{z\sqrt{s(z)}}{2\pi\sqrt{R_c}r} K(s(z)) \right] \tag{IV.3}$$

IV. 2.2 Intégration d'un modèle tourbillonnaire au sein d'une simulation CFD pour l'analyse du sillage éolien [84]

Les pales tournantes des éoliennes créent généralement des tourbillons qui suivent une trajectoire hélicoïdale. Pour étudier le flux d'air autour des pales, une approche de couplage entre un simulateur CFD et un modèle de sillage tourbillonnaire sera utilisée. Dans le schéma illustré à la figure IV. 3, le modèle de sillage tourbillonnaire détermine la vitesse induite à chaque étape en utilisant la loi de Biot-Savart.

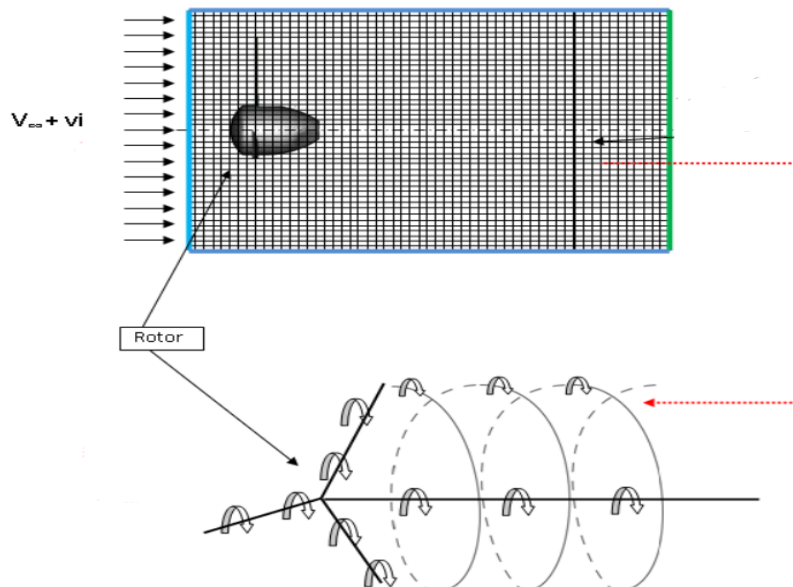


Figure IV.3 :Intégration d'un modèle tourbillonnaire au sein d'une simulation CFD [84]

IV.2.2.1 Cas du sillage hélicoïdal

La loi de Biot-Savart facilite le calcul de la vitesse générée sur chaque segment de pale :

$$d\vec{v}_{i,j} = \frac{\Gamma_{i,j}}{4\pi R} \frac{\vec{S}_{i,j} \wedge \vec{d}_{i,j}}{d_{i,j}^3} \quad (\text{IV.4})$$

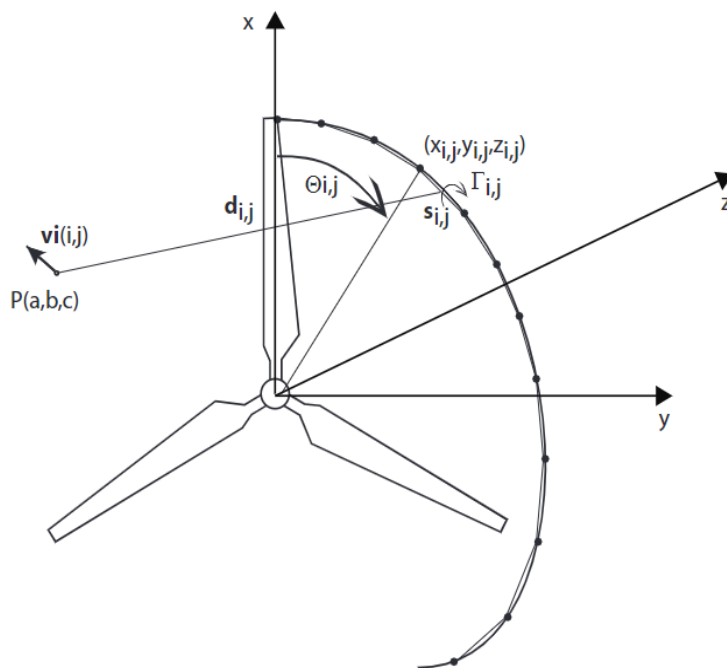


Figure IV.4:- Discrétisation du sillage hélicoïdal [84]

L'équation (IV.5) définit le vecteur position du segment constituant le sillage.

$$\vec{S}_{i,j} = \begin{cases} \dot{x}_{i+1j} - \dot{x}_{i,j} \\ \dot{y}_{i+1j} - \dot{y}_{i,j} \\ \dot{z}_{i+1j} - \dot{z}_{i,j} \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

L'équation (IV.6) représente le vecteur position qui détermine le début du segment constituant le sillage.

$$\vec{d}_{i,j} = \begin{cases} \frac{\dot{x}_{i+1j} + \dot{x}_{i,j}}{2} - \frac{a}{R} \\ \frac{\dot{y}_{i+1j} + \dot{y}_{i,j}}{2} - \frac{b}{R} \\ \frac{\dot{z}_{i+1j} + \dot{z}_{i,j}}{2} - \frac{c}{R} \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

La vitesse totale induite est donc la somme des vitesses créées par les tourbillons de chaque segment.

$$\vec{v}_i = \sum_{j=1}^{Np} \sum_{l=1}^{NsNt} d\vec{v}_{l,j} = \frac{1}{4\pi R} \sum_{j=1}^{Np} \sum_{l=1}^{NsNt} \Gamma_{i,j} \frac{\vec{S}_{l,j} \wedge \vec{d}_{l,j}}{d_{l,j}^3} \quad (\text{IV.7})$$

IV. 3 Méthode de l'élément de Pale

La théorie repose sur le principe de décomposer la pale en différentes sections et d'étudier les caractéristiques de l'écoulement de chaque section. Les forces agissant sur la pale sont évaluées en analysant les composantes de portance et de traînée pour chaque section. En intégrant ces forces aérodynamiques sur l'ensemble de la pale, il est possible de calculer la force axiale, le couple, ainsi que la puissance générée par le rotor. La façon dont la pale est segmentée en sections est clairement illustrée dans la figure IV. 5 [97]

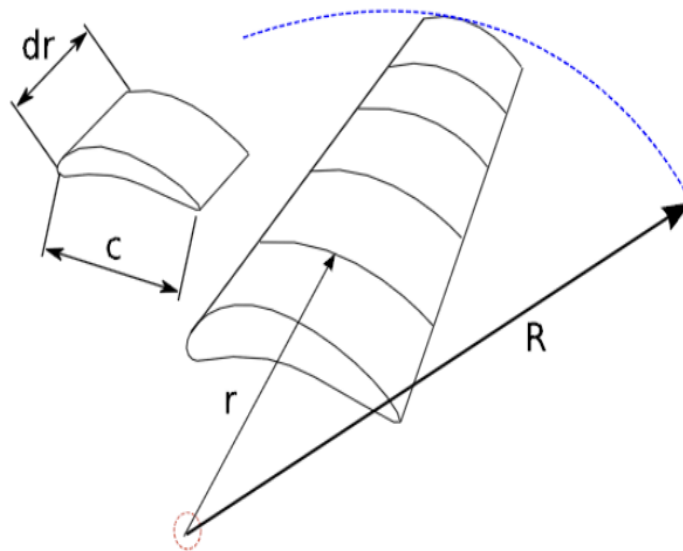


Figure IV.5 : Décomposition de la pale en plusieurs section [97]

IV. 4 Présentation du modèle

Durant le fonctionnement d'une éolienne, le sillage hélicoïdal se forme derrière un rotor, ce dernier étant modélisé avec une série d'anneaux tourbillonnaires [98,100]. Pour modéliser le rotor d'une éolienne, il est possible d'appliquer la théorie BEM, qui segmente la pale en différentes sections distinctes.

IV. 4.1 Modélisation du sillage

Le sillage est modélisé par une série d'anneaux vortex figure (IV.6), prêts à se déplacer axialement et à s'élargir radialement. Les pales sont conçues pour tenir compte de l'effet du champ de vitesse induit dans le sillage. L'augmentation du passage de la pale se traduit par des variations dans l'intensité de l'anneau tourbillonnaire et du rayon R , qui déterminent la force axiale appliquée sur le rotor de manière proportionnelle.

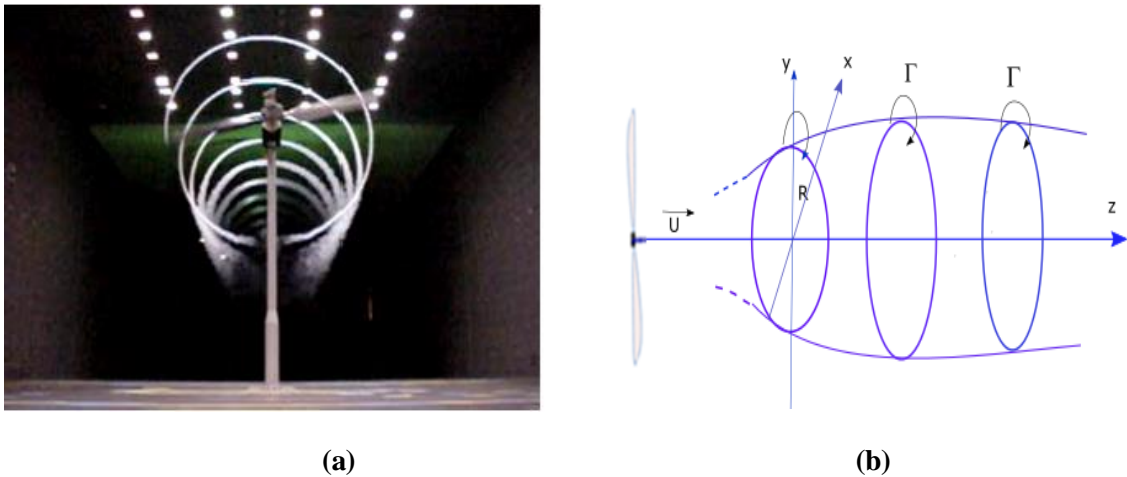


Figure IV.6 : (a) Visualisation du sillage éolien [101], (b) Représentation de la trajectoire hélicoïdale formée par des vortex tourbillonnaires

➤ **Vitesse générée par un anneau tourbillonnaire**

Pour déterminer le champ de vitesse produit par les anneaux tourbillonnaires, on applique la loi de Biot-Savart: La figure IV.7 illustre les anneaux tourbillonnaires avec un rayon R dans le plan xy. La méthode de calcul de la vitesse induite est déterminée comme suit :

$$dv_i = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{r}{|r|^3} \tag{IV.8}$$

Γ est l'intensité du segment tourbillonnaire.

La modélisation des anneaux tourbillonnaires s'effectue en utilisant la loi de Biot-Savart. Des singularités se produisent dans les noyaux de vortex, ce qui rend la solution singulière lorsque le point d'analyse P est situé directement sur l'anneau. Pour éviter un comportement singulier, un paramètre de régularisation δ est introduit. La figure (IV.8) illustre la vitesse axiale induite avec et sans le paramètre de régularisation.

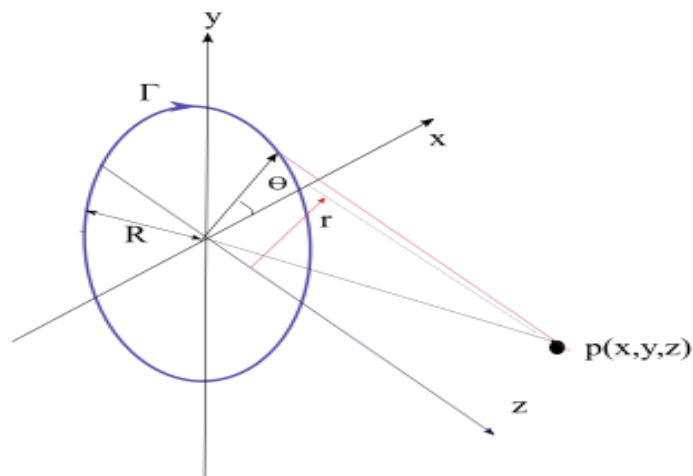


Figure IV.7 : Géométrie de l'anneau tourbillonnaire dans le plan xy.

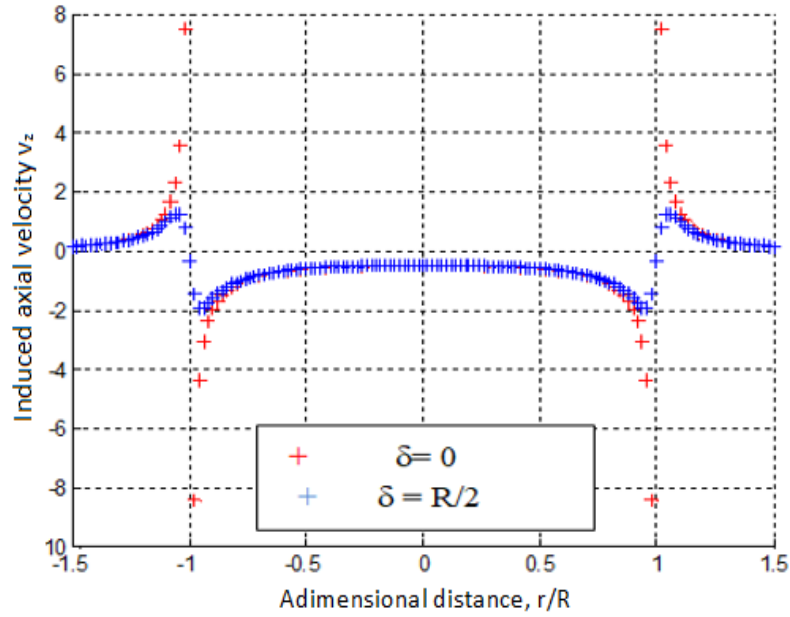


Figure IV.8 : Vitesse axiale induite avec et sans le paramètre de régularisation.

$$dv_i = \frac{\Gamma \times r}{4\pi(|r|^2 + \delta^2)^{3/2}} \tag{IV.9}$$

En outre, la résolution précise est exprimée avec les intégrales elliptiques du premier et du second type pour toute position au sein du champ de flux [102]. Ainsi, les composantes radiales et axiales de la vitesse induite sont décrites par les équations V_z et V_r pour le tourbillon annulaire ayant un rayon R et une intensité Γ .

$$v_r(r, z) = \frac{-r.z}{2\pi\sqrt{z^2 + (R + r)^2 + \delta^2}} \times \left[K(s) - \frac{R^2 + r^2 + z^2 + \delta^2}{z^2 + (R - r)^2 + \delta^2} E(s) \right] \tag{IV.10}$$

$$v_z(r, z) = \frac{-r}{2\pi\sqrt{z^2 + (R + r)^2 + \delta^2}} \times \left[K(s) - \frac{R^2 + r^2 + z^2 + \delta^2}{z^2 + (R - r)^2 + \delta^2} E(s) \right] \tag{IV.11}$$

Les intégrales elliptiques de première espèce $K(s)$ et de seconde espèce $E(s)$ avec le paramètre ‘s’, représentent respectivement le premier et le deuxième type d'intégrales elliptiques.

$$S = \frac{4rR}{Z + (R - r)^2 + \delta^2} \tag{IV.12}$$

Heemst et al. proposent que l'emplacement axial de l'anneau tourbillonnaire dans le sillage libre soit fixé par [103] :

$$v_a = u_0 + \sum_{i=1}^j v_{zi} + v_{aut} \quad (\text{IV.13})$$

La vitesse auto-induite est définie au point situé dans l'anneau tourbillonnaire pour le rayon R et le cœur du rayon r_c , selon l'équation (IV.14), comme suggéré par Lewis [104].

$$v_{auti} = \frac{\Gamma}{4\pi R} \left(\log \frac{8R}{r_c} - \frac{1}{4} \right) \quad (\text{IV.14})$$

Et pour déterminer la vitesse radiale de l'anneau tourbillonnaire au niveau d'un point de contrôle sur sa périphérie, on additionne toutes les vitesses induites mutuellement, comme indiqué dans l'équation. (IV.15)

$$v_r = \sum_{i=1}^j v_{ri} v_{aut} \quad (\text{IV.15})$$

La figure IV.9 indique que les anneaux tourbillonnaires, qui apparaissent immédiatement derrière le rotor, se trouvent dans une région de vitesse radiale élevée, entraînant une expansion rapide de leur diamètre lorsqu'ils s'éloignent du rotor. Ces vitesses radiales, mesurées par le point de contrôle au bord de l'anneau tourbillonnaire, sont réduites à zéro.

La figure (IV. 10) illustre la vitesse axiale en relation avec la distance z depuis le plan du rotor, le long du bord des anneaux. Il est remarquable que l'anneau tourbillonnaire derrière le rotor se déplace initialement plus lentement que ceux situés plus loin du plan rotor.

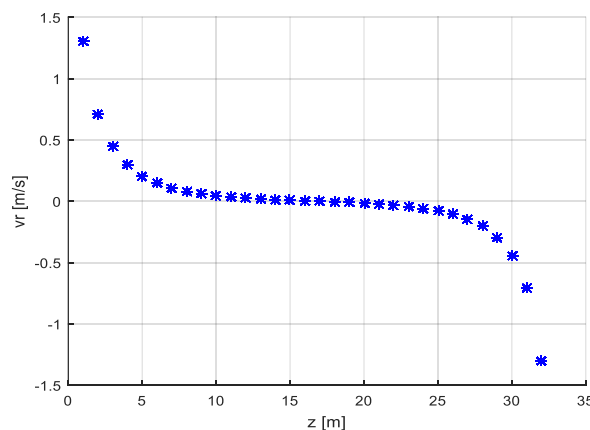


Figure IV.9: Distribution de la vitesse radiale le long du sillage de l'anneau tourbillonnaire

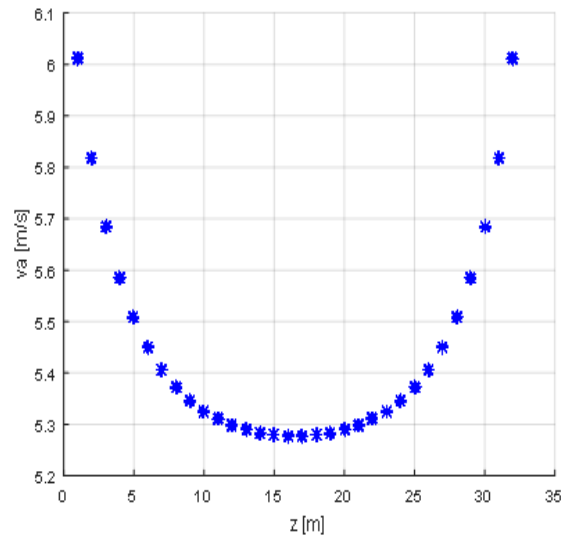


Figure IV.10 : Distribution de la vitesse axiale à travers le sillage

IV.4.2 Modélisation des pales

La modélisation aérodynamique des pales est essentielle et exige des calculs précis pour définir les dimensions critiques. La figure IV.11 présente le triangle de vitesse, souvent utilisée pour évaluer les forces exercées sur le rotor.

Cette approche consiste à diviser la pale en k sections, chacune étant considérée comme indépendante des autres. Pour chaque section, la vitesse induite est évaluée axialement et tangentielle par le système tourbillonnaire, comme le montrent Karpatne et al [105].

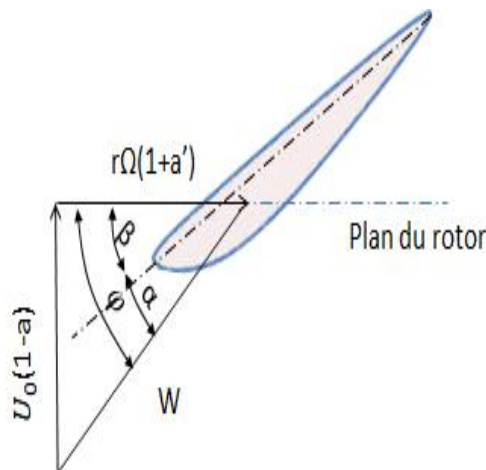


Figure IV.11 :Représentation du triangle de vitesse dans l'analyse des pales de rotor

L'angle d'incidence est calculé selon :

$$\alpha = \phi - \beta \tag{IV.16}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{u_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} \right) \quad (\text{IV.17})$$

La poussée totale T générée par le rotor est calculée en sommant les coefficients de portance locaux $cl(i)$ pour chaque α_i .

$$T = \frac{1}{2k} \sum_i^k N \rho w^2 cl(i) c(i) \Delta r \quad (\text{IV.18})$$

Pour obtenir l'intensité de chaque pale, on utilise le théorème de Kutta-Joukowski. On peut déterminer l'intensité équivalente du tourbillon à partir de la poussée totale produite par la turbine [106].

$$(\text{IV.19})$$

$$T = \Gamma \rho \int_0^R \Omega r dr$$

En supposant que tout le flux résultant est tiré de l'extrémité des pales et en additionnant la poussée totale de toutes les aubes, l'intensité de l'anneau tourbillonnaire est déterminée par (IV.20). [106]

$$\Gamma = \frac{2T}{\rho N R^2 \Omega} \quad (\text{IV.20})$$

La circulation Γ , qui sera libérée par l'anneau tourbillonnaire, est calculée de manière itérative à chaque étape t, comme le décrit Karpatne et al. [105].

$$\Delta t = \frac{2T}{N\Omega} \quad (\text{IV.21})$$

➤ Schéma d'intégration temporelle

Pour chaque pas temporel, on détermine le champ total de vitesse généré par tous les anneaux. Pour le passage du temps, un schéma prédictor-correcteur a été désigné, comme précisé en (IV.22) et (IV.23) [107]. Lors de la première itération, ces paramètres sont utilisés pour estimer les positions axiales et radiales des anneaux tourbillonnaires.

$$r_i^* = r_i^n + \Delta t v_{ir}(r_i^n, z_i^n) \quad (\text{IV.22})$$

$$z_i^* = z_i^n + \Delta t v_{iz}(r_i^n, z_i^n) \quad (\text{IV.23})$$

Afin d'assurer une précision et une stabilité optimales dans le calcul des positions des anneaux tourbillonnaires, la méthode Adams-Bashforth est employée équations (IV.24) à (IV.25) .

$$r_i^* = r_i^n + \frac{3}{2} \Delta t v_{ir}(r_i^n, z_i^n) - \frac{1}{2} \Delta t v_{ir}(r_i^{n-1}, z_i^{n-1}) \quad (\text{IV.24})$$

$$z_i^* = z_i^n + \frac{3}{2} \Delta t v_{iz}(r_i^n, z_i^n) - \frac{1}{2} \Delta t v_{iz}(r_i^{n-1}, z_i^{n-1}) \quad (\text{IV.25})$$

Par la suite, les vitesses sont déterminées dans cette nouvelle position. L'emplacement de l'anneau est déterminé par la vitesse moyenne intermédiaire et les nouvelles vitesses (IV.26) et (IV.27).

$$r_i^{n+1} = r_i^n + \frac{\Delta t}{2} [v_{ir}(r_i^*, z_i^*) + v_{ir}(r_i^n, z_i^n)] \quad (\text{IV.26})$$

$$z_i^{n+1} = z_i^n + \frac{\Delta t}{2} [v_{iz}(r_i^*, z_i^*) + v_{iz}(r_i^n, z_i^n)] \quad (\text{IV.27})$$

Dans ce travail, nous avons utilisé deux types d'éoliennes pour étudier et simuler les forces appliquées aux rotors d'éoliennes. Le premier cas étudié concerne un rotor de type NREL5MW, soumis à une vitesse de vent de 8 m/s. Le rapport NREL [108] fournit les paramètres fondamentaux des turbines, ainsi que les spécifications des profils aérodynamiques, leurs caractéristiques et d'autres détails pertinents relatifs à la turbine utilisée dans ce modèle.

La figure (IV.12) illustre la manière dont les anneaux tourbillonnaires se distribuent dans le sillage, en se déplaçant le long de l'axe et en se dilatant radialement.

Cette simulation numérique nous permet d'obtenir les résultats exposés dans les figures (IV.13) et (IV.14) expose la manière dont l'intensité Γ est répartie, ainsi que la distribution des forces tangentielles et axiales le long de la pale.

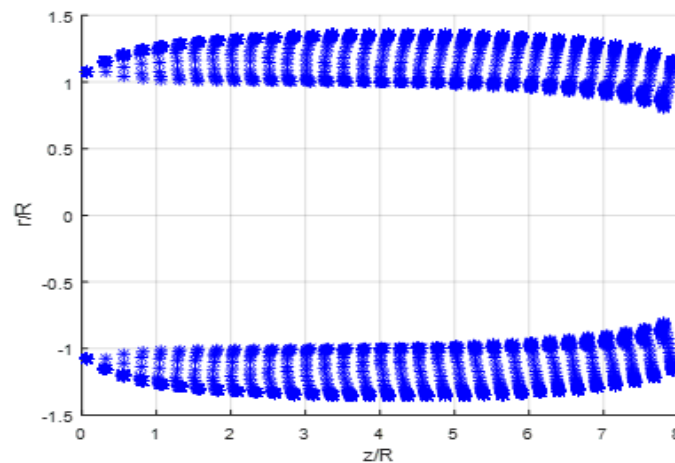


Figure IV.12: Organisation des anneaux tourbillonnaires dans le sillage

La figure (IV.12), illustrant la distribution des anneaux tourbillonnaires dans le sillage d'une éolienne, met en lumière un phénomène dynamique complexe qui est fondamental pour comprendre l'impact aérodynamique des éoliennes sur leur environnement immédiat. Le mouvement axial et l'expansion radiale des anneaux tourbillonnaires illustrent de manière saisissante les interactions causées par la rotation des pales d'une éolienne.

Le déplacement axial des anneaux tourbillonnaires montre comment l'énergie cinétique est transférée du rotor à l'air ambiant, créant un sillage caractérisé par une série de structures tourbillonnaires cohérentes. Ce phénomène est essentiel, car il influence directement l'efficacité de l'éolienne en provoquant des pertes d'énergie dans le sillage. Il est également crucial de comprendre ce déplacement axial pour optimiser l'espacement entre les éoliennes au sein d'un parc, dans le but de limiter les interactions défavorables entre les sillages et, par conséquent, d'optimiser la production d'énergie globale du parc.

L'expansion radiale des anneaux, d'autre part, souligne l'importance des effets tridimensionnels dans la dynamique du sillage. Cette dilatation radiale indique une redistribution de l'énergie dans le plan perpendiculaire à l'axe du vent. Cela peut avoir des impacts importants sur la conception des pales et sur le sillage, et qui peuvent également bénéficier d'une compréhension approfondie de ce phénomène.

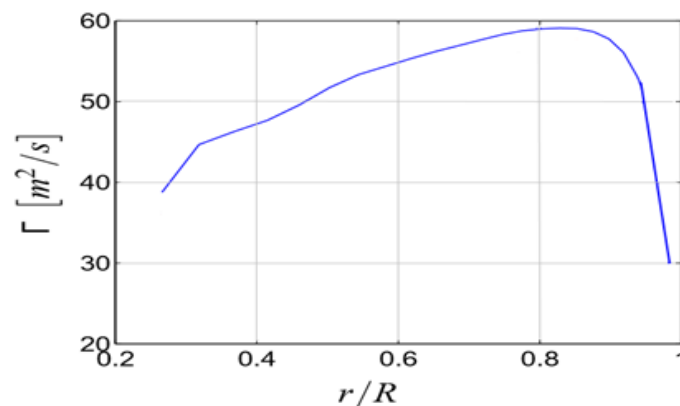


Figure IV.13: Variation de l'intensité Γ le long de la pale.

Cette observation, provenant de la simulation numérique et illustrée dans la figure IV.13, souligne un aspect crucial de la dynamique des pales d'éolienne. L'intensité de circulation Γ à l'extrémité de la pale atteint $39 \text{ m}^2/\text{s}$, ce qui est un paramètre crucial représentant la circulation tourbillonnaire autour de la pale. Le fait que cette intensité augmente proportionnellement à la valeur $0,87 \text{ } r/R$ (où r désigne la distance radiale par rapport au centre de rotation et R le rayon total de la pale) cette intensité diminue rapidement en direction de la racine de la pale. Les figures IV.14 et IV.15 démontrent la répartition des forces tangentielles et axiales dans le plan du rotor. On observe que la force augmente légèrement vers l'extrémité de la pale avant de se stabiliser. Cette force diminue ensuite rapidement à proximité de l'emplanture de la pale. Concernant le deuxième cas étudié, il s'agit d'une éolienne de type Gamesa G58

(Tableau IV.1), équipée d'un profil NACA 4412 (Tableau IV. 2) et dotée de trois pales. Le rotor, ayant un rayon de 58 mètres, est analysé et les résultats obtenus sont illustrés dans la figure IV.16. Ces résultats illustrent la quantité d'énergie récupérée par la turbine Gamesa en fonction de la vitesse du vent.

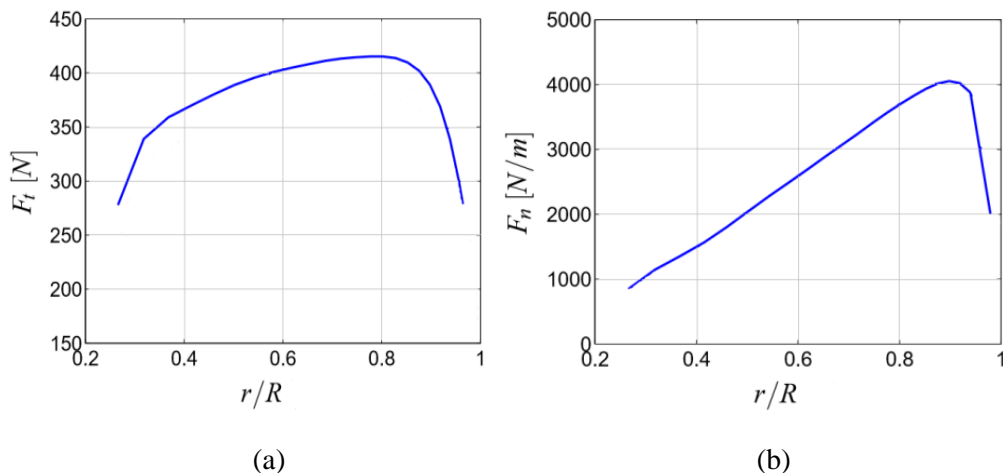


Figure IV.14 : Répartition des forces dans le plan rotor.

a: Répartition des forces tangentielles dans le plan rotor

b: Répartition des forces axiales dans le plan rotor

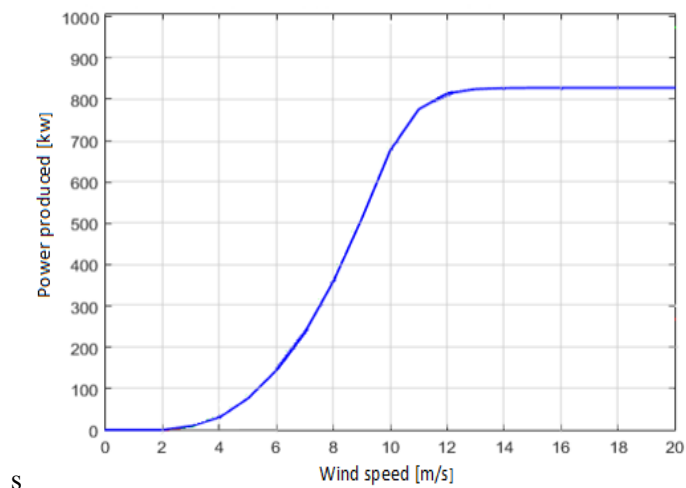


Figure IV.15 : Puissance produite par Gamesa G58 en fonction du vent rapide.

La Figure IV.15 illustre la variation de la puissance récupérée par la turbine Gamesa en fonction de la vitesse du vent. Il est crucial de considérer cette relation pour évaluer l'efficacité de l'éolienne dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité. La puissance récupérée augmente avec la vitesse du vent jusqu'à atteindre un seuil spécifique, appelé vitesse nominale.

Tableau IV.1: Caractéristiques techniques de l'éolienne Gamesa 58

| Paramètres | Valeurs |
|--------------------------|------------|
| Puissance Nominale | 850Kw |
| Vitesse de démarrage | 3,0 m/s |
| Vitesse nominale du vent | 12,5 m/s |
| Vitesse de déconnexion | 20 m/s |
| Diamètre du rotor | 58 m |
| Nombre de pales | 3 |
| Vitesse à extrémité | 94 m/s |
| Génératrice | Asynchrone |

Tableau.IV.2: Caractéristiques du profil NACA 4412

| NACA 4412 | Valeurs |
|--------------------------------|---------|
| Épaisseur (% de la corde) | 12 |
| Cambure (% de la corde) | 4,0 |
| Angle de bord de fuite (degré) | 14 ,4 |
| Épaisseur de l'intrados % | 76,1 |
| Portance maximale C_L | 1,507 |
| Maximum L/D | 57,20 |

IV.5 Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière les défis associés à la modélisation précise des forces agissant sur les rotors d'éolienne, et aussi a exploré en profondeur la dynamique complexe des écoulements aérodynamiques autour des rotors d'éoliennes, en mettant particulièrement l'accent sur les relations entre les pales du rotor et les anneaux tourbillonnaires formés dans leur sillage. À travers des simulations

numériques, nous avons pu observer et quantifier l'impact de ces interactions sur les performances globales des turbines éoliennes étudiées, notamment les modèles NREL5MW et Gamesa G58.

Les résultats obtenus démontrent clairement que les forces tangentielles et axiales le long des pales exercent une influence importante. L'adoption de profils aérodynamiques particuliers et une modélisation approfondie des anneaux tourbillonnaires dans le sillage peuvent fournir des informations essentielles sur les mécanismes de production d'énergie et les méthodes potentielles pour optimiser l'efficacité énergétique des turbines.

Conclusion générale

En débutant par un bref historique des éoliennes, cette étude a jeté les bases nécessaires à une compréhension approfondie de l'énergie éolienne en détaillant ses composants essentiels et ses principes de fonctionnement. Par la suite, notre recherche s'est concentrée sur une analyse minutieuse des différentes approches aérodynamiques applicables à l'étude des éoliennes. L'objectif principal de cette étude était d'approfondir la compréhension de l'aérodynamique des éoliennes et de créer une modélisation précise des forces exercées sur un rotor à axe horizontal. Pour atteindre cet objectif, nous avons élaboré un modèle en intégrant la méthode des éléments de pale pour le calcul des forces aérodynamiques et la théorie tourbillonnaire afin d'analyser le champ d'écoulement généré autour du rotor et dans son sillage.

L'enjeu majeur de ce travail résidait dans l'analyse des forces agissant sur les rotors d'éoliennes à axe horizontal, en utilisant la méthode des éléments de pale pour modéliser le rotor, et une approche basée sur les tourbillons pour simuler le sillage de manière libre. Ce modèle de rotor, conçu pour être utilisé dans l'analyse de parcs éoliens, visait spécifiquement à prédire la puissance générée par une éolienne, tout en représentant fidèlement les dynamiques d'écoulement associées.

Toutefois, le chemin de la recherche est pavé de questions non explorées et de défis à surmonter. Une analyse approfondie des interactions complexes entre les éoliennes, ainsi que l'intégration de ces modèles dans des simulations de parcs éoliens à grande échelle, demeurent des étapes essentielles pour l'avenir. Les perspectives de ce travail s'ouvrent donc sur :

- **Affinement des Modèles Existants** : améliorer les modèles aérodynamiques actuels pour accroître la précision des prédictions et adapter les outils de simulation aux nouvelles conditions environnementales et technologiques.
- **Développement de Nouvelles Méthodologies** : Explorer de nouvelles méthodologies et approches pour exploiter plus efficacement et durablement l'énergie éolienne, en prenant en compte les progrès technologiques et les besoins énergétiques en constante augmentation.
- **Examiner des approches de conception novatrices** pour réduire les effets instationnaires et optimiser l'efficacité énergétique des éoliennes.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] « Energy outlook 2016 », BP p.l.c, BP Statistical, 2016.
- [2] Hachemi, Glaoui, Harrouz, Abdelkader, Ismail, Messaoudi, Hamid, Saab, « Modeling of Wind Energy on Isolated Area », International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), vol. 4, no. 2, pp. 274-280, 2014.
- [3] Lanchester, F. W., « A contribution to the theory of propulsion and the screw propeller », Journal of the American Society for Naval Engineers, vol. 27, no. 2, pp 57-98, 1915.
- [4] Hamidreza, Abedi, « Development of Vortex Filament Method for Aerodynamic Loads on Rotor Blades », Thesis for Licentiate of Engineering, no. 22, 2013.
- [5] Hansen, M., Sørensen, J, Voutsinas. S, Sørensen. N., Madsen, H, « State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity », Progress in Aerospace Sciences, vol. 42, no. 4, pp. 285-330, 2006.
- [6] W. Froude, « On the Elementary Relation between Pitch, Slip and Propulsive Efficiency », Transactions of the Institute of Naval Architects, vol. 19, 1978.
- [7] Naji Abdullah Mezaal, Osintsev K. V, Alyukov S.V, « The computational fluid dynamics performance analysis of horizontal axis wind turbine », International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), vol. 10, no. 2, pp. 1072-1080, 2019.
- [8] B. Sanderse, S. P. Van der Pijl, and B. Koren, « Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics », Wind Energy, vol. 14, no. 7, 2011.
- [9] Emmanuel, B., « Wind Turbine Aerodynamics and Vorticity-Based Methods, Fundamentals and Recent Applications », Springer, Germany, 2017.
- [10] Bofeng, Xu, Tongguang, Wang, Yue, Yuan, Zhenzhou, Zhao and Haoming, Liu, A Simplified Free Vortex Wake Model of Wind Turbines for Axial Steady Conditions », Applied Sciences, vol. 8, no. 6, p. 866, 2018.
- [11] Yu. W, Ferreira. C.S, van. Kuik, G. Baldacchino, D, « Verifying the blade element momentum method in unsteady, radially varied, axisymmetric loading using a vortex ring model », Wind Energy, vol. 20, no. 2, pp. 269-288, 2017.
- [12] Branlard. E, S. P, & Gaunaa. M., « Analysis of wind turbine aerodynamics and aeroelasticity using vortex based methods », DTU Wind Energy, mo. 0052, 2015.
- [13] De Vaal. J., « Aerodynamic Modelling of Floating Wind Turbines », Ph.D. Thesis, NTNU Trondheim, Norway, 2015.
- [14] Jing. Dong, Axelle, Viré, Carlos Simao, Ferreira, Zhangrui, Li and Gerard van Bussel, « A Modified Free Wake Vortex Ring Method for Horizontal-Axis Wind Turbines », Energies, vol. 12, no. 20, p. 3900, 2019
- [15] A. Rolan, A. Luna, G. Vazquez, D. Aguilar, and G. Azevedo, « Modeling of a variable speed wind turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator », IEEE International Symposium on Industrial Electronics, no. ISIE, pp. 734–739, 2009.
- [16] F. Poitiers, « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat en génie électrique, École polytechnique de Nantes, France, 2003.
- [17] C.Masson "Wind technology", Department of Mechanical Engineering, École de technologies supérieure SYS84, 2011.
- [18] Abdelkarim, CHEMIDI, « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », Thèse de doctorat en Electrotechnique, Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen ,2015.
- [19] R. Ramakumar, A. Naeter, « Role of Renewable Energy in the Development and Electrification of Remote and Rural Areas », Power Engineering Society General Meeting IEEE, Vol.2, PP. 2103 – 2105,2004.

- [20] Haritza Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [21] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.
- [22] Zerari Naziha, « Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille », Thèse de doctorat en science, 2015.
- [23] Abdoula YB Mamadie Sylla, « Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation », mémoire présenté a l'université du Québec a trois rivières. 2013.
- [24] Milha Touati. M, « Conception et réalisation de pales de petites éoliennes » . Exposé de projet (www.saharawind.),consulté: Janvier 2023
- [25] <http://eolienne.comprendrechoisir.com/comprendre/eolienne-pour-particulier>. Consulté : mars 2022
- [26] J. M.Martin-Amouroux, « Perspectives Énergétiques Mondiales », Techniques De L'ingénieur, Be 8 515 -2004.
- [27] www.lemoniteur.fr/article/comment-ca-marche-energie-eolienne-20844033,consulté septembre 2020
- [28] Dris Mida, « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'énergie électrique Hybride (Éolien – Photovoltaïque) », thèse de doctorat de science 2019.
- [29] Khaled Ferkous, " Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne", Magister en physique école doctorale,Energies Renouvelables. 2009.
- [30] B. Paluch," Introduction à l'énergie éolienne ", Revue REE, no. 5, pp. 35-50, Mai 2005.
- [31] A.Mirecki,« Étude Comparative de chaînes de Conversion d' énergie Dédiées à une éolienne de Petite Puissance », Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [32] S. E. Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyen tension », thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2004.
- [33] " Le guide du petit éolien ", Clean tech Republic, 2009. [Online]. Available : [www. Clean techrepublic.com](http://www.Cleantechrepublic.com) 26, 174
- [34] D.A. SPERA, " Wind turbine technology. Fundamental concepts of wind turbine engineering ". New York ASME Press, 1994.
- [35] Zerzouri Nora, « Étude de l'effet de défaut sur le comportement dynamique de la machine asynchrone », thèse de doctorat Université Badji Mokhtar Annaba ,2016.
- [36] O.Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Ph.D. dissertation, École Normale Supérieure de Cachan, 2002. 33, 41, 174.
- [37] S. M. Boudia, « Optimisation de l'évaluation temporelle du gisement énergétique éolien par simulation numérique et contribution à la réalisation de l'Atlas des vents en Algérie », thèse de doctorat, Département de physique, Université de Tlemcen, 2012.
- [38] DEBBACHE Mohammed, « Amélioration de la performance de pale éolienne par considération des paramètres locaux et prend en compte les phénomènes des pertes », thèse de doctorat,Département Génie mécanique,Université Mohamed Khider Biskra,2018.
- [39] IEC-6400-2, Wind turbines -Part 2: Design requirements for small wind turbines, British standard, 2006.
- [40] Pascal Berlu, « Calcul des efforts subis par les éoliennes de moyenne et forte puissance », Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1,1999.
- [41] BELAMADI. Riyadh , « Contribution à l'étude d'un contrôle d'écoulement pour l'amélioration des performances aérodynamiques d'une éolienne », 2016

- [42] Munif Jourieh. « Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien ». Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2007.
- [43] D. Dimitrov and V. Lazarov. Source énergie renouvelables. Université technique de sofia, 1999.
- [44] S. S. A. Ivanell, « Numerical computations of wind turbine wakes », Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, April 2005.
- [45] D. A. Spera, Wind turbine technology, 2ème ed.: Asme Press, 2009.
- [46] E. HAU. Wind Turbine, Fundamentals, technologies, Application, Economics. Editions Springer, 2000.
- [47] F.Poitier, « Étude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [48] P.South, R.Mitchell, E.Jacobs, Strategies for the Evaluation of advanced Wind Energy Concepts, December 1983.
- [49] Sørensen J.N. and Shen W.Z, « Numerical modeling of wind turbine wakes », Journal of Fluid Engineering, 124:393–9, 2002.
- [50] R. Mikkelsen, « Actuator disc methods applied to wind turbines », Thèse de doctorat à la Technical University de Denmark, 2003.
- [51] Munif Jourieh, « Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien », Engineering Sciences. Arts et Métiers Paris Tech , 2007.
- [52] H. GLAUERT, « The Elements of Aerofoil and Airscrew Theory ». Cambridge University Press, New York, 2e édition.1947.
- [53] Asif Ali Memon. « Développement d'un modèle de surface active pour améliorer la représentation des charges aérodynamiques sur une pale éolienne ». Electric power. Arts et Métiers ParisTech, 2012. French .
- [54] Glauert H., 1935, Aerodynamic theory. vol. 4. Berlin, Germany, Julius Springer. p. 169–360.
- [55] S. Ivanell, J. Sørensen et D. Henningson :« Numerical computations of wind turbine wakes ». Wind Energy, pages 259–263, 2007.
- [56] Christophe Bassem Maalouf.« Etude des phénomènes tourbillonnaires dans le sillage éolien». Mechanics of the fluids. Arts et Métiers ParisTech, 2010. French.
- [57] Said Chkir. « Contribution a l'étude a'érodynamique d'une 'éolienne par une méthode de sillage libre». Fluids mechanics. Arts et Métiers ParisTech, 2010. French.
- [58] A.J. Landgrebe .« An analytical method for predicting rotor wake geometry. Journal of the American Helicopter Society », 14(4):20–32, 1969.
- [59] P. E. J. Vermeulen, An experimental Analysis of Wind Turbine Wakes,Third International Symposium on Wind Energy Systems, Technical University of Denmark, Lyngby,1980.
- [60] P. H. Alfredsson, J. A. Dahlberg, F. H. Bark, Some Propertes of The Wake Behind Horizontal Axis Wind Turbine, Third International Symposium On Wind Energy Systems, Technical University of Denmark, lyngby, 1980.
- [61] U. Hogstrom, D. N. Asimakopoulos, H. Kambezidis, C.G. Helmis, A. Smedman, « A Field Study of the Wake behind a 2 MW Wind Turbine » , Atmospheric Environment, Vol,22, N04, 803-820, 1988.
- [62] HAMANE Dawoud « Simulation numérique de l'écoulement dans le sillage d'une éolienne » Ecole Nationale Polytechnique Département d'Electronique Centre de Développement des Energies Renouvelables 2012
- [63] L. Christophe. « Simulation numérique de l'écoulement tridimensionnel turbulent dans un parc éolien » . Mémoire de maitrise en science appliquées à l'institut polytechnique de Montréal, Septembre, 1998.

- [64] RB Gray et GW Brown :« A Vortex-Wake Analysis of a Single-Bladed Hovering Rotor and a Comparison with Experimental Data » . In AGARD Conference on Aerodynamics of Rotary Wings, AGARD-CPP-111, 1972.
- [65] J.C. Gohard :« Free Wake Analysis of Wind Turbine Aerodynamics » . ASRL TR184-14, Aero. And Struc. Research Lab., Dept. of Aeronautics and Astronautics, MIT, 1978, 1978.
- [66] Mohamed Mostafa Abdelaziz Hammam ,« Analytical Unsteady Aerodynamic Models for Horizontal Axis Wind Turbines »,thèse de doctorat, UNIVERSITY OF CALGARY ,2016
- [67] M. M. Hand, D. A. Simms, L. J. Fingersh, D. W. Jager, and J. R. « Cotrell. Unsteady Aerodynamics Experiment Phase V: Test Configuration and Available Data Campaigns ». Technical Report December, 2001.
- [68] J. Gordon Leishman . « Challenges in modelling the unsteady aerodynamics of wind turbines » . Wind Energy, 5(2-3):85–132, apr 2002. ISSN 1095-4244. doi: 10.1002/we.62.
- [69] J.G. Schepers.:« Engineering models in wind energy aerodynamics ». PhD thesis, TU Delft, Delft, 2012.
- [70] Herman Snel. Review of aerodynamics for wind turbines. Wind Energy, 6(3):203–211, ISSN 10954244. doi: 10.1002/we.97. 2003.
- [71] S. Ivanell : « Numerical Computations of Wind Turbine Wakes » , Lic. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, ISRN/KTH/MEK/TR/-05/10-SE, 2005.
- [72] X. Munduate, F.N. Coton et R.A.M.D. Galbraith,« An investigation of the aerodynamic response of a wind turbine blade to tower shadow ». Journal of Solar Energy Engineering, 126:1034, 2004.
- [73] J.J. Chattot,«Tower shadow modelization with helicoidal vortex method »,Computers and Fluids, 37(5):499–504, 2008.
- [74] Y. Kamada, T. Maeda, K. Naito, Y. Ouchi et M. Kozawa, « Measurement of Unsteady Aerodynamics Load on the Blade of Field Horizontal Axis Wind Turbine », Journal of Fluid Science and Technology, 3(3):335–343, 2008.
- [75] V. Lauber. REFIT and RPS : « Options for a harmonised Community framework » . Energy Policy " , 32(12) :1405–1414, 2004.
- [76] Ivanell S.S.A, « Numerical Computations of Wind Turbine Wakes », These doctorat , KTH Mechanics " , Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden,2005.
- [77] J G Schepers. IEA Annex XX: « Comparison between calculations and measurements on a wind turbine in yaw in the NASA-Ames wind tunnel » . ISBN 2020021110. doi: ECN-E-07-072.. 2007.
- [78] M. A. Khan, « Dynamic Stall Modeling for Wind Turbines".Master of Science at the Delft» .University of Technology,2018.
- [79] Meyers, J. and Meneveau, C. « Optimal Turbine Spacing In Fully Developed Wind Farm Boundary Layers » . Wind Energy, 2(15), 305-317.2011.
- [80] Barthelmie, R. and Jensen, L. « Evaluation Of Wind Farm Efficiency and Wind Turbine Wakes At The Nysted Offshore Wind Farm » . Wind Energy, 6(13), 573-586..2010.
- [81] Frédéric Sicot. « Simulation efficace des écoulements instationnaires périodiques » ,These doctorat.École Centrale de Lyon .Laboratoire de Mécanique des Fluides et d’Acoustique.2009.
- [82] F. Longatte. « Contribution à l'analyse phénoménologique des écoulements instationnaires dans les turbomachines : étude du couplage pompe-circuit et rotor-stator » .1998.
- [83] Frédéric Sicot. « Simulation efficace des écoulements instationnaires périodiques en turbomachines » .2009
- [84] C. B. Maalouf, « Etude des phénomènes tourbillonnaires dans le sillage éolien », Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech., 2010.
- [85] W. S. WIDNALL, H. R. MORTH. « Space Shuttle Landing Navigation Using Precision Distance Measuring Equipment » .1972.

- [86] Hadrien BOLNOT.« Instabilités des tourbillons hélicoidaux : application au sillage des rotors » These doctorat, Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre.2012
- [87] Abo-Khalil, A., Alyami, S., Sayed, K., Alhejji, A.« Dynamic Modeling Of Wind Turbines Based On Estimated Wind Speed Under Turbulent Conditions ». *Energies*, 10(12), 1907. <https://doi.org/10.3390/en12101907>. 2019.
- [88] Bergua, R., Robertson, A., Jonkman, J., Branlard, E., Fontanella, A., Belloli, M., & Goveas, A.Oc6 Project Phase Iii: « Validation Of the Aerodynamic Loading On A Wind Turbine Rotor Undergoing Large Motion Caused By A Floating Support Structure ». <https://doi.org/10.5194/wes-2022-74.2022>.
- [89] Das, S., Karnik, N., Santoso, S. « Time-domain Modeling Of Tower Shadow and Wind Shear In Wind Turbines ». *Isrn Renewable Energy*, (2011), 1-11. <https://doi.org/10.5402/2011/890582>.(2011).
- [90] Smith, B. and Glezer, A. « The Formation and Evolution Of Synthetic Jets. *Physics of Fluids* », 9(10), 2281-2297.
- [91] Ogbeide, O.O, Uwoghiren, F.O, « Computational Fluid Dynamic (CFD) Analysis of NACA Airfoil for Wind Turbine Blade Design », *Industrial Engineering Letters Vol.12, No.2, 2022*
- [92] L. J. Vermeer, J. N. Sørensen, and A. Crespo. *Wind turbine wake aerodynamics*, *Progress in Aerospace Sciences*, 2003.
- [93] A. Makridis. *Modelling of wind turbine wakes in complex terrain using Computational Fluid Dynamics*. PhD thesis, University of Edinburgh, 2012.
- [94] D. L. Elliott. *Status of wake and array loss research*, *Wind Power 1991 Conference*, Pacic Northwest Lab. , Richland, WA (United States), 1991.
- [95] A. Choudhry. *Effects of Wake Interaction on Downstream Wind Turbines*. Technical report, School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide, Australia, October 2014.
- [96] Issam MEGHLAOU « Contribution à l'étude d'une chaine de conversion éolienne de faible puissance à axe horizontal », Thèse de doctorat , Université Badji Mokhtar, Annaba , 2018.
- [97] A. Cerisola. *Numerical Analysis of Tidal Turbines using Virtual Blade Model and Single Rotating Reference Frame*, University of Washington, August 2012.
- [98] J B de Vaal, M O L Hansen and T Moan ,« Validation of a vortex ring wake model suited for aeroelastic simulations of floating wind turbines ». *Journal of Physics: Conference Series* 555 , 2014
- [99] E. Branlard, M. Gaunaa, « Cylindrical vortex wake model: right cylinder » *Wind Energy*, vol. 18, no. 11, pp. 973-987, 2014.
- [100] Ian S. Sullivan, Joseph J., Niemel, A., Robert E., Hershberger, Diogo Bolster and Russel J., Ddonnelly, « Dynamics of thin vortex rings,» *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 609, no. 25, pp. 319-347, 2008.
- [101] Jean-Jacques. Chattot, «Wind turbine aerodynamics, analysis and design,» *International Journal of Aerodynamics*, vol. 1, no. 3-4, pp. 404-444, 2011
- [102] Chattot, Jean-Jacques. «Actuator Disk Theory—Steady and Unsteady Models ». *Journal of Solar Energy Engineering* 136.3: 031012, 2014.
- [103] Van Heemst, J. W., et al. « Coupling of a free wake vortex ring near-wake model with the Jensen and Larsen far-wake deficit models. ». *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 625. No. 1. IOP Publishing, 2015
- [104] Lewis, Reginald Ivan. « Vortex element methods for fluid dynamic analysis of engineering systems » , Vol. 1. Cambridge University Press, 2005.
- [105] Karpatne. Anand, et al, «Vortex Ring Model of Tip Vortex Aperiodicity in a Hovering Helicopter Rotor, » *Journal of Fluids Engineering*, vol. 136, no. 7, pp. 071104. 2014.

- [106] Issam. Maghlaoui, Ivan, Dobrev, Fawas. Massouh, Ouahab. Benretem, Dalila. Khalfa, « Computationally Inexpensive free vortex method to obtain vortex core position in the wake of a horizontal axis wind turbine » *International Journal of Fluid Mechanics Research*, vol. 44, no. 5, pp. 427-443, 2017.
- [107] V. L. Okulov, et al ,« The rotor theories by Professor Joukowsky: Vortex theories » *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 73, pp. 19-46, 2015.
- [108] Wind Turbine for Offshore System Development, 5-MW Reference. Tech. Rep. TP-500-3806, NREL, February. 2009.