

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Génie mécanique
Spécialité : Energétique

THEME

Etude et simulation d'une turbine à axe vertical
(VAWT)

Présenté par :

SAHRAOUI FATIHA

Promoteur :

M^r HACHEMI MADJID

Promotion 2023- 2024

*D*édicace

Je dédie ce mémoire

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

Au mammon, qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect.

À mes frères Mohamed et Malek Et mes sœurs Baya, Nadia, Ahlem

Merci pour vos encouragements et vos soutiens inestimables, Qu'Allah puisse renforcer les liens sacrés qui nous unissent, ce travail est le résultat de votre précieux soutien

À les enfants de mes sœurs : Houssam, Haithem, Assil, wafaa, rawaa.

À mes amis que j'ai connus jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements

Merci a tout

Remerciement

Au début, je remercie Dieu pour la santé, la patience et la volonté qu'Il m'a accordées tout au long de ces longues années.

Je remercie mon superviseur HACHEMI MADJID pour son aide et la compréhension qu'il nous a toujours montrée, ainsi que pour sa patience, sa sagesse et sa disponibilité constante.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à les jurés d'avoir accepté de lire et d'évaluer notre travail. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants qui nous ont enseigné et qui nous ont soutenus par leurs compétences dans la poursuite de nos études (Mm.brahimi,Mm.ladjani,Mm.moughari,Mm.hayat,Mm.khaldi, Mm.cheradi,M.himrane, ...).

Toujours encouragé à poursuivre mes études. Enfin, je remercie ma famille pour leur soutien et leur présence, ainsi que toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à mes recherches et à la préparation de ce mémoire.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude et la simulation d'une turbine à axe vertical (VAWT), une technologie prometteuse pour la production d'énergie renouvelable. Les VAWT se distinguent par leur capacité à capter le vent dans toutes les directions, ce qui les rend adaptées aux environnements urbains et aux sites avec des régimes de vent fluctuants.

Dans un premier temps, nous avons examiné les principes de fonctionnement des VAWT, en analysant les différents types disponibles, notamment la turbine Darrieus et la turbine Savonius. Cette étude a été suivie d'une modélisation numérique utilisant des outils de simulation avancés pour évaluer les performances aérodynamiques de ces turbines.

Les résultats obtenus montrent que les VAWT peuvent atteindre des rendements intéressants, tout en présentant des avantages en termes de sécurité et d'intégration architecturale. Enfin, des recommandations pour l'optimisation de la conception des VAWT et leur mise en œuvre dans des projets futurs sont proposées.

Ce travail souligne l'importance des VAWT dans la transition énergétique et leur potentiel pour contribuer à un avenir durable.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace

REMERCIEMENTS

RÉSUMÉ

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION.....	1
Chapitres 01 : Généralités sur les éoliennes.....	3
1.1.Introduction.....	3
1.2. L'énergie éolienne.....	3
1.2.1.les avantages et inconvénient, de l'énergie éolienne.....	4
1.2.2. Applications de l'énergie éolienne.....	4
1.2.3. Développement de l'Energie éolienne	4
1.2.4. Les différents types d'éoliennes.....	5
1.3. Type VAWT (Vertical Axis Wind Turbine).....	7
1.4. Éolienne de Type Darius	8
1.4.1. Principe de fonctionnement.....	8
1.4.2 rendement.....	9
1.4.3.les avantages.....	9
1.4.4.les inconvénients.....	9
1.4.5.les éoliennes et la production d'énergie renouvelable.....	9
1.5. Éolienne de type savonius.....	9
1.5.1. Principe de fonctionnement.....	9
1.5.2. Les avantages.....	10
1.5.3. Les inconvénients.....	10
1.5.4. Rendement d'une éoliennede savonius	10
1.5.5.Applications courantes.....	11
1.6. Éolienne de type mixte	12
1.7. Aérodynamique d'un rotor éolienne.....	13
1.8. Technologies de production d'électricité à partir de l'énergie éolienne	13

1.8.1. Différentes méthodes utilisées dans l'éolienne.....	13
1.8.2. Turbine éolienne entraînant une génératrice synchrone à aimant permanent.....	16
1.9. Limite de fonctionnement	16
1.9.1. Le coût.....	16
1.9.2. Le milieu.....	16
1.9.3. Les effets sur le paysage.....	17
1.9.4. Le bruit.....	17
1.9.5. Divers problèmes.....	17
1.10. Les énergies éoliennes en Algérie.....	17
1.11. Conclusion.....	19
Chapitre 02 : ENERGIE DU VENT	20
2.1. Introduction.....	20
2.2. Distributions de Weibull.....	20
2.2.1. La loi de Weibull.....	20
2.2.2. Influence des paramètres K et c sue la distribution statistique des vitesses de vent.....	23
2.3. Le vent.....	25
2.4. Principe d'obtention de l'énergie à l'aide du vent.....	25
2.5. Transformation de l'énergie du vent en électricité.....	26
2.6. Principe de l'énergie éolienne.....	26
2.7. Amélioration du rendement d'une éolienne a axe vertical.....	26
2.7.1. Optimisation de la géométrie des pales.....	26
2.7.2. Matériaux innovants.....	26
2.7.3. Contrôle actif.....	27
2.7.4. Optimisation du générateur.....	27
2.7.5. Modélisation numérique et simulation.....	27
2.7.6. Autres axes d'amélioration.....	27
2.8. Energie éolienne urbaine.....	27
2.8.1. Présentation des éoliennes urbaines et de leur fonctionnement.....	28
2.8.2. Inconvénient et avantages des éoliennes urbaines	28
2.8.3. Développement des éoliennes urbaines	29
2.9. Optimisation d'une éolienne type Darrieus.....	30
2.9.1. Définition des objectifs d'optimisation.....	30

2.9.2. Conception initiale des pales.....	30
2.9.3. Simulation et analyse aérodynamique.....	30
2.9.4. Optimisation des paramètres de conception	31
2.9.5. Analyse structurale et optimisation.....	31
2.9.6 .Validation et déploiement.....	31
2.10. Optimisation d'une VAWT hybride.....	32
2.10.1. Les principaux axes d'optimisation d'une VAWT hybride	32
2.10.2. Challenges et perspectives.....	33
2.11. Conclusion.....	34
Chapitre 03 : Calcul d'une pale d'une VAWT.....	35
3.1. Introduction.....	35
3.2. Les pales.....	35
3. 3. La forme des pales.....	35
3.4 Descriptions aérodynamique d'une pale éolienne.....	36
3.4.1. Géométrie d'une pale d'éolienne.....	36
3.4.2. Le principe d'une pale.....	36
3.5. Réglage d'une pale.....	38
3.6. Les pales pour une éolienne verticale.....	38
3.7 Efforts aérodynamiques sur les pale.....	38
3.7. 1. Aérodynamique de la pale.....	40
3.7. 2. Les pales finies.....	45
3.7.3. Théorie de l'élément de pale.....	45
3.7.4 Avec quels matériaux sont fabriqués les pales des éolienne ?.....	46
3.7.5. Des matériaux de performants.....	47
3.8. Définition des profils.....	47
3.8.1. Action du vent sur les pales d'éolienne.....	48
3.8.2. Choix du profil.....	48
3.8.3. Polaire de profil.....	49
3.8.4 Caractéristique de quelque profil	50
3.8.5. Définition des profil NACA.....	51
3.8.5.1 Désignation d'un profil.....	51
3.8.5.2. NACA à quatre chiffres.....	51

3.8.5.3. NACA cinq chiffres	52
3.8.5.4. Quelque type du profil NACA.....	52
3.8.6. Quels sont les acteurs de la finesse d'une profil ?.....	53
3.9. Darrieus wind turbine.....	54
3.9.1. Principe de fonctionnement.....	55
3.9.2. Méthode de fonctionnement.....	56
3.9.3. Applications.....	57
3.9.4. Développements futurs.....	57
3.10. Théorie de Betz et coefficient de puissance.....	57
3.11. Utilisation de QBLAD pour la simulation et l'optimisation.....	58
3.12. Conclusion	59
Chapitre 04 : résultats et discussions.....	60
4. 1 introduction.....	60
4.2 Définition Qblade.....	60
4.3. Les paramètres des éléments d'une pale éolienne.....	61
4.4. Calcul des paramètres d'élément d'une pale.....	61
4.5 Application des paramètres de profil NACA sur l'éolienne.....	63
4.6 Simulation et analyse des résultats.....	65
4.6.1 Profil aérodynamique.....	65
4.6.2 Analyse directe de profil aérodynamique.....	66
4.6.3. Extrapolation polaire à 360°.....	69
4.6.4. Design du rotor.....	72
4.6.5. Simulation du rotor avec BEM (Blade Elément Moentum).....	73
4.6.6. Simulation de la turbine en utilisant BEM.....	74
4.6.7 Générateur de champ de vent turbulent.....	76
4.6.8. Présentation du générateur d'ondes.....	77
4.7. Remarque.....	78
4.8. Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	80

Liste des figures

Figure 01 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Figure 02 : Différents types d'éoliennes

Figure 03 : Eolienne a axe verticale

Figure 04 : Eolienne horizontale

Figure 05 : Vertical Axis Wind Turbine

Figure 06 : Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus

Figure 07 : Eolienne Savonius - éolienne domestique

Figure 08 : Caractéristiques d'une éolienne hybride Darrieus-Savonius

Figure 09 : Rendement des différents types d'éoliennes

Figure 10 : Turbine éolienne entraînant une génératrice à cc.

Figure 11 : Turbine éolienne entraînant une génératrice asynchrone à travers une boîte à vitesse

Figure 12 : Turbine éolienne couplée à une génératrice asynchrone à vitesse variable.

Figure 13 : Turbine éolienne couplée à une génératrice asynchrone double alimentation.

Figure 14 : Turbine éolienne couplée à une génératrice synchrone à aimants permanents.

Figure 15 : Comparaison de distributions de Weibull pour une même valeur de k

Figure 16 : Comparaison de distributions de Weibull pour une même valeur de c

Figure 17 : Forme des pales

Figure 18 : Profil d'une pale

Figure 19 : Bilan des efforts et vitesse sur un élément de la pale

Figure 20 : Darrieus et ses éoliennes à axe vertical (VAWT)

Figure 21 : Démarche de Validation d'une pale

Figure 22 : Actions des forces aérodynamiques

Figure 23 : Paramètres géométriques du rotor Darrieus

Figure 24 : Eléments caractéristiques d'une pale

Figure 25 : Direction du vent sur un tronçon d'une pale

Figure 26 : Forces appliquées sur un élément d'une pale

Figure 27 : Evolution des coefficients de portance et de traînée avec l'angle d'incidence

Figure 28 : Courbes de la portance théorique

Figure 29 : Quelque type de profils NACA

Figure 30 : Dornier Darrieus

Figure 31 : Principe de fonctionnement éolienne Darrieus

Figure 32 : Eoliennes à axe vertical

Figure 33 : Écran d'accueil Qblade (VAWT)

Figure 34 : Forme des profils NACA 0021 et SNL1850

Figure 35 : Analyse de profil NACA0021

Figure 36 : Analyse de profil SNL1850

Figure 37 : Coefficient de portance $[C_l]$ vs Angle d'attaque $[\alpha]$

Figure 38 : Ratio du coefficient de portance et du coefficient de traînée $[C_l/C_d]$ par rapport à l'angle d'attaque $[\alpha]$

Figure 39 : Profils aérodynamiques

Figure 40 : Extrapolation de profil NACA0021 aérodynamique réalisée selon la méthode Viterna dans QBlade

Figure 41 : Extrapolation de profil SNL1850 aérodynamique réalisée selon la méthode Viterna dans QBlade

Figure 42 : Paramètres dynamiques du profil aérodynamique pour une décomposition polaire NACA 0021 et SNL1850 réalisée dans QBlade

Figure 43 : Profil aérodynamique de la pale d'éolienne rotor Darius 8m

Figure 44 : Module de simulation BEM du rotor Darrius

Figure 45 : Paramètres de simulation d'une éolienne

Figure 46 : Fenêtre de contrôle d'une simulation numérique

Figure 47 : Résultats d'une simulation aérodynamique

Figure 48 : Champ de vent turbulent généré dans QBlade

Figure 49 : Module de simulation aérodynamique

Figure 50 : Observation d'une onde instable

Figure 51 : Évolution temporelle

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des composants pour les différentes technologies

Tableau 2 : Caractéristique de quelque profil

Tableau 3 : Caractéristiques de l'éolienne

Tableau 4 : Résultats de calcul NACA 0021

Tableau 5 : Résultats de calcul SNL 1850

Tableau 6 : Caractéristiques qui concernent les profils

Tableau 7 : Sections de rotor

Nomenclature

Acronymes

BEM : Blade Elément Momentum théorie

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables

DMST : Double-Multiple Stream Tube

ENP : Ecole Nationale Polytechnique

HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine

H-Rotor : Eolienne vertical de type H

NACA : National Advisory Committee for Aeronautics

NREL : National Renewable Energy Laboratory

VAWT : Vertical Axis Wind Turbine

TSR : Tip Speed Ratio

Lettres latines

A : Surface [m^2]

a : Facteur d'induction axial [-]

B : Nombre de pales d'une éolienne [-]

c : Longueur de la corde d'un profil aérodynamique [m]

C_d : Coefficient de traînée [-]

C_l : Coefficient de portance [-]

C_m : Couple mécanique [N.m]

C_p : Coefficient de puissance d'une éolienne [-]

d : Diamètre du rotor d'une éolienne [m]

F_D : Force de traînée [N]

F_L : Force de portance [N]

F_R : Force résultante [N]

h : Longueur de la pale [m]

KG : Constante de proportionnalité géométrique

KF : Constantes de proportionnalité des forces

KM : Constantes de proportionnalité des masses

P : Puissance d'une éolienne [W]

Nomenclature

P_{vent} : Puissance contenue dans le vent [W]

R : Rayon du rotor d'une éolienne [m]

U : Vitesse du vent [m/s]

Variables grecques

θ : Angle de calage [$^{\circ}$]

λ : Vitesse spécifique [-]

θ : Angle azimutale [$^{\circ}$]

ω : Vitesse de rotation [rd/s]

ρ : Masse volumique [kg/m³].

δ : Epaisseur de la couche limite [m]

σ : Solidité

$\sigma_{Cp_{max}}$: Solidité qui maximise le C_p

$\lambda_{cp_{max}}$: λ qui maximise le C_p

$C_{p_{max}}$: Maximum de C_p

ν : Viscosité cinématique [m²/s]

Introduction générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables comme l'énergie solaire, éolienne et hydraulique sont inépuisables, respectueuses de l'environnement et peuvent être autonomement gérées. Elles constituent le remède ultime pour combattre l'exploitation des énergies fossiles qui contribuent au réchauffement climatique et à la pollution mondiale. Ainsi, leurs avancées doivent être suffisamment importantes pour remplacer l'énergie fossile. Aujourd'hui, les recherches avancées dans le domaine de l'énergie éolienne sont très nombreuses pour améliorer son efficacité.

La politique énergétique algérienne doit aujourd'hui inclure les énergies renouvelables afin de garantir un développement durable et de répondre aux défis liés au contexte énergétique mondial actuel. C'est précisément pour répondre à cette exigence que nous avons élaboré ce travail actuel.

Ce travail a été fait dans le but de concevoir et de mettre en œuvre un prototype d'éolienne à axe vertical de type VAWT. Cette étude vise principalement à étudier le comportement d'une turbine à axe vertical en utilisant des simulations numériques de pointe. Cela englobe l'étude des pressions aérodynamiques, la répartition des contraintes mécaniques sur les pales, ainsi que l'évaluation de la performance énergétique dans diverses conditions de vent.

Dans le premier chapitre, nous examinerons d'abord l'origine de l'utilisation de l'énergie du vent. Ensuite, nous examinerons la définition et le classement des éoliennes, puis le fonctionnement des éoliennes à axe vertical. Enfin, nous conclurons avec la situation mondiale et nationale de l'énergie éolienne.

Ensuite le deuxième chapitre, il est souligné que la sélection d'un site et l'analyse statistique de la vitesse du vent jouent un rôle essentiel dans la réalisation d'une petite éolienne, ce qui a un impact sur sa rentabilité économique. La distribution de fréquence du vent est décrite par la loi de Weibull.

Au cours du troisième chapitre, la géométrie des pales d'une éolienne est cruciale pour son efficacité et rentabilité, grâce aux principes de l'aérodynamique qui convertent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Une géométrie optimisée augmentera le rendement, réduira les productions et prolongera la durée de vie.

Le chapitre final, Le rotor Darrieus, un type classique d'éolienne, utilise désormais un logiciel de simulation numérique avancé, QBlade, permettant aux ingénieurs de peaufiner la conception de ces rotors verticaux, optimisant ainsi leur performance et leur rendement énergétique.



Chapitre 01 :

Généralités sur les éoliennes

1. Généralités sur les éoliennes

1.1. Introduction

Ce chapitre vise à renforcer nos connaissances fondamentales sur les éoliennes. Dans un premier temps, nous examinerons brièvement l'histoire de l'utilisation du vent comme source d'énergie. Ensuite, nous examinerons la définition et le classement des éoliennes en fonction de leurs caractéristiques.

Les différentes configurations (emplacement du rotor) sont examinées, suivies du mode de fonctionnement des éoliennes à axe vertical, pour finalement aborder la situation mondiale et nationale de cette ressource.

1.2. L'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur.

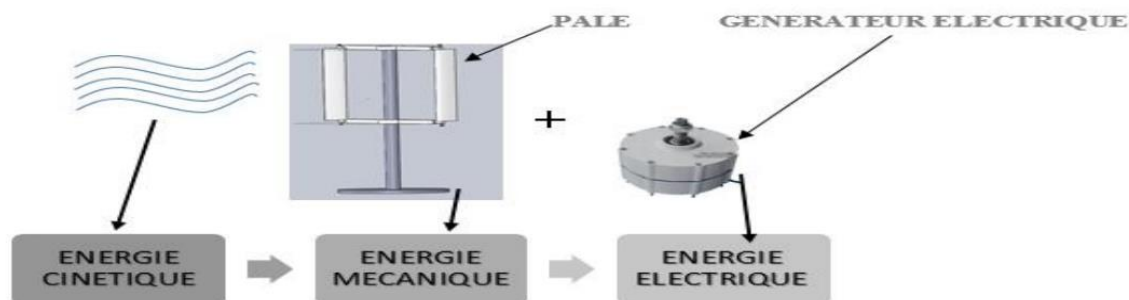


Figure 01 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. C'est une énergie qui a une forme indirecte du soleil, puisque les vents sont générés par des différences de pression et des températures dans l'atmosphère causée par le rayonnement solaire. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique [1].

Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- ✓ En énergie mécanique
- ✓ En énergie électrique

Cette énergie présente deux avantages majeurs, car elle est entièrement écologique et renouvelable. Elle ne génère aucun rejet lors de son exploitation, ne dégage aucune radiation ou émission toxique (pas d'effet de serre) et ne produit aucun déchet. Cependant, le principal désavantage de cette source d'énergie réside dans son manque de souplesse et de stabilité (mauvais rendement lors des vents turbulents) [1].

1.2.1. Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

a) Les avantages

- ✓ Il est considéré comme une énergie renouvelable
- ✓ Plus bas coût par rapport au nucléaire
- ✓ Une source d'énergie qui ne provoque pas de pollution
- ✓ C'est une solution efficace pour alimenter les zones reculées avec l'énergie
- ✓ La facilite de monter et démonter Les parcs éoliens

b) Inconvénients

- ✓ Le Mouvement du vent aléatoire les aérogénérateurs produits une qualité de puissance n'est pas toujours très bonne.
- ✓ Le bruit et impact visuel produit par les aérogénérateurs peut être dérangement
- ✓ Les parcs éoliens besoin des grandes surfaces
- ✓ Intervention électromagnétique

1.2.2. Applications de l'énergie éolienne

- ✓ Production de l'énergie électrique
- ✓ Utilisé pour déplacer des navires et des voiliers
- ✓ Utilisé pour moudre la farine
- ✓ Faire des activités sportives
- ✓ Le pompage de l'eau

1.2.3. Développement de l'énergie éolienne

Le développement de l'énergie éolienne a connu une évolution significative depuis ses origines avec les moulins à vent, qui remontent au Moyen Âge. À partir des années 1970, une prise de conscience accrue des enjeux énergétiques et environnementaux a conduit à l'essor des éoliennes modernes, notamment dans les années 1990 avec des avancées technologiques. Les éoliennes, qu'elles

soient terrestres ou offshore, jouent un rôle crucial dans la transition énergétique, offrant une source d'énergie renouvelable, durable et en constante expansion. Malgré leurs nombreux avantages, tels que la réduction des émissions de CO₂ et la création d'emplois, elles doivent faire face à des défis comme l'intermittence de la production et l'impact environnemental. À l'avenir, le secteur devrait continuer à croître grâce à des innovations technologiques et à des politiques favorables, intégrant l'énergie éolienne avec d'autres sources renouvelables pour maximiser son potentiel et contribuer à un avenir énergétique durable.

1.2.4. Les différents types d'éoliennes

Selon la configuration géométrique de l'arbre sur lequel l'hélice est montée, les éoliennes sont divisées en deux grandes catégories : les éoliennes à axe horizontal HAWT (« Horizontal Axis Wind Turbine ») et les éoliennes à axe vertical VAWT (« Vertical Axis Wind Turbine »). Les éoliennes de grandes puissances utilisent principalement les HAWT. Les VAWT ont été développées plus récemment, mais leur développement est accéléré, en particulier pour des turbines de petites ou moyennes puissances adaptées à des applications urbaines ou domestiques. De plus, des projets pour des VAWT de grandes puissances sont également en cours.

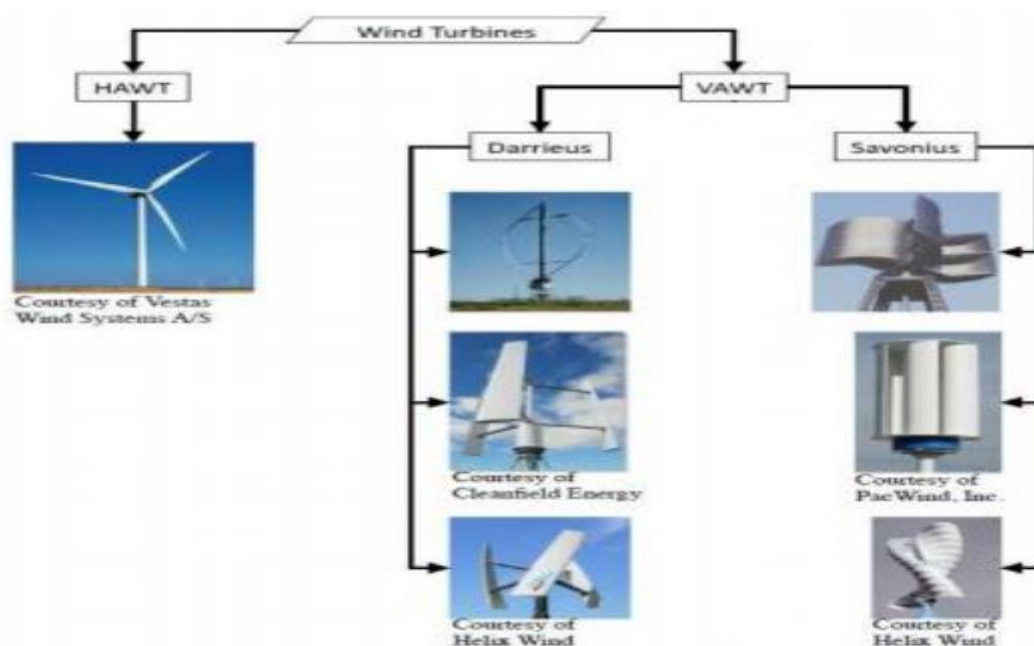


Figure 02 : Différents types d'éoliennes [2]

A) L'éolienne à axe vertical

Ce type de machines est les premières à être utilisées pour capter l'énergie éolienne, car elles sont d'une conception beaucoup plus simple que celle à axe horizontale[3], Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles[4], Elle ne nécessite pas de système d'orientation des pales par rapport à la direction du vent[3], De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue[5], Des problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol ont été les raisons de cet abandon au profit des éoliennes à axe horizontale[6].



Figure 03 : Eolienne à axe vertical.

b) L'éolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe verticale, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important[5], elles fonctionnent selon le principe des moulins à vent, Elles comportent généralement des hélices à trois pales[6], les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales[5].



Figure 04 : Eolienne horizontale

1.3. Type VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)

Une turbine éolienne à axe vertical (VAWT) est une turbine dans laquelle l'axe du rotor est dans la direction verticale. Étant donné que l'axe du rotor est dans la direction verticale, ces turbines n'ont pas besoin d'être pointées vers le vent pour être efficaces les rendent avantageux pour l'utilisation sur les sites où la direction du vent est très variable. Elles sont nettement plus silencieuses que les éoliennes à axe horizontal, ce qui les rend particulièrement utiles dans les zones résidentielles et urbaines. Mais les VAWT sont moins efficaces que les HAWT en raison de la traction supplémentaire qu'ils produisent lorsque les lames tournent dans le vent. Par conséquent, des efforts sont déployés pour réduire le coefficient de traction du VAWT afin de le rendre plus efficace. Les VAWT sont donc testés sur divers paramètres comme la vitesse du vent, le ratio de vitesse de pointe, la solidité, la finition de la lame du rotor ces dernières années. Les éoliennes à axe vertical sont principalement classées en deux types :

- ✓ Darrieus type VAWT
- ✓ Savonius type VAWT

En plus de ceux-ci, il existe d'autres types de VAWT, tels que le type Sweeney, moulins à vent de type Sistan, etc. qui ne sont pas utilisés fréquemment comme les deux ci-dessus. Cette section présente les conclusions de divers auteurs qui ont travaillé sur ces configurations de VAWT [7].

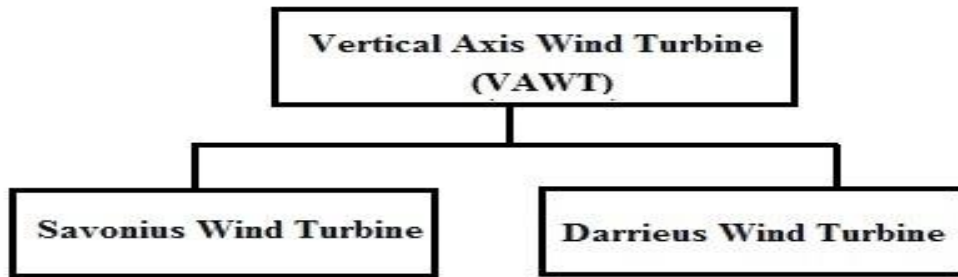


Figure 05 : Vertical Axis Wind Turbine

1.4. Éolienne de type Darius

1.4.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement repose sur un rotor d'axe vertical qui se déplace au centre d'un stator à ailettes.

Ce genre de solution permet une réduction significative du bruit tout en permettant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 km/h et quelle que soit leur direction.

Le principal inconvénient de ce genre d'éolienne réside dans leur difficulté à démarrer, car le poids du rotor pèse sur son socle, ce qui entraîne des frottements.

Autour de ce principe, on trouve plusieurs variantes, du simple rotor cylindrique – deux profils placés de part et d'autre de l'axe – au rotor parabolique où les profils sont recourbés en troposkine et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical.

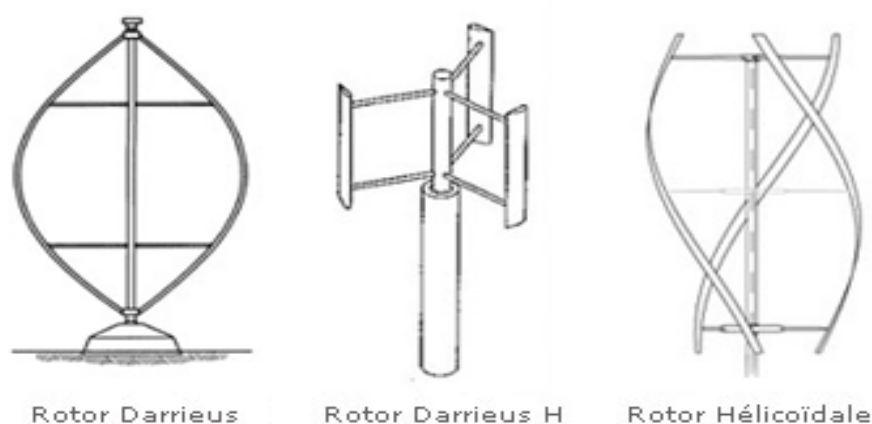


Figure 05 : Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus [8].

1.4.2. Rendement

Le faible rendement des éoliennes Darrieus est dû en partie au poids du rotor sur son stator et aux forces de frottement qui en résultent et contre lesquelles il faut aller. Mais ce faible rendement est compensé, comme nous venons de le voir, par la capacité omnidirectionnelle de prise au vent des éoliennes Darrieus.

Un autre avantage important de ce type d'éolienne est que le générateur électrique se place à la base du dispositif éolien, sur le sol. Il n'y a ainsi pas à investir dans l'édification d'un mât (c'est cependant une raison importante du manque d'efficacité de ce type d'éolienne que d'être proche du sol, car les autres types d'éolienne demande que pour leur efficacité l'extrémité des pales soient au minimum à 40m au-dessus du sol). Mais surtout, cela diminue et facilite évidemment grandement le coût d'installation et la maintenance à long terme de l'éolienne.

La plus vaste expérimentation d'éoliennes Darrieus eut lieu au Québec entre 1983 et 1992 sous la dénomination de Parc Eole. Un coup de vent extrêmement important mis fin à l'expérience [9].

1.4.3. Les Avantages

- ✓ Génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles).
- ✓ Moins d'encombrement qu'une éolienne "conventionnelle".
- ✓ Intégrable au bâtiment [8].

1.4.4. Les Inconvénients

- ✓ Démarrage difficile par rapport à l'éolienne de type Savonius.
- ✓ Faible rendement [8].

1.4.5. Les éoliennes et la production d'énergie renouvelable

Les éoliennes domestiques, y compris les Darrieus, jouent un rôle crucial dans la production d'énergie renouvelable.

En 2020, l'éolien terrestre a contribué à hauteur de 23,4% de la production d'électricité renouvelable mondiale. Ceci contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre, améliorant ainsi l'empreinte carbone globale.

1.5. Éolienne de type Savonius

1.5.1. Principe de fonctionnement

En 1924, l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius a créé une variante d'éoliennes verticales appelées éoliennes Savonius.

Leur mécanisme est simple : deux semi-cylindres désaxés forment des godets. Ces godets sont ouverts par le vent, ce qui génère un couple aérodynamique qui fait tourner l'axe de l'éolienne, produisant ainsi de l'électricité.

Grâce à leur design original, les éoliennes Savonius peut capturer le vent dans n'importe quelle direction [9].

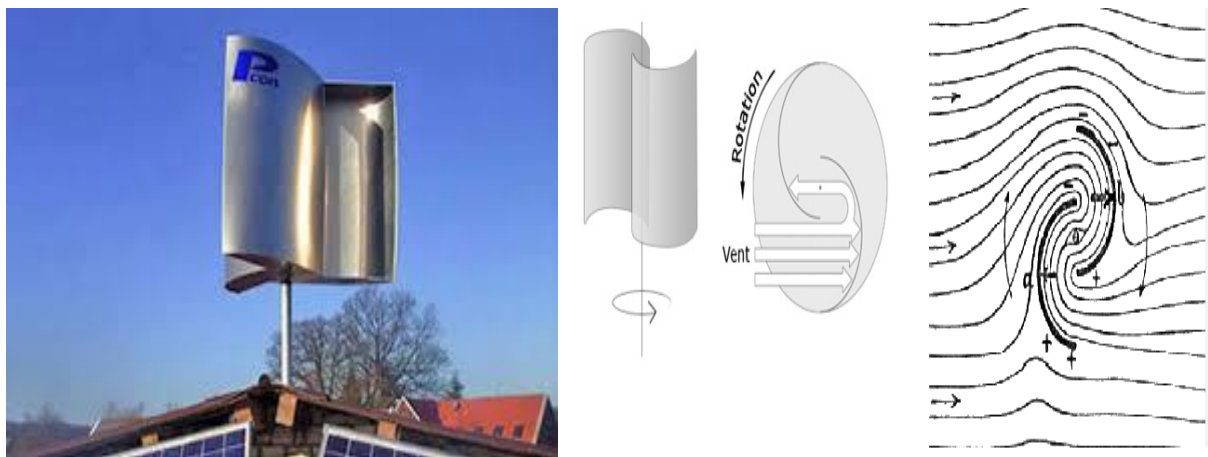


Figure 07 : Eolienne Savonius - éolienne domestique

1.5.2. Les Avantages

- ✓ Pas de contraintes sur la direction du vent
- ✓ Compact et robuste

1.5.3. Les Inconvénients

- ✓ Faible rendement par rapport à une éolienne à pôle

1.5.4. Rendement d'une éolienne de Savonius

- Savonius hélicoïdale

Les éoliennes de type Savonius hélicoïdale optimisent la prise au vent grâce à leur forme hélicoïdale, augmentant ainsi leur rendement. Elles peuvent atteindre un rendement de 30 à 40 %.

- Limite de Betz

La loi de Betz établit une limite théorique à la quantité d'énergie qu'une éolienne peut extraire du vent, généralement à environ 59,3 %. Les éoliennes Savonius, bien que moins efficaces que les modèles horizontaux, restent efficaces pour la production d'énergie domestique.

- **Rendement énergétique**

Le rendement énergétique d'une éolienne Savonius est influencée par divers facteurs, notamment la vitesse du vent, la conception du rotor et la qualité des composants. Le rendement global de conversion d'énergie mécanique en électricité varie de 15 à 40 %.

- **Mesure de la puissance récupérée**

Des mesures de la puissance électrique générée par l'éolienne permettent de déterminer son efficacité à différents niveaux de vent. Une éolienne de 1 kW (kilowatt) peut produire en moyenne 2 000 à 3 000 kWh (kilowattheures) par an dans des conditions venteuses.

- **Calcul de la puissance cinétique du vent**

Le calcul de la puissance cinétique du vent est essentiel pour évaluer le rendement de l'éolienne en fonction des conditions de vent. La puissance cinétique varie de 0,5 à 36 kW dans des vents de 3 à 25 m/s.

1.5.5. Applications courantes

- **Maison individuelle**

Les éoliennes Savonius de petite taille sont idéales pour alimenter une maison individuelle. Elles peuvent fournir entre 1 000 et 3 000 kWh par an, couvrant ainsi une partie significative des besoins en électricité d'un ménage moyen.

- **Entreprises**

Les entreprises peuvent également tirer parti des éoliennes Savonius pour réduire leur empreinte carbone et leurs coûts énergétiques [9].

Une éolienne de 5 kW peut économiser environ 3 000 à 5 000 euros par an en électricité.

1.6. Éolienne de type mixte

Les éoliennes de type hybride Darrieus-Savonius sont constituées de deux rotors généralement Concentriques, un rotor externe de type Darrieus et un rotor interne de type Savonius.

Les deux rotors peuvent aussi être montés l'un au-dessus de l'autre.

Elles exploitent donc à la fois la force de trainée et la force de portée. Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes (Figure 08) :

- Exploite la force de portée et de trainée
- Coefficient de puissance max $\approx 20\%$
- Vitesse spécifique optimal = 3 à 5
- Vitesse de démarrage = 2-3m/s

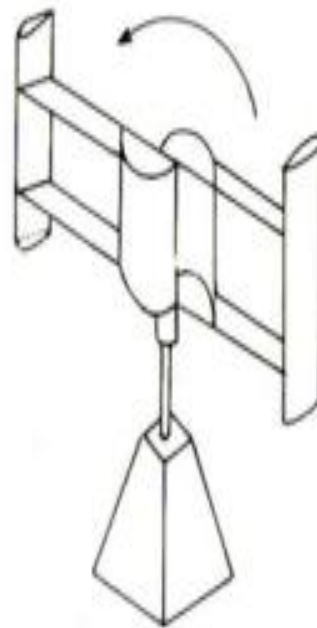


Figure 08 : Caractéristiques d'une éolienne hybride Darrieus-Savonius

Les performances des différents types d'éoliennes peuvent être résumées, de manière Approximative, par le graphique suivant (Figure 9) qui définit le coefficient de pression en Fonction de la vitesse spécifique [10].

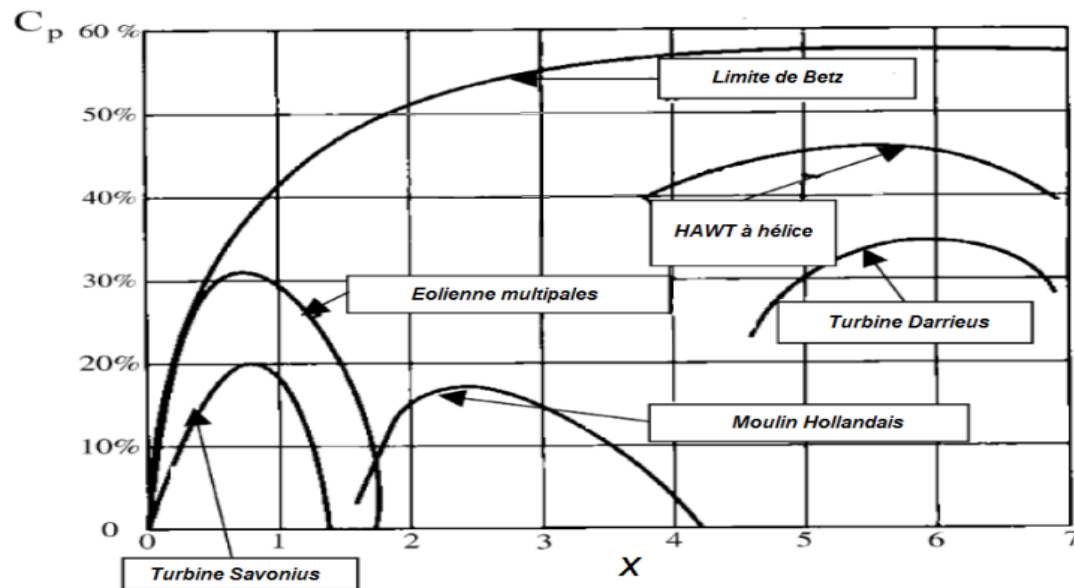


Figure 09 : Rendement des différents types d'éoliennes

1.7. Aérodynamique d'un rotor éolien

L'aérodynamique est la science qui étudie les phénomènes accompagnant tout mouvement relatif entre un corps et l'air qui le baigne. Dans son utilisation en aérodynamique, en particulier en aérodynamique externe, une caractéristique fondamentale est que le nombre de Reynolds représentatif de l'écoulement est toujours beaucoup plus grand que l'unité [5].

1.8. Technologies de production d'électricité à partir de l'énergie éolienne [1]

1.8.1. Différentes méthodes utilisées dans l'éolienne

Cinq méthodes sont utilisées afin de reproduire pour l'électricité de repartir due alizé

- 1) Turbine véhément une génératrice de mouvement constant (Figure10)
- 2) Turbine véhément une génératrice asynchrone de vélocité constant (Figure11) La vélocité Pour la génératrice restant virtuellement constante quelle pourquoi soit la vélocité due alizé Cette technique ne peut rien distiller la toute-puissance maximale ouvert afin de toutes les Vitesses due alizé

- 3) Turbine véhiculant une génératrice asynchrone de vitesse fluctuante (Figure12)
- 4) Turbine véhiculant une génératrice asynchrone triple diélectrique de vitesse fluctuante (Figure13)
- 5) Turbine véhiculant une génératrice synchrone à aimants permanents de vitesse fluctuante (Figure14)

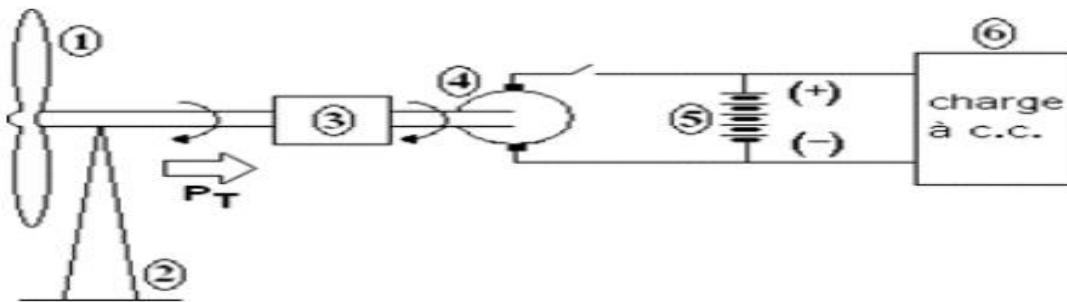


Figure 10 : Turbine éolienne entraînant une génératrice à cc.

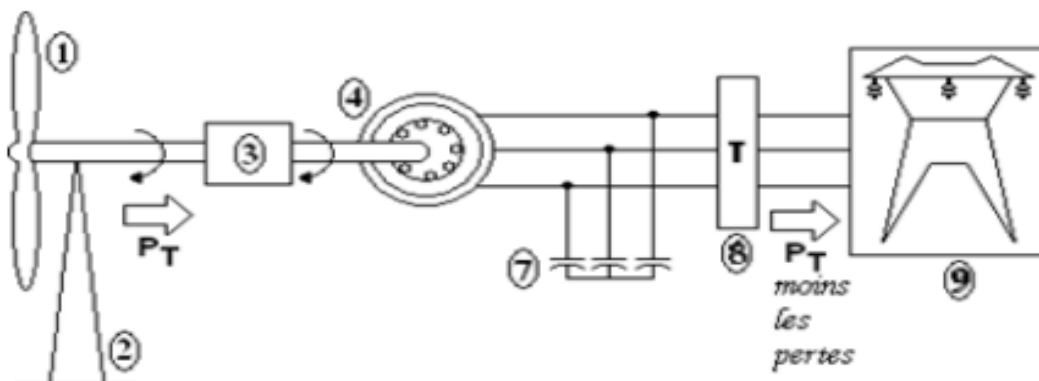


Figure 11 : Turbine éolienne entraînant une génératrice asynchrone à travers une boîte à vitesse.

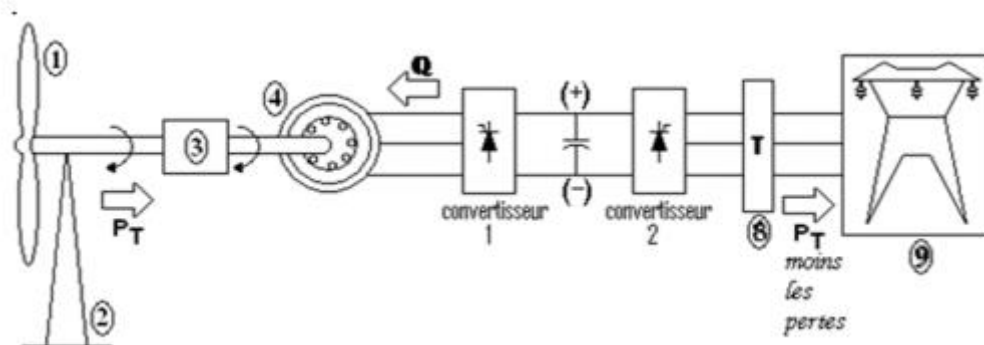


Figure 12 : Turbine éolienne couplée à une génératrice asynchrone à vitesse variable.

Turbine entraînant une génératrice synchrone à aimants permanents à vitesse variable

(Figure 14).

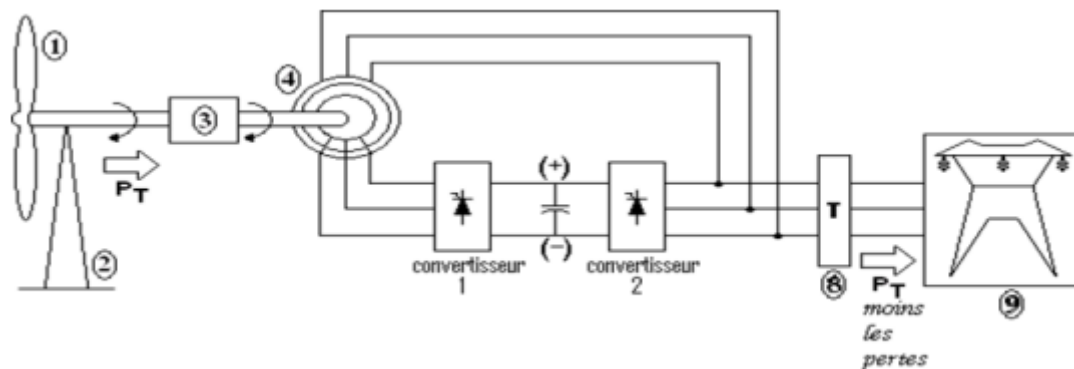


Figure 13 : Turbine éolienne couplée à une génératrice asynchrone double alimentation.

Les convertisseurs 1 et 2 transforment seulement une partie de la puissance totale générée par l'éolienne.

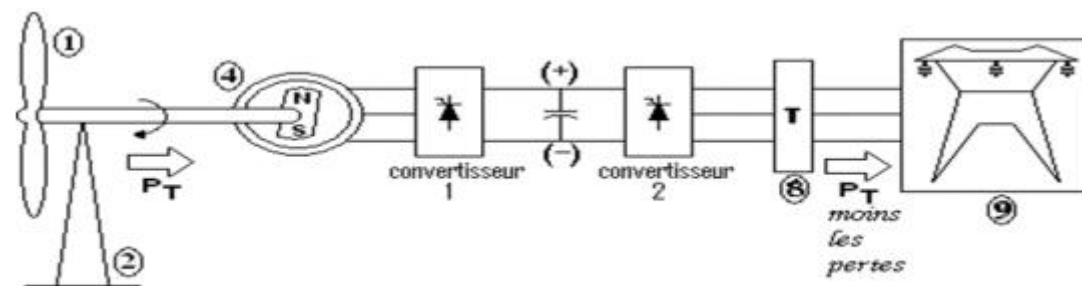


Figure 14 : Turbine éolienne couplée à une génératrice synchrone à aimants permanents.

Le couplage direct, sans boîte à vitesse, permet d'éviter les dégâts éventuels au système d'engrenage à la suite des coups de vent brusques.

Numéro	Désignation	Numéro	Désignation
(1)	Les pales	(6)	Charge
(2)	Tour	(7)	Banc de condensateur
(3)	Boîte à vitesse	(8)	Transformateur
(4)	La génératrice selon le cas	(9)	Réseau électrique
(5)	Batterie		

Tableau 1 : Liste des composants pour les différentes technologies

Evidemment, il ne nous est pas possible de traiter toutes les technologies dans un seul exposé, nous limiterons notre travail à la cinquième technologie.

Pour cela, nous présenterons le principe de base de la génératrice synchrone à aimants permanents.

1.8.2. Turbine éolienne entraînant une génératrice synchrone à aimant permanent

La figure (14) montre-bracelet une moteur éolienne couplée immédiatement d'une génératrice synchronique de aimants permanents La vitesse pour gyration optimale pour le moteur définit la multiplicité d'alimentation pour la génératrice synchronique. Cette multiplicité orientée produite dans le transformateur 1 quelque un remontrance pourquoi les accouplement convertisseurs transforment toute la toute-puissance produite dans la moteur dans conséquence ces convertisseurs sont encore mastoc pourquoi ceux utilisés sans une génératrice asynchrone de triple diététique immédiat permet d'éviter la piquette pour vitesses toute fois contrairement la vitesse pour gyration orientée peu guitare pour l'ordre pour 50r/min l'alternateur compte demeurer peu encore mastoc dans dehors la génératrice de aimants permanents ne requiert pope pour bagues ni pour balais et les pertes joules sur le rotor sont nulles généralement exactement non la machin orientée encore enceinte les avantages pour ce hissage de font la technique éolienne préférée afin de engendrer incontinent puissances jusqu'à (2 MW de 5MW).

1.9.Limite de fonctionnement

1.9.1.Le coût

La construction d'une éolienne nécessite un investissement élevé (un peu plus d'un million d'euros pour 1MW). Les éoliennes off-shore sont encore plus coûteuses, étant exposées à la corrosion et aux conditions météorologiques.

Cependant le prix d'achat et d'entretien est compensé par la durée de vie de l'éolienne, qui est d'environ 20 ans.

L'énergie produite par une ferme éolienne coûte donc moins cher que l'énergie produite par une centrale nucléaire. Mais une centrale nucléaire produit plus, et pendant de plus longues périodes.

1.9.2. Le milieu

L'éolienne doit être en permanence face au vent, à condition qu'il y en ait, pour produire l'énergie maximale (une rotation est effectuée par un gouvernail pour placer les pales face au

vent). La production d'énergie a lieu en fonction du vent et non de la demande. Au dessous d'une force de vent de 5 m/s, les pales restent inactives et au-delà de 27 m/s, il faut les orienter de manière à laisser le rotor tourner en roue libre.

Il faut donc un milieu bien particulier, exposé au vent mais pas trop. Un des avantages de l'éolienne est qu'elle ne prend pas beaucoup de place au sol, ce qui rend l'implantation moins difficile. De plus, la période d'hiver où les vents sont souvent les plus importants correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.

1.9.3. Les effets sur le paysage

L'éolienne est considérée comme un objet esthétique ou dénaturant, visible de loin. Les populations s'habitent aux pylônes électriques et aux châteaux d'eau depuis le début du XX siècle, et l'espace pour produire d'électricité doit être plus important.

1.9.4. Le bruit

Le bruit éolien consiste d'un passage de l'air dans l'hélice et de la rotation des éléments mécaniques. Le premier bruit est plus élevé, mais moins perturbant et susceptible aux plaintes. Mesuré en décibels, il n'empêche pas de tenir une conversation.

1.9.5. Divers problèmes

Les éoliennes provoquent des interférences électromagnétiques, mais l'installation de récepteurs et des problèmes liés aux oiseaux sont également abordables. Les études prouvent que la mortalité des oiseaux causé par les éoliennes est très faible, et la LPO (Ligue Protectrice des Oiseaux) surveille attentivement l'implantation de parcs éoliens [10].

1.10. Les énergies éoliennes en Algérie

En matière d'éolien, l'Algérie compte actuellement une capacité installée de 10 MW, à travers la ferme éolienne d'Adrar et projette une capacité de 400 MW à l'horizon 2030-2035, dans le cadre du programme dédié aux énergies renouvelables, tracé par le ministère de l'Energie et des Mines.



M. Bides, qui a présenté, à la presse, les enjeux de la transition énergétique au niveau mondial, régional et national et la contribution de la Banque mondiale dans ce domaine, a en outre indiqué que la préparation du programme d'accompagnement technique menée par la BM se poursuivra, dans les prochains mois, par d'autres rencontres d'évaluation en vue de mettre en place les outils techniques nécessaires au lancement effectif des projets dédiés aux deux volets.

La finalisation des deux études devrait se concrétiser dans neuf mois, après des bilans d'étape prévus tous les trois mois à Alger, selon les déclarations du responsable de la délégation de la Banque mondiale.

Il est à noter que la BM fournit actuellement à l'Algérie une assistance technique et des services d'analyse dans divers domaines, tels que la protection sociale, le développement du capital humain, la gestion des risques de catastrophe, les énergies renouvelables et le climat d'investissement. Deux études ont été récemment publiées par la BM.

Il s'agit d'un rapport sur la « Gestion des risques climatiques et de catastrophes en Algérie » élaboré conjointement avec la Délégation nationale des risques majeurs (DNRM) et les autorités algériennes, et d'un rapport intitulé « Note sur les forêts algériennes : gestion durable des forêts pour lutter contre les feux de forêt » identifiant les principaux axes d'intervention pour renforcer la durabilité et la résilience climatique des ressources forestières du pays.

1.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu étudier un modèle d'éolienne à axe vertical. Nous avons vu présenter les différents profils de pale et le comportement de l'air autour. En particulier Le principe de fonctionnement et on a exposé la définition de l'énergie éolienne, son histoire, leurs avantages et leurs inconvénients. Et enfin, on a présenté les différents types des éoliennes, les théories aérodynamiques des éoliennes à axe vertical (VAWT).

Chapitre 02 :
ENERGIE DU VENT

2. Energie du vent

2.1. Introduction

Le choix du site et la caractérisation statistique de la vitesse de vent représentent les facteurs les plus importants dans le processus d'implantation d'une petite éolienne. En effet, la valeur moyenne de la vitesse du vent et sa variation dans le temps sont les facteurs qui ont le plus grand impact sur sa rentabilité économique. Ainsi l'analyse de la vitesse du vent sur un site représente la première étape de tout projet éolien, permettant d'estimer la capacité de production. Comme le vent présente un caractère aléatoire, son analyse doit se baser sur des méthodes statistiques. Ainsi, les paramètres qui vont caractériser le régime des vents sur un site seront la valeur de la vitesse moyenne et les lois statistiques permettant de représenter sa variation temporelle.

Parmi ces lois, on retrouve la loi de Weibull qui permet de caractériser la distribution des fréquences de vitesses de vent.

2.2. Distributions de Weibull

2.2.1 La loi de Weibull

La fonction de Weibull permet de caractériser la distribution fréquentielle des vitesses de vent sur une période donnée : une année, un mois ou une journée par exemple. Cependant, dans la majorité des cas, cette distribution est utilisée pour une période d'un an. Elle est définie par l'équation suivante (2.1)[11] :

$$f(U) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{U}{c} \right)^k \right) \quad 2.1$$

Où : - $f(U)$ est la fonction de densité de probabilité de Weibull : $f(V)$ est donc la probabilité d'observation d'une vitesse de vent V , en m/s ;

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

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

La fonction de distribution cumulative associée est donc :

$$F(V) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad 2.2$$

La relation entre le facteur d'échelle de la loi de Weibull et la vitesse moyenne des vents s'établit par la formule suivante (2.3) :

$$c = \frac{\bar{U}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad 2.3$$

Avec : - Γ , la fonction Gamma ; $\bar{U}$, en m/s, la vitesse moyenne du vent ;

- k , le facteur de forme de la loi de Weibull.

L'estimation des deux paramètres k et c permet de caractériser la distribution statistique des vitesses de vent sur une période donnée, et par conséquent, d'estimer la production d'énergie éolienne.

Il est alors nécessaire de calculer ces deux paramètres pour chaque site étudié. Il existe plusieurs méthodes, permettant de calculer les paramètres k et c de la loi de Weibull à partir des données brutes de vitesses de vent prises durant une période déterminée :

- ✓ Méthode des moindres carrées (méthode graphique) ;
- ✓ Utilisation de la valeur médiane du vent et des vitesses quartiles ;
- ✓ Utilisation de la vitesse moyenne et de l'écart-type : méthode des moments ;
- ✓ Utilisation de la tendance entre k et la vitesse moyenne ;
- ✓ Utilisation du « facteur d'énergie » ;
- ✓ Utilisation des estimateurs de centile ;
- ✓ Méthode du maximum de vraisemblance (méthode itérative) : Maximum Likelihood Method (MLM) ;
- ✓ Méthode du maximum de vraisemblance modifiée : Modifie Maximum Likelihood Estimation (MMLE).

Les deux méthodes principalement utilisées sont la méthode des moindres carrées et la méthode MLM. La méthode MMLE sera aussi décrite afin de la comparer avec la méthode MLM.

a) Méthode des moindres carrés

C'est une méthode graphique basée sur la fonction cumulative de Weibull :

$$P(U < U_i) = P(U \geq 0) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{U_i}{c} \right)^k \right] \right\} \quad 2.4$$

En traçant la droite représentant le logarithme népérien de la fonction cumulative versus le logarithme népérien de la vitesse de vent, on obtient la relation (2.5) :

$$\ln \left\{ -\ln \left[1 - P(U < U_i) \right] \right\} = k \ln U_i - k \ln c \quad 2.5$$

On obtient donc le facteur k qui représente la pente de la droite et le produit -k ln c qui représente l'ordonnée à l'origine.

b) Méthode du maximum de vraisemblance (MLM)

C'est une méthode itérative de détermination du paramètre de forme k. Sa valeur est définie à l'aide de la formule suivante (2.6) [11] :

$$k = n \left(\frac{\sum_{i=1}^n U_i^k \ln(U_i)}{\sum_{i=1}^n U_i^k} - \sum_{i=1}^n \ln(U_i) \right)^{-1} \quad 2.6$$

Avec : - k, paramètre de forme à déterminer par calcul itératif en prenant une valeur initiale de k=2 (cette valeur est prise comme point de départ car l'expérience a montré que la valeur finale varie entre 1.7 et 2.3 dans la plupart des cas) ;

- U_i , en m/s, vitesse non nulle du vent à un instant i ;

- n, nombre de données de vitesses de vent non nulles.

Ensuite, on détermine la valeur du paramètre d'échelle c à l'aide de la formule suivante (2.7) :

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i^k \right)^{1/k} \quad 2.7$$

Cette méthode est très utilisée mais elle a, cependant, un inconvénient majeur qui est la nécessité d'utiliser des vitesses de vent non nulles. En effet, pour les sites où la probabilité d'avoir des vitesses de vent nulles est importante, cette méthode risque de donner des résultats peu réalistes. Pour de tels sites, on utilisera la loi de Weibull modifiée présentée à la page 20.

Lorsque les données de vitesses de vent sont disponibles sous forme fréquentielle, une variante de la méthode MLM peut être utilisée. Cette méthode est nommée : Modifie Maximum Likelihood Method (MMLM). Le principe de cette méthode est le même et il est basé sur les relations suivantes (2.8) (2.9) [11] :

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i^k \ln(U_i) P(U_i)}{\sum_{i=1}^n U_i^k P(U_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(U_i) P(U_i)}{P(U \geq 0)} \right)^{-1} \quad 2.8$$

$$c = \left(\frac{1}{P(U \geq 0)} \sum_{i=1}^n V_i^k P(U_i) \right)^{1/k} \quad 2.9$$

Où : - k est le paramètre de forme à déterminer par calcul itératif en prenant une valeur initiale de k=2 ;

- U_j , en m/s, est la vitesse du vent à un instant i ;

$P\{U > 0\} = 1$, est la probabilité que la vitesse de vent soit égale ou supérieure à zéro ;

$P(U_j)$, est la probabilité d'avoir la vitesse de vent U_j .

2.2.2. Influence des paramètres k et c sur la distribution statistique des vitesses de vent

Les facteurs de forme k et d'échelle c de la loi de Weibull ont des influences différentes sur la distribution statistique des vitesses de vent.

Le facteur d'échelle c est directement relié à la vitesse moyenne du vent par la relation (2.9).

Pour une même valeur de k, l'augmentation de la valeur de c représente une augmentation de la valeur moyenne, c'est-à-dire une augmentation du nombre de vitesses de vent élevées et une diminution du nombre de vitesses faibles. La courbe de distribution des vitesses de vent est alors plus aplatie et avec un maximum qui se décale vers la droite (figure 15) :

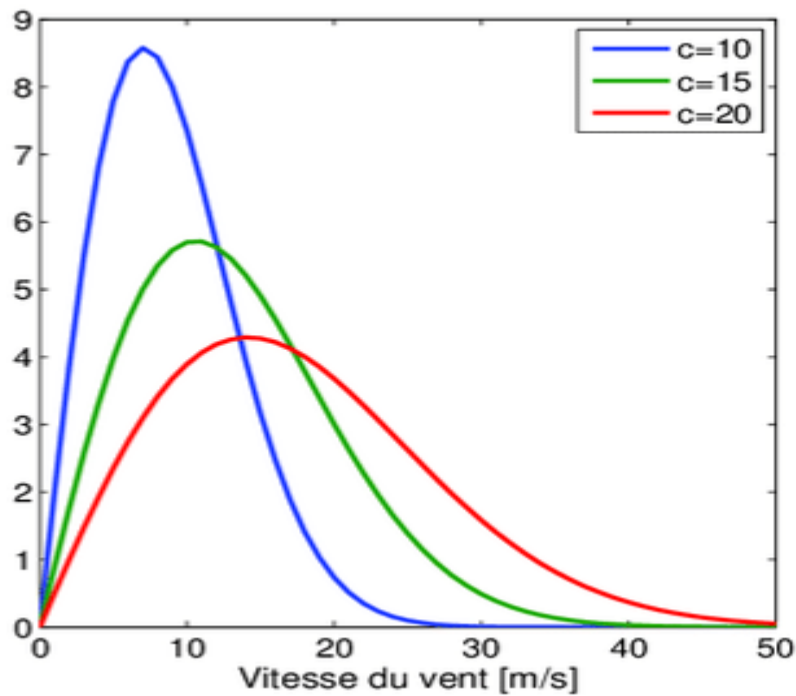


Figure 15 : Comparaison de distributions de Weibull pour une même valeur de k

Par contre, si l'on augmente la valeur du paramètre k en fixant celle de c , la courbe de distribution des vitesses de vent devient plus étroite, son maximum augmente et est décalé vers la droite : on a un plus grand nombre de vitesses de vent autour de la moyenne alors que le nombre de vitesses de vent faibles et élevées diminue (Figure16) :

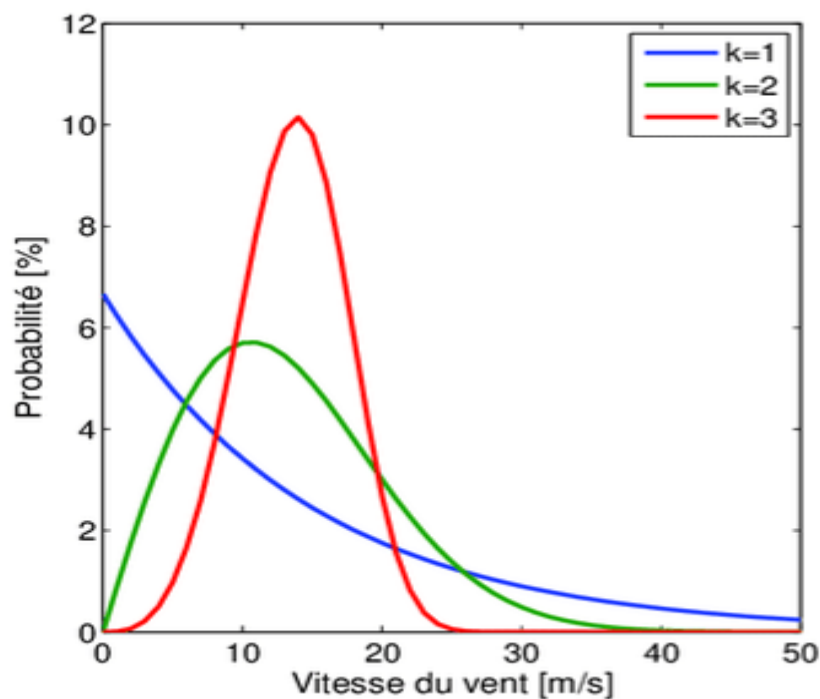


Figure 16 : Comparaison de distributions de Weibull pour une même valeur de c

2.3. Le vent

Le vent est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par-dessus l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre [02].

2.4. Principe d'obtention de l'énergie à l'aide du vent

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200 tr/min) est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau. S'il est lié directement au réseau, alors tourne à vitesse « fixe » ou très faiblement variable en jouant sur le glissement de la machine asynchrone [16].

Sil générateur est lié indirectement au réseau, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. Ce convertisseur autorise le fonctionnement à vitesse variable de ce type de chaîne permettant d'utiliser une machine synchrone, asynchrone ou encore machine spéciale. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système.

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

2.5. Transformation de l'énergie du vent en électricité

Pour la transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [8].

2.6. Principe de l'énergie éolienne

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

Au niveau de la turbine, qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique ; au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique. Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine.

2.7. Amélioration du rendement d'une éolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical offrent de nombreux avantages, notamment leur capacité à capturer le vent provenant de toutes les directions. Cependant, leur rendement est généralement inférieur à celui des éoliennes à axe horizontal. Pour améliorer ce rendement, plusieurs axes de recherche sont explorés [12][13][14] :

2.7.1. Optimisation de la géométrie des pâles

- **Forme aérodynamique** : Des études approfondies sont menées pour déterminer la forme optimale des pâles afin de maximiser la capture d'énergie éolienne.
- **Nombre de pâles** : Le nombre de pôle influence directement le rendement et les contraintes mécaniques. Un compromis doit être trouvé.
- **Profil des pâles** : Le profil aérodynamique des pâles joue un rôle crucial dans la génération de la portance et de la traînée.

2.7.2. Matériaux innovants

-**Matériaux composites** : L'utilisation de matériaux composites permet de réduire le poids des pâles tout en améliorant leur résistance et leur rigidité.

-Revêtements spéciaux : Des revêtements anti-givre ou hydrophobes peuvent améliorer le rendement en réduisant les pertes dues à l'accumulation de glace ou d'eau sur les pâles.

2.7.3. Contrôle actif

-Orientation des pâles : Des systèmes de contrôle actif permettent d'orienter les pâles en fonction de la direction et de la vitesse du vent, optimisant ainsi la capture d'énergie.

-Régulation de la vitesse de rotation : En adaptant la vitesse de rotation du rotor aux conditions de vent, il est possible d'améliorer le rendement énergétique.

2.7.4. Optimisation du générateur

-Type de générateur : Le choix du générateur (asynchrone, synchrone, à aimants permanents) a un impact significatif sur le rendement global de l'éolienne.

-Électronique de puissance : L'optimisation de l'électronique de puissance permet d'adapter la production d'électricité aux besoins du réseau et d'améliorer le facteur de puissance.

2.7.5. Modélisation numérique et simulation

-Optimisation par simulation : Des logiciels de simulation numérique permettent de tester différentes configurations d'éoliennes et d'identifier les solutions les plus performantes.

-Analyse des écoulements : La simulation des écoulements autour des pâles permet de mieux comprendre les phénomènes physiques en jeu et d'identifier les zones d'amélioration.

2.7.6. Autres axes d'amélioration

-Réduction des pertes mécaniques : La minimisation des pertes dues aux frottements et aux vibrations contribue à améliorer le rendement global.

-Intégration au paysage : Des études sont menées pour développer des éoliennes à axe vertical ayant un impact visuel réduit et s'intégrant mieux à l'environnement.

2.8. Energie éolienne urbaine

Les éoliennes urbaines sont une solution innovante pour la production d'énergie renouvelable en milieu urbain. Elles présentent des avantages environnementaux et économiques, mais doivent surmonter certains défis liés à leur rendement, leur coût et leur impact sur l'environnement urbain. Des exemples d'installations réussies montrent que les éoliennes urbaines peuvent être intégrées de manière harmonieuse et efficace dans les villes,

contribuant ainsi à la transition énergétique et à la lutte contre le changement climatique. Les progrès technologiques et la sensibilisation accrue du public devraient favoriser le développement et l'adoption des éoliennes urbaines dans les années à venir [15].

2.8.1. Présentation des éoliennes urbaines et de leur fonctionnement

Les éoliennes urbaines sont un type d'éoliennes terrestres très spécifiques : elles sont conçues pour être intégrées dans les environnements urbains et périurbains. Elles sont généralement de taille réduite et utilisent souvent des turbines à axe vertical (VAWT) pour capter les vents turbulents et changeants typiques des zones urbaines. Les éoliennes urbaines sont généralement installées sur les toits, les façades de bâtiments ou les espaces publics, et sont conçues pour fonctionner avec un minimum de bruit et de vibrations [15].

2.8.2. Inconvénients et avantages des éoliennes urbaines

Les éoliennes urbaines ont les avantages de l'énergie éolienne classique, mais sans certains inconvénients handicapants. Elles ont toutefois aussi leurs propres challenges [15].

a) Avantages

Les éoliennes urbaines présentent plusieurs avantages pour la production d'énergie renouvelable en milieu urbain :

- ✓ Production d'électricité bas carbone
- ✓ Production d'énergie locale et décentralisée, réduisant la perte d'énergie liée au transport
- ✓ Valorisation des espaces urbains inutilisés (toits, façades)
- ✓ Sensibilisation accrue du public aux énergies renouvelables et à la transition énergétique

b) Inconvénients et défis

Malgré leurs avantages, les éoliennes urbaines présentent également des défis :

- ✓ Rendement inférieur aux grandes éoliennes en raison de la faible vitesse du vent en milieu urbain
- ✓ Coût d'installation et d'entretien élevé
- ✓ Impact visuel et esthétique sur l'environnement urbain
- ✓ Nuisance sonore et vibrations potentielles pour les occupants des bâtiments
- ✓ Leur puissance est nécessairement limitée : il n'est pas possible de créer de grandes structures

2.8.3. Développement des éoliennes urbaines

a. Principales marques et modèles d'éoliennes urbaines

Plusieurs entreprises proposent des éoliennes urbaines adaptées aux besoins spécifiques des villes, telles que [15] :

- ENESSERE – Italie : Cette entreprise italienne conçoit et fabrique des éoliennes à axe vertical esthétiquement plaisantes et adaptées aux environnements urbains.
- Helix Wind – États-Unis : Helix Wind propose des éoliennes à axe vertical en spirale, qui se distinguent par leur design unique et leur faible bruit.
- Urban Green Energy (UGE) – États-Unis : UGE offre une gamme d'éoliennes à axe vertical et horizontal adaptées aux bâtiments et aux infrastructures urbaines.
- Wind spire Energy – États-Unis : Wind spire Energy conçoit des éoliennes à axe vertical élancées et élégantes, qui peuvent être installées dans des zones résidentielles et commerciales.
- PAC Wind Technologies – États-Unis : PAC Wind développe des éoliennes à axe vertical de petite taille pour une utilisation en milieu urbain.
- Klux Energies – Espagne : Cette entreprise espagnole propose des éoliennes à axe vertical compactes et silencieuses pour les environnements urbains.
- O-Wind Turbine – Royaume-Uni : O-Wind Turbine a développé une éolienne urbaine à axe vertical capable de capter le vent dans plusieurs directions, ce qui la rend particulièrement adaptée aux environnements urbains changeants.
- Quiet Revolution – Royaume-Uni : Quiet Revolution propose des éoliennes à axe vertical silencieuses, conçues pour minimiser l'impact sonore en milieu urbain.

b. Installations

- Paris, France : éoliennes sur le toit de l'hôtel Mercure Paris Montmartre Sacré-Cœur, permettant de produire une partie de l'électricité nécessaire à l'hôtel et de réduire son empreinte carbone.
- Toronto, Canada : éolienne urbaine installée sur la tour du Centre des sciences de l'Ontario, contribuant à l'éducation du public sur les énergies renouvelables et leur intégration en milieu urbain.
- New York, États-Unis : projet d'installation d'éoliennes sur le pont Verrazzano-Narrows, visant à produire de l'énergie pour les infrastructures du pont et à sensibiliser les passants à la transition énergétique.

2.9. Optimisation d'une éolienne type Darrieus

2.9.1. Définition des objectifs d'optimisation

Avant de commencer, définissez clairement les objectifs de l'optimisation [16] [17]:

- ✓ Maximiser le Coefficient de Puissance (C_p) : Augmenter la quantité d'énergie convertie à partir de l'énergie cinétique du vent.
- ✓ Réduire les Effets de Vibrations et de Charges Structurales : Assurer la durabilité et la stabilité du système.
- ✓ Améliorer la Performance dans des Conditions Variées : Adapter la conception pour différents profils de vent et conditions environnementales.

2.9.2. Conception Initiale des pales

A) Choix du profil aérodynamique

Profils de Pales : Sélectionnez des profils aérodynamiques adaptés, comme les profils NACA, pour optimiser le rendement. Les profils avec des courbures spécifiques peuvent améliorer le démarrage et la performance générale.

B) Géométrie des pales

Longueur des Pales : Choisissez une longueur appropriée pour les pales. Une longueur plus longue peut capter plus de vent mais peut aussi entraîner des défis structuraux.

Courbure et Twist des Pales : Déterminez la courbure et le twist (inclinaison progressive) des pales pour maximiser l'efficacité aérodynamique.

2.9.3. Simulation et analyse aérodynamique

A) Utilisation de logiciels

QBlade : Utilisez QBlade pour la simulation aérodynamique. Ce logiciel permet d'analyser les performances des pales, de simuler différentes configurations et de visualiser les résultats.

Autres Outils : Des logiciels comme XFOIL (pour les profils aérodynamiques) et Open FOAM (pour la dynamique des fluides computationnelle) peuvent compléter votre analyse [16][17][18].

B) Analyse des résultats

Courbes de C_p et de C_t : Analysez les courbes du coefficient de puissance (C_p) et du coefficient de traînée (C_t) pour différentes configurations de pales.

Évaluation des Forces : Vérifiez les forces exercées sur les pales et la structure du rotor pour éviter les problèmes de fatigue [16][17].

2.9.4. Optimisation des paramètres de conception

A) Ajustement des paramètres

Nombre de Pales : Le nombre de pales affecte la performance et les charges. Généralement, les éoliennes Darrieus a 2 ou 3 pales.

Inclinaison et Position des Pales : Ajustez l'inclinaison et la position des pales pour optimiser le démarrage et la performance à différentes vitesses du vent [16].

B) Test de prototypes

Tests en Éolienne de Laboratoire : Si possible, testez des prototypes en soufflerie ou en laboratoire pour valider les simulations et ajuster les designs en fonction des résultats expérimentaux [17].

2.9.5. Analyse structurale et optimisation

A) Vérification de la durabilité

Charge et Stress : Utilisez des outils d'analyse structurale pour évaluer les charges sur les pales et le rotor. Assurez-vous que les matériaux et la conception résistent aux contraintes opérationnelles.

Fatigue des Matériaux : Considérez la fatigue des matériaux en fonction des conditions de vent cycliques.

B) Amélioration de la conception

Réduction du Poids : Utilisez des matériaux légers et résistants pour réduire le poids des pales tout en conservant leur robustesse.

Optimisation des Structures : Améliorez la structure de support et les systèmes de montage pour garantir la stabilité et la performance du rotor [18].

2.9.6. Validation et déploiement

A) Validation sur site

Tests de Terrain : Réalisez des tests sur site pour valider la performance dans des conditions réelles de vent.

Ajustements Finaux : Apportez des ajustements basés sur les résultats des tests de terrain pour optimiser la performance de l'éolienne.

B) Documentation et suivi

Rapport d'Optimisation : Documentez les paramètres optimisés, les résultats de simulation, et les tests sur site.

Suivi des Performances : Mettez en place des systèmes de surveillance pour suivre la performance en fonctionnement et détecter tout problème potentiel [18].

2.10. Optimisation d'une VAWT hybride

Une VAWT hybride (Éolienne à Axe Vertical) combine les avantages de différentes géométries et technologies pour améliorer la capture d'énergie éolienne. L'optimisation d'une telle éolienne requiert une approche multidisciplinaire, combinant des connaissances en aérodynamique, en mécanique des structures, en électronique de puissance et en contrôle [19][20][21].

2.10.1. Les principaux axes d'optimisation d'une VAWT hybride

A) Optimisation géométrique

- Combinaison de profils aérodynamiques : Utiliser des profils différents sur les différentes parties de la pale pour améliorer la performance dans des régimes de vent variés.
- Optimisation du nombre et de l'espacement des pales : Trouver le compromis optimal entre la capture d'énergie et les contraintes structurelles.
- Forme du rotor : Explorer des formes de rotor innovantes (H-Darrieus, Savonius-Darrieus) pour améliorer le rendement à basse vitesse.

B) Matériaux et structures

- Matériaux composites : Utiliser des matériaux composites légers et résistants pour réduire le poids et augmenter la durée de vie de l'éolienne.
- Optimisation des structures : Utiliser des outils de simulation numérique (éléments finis) pour optimiser la structure des pales et du moyeu.

C) Contrôle actif

-Contrôle de l'orientation des pales : Adapter l'orientation des pales en fonction des conditions de vent pour maximiser la production d'énergie.

-Contrôle de la vitesse de rotation : Réguler la vitesse de rotation du rotor pour optimiser le fonctionnement du générateur et réduire les contraintes mécaniques.

-Contrôle actif des turbulences : Mettre en place des systèmes de contrôle actif pour réduire l'impact des turbulences sur le rendement.

D) Systèmes de conversion d'énergie

-Générateurs électriques : Choisir le type de générateur (asynchrone, synchrone, à aimants permanents) adapté aux caractéristiques de l'éolienne et aux exigences du réseau.

-Électronique de puissance : Optimiser l'électronique de puissance pour maximiser le rendement énergétique et améliorer la qualité de l'énergie produite.

E) Modélisation numérique et optimisation

-Simulation numérique : Utiliser des outils de simulation numérique (CFD, éléments finis) pour étudier les écoulements autour des pales, les contraintes structurelles et les performances globales de l'éolienne.

-Optimisation multi-objectifs : Utiliser des algorithmes d'optimisation multi-objectifs pour trouver le meilleur compromis entre différents critères (rendement, coût, durée de vie).

2.10.2. Challenges et perspectives

L'optimisation d'une VAWT hybride reste un domaine de recherche actif. Les principaux défis sont liés à la complexité des phénomènes physiques en jeu, à la nécessité de trouver des compromis entre différents critères et à la disponibilité de données expérimentales.

Les perspectives sont néanmoins prometteuses :

-Nouveaux matériaux : L'émergence de nouveaux matériaux (nanomatériaux, métamatériaux) pourrait ouvrir de nouvelles voies pour améliorer les performances des VAWT.

-Intelligence artificielle : L'utilisation de l'intelligence artificielle pourrait permettre de développer des systèmes de contrôle plus performants et de mieux prédire le comportement des éoliennes.

-Fabrication additive : La fabrication additive pourrait permettre de réaliser des géométries complexes et de réduire les coûts de production.

2.11. Conclusion

Au début de ce chapitre, nous avons examiné divers paramètres liés au vent, tels que la modélisation mathématique de la distribution de fréquence de vent de Weibull.

En résumé, l'optimisation des performances des éoliennes à axe vertical est un domaine de recherche en cours. Les progrès technologiques et les simulations numériques offrent des opportunités nouvelles pour concevoir des éoliennes plus performantes et plus compétitives.

Nous avons vu présenter, l'optimisation d'une VAWT hybride est un domaine de recherche dynamique et prometteur. Les avancées technologiques et les développements méthodologiques permettent d'envisager des éoliennes à axe vertical de plus en plus performantes et compétitives.

Chapitre 03 :
Calcul d'une pale d'une
VAWT

3. Calcul d'une pale d'une VAWT

3.1. Introduction

L'aérogénérateur est principalement conçu en utilisant les théories aérodynamiques, car il utilise des pales avec une géométrie spécifique et un profil aérodynamique. La taille de cette forme géométrique est très importante. Incidence sur son efficacité énergétique et, par conséquent, sur sa rentabilité financière [22].

3.2. Les pales

Les pales sont une partie très importante de l'aéromoteur, le rendement, le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine dépendront de leur conception. Lorsqu'elles sont assemblées on parle d'hélice ou de rotor.

Il existe très peu de fabricants dans le monde capables de construire ces pales qui sont maintenant en fibre de verre et en fibre de carbone. Du fait de leur longueur (30 à 40 mètres)

Il faut des convois exceptionnels pour les transporter sur le site.

Les pales sont caractérisées par :

- ✓ Leur longueur
- ✓ Leur largeur
- ✓ Leur profil : -Le profil traditionnel -Le profil cambré
- ✓ Leurs matériaux de construction
- ✓ Leurs nombres [5]

3.3. La forme des pales :

Lorsque l'on regarde des pales posées à plat, la première chose que l'on remarque c'est la différence des formes. Elles sont plus ou moins trapues, avec des bords parallèles ou un bord droit et un bord arrondi, etc.

-La forme influence la performance de la pale :

Plus il y a de portance près du bout de la pale, plus il y a de fuites en bout d'aile. Si on répartie la portance le plus loin possible du bout de la pale ca limitera les fuites.

La forme de la pale elliptique (a) répartie la portance le plus loin du bout et diminue fortement la traînée aérodynamique. La forme est difficile à réaliser.

Pour pallier à la difficulté de réalisation et au prix exorbitant de la fabrication de la pale une forme trapézoïdale (b) est utilisée et bénéficie d'un effet proche de l'optimum de la pale elliptique (a).



Figure 17 : Forme des pales

3.4. Descriptions aérodynamiques d'une pale éolienne

3.4.1. Géométrie d'une pale d'éolienne :

L'élément le plus important dans une machine éolienne rapide ou lente est la pale, l'étude de la pale amène à l'étude des profils qui correspond à une section transversale de la pale, tout d'abord on commence par donner quelque définition concernant un profil sur le schéma suivant [23] :

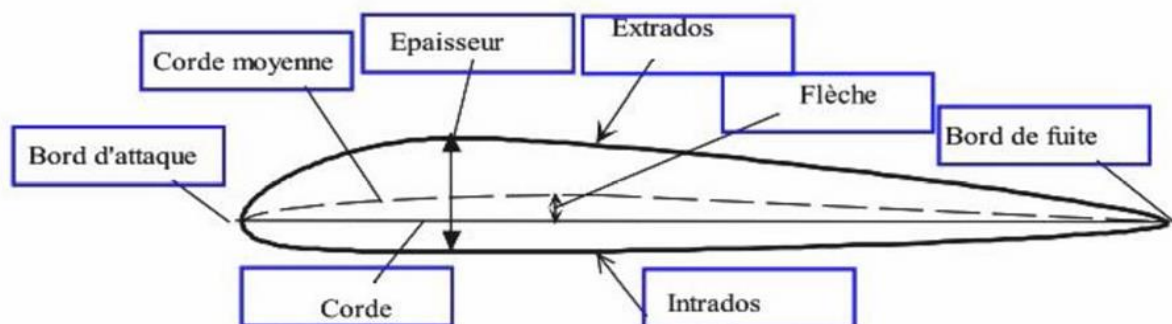


Figure 18 : Profil d'une pale

3.4.2. Le principe d'une pale

Les pales d'éolienne à axe vertical fonctionnent grâce à l'interaction entre le vent et leur forme aérodynamique. Lorsqu'une masse d'air frappe une pale, elle crée une différence de pression

entre la face avant et la face arrière. Cette différence génère une force de portance qui pousse la pale et entraîne ainsi la rotation de l'axe. La forme des pales, souvent incurvée ou profilée comme une aile d'avion, est optimisée pour maximiser cette force. De plus, la force de traînée, bien que moins efficace, contribue également à la rotation, surtout dans le cas des éoliennes de type Savonius. L'absence de système d'orientation est l'un des principaux avantages de ces éoliennes, car elles captent l'énergie éolienne quelle que soit la direction du vent.

Les pales d'une éolienne fonctionnent exactement sur le même principe que les ailes d'un avion comme expliqué par le schéma ci dessous. Grâce à la forme du profil l'air passant sur le dessus de l'aile, l'extrados, doit parcourir plus de chemin que celle passant par le dessous, l'intrados, c'est pourquoi l'air accélère créant une dépression et donc une aspiration vers le haut. Sur l'intrados l'air provoque une surpression ce qui génère aussi un effort vers le haut. Ces deux efforts réunis s'appellent la portance. La pénétration dans l'air ne se faisant pas sans frottement un autre effort, la traînée, s'oppose au mouvement.

La résultante aérodynamique est la résultante de ces deux efforts, la portance et la traînée, c'est elle qui permet à l'avion de tenir en l'air ou ici de faire tourner le rotor.

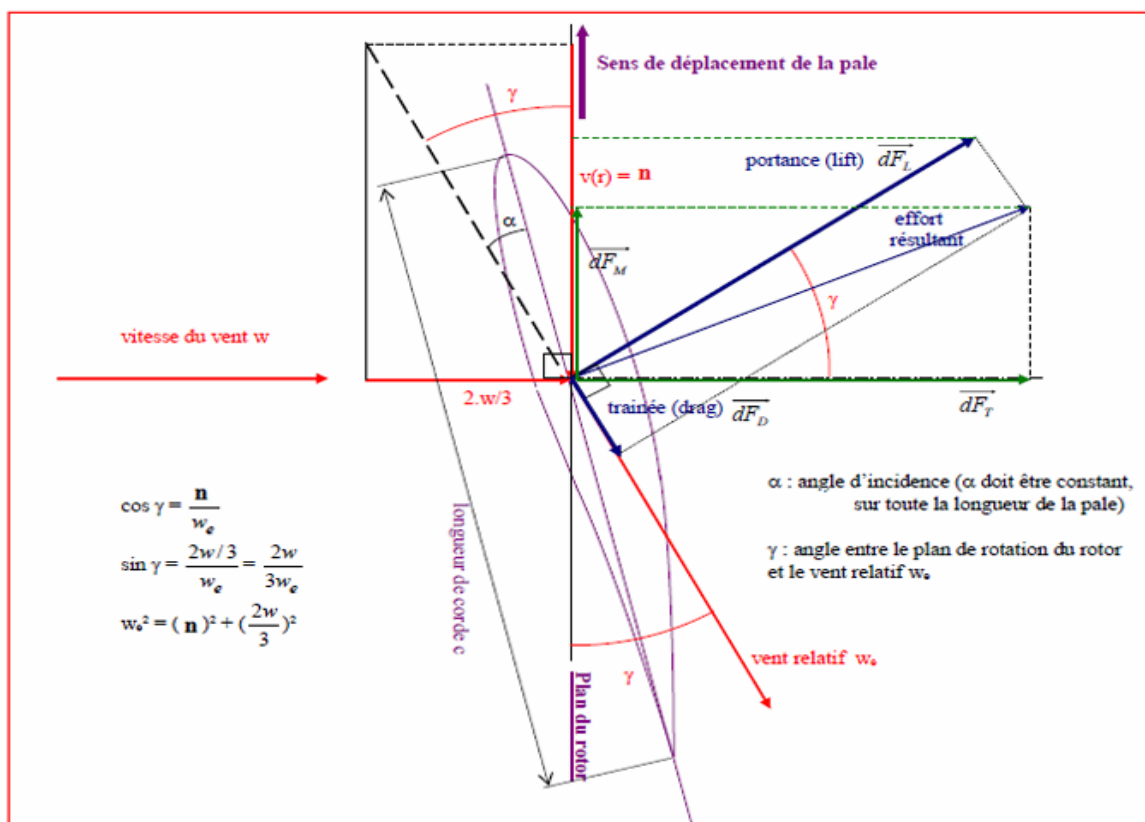


Figure 19 : Bilan des efforts et vitesse sur un élément de la pale

3.5. Réglage d'une pale

De par leur méthode de fabrication, les pales réagissent différemment aux sollicitations mécaniques. Elles sont donc équilibrées après fabrication sur un banc de réglage.

En plaçant une pale sur le banc, un technicien compare son comportement par rapport à une pale étalon, puis ajuste ses masses d'équilibrage statique et dynamique. Il n'est pas permis aux utilisateurs de toucher aux masses d'équilibrage, alors qu'il sera possible d'intervenir sur un ou deux « Tabs » pour affiner le réglage de la voilure.

3.6. Les pales pour une éolienne verticale

Les pales d'éolienne verticales sont conçues pour optimalement interagir avec le vent, selon leur forme et profil. Les matériaux et les contraintes sont importantes pour leur durabilité et légèreté. Les composites à base de fibres de verre ou de carbone sont utilisées pour leur excellent rapport. Les chercheurs cherchent à développer des matériaux, formes et méthodes de fabrication pour améliorer l'efficacité énergétique de ces éoliennes. Les simulations numériques et essais en soufflerie sont cruciaux pour optimiser les performances et réduire les coûts de production.

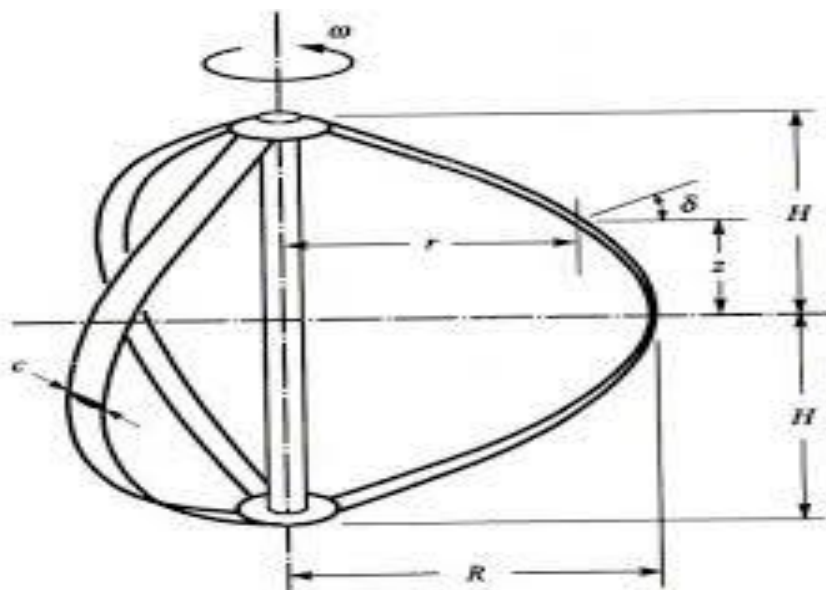


Figure 20 : Darrieus et ses éoliennes à axe vertical (VAWT)

3.7. Efforts aérodynamiques sur la pale

Selon la théorie de Betz [24], une pale ne peut avoir un rendement aérodynamique supérieur à 59% qui est appelé : limite de Betz. Aujourd'hui dans la pratique on arrive tout juste à avoir

un rendement de 50% pour les dernières éoliennes et donnant le minimum d'interférence d'écoulement à travers les pales.

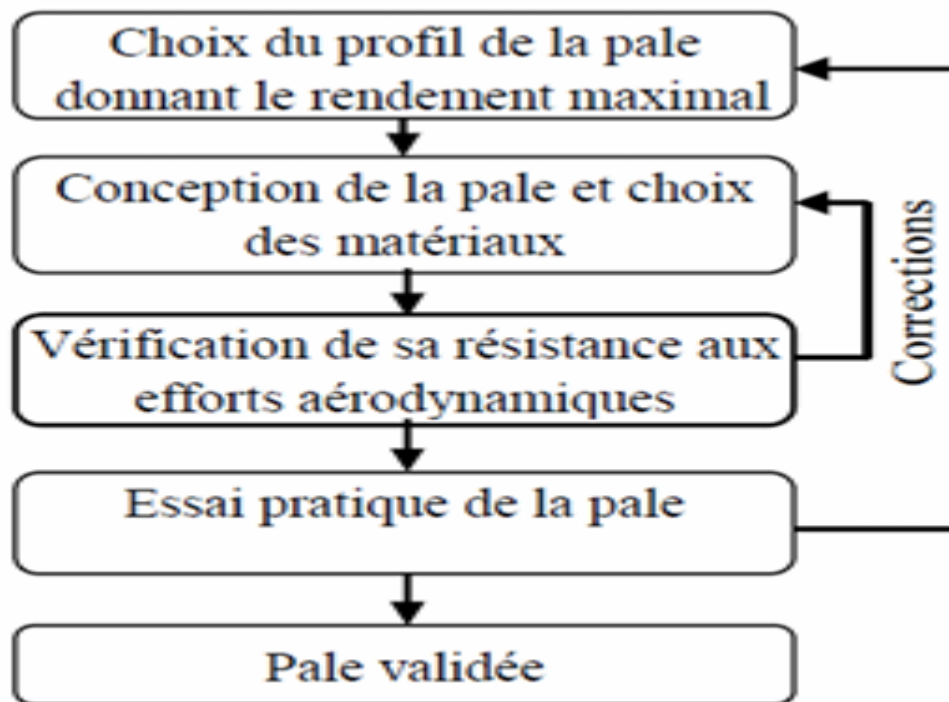


Figure 21 : Démarche de validation d'une pale

L'organigramme de la figure (21) montre la démarche adoptée pour valider une pale d'éolienne et par Conséquence garantir le meilleur rendement en assurant sa résistance aux efforts aérodynamiques.

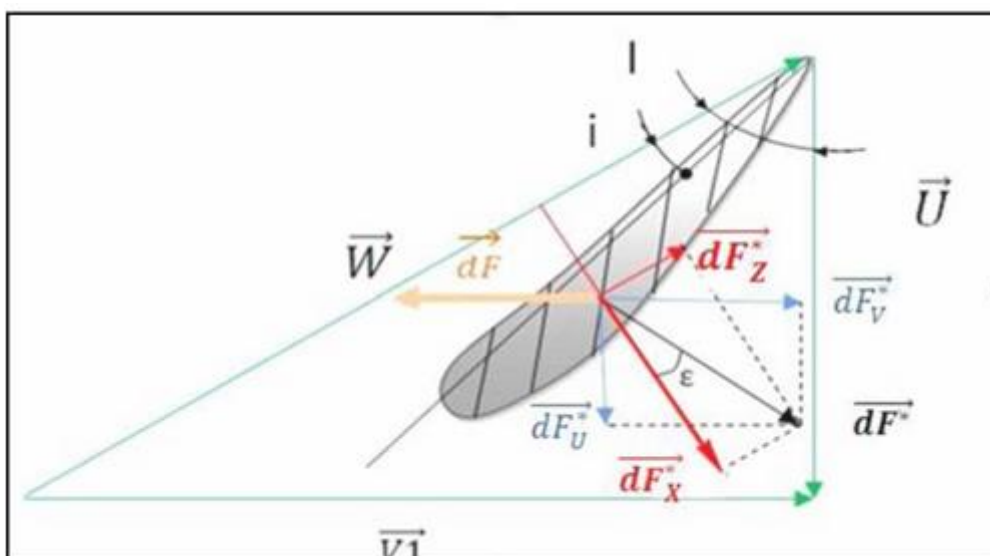


Figure 22 : Actions des forces aérodynamiques

3.7.1. Aérodynamique de la pale

a) Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques d'une pale sont essentielles pour comprendre son fonctionnement et ses performances. Voici quelques éléments clés :

- Longueur de la pale : La distance mesurée du bord d'attaque au bord de fuite. Elle influence la surface portante et la capacité à générer de la portance.
- Profil aérodynamique : La forme de la pale, qui détermine son efficacité en vol. Cela inclut le contour du bord d'attaque et le bord de fuite, ainsi que la courbure de la pale.
- Épaisseur : L'épaisseur maximale de la pale, qui affecte la résistance à l'air et la durabilité.
- Angle de twist : L'angle d'inclinaison de la pale, qui peut varier le long de sa longueur pour optimiser la portance à différentes vitesses.
- Surface de la pale : La surface totale qui interagit avec le fluide, cruciale pour le calcul de la portance et de la traînée.
- Distribution de masse : La répartition du poids le long de la pale, qui influence l'équilibre et la dynamique en vol.

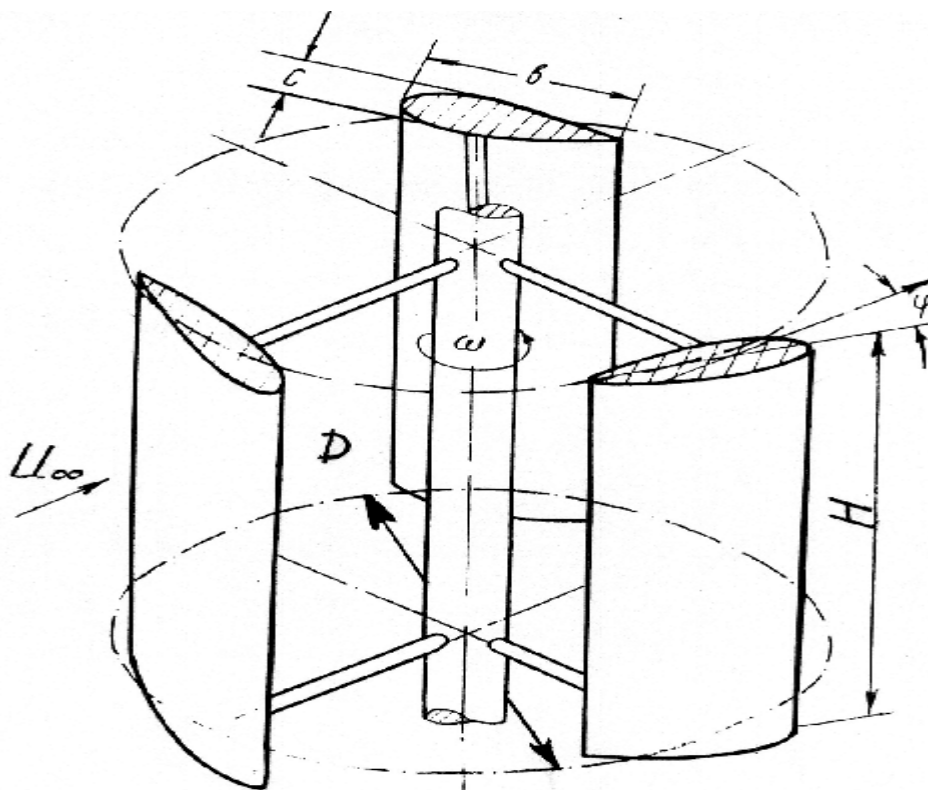


Figure 23 : Paramètres géométriques du rotor Darrieus

Le pas H d'une section est lié à l'angle de calage par l'expression suivante (3.1) :

$$H = 2\pi r \tan \alpha \quad (3.1) \Rightarrow \tan \alpha = K/r \quad \text{avec } K = H/2\pi$$

b) Définition des éléments caractéristiques d'une pale

Sans doute, les pales sont les composants les plus sollicités d'une éolienne. Il est nécessaire qu'elles aient une résistance mécanique exceptionnelle aux sollicitations répétées (fatigue), une surface très lisse, une légèreté pour réduire l'intensité des effets gyroscopiques, et une excellente résistance aux intempéries, aux UV et à l'usure des particules de l'air.

Plusieurs angles peuvent être observés sur une pale, tels que l'angle de calage (appelé α), l'angle d'incidence ou l'angle d'attaque du profil (appelé i) et l'angle de vrillage (appelé v).

- 1) L'angle de calage (β) est l'angle formé par la pale et le plan de rotation du rotor.
 - 2) L'angle d'incidence (α) est l'angle formé par la pale et la direction du vent apparent.
 - 3) L'angle de vrillage (appelé v) est l'angle formé entre le début de pale et le bout de pale
- [25].

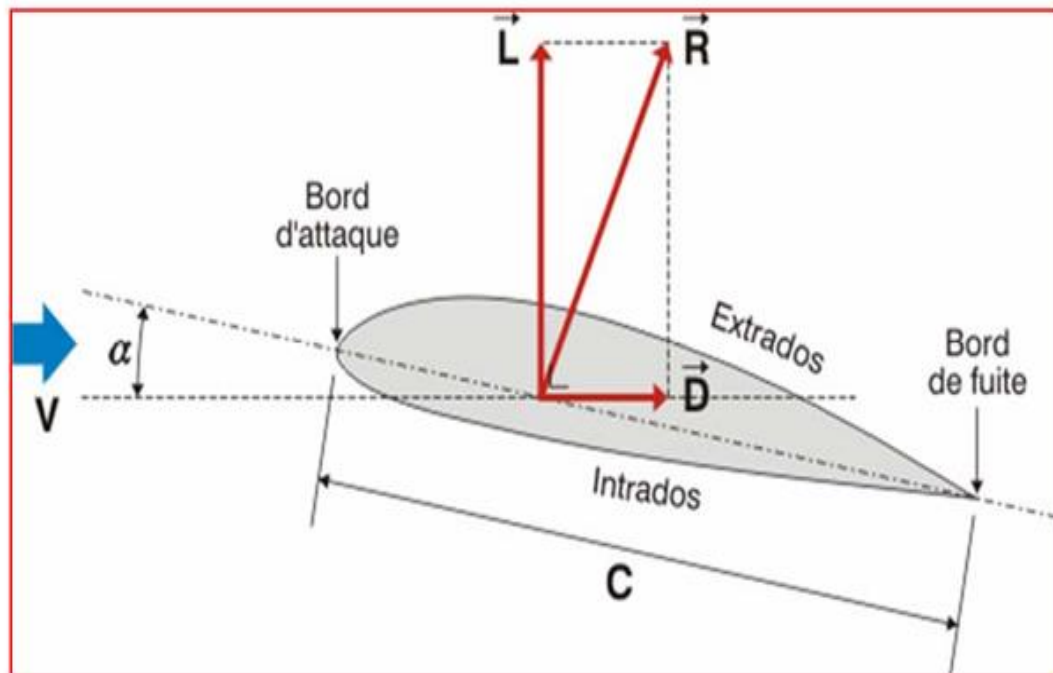


Figure 24 : Eléments caractéristiques d'une pale

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis.

Du fait de la rotation de la pale, le « tronçon » situé à une distance r du moyeu est soumis à la fois au vent incident de vitesse

V : vitesse apparente du vent.

U : la vitesse au bout de la pale (vitesse d'entraînement).

n : vitesse de la rotation du rotor.

$$U = (R \cdot 2\pi \cdot n) / 60 \quad (3.2).$$

La vitesse résultante W du vent « apparent » s'écrit donc :

$$W = V + U \quad (3.3).$$

Elle fait un angle d'attaque Ψ avec le plan de rotation. Cet angle s'écrit :

$$\Psi = \arctan\left(\frac{U}{V}\right) \quad (3.4)$$

On introduit alors l'angle dit d'incidence, noté α entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent apparent :

$$\alpha = \Psi - \beta \quad (3.5)$$

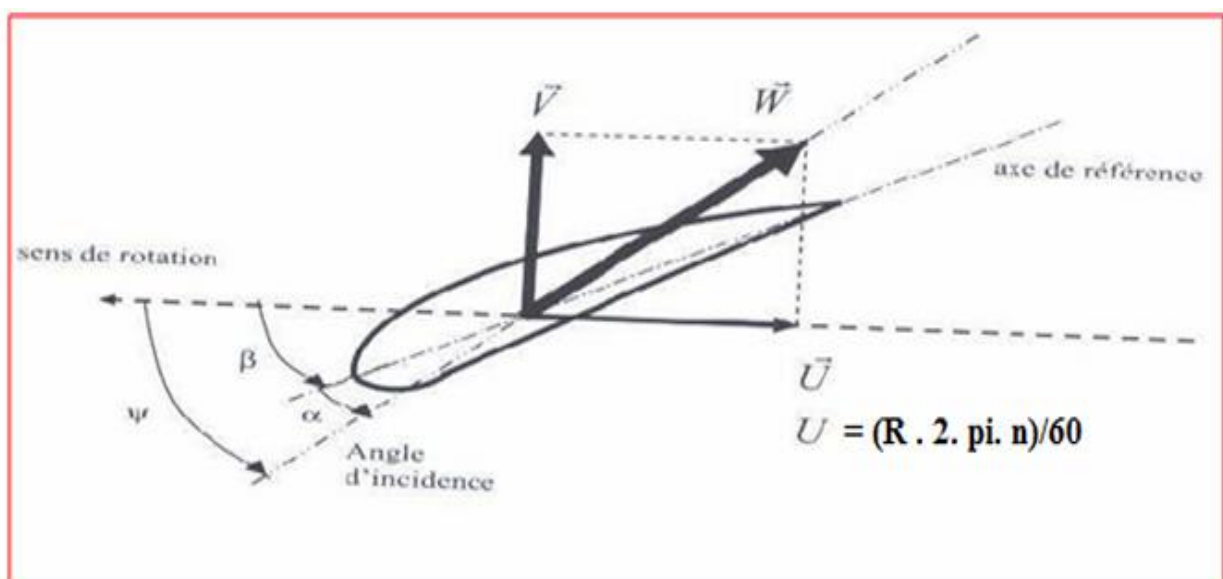


Figure 25 : Direction du vent sur un tronçon d'une pale

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur le tronçon de pale dr

Et de longueur de corde L à une distance r de l'axe de rotation crée une force résultante $\overline{dF}$:

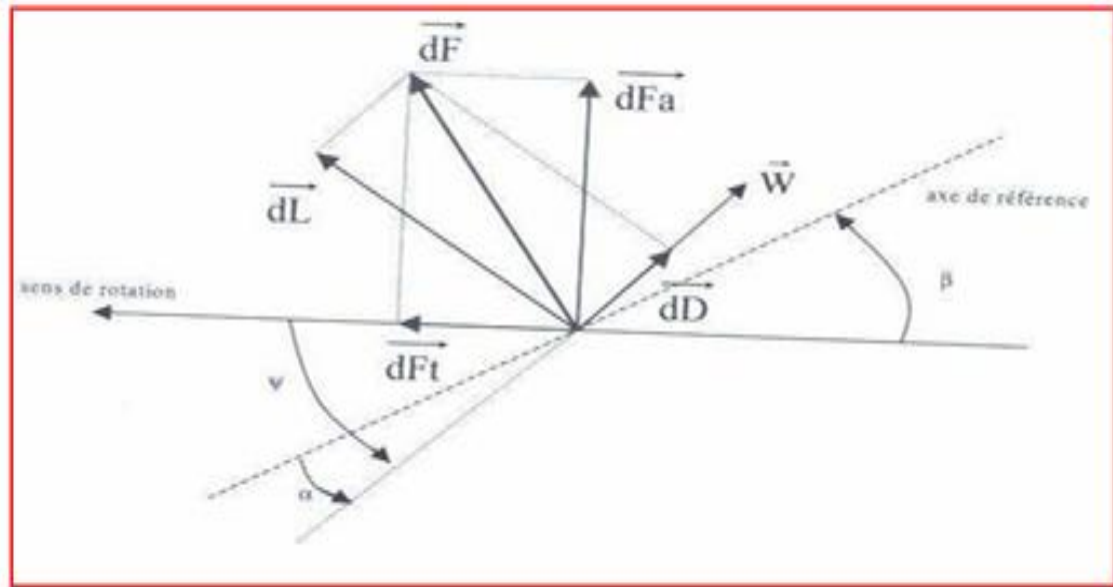


Figure 26 : Forces appliquées sur un élément d'une pale

On peut décomposer la force résultante $\overline{dF}$ de la manière suivante :

1. la portance (« Lift ») $\overline{dL}$ normale à la direction du vent apparent.
2. la force de traînée (« drag ») $\overline{dD}$ parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

1. La poussée axiale $\overline{dFa}$ perpendiculaire au plan de rotation.
2. La poussée tangentielle $\overline{dFt}$ dans la direction de rotation.

On déduit les expressions de la poussée axiale et tangentielle en fonction de la portance et de la traînée à partir du schéma précédent :

$$dF_t = dL \cdot \sin(\psi) - dD \cdot \cos(\psi) \quad (3.6)$$

$$dF_a = dL \cdot \cos(\psi) - dD \cdot \sin(\psi) \quad (3.7)$$

C'est le couple résultant de l'ensemble des forces tangentielles qui va provoquer la rotation de la turbine.

Les modules des forces dL et dD s'expriment en fonction de deux coefficients, le coefficient de portance C_L et le coefficient de traînée C_D :

$$dL = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W^2 \cdot dA \cdot C_L \quad (3.8)$$

$$dD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W^2 \cdot dA \cdot C_D \quad (3.9)$$

Avec : $dA = L(r)$

dA : surface du <<tronçon>> de pale.

$L(r)$: longueur de la corde à la distance r de l'axe de rotation

C_L : coefficient de portance (sans dimension)

C_D : coefficient de traînée (sans dimension)

Ces coefficients C_L et C_D dépendent fortement de l'angle d'incidence α faible, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados, crée la portance.

C'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler. Ici elle « aspire » la pale vers l'avant. Si α augmente, la portance augmente jusqu'à un certain point puis l'écoulement devient turbulent. La portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique.

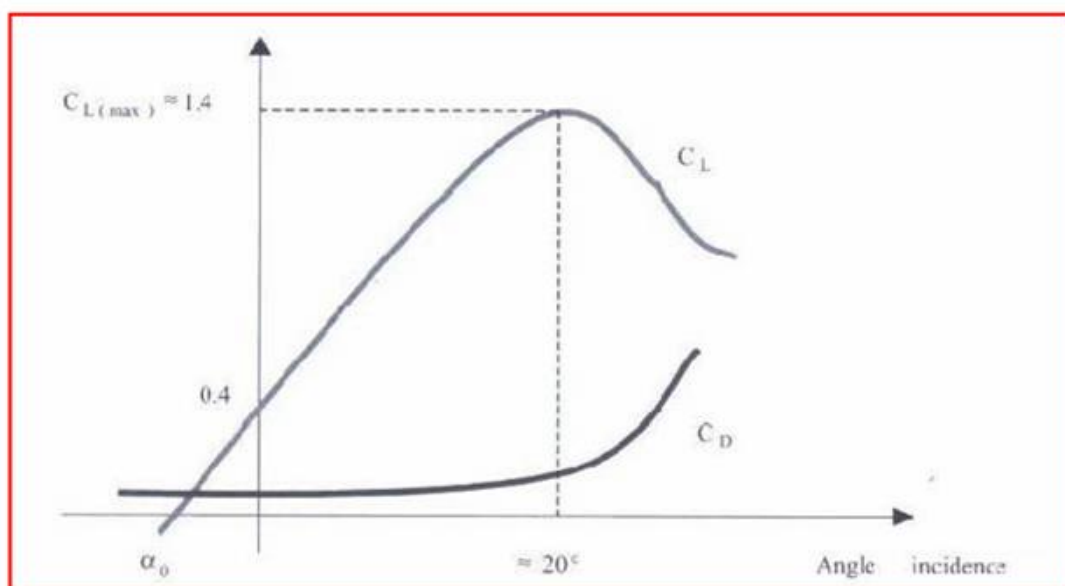


Figure 27 : Evolution des coefficients de portance et de traînée avec l'angle d'incidence

3.7.2. Les pales finies

On les peint ou on les vernit, puis on les fixe au pied avec des fixations solides, vissées ou boulonnées. Il est nécessaire de prodiguer une attention particulière afin d'équilibrer de manière statique (et si possible dynamique) le rotor complet.

La moindre vibration sur l'éolienne entière et le mât peut rapidement entraîner la destruction de certains éléments. Il arrive fréquemment que le safran trinque en premier car les vibrations y sont amplifiées, ce qui entraîne la libération des soudures. Un vent faible entrave également le démarrage de l'éolienne en cas de balourd excessif.

L'équilibrage du rotor est effectué en utilisant de fines bandes de plomb [26].

3.7.3. Théorie de l'élément de pale

La circulation de l'air au niveau d'une hélice crée des efforts aérodynamiques, l'un suivant la direction de la vitesse relative du vent et l'autre lui est perpendiculaire. La première est la trainée, le second est la portance. Elles sont définies par les équations [27] :

- ✓ La portance (FL) : est la composante d'aérodynamique perpendiculaire aux filets d'air du vent relatif. Exprimée :

$$FL = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_L \quad (3.10).$$

- ✓ Coefficient de portance :

$$C_L = 2 FL / \rho V^2 S \quad (3.11).$$

- ✓ La trainée (FD) : est la composante aérodynamique parallèle aux filets d'air du vent relatif. Exprimée :

$$FD = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_D \quad (3.12).$$

- ✓ Coefficient de trainée :

$$C_D = 2 FD / \rho V^2 S \quad (3.13).$$

- ✓ Résultante aérodynamique (Ra) :

$$Ra = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_r \quad (3.14).$$

L'aération les performances d'un profil de pale éolienne revient à augmenter le rapport de la portance à la trainée.

D'après le théorème de Pythagore on a :

$$F^2 = FL^2 + FD^2 \quad (3.15).$$

On définit aussi le moment aérodynamique résultant :

$$M = F.L = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_m \quad (3.16).$$

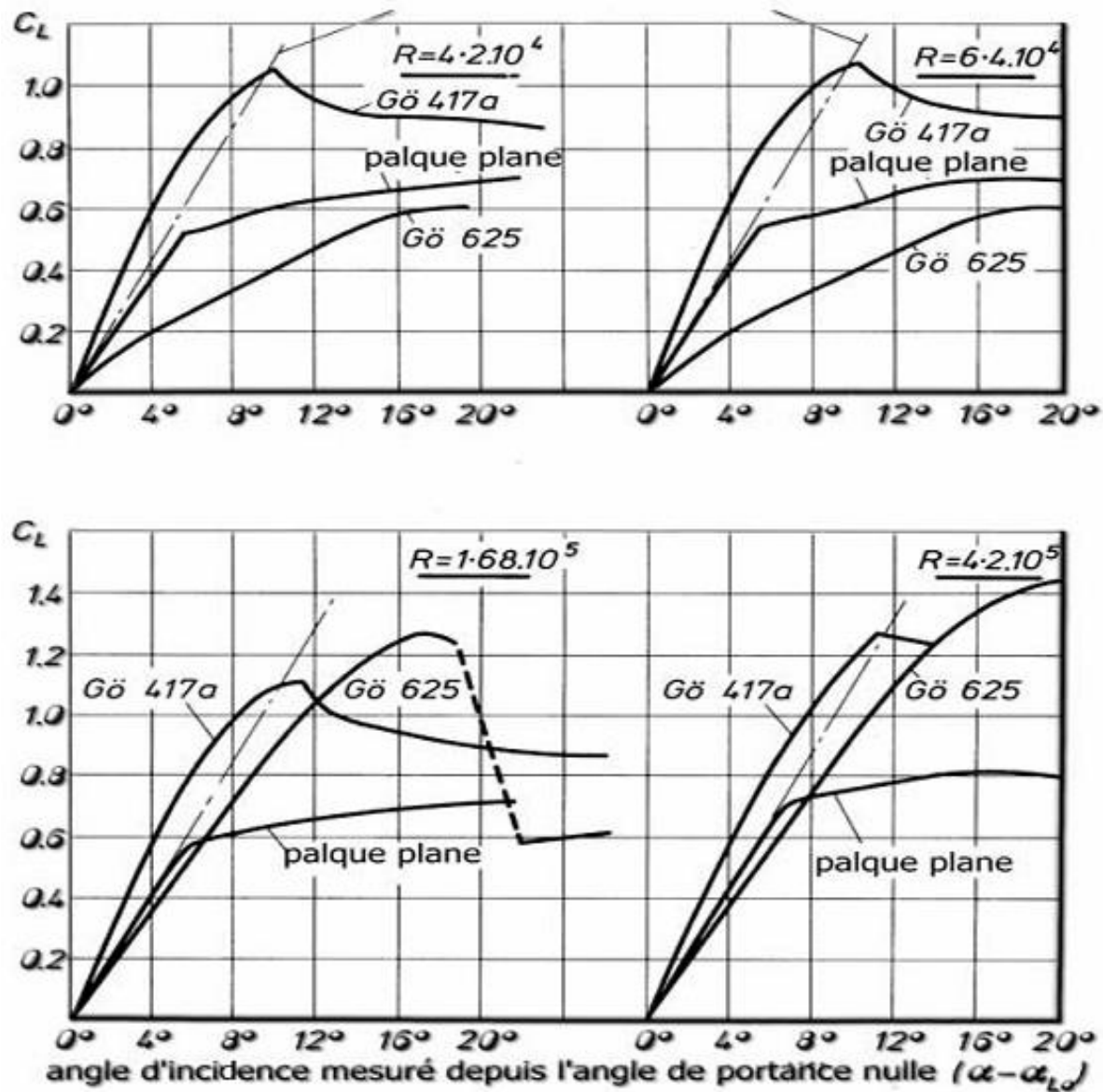


Figure 28 : Courbes de la portance théorique

3.7.4. Avec quels matériaux sont fabriquées les pales des éoliennes ?

Les pales d'éoliennes sont généralement conçues à partir de matériaux composites qui allient légèreté et résistance. En raison de la construction d'éoliennes de grande taille, en particulier pour les besoins de l'éolien offshore, les chercheurs sont incités à développer des matériaux de plus en plus efficaces.

Les matériaux requis pour la construction des pales d'éoliennes peuvent être définis en deux mots : légèreté et solidité. Plus une pale est longue, plus il est essentiel que les matériaux utilisés pour sa fabrication soient résistants.

Les pales des éoliennes de grande taille sont fabriquées à partir de matériaux composites qui allient ces qualités de résistance et de légèreté. Les matériaux choisis pour construire les pales des éoliennes en mer doivent de plus être résistants à la corrosion.

Les matériaux composites utilisés pour la fabrication des pales sont des mélanges de fibre de verre, de fibre de carbone, de résines polyester ou de résines d'époxy.

3.7.5. Des matériaux de performants

Les recherches se focalisent actuellement sur la création de matériaux de plus en plus légers et solides. En effet, la légèreté et la solidité de ces nouveaux matériaux permettent de concevoir des pales plus longues afin de générer davantage d'électricité.

Un matériau composite à base de polyuréthane renforcé avec des nanotubes de carbone a été développé par des chercheurs de l'université américaine de Case Western. La solidité des pales fabriquées dans ce matériau est annoncée à 8 fois supérieure à celle des pales en matériaux composites classiques, tout en étant plus légères.

Selon Blade Dynamics, le fabricant prévoit de développer prochainement des pales de 100 mètres de long, entièrement fabriquées en fibres de carbone [23].

3.8. Définition des profils

Le profil d'une pale d'éolienne est inversé par rapport à celui d'une hélice (une hélice montée sur une éolienne aurait soit son bord de fuite utilisé comme bord d'attaque soit son intrados utilisé comme extrados). Presque tous les aérogénérateurs modernes de grande taille sont à trois pales, compromis idéal pour optimiser les coûts de fabrication, un bon rendement et un bruit de fonctionnement acceptable¹. Rigides ou déformables selon la technologie retenue, elles peuvent mesurer de 23 à 45 mètres de long, voire 60 mètres et plus. -sur les types de profils utilisés en modèle réduit et sur leur désignation [28] :

Profils utilisés :

- ✓ Clark
- ✓ Eppler
- ✓ Ritz

- ✓ Wortman, Bertin, NACA... (dits laminaires)
- ✓ NACA non laminaires

3.8.1. Action du vent sur les pales d'éolienne

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface.

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- **Extrados** : dessus de la pale,
- **Intrados** : dessous de la pale,
- **Corde** : longueur L du profil du bord d'attaque au bord de fuite,
- **Angle** : de calage (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation)

3.8.2. Choix du profil

Le choix du profil dépend essentiellement du type de performance que l'on attend du planeur en effet, il existe une gamme très importante des profils et il faudra , avant de déterminer le profil à utiliser, savoir si le planeur a une vocation thermique (priorité à la portance, à une vitesse de chute mini), s'il sera un planeur de vol de pente ou de voltige, où la pénétration est recherchée (priorité à une faible traînée et à une vitesse sur trajectoire élevée), ou un planeur essayant de constituer un compromis comme c'est le cas en F3B par exemple, qui sont utilisés comme thermiques et comme planeurs de vitesse.

Pour diriger les recherches, il faut savoir que plus un profil est creux, plus il est porteur, mais plus il a de traînée (en première approximation). Ceci permet de sélectionner une plage du profil correspondant à ses désirs.

Ensuite on peut comparer les polaires de ces profils ou plus simplement plus simplement se fier au petit λ_{a} qui, dans la presse modéliste accompagne souvent chaque planche de profils.

Ces considérations permettent de choisir un profil en fonction de ses caractéristiques et de ses performances de vol, mais le choix d'un profil fait aussi intervenir d'autres paramètres :

- Les difficultés de construction : il est beaucoup plus facile de construire une aile munie d'un profil dont l'intrados est plat qu'une aile adoptant un profil à l'intrados légèrement courbe qui aurait pourtant de meilleures performances (C'est pourquoi on trouve beaucoup de Clark Y sur les avions de début). D'autre part, il n'est pas toujours facile de respecter exactement un profil dont le bord de fuite est très effilé ou présentant d'autres difficultés de construction. Il faudra donc choisir en fonction de ses talents en construction et du temps que l'on veut y passer.

- Les problèmes de résistance : ils sont surtout liés à l'épaisseur relative (). Il est plus facile d'obtenir une aile résistante avec un profil d'épaisseur relative 15% qu'avec un profil d'épaisseur relative 8% (dans les calculs de résistance du longeron, la hauteur intervient en puissance 3 dans la formule de la résistance).
- Si on désire équiper l'aile de dispositifs hypersustentateurs (volets de courbure par exemple), il faut un profil qui soit conçu pour pouvoir en supporter.
- La taille du planeur, son poids influent sur le choix du profil : on ne mettra pas un profil épais sur un petit planeur ; on ne construira pas un planeur de 3m avec un Wortmann FX 61.163 (16,3% d'épaisseur relative) car le rendement sera beaucoup moins bon qu'avec un profil de plus faible épaisseur relative.
- La courbe de déplacement du centre de poussée en fonction de l'incidence peut aider à choisir un profil ; en général, le centre de poussée se déplace en direction du bord d'attaque lorsqu'on augmente l'incidence. Pour certains profils, il recule avec l'incidence, ce sont les profils auto stables. Si le centre de poussée varie de façon sensible avec l'incidence, ce n'est pas bon pour la stabilité (profil plat); par contre, un profil biconvexe symétrique est très stable, son centre de poussée varie peu.
- Il faut savoir que les profils très minces induisent un décrochage brutal [28].

3.8.3. Polaire du profil

A chaque profil d'aile est associée sa Polaire du profil, qui donne, pour différents angles d'incidence de vol usuels, ses caractéristiques aérodynamiques mesurées en soufflerie

[28]:

- Coefficient de Portance $100.C_z$
- Coefficient de Traînée $100.C_x$
- Coefficient de Tangage $100.C_m$

3.8.4. Caractéristiques de quelque profil

PROFIL	Epaisseur Relative (en %)	Flèche Relative (en %)	Cz de Finesse Maxi	$\frac{Cz}{Cx}$ Maxi (Finesse Maxi)	Cx de Finesse Maxi	Cz Maxi
FX 60.126	12.6	3.5	1.06	53	0.02	1.23
FX 60.100	10	3.5	0.93	60	0.016	1.15
FX 61.140	14	2.5	1.03	50	0.021	1.08
FX 63.137	13.7	6	1.43	45	0.032	1.52
FX 62K131/17	13.1	3.5	1.09	51	0.022	1.2
FX M2	8.25	5	0.95	48	0.02	1.11
AH 79.100 A	10	3.5	1	55	0.018	1.18
AH 79.100 B	10	6	1.3	55	0.024	1.4
E474	14	0	0.55	25	0.022	0.8
NACA 0009	9	4.4	0.98	52	0.019	1.15
NACA 0012	12	0	0.6	30	0.026	0.84
NACA 0021	21	0	0.7	56	0.023	0.88
NACA 4409	9	4.4	0.98	52	0.02	1.15
NACA 2415 K24	15	2	0.95	36	0.026	1.06
NACA 2412	12	2	0.8	43	0.019	1.05
GOE 795	8	2.5	0.9	60	0.015	1.1

GOE 801	10	6	1.15	45	0.025	1.45
Clarck Y	6	1.75	0.55	36	0.015	0.9
SNL1850	50	7	1.12	54	0.024	1.11

Tableau 2 : Caractéristique de quelque profil utilisé râble

3.8.5. Définition des profils NACA

Les profils NACA sont des profils aérodynamiques pour les ailes d'avions développés par le Comité consultatif national pour l'aéronautique (NACA, États-Unis). Il s'agit de la série de profils la plus connue et utilisée dans la construction aéronautique N1 [25] :

La forme des profils NACA est décrite à l'aide d'une série de chiffres qui suit le mot « NACA ». Les paramètres dans le code numérique peut-être saisi dans les équations pour générer précisément la section de l'aile et de calculer ses propriétés. Toutes les dimensions en % sont entendues en % de longueur de corde, la droite reliant bord d'attaque et bord de fuite, par rapport au bord d'attaque, sauf précision contraire.

3.8.5.1. Désignation d'un profil

Plusieurs familles des profils d'ailes ont été conçues et testées. Les plus utilisés de nos jours, sont les profils NACA (National Advisory Commutée for Aéronautiques). Ils sont couramment utilisés, ce qui les rend pratiques dans la validation des méthodes numériques [23].

Il y'a plusieurs classifications des profils NACA. Les plus utilisés sont ont des désignations à quatre et à cinq chiffres. Ces chiffres nous renvoient aux caractéristiques géométriques du profil, Comme exemple :

3.8.5.2. NACA à quatre chiffres

Ces profils sont définis par le code NACA suivi de quatre chiffres MPXX définissant la géométrie du profil :

1. M, le premier chiffre définit la cambrure maximale en pourcentage de la corde,
- 2.P, le deuxième chiffre définit le point de cambrure maximale par rapport au bord d'attaque en pourcentage de la corde,

3. XX, les deux derniers chiffres définissant l'épaisseur maximale du profil en pourcentage de la corde, (4)

Les profils NACA0021 commencent par 00 sont des profils symétriques, ayant une ligne Moyenne qui se confond avec la corde.

Les deux derniers chiffres indiquent l'épaisseur relative $e=21\%$.

3.8.5.3. NACA à cinq chiffres

La série NACA 5-chiffres permet de décrire des surfaces portantes plus complexes⁷.

Ils sont définis par le code NACA suivi de cinq chiffres LPQXX :

1. L : le premier chiffre définit le coefficient de portance optimal, multiplié par 0,15,
2. P : le deuxième chiffre définit le point de cambrure maximale par rapport au bord D'attaque en pourcentage de la corde,
3. Q : le troisième chiffre indique si le profil est à cambrure simple (0) ou double (1)
4. Comme pour les profils à 4 chiffres, les quatrième et cinquième chiffre donnent l'épaisseur maximale du profil en pourcentage de la corde

Si on prend NACA23012 Le chiffre (2) indique la courbure relative $r=2\%$

La deuxième et troisième chiffre (30) indiquent le double de là l'abscisse de la flèche

Les deux derniers chiffres (12) indiquent l'épaisseur relative [23].

3.8.5.4. Quelque type du profils NACA

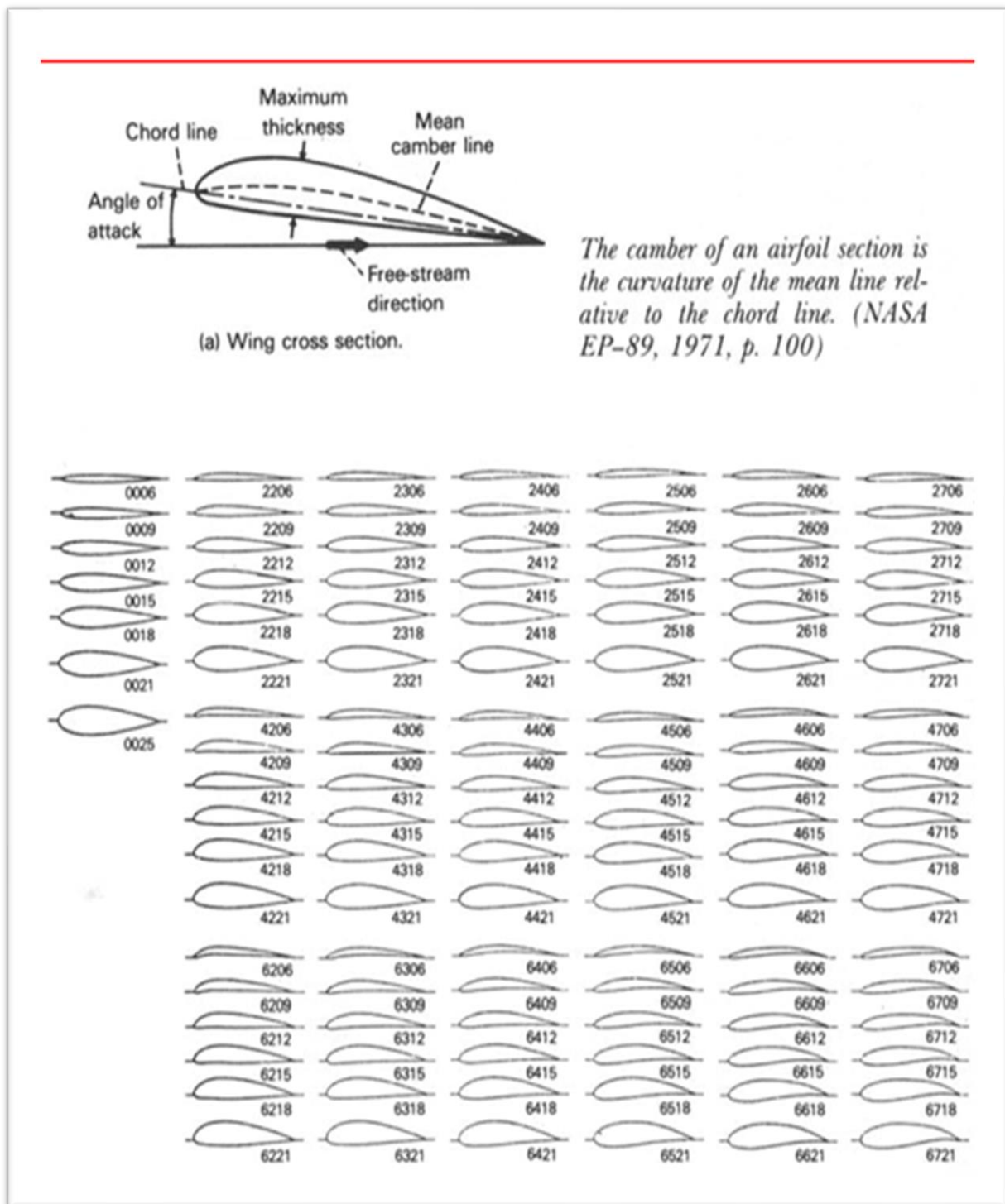


Figure 29 : Quelque type de profils NACA

3.8.6. Quels sont les acteurs de la finesse d'un profil ?

La finesse représente le rapport des forces qui seront en jeu sur le profil. Générer le maximum de portance avec le minimum de traînée c'est la clé du rendement de notre système. C'est le rapport de la portance sur la traînée du profil, ou plus exactement $\text{Finesse} = C_L / C_D$. Un "bon"

CL c'est un CL fort, et un "bon" CD c'est un CD faible. Nous disposons donc de deux leviers pour augmenter notre finesse de notre profil :

- Le CD : Plus l'épaisseur relative du profil est importante plus le CD est important, pour augmenter la finesse nous pouvons donc diminuer l'épaisseur relative.
- Une attention particulière est apporter sur la composition du CD : La traînée est principalement le résultat de deux forces, les forces de pression dont le coefficient est noté CD_p et les forces de frottement que nous nommerons CD_f .

$$CD = CD_p + CD_f \quad (3.17).$$

- Pour exemple comparons le C_x d'une sphère et d'une carène de dirigeable (au premier régime d'écoulement) de même volume : La distribution des pressions observées autour de la sphère nous donne la traînée de pression donc le CD_p de la sphère qui correspond à la somme des vecteurs de pressions.
- Le CD_p de la sphère est 0.511 Pour la sphère, Les traînées de frottement sont relativement faibles par rapport à la traînée de pression et on peut écrire $CD = CD_p = 0.511$ La distribution des pressions observées autour de la carène de dirigeable nous donne la traînée de pression donc le CD_p de la sphère qui correspond à la somme des vecteurs de pressions.
- Le CD_p de la carène est 0.0331. Les traînées de frottement sont maintenant plus importantes du fait de la grande surface de contact et la traînée totale mesurée nous donne un $CD = 0.1$ donc un $CD_f = 0.1 - 0.0331 = 0.066$ [25].

3.9. Darrieus Wind turbine

La turbine éolienne Darrieus est un type de turbine éolienne à axe vertical (VAWT) utilisée pour générer de l'électricité à partir de l'énergie éolienne. La turbine se compose de plusieurs pales aérodynamiques courbées montées sur un arbre ou un cadre rotatif. La courbure des pales permet à la pale d'être sollicitée uniquement en traction à des vitesses de rotation élevées. Il existe plusieurs éoliennes étroitement liées qui utilisent des pales droites. Ce design de la turbine a été breveté par Georges Jean Marie Darrieus, un ingénieur aéronautique français ; la demande de brevet a été déposée le 1er octobre 1926. Il y a de grandes difficultés à protéger la turbine Darrieus des conditions de vent extrêmes et à la rendre auto-démarrant [7].



Figure 30 : Dornier Darrieus.

3.9.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de l'éolienne de Darrieus repose sur la force aérodynamique exercée par le vent sur les pales incurvées. Lorsque le vent souffle, les pales entrent en rotation autour de l'axe vertical. Cette rotation est due à la différence de pression entre la face concave et convexe des pales.

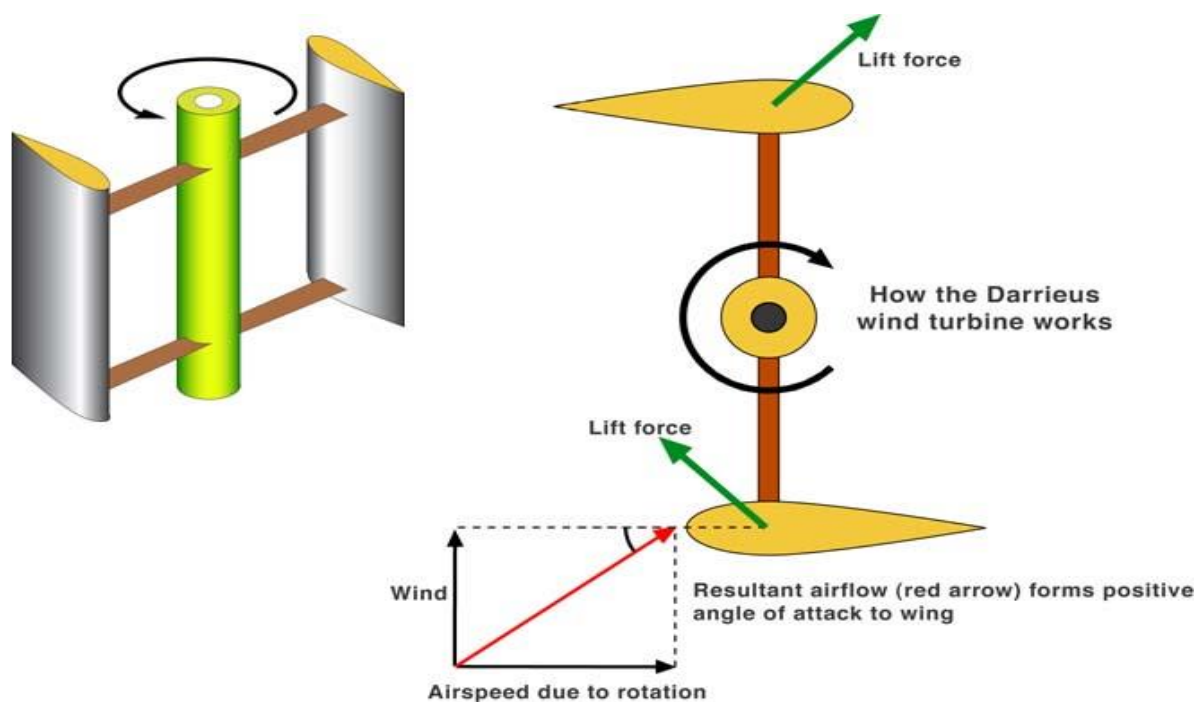


Figure 31 : Principe de fonctionnement éolienne Darrieus

3.9.2. Méthode de fonctionnement

Le design Darrieus est une disposition symétrique d'aile qui fonctionne quelle que soit la direction du vent, contrairement aux turbines conventionnelles qui nécessitent une rotation. Lorsque le rotor tourne, les profils aérodynamiques se déplacent sur une trajectoire circulaire, créant une force nette pointant obliquement vers l'avant le long d'une "ligne d'action" spécifique. Cette force peut être projetée vers l'intérieur au-delà de l'axe de la turbine, donnant un couple positif à l'arbre, l'aidant à tourner dans la direction dans laquelle il se déplace déjà. Le rotor tourne à une vitesse indépendante de la vitesse du vent, et l'énergie résultant du couple et de la vitesse peut être extraite et convertie en puissance à l'aide d'un générateur électrique. Le design ne démarre généralement pas de lui-même, mais dans des conditions rares, il peut démarrer tout seul. L'angle d'attaque change à mesure que la turbine tourne, entraînant un cycle de puissance sinusoïdal et des modes résonnants. La plupart des turbines Darrieus sont équipées de freins mécaniques ou d'autres dispositifs de contrôle de la vitesse pour éviter de tourner à ces vitesses pendant de longues périodes.

Dans le cas où la Darrieus tourne

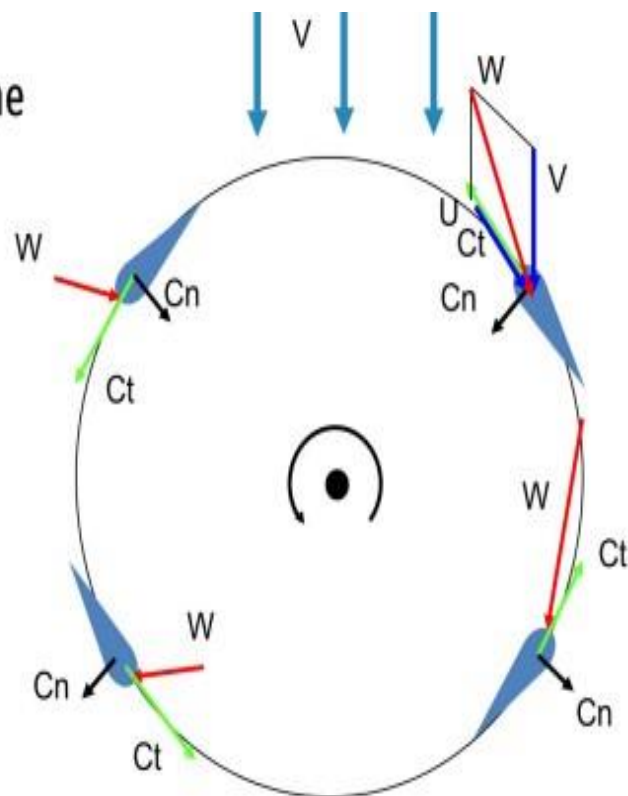


Figure 32 : Eoliennes à axe vertical

Le problème de la Darrieus, c'est que suivant la position de la pale, elle ne voit pas arriver le vent de la même direction. Alors supposons que la Darius tourne, et que le vent arrive d'une

direction donnée, elle va créer elle-même son propre vent qui est le vent tangentiel, U , associé au vent V , on va obtenir le vent apparent W , et suivant la position du profil, ce vent W n'arrivera pas de la même direction. En fait, on dit que le rotor tourne le vent ou enroule le vent qui lui arrive dessus. À partir de ce vent V , cela va créer portance et traînée puis après décomposition sur l'axe normal et tangentiel, nous obtiendrons les deux composantes : en vert, la composante tangentielle, et en noir, la composante normale. On peut le faire sur ces quatre positions différentes et on s'aperçoit que les composantes en vert ont tendance à faire tourner le rotor dans la direction indiquée en son centre et les composantes normales associées ont tendance à pousser le rotor dans la direction opposée du vent.

3.9.3. Applications

Les éoliennes de Darrieus trouvent des applications dans divers domaines :

- Production d'électricité à petite échelle : Elles sont utilisées pour alimenter des habitations isolées ou des petites communautés.
- Éoliennes urbaines : Leur faible encombrement les rend adaptées aux zones urbaines.
- Systèmes hybrides : Elles peuvent être couplées à d'autres sources d'énergie renouvelable pour former des systèmes hybrides.

3.9.4. Développements futurs

Les recherches se poursuivent pour améliorer les performances des éoliennes de Darrieus. Les principaux axes de recherche portent sur :

- ✓ Optimisation des profils de pales : Pour améliorer les performances aérodynamiques et réduire les effets de décrochage.
- ✓ Matériaux innovants : Pour réduire le coût de fabrication et augmenter la durée de vie des éoliennes.
- ✓ Systèmes de contrôle avancés : Pour optimiser la production d'électricité en fonction des conditions de vent [7]

3.10. Théorie de Betz et coefficient de puissance

La théorie de Betz indique la limite de puissance récupérable du vent. Elle introduit un coefficient de puissance C_p dans le calcul de la puissance. Ce coefficient représente l'efficacité de l'éolienne à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Pour classer les

éoliennes par rapport à cette limite de Betz, on utilise couramment le Coefficient de puissance définit par :

La formule de la puissance du vent

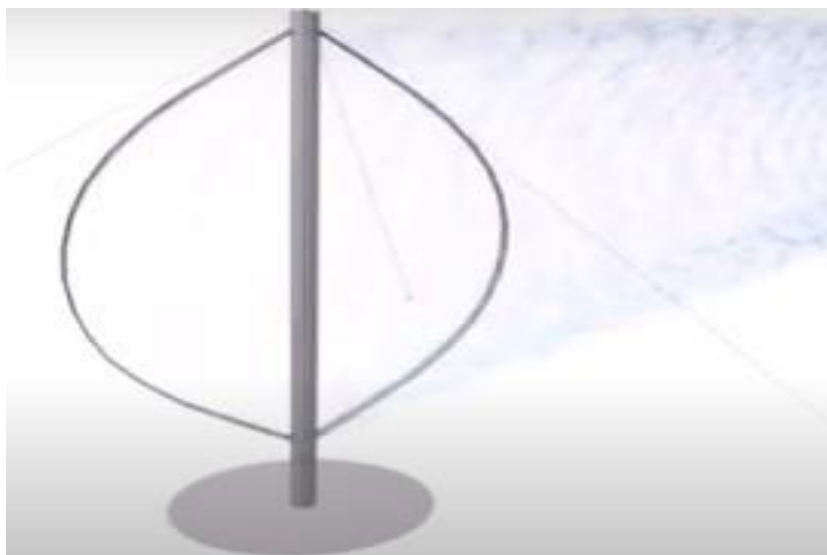
$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S V_0^3$$

Vitesse spécifique

$$\lambda = \frac{\Omega L}{V}$$

3.11. Utilisation de QBLAD pour la simulation et l'optimisation

J'ai utilisé le logiciel QBLAD pour réaliser des simulations et des optimisations dans le cadre de mon projet. Grâce à ses fonctionnalités avancées, j'ai pu modéliser différents scénarios et analyser les résultats de manière approfondie. QBLAD m'a permis d'identifier les meilleures stratégies pour optimiser les performances, tout en tenant compte de diverses contraintes. Cette expérience m'a non seulement permis d'acquérir des compétences techniques, mais aussi d'améliorer ma compréhension des processus impliqués dans l'optimisation.



3.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les pales d'éolienne verticale, leurs différents types, leur calcul, et en prenant en considération les différents profils. Nous avons étudié en particulier les profils NACA, car ils sont les plus couramment utilisés dans le monde. Cependant, dans une pale, il y a un profil qui joue un rôle plus important dans la rotation du rotor, ce qui entraîne son mouvement.

Ainsi, l'énergie cinétique a été convertie en une énergie mécanique, une rotation, qui a été transmise directement à l'arbre principal. Cependant, cette rotation extrêmement rapide est bien trop lente pour permettre la production d'électricité.



Chapitre 04 :

Résultat et discussions

4. Résultat et discussion

4.1. Introduction

Le rotor Darrieus est un exemple emblématique de la conception de turbines éoliennes à axe vertical, alliant efficacité et polyvalence. Avec un design basé sur le profil aérodynamique NACA, ce rotor est conçu pour maximiser la captation de l'énergie éolienne, en tirant parti de sa capacité à fonctionner dans des conditions de vent variées. Grâce à QBlade, un logiciel de simulation aérodynamique avancé, il est possible d'analyser et d'optimiser les performances de ce rotor sous différentes conditions d'exploitation.

Ce projet vise à explorer les caractéristiques aérodynamiques du rotor Darrieus, en se concentrant sur son comportement en termes de portance et de trainée. À travers des simulations réalisées dans QBlade, nous examinerons les paramètres influençant l'efficacité du rotor, tels que l'angle d'attaque, la vitesse du vent, et la configuration géométrique des pales. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre les performances de cette turbine et d'identifier des opportunités d'amélioration pour les applications futures dans le domaine de l'énergie renouvelable.

4.2. Définition Qblade

Qblade est un logiciel de simulation et d'analyse utilisé principalement dans le domaine de l'aérodynamique des éoliennes. Il permet de modéliser les performances des pales d'éoliennes, d'optimiser leur conception et de simuler leur comportement dans différentes conditions de vent. Grâce à des outils d'analyse avancés, Qblade aide les ingénieurs à évaluer l'efficacité et la durabilité des systèmes éoliens. C'est un outil essentiel pour le développement et l'optimisation de projets éoliens.



Figure33 : Écran d'accueil Qblade (VAWT)

4.3. Les paramètres des éléments d'une pale éolienne

Les paramètres des éléments d'une pale d'éolienne avec les caractéristiques suivantes :

Données générales	
Puissance nominale (rated power)	40 kW
Vitesse du vent nominale	14 m/s
Vitesse minimale de rotation (cut-in speed)	3 tours/minute
Vitesse maximale de rotation (cut-out speed)	20 tours/minute
Vitesse de mise en sécurité	55 m/s
Diamètre du rotor	8 m
Surface balayée	64 m ²
Hauteur du mât	[12,24] m
Nombre de pales	2

Tableau 3 : Les caractéristiques de l'éolienne

4.4. Calcul des paramètres d'élément d'une pale

- Avec la Vitesse maximale de rotation 20 tours/minute :

a) Calcul de la vitesse au bout de la pale :

$$U = (2 \pi n / 60) * R$$

R : le rayent de rotor(m).

n: la vitesse de rotation du rotor (tr/min).

$$U = (2 * \pi * 20 / 60) * 4$$

$$\underline{U = 8.38 \text{ m/s}}$$

b) Calcul la vitesse spécifique (Ratio):

U : la vitesse au bout de la pale (m/s).

V : la vitesse de vent 14 (m/s).

$$\lambda = U/V$$

$$\lambda = U/V = 8.38 / 14$$

$$\underline{\lambda = 0.6}$$

- Vitesse minimale de rotation 3 tours/minute :

a) Calcul de la vitesse au bout de la pale :

$$U = (2 * \pi * n / 60) * R$$

R : le rayent de rotor(m).

n: la vitesse de rotation du rotor (tr/min).

$$U = (\pi * 2 * 3/60) * 4$$

$$\underline{U = 1.3 \text{ m/s}}$$

b) Calcul de la vitesse spécifique (Ratio) :

$$\lambda = U/V$$

U : la vitesse au bout de la pale (m/s).

V : la vitesse de vent (m/s).

$$\lambda = U/V = 1.3 / 14$$

$$\underline{\lambda = 0.1}$$

- Calcul de la puissance du vent potentiel :**

$$P = 0.29 * D^2 * V^3$$

$$P = 0.29 * 8^2 * 14^3$$

$$\underline{P = 50.92 \text{ kW}}$$

$$P = 0.37 * S * V^3$$

$$P = 0.37 * 64 * 14^3$$

$$\underline{P = 64.97 \text{ kW}}$$

- Calcul de la Puissance du vent :**

$$P_v = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3$$

ρ : la masse volumique de l'air (1.238)

A : la section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor (64m²)

v: vitesse du vent (14 m/s)

$$P_v = \frac{1}{2} * 1.238 * 64 * 14^3$$

$$\underline{P_v = 108.70 \text{ kW}}$$

3-5) Calcul de la Puissance effective du vent :

$$P_{\text{eff}} = C_p * \frac{1}{2} * S * V^3$$

P_{eff} : puissance effective de l'énergie éolienne

C_p : Coefficient de rendement de la puissance comme nous on trouve la vitesse spécifique le plus mieux pour assurer la performance $\lambda=5.21$ et selon évolution du rendement aérodynamique instantané en fonction du rapport entre la vitesse en bout de pale et la vitesse du vent on contient que $C_p = 0.42$.

$$P_{\text{eff}} = 0.42 * \frac{1}{2} * 64 * 14^3$$

$$\underline{P_{\text{eff}} = 36.88 \text{ kW}}$$

Selon le profil aérodynamique choisi, il faudra calculer le coefficient de portance, la Traînée et le moment. Ils dépendent de l'angle d'attaque (angle α) du flux d'air et nombre de Reynolds.

4.5. Application des paramètres du profil NACA sur l'éolienne :

- Profil NACA 0021 $\alpha=10^\circ$

-Calcul des coefficients :

a) Pression dynamique :

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2$$

$$q = \frac{1}{2} * 1.238 * 14^2$$

$$\underline{q = 121.32 \text{ Pa}}$$

b) Coefficient de portance :

$$C_L = \frac{L}{q c} = 0.07$$

c) Coefficient de traînée :

$$C_D = \frac{D}{q c} = 0.06$$

d) Coefficient de moment :

$$C_m = -0.05$$

-Calcul des forces :

a) Force de portance :

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_L \cdot V^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot 1.238 \cdot 0.07 \cdot 64 \cdot 14^2$$

$$\underline{F_L = 543.53 \text{ N}}$$

b) Force de trainée :

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_D \cdot V^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot 1.238 \cdot 64 \cdot 0.06 \cdot 14^2$$

$$\underline{F_D = 465.88 \text{ N}}$$

c) D'après le théorème de Pythagore on calcule la somme des forces :

$$F^2 = F_L^2 + F_D^2$$

$$F^2 = 543.53^2 + 465.88^2$$

$$F^2 = 5.12469035 \times 10^5$$

$$\underline{F = 715.87 \text{ N}}$$

d) On définit aussi le moment aérodynamique résultant par :

$$M = F \cdot L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_m \cdot V^2$$

M : moment de la résultante aérodynamique par rapport au bord d'attaque (Nm).

L : Largeur du profile (m).

$$M = F \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 1.238 \cdot 64 \cdot 0.02 \cdot 14^2$$

$$M = F \cdot L = 155.3 \text{ Nm}$$

e) le finesse f max :

$$f = CL / CD = FL / FD$$

$$f = 0.07 / 0.06 = 543.53 / 465.88$$

$$\underline{f = 1.16}$$

Représentation des Résultats de calcul du profil NACA0012 :

Nombre de Reynolds	CL	CD	Cm	FL (N)	FD (N)	F (N)	M (Nm)	f
1000000	0.07	0.06	-0.05	543.53	465.88	715.87	155.3	1.16

Tableau 4 : Résultats de calcul NACA 0021

- Profil SNL1850 $\alpha=10$

Représentation des Résultats de calcul du profil SNL1850 :

Nombre de Reynolds	CL	CD	Cm	FL(N)	FD(N)	F(N)	M(Nm)	f
1000000	1.64	0.03	0.04	552324	12453	552465	14809	44.3

Tableau 5 : Résultats de calcul SNL1850

4.6. Simulation et analyse des résultats

4.6.1. Profil aérodynamique

La première étape dans la conception d'un aérogénérateur à axe vertical est de définir le Profil aérodynamique, pour notre cas on va utiliser deux profils NACA0021 et SNL1850

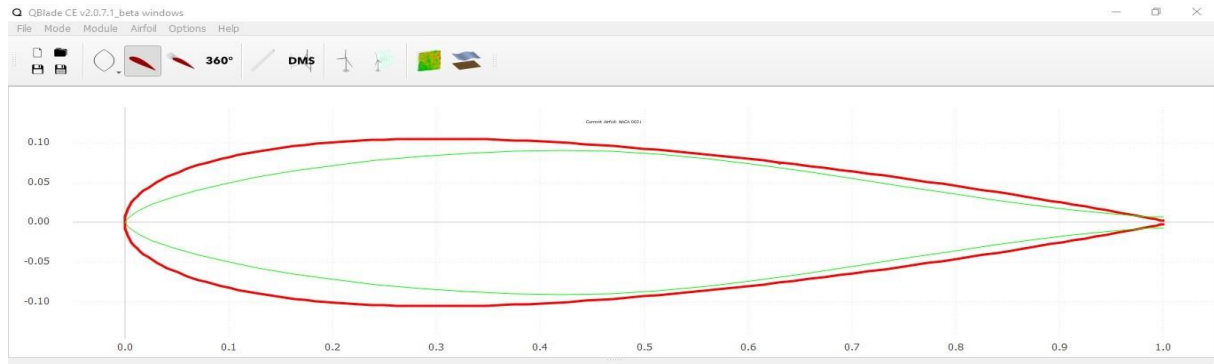


Figure 34 : Forme des profils NACA 0021 et SNL1850

Airfoil Design Module											
Foil Name	Thickness (%)	at (%)	Camber (%)	at (%)	Points	LE Flap (deg)	Show	Points	Centerline	Style	
1 NACA 0021	21.01	29.80	0.00	0.00	199	0.00	☒	☐	☐		
2 SNL1850	18.00	42.10	0.00	0.00	61	0.00	☒	☐	☐		

Tableau 6 : Caractéristiques qui concernent les profils si dessus

4.6.2. Analyse directe du profil aérodynamique

La portance sur un corps est une force exercée sur ce corps dans une direction perpendiculaire à celle du flux. La traînée sur un corps est la force exercée sur le corps dans une direction parallèle à celle du flux.

Coefficient de portance à traîner = C_l/C_d

Un graphique du coefficient de portance est tracé en fonction de l'angle d'attaque pour deux profils aérodynamiques différents, comme montré dans la Fig. 35 ci-dessous.

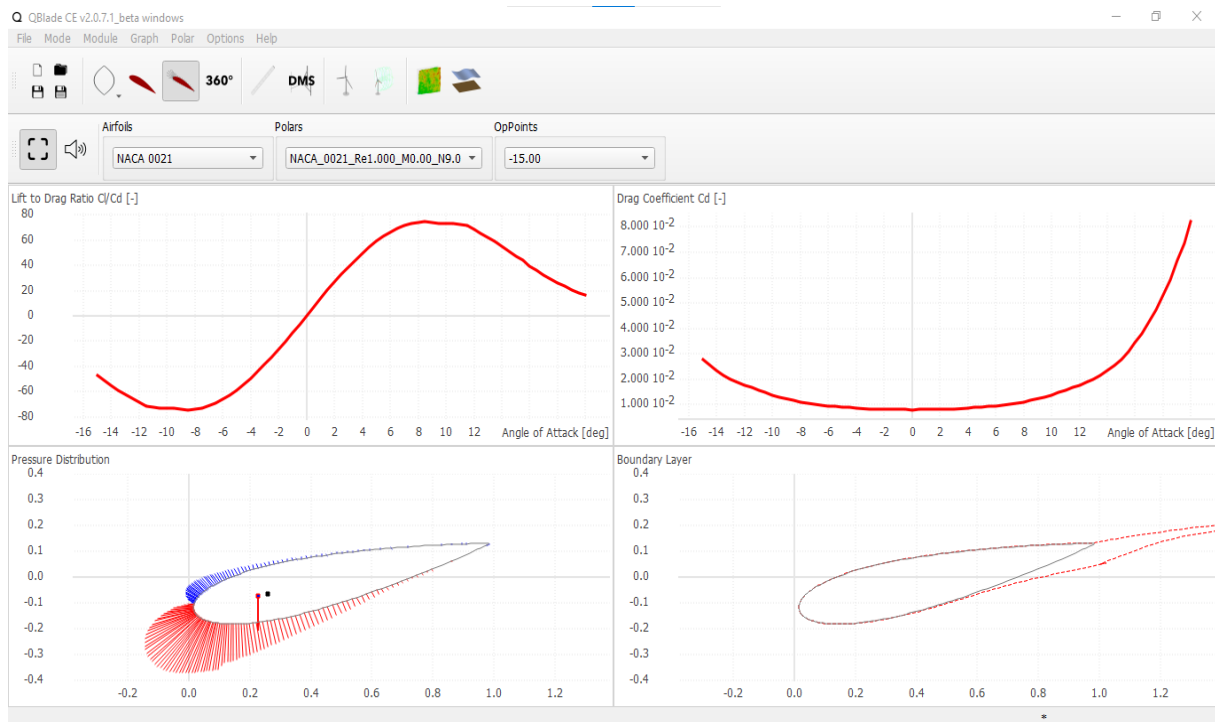


Figure 35 : Analyse de profil NACA0021

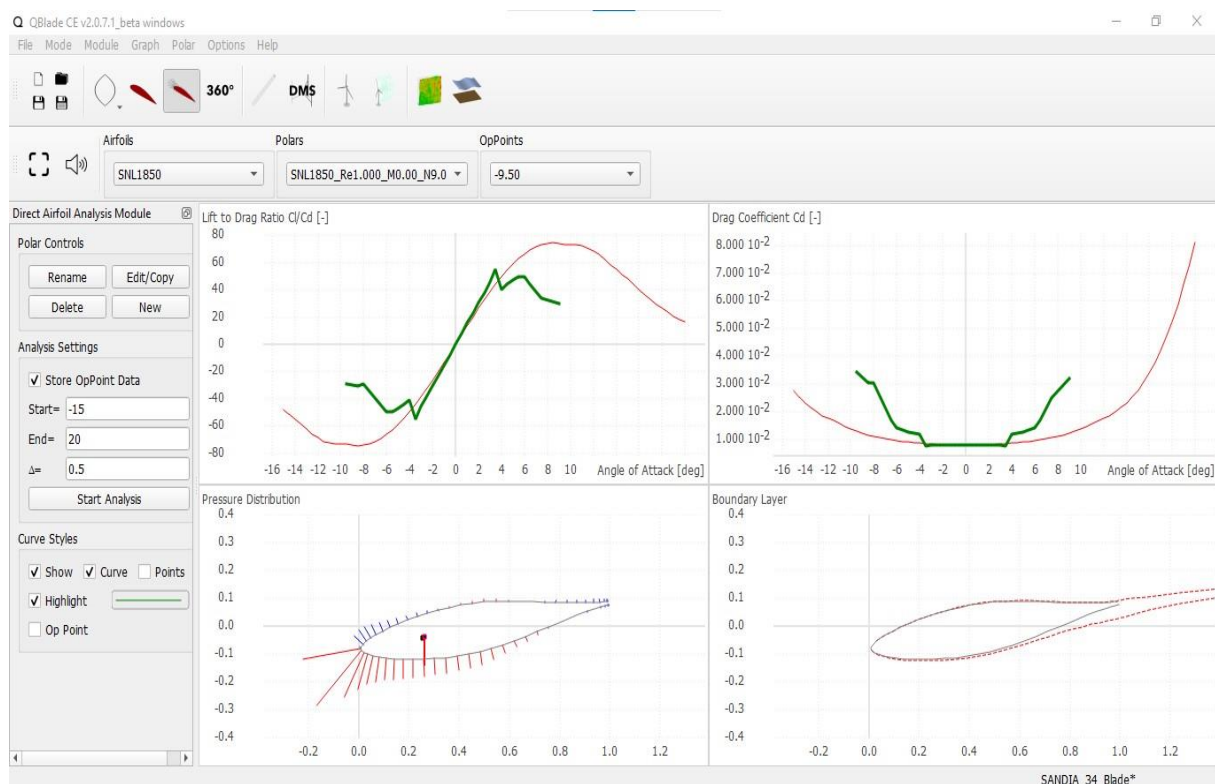


Figure 36 : Analyse de profil SNL1850

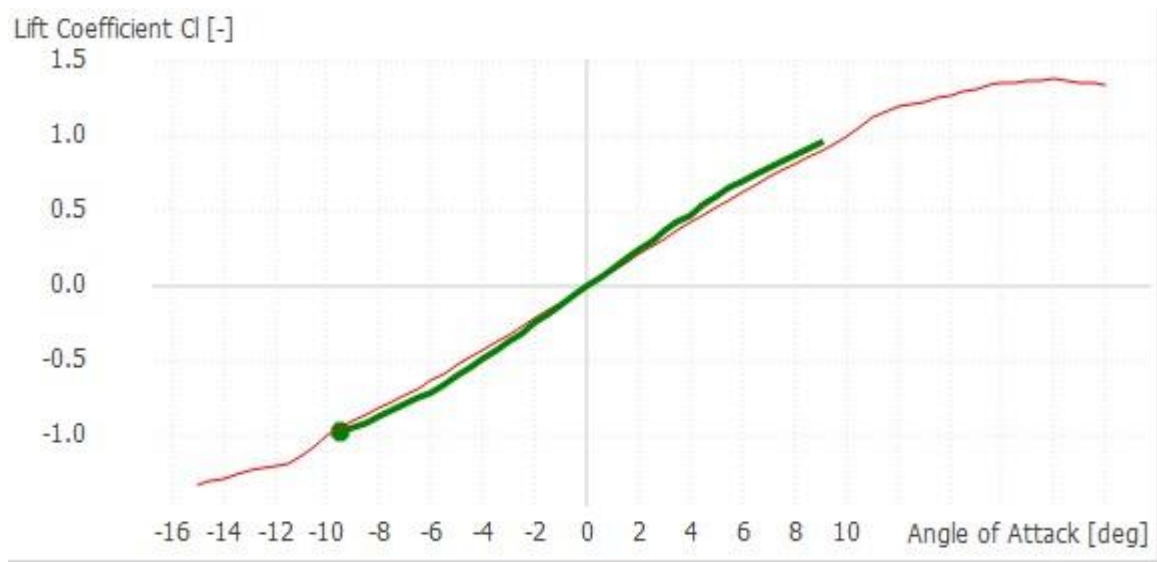


Figure 37 : Coefficient de portance [C_l] vs Angle d'attaque [α].

Ce profil de pale NACA0021 présente une valeur maximale du coefficient de portance de 1,4 pour un angle d'attaque compris entre 16° et 18° . Les valeurs optimisées des angles de corde et de torsion sont calculées à l'aide de l'équation dans le programme MATLAB. Les valeurs obtenues de l'angle de corde et de torsion sont présentées dans le tableau ci-dessous.

-La figure montre le rapport portance/trainée en fonction de l'angle d'attaque pour différents profils aérodynamiques.



Figure 38 : Ratio du coefficient de portance et du coefficient de trainée [C_l/C_d] par rapport à l'angle d'attaque [α]

La courbe de profil de couleur verte donne la valeur maximale du rapport portance/traînée pour un angle d'attaque de 2° à 4° .

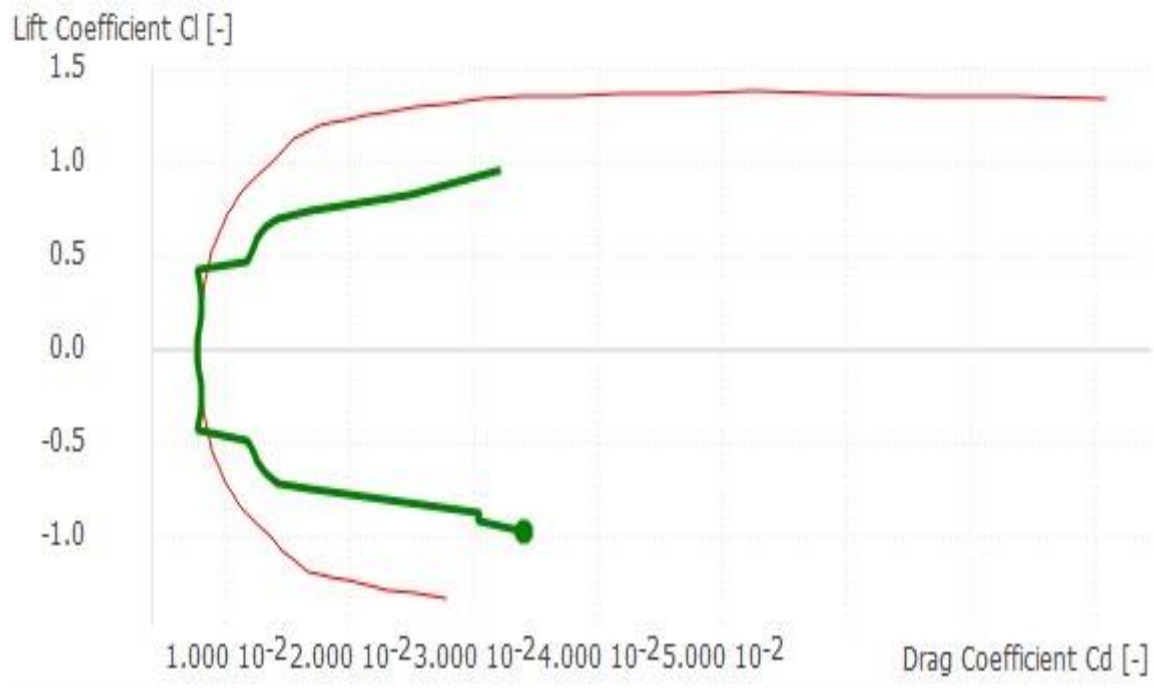


Figure 39 : Profils aérodynamiques

NACA 0021

SNL1850



La figure ci-dessus montre différents profils aérodynamiques selon la couleur.

D'après les résultats tracés dans Qblade, parmi tous les profils d'aile, le profil de pale SG6043 offre le coefficient de portance maximal et le rapport portance/traînée à différents angles d'attaque (α). Le coefficient de portance maximum du NACA0021 est de 1,4 à $\alpha = 14^\circ$. Ainsi, l'aile SNL1850 est sélectionnée.

4.6.3. Extrapolation polaire à 360°

Lorsque l'analyse bornée est faite, on lance une nouvelle analyse sur 360° en cliquant sur le bouton 360.

Sur cette fenêtre on sélectionne le profil puis on clique sur New puis Save. Puis on recommence l'opération pour le deuxième profil. On obtient (figure 40-41) :

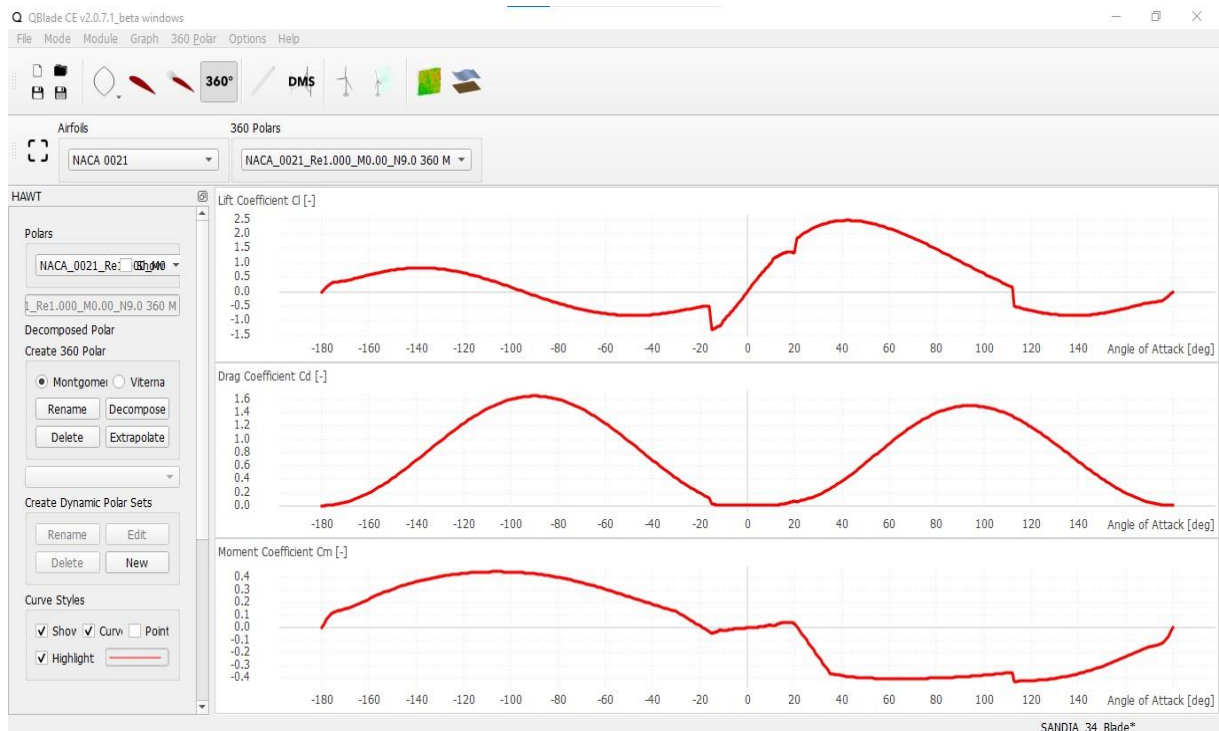


Figure 40 : Extrapolation de profil NACA0021 aérodynamique réalisée selon la méthode Viterna dans QBlade

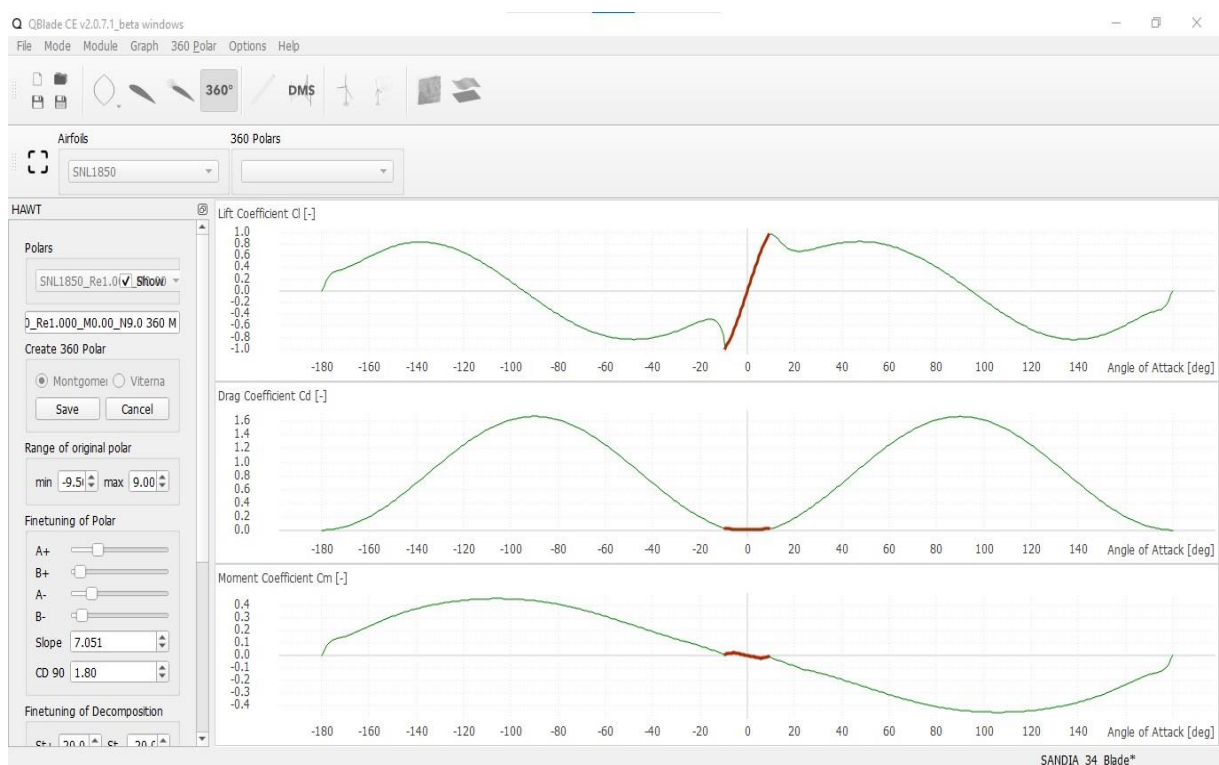


Figure 41 : Extrapolation de profil SNL1850 aérodynamique réalisée selon la méthode Viterna dans QBlade

Lors de l'application du modèle ATEFlap pour le phénomène de décrochage dynamique, une décomposition de l'aile doit être effectuée. Cette décomposition sépare les coefficients de l'aile

en régimes de flux entièrement attachés et entièrement détachés, qui sont utilisés avec des données cinématiques pour calculer les coefficients de portance, de traînée ou de moment non stationnaires. Dans QBlade, cette décomposition est réalisée automatiquement lors de l'extrapolation des polaires, ou peut être appliquée en post-traitement aux polaires déjà extrapolées.

Une fois l'extrapolation effectuée, les paramètres de la décomposition peuvent être visualisés, et ceux-ci incluent :

1. Coefficient de portance attaché : La valeur du coefficient de portance pour les flux attachés.
2. Coefficient de portance détaché : La valeur du coefficient de portance pour les flux détachés et les profils aérodynamiques dynamiques près du point de détachement.
3. Fonction f : La fonction qui détermine la fraction des contributions de portance mentionnées ci-dessus sur la plage des angles d'attaque.

Cette décomposition permet d'obtenir une compréhension plus approfondie des performances de l'aile dans différentes conditions de flux, facilitant ainsi l'optimisation du design et l'analyse aérodynamique de manière plus précise.

Un tracé de ces paramètres, tels que générés pour un profil NACA 0021 et SNL1850, est présenté dans (figure 42) :

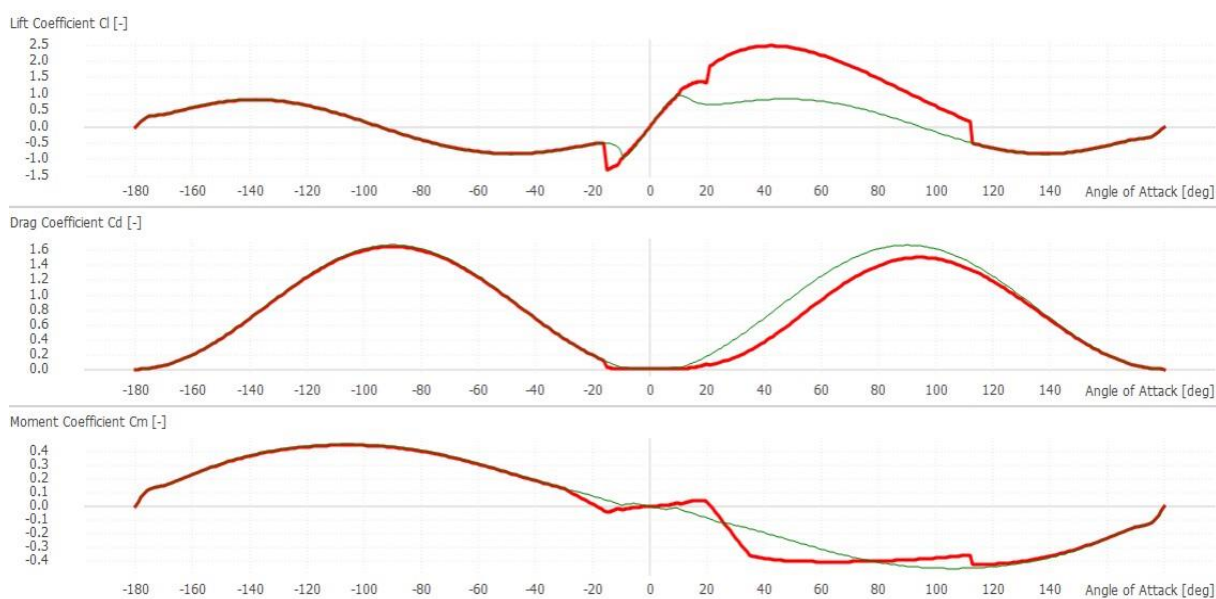


Figure 42 : Paramètres dynamiques du profil aérodynamique pour une décomposition polaire NACA 0021 et SNL1850 réalisée dans QBlade

4.6.4. Design du rotor

Le module de conception de pales comprend une pale hydraulique avec divers angles de torsion (α) et un sous-module pour la conception de rotors pour différents profils aérodynamiques. La lame se compose de 40 sections, avec les paramètres utilisés pour la conception : une hauteur de lame de 8 mètres, un angle de 0 à 70 degrés, et le type de rotor étant SNL1850 et NACA 0021.

Blade Length: 8.00 [m]

Swept Area: 36.83 [m²]



SANDIA_8m

Blade Length: 8.00 [m]

Swept Area: 36.83 [m²]

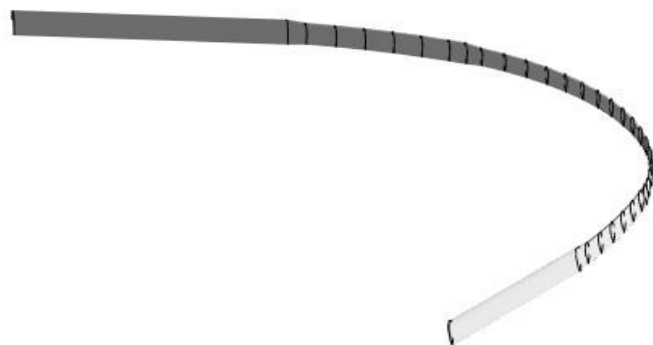


Figure 43 : Profil aérodynamique de la pale d'éolienne rotor Darius 8m

Blade Data								
SANDIA_8m								
Multi Reynolds Number Polars								
Rotor has 2 blades; airfoil suction side facing inwards								
	Height [m]	Chord [m]	Radius [m]	Twist [deg]	Circ [deg]	PAxis [%c]	Foil	Polar Range
1	0.099	0.239	0.153	0.000	0.000	0.500	NACA 0021	10000 to 1e+7
2	1.086	0.239	1.675	0.000	0.000	0.500	NACA 0021	10000 to 1e+7
3	1.181	0.210	1.790	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
4	1.337	0.210	1.971	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
5	1.500	0.210	2.146	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
6	1.670	0.210	2.314	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
7	1.847	0.210	2.475	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
8	2.030	0.210	2.629	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
9	2.146	0.210	2.723	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
10	2.274	0.178	2.801	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
11	2.473	0.178	2.914	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
12	2.680	0.178	3.013	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
13	2.894	0.178	3.098	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6
14	3.112	0.178	3.168	0.000	0.000	0.500	SNL1850	20000 to 1e+6

Tableau 7 : Sections de rotor

4.6.5. Simulation du rotor avec BEM (balade élément Momentum)

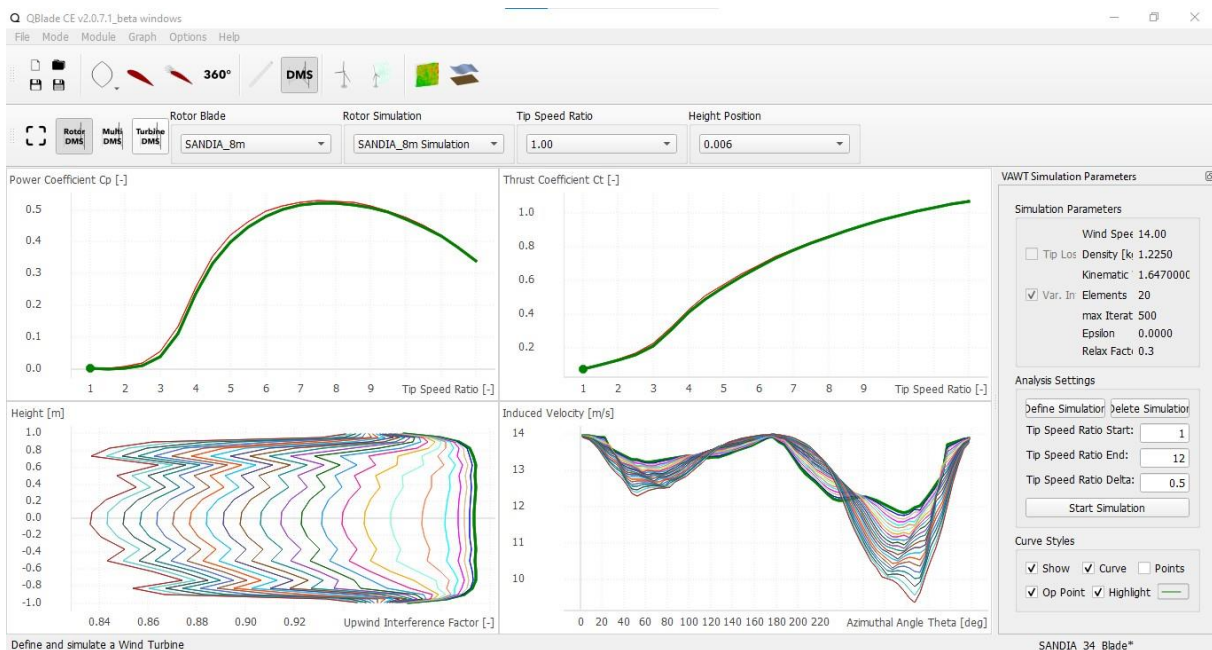


Figure 44 : Module de simulation BEM du rotor darrius

L'image fournie présente les résultats d'une simulation numérique d'une éolienne, probablement réalisée à l'aide du logiciel QBlade. Les graphiques montrent les principales caractéristiques de performance de l'éolienne en fonction du rapport de vitesse de pointe. (TSR). Les graphiques montrent le coefficient de puissance (C_p) et le rapport de vitesse optimal (TSR), la zone de fonctionnement optimale, le coefficient de poussée (C_t) et les forces exercées par le vent. Les graphiques montrent également la réduction de la vitesse du vent, l'effet de sillage,

les variations radiales et azimutales, ainsi que la périodicité du vent. Ces graphiques peuvent être utilisés pour optimiser le profil aérodynamique du rotor, étudier l'effet de sillage et valider les modèles numériques utilisés (figure 44).

4.6.6. Simulation de la turbine en utilisant BEM

Figure 45 : Paramètres de simulation d'une éolienne

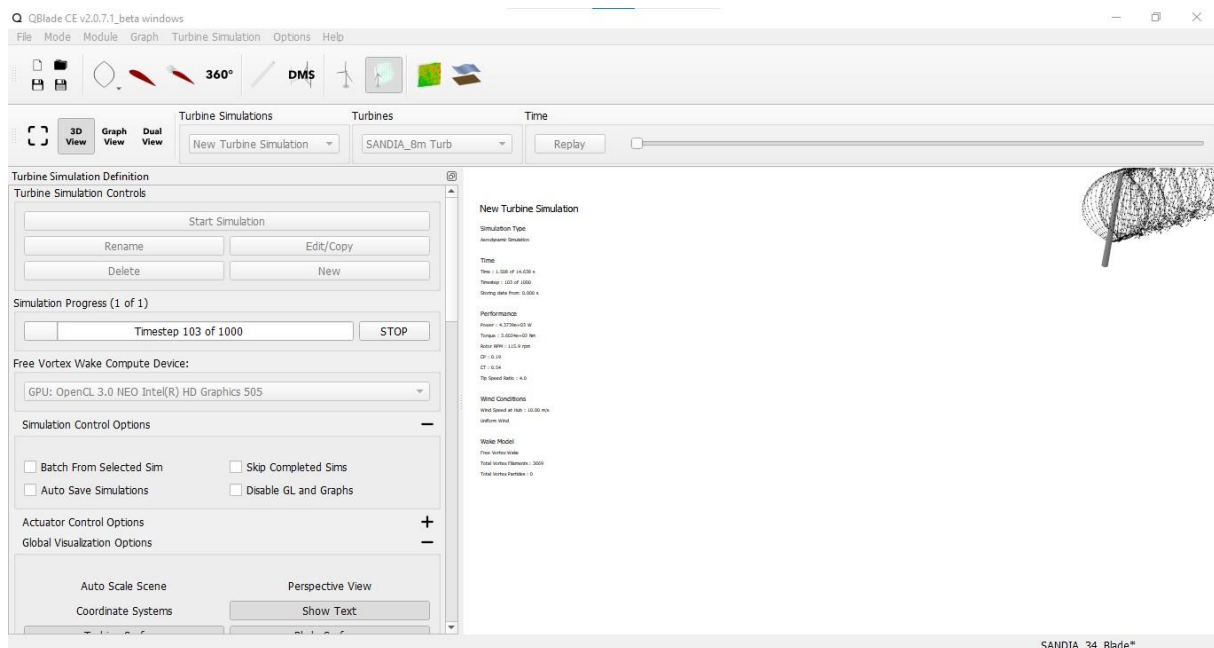


Figure 46 : Fenêtre de contrôle d'une simulation numérique

New Turbine Simulation

Simulation Type
Aerodynamic Simulation

Time
Time : 14.638 of 14.638 s
Timestep : 1000 of 1000
Storing data from: 0.000 s

Performance
Power : 4.3796e+03 W
Torque : 3.6071e+02 Nm
Rotor RPM : 115.9 rpm
CP : 0.19
CT : 0.53
Tip Speed Ratio : 4.0

Wind Conditions
Wind Speed at Hub : 10.00 m/s
Uniform Wind

Wake Model
Free Vortex Wake
Total Vortex Filaments : 4203
Total Vortex Particles : 0

Figure 47 : Résultats d'une simulation aérodynamique

-Les résultats de la simulation aérodynamique de la nouvelle turbine indiquent une puissance générée de $4,3796 \times 10^3$ W. Le coefficient de puissance (C_p) de 0,19 est également inférieur aux valeurs typiques observées pour les éoliennes performantes. Ces résultats suggèrent que la géométrie actuelle de la turbine pourrait être optimisée pour améliorer sa capacité à capturer l'énergie du vent. Le coefficient de poussée (C_t) de 0,53 semble par contre élevé, ce qui pourrait indiquer une résistance à l'avancement importante.

-Cette simulation préliminaire d'une nouvelle turbine a permis d'obtenir des premiers résultats encourageants. Néanmoins, les performances actuelles de la turbine, en termes de puissance et de coefficient de puissance, laissent entrevoir un potentiel d'amélioration. Les prochaines étapes consisteront à affiner le modèle numérique en tenant compte de conditions de vent plus réalistes et à explorer différentes géométries de pales afin d'optimiser les performances de la turbine.

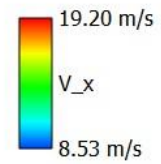
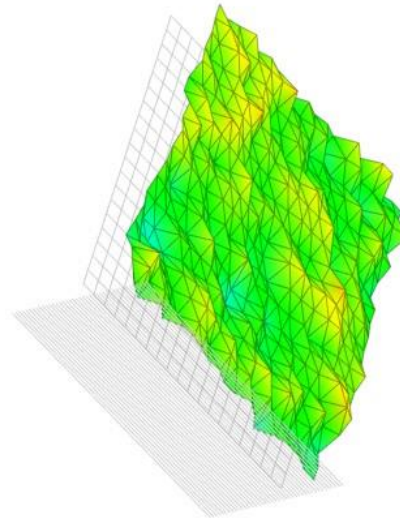
-L'analyse des résultats de la simulation révèle une puissance générée inférieure aux attentes, associée à un coefficient de puissance relativement faible. Ce constat pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs, tels qu'une géométrie de pale non optimisée, un profil aérodynamique inadéquat ou des pertes induites par le sillage. Une étude plus approfondie des résultats de la simulation, couplée à des analyses complémentaires (essais en soufflerie), permettra d'identifier les causes de ces performances sous-optimales et de proposer des améliorations ciblées.

4.6.7. Générateur de champ de vent turbulent

Windfield

Inflow

Windfield Type: VEERS
 Wind at Hub Height: 14.00 m/s
 Hub Height: 110.00 m
 Wind Profile Type: PL
 Shear Exponent: 0.00
 Wind at Reference Height: 14.00 m
 Reference Height: 60.00 m
 Turbulence Intensity: 10 %
 Measured HH TI: 8.23
 Random Seed: 1000000



Temporal

Shown Time: 0.0000 s
 Total Time: 77.29 s

Figure 48 : Champ de vent turbulent généré dans QBlade

Cette image nous donne un aperçu d'un champ de vent réaliste qui peut être utilisé pour simuler le comportement d'une éolienne. La prise en compte de la turbulence et du cisaillement vertical permet d'améliorer la précision des résultats de simulation et de mieux comprendre l'influence des conditions atmosphériques sur les performances de l'éolienne.

- Simulation aéroélastique instable rapide :

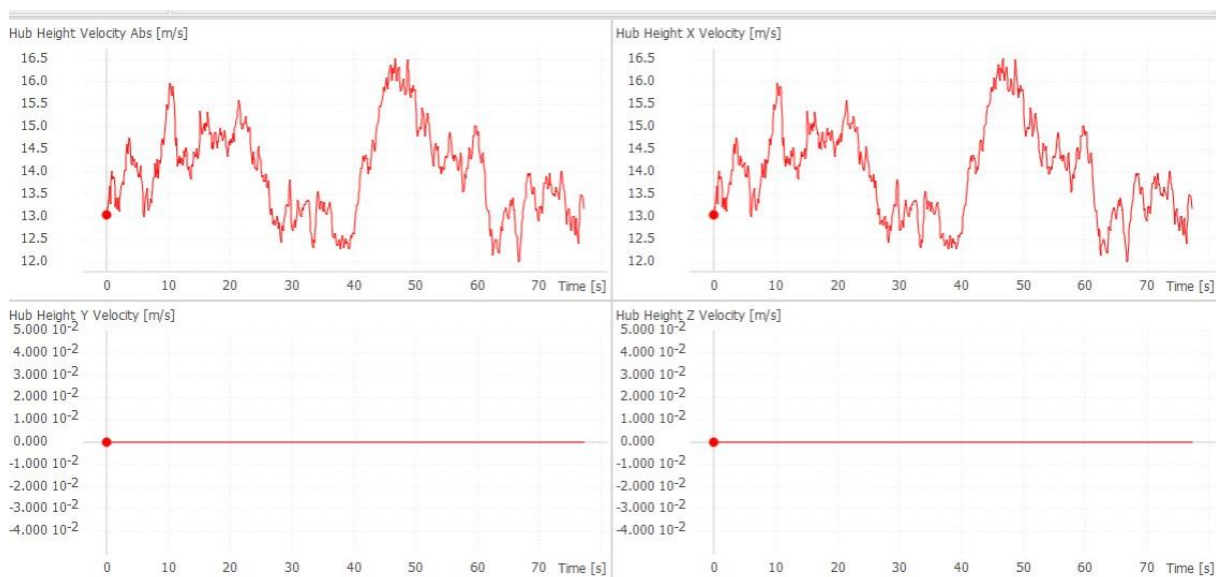


Figure 49 : Module de simulation aérodynamique

Ces graphiques fournissent une représentation qualitative de la turbulence du vent et de ses variations temporelles. Ces informations sont essentielles pour la conception et l'évaluation des performances des éoliennes. Une analyse plus quantitative permettrait d'extraire des paramètres statistiques tels que la vitesse moyenne, l'écart-type, la fréquence des rafales, etc...

4.6.8. Présentation du générateur d'ondes

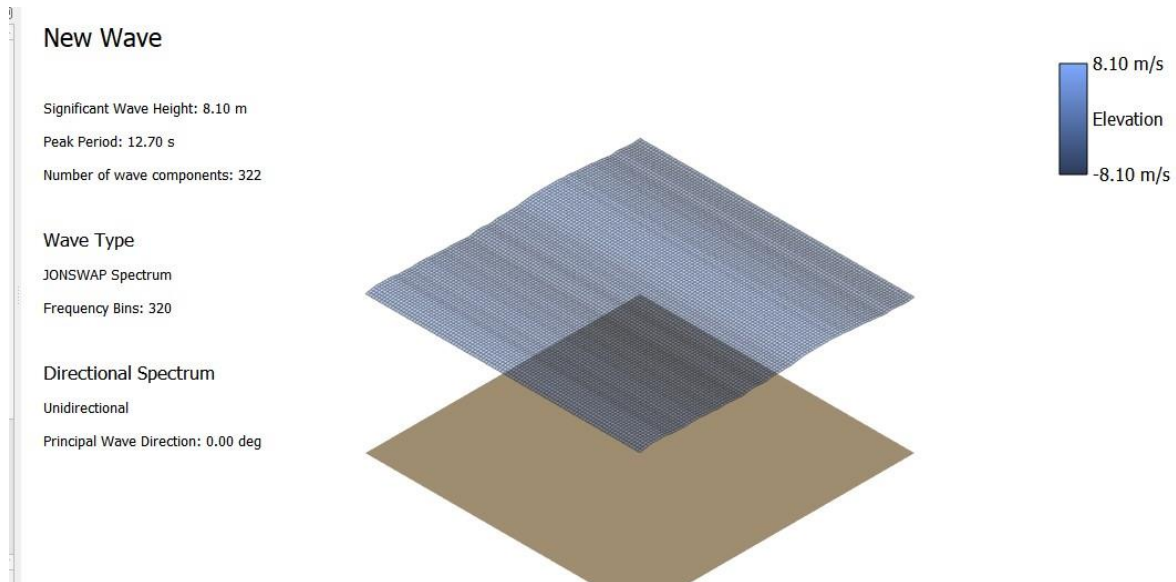


Figure 50 : Observation d'une onde instable

Le modèle décrit l'amplitude des vagues océaniques à l'aide du spectre JONSWAP, particulièrement adapté à la description des conditions de mer agitées. Il a une hauteur moyenne de 5,10 mètres, une période de crête de 12,70 secondes, 322 composantes d'onde, une fréquence de 320, une direction de 0,00 degrés, et une surface de l'eau représentée par une grille de points colorés. Les formes d'ondes apparaissent régulières et bien définies, cohérentes avec le spectre JONSWAP. Le modèle peut être utilisé dans diverses applications, telles que les structures offshore, la navigation maritime, les études d'impact sur le littoral et la simulation de phénomènes océaniques. Elle présente cependant des limites, comme le fait de ne pas prendre en compte tous les phénomènes physiques influençant les vagues, les conditions initiales et la validité du modèle basée sur la qualité des données utilisées.

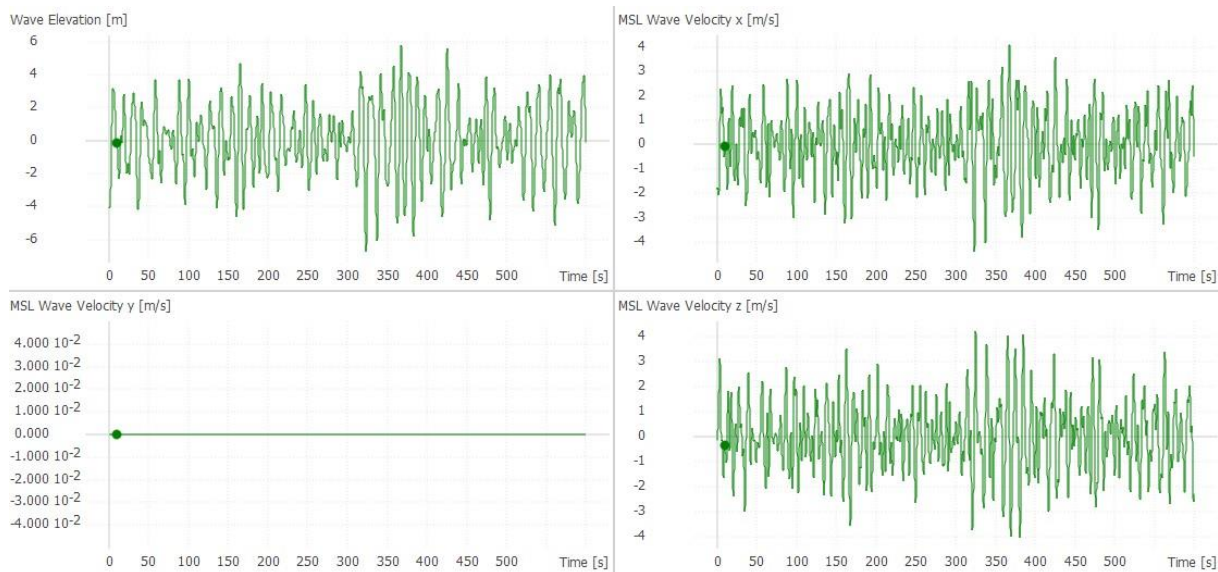


Figure 51 : Évolution temporelle .

Les graphiques présentés fournissent des informations précieuses sur la vitesse du vent à la hauteur d'un atome d'hélium sur une période donnée. Ces graphiques montrent des fluctuations significatives de la vitesse du vent, qui sont dues à la turbulence atmosphérique et peuvent avoir un impact direct sur la performance de l'hélium. La vitesse moyenne du vent est d'environ 14 m/s, ce qui correspond à un vent modifié. Des événements particuliers, tels qu'une rafale de vent, peuvent également influencer les charges subies par l'hélium. Ces données peuvent être utilisées pour des simulations numériques d'hélium afin de reproduire des conditions de fonctionnement réalistes. Les fluctuations de la vitesse du vent ont un impact direct sur la puissance de l'hélium, nécessitant une analyse plus approfondie.

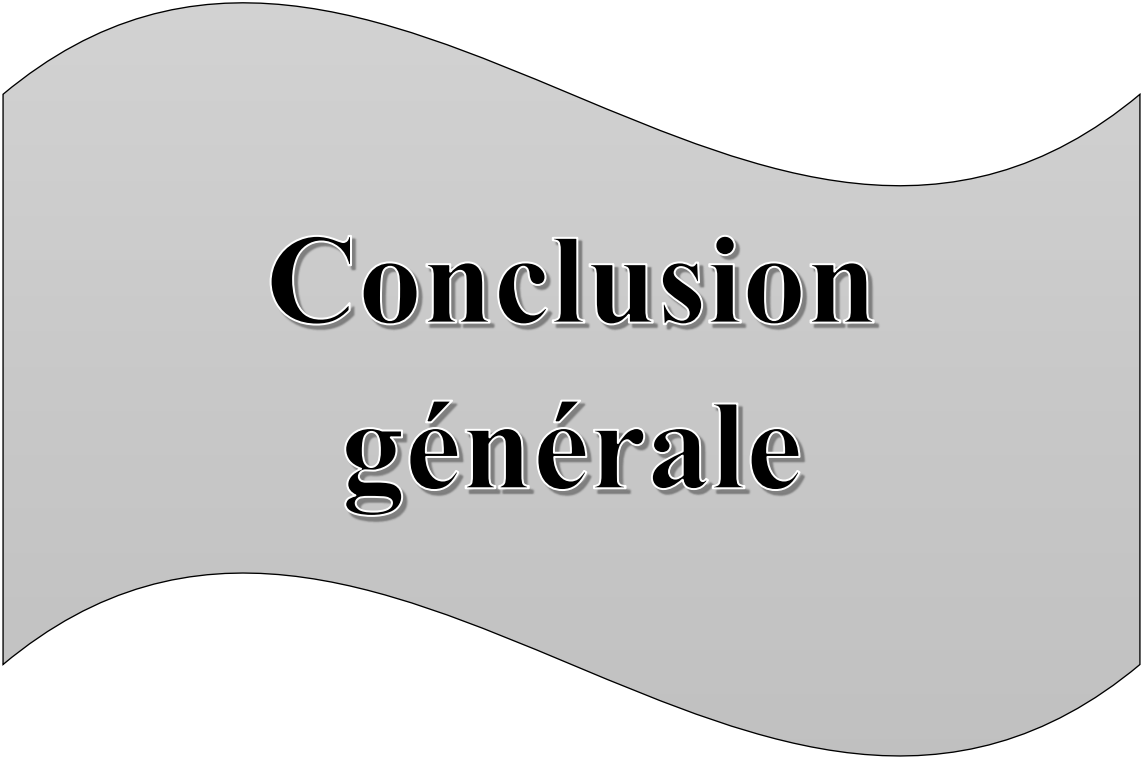
4.7. Remarque

L'étude et la simulation des turbines à axe vertical (VAWT) offrent des perspectives essentielles sur leur performance et leur efficacité. Ces turbines, comme les modèles Savonius et Darrieus, se distinguent par leur capacité à fonctionner dans des environnements urbains grâce à leur stabilité face aux variations de direction du vent. Les simulations permettent d'analyser l'impact de la géométrie des pales sur l'efficacité énergétique et de comprendre leur comportement en cas de vent turbulent. De plus, l'évaluation de l'impact acoustique et visuel est cruciale pour leur acceptabilité dans des zones densément peuplées. En optimisant les designs à l'aide de simulations, il est possible d'améliorer leur rendement et leur durabilité, tout en facilitant leur intégration dans des systèmes énergétiques hybrides. Ainsi, ces études constituent un outil précieux pour développer des solutions énergétiques renouvelables adaptées

aux besoins contemporains.

4.8. Conclusion

En conclusion, l'utilisation de QBLADE pour la simulation d'éoliennes offre une approche puissante pour optimiser la conception et les performances. Ce logiciel permet d'analyser la géométrie des pales, d'évaluer les caractéristiques aérodynamiques et de simuler les performances en fonction des conditions de vent. Grâce à ses fonctionnalités, QBLADE facilite l'optimisation des designs et aide à prédire le rendement énergétique, tout en considérant les aspects de stabilité et de durabilité. En intégrant QBLADE dans le processus de développement, les ingénieurs peuvent améliorer l'efficacité des éoliennes et favoriser une meilleure intégration dans les systèmes énergétiques renouvelables.



Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, l'étude et la simulation d'une turbine à axe vertical mettent en lumière les nombreux avantages et les opportunités qu'offre cette technologie dans le domaine des énergies renouvelables. Au fil de notre analyse, il est apparu que les turbines à axe vertical présentent des caractéristiques distinctes qui les rendent particulièrement adaptées aux contextes urbains et aux zones où les vents sont souvent instables ou de faible intensité. Contrairement aux turbines à axe horizontal, leur conception permet une capture efficace du vent, peu importe sa direction, ce qui maximise leur potentiel de production énergétique.

Les résultats de la simulation montrent également un rendement prometteur, confirmant que ces turbines peuvent répondre efficacement à la demande croissante en énergies renouvelables. En effet, leur faible encombrement et leur fonctionnement silencieux en font une option idéale pour les installations sur les toits des bâtiments ou dans des zones densément peuplées, où les préoccupations esthétiques et sonores sont primordiales. De plus, l'impact environnemental réduit de ces systèmes, en comparaison avec les énergies fossiles, souligne leur rôle clé dans la transition énergétique vers un avenir plus durable.

Cependant, il reste essentiel de poursuivre les recherches afin d'optimiser les performances des turbines à axe vertical. Cela inclut l'exploration de nouveaux matériaux, l'amélioration des designs pour réduire les coûts de fabrication, et l'intégration de technologies avancées pour le suivi et l'analyse des performances. En outre, des études de cas sur des installations existantes pourraient fournir des données précieuses pour mieux comprendre leur fonctionnement dans divers environnements.

En somme, l'avenir des turbines à axe vertical semble prometteur, offrant une solution viable pour diversifier notre mix énergétique. En investissant dans cette technologie et en intégrant ces turbines dans des projets d'infrastructure durable, nous avons l'opportunité de contribuer significativement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la création d'un monde plus propre et plus respectueux de l'environnement. L'adoption généralisée de cette technologie pourrait ainsi jouer un rôle crucial dans la lutte contre le changement climatique, tout en favorisant l'innovation et le développement économique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : Technique de l'ingénieur D3960.
- [2] : E.Muljadi, «Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications,» chez IEEE industry applications conference,1998.
- [3] : Mr. AFTIS Zahir & MrASLOUNI Youcef ,Commande non linéaire d'un système de pompage éolien, mémoire master, Université de Bejaia (2016)
- [4] : Mr. SAIDI Yazid & Mr.YAHIAOUI Yahia, Etude et réalisation d'une turbine éolienne, mémoire master , Université Abderrahmane Mira-Bejaia (2014)
- [5] : Khelfat Lotfi & Maataoui Lakhdar, Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, mémoire master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA (2017)
- [6] : HERISSI Belgacem, Commande d'une Eolienne basée sur les modèles flous de Takagi-Sugeno], mémoire master, UNIVERSITÉ LARBI TEBESSI-TÉBESSA (2015).
- [7] : article (A review on small scale wind turbines ,Abhishiktha Tummala, ... V. Hari Krishna, in Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016).
- [8] : dossier ecosources.org/eolienne-verticale-darrieus
- [9] : Global Wind Energy Council. (2021). Global Wind Report 2021. <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
- [10] : mémoire Etude numerique d'une eolienne hybride asynchrone 2011 .
- [11] : Lun, Isaac Y. F. and Lam, Joseph C. A Study of Weibull Parameters Using Long-Term Wind Observations. Renewable Energy. 2000 Jun; 20(2): 145-153.
- [12] : Articles scientifiques : De nombreux articles scientifiques traitent de l'optimisation des éoliennes à axe vertical. Vous pouvez les trouver dans des bases de données spécialisées comme ScienceDirect ou IEEE Xplore.
- [13] : Thèses de doctorat : Les thèses de doctorat offrent souvent une vision approfondie des dernières recherches dans ce domaine.
- [14] : Sites web de fabricants : Les fabricants d'éoliennes présentent souvent des informations sur leurs produits et les technologies qu'ils utilisent.
- [15] : Les éoliennes urbaines : une énergie renouvelable en ville - Découvrez la Genentech
- [16] : "Aerodynamics of Wind Turbines" par Martin O. L. Hansen : Une ressource essentielle pour comprendre les principes aérodynamiques appliqués aux éoliennes.
- [17] : "Wind Energy Handbook" par Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, et al. : Une vue d'ensemble complète sur la conception et l'optimisation des éoliennes.

[18] : QBlade Documentation et Tutoriels : Pour des instructions détaillées sur l'utilisation de QBlade 2023.

[19] : Aérodynamique des éoliennes: Étude des écoulements autour des pales et des phénomènes de décrochage.

[20] : Mécanique des structures: Analyse des contraintes et des déformations des composants de l'éolienne 2020.

[21] : Contrôle des systèmes dynamiques: Développement de stratégies de contrôle pour optimiser le fonctionnement de l'éolienne.

[22] : http://rist.cerist.dz/IMG/pdf/Art10-2_10.pdf

[23] : <http://tpe-si-2011.e-monsite.com/pages/l-energie-eolienne/les-differents-types-deoliennes.html>

[24] : <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1067/8/introduction-generale.pdf>

[25] : les_aspects_technologiques_des_eolienne_et_leur_utilisation.pdf

[26] : <https://alizes.jimdo.com/fonctionnement/les-pales/>

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

[28] : <http://aerodynamique.chez.com/profil.html>