

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة التعليم العالي و البحث العلمي جامعة وهران للعلوم و التكنولوجيا محمد بوضياف





### Présenté par :DADAMOUSSA AICHA

### Intitulé

Amélioration du rendement d'éolienne à axe vertical (Darrieus)

Faculté	: Génie Mécanique
Département	: Génie Mécanique
Domaine	: Génie Mécanique
Filière	: Génie Mécanique
Intitulé de la Formation	: Science de l'Aéronautique

Devant le Jury Composé de :

Membres de Jury	Grade	Qualité	Domiciliation
ADJLOUT LAHOUARI	Pr.	Président	USTO-MB
IMINE OMAR	Pr.	Encadrant	USTO-MB
YAHYAOUI TAYEB	Pr.	Co-Encadrant	USTO-MB
KHORSI AZZEDDINE	Pr.		ESGEE- Oran
GHEZALI FAIZA	MCA	Examinateurs	UDL - Sidi Bel - Abbés

Année Universitaire : 2022-2023

### DÉDICACES

Je dédie ce travail

A mon Allah le Tout puissant,

A mes très chers Parents, source de vie, d'amour et d'affection pour tous les soutiens qu'ils m'ont apportés.

A mes sœurs et mes frères leur présence à mes côtés, surtout ma chère sœur Salha.

A mon cher mari source d'espoir et de motivation.

A mon cher fils Mohammd Yacin , je prie Dieu de le protéger

A mes belles sœurs et mes bons frères.

A mes nouveus et mes nièces source de joie et de bonheur.

A tata Bakhta et B.Abdelkader et ses enfants qui m'ont encouragé dans les moments difficiles.

A tous mes chers amis et ma famille et belle-famille

A tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu

Mes remerciements vont avant tout à mon **ALLAH**, créateur pour cette faveur qu'Il a bien voulu m'accorder.

Mes remerciements à mon encadreur **Pr. Imine Omar**. Je le remercie surtout pour sa disponibilité et son attention

Je tiens à remercier tout particulièrement mon Co-encadreur,

**Pr. Yahiaoui Tayeb,** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, concernant l'aspect rédactionnel, qui ont contribué à alimenter ma réflexion, et de m'avoir accueilli dans son équipe et d'avoir accepté de diriger ce travail. Sa rigueur, sa disponibilité et ses qualités humaines m'ont profondément touché.

Je désire également remercier mes professeurs, et particulièrement **Pr.Settou Noureddin** pour son aide précieuse.

Un grand merci aux personnes qui ont pris le temps de relire et de corriger les imperfections de ce mémoire. Je remercie aussi toutes ma familles et les autres personnes qui ont pris part à ce mémoire, d'une façon ou d'une autre, et l'ont rendu possible.

#### Résumé

Le but de cettethèse c'est l'amélioration du rendement d'une éolienne à axe vertical type Darrieus, pourcela en utilisant une nouvelle conception des générateurs de vortex.

Notre travail est une contribution numérique de la dynamique de l'air à travers des générateurs de vortex sur des profils des pales d'éolienne Darrieus à l'aide du code de calcul ANSYS CFX 15, en utilisant le modèle de turbulence (SST K $\omega$ ), en régime permanent et instationnaire. Les effets de la géométrie des générateurs de vortex et leurs tailles par rapport au profil ont été mis en évidence. Les pales utilisées sont des profils NACA4415 et NACA0018.

La première partie du travail traite de l'écoulement autour du profil avec les générateurs de vortex positionnée sur l'extrados et autre fois à l'intrados pour un certain angle d'attaque et la solution 3D avec générateur de vortex. La deuxième partie de ce travail traite La validation du modèle de test se concentre sur le cas incontrôlé présenté dans les travaux de Tan Kar Zhen [22] et les meilleurs résultats obtenus à l'analyse passée on a utilisé pour simuler la turbine avec trois pales de NACA 0018.

The aim of the present thesis is to improve the Darrieus wind turbine performance by using a new design of vortex generators. The effect of vortex generators heights on the wings has been studied numerically using the unsteady k- $\omega$  SST model by means of the commercial code ANSYS CFX 15. In this study, the wings profiles tested are NACA4415 and NACA0018, respectively.

In a first part of the work, vortex generators are installed at the top of the wing, and then installed at the bottom. Later on, VGs are installed simultaneously at the top and bottom of the wing, with different angles of attack in order to extract best results in terms of performance.

In a second part, the tested models are validated and compared to experimental measurements of Tan Kar Zhen [22]. Results obtained for the three-blade turbine of NACA 0018 are found better than others.

الملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو تحسين أداء توربينات الرياح ذات المحور الرأسي من نوع Darrieus ، وذلك باستخدام تصميم جديد لمولدات دوامة.

عملنا على دراسة عددية باستخدام كود الكمبيوتر ANSYS CFX 15 و نموذج الاضطراب (K@SST) ، ثابت وغير ثابت وهذا بتغيير حجم المولدات بالنسبة للأجنحة ،الأجنحة المستخدمة في هذه الدراسة NACA4415 و NACA0018.

الجزء الأول من العمل قمنا بتثبيت المولدات على الجناح في الاعلى ثم ثبتناه في الاسفل ثم في الاعلى و الاسفل معا بزوايا معينة و استخراج أحسن النتائج .

تتناول الجزء الثاني من هذا العمل التحقق من صحة نموذج الاختبار ومقارنته مع عمل [22] Tan Kar Zhen . و استخدام أفضل النتائج التي تم الحصول عليها في التحليل السابق لمحاكاة التوربين بثلاث شفرات من NACA 0018 .

Remerciement
Dédicace
Table des figures
Table des tableaux
Nomenclature
Introduction générale

### Chapitre I : Généralité Sur les Systèmes Eoliennes

I.1 Introduction	3
I.2 Histoire de l'éolienne	3
I.3 Statistique (marché mondiale)	4
I.4 Classement	5
I.5 Types des éoliennes	7
I.5.1 Eoliennes à axe horizontale	7
I.5.1.1 Composantes d'une éolienne à axe horizontal	9
I.5.1.2 Principe de fonctionnement	10
I.5.2 Éoliennes à axe Vertical	11
I.6 Carte graphique des vents en Algérie	16
I.7 Production mondial d'électricité éolienne	18
I.8 Production algérienne d'électricité éolienne	18
I.9 Conclusion	19

### Chapitre II : Études Bibliographiques

II.1	Introduction	20
II.2	Étude bibliographique	20

### Chapitre III : Étude Théorique des Éoliennes à Axe Vertical

III.1 Introduction	
III.2 Principe de fonctionnement	45
III.3 Théorie des éoliennes (L'aérodynamique du rotor et des pale	es)47
III.3.1 Rapport de vitesse de pointe (TSR)	
III.3.2 Nombre de Reynolds	
III.3.3 Solidité de la turbine	
III.3.4 Force de portance et force de trainée	
III.3.4.1 La force de portance	
III.3.4.2 La force de trainée	
III.3.5 Force tangentiel et force normal	
III.3.6 Angle d'attaque	
III.3.7 Angle d'incidence	
III.3.8 Limite de Betz	
III.4 Profile aérodynamique	
III.4.1 Géométrie du profil	

III.4.1.1 Paramètre caractéristiques de l'aile	52
III.4.1.2 Particularité du bord d'attaque	.53
III.4.1.3 Bord de fuite	.53
III.4.2 Profile Symétrique	54
III.4.3 Profile asymétrique	54
III.4.4 Profils de type NACA	.54
III.4.4.1 Définition du profil NACA0012	54
III.4.4.2 Présentation du profil	.55
III.5 Phénomène du décrochage	55
III.6 Contrôle d'´écoulements	.55
III.6.1 Contrôle Passif	55
III.7 Le contrôle actif	
III.8 La couche limite	57
III.8.1 Types de couche limites	57

### Chapitre IV : Étude Numérique

IV.1 Introduction	60
IV.2 Équations fondamentales de la dynamique des fluides	60
IV.2.1 Les grandeurs moyennes	60
IV.2.2 Équation de Continuité	61
IV.2.3 Équation de quantité de mouvement	62
IV.2.4 Équation de conservation de l'énergie	62
IV.3 Modélisation de la turbulence	63
IV.3.1 Modèle Spalart-Allmaras	64
IV.3.2 Modèle $k - \varepsilon$	64
IV.3.2 Modèle $k - \omega$	66
IV.3.3.1 Modèles K-Omega couramment utilisés	66
IV.4 Application de la loi de paroi	68
IV.5 Présentation du code de calcul ICEM CFD CFX 15.0	70
IV.5.1 Génération de la géométrie et du maillage (ICEM CFD-15.CFX ou CFX-	
BUILD)	72
IV.5.2 Optimisation du Maillage	74
IV.6 CFX-Pre.	76
IV.7 CFX SOLVER	78
IV.8 CFX-POST	78

### **Chapitre V : Résultats et Interprétation**

V.1	Introduction	30

#### PARTIE -I-PROFIL ISOLÉ

V.2 Configuration du domaine de calcul	
V.2.1 Configuration du générateur de vortex	
V.3 Résultats pour la pale de la zone de freinage	
V.3.1 Validation de la méthode de simulation	
V 3.2 Analyse des contours de vitesse	84

### PARTIE -II-ÉOLIENNE DARRIEUS TRIPALE

V.4 Les éoliennes étudiées	
V.4.1 Éolienne 3 pales Ane Manshaka Roa	
V.4.2 Éolienne à la zone de freinage	
V.4.3 Éolienne 3 pales avec générateur de vortex	
V.5 Paramètres de calcul	
V.6 Génération de la géométrie	
V.7 Courbes des forces et du moment en fonction de $\lambda$	
V.8 Courbes de $Cp$ en fonction de $\lambda$	
V.9 Contours des vitesses en fonction de $\lambda$	
V.9.1 Éolienne Simple (pale lisse)	
V.9.2 Éolienne Extrados et Intrados (VGs)	
V.9.3 Éolienne Intrados (VGs)	

nclusions et perspectives113
------------------------------

## Table des figures

Figure I. 1 : Capacité globale annuelle installée 2001-2017. [5]	4
Figure I. 2 : Capacité globale instantanée cumulée 2001-2017.[5]	5
Figure I. 3 : capacité totale installée(MW) en 2017. [5]	6
Figure I. 4 : Dix premiers pays en termes de capacité installée, décembre 2017 .[5]	6
Figure I. 5 : type d'éolienne a axe horizontal.	9
Figure I. 6 : Composantes d'une éolienne à axe horizontal	10
Figure I. 7 : Étapes de construire l'électricité	11
Figure I. 8 : Modèle d'éolienne à axe vertical Darrieus et Savonius.	12
Figure I. 9 : Modèle d'éolienne à axe vertical Savonius.	13
Figure I. 10 : Différents types de rotor cylindrique Darrieus.	14
Figure I. 11 : hydrolienne à axe vertical	14
Figure I. 12 : Parc d'une éolienne à axe vertical.	15
Figure I. 13 : Éolienne à axe vertical Rotor parabolique.	15
Figure I. 14 : Modèle d'éolienne à axe vertical Giromill.	16
Figure I. 15 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire horizontale globale en Algérie. [11]	17
Figure I. 16 : Champ éolienne d'Adrar Kaberkéne.	19
Figure II. 1 : Dimensions et conditions aux limites du domaine de la soufflerie. [18]	21
Figure II. 2 : Comparaison des tracés de traînée d'analyse statique expérimentale et numérique sur chaque	
profil aérodynamique à différents angles azimutaux. [18]	21
Figure II. 3 : Comparaison des tracés de portance d'analyse statique expérimentale et numérique sur chaque	e
profil aérodynamique à un angle azimutal différent.[18]	22
Figure II. 4 : Courbe de performance d'une turbine H-Darrieus à cinq pales	22
Figure II. 5 : Maillage. [19]	23
Figure II. 6 : Influence des itérations internes sur le coefficient de portance au début du décrochage	
dynamique. [19]	24
Figure II. 7 : Coefficient de traînée du rotor. [19].	24
Figure II. 8 : Performances typiques du rotor Darrieus CP en fonction du rapport de vitesse de pointe. [19]	25
Figure II. 9 : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse de pointe pour les 25 sections de pa	ıle
Considérées. [21]	26
Figure II. 10 : Schéma du domaine de calcul de l'hydrolienne libre en milieu infini. [22]	27
Figure II. 11 : distribution du coefficient de puissance en fonction du paramètre d'avance pour l'hydrolienn	ıe
libre en milieu infini. [22]	27
Figure II. 12 : distribution cartésienne du coefficient de couple instantané au point de fonctionnement optin	nal.
[22]	27
Figure II. 13 : Aile composite en fibre de verre avec différentes	28
Figure II. 14 : coefficient de portance. [23]	28
Figure II. 15 : coefficient de trainé. [23]	29

## Table des figures

Figure II. 16 : Coefficient de couple instantané d'un seul profil aérodynamique en fonction de coordon	nnée
azimutale, rapport optimal de vitesse de pointe ( $\lambda$ =2,58 pour N=3, $\lambda$ =2,33 pour N=4, $\lambda$ =2,04 pour N=5). [24]	8]30
Figure II. 17 : Coefficient de couple en fonction de la position angulaire de pale n°1 (période unique trac	cée),
rapport de vitesse de pointe optimal ( $\lambda$ =2,58 pour N=3, $\lambda$ =2,33 pour N=4, $\lambda$ =2,04 pour N=5). [28]	31
Figure II. 18 : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse de pointe. [28]	31
Figure II. 19 :Discrétisation simple du maillage 2D d'une éolienne à axe vertical. [30]	. 32
Figure II. 20 : Domaines généraux des conditions aux limites et internes utilisés dans l'analyse numérique.	
[31]	. 33
Figure II. 21 : Génération et distribution de maillage autour de VAWT. [31]	. 33
Figure II. 22 : Angle de torsion de $0^\circ$ et $90^\circ$ . [31].	. 34
Figure II. 23 : Angle de torsion de 45° et 135°. [31]	. 34
Figure II. 24 : Structure maillée du domaine de calcul 2D de S-VAWT. [32]	. 36
Figure II. 25 : Analyse comparative du coefficient de force tangentielle de 3D et 2D pour S-VAWT. [32]	. 35
Figure II. 26 : Courbes du coefficient de force tangentielle instantanée de S-VAWT à différents pas de temp	os.
[32]	. 36
Figure II. 27 : Coefficient de puissance moyen du S-VAWT tripale à divers TSR. [32]	. 36
Figure II. 28 : Couple en fonction de $\lambda$ pour la lame fixe et inclinée.[39]	. 38
Figure II. 29 : Couple versus RPM pour différentes solidités vitesses du vent. [39]	. 39
Figure II. 30 : Comparaison du coefficient de puissance pour le rotor à pales fixes et inclinées. [39]	. 39
Figure II. 31 : Coefficient de puissance en fonction de $\lambda$ pour différentes valeurs de solidité [39]	. 39
Figure II. 32 : Coefficient de portance pour différentes hauteurs moyennes de rugosité à $\alpha = 5^{\circ}$ . [41]	. 40
Figure II. 33 : Coefficient de traînée pour différentes hauteurs moyennes de rugosité à $\alpha = 5^{\circ}$ . [41]	. 41
Figure II. 34 : Variations du coefficient de puissance de la turbine pour divers rapports de vitesse de pointe à	à
Ra = 0, 0,3 mm .[41]	. 41
Figure II. 35 : Variations du coefficient de puissance de la turbine pour différentes configurations de rugosit	é
et $Ra = 0,3 m .[41]$	. 41
Figure III. 1 :Schéma de travail d'une éolienne Darrieus.	. 46
Figure III. 2 : La direction du vent attaquant un profil de pale et les deux décompositions de la force	
résultante.	. 47
Figure III. 3 : Rapport entre vitesse spécifique et le coefficient de puissance. [a]	. 48
Figure III. 4 : Angle d'attaque.	. 51
Figure III. 5 : Angle d'incidence.	. 51
Figure III. 6 : Géométrie de profile aérodynamique.	. 52
Figure III. 7 : Paramètre caractéristiques de l'aile.	. 52
Figure III. 8 : Profile symétrique et asymétrique.	. 54
Figure III. 9 : Riblets triangle aligne avec l'écoulement.	. 56
Figure III. 10:Profils de vitesse typiques pour les couches limites Laminaires et turbulentes	. 58

Figure IV. 1 : Les fluctuations de pour un écoulement turbulent et stationnaire.	61
Figure IV. 2 : Profil de vitesse dans une couche limite turbulente. []	69
Figure IV. 3 : Structure du code de calcul CFX-15.0.	71
Figure IV. 4 : Géométrie réalisée ICEM CFD 15.CFX	73
Figure IV. 5 : Maillage réalisée ICEM CFD 15.CFX	73
Figure IV. 6 : Maillage du rotor et stator de la turbine simple	74
Figure IV. 7 : Condition aux limites du rotor et stator de la turbine simple.	. 74
Figure IV. 8 : Maillage dans la région locale autour du profil aérodynamique et maillage sur la surface du	
générateur Vortex	75
Figure IV. 9 : Les dimensions et les conditions aux limites d'éolienne à la zone de freinage	. 76
Figure IV. 10 : Conditions aux limites de la géométrie importée de l'ICEM CFD 15.CFX par le module CFX	ζ-
pre	. 77
Figure IV. 11 : Configurations du problème	. 77
Figure IV. 12 : Conditions aux limites de la géométrie importée de l'ICEM	. 78
Figure IV. 13 : Contour de pression sur un plan défini par CFX-POST	79
Figure V. 1:Schéma du modèle d'aile et définition du système de coordonnées global.	. 81
Figure V. 2:Spécification des conditions aux limites.	. 82
Figure V. 3:Démontions de générateur de vortex (VG).	83
Figure V. 4:Comparaison des résultats CFD et des données expérimentales [17]	. 85
Figure V. 5: Comparaison des résultats CFD et des données expérimentales [17]. (Coefficient de trainée CD).	. 85
Figure V. 6:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de portance.	. 86
Figure V. 7:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de traînée	. 86
Figure V. 8: Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de force tangentielle de NACA 4415	. 86
Figure V. 9:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de portance	. 87
Figure V. 10:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de traînée	. 87
Figure V. 11:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de force tangentielle de NACA 4415.Effets	des
générateurs de vortex sur les coefficients de force tangentielle de NACA 4415	88
Figure V. 12:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de portance	. 88
Figure V. 13:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de traînée	. 88
Figure V. 14: Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de force tangentielle de NACA 4415	. 89
Figure V. 15:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de force tangentielle de NACA 4415 pour	
toutes les configurations	. 89
Figure V. 16:Contours de vitesse de Conf7 à différents angles de 15 ° et surface d'aspiration du profil	
aérodynamique lisse	. 90
Figure V. 17:Contours de vitesse de Conf7 à différents angles de 20 ° et surface d'aspiration du profil	
aérodynamique lisse	. 91
Figure V. 18:Contours de vitesse de Conf7 à différents angles de 25 ° et surface d'aspiration du profil	
aérodynamique lisse	. 91

Figure V. 19:Contours de vitesse de Conf7 à différents angles 30 ° et surface d'aspiration du profil	
aérodynamique lisse	92
Figure V. 20:Contours de vitesse de Conf8 à différents angles de 15 ° et surface d'aspiration du profil	
aérodynamique lisse	92
Figure V. 21:Contours de vitesse de Conf8 à différents angles de 20 ° et surface d'aspiration du profil	
aérodynamique lisse	93
Figure V. 22:Contours de vitesse de Conf8 à différents angles 25 ° et surface d'aspiration du profil	
aérodynamique lisse	93
Figure V. 23:Contours de vitesse de Conf8 à différents angles 30 ° et surface d'aspiration du profil	
aérodynamique lisse	94
Figure V. 24:Contour de vitesse pour la Conf.1 VGs	94
Figure V. 25:Contour de vitesse pour la Conf.2 VGs	94
Figure V. 26:Contour de vitesse pour la Conf.3 VGs	95
Figure V. 27:Contour de vitesse pour la Conf.4 VGs	95
Figure V. 28:Contour de vitesse pour la Conf.5 VGs	95
Figure V. 29:Contour de vitesse pour la Conf.6 VGs	95
Figure V. 30:Contour de vitesse pour la Conf.7 VGs	96
Figure V. 31:Contour de vitesse pour la Conf.8 VGs	96
Figure V. 32:Contour de vitesse pour la Conf.9 VGs	96
Figure V. 33:Contour de vitesse pour la Conf.10 VGs	96
Figure V. 34:Contour de pression pour la Conf.1 VGs	97
Figure V. 35:Contour de pression pour la Conf.2 VGs	97
Figure V. 36Contour de pression pour la Conf.3 VGs	97
Figure V. 37:Contour de pression pour la Conf.4 VGs	97
Figure V. 38:Contour de pression pour la Conf.5 VGs	98
Figure V. 39:Contour de pression pour la Conf.6 VGs	98
Figure V. 40:Contour de pression pour la Conf.7 VGs	98
Figure V. 41:Contour de pression pour la Conf.8 VGs	98
Figure V. 42:Contour de pression pour la Conf.9 VGs	99
Figure V. 43:Contour de pression pour la Conf.10 VGs	99
Figure V. 44:Plan 2D de la turbine tripale	101
Figure V. 45:Courbes des forces et du moment en fonction de $\lambda$	106
Figure V. 46:Coefficients de puissance numériques en fonction de vitesse spécifique	106
Figure V. 47:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 1$	107
Figure V. 48:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 2$	108
Figure V. 49:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 3$	108
Figure V. 50:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 1$	109
Figure V. 51:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 2$	109
Figure V. 52:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 3$	110

## Table des figures

Figure V. 53:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 4$	110
Figure V. 54:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 1$	111
Figure V. 55:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 2$	111
Figure V. 56:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 3$	. 112
Figure V. 57:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique $\lambda = 4$	. 112

### Liste des tableaux

Tableau IV. 1 : Coefficients de portance et de traînée à un nombre différent de générateurs de vortex	75
Tableau IV. 2 : Coefficients de portance et de traînée à un nombre différent de générateurs de vortex autour.	75
Tableau V. 1 Condition aux limites	82
Tableau V. 2 Caractéristiques de la turbine Darrieus a la zone de freinage avec et sans générateurs de	
vortex	83
Tableau V. 3 Configuration du générateur de vortex pour L'extrados	83
Tableau V. 4 Configuration du générateur de vortex pour L'intrados.	83
Tableau V. 5 Configuration du générateur de vortex pour l'extrados et l'intrados	84
Tableau V. 6 Caractéristiques de la turbine tripale Darrieus.	101
Tableau V. 7 Caractéristiques de la turbine tripale Darrieus avec générateurs de vortex	102
Tableau V. 8 Paramètre de calcul	103

# Nomenclature

### Acronymes

CFD	Computational fluid Dynamics	[]
DES	Detached Eddy Simulation	[]
HAWT	Eolienne à axe horizontal	[]
LES	Large Eddy Simulation,	[]
RANS	Steady Reynolds Averaged Navier Stokes	[]
VAWT	Eolienne à axe vertical	[]

### Symboles

α	Angle incidence	[rad]
θ	angle de rotation	[rad]
λ	Speed ratio	[/]
ω	Vitesse de rotation	[rad/s]
ρ	Density	$[kg/m^3]$
А	surface	[m <sup>2</sup> ]
С	Cord	[m]
Н	Hauteur	[m]
R	Rayon	[m]
$u_{\tau}$	Vitesse de frottement	[]
$\tau_{\omega}$	Contrainte de cisaillement	[/]
C <sub>P</sub>	Le coefficient de puissance	[/]
C <sub>T</sub>	Coefficient de couple	[/]
F <sub>D</sub>	Force de traînée	[N]
$F_L$	Force de portance	[N]
F <sub>N</sub>	Force normale	[N]
F <sub>T</sub>	Force tangentielle	[N]
C <sub>D</sub>	Coefficient de traînée	[/]
$C_{L}$	Coefficient de portance	[/]
V	Vitesse de vent	[m/s]
$y^+$	Distance adimensionnelle	[/]
$\Delta y$	Distance normale	[]
Ut	Vitesse parallèle	[]

### Introduction générale

La terre est un marbre merveilleux avec d'innombrables beautés dans sa nature, à partir de plantes, fleurs, arbres, oiseaux, et ainsi de suite aux merveilles sous-marines. Dans les temps anciens, quand le nombre de personnes était petit et ils ne l'ont pas bougé tellement, la pollution était limitée et le bois et le charbon brûlaient pas conduire à des changements perceptibles.

Malgré ce facteur, les forêts dans le plus zones peuplées ont progressivement disparu et aujourd'hui plus de forêts sont détruites tous les ans. Ajouté à cela, la pollution de la combustion du charbon, du pétrole et du gaz pour le chauffage, le transport, et la fabrication détruit lentement l'environnement, faisant l'air et l'eau sale, élevant la température de la planète, et dérangeant notre santé.

De nos jours, il y a plus de '14000 Gigawatts d'énergie par an consommés par l'humanité qui se base dans l'énergie fossile dont environ 32% proviennent du pétrole, 26% du charbon et 19% du gaz, soit 77% de combustibles fossiles non renouvelables' [1].

Maintenant, les alarmes ont commencé à sonner un appel de réveil pour l'action avant qu'il ne soit trop tard. Si nous ne prenons pas soin d'utiliser les ressources Sagement et maintenez l'équilibre, toutes les merveilles de la Terre prendront fin. Il est de notre responsabilité, en tant qu'habitants de cette planète, de le garder propre et en forme.

Le monde d'aujourd'hui nécessite l'accès à l'utilisation des nouvelles technologies qui pourront produire suffisamment d'énergie, mais sans désastre. Les nouvelles technologies sont des énergies amies avec la nature, 'les Energies Renouvelables'.

L'énergie renouvelable ou énergie verte est une innovation en plein essor qui réduit les coûts énergétiques et tient sa promesse d'un avenir plus propre et plus vert. L'énergie éolienne est l'une des cinq familles considérées comme renouvelables.

L'énergie éolienne est l'une des technologies d'énergie renouvelable dont la croissance est la plus rapide, où le processus utilise le vent pour produire de l'électricité. Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et le générateur peut convertir l'énergie mécanique en électricité. Il existe deux types d'éoliennes : les éoliennes à axe horizontal (HAWT) et les éoliennes à axe vertical (VAWT). Les HAWT sont le type d'éolienne le plus courant. Ils ont généralement deux ou trois longues pales minces qui ressemblent à une hélice d'avion. Les pales sont positionnées de manière à faire face directement au vent. Les VAWT ont des lames incurvées plus courtes et plus larges.

Cette thèse comprend quatre chapitres. Le premier chapitre aborde l'historique et les statistiques d'un marché mondiale sur la source inépuisable qui est le vent, ensuite une présentation de la Classification des éoliennes, en donnant des généralités sur son évolution, son utilisation, les différents types des aérogénérateurs ainsi que le potentiel aérodynamiques et en fin citation la carte graphique du vent de l'Algérie étalé sur une année.

Étude bibliographique d'une éolienne Darrieus dans le deuxième chapitre.

Troisième chapitre Présente la théorie des éoliennes avec son principe de fonctionnement et ses classifications, vient ensuite, les différents types des profils aérodynamiques et les caractéristiques physiques qui régissent leur fonctionnement. On autre coté les types des générateurs de vortex.

Quatrième chapitre présente la géométrie et maillage et les conditions aux limites des éoliennes et les nouvelles configurations étudié (les éoliennes avec des générateurs de vortex).

Le dernier chapitre de ce travail consiste à présenter ensemble des résultats obtenus aux simulations numériques effectuées sur les éoliennes et la validation des forces aérodynamique et le coefficient de puissance.

#### I.1. Introduction

Le vent est le mouvement de l'air entre les régions à haute pression et à basse pression dans l'atmosphère causée par le réchauffement inégal de la surface de la terre par le soleil. Lorsque l'air au-dessus des surfaces chaudes est chauffé, il s'élève, créant une zone de basse pression. L'air environnant les zones de pression supérieure s'écoule vers la zone de basse pression, créant du vent.

Aujourd'hui, seule une petite partie de l'électricité mondiale est générée par le vent. Cependant, la demande pour cette source d'énergie renouvelable continuera d'augmenter avec l'épuisement des combustibles fossiles. Alors que le monde continue à utiliser des ressources énergétiques non renouvelables, l'énergie éolienne continué à gagner en popularité. L'éolienne est la pierre angulaire de cette nouvelle technologie. [1]

L'éolienne c'est un dispositif qui transfère l'énergie mécanique en énergie électrique, dans ce premier chapitre nous donnerons une présentation générale des éoliennes et sa capacité. En premier lieux, nous définirons l'historique des éoliennes et statistique de capacité mondiale et classement des premier pays dans le monde, la deuxième partie sera consacrée à une présentation générale de type d'éolienne et le principe de fonctionnement. Dans la troisième, partie nous aborderons les carte graphique du vent en Algérie, et la production mondial et algérienne d'électricité éolienne.

#### I.2. Histoire de l'éolienne

Le vent et l'eau ont longtemps été deux sources d'énergie principales pour l'humanité. Depuis l'antiquité, Les moulins à eau et les moulins à vent ont été utilisés pour des applications telles que le broyage du blé et l'irrigation, où des animaux auraient sinon été utilisés comme source d'énergie. Avant l'invention des machines à vapeur et la conversion de l'énergie de la combustion du charbon et du pétrole, l'énergie éolienne était probablement le seul moyen de rendre possible le transport maritime à grande distance. Les premiers rapports sur les moulins à vent perses à axe vertical remontent à 1000 ans. Le célèbre moulin à vent hollandais, à axe horizontal, existe depuis le XIIe (12) siècle.

Depuis le 14éme siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. [2]

Aux Etats Unis, En 1850 les éoliennes ont été conçues de type rose du vent c'est une machine a axe horizontal avec un rotor multi pale, fonctionne pour pomper l'eau, En 1888, Charles Brush construit la première turbine de production d'électricité éolienne de grande taille avec un rotor de 144 pales (configuration de rosier de 17 m de diamètre, génératrice de 12 kW).[3] Au 20éme siècle, À l'année 1920 apparitions la première éolienne à axe vertical type Darrieus et après ça en 1956 construire une machine a axe horizontale avec un rotor de tripale.

La nouvelle ère d'intérêt pour les éoliennes pour la production d'électricité a commencé dans les années 1970. La crise pétrolière de 1972 a été une bonne stimulation. Les pays européens ont été plus touchés que les autres pays et ont accordé toute leur attention à cette source d'énergie renouvelable. Jusqu'en 1992, les éoliennes commerciales étaient beaucoup plus petites (225 kilowatts), mais en raison des progrès technologiques, à la fin de 2002, la taille des turbines avait été multipliée par 10. De plus en plus de parcs éoliens intérieurs et Pays européens, et en Amérique du Nord, l'attention portée aux énergies renouvelables a été rétablie. [4]

#### I.3. Statistique (marché mondiale)

Au cours des années 1990, l'énergie éolienne a décollé et s'est transformée en une industrie de plusieurs milliards de dollars. En 1997, 1,5 GW de nouvelle capacité a été installée dans le monde (capacité globale totale de 7,6 GW). À la fin de l'année 2000, 17,4 GW avaient été installés (3,8 GW de nouvelle capacité au cours de l'année). Cinq ans plus tard, en 2005, la capacité totale cumulée était maintenant de 59,1 GW avec une nouvelle capacité de 11,5 GW.



Figure I. 1 : Capacité globale annuelle installée 2001-2017. [5]

Les nouvelles installations ont connu une croissance rapide jusqu'en 2010. De 2009 à 2012, la croissance des nouvelles installations a ralenti et en 2013, l'industrie a connu une baisse spectaculaire et sans précédent de 9,2 GW (-21%) des nouvelles installations. L'effondrement des nouvelles installations a eu un impact majeur sur les ventes et les bénéfices des fabricants d'éoliennes et des développeurs de projets. L'industrie s'est rapidement rétablie en 2014 et a installé en 2015 une capacité record de 63,6 GW (432,7 MW au total).





En 2016, 64 GW de nouvelles installations étaient attendues, mais seulement 54,6 GW ont été installés, suivis d'une nouvelle baisse à 52,6 GW en 2017 (préliminaire). Selon le Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), le ralentissement est principalement dû à la transition vers une exploitation entièrement commerciale basée sur le marché, ce qui a laissé des vides politiques dans certains pays. En 2018, 60,9 GW de nouvelles installations sont attendues. Pour 2021, les prévisions pour les nouvelles installations sont de 75,3 GW et la puissance totale installée est de 810,5 GW. [5]

Ces chiffres quantifient les efforts effectués par plusieurs pays pour augmenter la part de production électrique via des énergies propres.

#### I.4. Classement

En 2017, La Chine est de loin la plus grande nation en termes de capacité installée (19,5 GW) et l'énergie totale (188,2 GW) représente près de la moitié de l'énergie totale du monde, ce qui en fait le sommet de ce classement. En deuxième position, les États-Unis affichaient 89,1 GW de

puissance éolienne totale fin 2017, devant l'Allemagne (56,1 GW), l'Inde (32,8 GW), l'Espagne (23,2 GW) et le Royaume-Uni (18,9 GW). [5]

En septième position, la France avec une capacité de 13,7 MW, et après, nous retrouvons Brésil et Canada avec respectivement 12.8% et 12.2% de la capacité mondiale. Et en dixième position de l'Italie avec 9,5 MW.



Figure I. 3 : capacité totale installée(MW) en 2017. [5]

Le graphique présenté ci-dessus fait apparaître les dix pays ayant les plus grandes capacités installées à la fin de l'année 2017.

Selon le Global Wind Energy Council (GWEC) et l'Energie Information Administration (EIA) des États-Unis, la capacité éolienne américaine a augmenté de 7,0 GW ou 8,6% en 2017.





Les fluctuations des installations renouvelables sur le marché américain sont un problème récent de la politique et des incitations. En février 2018, le GWEC publiait ses statistiques annuelles du marché et affirmait que «le vent est la technologie la plus compétitive sur de nombreux marchés, sinon la plupart, et l'émergence d'hybrides éolien / solaire, une gestion plus sophistiquée du réseau et un stockage de plus en plus abordable l'image de ce à quoi ressemblera un secteur de l'énergie totalement exempt d'énergie fossile.

#### I.5. Types des éoliennes

Le vent est causé par le chauffage inégal de la terre par le soleil, faisant du vent une source d'énergie renouvelable. Les éoliennes sont une source d'énergie alternative qui exploite l'énergie éolienne renouvelable naturelle propre et gratuite pour produire de l'électricité. Il existe deux principaux types d'éoliennes, l'axe horizontal et l'axe vertical. Il existe deux principaux types d'éoliennes en fonction de la configuration et du fonctionnement de leurs pales. Le premier type est l'éolienne à axe horizontal (HAWT).

#### I.5.1 Eoliennes à axe horizontale

Ce type d'éolienne est la plus courante et peut souvent être observé à travers le paysage dans des zones de terrain relativement plat avec des conditions de vent prévisibles toute l'année. Les HAWT sont installés au sommet d'une grande tour et disposent d'un ensemble de pales qui tournent autour d'un axe parallèle au sens de l'écoulement. Ces éoliennes sont le principal sujet de recherche sur les éoliennes depuis des décennies, principalement parce qu'elles partagent le même fonctionnement et la même dynamique que les aéronefs rotatifs.[1]

Les éoliennes à axe horizontale ont été inspirées des moulins à vent, leur axe de rotation horizontal vers le sol est presque parallèle à la direction du vent .ces éoliennes sont les plus utilisées dans les marchés mondiaux.

Elles sont généralement formées d'une seule, deux et trois pales qui tournent de façon aérodynamique pour la production d'électricité. Les turbines à une seul pale ne sont pas très populaire en raison de problème d'équilibrage et d'acceptabilité visuelle mais elles sont moins chères par apport les autres en raison des économies réalisées sur les matériaux des pales.

La plupart des éoliennes utilisées pour la production d'électricité sont les éoliennes des trois pales, elles sont stables car la charge aérodynamique sera relativement uniforme. Généralement elles montrent un coefficient de puissance relativement élevé, elles sont également plus solides et coutent moins cher à la fabrication. Elles captent au mieux l'énergie du vent et s'oriente seule vers la direction du vent. Par contre les éoliennes à axe horizontal nécessitent plus de maintenance dans la mesure où elles sont moins résistantes aux vents forts et elles font beaucoup de bruit.

La conception et la fabrication d'une pale HAWT sont complexes car la pale est effilée et torsadée avec des sections variables pour obtenir des performances aérodynamiques optimales.

Les éoliennes à axe horizontal comprennent essentiellement deux types, à savoir les éoliennes au vent et les éoliennes sous le vent.

#### a- Turbines au vent

Ces types d'éoliennes sont les plus couramment utilisés. Les HAWT au vent font face au vent, ce qui signifie que le vent atteint les rotors avant le mât. Par conséquent, les rotors ne souffrent pas du pare-vent derrière la tour, ce qui signifie un fonctionnement plus efficace ainsi qu'une moindre sensibilité à l'usure des rotors. Néanmoins, la nécessité du mécanisme de lacet ajoute au poids de la structure.

Un autre point concernant les types d'éoliennes au vent est que leurs rotors ne doivent pas être flexibles, afin qu'ils ne se plient pas et n'entrent pas en collision avec le mât lorsque la vitesse du vent est élevée. Pour éviter davantage de telles incidences, le rotor est placé à une certaine distance de la tour. Cela ajoute aux difficultés de fabrication de ces types d'éoliennes, et la rigidité plutôt des pales du rotor équivaut à nécessiter un matériau plus lourd pour la construction des pales.

#### **b-Turbines sous le vent**

Les éoliennes à axe horizontal sous le vent sont les types d'éoliennes les moins courants. Leur conception ressemble à peu près à celle des HAWT au vent, à l'exception de l'emplacement du rotor, qui est en aval de la tour ; le vent frappe le mât avant d'atteindre les pales. Cette configuration permet une plus grande flexibilité des pales du rotor et, par conséquent, un matériau plus léger peut être utilisé. Par conséquent, cette conception sert deux objectifs de poids structurel plus léger et une meilleure dynamique structurelle de la tour en enlevant une partie de la charge de la tour aux pales pendant leur flexion.

Les types d'éoliennes à axe horizontal sous le vent ne nécessitent théoriquement aucun mécanisme de lacet tant que les rotors et le boîtier sont conçus de manière à ce que le boîtier suive passivement la direction du vent. Le lacet passif de ces éoliennes ne serait pas un avantage pour les grandes éoliennes qui ont des câbles de mise à la terre attachés au boîtier.

Comme le rotor de ces types d'éoliennes est situé derrière en aval du mât, elles souffrent du parevent. L'ombre du vent induit non seulement des fluctuations de la quantité d'énergie produite, mais entraîne également une plus grande fatigue des types d'éoliennes sous le vent par rapport à leurs homologues sous le vent.



Turbine sous le vent

Turbine au vent

Figure I. 5 : type d'éolienne a axe horizontal.

#### I.5.1.1 composantes d'une éolienne à axe horizontal

Pour une éolienne à axe horizontal on a trois composantes principales : le rotor, la nacelle et la tour

#### Le rotor •

Est la partie tournant de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vont fort et régulière, il se compose des pales qui sont la partie très importante (le rendement et le bon fonctionnement dépend de leur conception). et du moyeu qu'est le point de raccordement entre les pales et l'arbre de la machine. Le rotor permet la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

#### La nacelle •

La nacelle étant le cœur de l'éolienne installée au sommet du mat, elle renferme tous les instruments essentiels à la conversion d'énergie notamment le multiplicateur, le système de freinage et la générateur, tableau de commande et l'arbre principale.

La tour (mat)

La tour est la pièce imposante de l'éolienne, est un gigantesque structure d'acier ou de béton qui supporte la nacelle et le rotor .elle est placé le plus haut possible car le vent est plus fort en hauteur et donc le rendement est plus important.

Un courant continue est produit en haut de l'éolienne, il est apporté en bas par des câbles passant par la tour et transformer en puissance alternative par un puissant transformateur.



Figure I. 6 : Composantes d'une éolienne à axe horizontal.

#### I.5.1.2 Principe de fonctionnement

La production d'électricité par une éolienne est utilisée par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Le vent fait tourner les pales, la différence pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique. Mettant en mouvement le rotor, permettant sa transformation en énergie mécanique.

Généralement les pales d'un éolienne axe horizontal extraient l'énergie du vent en générant une portance, ce qui crée un couple net autour de l'axe de rotation. Comme le couple est produit par la rotation lente mais les plupart des générateurs on besoin de tourner à grande vitesse pour produit de l'électricité, le multiplicateur est donc celui qui accélère le mouvement du rotor. L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique par le générateur. Pour accomplir cette tâche De manière efficace, en particulier pour les éoliennes à axe verticales de grande taille, des contrôleurs de tangage actifs permettent d'ajuster chaque pale de manière à maintenir un angle d'attaque optimal pour une extraction de puissance maximale pour une vitesse de vent donnée. Cette électricité ne peut pas être utilisée directement, le convertisseur est traitée l'électricité, après ça est augmentée par le transformateur. L'électricité est alors cheminée à traverse un câble, pour être injectée sur le réseau électrique puis distribuée au consommateur le plus proche. Cette électricité ne peut pas être utilisée directement, le convertisseur est traitée l'électricité, après ça est augmentée par le transformateur. L'électricité est alors cheminée à traverse un câble, pour être injectée sur le réseau électricité est alors cheminée à traverse un câble, pour être injectée sur le réseau électrique puis distribuée au consommateur le plus proche.



Figure I. 7 : Étapes de construire l'électricité.

#### I.5.2 Éoliennes à axe Vertical

L'éolienne à axe verticale est un appareil très simple qui se consiste d'une roue montée sur un axe. Les pales de l'éolienne tournant autour d'une tige positionnent verticalement .sous l'effet du vent, des aubes, solidaires de cette roue, se mettent en mouvement et produisent de l'électricité grâce au générateur. Elle peut capter des vents faibles et fonctionne quel que soit la direction du vent. L'éolienne à axe verticale est notamment indiqué pour les zone urbaines et demande moins d'espace, et le coût généralement moins chère, par contre elle produit moins d'électricité (le rendement est faible) et le problème de démarrage L'éolienne à axe verticale est un appareil très simple qui se consiste d'une roue montée sur un axe. Les pales de l'éolienne tournant autour d'une tige positionnent verticalement .sous l'effet du vent, des aubes, solidaires de cette roue, se mettent en mouvement et produisent de l'électricité grâce au générateur. Elle peut capter des vents faibles et fonctionne quel que soit la direction du vent.

L'éoliennes à axe verticales sont des appareils petits, silencieux, faciles à installer, peuvent supporter le vent faible et de quel que soit la direction du vent, et fonctionnent efficacement dans des conditions de vent turbulent. Le dispositif lui-même est relativement simple. Le composant principal en mouvement étant le rotor, les composants les plus complexes, tels que la boîte de vitesses et le générateur, sont situés à la base de l'éolienne. La fabrication d'un éolienne axe vertical est beaucoup plus simple qu'un éolienne axe horizontal en raison des lames à section transversale constante. En raison de la simplicité de leur processus de fabrication et de leur installation, les éoliennes à axe verticales sont parfaitement adaptées aux applications résidentielles.

Le rotor éolien à axe vertical, composé de plusieurs pales à section constante, est conçu pour obtenir de bonnes qualités aérodynamiques sous différents angles d'attaque. Contrairement à l'éolienne à axe horizontal où les pales exercent un couple constant autour de l'arbre lorsqu'elles tournent, une éolienne à axe vertical tourne perpendiculairement à l'écoulement, ce qui provoque une oscillation du couple autour de l'axe de rotation .Le fait que l'angle d'attaque local de chaque pale est fonction de son emplacement azimutal. Étant donné que chaque pale a un angle d'attaque différent à tout moment, le couple moyen est généralement recherché comme fonction objective. Cependant, les pales éoliennes à axe vertical sont conçues de manière à présenter de bonnes performances aérodynamiques tout au long d'une rotation aux différents angles d'attaque, conduisant à un couple moyen dans le temps élevé. Les éoliennes axe verticales se composent de deux types principaux, Darrieus et Savonius .L'éolienne Darrieus est un éolienne axe vertical qui tourne autour d'un axe central dû à la portance produite par les pales en rotation, alors qu'un Le rotor Savonius tourne en raison de la traînée créée par ses pales. [1]



Figure I. 8 : Modèle d'éolienne à axe vertical Darrieus et Savonius.

#### a-Turbines Savonius

La force qui fait tourner les turbines Savonius est la traînée, ce qui en fait des VAWT de type traînée. L'idée de leur conception est assez similaire à celle des anémomètres à coupelles.

Dans les anémomètres à coupelles, il y a toujours une coupelle face au vent qui subit le plus de traînée exercée sur sa surface, tandis que d'autres coupelles ont leurs autres surfaces de forme ronde et donc de réduction de la traînée face au vent. Ce qui se passe dans les types d'éoliennes Savonius suit la même logique. Il y a toujours une surface avec le plus de traînée tandis que d'autres subissent moins de force de traînée exercée sur elles.

Le point important à propos de cette conception est qu'elle tournerait quelle que soit la direction dans laquelle le vent souffle. Ces types d'éoliennes fonctionnent également très bien avec des vents à faible vitesse, sont faciles à fabriquer et à entretenir et fonctionnent bien dans des vents turbulents. Malgré ces avantages, cette conception est très inefficace. C'est parce que les forces de traînée favorables et défavorables ne sont pas si différentes les unes des autres, et par conséquent, la vitesse de rotation ne serait pas si élevée.

Ces types d'éoliennes peuvent démarrer automatiquement en raison du couple élevé généré, mais leur faible régime signifie qu'il ne peut pas y avoir beaucoup d'énergie électrique produite au niveau du générateur. Par conséquent, ils ne peuvent pas être utilisés pour la production d'électricité à grande échelle et ne pourraient être utiles que pour des applications à petite échelle où d'autres types d'éoliennes ne pourraient pas fonctionner aussi bien. Il y a ces conceptions de turbines Savonius torsadées qui ont de longues écopes hélicoïdales qui génèrent un couple en douceur qui pourraient être utilisées sur les toits.



Figure I. 9 : Modèle d'éolienne à axe vertical Savonius.

#### **b-Turbines Darrieus**

Contrairement aux éoliennes Savonius, les éoliennes Darrieus sont des VAWT de type portance, dans lesquelles l'idée de production de portance des profils aérodynamiques a été mise en œuvre. Ces types d'éoliennes sont le type d'éoliennes à axe vertical le plus largement utilisé pour la production d'électricité avec des pales courbes, en forme de C, qui vont du haut de la tour au bas où elles sont connectées à l'arbre du générateur. Ils ont une bonne efficacité car ils tournent à des vitesses plus élevées qui pourraient générer plus de puissance.

Ce régime plus élevé s'accompagne d'un couple inférieur à un niveau qui nécessite une source externe de mécanisme de démarrage pour ces types d'éoliennes, comme une autre éolienne Savonius qui amènerait la vitesse de rotation à un niveau où les pales Darrieus pourraient "prendre le volant". . Ils souffrent également d'ondulations de couple, qui sont une augmentation et une diminution périodiques du couple généré, et donc des contraintes périodiques sur la structure de la tour. Les éoliennes Darrieus à trois pales ne souffrent pas de ce problème d'ondulation de couple.



Figure I. 10 : Différents types de rotor cylindrique Darrieus.



Figure I. 11 : hydrolienne à axe vertical.



Figure I. 12 : Parc d'une éolienne à axe vertical.



Figure I. 13 : Éolienne à axe vertical Rotor parabolique.

#### c-Cycloturbines

Les cycloturbines ressemblent beaucoup aux éoliennes Giromill et sont en fait une variante des éoliennes Giromill qui sont en quelque sorte un type hybride d'éoliennes à axe vertical. La raison en est que leurs pales à profil aérodynamique sont du type à pas variable. Lorsque le vent n'est pas assez rapide, ce qui est principalement le cas lors du démarrage de l'éolienne, les pales sont inclinées contre le vent d'une manière similaire à l'idée des éoliennes Savonius pour produire le plus de traînée et de couple pour faire un auto-démarrage éolien.

Lorsque la turbine atteint un régime spécifique, les pales changent de pas afin de produire plus de portance plutôt que de traînée pour amener le régime à des niveaux encore plus élevés, comme c'est le cas pour les éoliennes Darrieus. Aussi intéressant que cela puisse paraître d'avoir un VAWT aussi efficace et flexible, il est clair que leur conception et leur fabrication sont plus compliquées que les autres conceptions, ce qui les rend coûteux, et aura plus de composants, et donc, sont plus lourds avec plus d'exigences de maintenance.

#### d-Turbines Giromill

Les éoliennes Giromill sont inspirées des turbines Darrieus. Ces types d'éoliennes sont donc des VAWT de type ascenseur avec des pales verticales droites au lieu de courbes. Les éoliennes Giromill ne démarrent pas automatiquement comme les éoliennes Darrieus et peuvent ne pas avoir une vitesse de rotation constante. Par conséquent, elles ne sont pas aussi efficaces que les turbines Darrieus. Néanmoins, ils sont moins chers, plus faciles à fabriquer et peuvent bien fonctionner dans des vents turbulents.

![](_page_31_Picture_5.jpeg)

Figure I. 14 : Modèle d'éolienne à axe vertical Giromill.

#### I.6. Carte graphique des vents en Algérie :

L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les plus importantes avant une éventuelle d'un parc d'éolienne .Pour cela, il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement de l'atlas éolienne de la région.

On peut citer quelques travaux effectués pour tracer la carte des vents en Algérie en 2000, trace la première carte graphique des vents par Kasbadji Merzouk [6] en utilisant les données répertoriées en1990 par Hammouch [7]. La modification de la carte en 2006 par le même auteur ksbadji [8] dans sa thèse de doctorat. En 2011, Chellali et all [9], ont contribué à l'actualisation de la carte des vents en utilisant 37 point de mesure à travers le pays.

La Carte graphique des vents actuelle utilisée à partir de l'établissement des cartes des vents (atlas des vents) en Algérie est celui publiée par S.Boudia [10] dans sa thèse de doctorat en 2013. Il a travaillé avec 63 points de mesure à l'intérieur du pays, en ajoutant 24 stations présentent dans les pays voisins à proximité des frontières.

Dans l'étude annuelle, il a présentée deux cartes des vents, la première comprenant uniquement les 63 points de mesure en Algérie et une deuxième avec 87 stations. Par ailleurs, l'ensemble des données utilisées dans son travail sont des vitesses moyennes journalières pour les 87 sites étudiés.

En 2017, Rahmouni et all [11], ont tracés une carte graphique des vents, en utilisant les données de Boudia 2013. La carte des vents dans cette section a été réalisée avec le logiciel Gis [12], la carte annuelle des vents d'Algérie, à une hauteur de 10 m, est présentée dans la Figure suivante.

![](_page_32_Figure_6.jpeg)

Figure I. 15 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire horizontale globale en Algérie. [11]

À partir de la carte, la vitesse moyenne du vent en Algérie varie de 1,6 m / s à 6,3 m / s, et Les vents les plus forts enregistrés sont: 6,3 m / s pour la région d'Adrar, 6,1 m / s pour Hassi-R'mel et 6 m / s pour la région de Tindouf.

Les régions venteuses sont situées dans les régions du sud-ouest et à Tiaret, Borj-Baji Mokhtar, Djelfa et Biskra. La vitesse moyenne du vent dans la région côtière est d'environ 4 m / s.

La vitesse la plus basse de 1,6 m / s a été observée pour la région de Tizi-Ouzou (région nord). Ainsi, pour la région de Maghnia (région du nord-ouest), en été remarqué que le potentiel du vent est inférieur à 1,4 m / s. [11].

#### I.7. Production mondial d'électricité éolienne

Année après année, la production d'énergie éolienne dans le monde augmente. En trois années dernières, l'électricité passant de 396.9 GW à 539.6 GW [5]. La capacité installée éolienne a augmenté de 170 GW de 2014 à 2017 (figure 2). Récemment Les principaux pays du monde qui produisent l'électricité par les éoliennes sont la chine, les Etat unis qui sont devenus les pays qui possèdent la plus grande capacité éolienne installée, précèdent l'Allemagne et l'Espagne qui restent ce pendant les pays disposant de la plus grande puissance éolienne avec l'Inde. Ces chiffres quantifient les efforts effectués par plusieurs pays pour augmenter la part de production électrique via des énergies propres.

#### I.8. Production algérienne d'électricité éolienne

Les effets négatifs des énergies fossiles sur la terre ont poussé le monde de proposer une autre énergie propre et renouvelable comme l'énergie solaire, éolienne ...etc., pour la production d'électricité. L'énergie renouvelable en Algérie permettre de diminuer la part de l'énergie fossile qui est actuellement la principale ressource pour la production d'électricité du pays. En Algérie l'utilisation d'énergie renouvelable en précise l'énergie éolienne est fable par rapport les pays voisins surtout le Maroc.

La première éolienne installée en Algérie dans la zone d'Ouled-Aïssa pendant les années 50 durant la période coloniale, un aérogénérateur de 100 KW avec l'ingénieur français Andreau. En 2014, l'Algérie inaugure sa première ferme d'éolienne d'une capacité de 10 MW à la zone de Kaberkéne à la wilaya d'Adrar, la ferme constitué de 12 éolienne type Gamesa G52 chaque éolienne à trois pales d'une longueur 26 m, la hauteur de Mat 55 m et la puissance unitaire d'éolienne est de 850 kW [13].

![](_page_34_Picture_2.jpeg)

#### Figure I. 16 : Champ éolienne d'Adrar Kaberkéne.

L'Algérie a lancé un programme de développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable entre la période de 2015 jusqu'a 2030 pour produit une capacité de 22 000 MW [14]. Le programme a été devisé en deux phases : La première phase (2015-2020), cette phase doit atteindre une capacité de 3000 MW d'énergie solaire, 1010 MW pour l'éolienne et 500 MW pour les autres énergies [15]. la deuxième (2021\_2030) , le développement de la liaison électrique nord-Sahara permettre l'installation de grande centrales d'énergie renouvelables dans les zones d'Ain Salah , Adrar , Timimoune et Bechar, pour créer une capacité éolienne de 4000MW [15].

#### I.9. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons passé en revue les principales caractéristiques de l'éolienne. Nous avons défini les premières éoliennes dans le monde et les capacités mondiales d'électricité pendant des années. Une autre partie de ce chapitre consiste à étudier les types d'éoliennes verticales et horizontales et a commencé à produire de l'électricité et l'emplacement de cette énergie par l'Algérie. Ce chapitre va nous permettre dans un premier temps d'avoir une bonne connaissance des éoliennes.

#### **II. 1 Introduction**

Le monde d'aujourd'hui a besoin d'accéder à l'utilisation de nouvelles technologies capables de produire suffisamment d'énergie, mais sans catastrophe. Aujourd'hui, l'humanité consomme plus de 14 000 gigawatts d'énergie chaque année, dont environ 32% de pétrole, 26% de charbon et 19% de gaz et 77% de combustibles fossiles non renouvelables [16]. Des défis sont lancés pour produire de l'énergie propre; une énergie respectueuse de la nature et surtout renouvelable parmi les sources d'énergie renouvelables, l'éolien terrestre est l'un des plus intéressants en raison de son faible coût de maintenance des systèmes installés. Il existe deux types d'éoliennes: les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical. Bien que le concept d'éoliennes à axe vertical ait été proposé par Darrieus [17] dès 1931, la recherche et le développement dans ce domaine présentent toujours un intérêt et sont en cours. Parmi les différentes catégories d'éoliennes, les petites éoliennes ont de plus en plus d'intérêt pour leur excellente adaptabilité à l'environnement urbain en termes d'impact visuel et de pollution sonore. Parmi les différentes catégories d'éoliennes, les petites éoliennes ont de plus en plus d'intérêt pour leur excellente adaptabilité à l'environnement urbain en termes d'impact visuel et de pollution sonore. Ce sont des turbines qui répondent bien aux changements de direction du vent. Afin de déterminer les performances du VAWT, des approches analytiques et numériques ainsi que des tests expérimentaux sont généralement utilisés.

#### II. 2 Étude bibliographique

SANTANU Misra et al [18], ont présent une analyse numérique d'une éolienne Darrieus à axe vertical à cinq pales (Naca 0018) et compare par des résultats expérimentaux. L'analyse est caractérisée à l'aide d'une modélisation de la turbulence k-ɛ réalisable, qui permet de prédire la performance de la turbine avec plus de précision que celle du résultat expérimental. L'analyse statique démontre que les performances de démarrage ou la génération de couple initiale de la turbine à partir des courbes de portance et de traînée obtenues. La valeur de crête maximale est obtenue avec un rapport de vitesse de pointe plus élevé, ce qui implique que NACA 0018 ne démarre pas automatiquement à faible vitesse de pointe, la portance étant fortement assurée par deux pales lors d'une rotation complète. On observe une dégradation graduelle de la valeur de Cp à mesure que la vitesse de pointe augmente, mais une baisse constante est observée avec celle de trois pales avec une augmentation de la vitesse de pointe. Finalement, un couple remarquablement positif sera maintenu tout au long de la rotation d'une turbine à cinq pales, avec un rapport de vitesse
compris entre 2.5 et 4, indique également que la turbine fonctionne bien avant les turbines à trois pales.



Figure II. 1 : Dimensions et conditions aux limites du domaine de la soufflerie. [18]



Figure II. 2 : Comparaison des tracés de traînée d'analyse statique expérimentale et numérique sur chaque profil aérodynamique à différents angles azimutaux. [18].



Figure II. 3 : Comparaison des tracés de portance d'analyse statique expérimentale et numérique sur chaque profil aérodynamique à un angle azimutal différent.[18].



Figure II. 4 : Courbe de performance d'une turbine H-Darrieus à cinq pales

#### versus TSR. [18]

Amet et al [19], ont présent une analyse numérique bidimensionnelle détaillée sur les phénomènes physiques se produisant lors du décrochage dynamique d'une éolienne Darrieus.

L'écoulement est particulièrement complexe car, à mesure que la turbine tourne, l'angle d'incidence et le nombre de Reynolds d'aubes varient, ce qui provoque des effets instables dans le champ d'écoulement. À faible rapport de vitesse de pointe, un décrochage dynamique profond se produit sur les lames, ce qui entraîne de grandes boucles de soulèvement et de traînée d'hystérésis (effets principaux). Par ailleurs, le rapport de vitesse de pointe élevé correspond aux couches limites fixées sur les pales (effets secondaires). L'efficacité optimale se situe dans la plage médiane du rapport de vitesse de pointe, où cohabitent les effets primaires et secondaires. Pour prouver la capacité de la modélisation à gérer la physique dans l'ensemble des conditions de fonctionnement, nous avons choisi de considérer deux rapports de vitesse de pointe (2 et 7), le premier dans la région d'effet primaire et le second dans région d'effet secondaire. L'analyse numérique est effectuée avec un code TURBFLOW RANS k code RANS compressible et explicite, dans une configuration de maillage structuré multi bloc. Les sensibilités du pas de temps et du raffinement de la grille sont examinées.



Figure II. 5 : Maillage. [19]



Figure II. 6 : Influence des itérations internes sur le coefficient de portance au début du décrochage dynamique. [19].



Figure II. 7 : Coefficient de traînée du rotor. [19].



Figure II. 8 : Performances typiques du rotor Darrieus CP en fonction du rapport de vitesse de pointe. [19].

Francesco Balduzzi et al [20], ont procédé à une évaluation critique de la pertinence énergétique l'installation d'une éolienne à axe vertical type Darrieus sur le toit d'un immeuble situé dans une ville européenne. Le module de vitesse d'écoulement et la direction ont été calculés pour différents profils de vent venant en sens inverse et comparés à leur niveau dans le vent non perturbé. Sous l'hypothèse de la distribution de Rayleigh du vent qui souffle, les résultats ont été projetés dans les distributions de vent disponibles nettes sur le toit de chaque bâtiment. Enfin, les résultats des simulations CFD et du nouveau modèle de turbine ont été combinés dans une analyse de faisabilité comparative d'une turbine H-Darrieus de taille moyenne dans l'environnement bâti.

Une analyse numérique détaillée a été introduite dans ce travail par Hafiz et al [21] pour améliorer les performances globales d'une éolienne Darrieus. Une comparaison a été faite entre les outils de maillage ANSYS Workbench et Gambit pour la modélisation numérique est effectué pour résumer une séquence numérique finale des performances du rotor Darrieus. Ensuite, cette séquence de modèle est appliquée à différents profils aérodynamiques pour obtenir les meilleures performances. Les résultats montrent que la précision du maillage ANSYS Workbench est améliorée en utilisant le modèle SST K-oméga, mais n'est pas recommandée pour les autres modèles de turbulence. De plus, cette procédure CFD est utilisée dans le présent papier pour évaluer les performances de la turbine avec différentes formes de pales aérodynamiques. Les résultats ont introduit de nouvelles formes pour cette turbine, avec un rendement supérieur de 10% à celui des pales classiques.



Figure II. 9 : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse de pointe pour les 25 sections de pale Considérées. [21]

Le contexte général de la thèse de Ane Menchaca Roa [22] est celui des énergies renouvelables au sein du programme HARVEST initialisé au laboratoire LEGI, qui consiste à développer une hydrolienne de type Darrieus . le hydrolienne peut être équipé d'un dispositif de canalisation qui permet de transformer une plus grande quantité d'énergie cinétique contenue dans le flux en électricité. Le présent travail est focalisé sur les dispositifs de canalisation. Les études portent sur trois thèmes principaux : l'explication du fonctionnement hydrodynamique du dispositif de canalisation.

L'évaluation des performances du hydrolienne enveloppé et la mise en évidence des paramètres géométriques du système qui permettent son amélioration ou son optimisation. Toutes les études ont été réalisées par des calculs RANS 2D et des données expérimentales disponibles, et ont été comparées aux résultats du hydrolienne non carénée.



Figure II. 10 : Schéma du domaine de calcul de l'hydrolienne libre en milieu infini. [22]



Figure II. 11 : distribution du coefficient de puissance en fonction du paramètre d'avance pour l'hydrolienne libre en milieu infini. [22]



# Figure II. 12 : distribution cartésienne du coefficient de couple instantané au point de fonctionnement optimal. [22]

Une étude numérique et expérimentale a été réalisée par ZHen et all [23], en utilisant différents emplacements, espacements et configurations de formes (de générateur de vortex) dans le sens du courant pour obtenir les paramètres optimaux de VG passive dans l'amélioration des performances aérodynamiques de l'aile d'Aludra avec profil aérodynamique NACA4415. Dans cette étude, ils ont simulé par le code fluent avec un modèle de turbulence Spalart-Allmaras. La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques révèle un accord satisfaisant. L'étude paramétrique montre que le coefficient de portance maximal plus élevé a atteint lorsque les VG sont placés plus près du point de séparation. De plus, une distance dans le sens de l'envergure plus courte entre les VG augmente également le coefficient de portance maximal. Les VG rectangulaires et à bords courbes offrent de meilleures performances que les VG triangulaires.



Figure II. 13 : Aile composite en fibre de verre avec différentes configurations VG. [23].







#### Figure II. 15 : coefficient de trainé. [23]

Des tests expérimentaux peuvent être réalisés au moyen d'une mesure en soufflerie ou en champ libre afin d'évaluer les performances réelles des éoliennes. Sheldahl [24] a testé une batterie Darrieus VAWT de 2 m de diamètre avec des pales pour voilure NACA-0012 sur le terrain aux laboratoires Sandia National et l'a utilisée pour déterminer si les données obtenues lors de ces tests étaient comparables à celles obtenues en soufflerie dans des conditions idéales. Bedon et al. [25] décrivent les résultats d'une campagne expérimentale de mesures effectuées sur un VAWT à pale hélicoïdale de rayon 1 m avec une section à profil aérodynamique NACA-0018, testé en champ libre. Avec l'avènement des ordinateurs, de nombreux auteurs ont étudié la faisabilité et la précision de différentes approches de la dynamique des fluides numériques (CFD). Les enquêtes analytiques et numériques ont été menées par Biadgo et al. [26] sur VAWT à lame droite utilisant NACA0012 comme profil de lame. L'investigation analytique est réalisée à l'aide du modèle double-multiple streamtube, tandis que l'investigation numérique d'un écoulement instationnaire à deux dimensions est réalisée à l'aide de CFD.

Normunds Jekabsons et all [27] concentre sur une étude numérique et expérimentale de la performance aérodynamique de la turbine de type Darrieus à pales droites, l'une des éoliennes à axe vertical les plus courantes. Le but de la recherche est d'évaluer les paramètres caractéristiques de conceptions de turbines applicables dans la pratique à l'aide d'outils de dynamique des fluides numériques (CFD). Plusieurs constructions de rotors d'éoliennes assemblés à partir de profils aérodynamiques symétriques NACA0015 à trois ou six pales ont été étudiées numériquement. Les calculs d'écoulement turbulent bidimensionnel et

tridimensionnel autour du VAWT ont été effectués en utilisant l'approche de Navier-Stokes à moyenne de Reynolds unsteady. Une approximation en volume fini des PDE et de la solution a été réalisée avec la version étendue de la boîte à outils Open Source CFD OpenFOAM. La rotation du rotor de l'éolienne a été réalisée par l'interface généralisée (GGI), qui utilise une interpolation pondérée pour évaluer et transmettre les valeurs de débit à travers une paire de limites couplées conformes ou non conformes entre les domaines stationnaires et tournants. Flow a été modélisé comme incompressible. La comparaison des paramètres de performance globale de la turbine a été étudiée au moyen de mesures expérimentales et de simulations numériques. Les tendances caractéristiques du couple en fonction de la vitesse du vent libre et de la fréquence de rotation du rotor ont été obtenues.

Des analyses numériques ont été effectuées par Casetelli et all [28] afin de comprendre l'effet du nombre de pales sur le comportement d'une éolienne à axe vertical à lames droites. À cette fin, des analyses CDF bidimensionnelles ont été effectuées sur un rotor de type Darrieus à lames droites. Après avoir décrit le modèle de calcul, une campagne complète de simulations basées sur des calculs instables RANS complets a proposé pour une architecture de rotor à trois, quatre et cinq pales caractérisées par un profil NACA 0025. Pour chaque configuration de rotor a proposé les caractéristiques du champ d'écoulement sont étudiées à différentes valeurs du rapport de vitesse de pointe, permettant ainsi de quantifier l'influence du nombre de pales sur les caractéristiques géométriques de l'écoulement et les grandeurs dynamiques, telles que le couple et la puissance du rotor.

Enfin, les courbes de couple et de puissance sont comparées pour les architectures analysées, ce qui permet de quantifier l'effet du nombre d'aubes sur les performances globales du rotor.



Figure II. 16 : Coefficient de couple instantané d'un seul profil aérodynamique en fonction de coordonnée azimutale, rapport optimal de vitesse de pointe ( $\lambda$ =2,58 pour N=3,  $\lambda$  =2,33 pour N=4,  $\lambda$ =2,04 pour N=5). [28]



Figure II. 17 : Coefficient de couple en fonction de la position angulaire de pale n°1 (période unique tracée), rapport de vitesse de pointe optimal ( $\lambda$ =2,58 pour N=3,  $\lambda$ =2,33 pour N=4,  $\lambda$ =2,04 pour N=5). [28].



Figure II. 18 : Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse de pointe. [28]

Qing et all [29] a tenté de compiler les principaux modèles aérodynamiques utilisés pour la prévision des performances et la conception d'éoliennes à axe vertical.

Premièrement, les modèles de moment cinétique (spécifiés en tant que modèle de rotor et de modèle Streamtube) reposent essentiellement sur le calcul de la vitesse d'écoulement à travers la turbine en assimilant la force aérodynamique au niveau du flux des aubes au taux de variation du débit d'air, qui correspond au changement global. En vitesse multiplié par le débit massique. Ensuite, selon cette théorie le vélocimètre laser Doppler (LDV) a été utilisé pour

étudier l'écoulement instable bidimensionnel autour de l'éolienne à axe vertical à trois rapports de vitesse de pointe différents en soufflerie.

Afin de dégager les caractéristiques de la courbe du coefficient de puissance, la distribution de pression à la surface des aubes de rotor a également été mesurée pendant la rotation.

En comparant les résultats, en concluant que le coefficient de puissance calculé à partir de modèles de moment est en bon accord quantitativement avec les données expérimentales, sauf lorsque la lame a un rapport de vitesse de pointe élevé.

Taher et all [30] dans leur article ont passé en revue certains paramètres, tels que le nombre des pales et la longueur des cordes, qui influent sur l'efficacité des éoliennes Darrieus droites. À cette fin, douze modèles créés avec un nombre différent de pales et de longueurs de corde de pales pour étudier leur effet sur les performances de l'éolienne Darrieus. Des analyses bidimensionnelles informatisées de la dynamique des fluides ont été effectuées sur un rotor de type Darrieus à lames droites.

Il a été conclu qu'un plus grand nombre de pales permettait d'atteindre le coefficient de puissance maximal pour les vitesses angulaires inférieures, mais était pénalisé autant que l'efficacité est importante. L'effet combiné de la force radiale aérodynamique et de la force centrifuge sur le comportement structurel de l'aube devrait être étudié à l'avenir.



Figure II. 19 : Discrétisation simple du maillage 2D d'une éolienne à axe vertical. [30]

Jae-Hoon et son groupe [31], ont mené une étude visant à comprendre les performances et la forme des caractéristiques de la turbine à air spirale Savonius avec différents angles hélicoïdaux.

Le coefficient de puissance à différents rapports de vitesse de pointe et le coefficient de couple à différents azimuts pour des angles de pales hélicoïdales de 0 °, 45 °, 90 ° et 135 ° ont été observés dans les conditions d'une surface de projection et d'un rapport de forme constante. Les résultats numériques discutés dans cet article ont été obtenus en utilisant un modèle Navier Stokes moyen de Reynolds instationnaire et incompressible. Une analyse numérique à l'état instable a été utilisée pour examiner les caractéristiques d'écoulement par paliers de 1 °, de 0 ° à 360 °.

En outre, une expérience a été réalisée dans une soufflerie à grande échelle et les résultats ont été comparés à ceux de l'analyse numérique. Le Cp, max est apparu à un angle de torsion de 45 ° C, alors qu'il a diminué de 25,5% à 90 et 135 ° C. En ce qui concerne les valeurs de CT à différents azimuts, les résultats ont montré que les valeurs de pic à pic dans les profils pour 90 ° et 135 ° étaient inférieures à celles de 0 ° et 45 °.



Figure II. 20 : Domaines généraux des conditions aux limites et internes utilisés dans l'analyse numérique. [31]



Figure II. 21 : Génération et distribution de maillage autour de VAWT. [31]



Figure II. 22 : Angle de torsion de 0° et 90°. [31].



Figure II. 23 : Angle de torsion de 45° et 135°. [31]

La simulation numérique était devenue une méthode attrayante pour mener des recherches sur la conception de structures et la prévision de performances aérodynamiques d'éoliennes à axe vertical à lames droites, Comme ce que Zhang et all [32] a fait dans leur article. Sur la base du modèle CFD bidimensionnel actuel, une série d'enquêtes systématiques ont été menées pour analyser les effets du domaine de calcul, du numéro de grille, de la grille proche du mur et du pas de temps sur la précision de la prédiction. Des efforts ont ensuite été consacrés à la prévision et à l'analyse du champ d'écoulement global, de la performance dynamique des aubes et de ses forces aérodynamiques. Les résultats calculés concordent bien avec les données expérimentales et démontrent que le modèle turbulent RNG k-est excellent pour des forces aérodynamiques mais avec une valeur estimée élevée du coefficient de viscosité de la turbulence. En outre, la force tangentielle calculée dépend davantage de la grille près du mur et la précision de la prévision est médiocre dans la région avec décrochage

dynamique grave. De plus, les pales subissent des décrochages légers et profonds avec un faible rapport de vitesse de pointe. Le vortex de séparation du bord d'attaque et son déplacement à la surface portante ont donc un impact significatif sur les performances aérodynamiques.



Figure II. 24 : Structure maillée du domaine de calcul 2D de S-VAWT. [32].



Figure II. 25 : Analyse comparative du coefficient de force tangentielle de 3D et 2D pour S-VAWT. [32].



Figure II. 26 : Courbes du coefficient de force tangentielle instantanée de S-VAWT à différents pas de temps. [32].



Figure II. 27 : Coefficient de puissance moyen du S-VAWT tripale à divers TSR. [32]

Wolfe et al. [33] utilisent la méthode CFD pour étudier les performances aérodynamiques bidimensionnelles d'ailes d'aérogénérateurs typiques avec le modèle de turbulence standard K-ε [34], en concluant que ce modèle n'est pas adapté aux angles d'attaque avec séparation des écoulements.

La simulation numérique de Jean-Jacques Chattot [35] peut être utiliser pour analyser et concevoir des éoliennes modernes dans des régimes où le flux est lié. Une grande partie du travail a été développée sous l'impulsion de General Electric, dont le soutien est vivement apprécié. Le développement ultérieur du modèle vortex inclut son couplage avec un modèle structural à pales permettant de réaliser des études d'aéroélasticité.

L'analyse comparative de différentes formes de générateur de vortex est l'objectif principal de l'article de Vasantha Kumar et all [36]. Ils avont pris différentes formes comme des formes rectangulaires, triangulaires et gothiques pour l'analyse comparative et les résultats basés sur un angle d'attaque différent à 0 ° et à 10 °. Cette étude détaillée est réalisée sur le profile aérodynamique symétrique NACA 0012. La traînée aérodynamique est principalement due à la séparation des écoulements près de l'arrière de l'objet aérodynamique. Différents modèles, qui sont conçu par Conception assistée par ordinateur dans le logiciel CATIA V5. Les valeurs de force de traînée peuvent être obtenues en utilisant Ansys CFX. Selon leur analyse, le générateur de vortex de forme triangulaire donne une force de traînée minimale et retarde également la séparation du flux en augmentant la vitesse près de la surface.

L'article de Qing'an Li et all [37] se concentre sur l'évaluation des forces aérodynamiques en fonction de plusieurs nombres de pales dans une expérience en soufflerie. Dans la présente étude, la pale d'essai de la pale est une pale à symétrie de NACA 0021 et le nombre de pales est de deux à cinq. La pression agissant sur la surface de la pale du rotor est mesurée pendant la rotation par des dispositifs de pression multiports et transmise à un système stationnaire via un réseau local sans fil. Et ensuite, les forces aérodynamiques (force tangentielle, force normale et autres) sont discutées en fonction de l'angle d'azimut, ce qui permet une analyse quantitative de l'effet du nombre d'aubes. Enfin, les charges sont comparées aux données expérimentales de la balance à six composants. En conséquence, il est précisé que le coefficient de puissance diminue avec l'augmentation du nombre de pales. En outre, l'énergie éolienne absorbée par le vent dépend principalement de la région amont de l'angle d'azimut  $\theta = 0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ . De cette manière, ces résultats sont très importants pour le développement d'équations de conception simples et d'applications pour la VAWT à lames droites.

L'analyse de la performance présentée dans l'article de Paraschivoiu et all [38] montre que la forme de Sandia est une bonne approximation de la forme téléchargée par troposkien sans effets de gravité. Toutefois, pour le grand rotor Darrieus, il est recommandé de choisir la forme du rotor en fonction de l'effet du champ gravitationnel sur la pale. En ce qui concerne la section de la lame, une lame symétrique NACA 0015 peut être utilisée dans la plupart des cas car elle présente l'avantage de présenter des caractéristiques de décrochage plus favorables. Cependant, un NACA 0018 devrait être utilisé pour la grande turbine Darrieus pour des raisons structurelles.

Une autre amélioration est l'incorporation de l'effet de décrochage dynamique dans le modèle DMS, car il résulte une grande différence dans les forces locales, en particulier à des rapports de vitesse de pointe faibles. Un compromis peut être obtenu en utilisant un modèle hybride combinant la simplicité de la méthode double flux multiple avec des modèles vortex pour prédire à la fois les forces aérodynamiques et les performances de la turbine Darrieus à axe vertical.

L'étude de M. Douak [39] a pour objectif de reconsidérer le rotor de Darrieus afin d'optimiser une conception qui augmentera son couple de démarrage.

L'étude du système de surveillance et de contrôle de l'angle d'attaque du profil d'aube, qui permet un démarrage automatique pour des vitesses de vent aussi basses que possible, est présentée pour l'aube droite de la turbine Darrieus. L'étude continue à s'étendre à d'autres configurations, notamment de type parabolique. La hauteur du rotor n'affecte pas le coefficient de puissance car il apparaît dans les expressions de la puissance produite et de la puissance.



Figure II. 28 : Couple en fonction de λ pour la lame fixe et inclinée.[39]



Figure II. 29 : Couple versus RPM pour différentes solidités vitesses du vent. [39]



Figure II. 30 : Comparaison du coefficient de puissance pour le rotor à pales fixes et inclinées. [39]



Figure II. 31 : Coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$  pour différentes valeurs de solidité [39].

Dans l'article de Seyed Mohammad et all [40], l'aérodynamique de la turbine éolienne à axe vertical à rotor H (VAWT) a été étudiée à l'aide de la dynamique des fluides numérique via deux modèles de turbulence différents. Le modèle de turbulence k- $\omega$  (SST) a été utilisé pour simuler un modèle 2D instationnaire de la turbine H-Darrieus. Afin de compléter cette simulation, une analyse de sensibilité des paramètres effectifs de la turbine tels que le facteur de solidité, la forme de la surface portante, la vitesse du vent et le diamètre de l'arbre ont été effectuées. Pour simuler l'écoulement à travers la turbine, un domaine de calcul simplifié en 2D a été généré.

Les résultats de la simulation correspondent étroitement aux données expérimentales, fournissant une base efficace et fiable pour étudier l'aérodynamique des éoliennes. Cela démontre également le calcul de la meilleure valeur du paramètre effectif. L'analyse de sensibilité a révélé la meilleure valeur du paramètre effectif pouvant être utilisé dans le processus de conception d'une turbine. Ces travaux constituent la première étape du développement d'une modélisation aérodynamique 3D et qui précise des éoliennes Darrieus.

L'objectif principal du document de Kamyar Jafari [41] est d'étudier diverses configurations de rugosité afin de trouver une solution permettant d'atténuer les effets destructeurs de la rugosité. Les résultats indiquent que contrairement aux études précédentes, la rugosité sera utile si elle est appliquée uniquement du côté pression de la surface portante. Dans ces conditions, le coefficient de portance est augmenté à 8,62% et 1,2% par rapport à la surface portante à côtés rugueux et lisse respectivement. Cependant, dans une simulation 3D le coefficient de portance de l'aube avec la rugosité de la surface de pression est inférieur à celui de la lame lisse, mais ses impacts destructifs sont bien moindres que ceux de la rugosité des surfaces et de la rugosité de la surface d'aspiration.

On peut donc déduire que pour révéler l'influence de la rugosité, la simulation doit être réalisée en trois dimensions.



Figure II. 32 : Coefficient de portance pour différentes hauteurs moyennes de rugosité à  $\alpha = 5^{\circ}$ . [41]



Figure II. 33 : Coefficient de traînée pour différentes hauteurs moyennes de rugosité à  $\alpha = 5^{\circ}$ . [41]



Figure II. 34 : Variations du coefficient de puissance de la turbine pour divers rapports de vitesse de pointe à Ra = 0, 0,3 .[41]



Figure II. 35 : Variations du coefficient de puissance de la turbine pour différentes configurations de rugosité et Ra = 0,3 .[41]

L'étude de Yong Ming Dai et Wei-Haur Lam [42] a d'abord utilisé des modèles théoriques à tubes multiples suivis d'essais physiques sur une turbine de modèle à l'échelle réduite et principalement de simulations numériques. Des études numériques d'une turbine à l'échelle proposée ont été entreprises à l'aide des modèles informatiques développés. La conception de la turbine a été étudiée à l'aide d'un résolveur commercial Navier – Stokes moyenné sur la moyenne de Reynolds. La sensibilité de la turbine aux variations paramétriques a également été démontrée dans l'étude numérique à grande échelle.

Ce travail conclut que le modèle développé peut prédire efficacement les performances hydrodynamiques et les charges de conception des structures d'une turbine de courant marin à axe vertical.

Dans les travaux de Francesco Balduzzi et all [43] une analyse approfondie est présentée. Elle a pour objectif final d'identifier les paramètres de simulation les plus efficaces pour garantir une simulation bidimensionnelle fiable et totalement instable d'une turbine Darrieus de type H.

Les paramètres sélectionnés ont été appliqués pour simuler la géométrie d'un rotor réel qui a été testé en soufflerie afin d'obtenir un accord remarquable entre les estimations numériques et les données expérimentales. En outre, l'approche proposée a été validée au moyen de deux autres séries de simulations fondées sur des études de cas.

Dans la thèse d'Edgar Sousa Carrolo [44] des modèles informatiques simulant l'interaction fluide-structure sur un modèle à lame améliorée ont été développés. Une analyse couplée prenant uniquement en compte la charge aérodynamique puis la combine avec une inertie a été réalisée. Les résultats ont montré que cette conception pourrait réduire de 2,1% la charge aérodynamique par vent fort à la vitesse du vent coupé ce qui s'avère être une technique de contrôle passif réaliste. Une validation statique préliminaire du modèle de lame améliorée a été effectuée avec succès, en tenant compte des valeurs de référence maximales.

L'étude de Kana Horikiri [45] était axée sur les effets aérodynamiques modifiés par la distribution de la surface des aubes ainsi que par la solution de grille le long du profil. Les détails du calcul numérique à partir de Fluent ont été décrits pour aider à prédire les performances précises de la lame pour la comparaison et la discussion avec les données disponibles. Le calcul FLUENT du NACA63-215V a montré que les caractéristiques aérodynamiques concordaient bien avec les données expérimentales disponibles aux angles d'attaque plus faibles, bien qu'il s'agisse de discontinuités dans les distributions de courbure de surface comprises entre 0,7 et 0,8 in / c. Les discontinuités étaient si petites que les

performances de la lame ne pouvaient être affectées.La conception de la lame Eppler 387 a été conçue pour réduire la force de traînée.

L'article de Robert Howell et all [46] présente une étude combinée expérimentale et numérique sur l'aérodynamique et les performances d'une éolienne à petite échelle et à axe vertical (VAWT). Des essais en soufflerie ont été effectués pour vérifier les performances globales de la turbine et des modèles CFD (Computationnel Computing Dynamics) bidimensionnels et tridimensionnels ont été générés pour aider à la compréhension de l'aérodynamique de ces performances. Il a été démontré expérimentalement que la rugosité de surface des pales a un effet significatif sur les performances. Une augmentation significative du coefficient de performance est observée pour les rotors à plus haute solidité sur la majeure partie de la plage de fonctionnement.

L'article d'Arti Tirkey [47] présente l'effet du profil de la pale, du nombre de pales, de la rugosité de la surface des pales, du facteur de forme et du nombre de Reynolds sur les performances d'une éolienne à axe vertical. Une analyse numérique est réalisée pour évaluer les performances en fonction de paramètres. Le résultat numérique montre que la variation du profil de la lame affecte directement la production d'influence. On observe une augmentation de la production d'énergie avec l'augmentation du nombre de Reynolds sur l'ensemble de la plage de rapports de vitesse d'aube testés. Le rapport d'aspect de l'éolienne est le rapport entre la longueur de la pale et le rayon du rotor. Il a été démontré expérimentalement que la rugosité de la surface de l'aube de la turbine avait un effet important sur les performances de la turbine.

L'article de Md Farhad Ismail [48] étudie l'effet des modifications de profil sur un profil aérodynamique NACA 0015 utilisé dans des éoliennes à axe vertical (VAWT). Les modifications de profil étudiées consistent en une combinaison de fossette semi-circulaire vers l'intérieur et de volet Gurney à la surface inférieure de la surface plane du NACA-0015.Une optimisation entièrement automatisée utilisant l'approximation de surface de réponse (RSA) est utilisée pour maximiser le couple moyen produit par la pale de l'éolienne. L'ensemble de données utilisé dans l'optimisation est généré à l'aide de simulations CFD (dynamique des fluides numérique). Le domaine de calcul et le modèle de turbulence utilisé dans les simulations CFD sont validés par rapport à des résultats expérimentaux antérieurs. La forme optimisée de la surface portante modifiée améliore l'aérodynamisme de la pale de l'éolienne.

L'étude de Palanisamy et all [49] présente l'optimisation expérimentale, la conception et la construction d'une micro-éolienne de type Darrieus à axe vertical. Quatre turbines de topologies différentes sont fabriquées, représentant les différentes configurations de fonctionnement de la nouvelle éolienne Darrieus adaptative, développée pour améliorer les performances de vent faible de Giromill conventionnel. Le rotor Savonius étant intégré au rotor Darrieus, un diamètre optimisé du rotor Savonius est obtenu par un test en soufflerie. La conception, la sélection des composants et la disposition mécanique du prototype à l'échelle destiné aux essais sur le terrain sont discutés en détail.

Une étude a été réalisée par simulation numérique sur un profil aérodynamique d'éolienne et sur un profil aérodynamique émoussé avec ou sans générateurs de vortex (VG), et les performances de ces profils ont été analysées par YANG Ke et all [50]. La simulation de la surface portante DU 91-W2-250 a permis de vérifier que la méthode numérique et le modèle étaient crédibles. Sur la base de cette surface portante, une nouvelle couche avec un bord de fuite émoussé de 6% a été mélangée par addition d'épaisseur symétrique, et ses courbes caractéristiques ont été obtenues par calcul aux angles d'attaque clés. De plus, la distribution de pression sur le profil aérodynamique mélangé a été analysée en comparant le profil aérodynamique sans mélange. L'interaction des tourbillons induits par les VG avec les vortex de fuite ou de séparation a été prise en compte, suivie de la découverte de la manière dont les VG peuvent supprimer la séparation de la couche limite.

## **III.1 Introduction**

Une éolienne est l'avancement moderne du moulin à vent. Au lieu d'utiliser le vent pour soulever l'eau ou déplacer des roches lourdes pour broyer les graines, le vent est utilisé pour transformer un générateur électrique pour faire électricité. Parfois, les élèves confondent l'éolienne modèle ci-dessous pour un ventilateur. Juste comme un fan utilise l'électricité pour produire du vent, donc une éolienne utilise le vent pour produire de l'électricité. Ce chapitre comprendre une étude théorique d'une éolienne à axe vertical. Devisé en sept parties la premier suivra les types et les principes de fonctionnement d'une éolienne Darrieus. dans le deuxième partie, nous définirons la théorie de la machine, la troisième partie sera consacré l'aérodynamique des éoliennes et le profile aérodynamique et pour la dernier partie sont les générateur e vortex

#### **III.2.Principe de fonctionnement**

L'éolienne Darrieus est un type d'éolienne à axe vertical utilisée pour générer de l'électricité à partir de l'énergie transportée par le vent. La turbine est constituée d'un certain nombre de voilures aérodynamiques montées verticalement sur un arbre ou une structure en rotation. Le type Darrieus est théoriquement aussi efficace que le type à hélice si la vitesse du vent est constante, mais en pratique, cette efficacité est rarement réalisée en raison des contraintes physiques et des limitations imposées par une conception pratique et une variation de la vitesse du vent.

Le fluide autour du profil de l'aile génère des efforts, Ces forces sont généralement exprimées en composantes de portance et de traînée. La force de traînée est parallèle à l'écoulement, tandis que la force de portance est perpendiculaire à la force de traînée.

les eoliennes à axe vertical peut etre divisées en turbines entrainées par la trainée et l'autre par la portance . les eoliennes darrieus basées sur la portance présentent un intèret beaucoup plus grand car l'amplitude des forces de portance sur une profile aérodynamique.

Lorsque le rotor de Darrieus est en rotation, les pales aérodynamiques avancent dans l'air selon une trajectoire circulaire. Par rapport à la pale, ce flux d'air imminent s'ajoute de manière vectorielle au vent, de sorte que le flux d'air résultant crée un petit angle d'attaque (L'angle qu'est formé entre la ligne de corde et le flux) positif variable pour la pale. Cela génère une force nette qui pointe obliquement vers l'avant le long d'une certaine «ligne d'action». Cette force peut être projetée vers l'intérieur de l'axe de la turbine à une certaine distance, ce qui donne un couple positif à l'arbre et lui permet de tourner dans la direction dans laquelle il tourne déjà.

Le rotor tourne à une vitesse sans rapport avec la vitesse du vent, et généralement plusieurs fois plus vite. L'énergie provenant du couple et de la vitesse peut être extraite et convertie en puissance utile à l'aide d'un générateur électrique.

Lorsque le rotor est à l'arrêt, il ne se produit aucune force de rotation nette, même si la vitesse du vent est assez élevée- le rotor doit déjà tourner pour générer un couple. Ainsi, la conception ne démarre pas normalement. Il faut noter cependant que, dans des conditions extrêmement difficiles, Dans de rares cas, les rotors Darrieus peuvent s'auto-démarrer. Il est donc nécessaire de faire appel à un frein pour les maintenir à l'arrêt (figure suivante).

Un problème avec la conception est que l'incidence d'attaque change à mesure que la turbine tourne, de sorte que chaque pale génère son couple maximal en deux points de son cycle (avant et arrière la turbine). Cela conduit à un cycle d'alimentation sinusoïdal (à impulsions) qui complique la conception. En particulier, presque toutes les turbines Darrieus ont des modes de résonance où, à une vitesse de rotation donnée, les pulsations sont à la fréquence naturelle des aubes qui peuvent les amener (éventuellement) à se rompre. Pour cette raison, la plupart des turbines Darrieus sont équipées de freins mécaniques ou d'autres dispositifs de contrôle de la vitesse pour empêcher la turbine de tourner à ces vitesses pendant une période prolongée.



Figure III. 1 :Schéma de travail d'une éolienne Darrieus.

# III.3. Theorie des éoliennes (L'aérodynamique du rotor et des pales)

Au passage du vent à travers le rotor, l'interaction entre le vent et les pales génère une poussée qui est transformée l'énergie cinétique en énergie mécanique.

La figure suivante montre la force exercée sur un profil de pale d'une éolienne. La résultante T divisée en deux types des composantes la première correspond aux projections dans la direction du vent relatif sont la portance et la trainée et l'autre correspond aux projections sur l'horizontal c'est la poussée Fx et sur le plan de rotation la force motrice Fz.



Figure III. 2 : La direction du vent attaquant un profil de pale et les deux décompositions de la force résultante.

Le triangle de vitesse compose par La vitesse de rotation w et la vitesse du vent et la vitesse relative V, comme indique dans la figure

## III.3.1.Rapport de vitesse de pointe (TSR)

TSR est le rapport entre la vitesse de rotation de la pointe de la pale et la vitesse réelle du vent, décrit par lambda,  $\lambda$ . Le TSR est un facteur qui affecte directement l'énergie générée par la turbine. La relation entre TSR et coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes est illustrée à la figure suivante.



Figure III. 3 : Rapport entre vitesse spécifique et le coefficient de puissance. [a]

Le TSR détermine la vitesse de rotation de l'éolienne et dépend généralement de la conception particulière de l'éolienne utilisée, du profil de la surface portante du rotor utilisé et du nombre de pales utilisées.

La rotation lente du rotor entraîne une faible extraction de puissance car le vent traverse sans jeu les espaces entre les pales. De plus, la rotation rapide du rotor entraîne une faible extraction de puissance en raison de la solidité de l'obstruction du flux de vent. Il est donc important que les concepteurs d'éoliennes fassent fonctionner les éoliennes dans la plage de leur TSR optimal en prenant en considération la relation entre la vitesse angulaire et la vitesse du vent afin d'extraire le plus de puissance possible du vent.

$$\lambda = \frac{\omega r}{v}$$
 III.1

#### III.3.2. Nombre de Reynolds

C'est l'un des principaux paramètres de contrôle de tous les écoulements visqueux .il joue un rôle important dans la prévision des tendances du comportement d'un fluide, et utilise pour déterminer le type de flux de fluide si laminaire ou turbulent. On représente en trois fonctions

$$R_e = \frac{UL}{\vartheta}$$
,  $R_e = \frac{V_{\infty}D}{\vartheta}$ ,  $R_e = \frac{(wR)C}{\vartheta}$  III.2

#### III.3.3.Solidité de la turbine

La solidité est un paramètre important de l'éolienne à axe vertical, qui correspond à la surface totale des pales divisée par la surface de balayée :

$$\sigma = \frac{NC}{R}$$
 III.3

#### III.3.4.Force de portance et force de trainée

La portance et la traînée sont des forces mécaniques générées à la surface d'un objet lorsqu'il interagit avec un fluide.

#### III.3.4.1.La force de portance

La portance c'est la différence de pression qui généré une force aérodynamique mécanique produite par le mouvement de profil dans les airs. Cette force, il s'agit d'une quantité vectorielle, ayant à la fois une magnitude et une direction qui lui sont associées. La portance agit à travers le centre de pression de l'objet et est dirigée perpendiculairement à la direction du flux

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2$$
 III.4

#### III.3.4.2.La force de trainée

C'est la force de résistance provoquée par le mouvement d'un profile aérodynamique à travers un fluide, tel que l'eau ou l'air. Cette force est constituée de force de frottement et de force de pression inégale exercée sur les surfaces du profil aérodynamique tourné vers l'écoulement en sens inverse.la force de trainée est exprimé par :

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2$$
 III.5

#### **III.3.5.**Force tangentiel et force normal

La résultante de FL et FD dans la direction du mouvement de la pale est appelée force tangentielle FT, et la résultante de FL et FD dans la direction radiale est appelée force normale FN. La force normale FN reflète les charges sur les pales et la force tangentielle FT est utilisée pour estimer la puissance de la turbine. La correspondance entre les forces de portance- trainée et les forces normale-tangentielle est donnée par les relations

$$F_N = F_L \cos \alpha - F_D \sin \alpha \qquad \qquad \text{III.6}$$

$$F_T = F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha \qquad \qquad \text{III.7}$$

Les forces  $F_L, F_D, F_N$  et  $F_T$  peuvent être exprimées sous forme adimensionnelle par les coefficients suivants :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho H D V_{\infty}^2}$$
 III.8

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho H D V_{\infty}^2}$$
 III.9

$$C_N = \frac{F_N}{\frac{1}{2}\rho H D V_{\infty}^2}$$
 III.10

$$C_T = \frac{F_T}{\frac{1}{2}\rho HDV_{\infty}^2}$$
 III.11

Deux paramètres de fonctionnement permettent de caractériser les performances de l'éolienne :

• le coefficient de moment  $C_M$ 

$$C_M = \frac{M_Z}{\frac{1}{2}\rho H D R V_{\infty}^2}$$
 III.12

Le couple moteur fourni par une pale est:

$$M = F_T R$$
 III.13

Avec  $M_Z$  le couple suivant

 Le coefficient de puissance C<sub>P</sub>, c'est le rapport entre la puissance recueillie par l'arbre de rotation et la puissance cinétique théorique de l'écoulement amont au travers de la surface du rotor.

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho H D V_{\infty}^3}$$
 III.14

$$P = M_Z w III.15$$

#### III.3.6.Angle d'attaque

Angle d'attaque c'est un angle aérodynamique entre la ligne de corde de la surface portante et le vent résulte, c'est un angle pas facile de mesure .cela peut changer sans changer l'angle d'inclinaison de le profile.



Figure III. 4 : Angle d'attaque.

Lorsque l'angle d'attaque augmente, l'air circulant sur la surface portante est dévié sur une plus grande distance, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse de l'air et une augmentation de la portance.

#### **III.3.7.Angle d'incidence**

L'angle d'incidence est l'angle entre la ligne de corde d'une pale de rotor principal ou de queue et le moyeu du rotor. Il s'agit d'un angle mécanique plutôt que d'un angle aérodynamique et est parfois appelé angle d'inclinaison d'aube.

En l'absence de débit induit, angle d'attaque et angle d'incidence sont les mêmes. Chaque fois qu'un flux induit, un flux ascendant (flux entrant) ou une vitesse modifie le vent relatif, l'angle d'attaque est différent de l'angle d'incidence.





Figure III. 5 : Angle d'incidence.

#### III.3.8.Limite de Betz

La limite de Betz est l'efficacité maximale théorique d'une éolienne, conjecturée par le physicien allemand Albert Betz en 1919. Betz exprime la loi sous forme d'un coefficient de puissance maximal qui est égal 16/27, ce qui signifie qu'au plus 59,3% de l'énergie cinétique du vent peut être utilisée pour faire tourner la turbine et générer de l'électricité. En réalité, les turbines ne peuvent pas atteindre la limite de Betz et les rendements communs se situent dans une fourchette presque à 45% même dans les meilleures éoliennes conçues. Les éoliennes à axe horizontales théoriquement sont plus efficaces que les éoliennes à axe verticales.

Dans des conditions turbulentes avec des changements rapides dans la direction du vent, une éolienne à axe vertical générera plus d'électricité en dépit de son rendement plus faible.

$$Cp = \frac{16}{27} \approx 0.593$$
 III.17

#### III.4.Profile aérodynamique

Profile aérodynamique est le terme utilisé pour décrire la forme en coupe transversale d'un objet qui, lorsqu'il est déplacé dans un fluide tel que l'air, crée une force aérodynamique. Les voiles aérodynamiques sont utilisées dans les avions comme ailes pour produire une portance ou comme hélices pour produire une poussée. Ces deux forces sont produites perpendiculairement au flux d'air.

#### III.4.1 Géométrie du profil

#### III.4.1.1 Paramètre caractéristiques de l'aile

Les paramètres aérodynamiques des profils dépendent des caractéristiques géométriques présentées sur la figure suivante



## Figure III. 6 : Géométrie de profile aérodynamique.

Figure III. 7 : Paramètre caractéristiques de	ļ
l'aile.	

- A : Bord d'attaque,
- **B** : Bord de fuite,
- **AB** : Corde de référence,
- L : Longueur de la corde,
- **E** : Épaisseur maximale, étant atteinte vers le 1/3 à l'amont de la corde.

E/I : Épaisseur relative. Les profils classiques usuels ont une épaisseur relative de 6 à 20%.

- **S** : Surface de référence.
- $\alpha$ : Angle d'incidence (que fait la vitesse de l'écoulement V avec la corde).

**AMB** : ligne moyenne (sa plus grande ordonné par rapport à la corde AB est la flèche maximale f qui et définie par sa position d/l

# III.4.1.2 Particularité du bord d'attaque :

Le bord d'attaque est une zone importante. De sa forme et de son état de surface dépend la qualité de l'écoulement de l'air sur le reste du profil. Il est donc important de respecter sa forme et son état de surface.

- Un bord d'attaque trop pointu ou abîmé détériore l'écoulement aérodynamique, ce qui réduit la Portance et augmente beaucoup la traînée.
- Un bord d'attaque tombant donnera un vol instable.

# **III.4.1.3 Bord de fuite :**

Sur les modèles de début, compte tenu des profils utilisés, inutile de transformer le bord de fuite de l'aile en lame de rasoir. Cette zone deviendrait plus fragile, sans pour autant, garantir que l'écoulement aérodynamique influence les performances générales du profil.

On a deux types de profile aérodynamique, profile symétrique et l'autre asymétrique.

## III.4.2.Profile Symétrique

Profile aérodynamique symétrique c'est un profile distingue par ses surfaces supérieur et inferieur qui sont identiques. La ligne de cambrure moyenne et la ligne d'accord sont les mêmes sur une surface portante symétrique et ne produisent aucune portance à zéro angle d'attaque.

## III.4.3.Profile asymétrique

Les sections de surface portante cambrées (asymétriques) sont de nature plus complexe et nécessitent des paramètres plus géométriques à définir. Ils sont supposés être une superposition d'une distribution d'épaisseur symétrique sur une ligne courbe appelée ligne de cambrure ou ligne moyenne



Figure III. 8 : Profile symétrique et asymétrique.

## III.4.4. Profils de type NACA

Les profils aérodynamiques de la NACA sont développés par le Comité consultatif national de l'aéronautique (NACA). La forme des profils aérodynamiques NACA est décrite à l'aide d'une série de chiffres suivant le mot "NACA"

Elle définit le profile aérodynamique de quatre chiffre comme suit:

- Premier chiffre indique le carrossage maximal en pourcentage de la corde (m).
- Deuxième chiffre décrivant la distance de cambrure maximale (p) du bord d'attaque du profil aérodynamique en dizaines de pour cent de la corde.
- Les deux derniers chiffres fournissent l'épaisseur maximale (t) du profil aérodynamique en pourcentage de la corde.

## II.4.4.1. Définition du profil NACA0012

Le prédécesseur de la NASA était le NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Cet organisme a étudié différentes familles de profils répondant à diverses applications. Parmi ces dernières, il faut distinguer la famille de profils à 4 chiffres, celle à 5 chiffres et les profiles laminaires.

## II.4.4.2. Présentation du profil

Le Profil NACA 0012 appartient à la famille de profils à 4 chiffres, sa signification est

- $\Rightarrow$ **0** : représente la cambrure relative maximale
- $\Rightarrow$  0 : représente la position de la cambrure maximale
- $\Rightarrow$ **12** : représente l'épaisseur relative maximale
- Le NACA 0012 est un profil symétrique a base Y= f(x), très commode par leur définition géométrique et analytique, ils ont été très utilisés sur les avions et aussi dans le domaine de l'hydrodynamique.

## III.5. Phénomène du décrochage

C'est un phénomène les plus courants en mécanique de fluides, surtout en aérodynamique. Qui est représenté le décollement de la couche limite d'un écoulement sur une surface inclinée d'un certain angle d'attaque pour un profil d'aile.

## III.6. contrôle d''écoulements

Le contrôle d'écoulements est une technique qui permet de manipuler un écoulement libre ou à proximité d'une paroi à l'aide de dispositifs passifs ou actifs pour produire des changements favorable. les stratégies de ce contrôle sont généralement utiliser pour retarder ou avancer la transition, améliorer / éliminer les turbulences et / ou empêcher / induire la séparation afin d'augmenter la portance, de réduire la traînée, d'augmenter le mélange ou de supprimer le bruit induit par l'écoulement.

#### III.6.1. Contrôle Passif

Parmi les technologies de control passif on a choisi le générateur de vortex et les riblets

## .a. Générateur de vortex

Un générateur de vortex (VG) est un dispositif aérodynamique, qui est maintenant largement utilisé par les industries de l'aéronautique et des éoliennes pour le contrôle passif du flux. Il s'agit d'un petit aileron attaché à un angle l'écoulement imminent du côté aspiration de l'aile / de la pale, ce qui génère des tourbillons longitudinaux et provoque ainsi un mélange

local de l'écoulement, ce qui redynamise la couche limite et par conséquent retarde / empêche la séparation de l'écoulement.

Par conséquent, les VG peuvent être utilisés pour améliorer l'efficacité des ailes / pales dans les angles d'attaque élevés. D'un point de vue technique, il existe un besoin important de savoir comment incorporer les VG dans le processus de conception à un stade précoce, afin de choisir la taille, la forme, la position et les angles d'inclinaison des VG. Dans les codes de conception utilisés par l'industrie éolienne à l'heure actuelle, l'influence de l'équipement de section à profil aérodynamique avec des VG est intégrée dans ses polaires de portance, de traînée et de moment modifiés.

## .b. Les riblets

Les riblets sont de petites saillies superficielles alignées avec la direction de l'écoulement, qui confèrent une rugosité anisotrope à une surface. C'est l'une des rares techniques qui ont été appliquées avec succès à la réduction du frottement de la peau dans les couches limites turbulentes, à la fois en laboratoire et dans des configurations aérodynamiques complètes.



Figure III. 9 : Riblets triangle aligne avec l'écoulement.

## III.7. Le contrôle actif

Le contrôle actif du débit est une technique permettant d'améliorer la dynamique des fluides d'un corps aérodynamique à l'aide d'un actionneur actif et d'un apport d'énergie. L'objectif principal était de réguler les charges et les vibrations aérodynamiques instables des pales en contrôlant le flux localement le long de la pale.
#### **III.8.** La couche limite

La couche limite aérodynamique a été définie pour la première fois par Ludwig Prandtl dans un document présenté le 12 août 1904 au troisième Congrès international des mathématiciens à Heidelberg, en Allemagne. Il simplifie les équations d'écoulement de fluide en divisant le champ d'écoulement en deux zones: l'une à l'intérieur de la couche limite, dominée par la viscosité et créant la majorité de la traînée subie par le corps limite; et un en dehors de la couche limite, où la viscosité peut être négligée sans effets significatifs sur la solution. Cela permet une solution de forme fermée pour le flux dans les deux zones, une simplification significative des équations de Navier – Stokes complètes.

La couche limite est une très fine couche d'air s'écoulant sur la surface d'un corps où le frottement ralentit l'écoulement local. Les molécules qui touchent directement la surface de l'aile sont pratiquement immobiles. Chaque couche de molécules dans la couche limite se déplace plus rapidement que la couche la plus proche de la surface de l'aile. Au sommet de la couche limite, les molécules se déplacent à la même vitesse que les molécules situées en dehors de la couche limite. Cette vitesse s'appelle la vitesse en flux libre. La vitesse réelle à laquelle les molécules se déplacent dépend de la forme de l'aile, de la viscosité ou du caractère collant de l'air et de sa compressibilité.

#### **III.8.1.Types de couche limites**

#### a. couche limite laminaire

Une couche limite laminaire est une couche où l'écoulement se produit en couches, c'est-à-dire que chaque couche glisse au-delà des couches adjacentes. Dans une couche limite laminaire, tout échange de masse ou de quantité de mouvement n'a lieu qu'entre des couches adjacentes à une échelle microscopique non visible à l'œil. Par conséquent, la viscosité moléculaire permet de prédire la contrainte de cisaillement associée. Les couches limites laminaires ne se trouvent que lorsque les nombres de Reynolds sont faibles.

#### b. couche limite turbulent

Une couche limite turbulente est marquée par un mélange sur plusieurs couches de celle-ci. On peut voir des paquets de fluide se déplacer. Il y a donc un échange de masse, de quantité de mouvement et d'énergie à une échelle beaucoup plus grande comparée à une couche limite laminaire. Une couche limite turbulente ne se forme qu'à de plus grands

nombres de Reynolds. L'échelle de mélange ne peut pas être manipulée par la seule viscosité moléculaire.

En raison du mélange intense, une couche limite turbulente présente un fort gradient de vitesse au niveau de la paroi et par conséquent une contrainte de cisaillement importante.



Figure III. 10:Profils de vitesse typiques pour les couches limites Laminaires et turbulentes.

Profils de vitesse typiques des couches limites laminaires et turbulentes Taux de croissance (vitesse à laquelle l'épaisseur de la couche limite d'une couche limite laminaire est faible. Pour une plaque plane, elle est donnée par

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5.0}{\sqrt{Re_x}}$$
 III.18

Où  $Re_x$  est le nombre de Reynolds basé sur la longueur de la plaque. Pour un écoulementturbulent,ilestdonnépar

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.385}{\sqrt{Re_x^{0.2}}}$$
 III.19

La contrainte de cisaillement de la paroi est un autre paramètre d'intérêt dans les couches limites. Il s'exprime généralement comme un frottement cutané défini comme

$$C_f = \frac{\tau_\omega}{1/2\rho U_\infty^2}$$
 III.20

où est la contrainte de cisaillement au mur donnée par

$$\tau_{\omega} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0}$$
 III.21

et  $U_{\infty}$  est la vitesse du flux libre.

La friction de la peau pour les écoulements laminaires et turbulents est donnée par

$$C_f = rac{0.664}{\sqrt{Re_x}}$$
 Laminaire III.22  
 $C_f = rac{0.0594}{\sqrt{Re_x^{0.2}}}$  Turbulente III.23

Pour un écoulement constant, turbulent et incompressible, les équations de la dynamique de Reynolds sont :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( U_j U_i \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right)$$
 III.24

Pour une couche limite bidimensionnelle à gradient de pression nul, les équations de continuité et d'impulsion dans le sens du courant se réduisent à :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = \mathbf{0}$$
 III.25

$$\frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial VU}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v \frac{\partial U}{\partial x} - \overline{u^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v \frac{\partial U}{\partial y} - \overline{uv} \right)$$
III. 26

Équations de gouvernance pour la couche limite 2D, constante et laminaire

Continuité : 
$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \mathbf{0}$$
 III.27

x-momentum : 
$$v \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} = \underbrace{-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx}}_{\frac{U dU}{dy}, y=0} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$
 III.28

y - momentum : 
$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mathbf{0}$$
 III.29

## **IV.1 Introduction :**

Les méthodes numériques de la dynamique des fluides, connues sous le nom « Compulational Fluid Dynamics, CFD », sont largement utilisées depuis les années 1970 par les ingénieurs et les chercheurs travaillant dans les différents domaines de la science et de la technologie. Ces méthodes servent à résoudre les problèmes d'écoulements des fluides dans des situations d'intérêt fondamental et pratique. Les méthodes CFD sont basées sur la résolution numérique des équations différentielles de Navier stockes décrivant les principes de conservation de la masse, des quantités de mouvement et de l'énergie.

Dans le présent chapitre, les méthodes CFD sont utilisées pour étudier le développement de l'écoulement d'un fluide incompressible dans le débitmètre Venturi. Les prévisions numériques seront discutées pour voir l'influence des défauts géométriques et des profils des écoulements non standards sur le développement de l'écoulement dans le tube de Venturi. Le code de calcul utilisé : ANSYS CFX – 15.0.

## IV.2 Équations fondamentales de la dynamique des fluides :

### **IV.2.1** Les grandeurs moyennes :

Devant la grande complexité de la turbulence, on a souvent recours au traitement des problèmes par des méthodes statistiques. Ce recours est justifié par la difficulté d'accès aux nombreuses causes des instabilités. Ainsi, selon la "Décomposition de Reynolds", chaque grandeur  $\phi$  est décomposée en une valeur moyenne  $\overline{\Phi}$  et une fluctuation  $\phi$ '.

Cette décomposition consiste à considérer toute grandeur comme la somme d'un terme moyen et d'un terme fluctuant :

$$\phi(t) = \overline{\Phi} + \phi(t)' \tag{IV-1}$$

En appliquant l'approche statistique décrite ci-dessous et prenant la moyenne d'ensemble comme il est montré sur la figure IV-1.





Où la moyenne temporelle de la variable  $\phi$  sur la période  $\Delta T$  s'écrit :

$$\overline{\Phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_{0}^{\Delta t} \phi(t) dt \qquad (IV-2)$$

Pour illustrer les effets des fluctuations, on remplace chaque variable de l'écoulement (u, v, w et p) par la somme de sa moyenne et de sa composante fluctuante dans les équations de Navier-Stokes. On obtient les équations du mouvement moyen.

## IV.2.2 Équation de Continuité :

Elle exprime la variation de la masse de fluide par rapport au temps dans un volume élémentaire donné. Cette équation peut être exprimée par la formule suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left( \rho \stackrel{\longrightarrow}{U} \right) = 0 \tag{IV-3}$$

Pour un écoulement stationnaire :  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  (IV-4)

L'équation de continuité devient : 
$$\nabla \left( \stackrel{\rightarrow}{\rho} \stackrel{\rightarrow}{U} \right) = 0$$
 (IV-5)

## IV.2.3 Équation de quantité de mouvement :

Si le fluide considéré est newtonien et la pesanteur est la seule force de volume agissant sur le volume considéré, l'équation de quantité de mouvement devient sous la forme suivante :

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \{\rho U \otimes U\} = \nabla \{\tau - \rho \overline{u \otimes u}\} + S_M$$
(IV-6)

Où  $\tau$  représente le tenseur des contraintes visqueuses du fluide

Le terme -  $\rho u \otimes u$  de l'équation (4-6) est appelé tenseur de Reynolds. Il traduit l'effet de la turbulence sur l'évolution du mouvement moyen. Les modèles de turbulence clôturent les équations moyennes de Reynolds en fournissant des modèles pour le calcul des contraintes de Reynolds.

## IV.2.4 Équation de conservation de l'énergie :

A partir du premier principe de la thermodynamique, la dérivée de la somme de l'énergie interne et de l'énergie cinétique par rapport au temps, est égale à la somme de la puissance mécanique fournie au domaine par les forces de volume et de surfaces extérieures et de la puissance calorifique fournie au domaine.

L'équation d'énergie pour un écoulement stationnaire s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} + \nabla \left( \rho U h_{tot} + \rho \overline{uh} - \lambda \nabla T \right) = \frac{\partial p}{\partial t}$$
(IV-7)

L'enthalpie totale peut être formulée comme suit :

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2 + k$$
 (IV-8)

 $\frac{1}{2}U^2$ : est l'énergie cinétique de l'écoulement moyen.

k : est l'énergie cinétique de la turbulence.

$$k = \frac{1}{2}\overline{u^2}$$
(IV-9)

#### IV.3 Modélisation de la turbulence :

En vue de l'amélioration du traitement des fluctuations induites par la turbulence dans le mouvement d'une particule, dans le code de calcul, il existe trois méthodes d'approche pour aborder le problème de turbulence.

La première méthode consiste à décomposer le champ de la vitesse et de la température en une composante moyenne et une fluctuation turbulente, le système d'équations résultant (Reynolds Averaged Navier-Stokes équation, RANS) quantifie ainsi le comportement de l'écoulement moyen. Mais le non linéarité des équations fait apparaître un nouveau terme qu'il faut modéliser. Ce problème est connu sous le nom de « problème de la fermeture » où l'on dispose d'un nombre d'équations inférieur au nombre d'inconnues. Une variété de modèles est à présent disponible, allant du plus simple (à zéro équation) au plus complexe (Reynolds Stress Model, RSM).

La seconde est une méthode dans laquelle toutes les structures de la turbulence (macro et microstructures) sont résolues directement et modélise l'effet des petites structures par des modèles plus ou moins simples, dits « modèles de sous-maille » (subgrid models). Cette méthode est connue sous le nom de « simulation des macro-échelles » (Large Eddy Simulation, LES).

Afin d'essayer d'améliorer les possibilités prédictives des modèles de turbulence dans des régions fortement séparées, *Spalart* [35] a proposé une approche hybride, qui regroupe les avantages des simulations aux grandes échelles (LES), donnant de bons résultats dans les zones fortement décollées, et des modèles Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), plus efficaces dans les régions proches parois de la couche limite. Le concept est nommé (Detached Eddy Simulation, DES), c'est la troisième méthode.

#### IV.3.1. Modèle Spalart-Allmaras

Le modèle de Spalart - Allmaras, qui est classé comme un modèle à une équation, résout une équation de transport pour la viscosité des tourbillons elle-même. Ce modèle a acquis une popularité considérable pour les applications aéronautiques.

À l'exception du modèle Spalart-Allmaras, les modèles d'équation zéro et un précédent sont incomplets dans le sens où une connaissance préalable du débit est nécessaire pour résoudre le champ turbulent. Cette lacune est levée dans les deux modèles de fermeture d'équations, où une équation de transport distincte est résolue pour déterminer l'échelle de longueur.

En raison de cette propriété, les modèles à deux équations ont gagné en popularité dans les applications d'ingénierie et les simulations quotidiennes. Les modèles à deux équations diffèrent les uns des autres en ce sens qu'ils résolvent des équations différentes pour l'échelle de longueur.

#### IV.3.2.Modèle $k - \varepsilon$ :

L'équation de transport pour k peut être dérivée en prenant la trace de Eq. (IV-10) et en divisant par deux:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{\nu}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \varepsilon + D_t^k + \nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_j \partial x_j}$$
(IV-10)

Le premier terme à droite est le terme de production qui se lit comme suit:

$$P_k = -\overline{v'_i v'_j \frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j}} \tag{IV-11}$$

Ce terme doit être modélisé en raison de la présence du tenseur de contrainte de Reynolds qui est inconnu. Ce terme est d'une importance significative et le succès d'un modèle de turbulence est fortement influencé par la façon dont ce terme est modélisé. Dans les modèles linéaires de viscosité des tourbillons, ce terme est modélisé en utilisant l'hypothèse de Boussinesq

$$P_{k} = -\overline{v_{i}'v_{j}'}\frac{\partial\overline{v}_{i}}{\partial x_{j}} = v_{t}\left(\frac{\partial\overline{v}_{i}}{\partial v_{j}} + \frac{\partial\overline{v}_{j}}{\partial x_{i}}\right)\frac{\partial\overline{v}_{i}}{\partial x_{j}} = 2v_{t}\overline{S}_{ij}\overline{S}_{ij}$$
(IV-12)

où  $S_{ij}$  est la partie symétrique du tenseur de gradient de vitesse. Le tenseur de gradient de vitesse est décomposé en une partie symétrique et anti symétrique avec les définitions suivantes:

Avec

$$\frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j} = \overline{S}_{ij} + \overline{\omega}_{ij} \tag{IV-13}$$

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v}_j}{\partial x_i} \right)$$
(IV-14)

$$\overline{\omega}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{\nu}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{\nu}_j}{\partial x_i} \right) \tag{IV-15}$$

Le deuxième terme sur le côté droit de l'équation k est la dissipation dont la valeur est déterminée à partir de sa propre équation de transport. Le troisième terme est la diffusion turbulente définie comme:

$$D_t^k = -\frac{\partial}{\partial x_j} \overline{v'_j \left(\frac{p'}{\rho} + \frac{1}{2} v'_i v'_i\right)}$$
(IV-16)

Qui comprend la corrélation pression-vitesse et la corrélation triple vitesse. La corrélation pression-vitesse est généralement négligée et la corrélation triple vitesse est modélisée sur la base de l'hypothèse du gradient conduisant à:

$$D_t^k = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\partial_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \tag{IV-17}$$

Le dernier terme de l'équation k est la diffusion visqueuse qui est explicite et ne nécessite aucune modélisation. La diffusion turbulente modélisée et la diffusion visqueuse font une diffusion totale comme:

$$D^{k} = -\frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_{t}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right]$$
(IV-18)

L'équation de transport modélisée pour la dissipation est très similaire à l'équation k mais avec des constantes différentes et des dimensions appropriées. Dans le modèle standard k-  $\epsilon$  ", l'équation  $\epsilon$  se lit comme suit:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\varepsilon}{k} \left( c_{\varepsilon 1} P_k - c_{\varepsilon 2} \varepsilon \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$$
(IV-19)

Où le groupe  $\varepsilon/k$  est multiplié par les termes de production et de dissipation pour corriger les dimensions de ces termes. Les constantes du modèle dans le modèle standard  $k - \varepsilon$  sont:

 $\sigma_k = 1$   $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$   $c_{\varepsilon 1} = 1.44$   $c_{\varepsilon 2} = 1.92$ 

La constante  $c_{\varepsilon_1}$  est déterminée à partir de l'étude de la turbulence homogène décroissante et de la constante  $c_{\varepsilon_2}$  à partir de l'équilibre local de la turbulence dans la région de la loi logarithmique de la couche limite.

La viscosité des tourbillons peut maintenant être déterminée par une combinaison appropriée de k et  $\varepsilon$  Sur la base d'une analyse dimensionnelle, la viscosité des tourbillons est définie comme:

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{IV-20}$$

#### IV.3.3 Modèle K-ω

Le modèle K-oméga est l'un des modèles de turbulence les plus couramment utilisés. Il s'agit d'un modèle à deux équations, ce qui signifie qu'il comprend deux équations de transport supplémentaires pour représenter les propriétés turbulentes de l'écoulement. Cela permet à un modèle à deux équations de tenir compte des effets historiques comme la convection et la diffusion de l'énergie turbulente.

La première variable transportée est l'énergie cinétique turbulente, k. La deuxième variable transportée dans ce cas est la dissipation spécifique, \ oméga. C'est la variable qui détermine l'échelle de la turbulence, tandis que la première variable, k, détermine l'énergie dans la turbulence.

Pour calculer les conditions aux limites de ce modèle, consultez les conditions aux limites des courants sans turbulence.

#### IV.3.3.1 Modèles K-Omega couramment utilisés

Le modèle k-oméga de Wilcox

- Modèle K-Omega modifié de Wilcox
- Modèle k-  $\omega$  SST

### 1.1. Modèle k- ω SST

Le modèle de turbulence k- $\omega$  SST [Menter 1993] est un modèle de viscosité turbulente à deux équations qui est devenu très populaire. La formulation de transport des contraintes de cisaillement (SST) combine le meilleur de deux mondes. L'utilisation d'une formulation k- $\omega$ dans les parties internes de la couche limite rend le modèle directement utilisable jusqu'à la paroi à travers la sous-couche visqueuse, par conséquent le modèle SST k- $\omega$  peut être utilisé comme un Low-Re modèle de turbulence sans fonctions d'amortissement supplémentaires.

La formulation SST bascule également vers un comportement k- $\varepsilon$  dans le courant libre et évite ainsi le problème courant de k- $\omega$  que le modèle est trop sensible aux propriétés de turbulence du courant libre d'entrée. Les auteurs qui utilisent le modèle SST k- $\omega$  le méritent souvent pour son bon comportement dans les gradients de pression défavorables et l'écoulement de séparation. Le modèle SST k- $\omega$  produit des niveaux de turbulence un peu trop élevés dans les régions à forte déformation normale, comme les régions de stagnation et les régions à forte accélération. Cette tendance est cependant beaucoup moins prononcée qu'avec un modèle k- $\varepsilon$  normal.

- Équations gouvernantes SST k-ω
  - Énergie cinétique de turbulence

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_i} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$
(IV-21)

#### - Taux de dissipation spécifique

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial\omega}{\partial x_i} = aS^2 - \beta\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1)\sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial\omega}{\partial x_i} \qquad (IV - 22)$$

#### - Coefficients de fermeture et relations auxiliaires

$$F_{2} = \tanh\left[\left[max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^{*}\omega y}, \frac{500v}{y^{2}\omega}\right)\right]^{2}\right]$$
(IV-23)

$$P_{k} = \min\left(\tau_{ij}\frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}}, 10\beta^{*}k\omega\right) \tag{IV-24}$$

$$F_{1} = \tanh\left\{\left\{\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^{*}\omega y}, \frac{500v}{y^{2}\omega}\right), \frac{4\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^{2}}\right]\right\}^{4}\right\}$$
(IV-25)

$$CD_{k\omega} = max \left( 2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$
(IV - 26)

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \tag{IV - 27}$$

$$a_{1} = \frac{5}{9}, a_{2} = 0.44$$

$$\beta_{1} = \frac{3}{40}, \beta_{2} = 0.0828$$

$$\beta^{*} = \frac{9}{100}$$

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{k2} = 1$$

$$\sigma_{\omega 1} = 0.5, \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

#### IV.4 Application de la loi de paroi :

Dans l'écoulement d'un fluide le long d'une paroi solide, la couche limite représente la mince couche de fluide influencée par le contact avec la paroi. Dans cette couche, la vitesse du fluide varie très rapidement, passant de la valeur nulle pour les molécules au contact de la paroi à la valeur normale que prend la vitesse du fluide à une certaine distance de la paroi. La théorie de la couche limite suppose que la résistance qui s'oppose au mouvement d'un fluide le long d'une paroi solide, soit imputable aux contraintes tangentielles induites dans cette couche par le fort gradient de vitesse qui y règne. L'épaisseur de la couche limite dépend du profil et de la rugosité de la paroi, ainsi que de la viscosité du fluide. Son épaisseur croît avec le déplacement du fluide à partir de son point de contact avec la paroi.

La couche limite est divisée au moins en deux régions :

- L'une, loin de la paroi, est contrôlée par la turbulence et est appelée « couche logarithmique ».
- L'autre près de la paroi « sous couche visqueuse » est dominée par les forces visqueuses.

L'écoulement est presque laminaire dans cette région. Il y a une région entre la sous couche visqueuse et la couche logarithmique appelée « couche intermédiaire », où les effets de la viscosité moléculaire et de la turbulence sont importants **[36]**.

La figure (4-2) ci-dessous illustre de manière claire la subdivision de la région prés de la paroi.



Figure IV. 2 : Profil de vitesse dans une couche limite turbulente. []

La relation logarithmique pour calculer la vitesse près de la paroi est donnée par :

$$u^{+} = \frac{U_{t}}{u_{\tau}} = \frac{1}{k} \ln \left( E \cdot y^{+} \right)$$
 (IV-28)

Où

$$y^{+} = \frac{\rho \cdot \Delta y \cdot u_{\tau}}{\mu}$$
(IV-29)

$$u_{\tau} = \left(\frac{\tau_{\omega}}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(IV-30)

- y<sup>+</sup>: Distance adimensionnelle normale à la paroi.
- $\Delta y$ : Distance normale à la paroi solide.
- $U_t$ : Vitesse parallèle à la paroi.

 $u_{\tau}$ : Vitesse de frottement à la paroi

k : Constante de Von Karman (k = 0.41).

E : Est une constante qui dépend de la rugosité de la paroi (pour une paroi lisse E=9.793).

 $\tau_{\varpi}$  : Contrainte de cisaillement à la paroi.

Il est important de noter que la loi logarithmique est applicable que dans les régions ou y<sup>+</sup> est supérieur à 11.225, dans le cas contraire, une égalité est observée expérimentalement entre y<sup>+</sup> et  $U_t$ .

L'un des points les plus essentiels dans l'emploi optimal des modèles de turbulence, est la résolution appropriée de la couche limite et de la distance  $y^+$ . Comme orientation, une couche de frontière devrait au moins être résolue avec :

$$N_{Normal} = 10$$
 pour la loi de la paroi. (IV-31)

Où : N<sub>ormale</sub> est le nombre de nœuds de la couche limite (dans la direction Normale à la paroi)  $20 \le y^+ \le 100$  pour la loi de la paroi.

## IV.5 Présentation du code de calcul ICEM CFD CFX 15.0 :

La compréhension du comportement des fluides est bien souvent un facteur important dans le développement de produit et de process. Grâce à la capacité de calcul disponible toujours plus grande, l'analyse des écoulements a de plus en plus tendance à quitter le laboratoire pour entrer dans le monde de la simulation numérique. Des interfaces conviviales et intuitives ainsi que son intégration dans le processus de développement élargissent continuellement la palette d'utilisateurs de calcul fluide. Le rôle central pour ce type de calcul est détenu comme auparavant par l'ingénieur spécialiste en code de calcule CFD, mais les environnements de nouvelle génération comme ICEM CFD et CFX 15.0 donnent un accès à certaines applications aux ingénieurs de mécanique des fluides avec l'importance croissante des calculs couplés, comme par exemple l'interaction fluide-structure.

Les applications du code de calcul ICEM CFD CFX 15.0 interviennent sous différentes formes dans de nombreux domaines: depuis la climatisation de grands bâtiments jusqu'à la simulation d'essais en soufflerie pour l'industrie automobile, en passant par

l'optimisation de turbines, de pompes et par les calculs d'écoulements dans les domaines micro- et nano-scopiques.

Le code de calcule CFX fait partie depuis 20 ans parmi les solutions dominantes dans le domaine de la simulation de fluides. C'est un système général dédié pour le calcul des dynamiques des fluides (CFD), combinant un résolveur très avancé avec des modules de pré et post traitement très puisant. Il peut modéliser une gamme très large des écoulements : permanents, laminaires turbulents, subsoniques, transsoniques, supersoniques, avec transfert de chaleur et rayonnement thermique, à surface libre, non newtoniens, multi-phasé, écoulement de plusieurs constituants, combustion et cheminement d'une particule fluide.



Figure IV. 3 : Structure du code de calcul CFX-15.0.

Traditionnellement la modélisation avec CFD inclue la mise en place de la géométrie du problème, la génération d'un maillage convenable et la définition des conditions limites. CFX compte les aspects suivants :

- Un résolveur avancé qui est à la fois fiable et robuste,
- Une intégration parfaite de la définition du problème, son analyse et la présentation des résultats,
- Une mise au point intuitive et interactive utilisant des menus et des graphiques avancés,

Une aide en ligne détaillée.

Le code de calcule CFX-15.0 est constitué de cinq modules qui sont liés par le flux d'information requit pour réaliser une analyse CFD.

## IV.5.1. Génération de la géométrie et du maillage (ICEM CFD-15.CFX ou CFX-BUILD) :

CFX-Build est un module de pré processeur de génération de la géométrie et du maillage de CFX-15.0 .C'est un programme interactif qui permet de construire des géométries plus au moins complexes avec un maillage approprié et désignation de chaque région pour l'entrée au CFX-Pre. Parmi les principaux dispositifs du CFX-Build on peut citer :

- Une interface d'utilisation facile à manipuler,
- Équipements pour importer la géométrie des paquets principaux,
- Équipements puissants pour permettre à la géométrie d'être éditée et préparée pour l'analyse de CFD,
- Spécifications faciles en 2D et 3D qui apparaissent dans le CFX-Pre pour la création des conditions aux limites, des domaines et des sous-domaines.
- Une large et intuitive base d'unités avec les spécifications de la géométrie dans pratiquement toutes les unités.
- Documentation d'utilisateur en ligne, avec l'aide sensible de contexte.
- Parmi les caractéristiques du CFX, sa capacité d'importer la géométrie et le maillage généré par un autre code sans avoir recourt au CFX-BUILD.



Figure IV. 4 : Géométrie réalisée ICEM CFD 15.CFX.



Figure IV. 5 : Maillage réalisée ICEM CFD 15.CFX.

## IV.5.2.Optimisation du Maillage

### a. Maillage d'éolienne à 3 pales

Le stator (domaine extérieur) est discrétisé en 36795 éléments .domaine intérieur est discrétisé en 183323 éléments, plus 10 couches pour la couche limite autour des profils. Le domaine intérieur a été fixé presque à 9 c (cordes) du centre de la turbine. Les figures montrent les maillages et les conditions aux limites de la turbine. La vitesse d'entrée du domaine de calcul est 2.3m/s.



Figure IV. 6 : Maillage du rotor et stator de la turbine simple.





## b. Optimisation du maillage d'éolienne à la zone de freinage

Le maillage a été optimisé et raffiné au maximum pour obtenir une solution plus proche de la réalité (Figure 4.5.).Les tableaux suivant résume les nombre déliement et des nœud de maillage de cette turbine La figure 4.6. Montre les dimensions et les conditions aux limites.la vitesse d''entré est



Figure IV. 8 : Maillage dans la région locale autour du profil aérodynamique et maillage sur la surface du générateur Vortex.

Configuration	Conf.1	Conf.2	Conf.3	Conf.4	Conf.5	Exp
C <sub>L</sub>	1.345	1.382	1.349	1.773	1.813	1,32495
CD	0.401	0.391	0.405	0.379	0.360	0,21564
Nombre de nœuds	102113	107532	108408	134467	78471	
Nombre d'élément	296708	314693	318625	394618	232124	

Tableau IV. 1 : Coefficients de portance et de traînée à un nombre différent de<br/>générateurs de vortex autour.

Configuration	Conf. 6	Conf.7	Conf.8	Conf.9	Clean	Exp
CL	1.782	1.813	1.809	1.315	1,7424 1	1,32495
CD	0.356	0.362	0.356	0.402	0,3783 1	0,21564
Nombre de nœuds	89458	104123	109853	114406	70778	/
Nombre d'élément	260129	307197	319242	328032	212386	/

# Tableau IV. 2 : Coefficients de portance et de traînée à un nombre différent de<br/>générateurs de vortex autour.

## IV.6. CFX-Pre :

Dans l'interface CFX-Pre, nous choisissons les différents paramètres concernant l'écoulement. La nature physique de l'écoulement (air, gaz parfait, eau...) et la nature dynamique, ainsi que le choix du modèle de turbulence et la précision des résultats, autrement dit la tolérance d'erreur :



Figure IV. 9 : Les dimensions et les conditions aux limites d'éolienne à la zone de freinage.

Le travail effectué dans cette étude numérique et représenté comme suit :

Les angles d'incidence présentés dans cette étude sont : (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30°).



Figure IV. 10 : Conditions aux limites de la géométrie importée de l'ICEM CFD 15.CFX par le module CFX-pre.



Figure IV. 11 : Configurations du problème.



Figure IV. 12 : Conditions aux limites de la géométrie importée de l'ICEM CFD 15.CFX par le module CFX-pre.

#### **IV.7 CFX SOLVER :**

CFX-Solver est le module qui résout le problème spécifié dans CFX-pre pour toutes les variables de la solution (voir figure 4.8). Un des dispositifs les plus importants de CFX-14.1 est son utilisation d'un solver couplé, dans lequel toutes les équations hydrodynamiques sont résolues en tant que simple système. Le solver couplé est plus rapide que le solver traditionnel isolé, et peu d'itérations sont requises pour l'obtention de la convergence.

#### **IV.8 CFX-POST**

CFX-Post est un post processeur très flexible du dernier cri pour CFX-15. Il est conçu pour permettre la visualisation facile et quantitative des résultats de simulation de CFD Il est doté de dispositifs importants, tels que :

- ✤ Le champ de vitesses,
- ✤ Les contours de pression,
- ✤ Les lignes de courant, ……



Figure IV. 13 : Contour de pression sur un plan défini par CFX-POST.

## V.1 Introduction

Dans ce chapitre on a présenté les résultats obtenus aux simulations numériques effectuées sur les éoliennes étudiées dans ce travail. La simulation prend beaucoup de temps dans chaque cas, et cela est dû aux ordinateurs qui on a utilisés. Les paramètres calculés par CFX étant les forces des portances et des trainé et force tangentionnel pour obtenir le coefficient de portance.

Ce travail est d'analyser la structure d'écoulement sur NACA4415 et d'évaluer l'efficacité des générateurs Vortex VG en tant que dispositifs de contrôle passifs. La validation du modèle de test se concentre sur le cas incontrôlé présenté dans les travaux de Manshaka Roa et al [] et les meilleurs résultats obtenus à l'analyse passée on a utilisé pour simuler la turbine avec trois pales de NACA 0018.

## PARTIE -I-PROFIL ISOLÉ

## V.2 Configuration du domaine de calcul

Cette partie de l'étude numérique est inspirée de l'investigation expérimental de Tan Manshaka Roa et al [], La configuration de l'écoulement consiste en un écoulement autour d'un profil aérodynamique NACA0018 au nombre de Reynolds de 896 000, en fonction de la longueur de la corde du profil (C = 1 m) et de la vitesse d'écoulement principal  $U_{\infty}$ .

$$Re = \frac{C\rho U_{\infty}}{\mu} \tag{4-1}$$

Tels que ;

 $\mu$  est la viscosité dynamique et  $\rho$  est la densité du fluide entourant le profil aérodynamique.

Le profil est monté à 10C en aval de l'entrée (Figure 4.1) et pivote autour de l'emplacement afin d'ajuster l'angle d'attaque par rapport à la vitesse d'écoulement principal. Le système de coordonnées globales (x, y, z) est défini au bord arrière du profil aérodynamique avec **x** parallèle à  $U_{\infty}$ .  $\alpha$  Est identifiée comme l'angle de rotation du profil correspondant à une distribution du coefficient de pression symétrique (Cp), où Cp est défini comme :

(4 - 2)

$$Cp = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2}$$



Figure V. 1:Schéma du modèle d'aile et définition du système de coordonnées global.

La spécification correcte des conditions aux limites sur le domaine de calcul est très critique dans la modélisation CFD pour obtenir les solutions précises. La définition de ces conditions aux limites implique l'identification de l'emplacement (c'est-à-dire les entrées, les sorties, les parois, symétries...etc.) et la spécification des variables d'écoulement. Ces emplacements sont montrés sur la Figure 4.2.

Les équations de Navier-Stokes relative à un écoulement turbulent sont résolues à l'aide du code ANSYS CFX-CFD avec l'adoption du modèle  $k-\omega$  SST pour le traitement de la turbulence et la fermeture du système d'équations.



Figure V. 2: Spécification des conditions aux limites.

Entrée de la veine d'essai :	Entrée Inlet		
Sortie de la veine d'essai :	Sortie	Outlet	
Paroi solide	Haut, Bas, Nord, Sud Symmetry		
Profil	Intrados, Extrados Wall		
Pression de sortie,	1 Atm		
Fluide	Incompressible		
Le régime	Turbulent		
Modèle de turbulence	k-ε		
L'écoulement	Bidimensionnel		
Vitesses de l'entrée	10 m/s.		

 Tableau 5.1 Condition aux limites

## V.2.1. Configuration du générateur de vortex

Les travaux ont été menés pour le contrôle de la couche limite et l'augmentation de la force de portance, avec un profil avec et sans générateurs de vortex (VG), à l'aide de générateurs de vortex installé sur un profil d'une éolienne à axe vertical.

Profile de la pale	Naca 4415		
Corde (C)	0.032 m		
Nombre de pales (N)	1		
Rayon de la turbine (R)	0.11 m		
Hauteur de la turbine (H)	0.02 m		
Vitesse du vent $(U_{\infty})$	21 m/s		
Nombre de Reynolds	$Re = 2.05 \times 10^5$		





Figure V. 3:Démontions de générateur de vortex (VG).

Configuration	Configuration	Configuration	Configuration	Configuration		
	1	2	3	4		
	a = H	a = H/2	a = H/4	a = H/8		
	$\mathbf{b} = \mathbf{L}$	$\mathbf{b} = \mathbf{L}/2$	$\mathbf{b} = \mathbf{L}/4$	$\mathbf{b} = \mathbf{L}/8$		
Tablea	Tableau 5.3: Configuration du générateur de vortex pour					
	C	L'extrados.	-			
Configuration	Configuration	Configuration	Configuration	Configuration		
	5	6	7	8		
		TT / 2		<b>TT</b> 10		
	a = H	$\mathbf{a} = \mathbf{H}/2$	a = H/4	a = H/8		
	$\mathbf{b} = \mathbf{L}$	$\mathbf{b} = \mathbf{L}/2$	$\mathbf{b} = \mathbf{L}/4$	$\mathbf{b} = \mathbf{L}/8$		
Tableau 5.4: Configuration du générateur de vortex pour						
L'intrados.						



 
 Tableau 5.5: Configuration du générateur de vortex pour l'extrados et l'intrados

## V.3 Résultats pour la pale de la zone de freinage

#### V.3.1 Validation de la méthode de simulation

Au départ, le calcul du même cas non contrôlé a été effectué. Les coefficients de portance et de traînée en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$  varient de 0 ° à 30 ° tracés et comparés dans les données expérimentales et le montre la figure 1. Les graphiques montrent que les résultats entre 0 ° et 10 ° ont un bon accord contre les résultats expérimentaux pour le coefficient de portance et jusqu'à 23 ° pour le coefficient de traînée.

Les figures 2 à 11 présentent l'effet des générateurs de vortex sur les coefficients de portance, de traînée et de tangentiel pour différentes configurations, les VG installés sur les extrados, les VG installés sur les intrados et les VG installés sur les deux surfaces (extrados et intrados. On voit clairement l'effet VGs sur le Lorsque les VG ont été installés sur l'extrados, ils ne sont pas en mesure de produire un effet utile mais, lorsqu'ils sont installés sur la surface intrados du profil, on observe une augmentation de la portance de l'aile. Le plus grand incrément de coefficient de portance a été obtenu pour la configuration conventionnelle 8 (conf 8) L'effet de mélange de flux en utilisant le VG devrait atteindre la région où le flux se sépare afin que la séparation de flux puisse être contrôlée.



Figure V. 4: Comparaison des résultats CFD et des données expérimentales [17].



(Coefficient de portance CL)

Figure V. 5:Comparaison des résultats CFD et des données expérimentales [17].(Coefficient de trainée CD).



Figure V. 6:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de portance.

Figure V. 7:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de traînée



Figure V. 8:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de force tangentielle de NACA 4415



Figure V. 9:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de portance



Figure V. 10:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de traînée



Figure V. 11:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de force tangentielle de NACA 4415.Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de force tangentielle de NACA 4415.



Figure V. 12:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de portance





Figure V. 14:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de force tangentielle de NACA 4415.



Figure V. 15:Effets des générateurs de vortex sur les coefficients de force tangentielle de NACA 4415 pour toutes les configurations.

#### V.3.2 Analyse des contours de vitesse

Les figures 12 à 19 montrent les contours de vitesse autour du profil NACA 4415 pour différents angles 15, 20, 25 et 30 °. Le comportement général des cas incontrôlés est une forte accélération du fluide en aval du point de stagnation au bord d'attaque, suivie d'une décélération le long de la surface supérieure jusqu'au bord de fuite. La vitesse sur l'extrados est plus élevée que le long de l'intrados, ce qui entraîne une zone de recirculation autour du profil. C'est ce qui génère la force de levage. En aval du profil, le sillage caractérisé par une faible vitesse, cela augmente ultérieurement la force de traînée. L'augmentation de la vitesse sur la surface supérieure du profil et la diminution de la taille du sillage est également considérée comme considérablement réduite en utilisant les VGs est clairement vu en utilisant VG comme un contrôle passif.



Figure V. 16:Contours de vitesse de Conf7 à différents angles de 15 ° et surface d'aspiration du profil aérodynamique lisse



Figure V. 17:Contours de vitesse de Conf7 à différents angles de 20 ° et surface d'aspiration du profil aérodynamique lisse.



Figure V. 18:Contours de vitesse de Conf7 à différents angles de 25 ° et surface d'aspiration du profil aérodynamique lisse.



Figure V. 19:Contours de vitesse de Conf7 à différents angles 30 ° et surface d'aspiration du profil aérodynamique lisse.



Figure V. 20:Contours de vitesse de Conf8 à différents angles de 15 ° et surface d'aspiration du profil aérodynamique lisse.


Figure V. 21:Contours de vitesse de Conf8 à différents angles de 20 ° et surface d'aspiration du profil aérodynamique lisse.



Figure V. 22:Contours de vitesse de Conf8 à différents angles 25 ° et surface d'aspiration du profil aérodynamique lisse.



Figure V. 23:Contours de vitesse de Conf8 à différents angles 30 ° et surface d'aspiration du profil aérodynamique lisse.



Figure V. 24:Contour de vitesse pour la Conf.1 VGs



Figure V. 25:Contour de vitesse pour la Conf.2 VGs



Figure V. 26:Contour de vitesse pour la Conf.3 VGs



Figure V. 27:Contour de vitesse pour la Conf.4 VGs



Figure V. 28:Contour de vitesse pour la Conf.5 VGs



Figure V. 29:Contour de vitesse pour la Conf.6 VGs



Figure V. 30:Contour de vitesse pour la Conf.7 VGs



Figure V. 31:Contour de vitesse pour la Conf.8 VGs



Figure V. 32:Contour de vitesse pour la Conf.9 VGs



Figure V. 33:Contour de vitesse pour la Conf.10 VGs



Figure V. 34:Contour de pression pour la Conf.1 VGs



Figure V. 35:Contour de pression pour la Conf.2 VGs



Figure V. 36Contour de pression pour la Conf.3 VGs



Figure V. 37:Contour de pression pour la Conf.4 VGs



Figure V. 38:Contour de pression pour la Conf.5 VGs



Figure V. 39:Contour de pression pour la Conf.6 VGs



Figure V. 40:Contour de pression pour la Conf.7 VGs



Figure V. 41:Contour de pression pour la Conf.8 VGs



Figure V. 42:Contour de pression pour la Conf.9 VGs



Figure V. 43:Contour de pression pour la Conf.10 VGs





# PARTIE -II-ÉOLIENNE DARRIEUS TRIPALE

## V.4 Les éoliennes étudiées

Les éoliennes qui a étudié dans ce thèse sont trois. La première c'est l'éolienne Darrieus tripale validé par l'éolienne d'Ane Menchaca Roa. La deuxième c'est étude l'éolienne à la zone de freinage La première partie présente le comportement de l'écoulement autour de la profile lisse, pour un angle d'attaque différent, qui est comparé à des données expérimentales. La deuxième partie étudie l'effet de contrôle passif des générateurs de vortex (VG) placés d'abord sur l'extrados, puis sur l'intrados et enfin sur les Darrieus avec des générateurs de vortex. Deux côtés, pour différentes hauteurs de générateurs de vortex.la troisième c'est l'éolienne à trois pales avec les meilleurs générateurs de vortex étudiées à la deuxième éolienne.

#### V.4.1 Éolienne 3 pales Ane Manshaka Roa

Ane Manshaka Roa [] a travaillé sur une hydrolienne de type Darrieus de trois pales sur la base d'un profil Naca 0018 projeté sur le cercle de rotation de l'hydrolienne. Les résultats de ces expériences demeurent une référence de base pour moult travaux de recherche. Les Principales caractéristiques de cette turbine sont données dans le tableau IIII.1.

Profile de la pale	Naca 0018
Corde (C)	0.032 m
Nombre de pales (N)	3
Rayon de la turbine (R)	0.11 m
Hauteur de la turbine (H)	0.02 m
Vitesse spécifique ( $\lambda$ )	1 2 3 4
Vitesse du vent $(U_{\infty})$	2.3 m/s
Nombre de Reynolds	Re=





Figure V. 44:Plan 2D de la turbine tripale.

## V.4.2 Éolienne à la zone de freinage

La géométrie de la turbine Darrieus à une seule pale est représentée sur la figure IIII. .

#### V.4.3 Éolienne 3 pales avec générateur de vortex

La configuration de cette éolienne consiste d'un mélange entre les deux éoliennes précédentes (combinaison entre l'éolienne de trois pales et les meilleurs générateurs de vortex).

Profile de la pale	Naca 0018
Corde (C)	0.032 m
Nombre de pales (N)	3
Rayon de la turbine (R)	0.11 m
Hauteur de la turbine (H)	0.02 m
Vitesse spécifique ( $\lambda$ )	1 2 3 4
Vitesse du vent $(U_{\infty})$	2.3 m/s
Nombre de Reynolds	Re=
Generateur de vortex	L=0.00375 m
L/4 et H/4	H=0.00125 m
Generateur de vortex	L=0.001875 m
L/8 et H/8	H=0.000625 m

Tableau 5.7 : Caractéristiques de la turbine tripale Darrieusavec générateurs de vortex.

## V.5 Paramètres de calcul

Ce présent travail a donc été réalisé à l'aide du code Ansys CFX, basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes moyennées (RANS ; Reynolds Averaged Navier Stokes).Le domaine est divisé en deux zones: une zone externe appelée stator, et un domaine mobile, appelée rotor.

Tous les calculs ont été réalisés avec un schéma de 2ème ordre pour la pression et la vitesse. Pour tester le modèle k-w sst dans des conditions plus simples que celles des turbines citées plus haut et dans le but de s'assurer de la précision de la méthode.

Premièrement une série de tests préliminaires sur une seule pale fixe isolée et sur une turbine mono pale, Dans ce cas, la résolution est stationnaire et les angles d'incidence  $\alpha$  sont pris entre 0° à 30° par pas de 5°.

Pour les autres machines, la résolution est instationnaire. Les simulations sont effectuées pour plusieurs révolutions jusqu'à ce que les efforts sur les pales deviennent périodiques, ainsi la convergence est atteinte. On a résumé les paramètres de calcul sur le tableau suivant.

Temps	Instationnaire $\Delta t = 1^\circ$ de rotation
Modèle visqueux turbulent	$k-\omega$ sst
Écoulement	Eau, $\rho = 1000 \ kg.m^{-3}$ , $v_{\infty} = 2.3 \ m.s^{-1}$ Air, $\rho = 1.225 \ kg.m^{-3}$ , $v_{\infty} = 21 \ m.s^{-1}$
Paramètre d'avance	$\lambda = 1$ à 4

#### Tableau.5.8 Paramètres de calcul

#### V.6 Génération de la géométrie :

La géométrie est générée à l'aide du logiciel ICEM ; un préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il est simple ainsi que sa robustesse envers la réalisation des géométries les plus complexes. ICEM rassemble deux fonctions: définition de la géométrie des problèmes, le maillage et sa vérification. Pour le maillage, ICEM CFD utilise des structures mono ou multi-blocs en fonction de la géométrie, il permet de générer deux types de maillages, entre autre le maillage tetrahedral et le maillage hexahedral. Pour chaque configuration (géométrie – maillage) il génère des fichiers \*.cfx5 pour doit être exporté ver CFX \_Pré.

## V.7 Courbes des forces et du moment en fonction de $\lambda$











Figure V. 45:Courbes des forces et du moment en fonction de  $\lambda$ 

#### V.8 Courbes de *Cp* en fonction de $\lambda$

Apres la première partie de résultat on a obtenir les meilleur cas pour simuler la turbine Darrieus à trois pales et valider avec l'éolienne Darrieus d'ANNE et la nouvelle structure d'éolienne avec les générateurs de vertex.



Figure V. 46:Coefficients de puissance numériques en fonction de vitesse spécifique

Afin d'analyser les performances de la turbine, les simulations numériques ont été élaborées pour plusieurs vitesses spécifiques  $\lambda$  choisies entre 1 et 4. La figure VI.... est

représentative de l'évolution du coefficient de performance des éoliennes en fonction de la vitesse spécifique.

La turbine de ANNE semble atteindre des valeurs supérieures à les autres turbines tripale avec et sans générateur de vortex pour vitesses spécifiques  $\lambda=1$  jusqu'à  $\lambda=2.4$ . Au-delà de  $\lambda=2.4$  pour l'éolienne lice et presque de  $\lambda=2.6$  pour les autres éoliens, l'inverse se produit

Comme il a été mentionné dans la turbine Darrieus testée numériquement dans ce travail correspond à l'éolienne étudiée par ANNE []. La figure confronte les résultats obtenue par une modélisation numérique de la turbine effectuée par Ane [] et ceux de la présence étude.

Une bonne concordance des résultats numériques a été observée dans les études présentes. Le coefficient de performance maximum CP max pour les études actuelles est de 0,47 et est atteint quasiment à la même vitesse donnée  $\lambda = 2,75$ , en même temps Cp max pour l'étude d'ANNE [] est de 0,42 pour une vitesse donnée  $\lambda = 2,2$  Ces résultats conduisent à la conclusion que la validation est quelque peu satisfaisante afin de poursuivre les calculs.

#### V.9 Contours des vitesses en fonction de $\lambda$



#### V.9.1 Éolienne Simple (pale lisse)

Figure V. 47:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique  $\lambda = 1$ 



Figure V. 48:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique  $\lambda = 2$ 



Figure V. 49:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique  $\lambda = 3$ 



## V.9.2 Éolienne Extrados et Intrados (VGs)





Figure V. 51:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique  $\lambda = 2$ 



Figure V. 52:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique  $\lambda = 3$ 



Figure V. 53:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique  $\lambda = 4$ 

## V.9.3 Éolienne Intrados (VGs)



Figure V. 54:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique  $\lambda = 1$ 



Figure V. 55:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique  $\lambda = 2$ 



Figure V. 56:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique  $\lambda = 3$ 



Figure V. 57:Contour de vitesse pour une vitesse spécifique  $\lambda = 4$ 

#### **Conclusion et Perspectives**

Cette thèse est une investigation numérique d'un écoulement turbulent autour d'un profil NACA 0018 et NACA4415. L'étude numérique a été réalisée à l'aide du code de calcul ANSYS CFX15; ce dernier résout les équations de Navier Stocks moyennées en mode stationnaire pour ce type d'étude d'écoulement. Deux types de contrôle d'écoulement ont été étudiés : un contrôle passif (utilisation de générateurs de vortex, vortiens) et un autre contrôle passif en ajoutant une éolienne en rotation.

Il a fallu dans un premier temps présenter une étude bibliographique constituant plusieurs recherches importantes pour l'acquisition du savoir nécessaire concernant notre domaine. Le deuxième chapitre a donné une vision globale sur le contrôle de la couche limite, et cela pour mettre en évidence l'utilité des vortiens dans les contrôles de la couche limite, l'importance du secteur de sureté et son principe de fonctionnement. Dans le troisième chapitre, une petite entrée sur la mécanique des fluides a été énoncé afin d'ériger les principales équations utilisées, telle que l'équation de Navier-Stockes pour les méthodes finies, une introduction sur l'aérodynamique a été également entamé pour approfondir nos connaissances sur les notions de cette branche. Ensuite vient le quatrième chapitre qui lui, a mis en avant la fonctionnalité de chaque logiciel utilisé (CFD/CFX), les modèles de turbulence utilisés et les étapes d'une conception géométrique ainsi que ses conditions aux limites. Au final, un cinquième chapitre a été fait afin de discuter les résultats obtenus, dans un tableau a été effectué contenant des figures pour les contours de pression des géométries en 2D et 3D pour la visualisation des dégradations de pression aux alentours des profils isolant, les profils des éoliennes et, ensuite deux autres tableaux, cette fois contenant des figures pour les contours de vitesse.

Les résultats obtenus sont bien sûr comparés avec des résultats expérimentaux d'un cas lisse (son contrôle) ou elles semblent être conformes plutôt bien aux données expérimentales et théoriques déjà étudier dans la littérature, en particulier la distribution de la pression autour des profils et la variation de coefficient de portance, trainée est de moment. Cette investigation ; permet de mettre la lumière sur les points suivants :

 Une bonne concordance (quantitative et qualitative) est remarquée entre la courbe de la simulation numérique et celle de l'expérimental.

- Au fur et à mesure que l'angle d'incidence augmente jusqu'au point de décrochage la pression sur l'extrados diminue tandis que la pression sur l'intrados augmente.
- L'utilisation de générateur de vortex couplé avec le profil donne de bons résultats par rapport à celles d'un générateur seul.
- L'ensemble des résultats montre que la zone de sillage est bien établie ou l'écoulement est fortement perturbé. Aussi, un bon accord est obtenu pour les faibles angles d'incidence est à mettre en relation avec le fait qu'il n'y a pas de séparation de couche limite dans ce cas-là, il est à noter que si l'angle d'incidence augmente, un décollement à l'extrados du profil ce produit, ce qui réduit un peu le taux d'accroissement de coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence (Conf 4, 5, 6, 7 et Conf 8).
- Et pour le coefficient de la trainée est directement proportionnel avec l'angle d'incidence du jet et de l'aile ; plus on se rapproche du bord de fuite de GV plus le coefficient de trainée C<sub>x</sub> croit, ce qui prouve que l'effet du sillage augmente fortement la trainée.

\*

Chaque travaille n'est toujours jamais achevé et comme veut la coutume des recommandations et des perspectives sont mis en disposition pour les chercheurs intéressés par comprendre la physique du phénomène étudié dans ce mémoire. Les points qui n'ont pas été étudiés :

- Concrétiser ce travail numérique par une étude expérimentale ;
- Tester d'autre modèle de turbulence avec des maillages plus raffiné ;
- Pour l'étude expérimentale il est intéressant de faire une visualisation pariétale sur les surfaces les profils pour confirmer les résultats obtenus.

# Références bibliographiques

- [1] Ahmed Haroub, 2015. Development of a Low Cost Rotor Blade for a H Darrieus Wind Turbine Haroub, Francis Xavier Ochieng1 and Joseph N. Kamau. Journal of Sustainable Research in Engineering Vol. 2 (3) 2015, 92-99 Journal homepage: www.jkuat-sri.com /ojs/index.php/sri/index.
- [2] Adam MIRECKI, 2005. "Thèse Etude Comparative De Chaînes De Conversion D'énergie Dédiées A Une Eolienne De Petite Puissance".
- [3] Christian Masson ; 28 octobre 2008 Technologie éolienne Département de génie mécanique École de technologie supérieure.
- [4] Ahmad Hemami ; Wind Turbine Technology Associate Of Mcgill University, Montreal, Canada and Iowa Lakes Community College, IA, USA.
- [5] GWEC 2017. Global wind statics.
- [6] Kasbadji Merzouk-N. 1999.Energie. Renouvelable. : Valorisation 209-214.209 Carte des Vents de l'Algérie- Résultats Préliminaires.
- [7] Rabah Hammouche. Office national de la métrologie. Atlas vent de l'Algérie.
- [8] Kasbadji Nachida Merzouk. 2006. Evaluation Du Gisement Énergétique Éolien Contribution À La Détermination Du Profil Vertical De La Vitesse Du Vent En Algérie. Thèse de Doctorat.
- [9] Chellali, F., A. Khellaf, A. Belouchrani, and A. Recioui. 2011. A contribution in the actualization of wind map of Algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15:993–1002.
- [10] S. M. Boudia. 2013. Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen Abou-Bakr Belkaïd, Département de Physique.
- [11] Soumia Rahmouni. 2017. Prospects Of Hydrogen Production Potential From Renewable Resources In Algeria.
- [12] Logiciel Gis.
- [13] Adrar : La ferme éolienne de Kabertène, Un Modèle Réussi D'exploitation Des Energies Renouvelables.

- [14] Nouveau Programme National De Développement Des Energies Renouvelables (2015 2030).
- مشاريع واستراتيجية الطاقات المتجددة -واقع وآفاق الطاقات المتجددة في الجزائر [15]
- [16] S. Balibar. 2005. 'Les Sources d'Energie du 21<sup>ème</sup> Siècle', 594<sup>ème</sup> Conférence de l'Université de Tous Les Savoirs.
- [17] Darrieus, G.1931. Turbine Having Its Rotating Shaft Transverse to the Flow of the Current. U.S. Patent 1,835,018, 8 December 1931.
- [18] Santanu M., Praveen L., Basina A., et Rajagopal V. B. 2017. "Parametric Sensitivity Analysis of Vertical Axis Wind Turbine," Int. J. Mech. Eng. Rob. Res. Vol. 6, No.5.
- [19] Amet E., Maître T., Pellone, C., Achard J-L. 2009. "2D Numerical Simulations of Blade-Vortex Interaction in a Darrieus Turbine" Journal of Fluids Engineering. Vol.131/111103.
- [20] Francesco B., Alessandro B., Ennio A C., Lorenzo F., Sandro M. 2011. "Feasibility Analysis Of A Darrieus Vertical-Axis Wind Turbine Installation In The Rooftop Of A Building" Applied Energy 97 (2012) 921–929.
- [21] M.H. Mohamed, A.M. Ali et A.A. Hafiz. 2015. CFD Analysis For H-Rotor Darrieus Turbine As A Low Speed Wind Energy Converter. Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 18, n. 1, pp. 1-13.
- [22] A. Menchaca Roa. 2011. Analyse Numérique Des Hydroliennes A Axe Vertical Munies D'un Carénage. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble.
- [23] Zhen T H., Zubair M., Ahmed K A. 2011. "Expérimental and Numerical Investigation of the Effects of Passive Vortex Generators on Aludra UAV Performance" Chinese Journal of Aeronautics 24 577-583.
- [24] Sheldahl, R.E. 1981. Comparison Of Field And Wind Tunnel Darrieus Wind-Turbine Data. J. Energy, 5, 254–256.
- [25] Bedon, G.; Castelli, M.R.; Benini, E. 2013. Experimental Tests Of A Vertical-Axis Wind Turbine With Twisted Blades. In Proceedings of the 15th International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Engineering, Istanbul, Turkey, 5–6 December 2013.
- [26] Gabriele B., Castelli M R., Benini E. 2013. "Experimental Tests of a Vertical-Axis Wind Turbine with Twisted Blades" International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol: 7, No:6.
- [27] Biadgo, M.A.; Simonovi´c, A.; Komarov, D.; Stupar, S. 2013. Numerical And Analytical Investigation Of Vertical Axis Wind Turbine. FME Trans. 41, 49–58.
- [28] Normunds J., Sabine U., Janis K. 2016. "Numerical And Experimental Investigation Of H-Darrieus Vertical Axis Wind Turbine" engineering for rural development Jelgava, 25.-27.05.2016.

- [29] M.R. Castelli, S. De Betta and E. Benini. 2012. Effect Of Blade Number On A Straight-Bladed Vertical-Axis Darrieus Wind Turbine. World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 61, n. 13, pp. 305-311.
- [30] LI Q. Maeda T., Kamada Y., Murata J., Furukawa K., yamamoto M. 2014. "Aerodynamic Models and Wind Tunnel for Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbines" Journal of Engineering Vol. 04, Issue 06.
- [31] Taher G. Abu-El-Yazied, Ahmad M. Ali, Mahdi S. Al-Ajmi, Islam M. Hassan. 2015. Effect of Number of Blades and Blade Chord Length on the Performance of Darrieus Wind Turbine. American Journal of Mechanical Engineering and Automation. Vol. 2, No. 1, pp. 16-25.
- [32] Jae-Hoon L., Young-Tae L., Hee-chang L. 2016. "Effect Of Twist Angle On The Performance Of Savonius Wind Turbine" Renewable Energy 89 (2016) 231-244.
- [33] Zhang, L.; Liang, Y.; Liu, X.; Jiao, Q.; Guo, J. 2013. "Aerodynamic Performance Prediction Of Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine Based On CFD". Adv. Mech. Eng. 2013, 2013, doi:10.1155/2013/905379.
- [34] Wolfe, W.P.; Ochs, S.S. 1997. "Predicting Aerodynamic Characteristic of Typical Wind Turbine Airfoils Using CFD"; Technical Report; Sandia National Labs. Albuquerque, NM, USA.
- [35] Launder, B.; Spalding, D. 1972. "Lectures in Mathematical Models of Turbulence"; Academic Press: London, UK.
- [36] Jean-Jacques Chattot. 2011. "Wind Turbine Aerodynamics: Analysis And Design" Int. J. Aerodynamics, Vol. 1, Nos. 3/4.
- [37] G. Vasantha Kumar; K. Sathiya Narayanan; S. K. Aravindhkumar; S. KishoreKumar. 2016. "Comparative Analysis of Various Vortex Generators for a NACA 0012 Aerofoil" ijisset. Volume: 2 Issue: 5.
- [38] Qing'an Li, Takao Maeda, Yasunari Kamada, Junsuke Murata, Kazuma Furukawa, Masayuki Yamamoto 2015. "Effect Of Number Of Blades On Aerodynamic Forces On A Straight-Bladed".
- [39] Paraschivoiu I; Delclauxt F. 1982. "Double Multiple Streamtube Model with Recent Improvements" J. Energy vol. 7, NO. 3.
- [40] M. Douak, Z. Aouachria. 2015. "Starting Torque Study of Darrieus Wind Turbine" International Journal of Physical and Mathematical Sciences. Vol: 9, No: 8, 2015.
- [41] Seyed Mohammad E. Saryazdia and Mehrdad Boroushaki. 2018. "2D Numerical Simulation and Sensitive Analysis of H-Darrieus Wind Turbine" Int. Journal of Renewable Energy Development 7 (1) 23-34.

- [42] Kamyar Jafari;Mohammad Hassan Djavareshkian; behzad Forouzi Feshalami. 2017. "The Effects of Different Roughness Configurations on Aerodynamic Performance of Wind Turbine Airfoil and Blade" Int. Journal of Renewable Energy Development 6 (3) 273-281.
- [43] Yong Ming Dai; Wei-Haur Lam .2009. "Numerical Study Of Straight-Bladed Darrieus-Type Tidal Turbine" Institution of Civil Engineers Energy 162 May 2009 Issue EN2.
- [44] Francesco Balduzzi, Alessandro Bianchini, Riccardo Maleci, Giovanni Ferrara, Lorenzo Ferrari .2015. "Critical Issues In The CFD Simulation Of Darrieus Wind Turbines" Renewable Energy 85.
- [45] Edgar Sousa Carrolo. 2015. Passive Control of Aerodynamic Load in Wind Turbine Blades, University of London.
- [46] Kana Horikiri. 2011. Aerodynamics Of Wind, Ticnico Lisboa.
- [47] Robert Howell, N.Qin, J.Edwards, N.Durrani. 2010. Wind Tunnel And Numerical Study Of A Small Vertical Axis Wind Turbine. Renewable energy 35.
- [48] Arti Tirkey, Yamini Sarthi, K.Patel, R.Sharma, P.K.Sen. 2014. Study On The Effect Of Blade Profile, Number Blade, Reynolds Number, Aspect Ratio On The Performance Of Vertical Axis Wind Turbine. International journal of science, engineering and technology research, volume3, issue 12, December 2014.
- [48] Md Farhad Ismail, Krishna Vijayaraghavan. 2015. The Effects Of Aerofoil Profile Modification On A Vertical Axis Wind Turbine Performance. Energy 80.
- [49] Palanisamy Mohan Kumar, Subramani Anbazhagan, Narasimalu Srikanth and Teik-Cheng Lim. 2017. Optimization, Design, and Construction of Field Test Prototypes of Adaptive Hybrid Darrieus Turbine. Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications.
- [50] Yang Ke, Zhang Lei, XU JianZhong, Simulation of aerodynamic performance affected by vortex generators on blunt trailing-edge airfoils.