



N° d'ordre : GM/2020/2021

# MEMOIRE

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLOME DE : MASTER

Filière : Génie Mécanique  
Option : Energétique

Thème :

**Etude des Performance Aérodynamique des éoliennes  
par le code commercial ANSYS-CFX.**

*Soutenu le : 20/09/2021*

**Par :**

BENALI Abdelchafie  
DRICI Yakoub

**Devant le jury proposé :**

**Président : Dr. GOUIDMI Hamza**  
**Rapporteur : Mr. BELFEGAS Bilal**  
**Examineur : Dr. TAYEBI Tahar**

**2021-2020**

---

# **Remerciements**

*Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*Nous remercions s'adressent envers notre encadreur **Mr. Drici Houssam-Eddine** et **Mr. BELFEGAS Bilal**, professeur à la faculté des sciences et de la technologie de l'Université El Bachir El Ibrahim, de nous avoir proposés ce sujet intéressant et nous avoir fait partager son expérience, ses conseils judicieux et pour sa grande bienveillance, qui a su nous laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de ce travail.*

*Nos remerciements aussi aux les jurys de notre mémoire **Dr. GOUIDMI Hamza** et **Dr. TAYEBI Tahar** et à tous nos enseignants du Filière Génie mécanique.*

*Enfin, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude.*

---

# **D**édicaces

*En préambule, nous souhaitons rendre grâce à Dieu,  
le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la  
force et la patience de mener à bien ce travail*

*Nous dédions cet humble travail*

*A nos chers parents*

*A tous nos amis*

*A tous ceux qui nous ont aidés et encouragés à finir ce  
mémoire.*

---

# **Nomenclatures**

- C<sub>p</sub>** le coefficient de régulation de puissance (sans dimension).
- P** la masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>).
- A** la surface du rotor (m<sup>2</sup>).
- V<sub>1</sub>** la vitesse du vent à l'amont du rotor (m/s).
- P<sub>max</sub>** l'énergie cinétique maximale (KW).
- C<sub>L</sub>** coefficient de portance.
- C<sub>f</sub>** coefficient de traînée.
- Re** Nombre de Reynolds.
- V** vitesse caractéristique du fluide (m/s).
- L** longueur caractéristique (m).
- C<sub>i</sub>** La vitesse absolue (m/s).
- W<sub>i</sub>** La vitesse d'entraînement (m/s).
- u<sub>i</sub>** vitesse relative (m/s).
- K** l'énergie cinétique turbulente (KW).

## ***Symboles Grecs***

- ρ** masse volumique du fluide (kg/m<sup>3</sup>).
- μ** Viscosité dynamique du fluide kg .m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>.
- ω** le taux de dissipation spécifique.
- Φ<sub>1</sub>** les constantes du modèle de Wilcox.
- Φ<sub>2</sub>** les constantes du modèle k-ε.
- μ<sub>t</sub>** La viscosité turbulente kg .m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>.

---

# Liste des figures

---

## Chapitre II

Figure II.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	17
Figure II.2: Schéma d'écoulement de l'air dans une éolienne à axe horizontal non carénée .....	17
Figure II.3: Une éolienne .....	19
Figure II.4: Une éolienne combinant les technologies Darrieus et Savonius .....	19
Figure II.5: l'Eolienne à axe horizontal .....	20
Figure II.6: Fondations de base .....	21
Figure II.7: Le mât de l'éolienne.....	21
Figure II.8: La nacelle et leurs composants .....	22
Figure II.9: Le rotor .....	22
Figure II.10: Le moyeu.....	23
Figure II.11: Caractéristique d'un profil d'aile aérodynamique .....	25
Figure II.12: Ligne de courant sur un profil aérodynamique .....	27
Figure II.13: Forces appliqués sur un profil aérodynamique .....	27

## Chapitre III

Figure III.1: écoulement laminaire .....	31
Figure III.2: écoulement turbulent .....	31
Figure III.3: écoulement tourbillonnaire.....	32
Figure III.4: La couche limite .....	32
Figure III.5: Le développement de la couche limite au Phénomène de décollement .....	33
Figure III.6: Résolution des équations de Navier-Stokes. Modélisation de la turbulence	35

## Chapitre IV

Figure IV.1: Décrochage dynamique.....	42
Figure IV.2: La section du profil d'aile de type (S809) .....	44
Figure IV.3: La Structure du code ANSYS CFX .....	45
Figure IV.4: le domaine d'étude 2D.....	48
Figure IV.5: le domaine intérieur D1 .....	48
Figure IV.6: Le domaine extérieur D2, et leur dimension.....	49
Figure IV.7: Le maillage dans le domaine 1 .....	50
Figure IV.8: Le maillage dans le domaine 2.....	50
Figure IV.9: Le Maillage raffiné autour du profil d'aile .....	50
Figure IV.10: le maillage dans les deux domaines ensemble .....	50
Figure IV.11: Le courbe de l'étude du maillage, le coefficient de traînée en fonction de nombre des nœuds .....	51
Figure IV.12: les conditions aux frontières .....	52
Figure IV.13: Le coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=3 \times 10^5$ ) ...	53
Figure IV.14: Le coefficient de traînée en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=3 \times 10^5$ ) .....	53
Figure IV.15: Le coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=5 \times 10^5$ ) ...	54
Figure IV.16: Le coefficient de traînée en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=5 \times 10^5$ ) .....	54
Figure IV.17: Le coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=6.5 \times 10^5$ ).....	54

Figure IV.18: Le coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=6.5 \times 10^5$ ).....	55
Figure IV.19: Le coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=7.5 \times 10^5$ ).....	55
Figure IV.20: Le coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=7.5 \times 10^5$ ).....	55
Figure IV.21: Le coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=10^6$ ) ....	56
Figure IV.22: Le coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=10^6$ ) .....	56
Figure IV.23: l'éolienne montée sur une tour de 12,192m au milieu de la soufflerie.....	62
Figure IV.24: La géométrie de la pale (S809) .....	62
Figure IV.25: 1ère configuration de géométrie du domaine de calcul en configuration tunnel de soufflerie .....	63
Figure IV.26: 2 <sup>ème</sup> configuration de géométrie du domaine de calcul avec les dimensions vue droite .....	64
Figure IV.27: 3ème configuration de géométrie du domaine de calcul en configuration tunnel de pale isolée sur un demi-moyeu.....	64
Figure IV.28: Le domaine d'étude vue de face .....	65
Figure IV.29: Le rotor .....	65
Figure IV.30: définition des limites du domaine de calcul.....	66
Figure IV.31: Méthode d'échange du type General Grid Interface (GGI) .....	67
Figure IV.32: Le graphe de l'étude du maillage .....	68
Figure IV.33: Le maillage dans tout le domaine vu de face .....	68
Figure IV.34: Le maillage dans tout le domaine .....	68
Figure IV.35: Le maillage dans le rotor vu de face .....	69
Figure IV.36: Le maillage dans le rotor.....	69
Figure IV.37: Le maillage sur la pale .....	69
Figure IV.38: La distribution exponentielle du maillage près des parois de la pale.....	69
Figure IV.39: Convention de mesure des coefficients des forces aérodynamiques.....	70
Figure IV.40: la configuration du domaine de calcul générée.....	70
Figure IV.41: l'évolution du le couple de l'éolienne on fonction de la vitesse du vent .....	72
Figure IV.42: Coefficient Normal en fonction de la vitesse du vent à ( $r/R=95\%$ ).....	73
Figure IV.43: Coefficient tangentielle en fonction de la vitesse du vent à ( $r/R=95\%$ ) .....	73
Figure IV.44: Coefficient tangentielle en fonction de la vitesse du vent à ( $r/R=80\%$ ) .....	73
Figure IV.45: Coefficient Normal en fonction de la vitesse du vent à ( $r/R=80\%$ ).....	73
Figure IV.46: Coefficient Normal en fonction de la vitesse du vent à ( $r/R=63\%$ ).....	73
Figure IV.47: Coefficient tangentielle en fonction de la vitesse du vent à ( $r/R=63\%$ ) .....	73
Figure IV.48: Coefficient Normal en fonction de la vitesse du vent à ( $r/R=47\%$ ).....	74
Figure IV.49: Coefficient tangentielle en fonction de la vitesse du vent à ( $r/R=47\%$ ) .....	74
Figure IV.50: Coefficient tangentielle en fonction de la vitesse du vent à ( $r/R=30\%$ ) .....	74
Figure IV.51: Coefficient Normal en fonction de la vitesse du vent à ( $r/R=30\%$ ).....	74
Figure IV.52: les positions des plans de section ont le long de la pale.....	77
Figure IV.53: Structure du sillage en aval du rotor .....	88

---

# Liste des tableaux

---

Chapitre III	
Tableau III.1: Les coefficients Le modèle k- $\epsilon$ transformé .....	37
Tableau III.2: Les coefficients du modèle K- $\omega$ (Wilcox) .....	38
Tableau III.3: Les coefficients du modèle K- $\omega$ SST (Menter).....	39
Chapitre IV	
Tableau IV.1: L'étude du maillage .....	51
Tableau IV.2: Les conteurs de Vitesse à différents nombres de Reynolds et pour différents angles d'incidences .....	58
Tableau IV.3: Les conteurs de pression à différents nombres de Reynolds et pour différents angles d'incidences .....	59
Tableau IV.4: l'étude du maillage .....	68
Tableau IV.5: Les conteurs de pression autour de la pale.....	75
Tableau IV.6: Les conteurs de vitesse autour toute la pale .....	76
Tableau IV.7: Les conteurs de pression à la position de 30%.....	78
Tableau IV.8: Les conteurs de pression à la position de 47%.....	79
Tableau IV.9: Les conteurs de pression à la position de 63%.....	80
Tableau IV.10: Les conteurs de pression à la position de 80%.....	81
Tableau IV.11: Les conteurs de pression à la position de 95%.....	82
Tableau IV.12: Les conteurs de vitesse à la position de 30% .....	83
Tableau IV.13: Les conteurs de vitesse à la position de 47% .....	84
Tableau IV.14: Les conteurs de vitesse à la position de 63% .....	85
Tableau IV.15: Les conteurs de vitesse à la position de 80% .....	86
Tableau IV.16: Les conteurs de vitesse à la position de 95% .....	87
Tableau IV.17: Les propriétés de la pale 3D du l'éolienne S809.....	92
Tableau IV.18: les résultats avec les écarts entre CFX et l'expérience .....	98

---

# T able des matières

---

<b>Remerciements</b>	
<b>Dédicaces</b>	
<b>Nomenclature</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Table des matières</b>	
<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>

## **Chapitre I : la recherche bibliographique**

I.1	Introduction .....	4
I.2	Recherche Bibliographique .....	4
I.3	Conclusion.....	10

## **Chapitre II : Notions Sur L'Énergie éolienne**

II.1	Introduction .....	14
II.2	Énergies renouvelables et définition .....	14
II.3	La production d'électricité par les énergies renouvelables .....	15
II.3.1	Les centrales hydrauliques .....	15
II.3.2	Le solaire photovoltaïque .....	16
II.3.3	Les éoliennes .....	16
II.4	Définition de l'énergie éolienne .....	16
II.4.1	Puissance récupérable par une éolienne à axe horizontal. Limite de Betz ....	17
II.4.2	Les types des éoliennes .....	18
II.4.2.1	Eoliennes à axe vertical .....	18
II.4.2.2	Eoliennes à axe horizontal.....	20
II.4.3	Construction d'une éolienne à axe horizontal .....	21
II.5	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	23
II.6	Paramètres caractéristiques d'un profil aérodynamique .....	25
II.7	Écoulement autour d'un profil .....	26
II.8	Les Forces aérodynamique .....	27
II.9	Conclusion .....	28

## **Chapitre III : Modélisation Mathématique du problème**

III.1	Introduction .....	31
-------	--------------------	----



III.2	Les Différents types d'écoulements.....	31
III.3	Notion sur la couche limite.....	32
III.3.1	Phénomène de décrochage de la couche limite .....	32
III.4	Nombre de Reynolds .....	33
III.5	Les formulations mathématiques du problème.....	34
III.5.1	Modélisation de la Turbulence .....	34
III.5.2	RANS (Reynolds Average Navier-Stokes équations) .....	35
III.5.2.1	Équation de quantité de mouvement .....	35
III.5.2.2	Équation de continuité .....	35
III.5.3	Approches pour la modélisation des pales en rotation.....	36
III.5.4	Les Modèles de turbulences.....	37
III.5.4.1	Modèle de turbulence K- $\omega$ standard.....	37
III.5.4.2	Model SST K- $\omega$ Menter (Shear Stress Transport) .....	38

## **Chapitre VI : Simulation et Résultats**

IV.1	Introduction .....	42
IV.2	cadre de l'étude.....	44
IV.3	Le profil d'aile.....	44
IV.4	Le modèle aérodynamique .....	45
IV.5	Présentation du code de calcul .....	45
IV.5.1	Structure du code ANSYS CFX .....	45
IV.6	Les données expérimentales .....	47
IV.7	La simulation en 2D .....	48
IV.7.1	Le domaine d'étude .....	48
IV.7.2	Maillage et les conditions aux limites .....	49
IV.7.2.1	La création du Maillage.....	49
IV.7.2.2	L'étude du maillage.....	51
IV.7.3	Les Conditions aux limites .....	52
IV.7.4	Résultats et discussions .....	53
IV.7.5	Conclusion.....	60
IV.8	La simulation en 3D .....	62
IV.8.1	Domaine de calcul et le maillage.....	63
IV.8.1.1	Domaine de calcul .....	63
IV.8.1.2	Maillage du volume de calcul.....	66
IV.8.1.3	L'étude de maillage .....	67
IV.8.2	Les Conditions aux limites .....	70
IV.8.3	Résultats et discussions .....	72
IV.8.4	Conclusion.....	89
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>91</b>

# Introduction Générale

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18e siècle, puis du pétrole au milieu du 20e siècle. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne ; la lumière solaire excitant les photopiles ; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau, ...etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie. L'aérogénérateur est basé sur le principe des moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort (15 km/h minimum), les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité. L'énergie éolienne est aujourd'hui l'énergie propre la moins coûteuse à produire, ce qui explique l'engouement fort pour cette technologie. Les recherches en cours pourraient lui laisser pendant encore de nombreuses années cette confortable avancée.

De nombreux travaux de recherche ont été effectués pour déterminer la structure fine de l'écoulement à travers les pales des éoliennes à axe horizontal. A titre d'exemples, nous citons quelques travaux effectués dans ces dernières années, tels que celui de Chandrala et al. ([1], 2012), qui porte sur l'analyse aérodynamique d'un rotor éolien du type NACA 4402 en comparant les résultats de calcul CFD avec les mesures pour différents angles d'attaque, le travail de Yi lei He et al. ([2], 2014) qui s'intéresse à l'optimisation du profil d'aile S809[3], utilisant un algorithme multi-objectifs MOGA ([4],2006), ainsi que le travail de MEMON et al. ([5], 2012), qu'ont utilisé le modèle de surface active pour la modélisation et la simulation des écoulements autour du profil éolien S809 [3], ont comparé les résultats de simulation à ceux obtenus par des essais expérimentaux à l'aide d'une soufflerie. En outre. Ces travaux sont basés sur la résolution des équations de Navier-Stokes moyennées en utilisant le modèle RANS, pour la turbulence.

Le mémoire est divisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous ferons une recherche bibliographique sur les éoliennes et leurs caractéristiques et les moyens possibles d'étudier des recherches similaires et d'acquérir des connaissances générales dans notre thème de mémoire.

Dans le deuxième chapitre, nous parlerons des énergies renouvelables, en particulier de l'énergie éolienne et de son importance ces dernières années, puis nous nous concentrerons et parlerons des composants des éoliennes et de leurs formes aérodynamiques, puis les propriétés aérodynamiques.

Dans le troisième chapitre nous allons voir la modélisation mathématique et numérique du notre problème d'étude et aussi nous allons voir des différents modèles turbulents et quel modèle nous allons choisir dans notre étude.

Dans le quatrième chapitre, nous allons faire une étude qui est portée sur la simulation numérique à l'aide du logiciel Ansys-CFX pour comprendre et analyser la structure fine de l'écoulement autour d'un profil éolien du type S809 et de déterminer aussi les caractéristiques aérodynamiques en 2D et en 3D. En plus, la simulation CFD sert à calculer les efforts aérodynamiques et à dégager des corrélations nécessaires.

## Bibliographie

---

- [1]Chandrala, M., Choubey, A., & Gupta, B. (2012). Aerodynamic analysis of horizontal axis wind turbine blade. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(6), 1244-1248.
- [2]He, Y., & Agarwal, R. K. (2014). Shape optimization of NREL S809 airfoil for wind turbine blades using a multiobjective genetic algorithm. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2014.
- [3]Jourieh, M. (2007). *Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien* (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [4]Locteau, H., Raveaux, R., Adam, S., Lecourtier, Y., Héroux, P., & Trupin, É. (2006, September). Approximation de courbes par Algorithme Génétique Multi-Objectif. In *CIFED 2006* (pp. 151-156). SDN06.
- [5]Memon, A. A., Abbasi, H. U., ABBASI, A., & ASAD, M. (2012). Modelling and Simulation of flow around Wind Turbine Blade by using Actuator Surface Model. *Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series)*, 44(4).
-

# Chapitre I

## La Recherche Bibliographique

---

### Sommaire

---

I.1	Introduction .....	4
I.2	Recherche Bibliographique .....	4
I.3	Conclusion.....	10

---

## I.1 Introduction :

L'étude des performances aérodynamiques des éoliennes a beaucoup suscité les chercheurs pendant ces dernières années à cause des applications potentielles dans la production de l'électricité à base de l'énergie cinétique du vent qui rentre dans la catégorie des énergies renouvelables propres à l'environnement. Des nombreux travaux de recherches ont été effectués pour déterminer et améliorer les performances aérodynamiques de l'écoulement d'un fluide à travers les pales des éoliennes. A titre d'exemples, nous citons quelques travaux effectués dans ces dernières années,

## I.2 Recherche bibliographique :

En 1993, **F. Menter. [1]**, a présenté Deux nouvelles versions du modèle de turbulence à deux équations  $k-\omega$  seront présentées. La première version est Le modèle BSL est identique au modèle de Wilcox dans les 50 % internes de la couche limite mais passe progressivement au modèle  $k-\epsilon$  standard (dans une formulation  $k-\omega$ ) vers le bord de la couche limite. La deuxième version du modèle est appelée modèle Shear-Stress Transport (SST). Les deux modèles sont testés pour un grand nombre de champs de flux différents. Les résultats du modèle BSL sont similaires à ceux du modèle original  $k-\omega$  w, mais sans la dépendance freestream indésirable. Les prédictions du modèle SST sont également indépendantes des valeurs de freestream mais montrent un meilleur accord avec les données expérimentales pour un écoulement de couche limite à gradient de pression défavorable.

Ensuite en 2007, **D.D. Chao, et al. [2]**, ont étudié les effets de la modification de la partie intérieure du rotor expérimental NREL Phase VI à l'aide d'une version épaissie et émoussée à bord de fuite (ou à dos plat) du profil aérodynamique de conception S809 à l'aide d'une méthode de Navier-Stokes compressible, tridimensionnelle et moyenne de Reynolds. Les résultats numériques du rotor de base de la phase VI sont comparés aux mesures en soufflerie obtenues à des vitesses de flux libre de 5, 7 et 10 ms<sup>-1</sup>. Ils ont trouvé que les résultats de cette étude démontrent qu'un profil de pale de bord de fuite épais et émoussé est viable comme pont pour relier les exigences structurelles aux performances aérodynamiques dans la conception des futurs rotors d'éoliennes.

Après **Q. Liao, et al. [3]**, des modèles mathématiques bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D) ont été mis en œuvre pour simuler l'écoulement de fluide autour du profil aérodynamique NREL S809. Les équations de Navier-Stokes compressibles

(Reynolds-Averaged) en régime permanent sont adoptées et résolues numériquement. Les résultats de la simulation montrent que des structures de vortex plus détaillées ont été obtenues en utilisant le modèle de turbulence tridimensionnel (SpalartAllmaras) avec un angle d'attaque élevé par rapport au modèle de turbulence à deux équations ( $k-\omega$  SST), et les performances aérodynamiques de la simulation sont en bon accord avec les données expérimentales disponibles, et il a été montré que le modèle La turbulence 3D est plus capable de montrer les propriétés 3D de l'écoulement de séparation de la couche limite que le modèle ( $k-\omega$  SST), et il est plus efficace pour prédire les propriétés du décrochage. Parallèlement, les résultats de la simulation révèlent également que les caractéristiques tridimensionnelles du flux de séparation jouent un rôle très important dans les performances aérodynamiques de l'aile après le décrochage statique.

**Y. Bazilevs, et al. [4]**, ont présenté en 2 parties une collection des méthodes numériques, qui a le potentiel pour une application réussie à la modélisation et à la simulation de rotors d'éoliennes. Dans la partie 1 de cet article, ils ont concentré sur : Les bases de la modélisation géométrique et de l'analyse de la construction géométrique appropriée pour les rotors d'éoliennes ; La formulation de la mécanique des fluides et son adéquation et sa précision pour les écoulements turbulents rotatifs ; et le couplage d'un flux d'air et d'un corps rigide rotatif. Et dans la partie 2, ils ont concentré sur la discrétisation structurelle des pales d'éoliennes et les détails des procédures de calcul de l'interaction fluide-structure. Les méthodes développées sont appliquées à la simulation du rotor d'éolienne offshore de référence NREL de 5 MW. Les simulations ont été effectuées dans des conditions réalistes de vitesse du vent et de vitesse du rotor et à pleine échelle spatiale. La validation par rapport aux données publiées a été présentée et les possibilités du cadre de calcul nouvellement développé ont été illustrées sur plusieurs exemples.

Un an après **B. Sanderse, et al. [5]**, ont étudié les différentes techniques de calcul de dynamique des fluides pour modéliser le rotor et le sillage. Concernant la modélisation du rotor, ils ont discuté les avancées récentes dans l'approche actionneur généralisée et le modèle direct, dans la mesure où elles attribuent à la description du sillage. Pour le sillage, l'accent est mis sur les différents modèles de turbulence qui sont utilisés pour étudier les effets de sillage sur les turbines en aval.

Après, en 2012, **Bekhti, A., et O. Guerri. [6]**, ont présenté les résultats d'une étude des effets de la rugosité sur les performances aérodynamiques d'un profil de pale d'éolienne. Cette étude est effectuée par simulation numérique de l'écoulement turbulent autour du

profil avec la résolution des équations moyennées de Navier-Stokes. La turbulence est représentée par le modèle SST  $k-\omega$  de Menter. Les calculs sont exécutés en stationnaire à l'aide de Code Saturne, un code libre d'EDF basé sous Linux. Dans une première étape, le Code Saturne est appliqué à un profil S809 de surface lisse placé sous différentes incidences, de  $0^\circ$  à  $25^\circ$ . Ensuite, les simulations sont poursuivies pour un profil rugueux pour étudier les effets de la rugosité sur les caractéristiques aérodynamiques du profil. Les résultats obtenus sont en bonne corrélation avec les données expérimentales publiées.

En 2013, **O. Eisele, et al. [7]**, ont étudié et discutés les effets de la turbulence de l'écoulement et des écarts de mesure des essais en soufflerie, pour permettre de prendre en compte les effets dans le processus de conception des pales de rotor. Et ils ont utilisé Les résultats des simulations CFD avec divers modèles de turbulence en combinaison avec des mesures en soufflerie afin d'évaluer l'impact de ces écarts. Ils ont trouvé dans les résultats globaux de cette étude ont été qu'il y a un écart significatif entre les mesures de performance du profil aérodynamique parmi les tunnels vent modernes qui peuvent affecter le processus de conception des pales d'éoliennes. On pense que la turbulence et les influences transitoires sont les raisons de cette contradiction.

La même année, **T. Gerhard, et al. [8]**, ont placé dans leur étude, des turbines fabriquées avec un axe horizontal de 3 mètres de diamètre sur le toit de l'Université de Siegen, et autour de la turbine ont été installés trois anémomètres et capteurs de direction du vent. Le couple et la vitesse de rotation sont dérivés de la puissance électrique d'un générateur calibré connecté au réseau. Le champ d'écoulement a été prédit à l'aide de simulations Navier-Stokes avec une moyenne de Reynolds. Deux modèles de turbulence ont été utilisés : un modèle standard  $k-\omega$ -SST et un modèle de transition laminaire/turbulent. Ils notent que l'accord entre la cinématique prédite analytiquement et les CFD amont et aval du rotor est tout à fait satisfaisant. Ils concluent à partir du rapport traction/portance de la section de pale que le facteur de puissance varie en fonction du modèle de perturbation choisi. De plus, le facteur de puissance déterminé expérimentalement est beaucoup plus faible que prévu à tous égards.

Après **R. Petrova, et al. [9]**, ont présente une analyse de modèle 3D d'une seule pale pour une éolienne à axe horizontal. Ils ont analysé se concentre sur le calcul de la pression du vent sur la pale sous différentes vitesses et directions du vent dans l'intervalle de  $[-45, +45]$  degrés. En utilisant des simulateurs de soufflerie virtuelle basés sur l'approche de la dynamique des fluides numérique (CFD). De plus, l'étude porte sur une analyse modale



linéaire de la pale chargée soumise aux charges aérodynamiques, au poids mort et à la vitesse angulaire du rotor. Ils ont modélisé la pale sous la forme d'une coque épaisse, d'une coque composite et d'éléments finis spatiaux solides (EF). Les résultats de l'étude indiquent que différentes solutions sont possibles à mettre en œuvre pour obtenir une rigidité presque égale au niveau des volets le long de la pale.

Ensuite **A.O. Gomes, et al. [10]**, ont examiné le comportement aérodynamique d'un profil aérodynamique S809. Des tests ont été effectués dans une soufflerie pour mesurer les profils de coefficient de traînée sous des écoulements à grande vitesse allant jusqu'à 14 m/s, avec des nombres de Reynolds compris entre environ  $Re = 11\ 400$  et  $Re = 135\ 400$ . Des angles d'attaque allant de  $0^\circ$  à  $20^\circ$  ont été testés, par incréments de deux degrés dans le sens horaire et antihoraire. Ils ont observé que le coefficient de traînée du profil aérodynamique diminuait à mesure que le nombre de Reynolds augmentait pour tous les angles d'attaque analysés. Le décrochage dynamique de la voilure a été déterminé (coefficient de portance maximum). Lors des essais, le décrochage dynamique s'est produit à environ  $16^\circ$  dans le sens des aiguilles d'une montre.

**N.B. Munir, et al. [11]**, ont étudié le profil des pales du vent de phase VI du Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) et avec l'utilisation du (ANSYS CFX et le modèle CAO 3D paramétré de NREL Phase VI) dans l'analyse 3D des forces aérodynamiques, ils ont comparé les résultats 3D avec les résultats expérimentaux 2D obtenues par NREL au NASA pour la pale d'éolienne NREL Phase VI. Le modèle de turbulence gamma-thêta de transport de contrainte de cisaillement (SST) et la condition d'angle de lacet de 0 degré sont adoptés pour l'analyse CFD. Pour l'étude de cas, ils ont successivement modifié sept vitesses de vent différentes, avec une vitesse de rotation de pale constante. Les résultats ont montré que bien que l'étude actuelle concorde bien avec les valeurs expérimentales NREL 3D, il existe un écart important entre les données expérimentales NREL 2D et l'étude 3D actuelle, ce qui suggère qu'en cas d'analyse 3D de la force aérodynamique de la surface de la lame, il est préférable d'utiliser les valeurs NREL 3D au lieu des valeurs expérimentales 2D.

En 2016, **B. Ernst, et al. [12]**, dans leurs étude actuelle a examiné l'effet du traitement de la turbulence sur l'évaluation des performances des éoliennes basée sur la CFD en augmentant séquentiellement la profondeur de modélisation. Un processus pour une simulation CFD 2D et 3D est décrit, qui est basé sur la géométrie de l'éolienne de référence NREL 5 MW. Il s'avère que les principales différences entre les calculs entièrement

turbulents et les simulations de modèles de transition avec et sans modèle de correction de courbure supplémentaire se produisent dans la région de la pale interne, et une augmentation des régimes d'écoulement 3D. Leurs résultats ont conduit à la conclusion que la simulation utilisant le modèle de transition en conjonction avec le modèle de correction de courbure devrait être préférée. La puissance de sortie générée par cette configuration correspond également bien au calcul du Blade Élément Momentum (BEM).

Quatre mois après, **F. Ziane, et al. [13]**, ont fait une simulation numérique de l'interaction fluide structure de l'écoulement autour d'un profil aérodynamique NACA0012 oscillante a été faite par le code de calcul ANSYS (CFX), pour voir l'effet de l'angle d'attaque moyen et une comparaison entre deux modèles de turbulence  $k-\varepsilon$  et  $k-\omega$ . Ils ont obtenu les résultats qui ils ont comparé avec des données expérimentales de (Lee et Gerontakos) à base nombre de Reynolds ( $10^5$ ), et Ils ont trouvé qu'il est en bon accord, et ils ont montré que l'instabilité de l'écoulement est plus importante aux grandes incidences. Et aussi il a été observé qu'il d'après la comparaison entre les résultats des modèles de turbulence  $k-\omega$  et  $k-\varepsilon$ , le modèle  $k-\omega$  donne un bon accord par rapport le modèle  $k-\varepsilon$ .

Ensuite en 2019, **I. Sossey-Alaoui, B. and RADI, [14]**, dans ses études, Leurs objectifs ont de simuler numériquement l'écoulement aérodynamique autour d'une pale d'éolienne. Ils ont effectué deux simulations à l'aide d'ANSYS CFX ; Tout d'abord, ils ont exposé une partie de la pale de l'éolienne au flux d'air, en utilisant trois modèles de turbulence différents, sous divers angles d'attaque afin de choisir le bon modèle. Ensuite, ils ont utilisé ce modèle dans une simulation 3D d'une pale d'éolienne pour démontrer cette performance aérodynamique dans des champs CFD complexes. Enfin, en comparant leurs résultats en CFD avec les résultats expérimentaux, ils ont conclu que ANSYS-CFX est une référence fiable, surtout pour les angles d'attaque bas en utilisant le modèle turbulent SST  $k-\omega$ , cette simulation démontre aussi que le profil aérodynamique S809 a une meilleure performance aérodynamique.

Après un an en 2020, **J. Smily, et al. [15]**, ont étudié une simulation numérique du profil aérodynamique S809 a été réalisé par ANSYS CFX en utilisant plusieurs modèles de turbulence ( $k-\omega$ ,  $k-\varepsilon$  et SST), et à différents angles d'attaque. Par la suite les coefficients de pression calculés sont comparés à des données expérimentales pour valider la précision de la simulation et choisir le modèle de turbulence adéquat. Leurs résultats montrent que les trois modèles de turbulence précités donnent les mêmes valeurs de  $C_p$ , mais le plus précise est le modèle SST, et ils ont observé qu'il les résultats de la simulation sont satisfaisants par

apport aux résultats expérimentaux. Cependant, certains points de comparaison ont présenté des erreurs non négligeables qu'on peut les réduire en utilisant un maillage plus raffiné autour du profil.

Dans la dernière étude dans cette année **B. Radi, et al. [16]**, ont présenté tout d'abord la validation de la simulation numérique de la voilure S809 réalisée avec ANSYS CFX en comparant les coefficients de pression, calculés pour différents modèles de turbulence, avec des données expérimentales. Ensuite, ils ont introduit les incertitudes, en utilisant une approche probabiliste, pour déterminer l'influence des variables d'entrée sur les coefficients de sortie aérodynamiques. Ils ont abordé l'étude probabiliste avec la méthode des surfaces de réponse et l'analyse Six Sigma afin de pouvoir quantifier l'effet des variables aléatoires d'entrée sur les réponses, et ils ont détecté que la variable d'entrée qui influence considérablement le comportement aérodynamique est l'angle d'attaque.

### **I.3 Conclusion:**

Nous avons conclu dans les études précédentes qu'il existe des phénomènes physiques qui se produisent au niveau des éoliennes, Ces phénomènes affectent les performances aérodynamiques des éoliennes. Il existe également des méthodes et moyens spécifiques pour étudier ces phénomènes et identifier leurs natures afin de résoudre les problèmes qui entravent le travail et les performances des éoliennes. C'est pourquoi nous avons choisi d'étudier ce sujet, d'une part pour découvrir et savoir quels phénomènes se produisent à la suite du travail des éoliennes, et d'autre part, car il existe de nombreuses études sur ce sujet en particulier.

---

**Bibliographie**

---

- [1] Menter, F. (1993, July). Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. In *23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference* (p. 2906).
- [2] Chao, D. D., & Van Dam, C. P. (2007). Computational aerodynamic analysis of a blunt trailing-edge airfoil modification to the NREL Phase VI rotor. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 10(6), 529-550.
- [3] Liao, Q., Cui, W., Li, L., & Zhang, Y. (2009, January). Numerical Simulation of Boundary Layer Separation Flow for Airfoil in a Wind Turbine. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 43796, pp. 95-99).
- [4] Bazilevs, Y., Hsu, M. C., Akkerman, I., Wright, S., Takizawa, K., Henicke, B., ... & Tezduyar, T. E. (2011). 3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part I: Geometry modeling and aerodynamics. *International journal for numerical methods in fluids*, 65(1-3), 207-235.
- [5] Sanderse, B., Van der Pijl, S. P., & Koren, B. (2011). Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics. *Wind energy*, 14(7), 799-819.
- [6] Bekhti, A., & Guerri, O. (2012). Influence de la rugosité sur les caractéristiques aérodynamiques d'un profil de pale d'éolienne. *Journal of Renewable Energies*, 15(2), 235-247.
- [7] Eisele, O., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C. N., & Paschereit, C. O. (2013, June). Experimental and Numerical Investigation of Inflow Turbulence on the Performance of Wind Turbine Airfoils. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 55294, p. V008T44A016). American Society of Mechanical Engineers.
- [8] Gerhard, T., Sturm, M., & Carolus, T. H. (2013, June). Small horizontal axis wind turbine: Analytical blade design and comparison with rans-prediction and first experimental data. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 55294, p. V008T44A005). American Society of Mechanical Engineers.
- [9] Petrova, R., Lemu, H. G., & Larion, I. (2013, November). Study of horizontal axis wind turbine blade in virtual wind tunnel simulator. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 56253, p. V04BT04A050). American Society of Mechanical Engineers.
- [10] Gomes, A. O., Brito, R. F., Rosa, H. M. P., Campos, J. C. C., Tibiriça, A. M. B., & Treto, P. C. (2014). Experimental analysis of an S809 airfoil. *Revista de Engenharia Térmica*, 13(2), 28-32.
- [11] Munir, N. B., Lee, K., Huque, Z., & Kommalapati, R. R. (2015, June). a study of aerodynamics force evaluation of horizontal axis wind turbine (hawt) blade using 2d and 3d comparison. In *ASME Power Conference* (Vol. 56604, p. V001T11A005). American Society of Mechanical Engineers.

- [12] Ernst, B., Seume, J. R., & Herbst, F. (2016, June). Effect of Turbulence and Transition Models on the CFD-Based Performance Prediction of Wind Turbines. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 49873, p. V009T46A008). American Society of Mechanical Engineers.
- [13] Ziane, F., Abdellah el-hadj, a., & Danouni, s. (2016). analyse de l'interaction fluide structure d'un profil aerodynamique oscillante.
- [14] Sossey-Alaoui, I., & RADI, B. Une étude aérodynamique d'une pale d'éolienne à axe horizontal. *Incertitudes et fiabilité des systems multiphysiques*.
- [15] Smily, J., Radi, B., & Sossey-Alaoui, I. (2020). Simulation numérique et validation expérimentale de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne de type S809. *Incertitudes et Fiabilité des Systèmes Multiphysiques*.
- [16] Smily, J., & Radi, B. (2021). Probabilistic Study of S809 Airfoil for Wind Turbine Blade. *Advances in Theoretical and Applied Mechanics*, 13(1), 1-9.
-

# Chapitre II

## Notions sur l'énergie éolienne

### Sommaire

---

II.1	Introduction .....	14
II.2	Énergies renouvelables et définition .....	14
II.3	La production d'électricité par les énergies renouvelables .....	15
II.3.1	Les centrales hydrauliques .....	15
II.3.2	Le solaire photovoltaïque .....	16
II.3.3	Les éoliennes .....	16
II.4	Définition de l'énergie éolienne .....	16
II.4.1	Puissance récupérable par une éolienne à axe horizontal. Limite de Betz ....	17
II.4.2	Les types des éoliennes .....	18
II.4.2.1	Eoliennes à axe vertical .....	18
II.4.2.2	Eoliennes à axe horizontal .....	20
II.4.3	Construction d'une éolienne à axe horizontal .....	21
II.5	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	23
II.6	Paramètres caractéristiques d'un profil aérodynamique .....	25
II.7	Ecoulement autour d'un profil .....	26
II.8	Les Forces aérodynamique .....	27
II.9	Conclusion .....	28

---

## II.1 INTRODUCTION

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Dans les pays industrialisés, ce système est aujourd'hui très centralisé même si les évolutions de réglementation conduisent à une amorce de décentralisation de la production.

Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Ainsi, la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> [1]. En outre, la part du prix du combustible dans le coût de production est prépondérante ce qui engendre, compte tenu du caractère sensible de ces matières premières, des oscillations continues et une instabilité à long terme.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

## II.2 Énergies renouvelables et définition :

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Mais dans les pays industrialisés, dès le XIX<sup>ème</sup> siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses. Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables.

De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès. Même au sein de l'Europe occidentale de tels "sites isolés" ne sont pas exceptionnels. Actuellement deux milliards et demi d'habitants, principalement dans les zones rurales des pays en développement, ne consomment que 1 % de l'électricité produite dans le monde [2].

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets
- Elles sont inépuisables
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux
- Elles offrent une importante indépendance énergétique.

Compte tenu de deux usages importants de l'énergie, chaleur et électricité, on classera les énergies renouvelables en deux groupes.

## **II.3 La production d'électricité par les énergies renouvelables :**

### **II.3.1 Les centrales hydrauliques :**

L'hydroélectricité, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de la force de l'eau, est apparue au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle dans la continuité des moulins qui exploitaient directement la force motrice de l'eau. Appelée la "houille blanche", elle a été synonyme d'un développement économique très important.



### **II.3.2 Le solaire photovoltaïque :**

Le rayonnement solaire représente une ressource renouvelable d'énergie énorme, de loin la plus importante. L'énergie reçue à la surface de la terre varie, par m<sup>2</sup>, de 1100 kWh

L'effet photovoltaïque permet de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique. La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, à la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil. Au zénith, le soleil délivre environ 1kW/m<sup>2</sup> de rayonnement sur un capteur placé perpendiculairement à ses rayons, au niveau de la mer.

Malgré le fait que depuis les premières mises en œuvre, les prix ont chuté d'un facteur 100, il faut un ensoleillement important pour arriver à un coût encore insuffisamment compétitif du kWh. C'est pourquoi pour l'instant, la production photovoltaïque est plutôt réservée à l'alimentation en site isolé d'équipements et d'habitations où le coût élevé du raccordement au réseau la rend compétitive. On estime la puissance photovoltaïque installée dans le monde à environ 1400 MW (en 2001) pour une énergie produite estimée à 1,4 TWh.[3].

### **II.3.3 Les éoliennes :**

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses. Son potentiel est énorme, il est estimé à 30.1015 kWh pour l'ensemble du globe et entre 5 et 50.1012 kWh/an pour la part terrestre exploitable.[4]

### **II.4 Définition de l'énergie éolienne :**

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



Figure II.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent

#### II.4.1 Puissance récupérable par une éolienne à axe horizontal.

##### Limite de Betz :

La masse d'air qui traverse le rotor d'une turbine éolienne à axe horizontal non carénée fonctionnant en milieu ouvert dispose d'une énergie cinétique proportionnelle à la masse d'air et au carré de la vitesse du flux d'air. Ce flux exerce alors une pression sur les pales du rotor qui entraîne ce dernier dans un mouvement de rotation, créant ainsi un couple moteur au niveau de l'arbre de transmission horizontal.

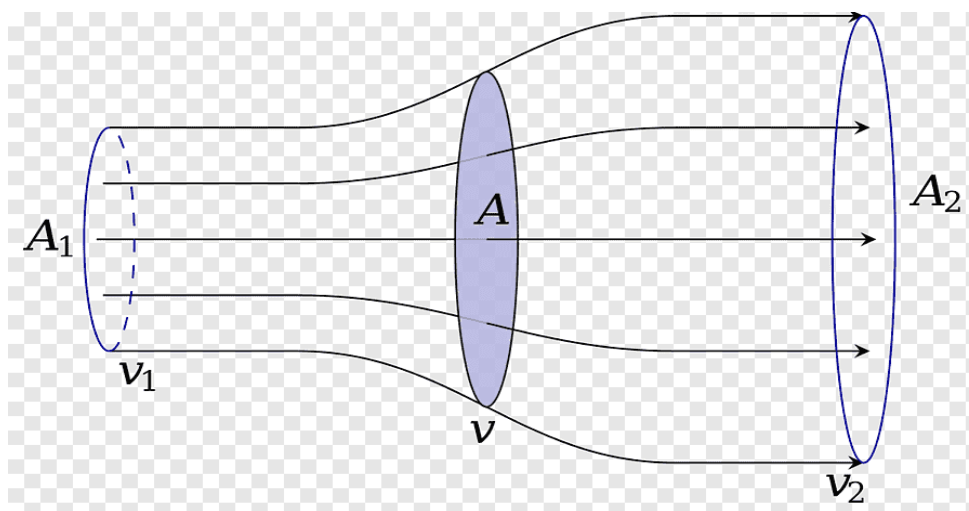


Figure II.2: Schéma d'écoulement de l'air dans une éolienne à axe horizontal non carénée

La puissance aérodynamique disponible au niveau de l'arbre moteur s'exprime avec la formule :

$$P_{\text{méca}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot V_1^3 \cdot A$$

**C<sub>p</sub>** : désigne le coefficient de régulation de puissance, ou rendement aérodynamique, de la machine ( $C_p < 1$ ).

**ρ** : étant la masse volumique de l'air.

$A$  : la surface du rotor.

$V_1$  : la vitesse du vent à l'amont du rotor.

La vitesse du vent en sortie de la turbine ne peut pas être nulle, ce qui signifie que toute l'énergie cinétique ne peut pas être récupérée. Albert Betz<sup>13a</sup> a démontré au début du 20<sup>ème</sup> siècle que dans le cas d'une turbine à axe horizontal non carénée fonctionnant en milieu ouvert, la puissance utile disponible sur l'arbre moteur à l'aval du rotor ne peut pas dépasser  $16/27^{\text{ème}}$  (59%) de la puissance mécanique maximale récupérable, soit :

$$P_{\text{méca}} < \frac{16}{27} P_{\text{max}}$$

$P_{\text{max}}$  représente l'énergie cinétique maximale « théorique » du flux d'air qui traverse la surface du rotor, soit :

$$P_{\text{max}} = \frac{1}{2} \rho \cdot V_1^3 \cdot A$$

En pratique, on préfère, pour des raisons d'optimisation technico-économique, limiter la puissance récupérée au-delà d'une certaine vitesse du vent, dite vitesse nominale. Pour cela, on réduit volontairement le rendement aérodynamique de façon à ce que la puissance mécanique récupérée sur l'arbre de la turbine soit sensiblement constante au-delà de la vitesse nominale. Pour cela, la turbine dispose d'un système de régulation aérodynamique assuré soit de façon passive par le profil des pales dont l'angle d'attaque est fixe (système « stall »), mais de moins en moins utilisé, soit par des pales dont l'angle d'attaque est variable (système « pitch control »).

La puissance électrique fournie par l'aérogénérateur en sortie de la chaîne de génération d'énergie est le résultat de la puissance mécanique récupérée sur l'arbre de la turbine après déduction des pertes mécaniques et électriques inhérentes à la machine, l'ensemble de ces pertes électromécaniques représentant quelques pour-cent (de 2 à 5% selon la vitesse du vent) de la puissance mécanique

## **II.4.2 Les types des éoliennes :**

### **II.4.2.1 Eoliennes à axe vertical :**

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, un ingénieur français Georges Darrieus et un architecte inventeur Sigurd Savonius déposent plusieurs brevets relatifs à la transformation de l'énergie mécanique du vent grâce à des éoliennes à axe vertical. Le fonctionnement d'une éolienne Darrieus repose sur l'effet de portance d'un profil ou d'une aile soumise à la force d'un vent relatif, lequel va entraîner le profil ou l'aile dans un mouvement de rotation autour

d'un axe vertical. L'éolienne Savonius comporte deux ou plusieurs godets ou profils demi-cylindriques, lesquels sont mis en rotation autour d'un axe vertical sous l'effet du vent.



Figure II.5: Une éolienne du type Darrieus



Figure II.4: Une éolienne type Savonius



Figure II.3: Une éolienne combinant les technologies Darrieus et Savonius

Par la suite, à partir des années 1970, différents inventeurs ont modélisé des profils d'aile plus ou moins sophistiqués combinant les technologies Darrieus et Savonius. Les avantages des éoliennes à axe vertical sont principalement :

- Fourniture d'un couple moteur et donc démarrage de la production d'électricité à faible vitesse de vent dans le cas de l'éolienne Savonius.
- Emplacement des composants électromécaniques à la base de l'éolienne donc plus accessibles.
- Impact sur le paysage qui semblerait mieux maîtrisé, bien que cet aspect soit discutable lorsqu'on le rapporte à une puissance nominale équivalente.
- Toutefois, les éoliennes à axe vertical présentent plusieurs inconvénients parmi lesquels :
  - Des efforts importants (poussée transversale ou oblique) supportés par le roulement en pied de mât. Ces efforts sont atténués en plaçant des haubans en haut du mât qui vont par ailleurs accroître la consommation d'espace au sol autour de la machine.
  - Absence de couple de démarrage dans le cas de l'éolienne Darrieus, sauf à disposer d'un régulateur électronique de puissance.
  - La difficulté de régulation aérodynamique en fonction de la vitesse du vent, du fait du profil non réglable du rotor en mouvement.

Dans ces conditions, le développement des éoliennes à axe vertical s'est limité jusqu'à présent à la fabrication de prototypes ou dans quelques rares opportunités à la fabrication en petite série de machines dont la puissance unitaire ne dépasse pas quelques dizaines de kW. Le développement du petit éolien installé sur les bâtiments pourrait représenter un marché de « niche » et s'accompagner de la mise en œuvre d'éoliennes à axe vertical de faible puissance unitaire (de l'ordre du kW).

#### II.4.2.2 Eoliennes à axe horizontal :

L'histoire des turbines à axe horizontal commence dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, mais c'est surtout à partir des années 1970 que les budgets de R&D et les efforts des constructeurs d'éoliennes ont convergé vers l'architecture comportant trois pales face au vent, communément appelée modèle « danois » \*la figure ci-après\*

Aujourd'hui, la commercialisation d'éoliennes à axe horizontal est segmentée en fonction de la puissance unitaire des machines<sup>18</sup>

- De 50 watts à 2 kW : il s'agit de micro-éoliennes équipant les bâtiments individuels,
- De 2 kW à 40 kW : ce sont les petites éoliennes installées sur les bâtiments agricoles, tertiaires ou industriels, les bâtiments isolés, par exemple les refuges en altitude,
- De 40 kW à 999 kW : éoliennes de puissance moyenne pouvant être connectées sur les réseaux de distribution publique d'électricité, les réseaux insulaires qui présentent souvent une faible puissance de court-circuit,
- De 1 MW à plusieurs MW de puissance unitaire : grandes éoliennes. Généralement regroupées pour former des installations de

production d'électricité, communément appelées « fermes éoliennes », elles sont destinées à être raccordées sur les réseaux de distribution publique Moyenne Tension (HTA) ou sur le réseau de Transport (HTB), dans le cas des parcs éoliens les plus puissants. De nos jours, les grandes éoliennes représentent, de très loin, la plus large part du marché.

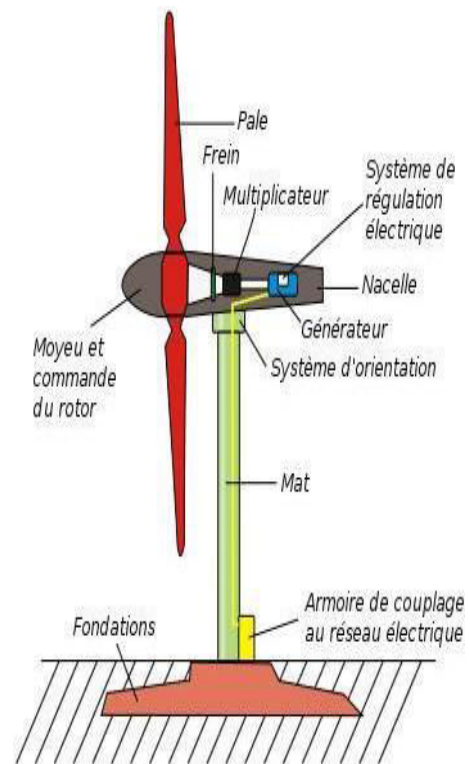


Figure II.4: l'Eolienne à axe horizontal

Les premières applications offshore (en mer) arrivent dans les années 1990. Elles adoptent, comme à terre, la technologie tripale à axe horizontal, avec des puissances et des diamètres de turbines de plus en plus élevés, aujourd'hui 7 MW et 160 m.

### II.4.3 Construction d'une éolienne à axe horizontal :

#### Fondations de base :

Les fondations nécessaires à l'implantation d'une éolienne occupent une surface comprise entre 200 et 300 m<sup>2</sup> sur une profondeur de plusieurs mètres. Il faut environ 60 tonnes d'acier pour le ferrailage et jusqu'à 600 m<sup>3</sup> de béton, soit environ 1'400 tonnes. Sur ces fondations il faut ancrer solidement dans le béton la virole d'ancrage, cette pièce circulaire métallique hérissée de tiges filetées sur son pourtour sur lesquelles sera fixée la première section du mât de l'éolienne.



Figure II.5: Fondations de base.

#### Mât :

Le mât est un tube faiblement conique, le plus souvent en acier, parfois en béton. Sa hauteur doit être un peu supérieure au diamètre des pales afin que celles-ci soient à l'abri des perturbations dues au relief immédiat. Sa hauteur dépasse largement 100 mètres pour les plus grandes éoliennes. Le diamètre à la base peut dépasser 5 mètres. Ce mât est constitué de trois ou quatre sections qui sont assemblées sur place. L'intérieur du mât abrite les câbles de commande et de connexion du courant, un système d'échelles pour accéder au sommet, voire même un ascenseur pour les plus grandes éoliennes. Au pied du mât se trouve un transformateur qui convertit le courant produit par la turbine dans la tension compatible avec celle du réseau.



Figure II.6: Le mât de l'éolienne

### La nacelle :

Une nacelle carénée montée à la cime du mât. Elle repose sur un roulement comportant un mécanisme d'orientation face au vent : le « yaw ». Dans la nacelle sont embarqués l'arbre moteur, les roulements et paliers, l'éventuel multiplicateur de vitesse, le générateur électrique, son convertisseur électronique de puissance, les composants auxiliaires : frein mécanique, pompes et circuits hydrauliques, ventilateurs et circuit de conditionnement de l'air, armoires de régulation aérodynamique et de puissance électrique, etc. L'anémomètre, indispensable à la régulation aérodynamique, la balise d'éclairage, etc. sont fixés sur la partie supérieure de la nacelle, La nacelle peut peser plusieurs centaines de tonnes.

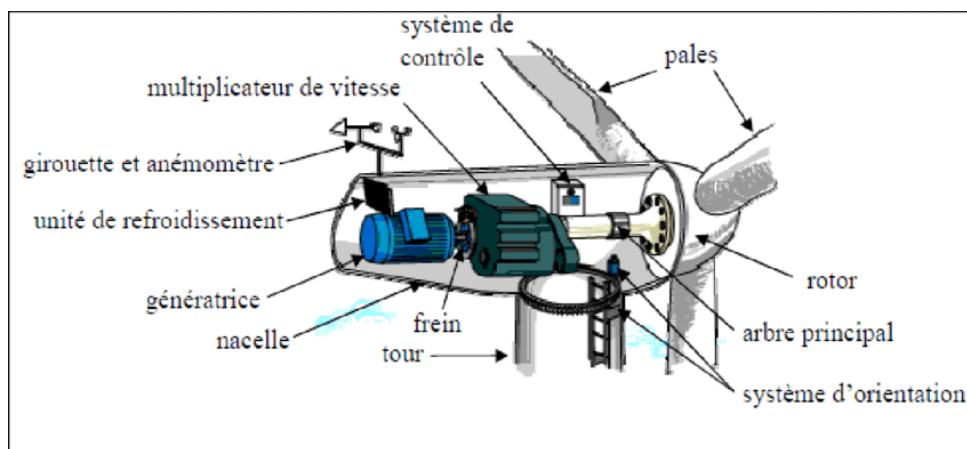


Figure II.7: La nacelle et leurs composants.

### Le rotor :

Le rotor est une gigantesque hélice à trois pales orientables. Elles sont le plus souvent en fibre de verre et en fibre de carbone. Une pale peut atteindre 70 m. de longueur et peser jusqu'à près de 30 tonnes. Elles ont le profil d'une aile d'avion, arrondi sur le bord d'attaque, plat sur le bord de fuite. Elles sont faiblement vrillées, ce qui signifie que leur incidence par rapport au vent varie du centre vers l'extrémité. En tournant à une vitesse comprise entre 12 et 20 tours/minute, la vitesse de l'extrémité d'une pale peut dépasser 500 km/h ! La force centrifuge qui s'exerce sur les pales en rotation nécessite un solide arrimage sur le moyeu.



Figure 8 : Le rotor.

Le rotor en mouvement est comparable à un gyroscope qui s'oppose à tout changement d'orientation. Or, il faut constamment maintenir le rotor face au vent. Un système mécanique automatique entraîne le changement d'orientation de la nacelle afin que le rotor reste toujours

bien orienté face au vent. Cet effet gyroscopique est important et chaque changement d'orientation du rotor induit de puissantes contraintes mécaniques sur les pales et le moyeu qui les supporte.

#### **Le moyeu :**

Le moyeu supporte les pales du rotor. Il est soumis à toutes les contraintes mécaniques exercées par le rotor. C'est une pièce d'acier solide et massive. Il est solidaire de l'axe de rotation appelé "arbre lent", dont la vitesse de rotation, qui correspond à celle du rotor, est comprise entre 15 et 30 tours/minute. Il comprend aussi le système qui permet de faire varier le pas des pales en fonction de la force du vent. Un puissant système de freinage à disque est installé sur l'axe du rotor qui permet de l'arrêter lorsque le vent devient trop tempétueux.



Figure II.9: Le moyeu.

## **II.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :**

### **Avantages :**

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

➤ L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO<sub>2</sub> a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050 [5]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [5]. « L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO<sub>2</sub> ».

➤ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier. • Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21



mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17,5 mille tonnes de Nox. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.

➤ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.

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

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

➤ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [5].

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

➤ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [5].

➤ Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [6].

➤ Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [6].

### **Inconvénients :**

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

➤ L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.

➤ Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.

➤ L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [5]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.

➤ La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes [5].

➤ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [5].

## II.6 Paramètres caractéristiques d'un profil aérodynamique

Les paramètres aérodynamiques des profils dépendent fortement des caractéristiques géométriques des profils d'ailes qui se présentent selon la (Figure II.10)

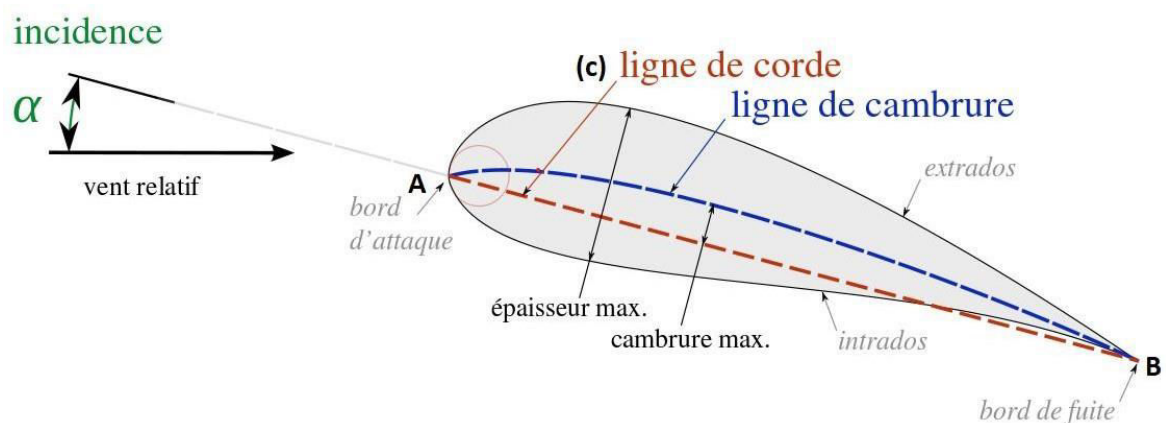


Figure II.10: Caractéristique d'un profil d'aile aérodynamique.

**A** : bord d'attaque

**B** : bord de fuite.

**C** : corde de profil : Droite reliant le bord d'attaque au bord de fuite (segment AB)

La flèche maximale  $f$  : L'écart maximum entre la corde et la ligne moyen

Épaisseur relative ( $E$ ) : est le rapport de l'épaisseur maximum à la corde de profil.

$\alpha$  : Angle d'incidence (angle d'attaque) : angle formé par la corde de profil et la direction d'écoulement à l'infinie.

Il a noté que la portance générée et les caractéristiques de décrochage dépendent fortement de la géométrie du profil, les paramètres géométriques qui ont un effet important sur les caractéristiques aérodynamique d'un profil comprennent.

➤ **Effet du rayon de bord d'attaque :**

Il est défini comme étant le rayon du cercle centré sur une ligne tangente à la première cambrure de bord d'attaque reliant tangentiellement des points de la partie inférieure et supérieure du profil avec le bord d'attaque. Il a un effet significatif sur la séparation de la couche limite ou le décrochage caractéristique d'un profil aérodynamique.

➤ **Effet de la corde moyenne :**

Le lieu équidistance entre l'intrados et l'extrados définit la ligne moyenne. La forme de cette ligne est très importante pour déterminer les caractéristiques aérodynamiques d'un profil. Dans un écoulement subsonique, les profils cambrés générant de la portance même à incidence nulle, contrairement aux profils symétriques.

## **II.7 Écoulement autour d'un profil :**

Une pale est définie comme étant une poutre dont l'enveloppe est profilée. En d'autres termes, toute section d'une pale doit présenter un profil aérodynamique. En général, ce profil est légèrement bombé sur la face supérieure et plutôt plat sur la face inférieure. Quand les particules d'air passent à travers le profil, ce dernier force les lignes de courant à se courber autour de la géométrie comme le montre la Figure II.11. La ligne de courant qui divise le fluide qui passe par-dessus du profil de celui qui passe par dessous est appelée ligne de courant de stagnation, illustrée par la figure 2.4. Au point de stagnation, la vitesse est nulle.

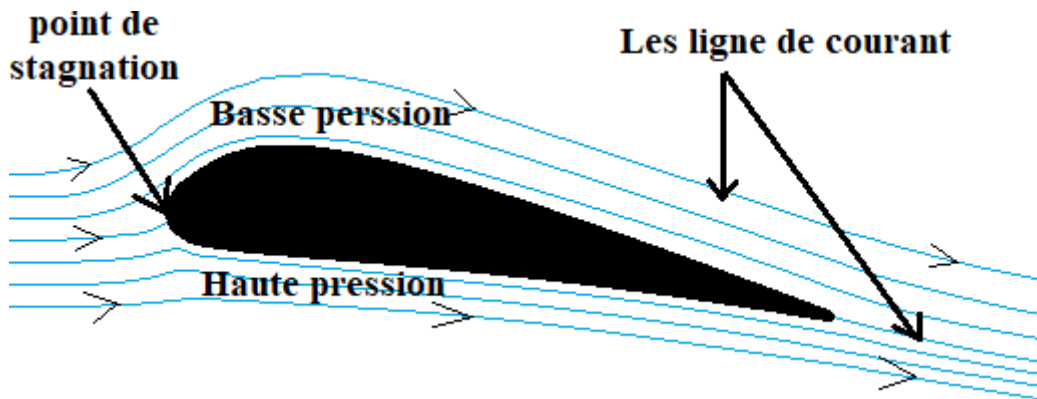


Figure II.11: Ligne de courant sur un profil aérodynamique.

## II.8 Les Forces aérodynamique :

Ainsi, les gradients de pression sur les faces du profil créent une différence de pression entre la face supérieure et la face inférieure comme le montre la figure (Ligne de courant et champ de pression sur un profil aérodynamique).

Cette différence de pression se traduit par une force de réaction, notée  $F$ , et par un moment noté  $M$ , que l'écoulement exerce sur le profil. La force  $F$  possède deux composantes : une première composante dans la direction parallèle à la direction de la vitesse du vent amont  $V_1$ , appelée force de traînée,  $D$ , et une deuxième composante dans la direction perpendiculaire appelée force de portance,  $L$ . Le moment  $M$  est connu à un point situé sur la corde,  $c$ , du profil à une distance de  $c/4$  à partir du bord d'attaque. Ce moment est positif lorsqu'il agit pour faire tourner le profil dans le sens des aiguilles d'une montre.

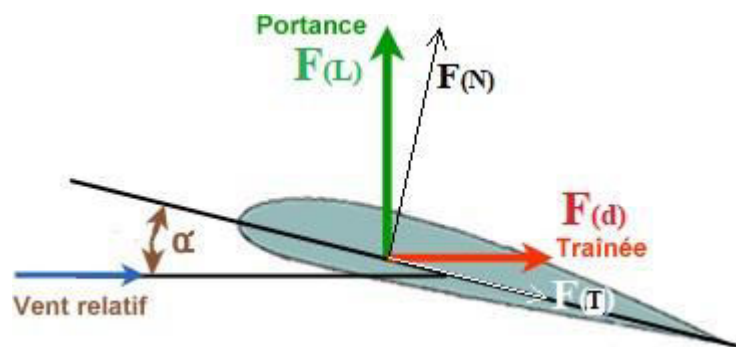


Figure II.12: Forces appliqués sur un profil aérodynamique.

**La force de portance :**

Est la force, due à la suppression –dépression, exercée sur le profil lors de son vol, qui est orienté perpendiculairement à la direction de l'écoulement. C'est cette force qui assure la sustentation de l'avion. Elle est proportionnelle au coefficient de portance  $C_L$ . Ce coefficient est la caractéristique principale du profil d'aile [7]. Il est proportionnel à l'angle d'incidence. Son intensité est donnée par :

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

**La force de traînée :**

Elle constitue la principale source de la résistance à l'avancement : est une composante parallèle à la direction de déplacement de la force générée par l'écoulement autour d'un profil. La traînée est une source de performances aérodynamiques. Pour l'avion, la traînée est compensée par la poussée des moteurs. La traînée est donc un obstacle à la vitesse de l'aile car elle le ralentit [7]. Elle est proportionnelle à un coefficient de traînée  $C_X$  son intensité est donnée par :

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho V^2 C}$$

**II.9 Conclusion :**

Dans cette partie, nous avons montré l'importance accrue de l'énergie éolienne comme source d'énergie renouvelable et son potentiel de développement important, notamment grâce à l'industrialisation du secteur éolien et à la nécessité d'augmenter la part des énergies renouvelables dans notre consommation énergétique. Étant donné que l'énergie éolienne produite est mise sur les marchés énergétiques, les profils prévisionnels de la production électrique doivent être fiables et précis.

**Bibliographie**

---

- [1] site Internet d'Electricité de France, [www.edf.fr](http://www.edf.fr)
- [2] Site Internet de l'association de conseil en énergie et environnement de Franche- Comté, AJENA, <http://perso.wanadoo.fr/ajena/>
- [3] Multon, B. (2003). Production d'énergie électrique par sources renouvelables. *Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Electrique*.
- [4] Multon, B. (1999, January). L'énergie électrique : analyse des ressources et de la production. In *Journées de la section électrotechnique du club EEA 1999* (p. 22p).
- [5] Camblong, H. (2003). *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable* (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).
- [6] Mahdaoui, H., & HARROUZ, A. (2017). *Simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents GSAP* (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draia-ADRAR).
- [7] Hansen, M. (2015). *Aerodynamics of wind turbines*. Routledge.
-

# Chapitre III

---

## Modélisation Mathématique du problème

### Sommaire

---

III.1	Introduction .....	31
III.2	Les Différents types d'écoulements.....	31
III.3	Notion sur la couche limite.....	32
III.3.1	Phénomène de décrochage de la couche limite .....	32
III.4	Nombre de Reynolds .....	33
III.5	Les formulations mathématiques du problème.....	34
III.5.1	Modélisation de la Turbulence .....	34
III.5.2	RANS (Reynolds Average Navier-Stokes équations) .....	35
III.5.2.1	Équation de quantité de mouvement .....	35
III.5.2.2	Équation de continuité.....	35
III.5.3	Approches pour la modélisation des pales en rotation.....	36
III.5.4	Les Modèles de turbulences.....	37
III.5.4.1	Modèle de turbulence K- $\omega$ standard.....	37
III.5.4.2	Model SST K- $\omega$ Menter (Shear Stress Transport) .....	38

---

### III.1 Introduction

Pour étudier quel phénomène physique doit être utilisé les équations mathématiques qui correspondent au comportement du phénomène dans l'espace et le temps

Dans cette étude, on s'intéresse à la simulation numérique de l'écoulement autour d'un rotor éolien à profil du type S809 soumis à la vitesse du vent sous un angle d'incidence donné  $\alpha$ . L'écoulement est supposé bidimensionnel axisymétrique, instationnaire et pleinement turbulent.

En mécanique des fluides, le fluide est un milieu continu, ce qui nous fait utiliser les lois de conservation à savoir :

- Conservation de masse.
- Conservation d'énergie.
- Conservation de la quantité de mouvement.

Ce chapitre expose les équations mathématiques générales gouvernant l'écoulement illustré dans plusieurs ouvrages de mécanique de fluide.

### III.2 Les Différents types d'écoulements

On appelle Écoulement le déplacement de l'air par rapport à un objet. On distingue trois grands types d'écoulement.

#### a. Écoulement laminaire :

Les particules d'air glissent parfaitement les unes sur les autres sans échanges de particules entre elles. Elles suivent un mouvement rectiligne et parallèle.

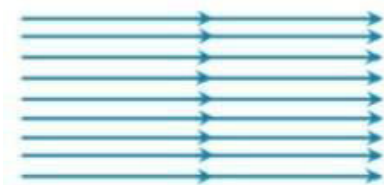


Figure III.1: écoulement laminaire

#### b. Écoulement turbulent :

Les particules d'air ont des trajectoires quasiment parallèles entre elles, mais qui ne sont plus rectilignes, tout en se déplaçant globalement dans le même sens à la même vitesse.



Figure III.2: écoulement turbulent



### c. Écoulement tourbillonnaire :

L'écoulement est très désordonné, les particules se mélangent et ne suivent ni une trajectoire rectiligne ni parallèle, et certaines particules peuvent remonter le courant et former ainsi des tourbillons.



Figure III.3: écoulement tourbillonnaire

### III.3 Notion sur la couche limite

L'air a une certaine viscosité c'est-à-dire qu'une couche d'air qui déplace en traine la couche voisine avec laquelle elle est en contact. Par rapport au profil, l'air en contact est la couche limite la couche d'air dans laquelle la vitesse évolue de 0 vers la vitesse de l'écoulement. L'ors qu'elle perd de son énergie la couche limite de vient turbulente puis décolle aspirée par la dépression.

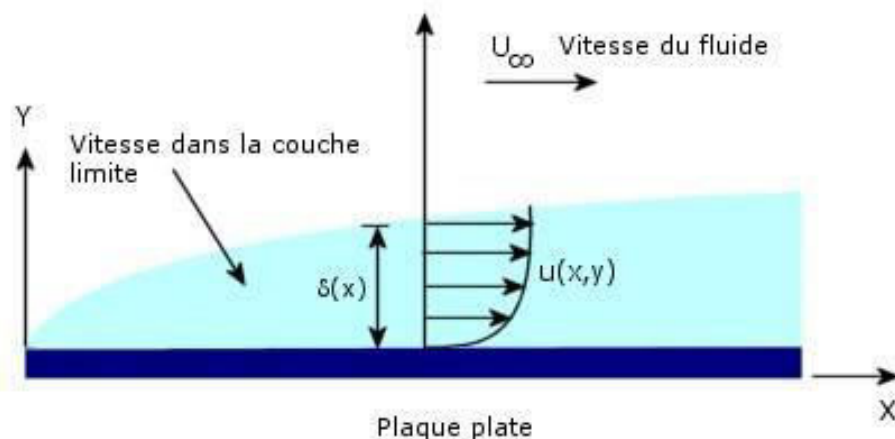


Figure III.4: La couche limite

#### III.3.1 Phénomène de décrochage de la couche limite :

Le phénomène de décollement se produit lorsqu'une couche limite se développe en présence d'un gradient de pression dit adverse, c'est-à-dire un gradient de pression tel que la pression croît dans le sens de l'écoulement. Une telle situation peut se rencontrer par exemple dans le cas d'un écoulement en régime subsonique à travers un divergent. Dans une telle géométrie l'écoulement ralentit ce qui se traduit par une diminution de la vitesse extérieure dans le sens de l'écoulement et par conséquent, en vertu de la relation de Bernoulli, par une augmentation de la pression dans le sens de l'écoulement. Comme les variations de pression suivant  $y$  sont négligeables dans la couche limite, on retrouve le gradient de pression positif au voisinage de la paroi, dans la zone de faible vitesse. Si ce

gradient de pression est suffisamment fort, il va diminuer la quantité de mouvement des particules fluides qui se déplacent au voisinage de la paroi dans une proportion telle que la vitesse de ces particules va finir par s'annuler puis par devenir négative : on dit alors que la couche limite décolle.

Comme les variations de pression suivant  $y$  sont négligeables dans la couche limite, on retrouve le gradient de pression positif au voisinage de la paroi, dans la zone de faible vitesse. Si ce gradient de pression est suffisamment fort, il va diminuer la quantité de mouvement des particules fluides qui se déplacent au voisinage de la paroi dans une proportion telle que la vitesse de ces particules va finir par s'annuler puis par devenir négative : on dit alors que la couche limite décolle.

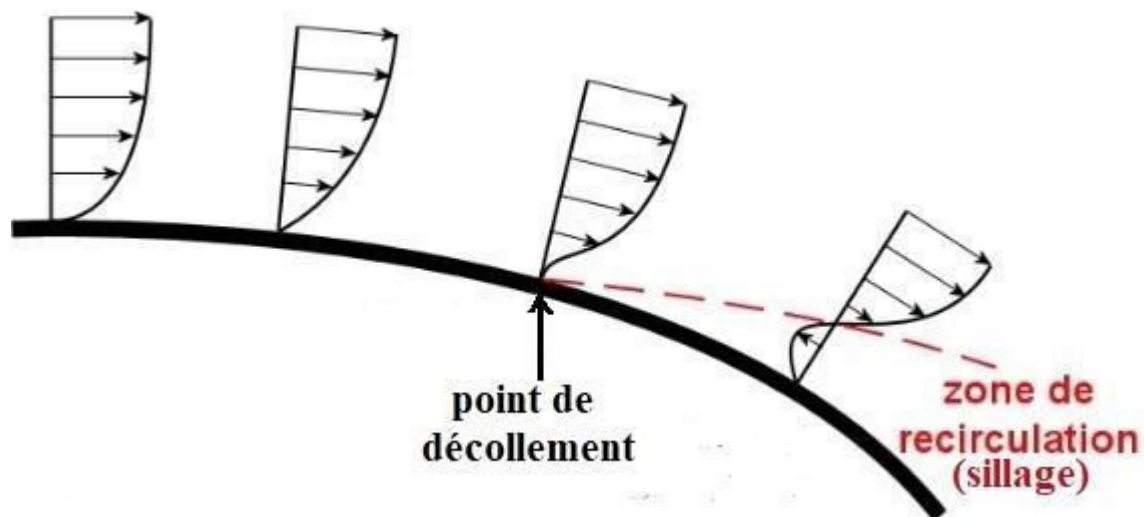


Figure III.5: Le développement de la couche limite au Phénomène de décollement

### III.4 Nombre de Reynolds :

Osborne Reynolds ingénieur anglais spécialiste de l'hydrodynamique a mis en évidence un nombre sans dimension caractéristique de la nature de l'écoulement d'un fluide (1883) : le nombre de Reynolds. Ce nombre qui porte son nom est le rapport entre les forces d'inertie des molécules du fluide, et les forces de viscosité de ce fluide. La valeur de  $Re$  dépend des dimensions du corps (longueur ou corde), de la vitesse de déplacement ( $V$ ) et de la viscosité cinématique du fluide ( $\nu$ ). L'intérêt initial de ce nombre est de pouvoir comparer l'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'une canalisation ou autour d'un obstacle solide.

**Re** est généralement très faible dans les milieux denses et visqueux, et plus élevé dans les milieux fluides et peu denses. En aéronautique, **Re** est généralement exprimé en Millions ( $10^6$ )

Et On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot L}{\mu}$$

**V** : vitesse caractéristique du fluide.

**$\rho$**  : masse volumique du fluide.

**$\mu$**  : viscosité dynamique du fluide.

**L** : longueur caractéristique (le cas d'un profil aérodynamique  $l = c$ )

### III.5 Les formulations mathématiques du problème

Les phénomènes d'écoulement et de transport sont régis par les principes de base de conservation tel que la conservation de masse, mouvement et de l'énergie. Tous ces principes de conservation sont résolus selon le modèle de fluide qui donne un ensemble d'équations aux dérivées partielles.

#### III.5.1 Modélisation de la Turbulence :

L'écoulement turbulent à travers le profil aérodynamique est simulé par l'intermédiaire des équations instantanées de Naviers Stocks, l'écoulement est considéré Tridimensionnel 3D, Fluide newtonien, incompressible et stationnaire. Les équations de continuité et de conservations de quantité de mouvement sont décrit par l'intermédiaire des équations moyennées de Reynolds.

Bien que la résolution des équations de Navier-Stokes soit désormais le seul moyen de simuler le comportement très complexe d'un écoulement réel instationnaire et visqueux, le domaine de validité est limité par les hypothèses posées pour la résolution des termes visqueux. La simulation des écoulements turbulents, est un problème difficile à résoudre, surtout pour les applications d'écoulement autour de rotor. La Figure III.6 résume les différentes méthodes utilisées pour la modélisation de la turbulence dans les équations de Navier-Stokes. Elles sont décrites brièvement par la suite.

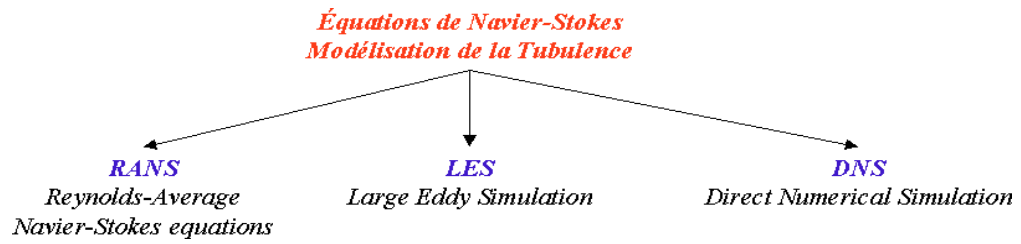


Figure III.6: Résolution des équations de Navier-Stokes. Modélisation de la turbulence

### III.5.2 RANS (Reynolds Average Navier-Stokes équations)

Connues aussi comme méthodes statistiques, les modèles RANS représentent l’approche la plus répandue pour la résolution des équations de Navier-Stokes. Elles procèdent directement au moyennage des équations de Navier-Stokes en redéfinissant les variables comme la sommation de deux valeurs : une valeur moyenne et une valeur fluctuante.

#### III.5.2.1 Équation de quantité de mouvement :

Deuxième loi de Newton indique que le taux de changement de quantité de mouvement d'une particule de fluide est égal à la somme des forces agissant sur une particule. Les forces agissant sur le corps sont une combinaison des deux forces de surface et du corps. Lorsque cette loi est appliquée pour fluide newtonien (contrainte visqueuse est proportionnelle aux taux de déformation) équations résultantes sont appelés équations de Navier Stokes [1].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} &= \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v v}{\partial y} + \frac{\partial \rho v w}{\partial z} &= \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho v w}{\partial y} + \frac{\partial \rho w w}{\partial z} &= \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial w} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

u, v, w : représentés les composants cartésiens de la vitesse.

$\mu$  : la viscosité dynamique du fluide.

#### III.5.2.2 Équation de continuité :

Le principe de conservation de la masse indique que le taux d’augmentation de la masse dans un élément fluide est égal au taux net de flux de masse dans un élément fluide. L'application de ce principe physique à un résultat du modèle de fluide dans une équation différentielle appelés équation de continuité [1]. L'équation de continuité pour un fluide compressible peut être écrite comme suit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

$\rho$  : représente la densité.

$u_i$  : la vitesse du fluide.

### III.5.3 Approches pour la modélisation des pales en rotation :

Dans les calculs d'écoulements dans les turbomachines ou d'éolienne en particulier, on retrouve souvent des domaines stationnaires (i.e. conduite d'amenée, volute, distributeur, aspirateur ou bien nacelle et tour) et des domaines en rotation (i.e. région entourant les pales du rotor).

En présence de pales animées d'un mouvement de rotation, la composition vectorielle des vitesses à l'intérieur d'une machine tournante est la suivante :

$$C_i = u_i + W_i$$

La vitesse absolue  $C_i$  correspond à la vitesse d'une particule de fluide mesurée dans le repère fixe. La vitesse d'entraînement  $W_i$ , correspondant à la mise en mouvement du rotor, est exprimée par :

$$W_i = \Omega_i \times r_i$$

Dans le repère mobile lié au rotor, la même particule présente une vitesse relative  $u_i$  et  $r_i$  étant la distance à l'axe et  $\Omega_i$  la vitesse angulaire du rotor. L'introduction de la vitesse relative permet de ramener l'étude de l'écoulement autour des rotors mobiles à celle de l'écoulement autour des mêmes rotors immobilisés artificiellement. Le repère relatif ou système de coordonnées tournant est le plus indiqué pour l'étude d'un rotor éolien mobile. Pour les pales fixes les équations seront identiques avec la condition de vitesse de rotation nulle. Les avantages du repère relatif sont nombreux :

- L'écoulement relatif est stationnaire dans la plupart des cas.
- Les conditions aux limites peuvent être appliquées plus facilement.
- Les profils de vitesse ainsi que les couches limites sont semblables à ceux que l'on observait avec un repère fixe.

Finalement, les équations de continuité et de quantité de mouvement peuvent être exprimées en mouvement relatif :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + 2\omega \times u + \omega \times \omega \times r = - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right)$$

Les équations précédentes permettent de décrire le comportement du fluide de manières générales. Dans le cas d'une turbomachine multi-étages ou d'une turbine éolienne, une simulation complète de la machine (sur 360°) reste encore du domaine de l'exception, les temps de calculs étant encore très longs. Afin de gagner du temps, des hypothèses supplémentaires sont nécessaires, car lorsqu'on réalise des simulations de plusieurs de ces composantes ou de la turbine complète, il est nécessaire d'utiliser des interfaces, pour connecter un domaine stationnaire á un autre en rotation. Par exemple, le domaine des pales d'éolienne et celui de la nacelle de fixation.

### III.5.4 Les Modèles de turbulences

Les équations moyennées, complétées de modèles de fermeture convenables, fournissent ainsi un système qui conserve la caractéristique fondamentale du modèle de Navier-Stokes, tout en ayant recouvré un déterminisme mathématique statistique.

#### Equation de k :

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma_{k2} \mu_t) \times \frac{\partial k}{\partial x_j}]$$

#### Equation de ω : [2]

$$\rho u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{y_2}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_2 \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma_{\omega 2} \mu_t) \times \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + 2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

$\sigma_{k2}$	$\sigma_{m2}$	$Q_2$	$Q^*$	$K$	$Y_1$
1.0	0.856	0.0828	0.09	0.41	$\frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} k^2}{\sqrt{\beta^*}}$

Tableau III.1: Les coefficients Le modèle k-ε transformé

#### III.5.4.1 Modèle de turbulence K-ω standard :

Le modèle k-ω standard de Wilcox [3] est très efficace dans la zone proche de paroi dans la couche limite. Ce modèle fait intervenir deux équations de transport : une pour l'énergie cinétique turbulente k et l'autre pour le taux de dissipation spécifique ω. Le taux de dissipation spécifique est défini par :

$$\omega = \frac{K}{\varepsilon}$$

**Equation de k :**

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = r_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma_{k1} \mu_t) \times \frac{\partial k}{\partial x_j}]$$

**Equation de  $\omega$  :**

$$\rho u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{y_1}{v_t} r_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_1 \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma_{\omega1} \mu_t) \times \frac{\partial \omega}{\partial x_j}]$$

$\sigma_{k1}$	$\sigma_{\omega1}$	$\beta_1$	$\beta^*$	K	$Y_1$
1.0	0.856	0.0828	0.09	0.41	$\frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega1} k^2}{\sqrt{\beta^*}}$

Tableau III.2: Les coefficients du modèle K- $\omega$  (Wilcox)

**III.5.4.2 Modèle SST K- $\omega$  Menter (Shear Stress Transport):**

Le modèle de turbulence SST k- $\omega$  de Menter [4] basé sur transport des contraintes de cisaillement est très répandu dans les codes de CFD modernes, car il offre de bonnes performances pour une vaste gamme de problèmes. Il fait notamment bonne figure dans les zones de fort gradient de pression adverse. La force de ce modèle réside dans sa capacité à exploiter les avantages des deux modèles de turbulence les plus populaires, le modèle k- $\epsilon$  [5] pour ses bonnes performances dans les zones d'écoulement libre et le second k- $\omega$  standard de Wilcon [3] pour sa pertinence dans les zones cisailées, plus particulièrement dans les couches limites de la paroi.

Le modèle SST k- $\omega$  représente le transport des contraintes de cisaillement turbulent et donne des prédictions très précises sur le commencement et l'évolution des séparations du flux sous les contraintes du gradient de pression.

Une combinaison des deux modèles est possible via une formulation mixte k - $\epsilon$  /k- $\omega$ . C'est l'approche suivie par Menter [4] pour mettre au point son modèle (appelé aussi SST-Menter) via une fonction de transfert F1. Cette fonction permet de sélectionner le modèle Wilcox k -  $\omega$  dans la sous-couche visqueuse et la région logarithmique et basculer progressivement vers le modèle k- $\epsilon$  à mesure qu'on s'approche de la zone de sillage.

**Equation de k :**

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma_k \mu_t) \times \frac{\partial k}{\partial x_j}]$$

**Equation de  $\omega$  : [4]**

$$\rho u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{Y}{v_t} P_k - \beta_2 \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \times \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + 2\rho(1 + F_1) \Phi \frac{1}{\omega} \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

$\Phi_1$  représente les constantes du modèle de Wilcox et  $\Phi_2$  les constantes du modèle k- $\epsilon$ , on définit alors les constantes mixtes  $\Phi$  du modèle Menter par :

$$\Phi = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2$$

	$\sigma_k$	$\sigma_m$	Q	Q*	K	$\frac{Y}{Q^*} - \sigma_m \frac{k^2}{\sqrt{Q^*}}$
$\Phi_1$	0.5	0.5	0.0750	0.09	0.41	0.553
$\Phi_2$	1.0	0.856	0.828	0.09	0.41	0.440

Tableau III.3: Les coefficients du modèle K- $\omega$  SST (Menter)

$P_k$  est la production de l'énergie cinétique de la turbulence

$$P_k = r_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$r_{ij} = \mu_t \left( 2S_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho K \delta_{ij}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

La viscosité turbulente est donnée par la relation :

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(\hat{\alpha}_1 \omega \Omega F_2)}$$

Avec  $a_1=0.31$

$$\Omega = \sqrt{(w_{ij} w_{ij})}, \quad w_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^2)$$

$$Arg_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}; \frac{500V}{d^2 \omega} \right); \frac{4\rho \sigma_\omega^2 K}{CD_{K\omega} d^2} \right]$$

$$CD_{K\omega} = \max \left( 2\rho \sigma_\omega^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \cdot 10^{-20} \right)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2)$$

$$Arg_2 = \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}; \frac{500V}{d^2 \omega} \right)$$



**Bibliographie**

---

- [1] Ziane, F., Abdellah el-hadj, a., & Danouni, s. (2016). Analyse de l'interaction fluide structure d'un profil aérodynamique oscillante.
- [2] Menter, F. (1993, July). Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. In 23rd fluid dynamics, plasma-dynamics, and lasers conference (p. 2906).
- [3] Wilcox, D. C. (1994). Simulation of transition with a two-equation turbulence model. *AIAA journal*, 32(2), 247-255.
- [4] Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8), 1598-1605.
- [5] Jones, W. P., & Launder, B. (1973). The calculation of low-Reynolds-number phenomena with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16(6), 1119-1130.
-

# Chapitre IV

## Simulation et Résultats

### Sommaire

---

IV.1	Introduction .....	42
IV.2	cadre de l'étude.....	44
IV.3	Le profil d'aile .....	44
IV.4	Le modèle aérodynamique .....	45
IV.5	Présentation du code de calcul .....	45
IV.5.1	Structure du code ANSYS CFX .....	45
IV.6	Les données expérimentales .....	47
IV.7	La simulation en 2D .....	48
IV.7.1	Le domaine d'étude .....	48
IV.7.2	Maillage et les conditions aux limites .....	49
IV.7.2.1	La création du Maillage.....	49
IV.7.2.2	L'étude du maillage .....	51
IV.7.3	Les Conditions aux limites .....	52
IV.7.4	Résultats et discussions .....	53
IV.7.5	Conclusion.....	60
IV.8	La simulation en 3D .....	62
IV.8.1	Domaine de calcul et le maillage.....	63
IV.8.1.1	Domaine de calcul .....	63
IV.8.1.2	Maillage du volume de calcul.....	66
IV.8.1.3	L'étude de maillage .....	67
IV.8.2	Les Conditions aux limites .....	70
IV.8.3	Résultats et discussions .....	72
IV.8.4	Conclusion.....	89

---

## VI.1 INTRODUCTION :

La connaissance approfondie de l'aérodynamique des pales de rotor d'éolienne constitue de nos jours un enjeu prépondérant pour la définition et l'optimisation des pales de rotors de nouvelle génération caractérisée par un rendement élevé et des coûts de construction et de maintenance réduits.

Une estimation précise des efforts s'exerçant sur des pales en rotation à forte incidence ou en régime de décrochage pose un vrai challenge à la mécanique des fluides numérique [1,2]. Les difficultés d'une telle estimation sont à la fois numériques (précision et indépendance vis-à-vis du maillage des prédictions d'écoulements visqueux, prise en compte des effets de confinement) et physiques (modélisation de la turbulence, de la transition). Les difficultés physiques sont particulièrement significatives dans des situations de décrochage et de post décrochage où l'écoulement fait intervenir une séparation massive et des phénomènes instationnaires. Il en résulte que la prédiction précise de l'incidence de décrochage et du coefficient de portance maximale est un problème particulièrement difficile. Au-delà du décrochage, la structure de l'écoulement (lâché tourbillonnaire) et les forces instationnaires sont des facteurs importants de la stabilité du système.

Ces conditions aérodynamiques singulières décrivent le régime normal de fonctionnement des pales d'éoliennes qui opèrent généralement en configuration de décrochage afin de produire le maximum de puissance. Dans le cas d'une machine régulée au décrochage, une modification rapide de la vitesse du vent ou de sa direction peut initier un mouvement d'oscillation en torsion, combinant les effets de la force centrifuge et du décrochage dynamique. Il y a une variation

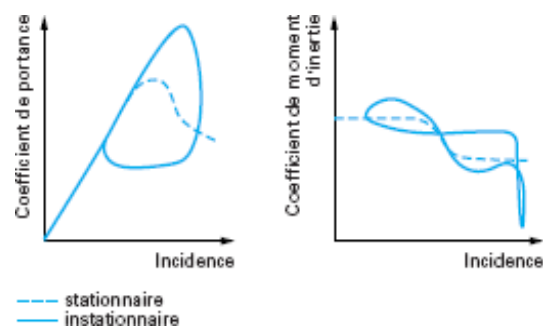


Figure IV.1: Décrochage dynamique

instationnaire de l'angle d'incidence, qui peut modifier le comportement aérodynamique de la pale au voisinage du décrochage (Figure IV.1). On constate que le nouvel angle de décrochage est supérieur à l'angle statique, la portance maximale est donc majorée. Lorsque l'angle d'incidence diminue, on note alors une réduction supplémentaire de la portance, qui ne retrouve la valeur obtenue pour des conditions statiques qu'à une incidence inférieure (phénomène de retard). Le moment aérodynamique subit lui aussi une altération de son comportement (figure 20).

Ce problème, lié à l'in-stationnarité de l'écoulement est tout à fait général pour toute surface portante animée d'un mouvement cyclique dont l'amplitude ou l'incidence et la fréquence dépassent une certaine valeur.

Il se traduit en particulier par un décollement et un recollement de la couche limite [3,4]. Dans tous les cas, il est certain que les variations de portance et de moment engendrent des vibrations, donc une fatigue de la structure de la pale et du bruit pour l'environnement. Tout cet environnement opérationnel très instable combiné à des contraintes liées aux réductions des coûts du cycle de vie du rotor place le concepteur de rotors d'éolienne devant d'innombrables difficultés qu'il ne pourra jamais surmonter sans l'utilisation d'outils de prédictions très précis.

L'objectif principal de cette étude portera donc sur la mise au point d'un modèle de simulation numérique capable de prédire avec précision le phénomène de décrochage de l'écoulement autour d'une pale d'éolienne. Afin de valider notre démarche, nous nous proposons de confronter notre modélisation à un cas test développé expérimentalement par le laboratoire américain des énergies renouvelables NREL dans son programme d'aérodynamique instationnaire phase VI mis en œuvre autour d'un rotor bipale, de forme géométrique très proche des éoliennes régulées par décrochage actuellement commercialisées.

## VI.2 CADRE DE L'ETUDE :

Du point de vue numérique, on s'intéresse à la résolution stationnaire des équations de Navier Stokes qui constituent le meilleur modèle actuel pour caractériser des écoulements de paroi gérés principalement par les effets de diffusion visqueuse et turbulente. La prise en compte des effets visqueux dans les méthodes de calcul d'aérodynamique 3-D des surfaces portantes en rotation sera entrepris par l'intermédiaire du code ANSYS-CFX et du mailleur ICEM-CFD. L'amélioration du calcul des effets de couche limite, sera recherchée et en dépendra une meilleure estimation des coefficients aérodynamiques locaux.

Pour atteindre notre objectif d'étude, on doit résoudre plusieurs difficultés qui sont liées à la modélisation des effets des petites échelles, aux problèmes d'intégrations temporelles à long terme et à la validité des approximations des conditions aux limites ouvertes aux grands pas de temps. Plusieurs schémas temporels et de types de conditions aux limites ouvertes doivent être analysés par expériences numériques, sans oublier de s'assurer de la qualité du maillage généré autour de la géométrie étudié grâce à une étude de l'influence de la topologie et du nombre de nœud implémentées sur les résultats obtenus. En ce qui concerne les modèles de sous maille, on se propose d'utiliser d'abord les modèles existants et d'en construire ensuite de nouveaux, mieux adaptés aux problèmes que nous étudierons.

## VI.3 Le profil d'aile :

Le profil d'aile que nous allons utiliser pour les études décrites ci-après est le profil S809 (Figure IV.2), utilisé par le NREL dans le développement de leur rotor à deux pales NREL Phase VI.

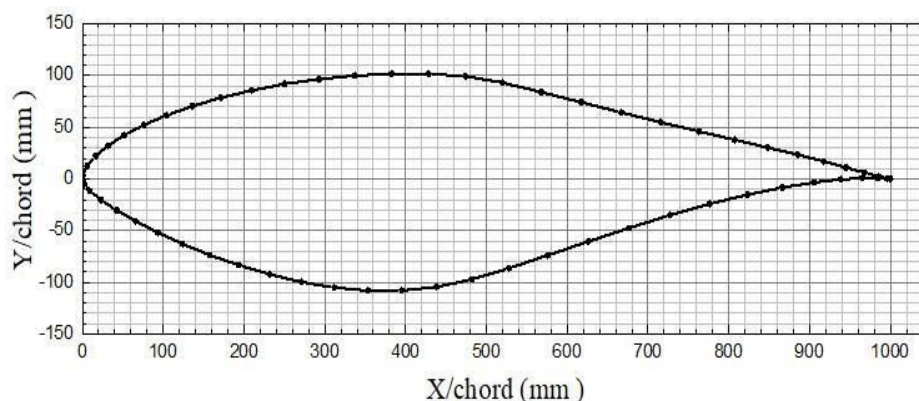


Figure IV.2: La section du profil d'aile de type (S809)

Nous avons choisi ce profil car tout d'abord il existe des nombres importants d'expérimentation dans la littérature le concernant (notamment [5] et [6]), ensuite il permettra une poursuite des études vers des modélisations de pale complète avec des

comparaisons possibles avec le rotor NREL Phase VI dont les études expérimentales sont nombreuses.

## VI.4 Le modèle aérodynamique

Parmi les différents modèles aérodynamiques proposés par le logiciel ANSYS CFX, nous choisissons de modéliser les écoulements à l'aide du modèle turbulent  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport). Pour ces études sur le domaine de calcul et le maillage nous utiliserons le modèle en mode purement turbulent, en laissant à l'étude suivante le soin de mettre en avant les autres modèles laminaires et turbulents ainsi que les modèles de transition proposés par le logiciel.

## VI.5 Présentation du code de calcul :

### VI.5.1 Structure du code ANSYS CFX :

ANSYS CFX se compose de trois modèles qui communiquent entre eux comme montré sur la Figure IV.3. Un logiciel qui permet la réalisation de la géométrie et du maillage est nécessaire pour exécuter une analyse de CFD. Dans notre cas le logiciel ANSYS ICEM CFD est utilisé.

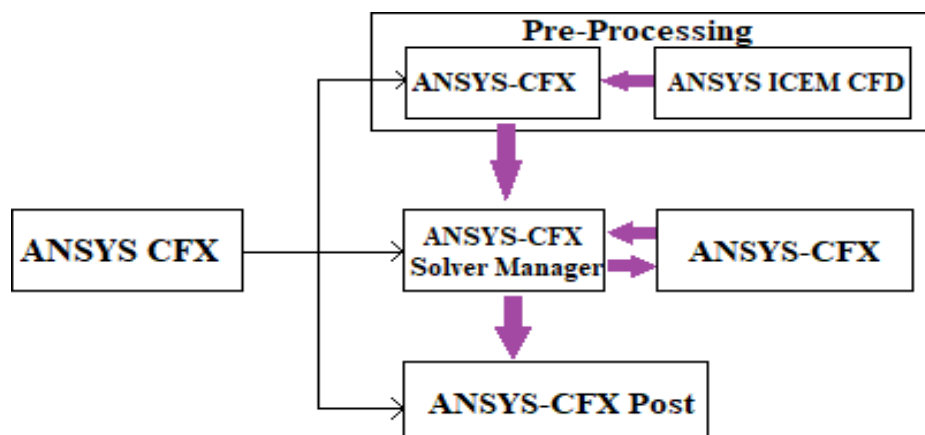


Figure IV.3: La Structure du code ANSYS CFX

**CFX-Pre :**

CFX-Pre offre une interface moderne, cohérente et intuitive pour la définition des problèmes complexes de CFD. CFX-Pre peut lire plusieurs maillages d'une variété de sources.

L'utilisateur est guidé dans la définition physique en se déplaçant le long de la barre d'outils ' Define ', qui présente les étapes principales dans la définition du problème. La création et la modification des objets physiques sont présentées par une interface utilisateur avec les panneaux tabulés fournissant l'accès facile aux détails des modèles. La définition en évolution des problèmes est montrée dans le 'object selector', qui montre les objets principaux qui peuvent être choisis pour accéder à n'importe quelle étape de la définition du problème. Les erreurs qui se produisent pendant la définition ou la modification du problème sont montrées à l'aide d'un codage de couleur dans le 'object selector', ou par l'intermédiaire des messages descriptifs dans le panneau de message physique. Une fois que la définition de problème est complète, il faut exporter un fichier de définition (\*.def) vers le module CFX-Solver pour avoir la solution du problème.

**CFX-Solver :**

Il permet de résoudre les équations de l'hydrodynamique modélisant le problème physique étudié. Toutes les spécifications du problème produites dans le module CFX-Pre sont résolues par CFX Solver pour une erreur bien définie ou un nombre d'itération maximale. Tous les résultats sont stockés dans un fichier (\*.res).

**CFX- Solver Manager :**

Il fournit une interface graphique au CFX-Solver afin de fournir des informations sur l'évolution de la solution et une manière facile de le commander. Ces fonctions principales sont les suivantes :

- Indiquer les dossiers d'entrée au solver CFX-5
- Lancer ou arrêter la simulation avec le solver CFX-5
- Modifier certains paramètres dans le fichier de définition
- Surveiller la progression de la solution avec le solver CFX-5
- Lancer une autre simulation en parallèle.

**CFX-Post :**

Il est conçu pour permettre la visualisation facile et le traitement quantitatif des résultats de simulations. Il dispose d'outils graphiques très puissants permettant la présentation et l'analyse des résultats en forme :

- Lignes de courant, Champ de vitesse...
- Visualiser différents paramètres définis par l'utilisateur
- Définir et calculer des nouvelles variables
- Exporter les résultats en différent format, pour tracer l'évolution des variables avec d'autres logiciels -graphiques.

### **Code de calcul CFX :**

Le code de calcul CFX, utilise une méthode couplée où les équations hydrodynamiques (u, v, w et p) sont résolues en même temps comme une équation unique.

Cette approche utilise une méthode entièrement implicite pour chaque pas de temps. Dans le cas d'un écoulement stationnaire, le pas de temps se comporte comme un paramètre d'accélération pour rendre la solution une solution stationnaire convergente et plus au moins réelle.

Montrée ci-dessous représente l'organigramme général du CFX. Pour la résolution de chaque ensemble d'équations, l'organigramme de calcul se compose de deux opérations numériques :

- La linéarisation des équations non linéaires avant d'être insérées dans la matrice de solution.
- La résolution des équations linéaires avec un procédé itératif en utilisant une méthode algébrique.

### **VI.6 Les données expérimentales :**

Les données expérimentales 3D-2D sont celles extraites des travaux [5]et [6]. Le travail dans [5] et [6] est réalisé dans Laboratoire national des énergies renouvelables aux États-Unis, Colorado (NREL). [5], réalisé par M.M. Hand, et l'autre. et [6] réalisé par J.M. Jonkman

En règles générales nous effectuerons les simulations pour des angles d'attaques de 0° jusqu'à 24°, pour les nombres de Reynolds suivent 300000 ; 500000 ; 650000 ; 750000 et 1000000.



## VI.7 La simulation en 2D :

Le profil d'aile qui nous a été étudié sous la forme d'un profil aérodynamique du NREL modèle S809, avec une corde de 1m. Les profils aérodynamiques de cette forme ont les données résultant d'essais qui ont été largement testés en soufflerie pour obtenir des coefficients aérodynamiques bidimensionnels et qui ont été effectués à la Colorado State University (CSU), à l'Ohio State University (OSU), à la Delft University of Technology (DUT). C'est à ce dernier que seront comparés nos résultats. Notre problème 2D est modélisé par le code commercial ANSYS CFX.

### VI.7.1 Le domaine d'étude :

Le domaine de calcul utilisé dans cette étude pour la simulation du profil aérodynamique 2D est illustré dans la Figure IV.4 .

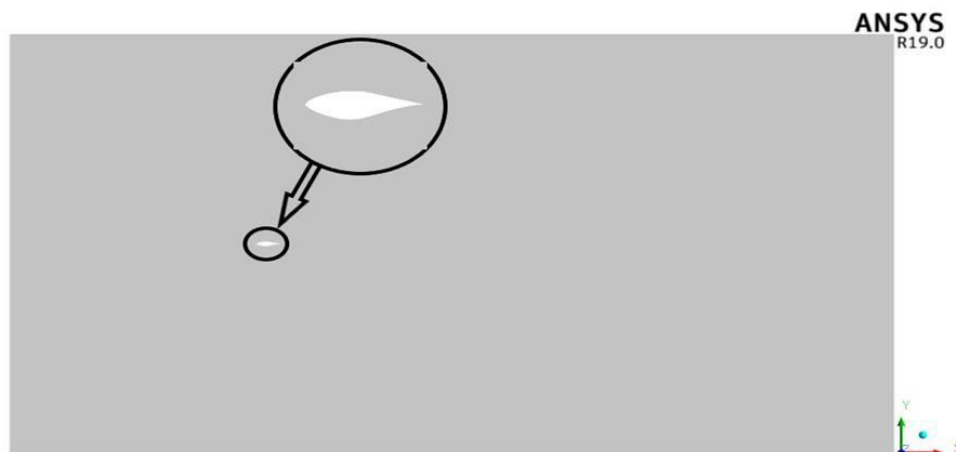


Figure IV.4: le domaine d'étude 2D

Nous divisons notre domaine en deux parties :

Une partie (D1) est sous la forme d'un cylindre qui contient le profil aérodynamique et cette forme cylindrique qui est située à l'intérieur du deuxième domaine, nous permet de laisser le cylindre en état de rotation libre, et cette dernière nous permet de créer des angles d'attaque spécifiques et différents fig.

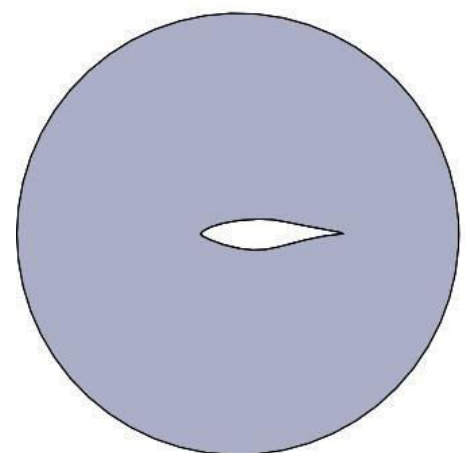


Figure IV.5: le domaine intérieur D1.

L'autre partie (D2), en forme de rectangle contenant la première partie, cette partie est plus éloignée du début du profil pour assurer la stabilité de l'écoulement du vent avant de la traverser, et plus éloignée après celle-ci pour assurer la stabilité et la clarté des

résultats, Entre les deux domaines existe une interface qui permet un flux continu de masse et de quantité de mouvement.

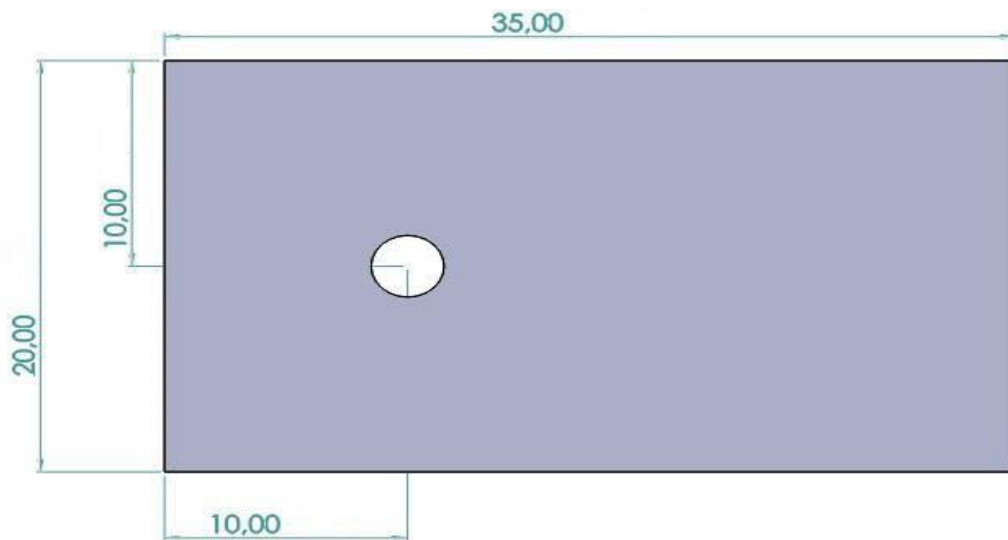


Figure IV.6: Présentation du domaine extérieur D2, et leur dimension.

## VI.7.2 Maillage et les conditions aux limites :

### VI.7.2.1 La création du Maillage :

La qualité de maillage a une grande importance sur les résultats obtenus par un calcul numérique. Le maillage d'analyse a été créé à l'aide d'ANSYS ICEM. Le nombre total de nœuds pour ce maillage qui est d'environ 85000 des nœuds a été choisi grâce à une étude que nous avons menée pour choisir le nombre de nœuds amélioré, Un maillage quadrilatère structuré a été utilisé et  $y^+ = 30$  a été pris.

Le maillage dans la 1ère partie est mobile (déformable) et sous forme un type maillage-O et très raffiné autour de la paroi du profil pour détecter la couche limite, avec un nombre des nœuds environ de 14001, et un nombre des éléments 7098.

Le maillage dans la 2ème partie est fixe. Avec un nombre des nœuds 71008, et un nombre des éléments 38632.

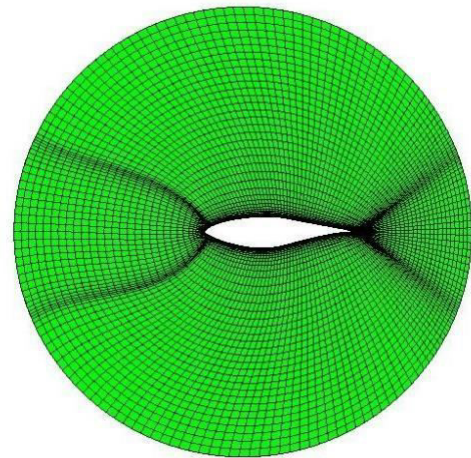
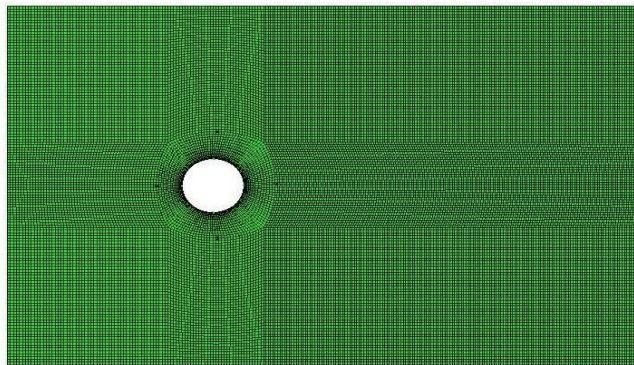


Figure IV.8: Le maillage dans le domaine 2.

Figure IV.7: Le maillage dans le domaine 1.

- Nombre total des nœuds 8509.
- Nombre des éléments 41956.

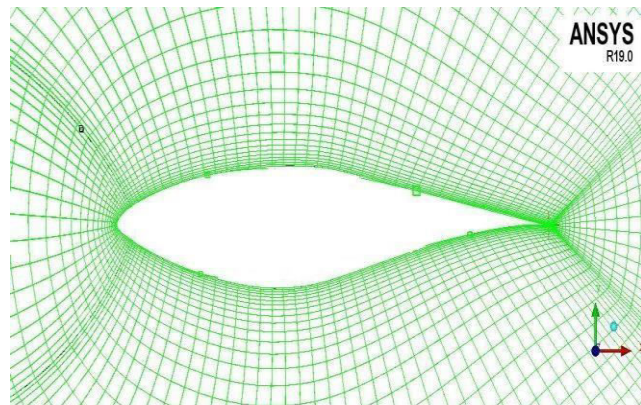


Figure IV.9: Le Maillage raffiné autour du profil d'aile.

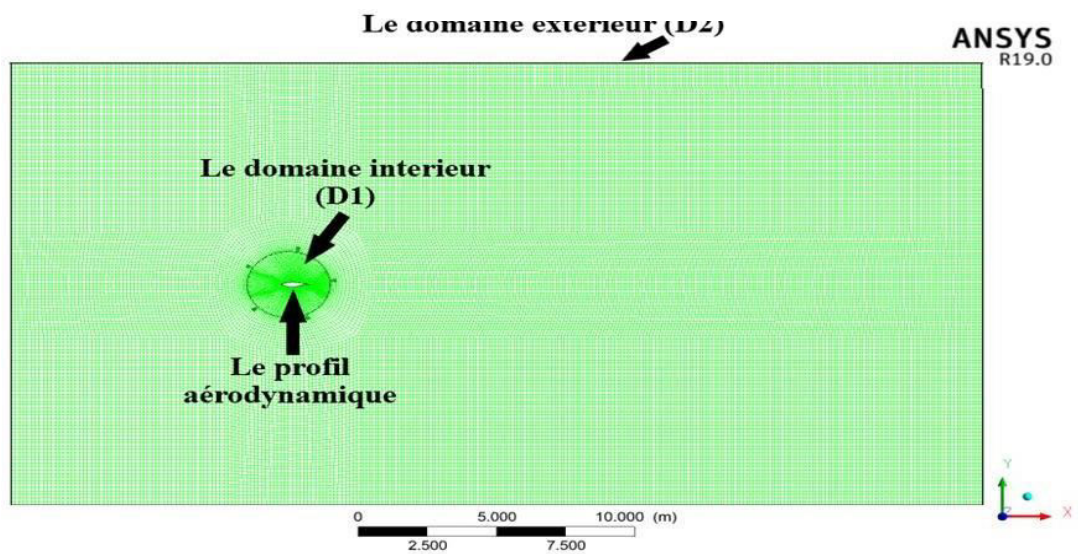


Figure IV.10: le maillage dans les deux domaines ensemble.

**VI.7.2.2 L'étude du maillage :**

Nous avons étudié cinq d'essais avec des différents nombres de nœuds Tableau IV.1, et le nombre des nœuds mentionnés précédemment (le quatrième) a été choisi car c'est le nombre amélioré de sorte que son résultat donne approximativement le même résultat que le nombre de nœuds après lui (Figure IV.11), et qui est le moins d'entre eux dans le nombre de nœuds et ce dernier signifie le moins de temps que nous passons en simulation.

Essai	Maillage	Drag Coeff (Cd)	Drag Coeff (Cd)CSU	Erreur Relative (%)
(1)	Number of Nodes: 15360 Number of Elements: 7436 Wedges: 14 Hexahedra: 7422	0.201	0,279	27.95%
(2)	Number of Nodes: 29194 Number of Elements: 14244 Wedges: 17 Hexahedra: 14227	0,2192	0,279	21.43%
(3)	Number of Nodes: 50160 Number of Elements: 24602 Wedges: 22 Hexahedra: 24580	0,2398	0,279	14.05%
(4)	Number of Nodes: 85090 Number of Elements: 41956 Wedges: 19 Hexahedra: 41937	0,2512	0,279	9.96%
(5)	Number of Nodes: 99750 Number of Elements: 49236 Wedges: 19 Hexahedra: 49217	0.2522	0,279	9.60%

Tableau IV.1: L'étude du maillage.

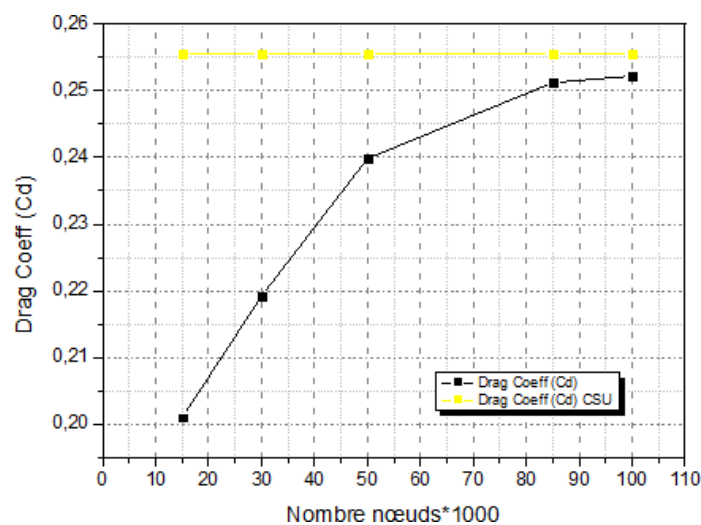


Figure IV.11: Le courbe de l'étude du maillage, le coefficient de traînée en fonction du nombre des nœuds.

### VI.7.3 Les Conditions aux limites :

On définit les conditions aux limites pour les zones frontalières.

➤ L'entrée (INLET) → D'après le nombre de Reynolds, la vitesse d'écoulement est déterminée à l'entrée du champ.

$$(Re = 3 \times 10^5 \rightarrow V = 4.58229 \text{ m/s})$$

$$(Re = 5 \times 10^5 \rightarrow V = 7.72575 \text{ m/s})$$

$$(Re = 6.5 \times 10^5 \rightarrow V = 10.04346 \text{ m/s})$$

$$(Re = 7.5 \times 10^5 \rightarrow V = 11.58862 \text{ m/s})$$

$$(Re = 10^6 \rightarrow V = 15.45149 \text{ m/s})$$

➤ La sortie (OUTLET) → La valeur par défaut de la pression relative est calculée à 1atm.

➤ Les parois supérieur et l'inférieur du domaine extérieur (WALLS (top & Bottom)) → des parois lisse (ils n'y a pas des frottements au niveau des parois = il n'y a pas de développement de la couche limite).

➤ Les frontières du profil → le profil est défini comme parois non lisse, il Ya du développement de la couche limite, donc un raffinement au niveau de la paroi du profil est nécessaire (Pour vu ce qui se passe à l'écoulement au niveau de cet paroi exactement).

Le modèle SST est le modèle de turbulence utilisé dans notre cas, il résout l'équation  $k-\omega$  dans les régions de la paroi. Il en résulte une bonne précision en courts temps de calcul.

Le calcul arrête lorsque la valeur résiduelle est inférieure à  $10^{-6}$ . Cela signifie que toutes les lois de conservation doivent être respectées par une erreur de  $10^{-6}$ .

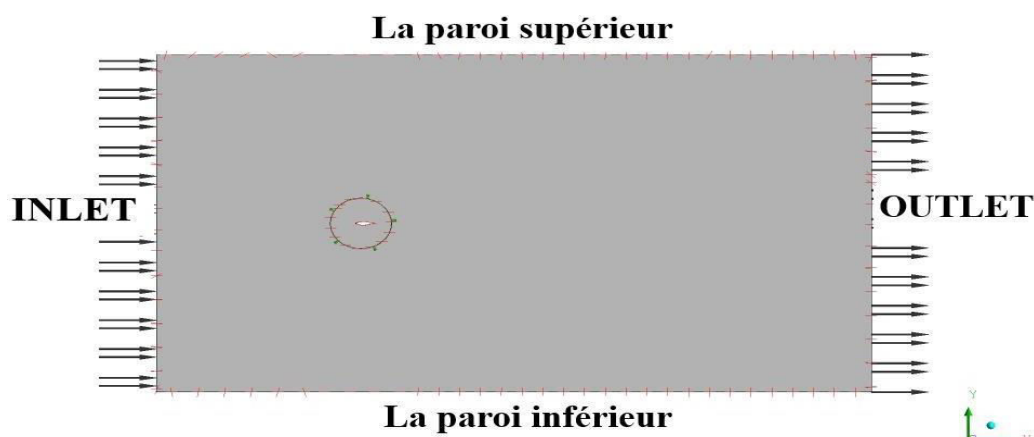


Figure IV.12: les conditions aux frontières

### VI.7.4 Résultats et discussions :

Les Figures (IV.13 jusqu'à IV.22) présentent les résultats obtenus, respectivement le coefficient de portance, de trainée en fonction de l'angle d'attaque qui variant de 0° à 26°, avec des différents nombres de Reynolds, et ces résultats de la CFX, nous les rassemblons avec les résultats expérimentaux de :

CSU pour les Reynolds = 300000 ;500000 et 650000.

OSU pour le Reynolds =750000.

DTU pour le Reynolds = 1000000.

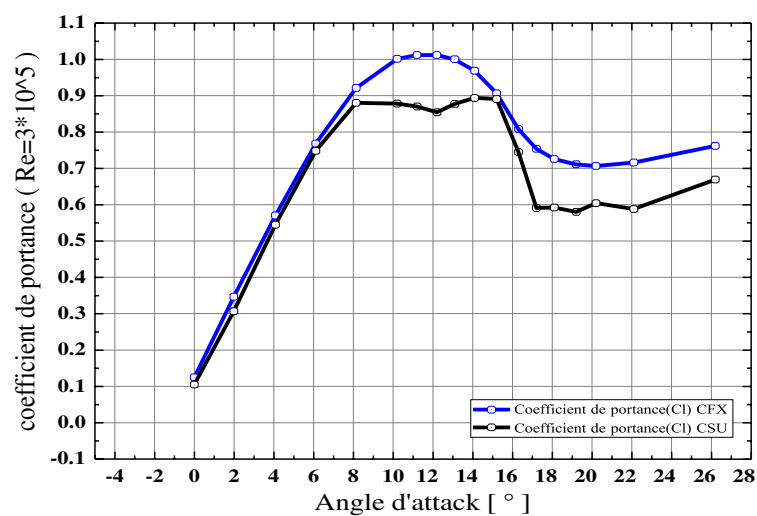


Figure IV.13: Le coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=3 \times 10^5$ ).

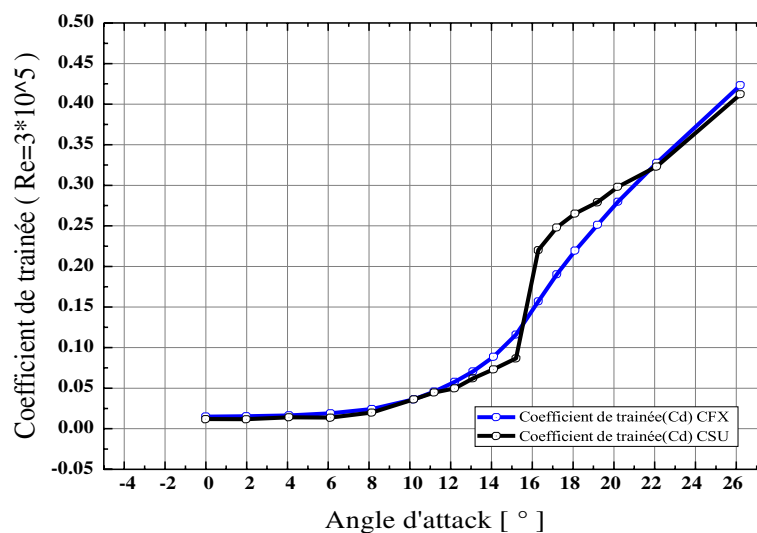


Figure IV.14: Le coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=3 \times 10^5$ ).

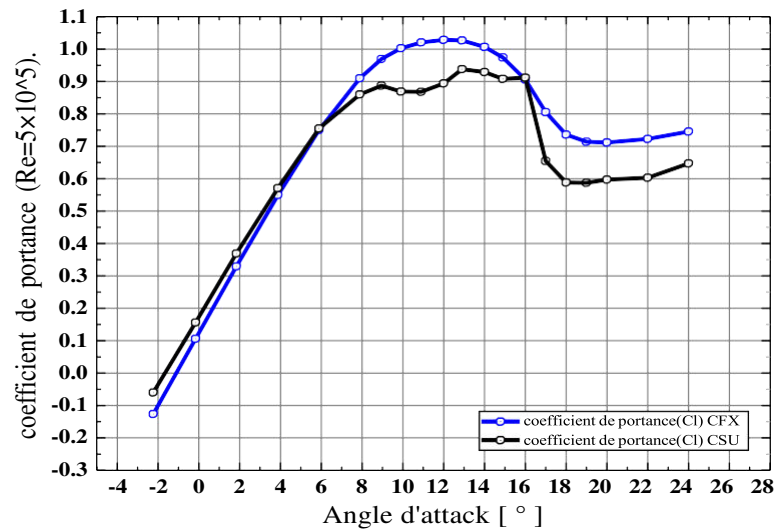


Figure IV.15: Le coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=5 \times 10^5$ ).

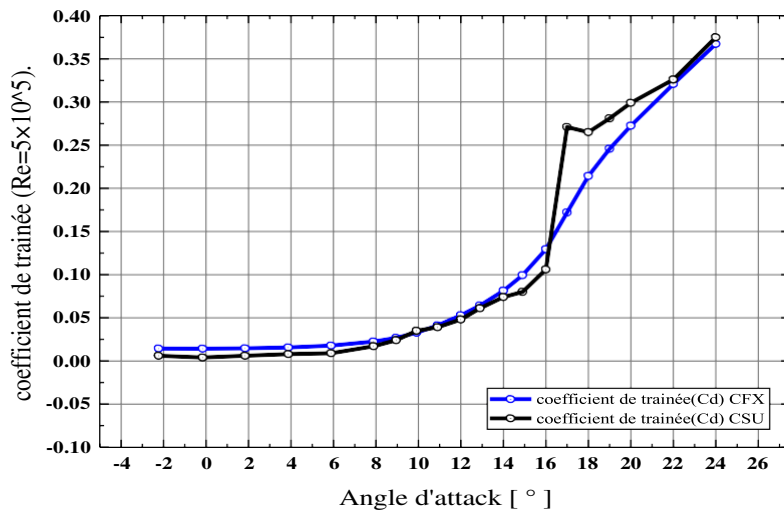


Figure IV.16: Le coefficient de traînée en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=5 \times 10^5$ )

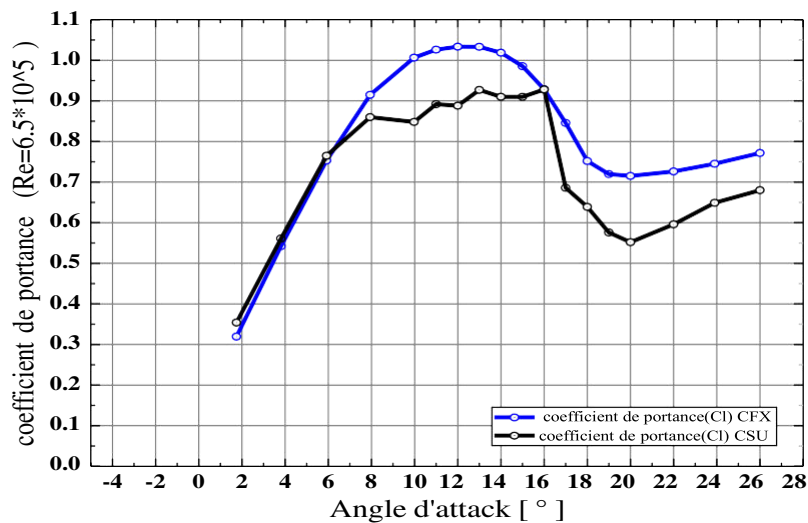


Figure IV.17: Le coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=6.5 \times 10^5$ ).

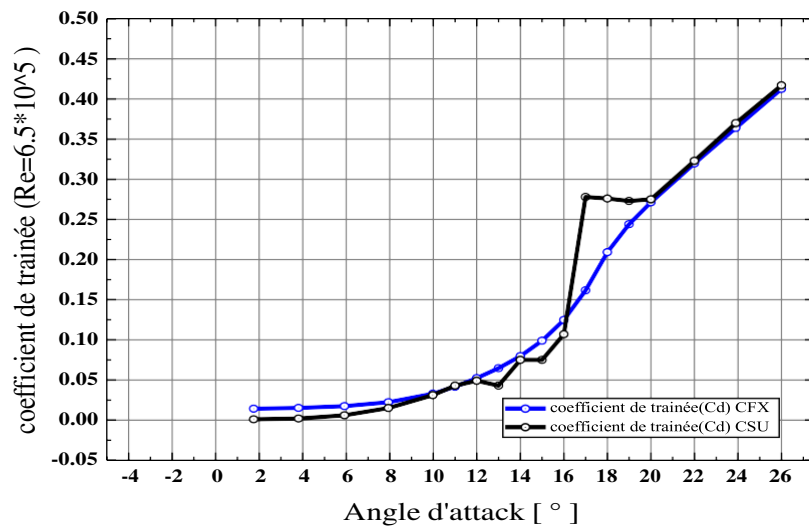


Figure IV.18: Le coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=6.5 \times 10^5$ )

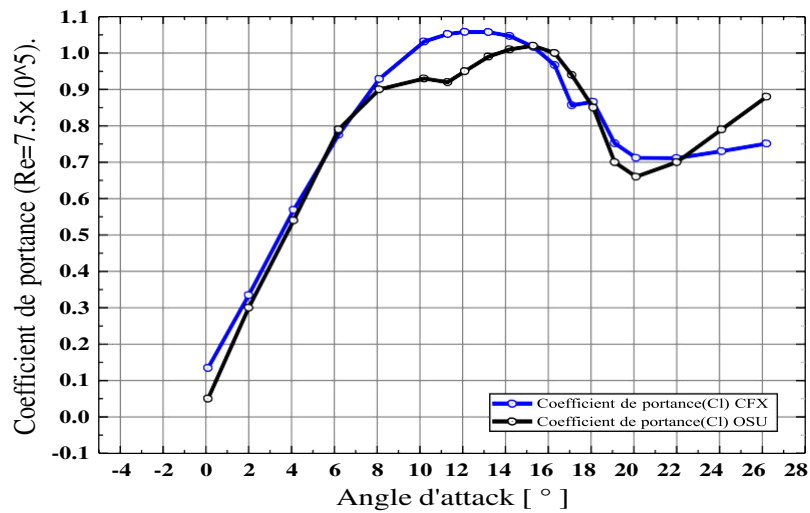


Figure IV.19: Le coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=7.5 \times 10^5$ ).

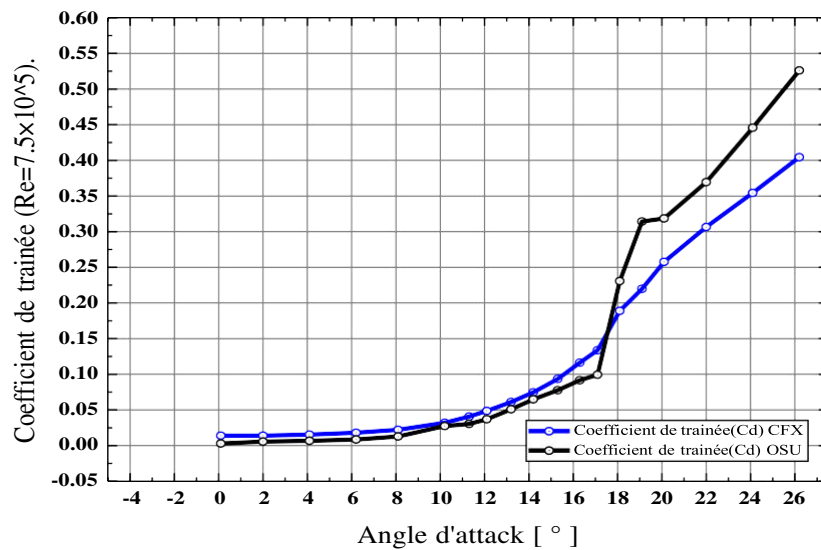


Figure IV.20: Le coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=7.5 \times 10^5$ ).



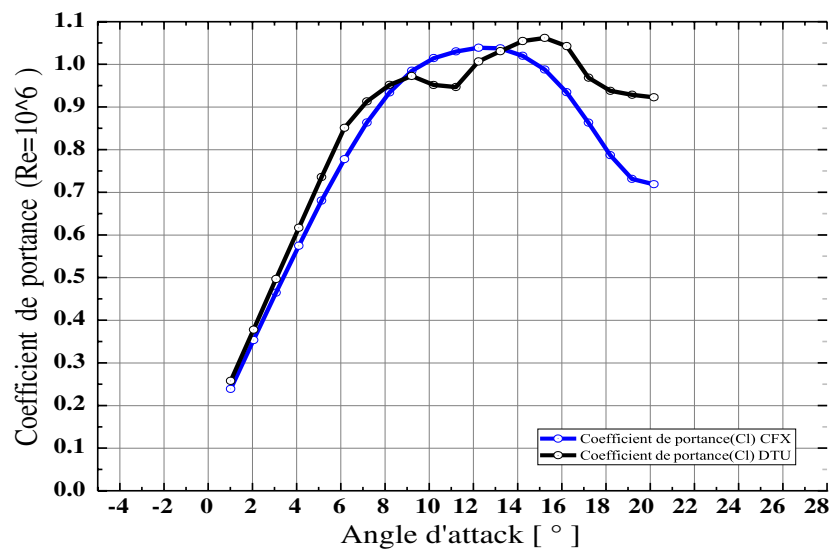


Figure IV.21: Le coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=10^6$ )

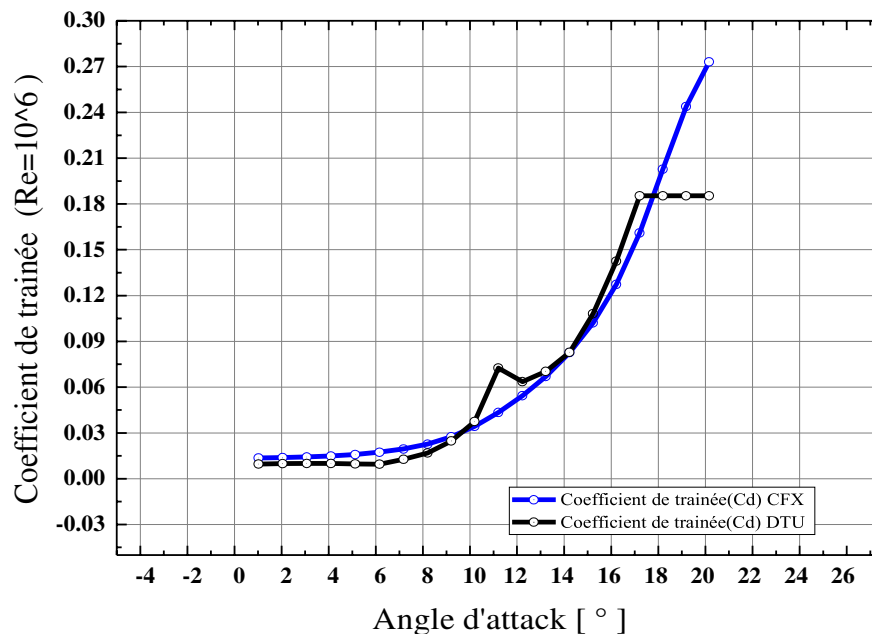


Figure IV.22: Le coefficient de traînée en fonction de l'angle d'attaque ( $Re=10^6$ )

Ces figures montrent que les résultats obtenus sont assez proches aux résultats du (CSU, OSU et DTU) pour les deux coefficients, de portance et de traînée avec une petite erreur relative.

Dans les figures IV(13,15,17,19,21) du coefficient de portance quel que soit le Reynolds, on constate que la courbe est une droite ascendante jusqu'au l'angle  $8^\circ$ , puis subit une inflexion au-delà de cette valeur, où le coefficient de portance continu à augmenter jusqu'à  $12^\circ$  et après diminue brusquement. Ce point d'inflexion se traduit par un début de

décrochage de l'écoulement au niveau de l'extrados au bord de fuite du profil, et ce point qui est on angle de  $12^\circ$  appelé l'Angle de décrochage aérodynamique.

Dans les figures IV (14,16,18,20,22), le coefficient de traînée augmente avec l'angle d'incidence. Cet résultat ne permet pas de se prononcer sur le phénomène de décrochage, il serait donc important de mesurer l'évolution du rapport  $CL/CD$  en fonction de l'angle d'incidence.

a) Les contours de Vitesse :

Les contours de vitesse sont illustrés sur le tableau IV.2 pour différents angles d'incidences ( $0^\circ, 8^\circ, 16^\circ$  et  $24^\circ$ ) avec différents nombres de Reynolds.

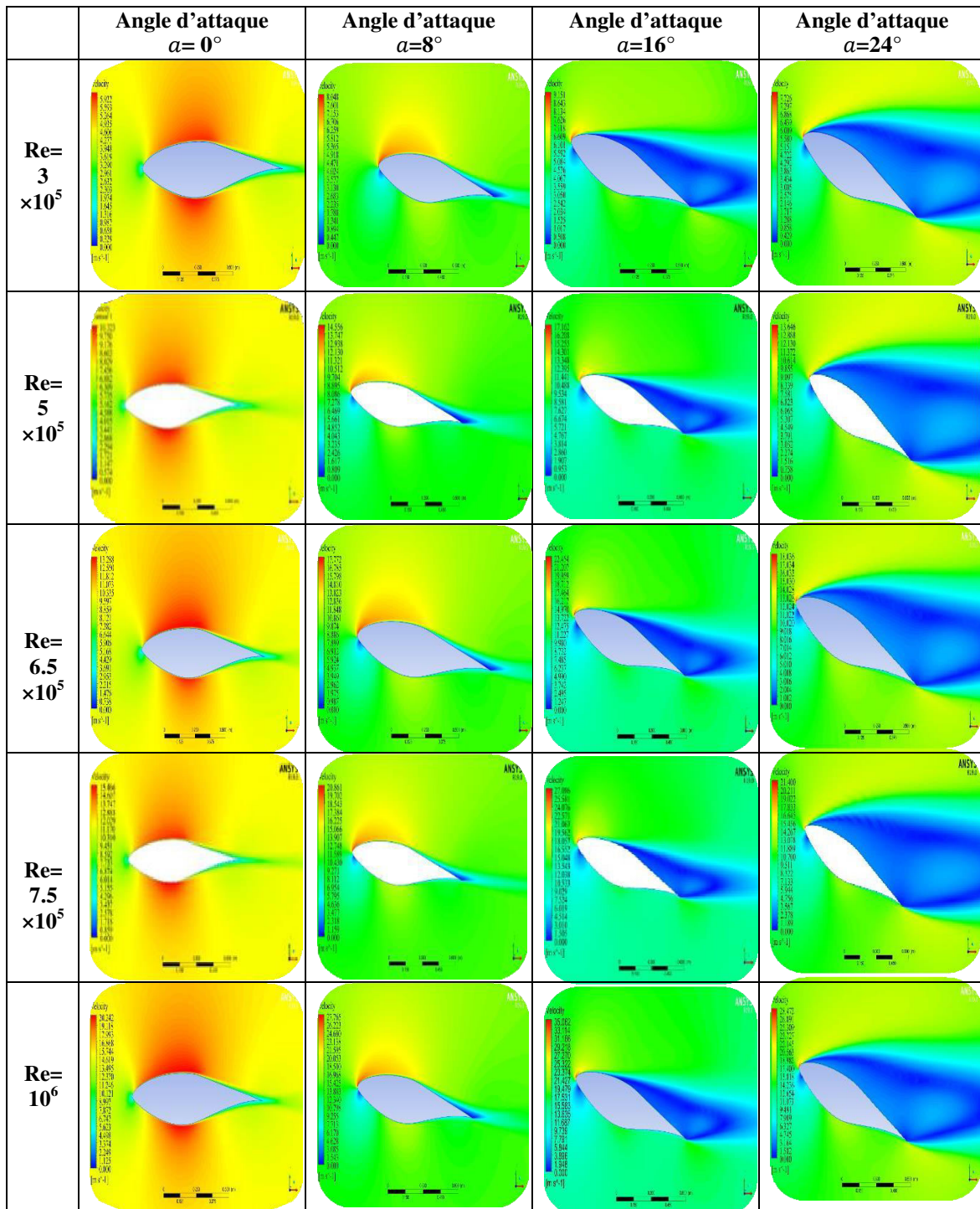


Tableau IV.2: Les contours de Vitesse à différents nombres de Reynolds et pour différents angles d'incidences

b) Les contours de Vitesse :

Les contours de pression sont illustrés sur le tableau IV.3 pour différents angles d'incidences ( $0^\circ, 8^\circ, 16^\circ$  et  $24^\circ$ ) avec différents nombres de Reynolds.

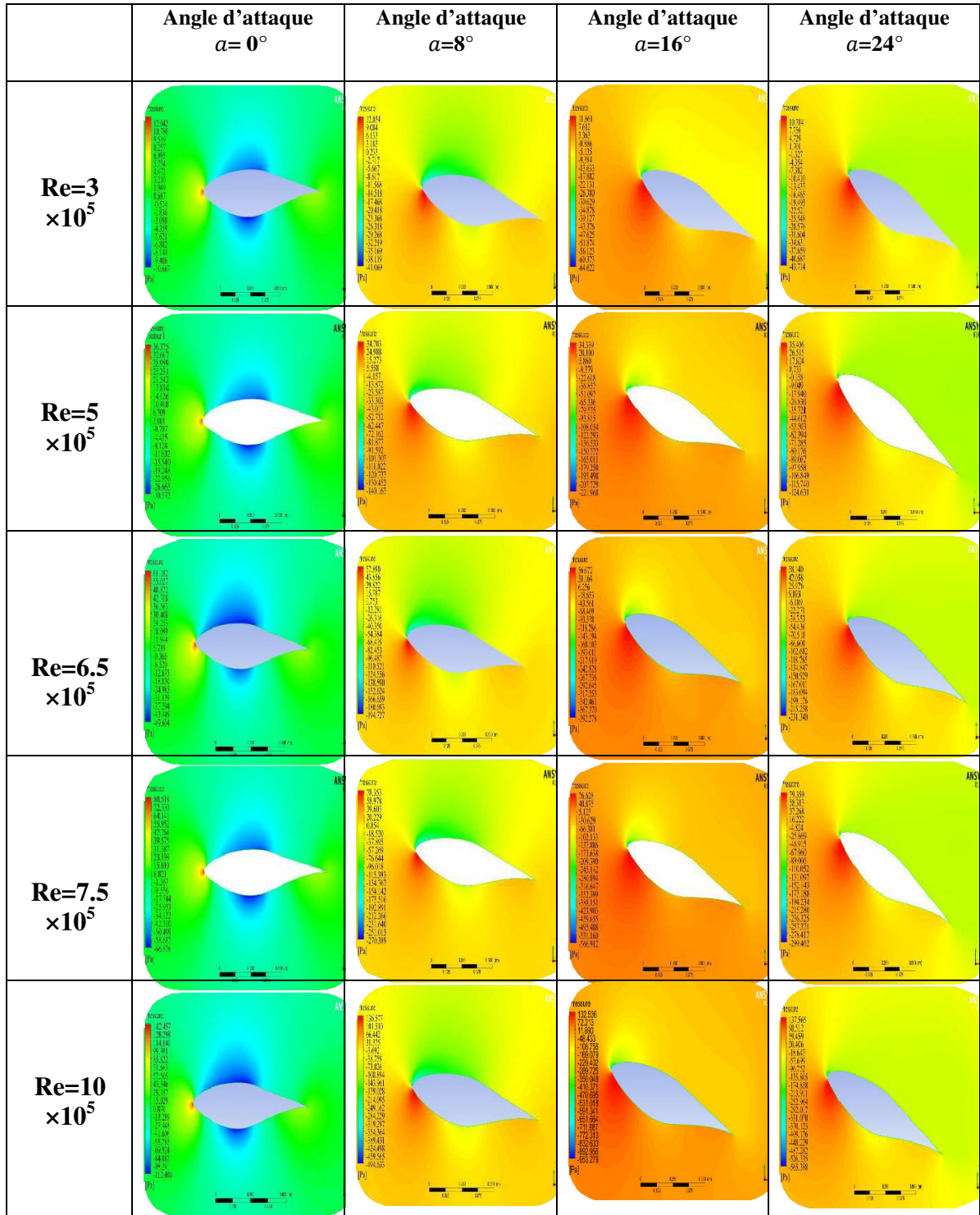


Tableau IV.3: Les contours de Vitesse à différents nombres de Reynolds et pour différents angles d'incidences

L'analyse de la morphologie de l'écoulement autour du profil de la vitesse montre le comportement de la couche limite. On peut remarquer les recirculations sur l'extrados dans les contours indiqués dans les tableaux (IV.2, IV.3). Sur les contours dans le tableau IV.2 et quel que soit le nombre de Reynolds, l'écoulement près de la paroi reste laminaire et ne présente aucun décollement turbulent pour un angle de  $0^\circ$ . À un angle de  $8^\circ$  une turbulence visible sur la partie supérieure du profil d'aile. Le code de calcul a permis de prédire le décollement au bord de fuite. Après l'angle  $16^\circ$  un décollement sur la plus de la moitié du profil. Donc, plus l'angle d'incidence augmente vers les  $16^\circ$ , plus la zone de décollement se déplace vers l'avant, à peu près au milieu de l'extrados. Dans l'angle qui est plus de  $16^\circ$  une nouvelle augmentation de l'angle d'incidence à  $24^\circ$ , presque toute la couche limite d'extrados est décollée ; le décollement se déplace rapidement vers l'avant au bord d'attaque.

Au fur et à mesure de l'augmentation de l'angle d'incidence, les filets d'air cessent de suivre le contour de l'extrados et décollent de celui-ci. Il s'y produit une agitation intense et des tourbillons (recirculations), perturbation synonyme d'augmentation de traînée. Ce phénomène diminue la dépression extrados et l'on observe une brusque chute de portance. La couche limite décroche (phénomène dit de décrochage).

### **VI.7.5 Conclusion :**

Dans cette partie(2D), nous avons étudié l'écoulement autour d'un profil d'aile S809 pour une éolienne à axe horizontal. La simulation numérique est faite à l'aide du logiciel Ansys-CFX, en utilisant un modèle de turbulence K- SST. Les résultats de simulation sont en bonne concordance avec ceux de [5] et [6], concernant les coefficients de portance et de traînée. Les résultats de calcul ont permis de soulever un angle d'attaque optimal qui est  $8^\circ$ , pour des conditions de fonctionnement correspondant à des différents nombres de Reynolds. Cependant, il serait important de d'étendre l'angle d'incidence à des valeurs supérieures pour mieux évaluer le phénomène de décrochage de l'écoulement et d'étudier l'influence des autres paramètres sur le comportement aérodynamique sur ce type de profil.

Nous avons montré que l'instabilité de l'écoulement est plus importante aux grandes incidences et aux phases descendantes du profil, ce qui justifie l'efficacité du modèle SST k -  $\omega$ .

Par ailleurs, ces résultats satisfaisants, vont nous permettre de calculer les forces de pression exercés sur le rotor qui seront injectées ensuite sur un modèle de calcul global des

performances aérodynamiques de l'éolienne et de corriger certaines corrélations faites dans ce modèle afin d'améliorer sa précision et sa performance.

Dans cette modélisation aérodynamique bidimensionnelle du profil *S809*, la comparaison entre les résultats CFD et les données expérimentales montre que ANSYS-CFX est une référence fiable, cette simulation démontre aussi que le profil aérodynamique *S809* a une meilleure performance aérodynamique.

## VI.8 La simulation en 3D :

### Le rotor phase VI de la NREL et la création du la pale :

Pour nos simulations numériques, nous avons d'adopté l'étude du rotor bipale de l'éolienne à axe horizontale de grande envergure (figure 42) et dont l'étude expérimentale a été menée en soufflerie de la NASA Ames par la NREL dans son programme d'aérodynamique instationnaire phase VI [5,7].

Les pales du rotor ont une section de profil NREL S809 de la racine à l'extrémité de pale. L'angle de calage est défini à 75% de l'envergure et son axe à 30% de la ligne de corde. Une géométrie de pale de 5.029m d'envergure linéairement effilée et non linéairement vrillée présentant une extrémité de pale avec un bord d'attaque arrondi fut fidèlement générée grâce à une déduction visuelle et aussi à l'aide des fonctions de lissage de SolidWorks comme le montre la figure 43, et les courbes montrent la distribution de l'angle de calage et la forme générale de la pale phase VI suivant l'expérimentation. La géométrie utilisée est 0° de calage à 75% et -3° à l'extrémité de la pale. La corde à la racine de la pale est évaluée à 0.508m et de 0.356m à l'extrémité de pale. La géométrie de fixation au moyeu est un cylindre de rayon 0.109m qui se prolonge de la corde 0.508m à celle de 0.737m, ensuite il y a une transition d'une section circulaire vers un profil NREL S809 qui s'opère entre l'envergure 0.883m et 1.257m

La géométrie de la pale d'éolienne est créée à partir des informations de forme aérodynamique (corde, angle de torsion...etc.) données dans le tableau [Annex 20].



Figure IV.23: l'éolienne montée sur une tour de 12,192m au milieu de la soufflerie

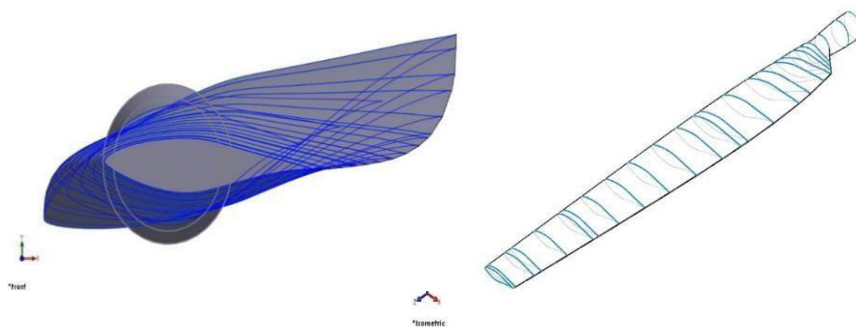


Figure IV.24: La géométrie de la

## VI.8.1 Domaine de calcul et le maillage :

### VI.8.1.1 Domaine de calcul :

Dans le but de vérifier la robustesse de convergence et la précision de notre maillage et afin de faciliter l'implémentation des différentes approches de modélisation utilisée et ainsi valider et étudier l'influence des conditions aux limites sur les charges aérodynamiques obtenues, nous avons construit plusieurs configurations de domaine de calcul :

1<sup>ère</sup> configuration : Avant de générer le maillage en volume définissant le domaine de calcul, on pourrait exploiter la propriété de périodicité de  $180^\circ$  du rotor, pour réduire de moitié notre domaine de calcul et ne générer ainsi qu'un maillage autour d'une seule pale. La pale restante étant prise en compte dans nos calculs en utilisant des conditions aux limites périodiques. Notre domaine de calcul est un demi cylindre de 12.192m de rayon (hauteur de la tour de l'éolienne) et de 36.6m de longueur correspondant ainsi aux dimensions de la section de la veine d'essai de la soufflerie de la NASA Ames, la pale du rotor est positionnée au milieu des deux surfaces périodiques sur le demi cylindre représentant le moyeu avec un angle de calage et d'azimut de  $5^\circ$  et  $0^\circ$  en lacet afin d'être en conformité avec l'expérimentation de la NREL, comme le montre la figure 44. La nacelle et la tour ne sont pas modélisées dans cette configuration car nous avons dans un premier pas négligé les effets d'interaction du sillage de la pale avec les parties fixe de l'éolienne [9,8] pour concentrer le maximum de points de notre maillage près de la surface de la pale.

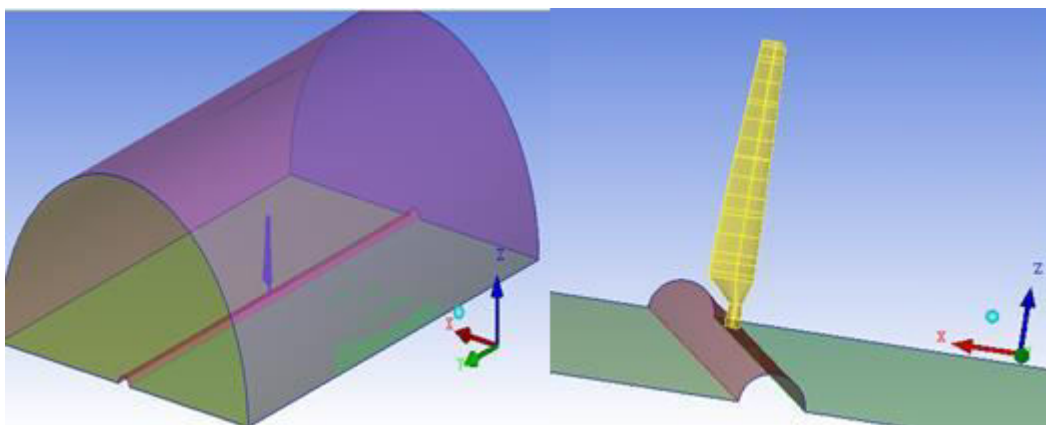


Figure IV.25: 1<sup>ère</sup> configuration de géométrie du domaine de calcul en configuration tunnel de soufflerie

2<sup>ème</sup> configuration : Semblable à la 1<sup>ère</sup> configuration pour l'étude d'une pale isolée, les conditions aux limites sont définies aux bords d'un domaine dont les dimensions sont doublées (figure IV.26), ce qui permettra d'étudier la sensibilité de la solution aux conditions aux limites.



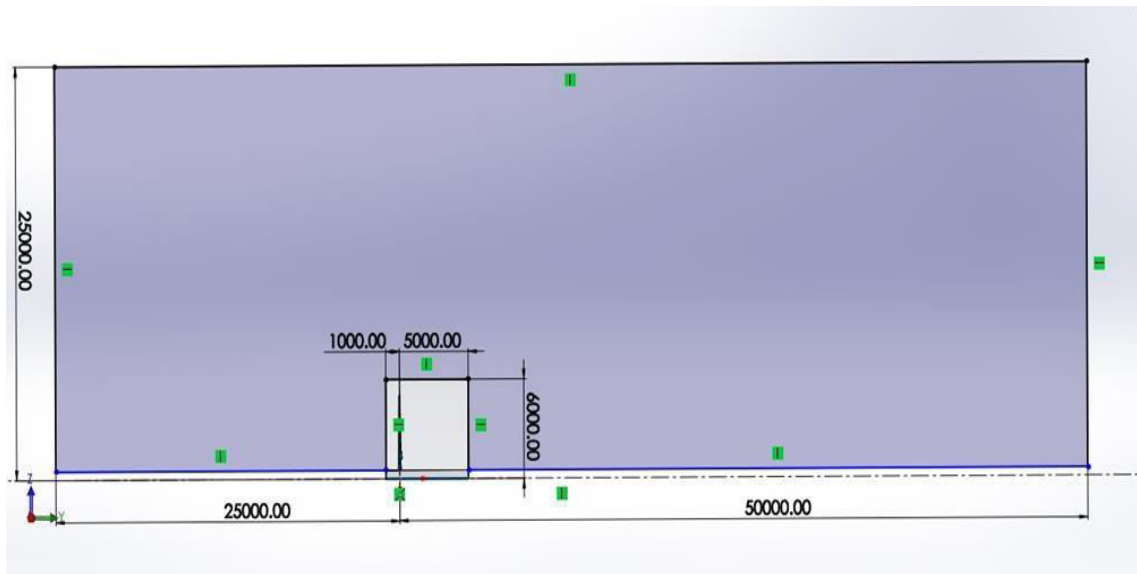


Figure IV.26: 2<sup>ème</sup> configuration de géométrie du domaine de calcul avec les dimensions vue droite

3<sup>ème</sup> configuration : en préambule à la conception d'un maillage incluant la nacelle et le mat, nous reprenons la configuration pale isolée en remplaçant le demi-cylindre couvrant la totalité du domaine de calcul par un moyeu proche des dimensions de l'expérimentation.

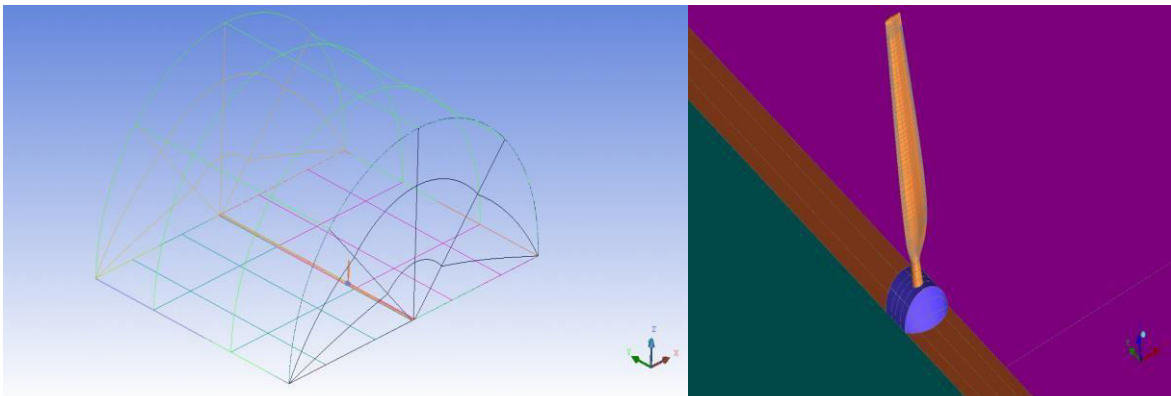


Figure IV.27: 3<sup>ème</sup> configuration de géométrie du domaine de calcul en configuration tunnel de pale isolée sur un demi-moyeu

Nous avons divisé le domaine en deux parties, interne et externe (figure 47) :

- Sous-domaine intérieur (DI) rotatif avec la rotation de l'éolienne (ROTOR) qui englobe la pale du rotor.
- Le domaine extérieur DE (domaine ambiant) est fixe (STATOR).

Et Puisque l'éolienne dispose de deux pales, le domaine est choisi sous forme d'une moitié de cylindre pour appliquer les conditions de périodicité.

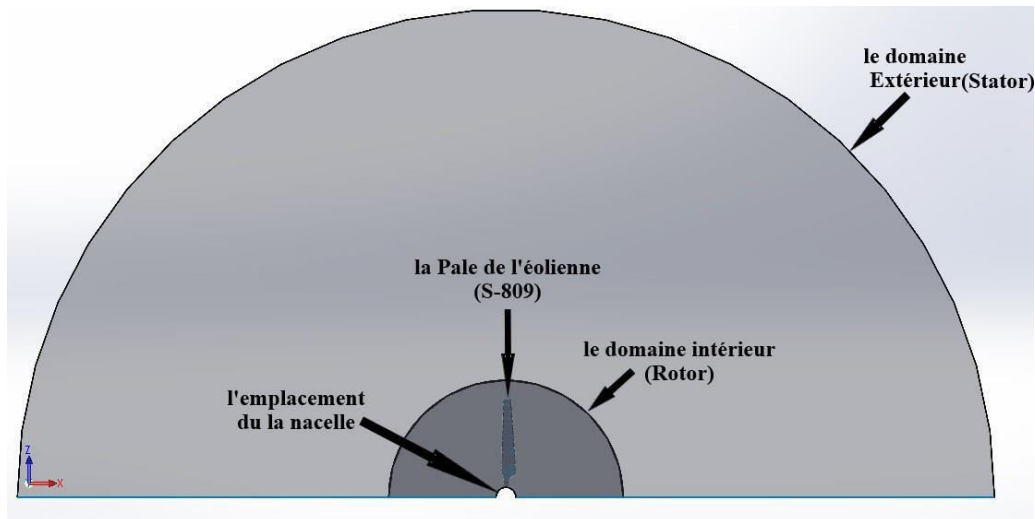


Figure IV.28: Le domaine d'étude vue de face

Pour faire le calage de la pale, Nous avons créé un domaine à l'intérieur du rotor, entourant la pale, qui est conique en raison de la forme de la pale, ce qui nous a permis plus tard de donner à la pale un angle spécifique.

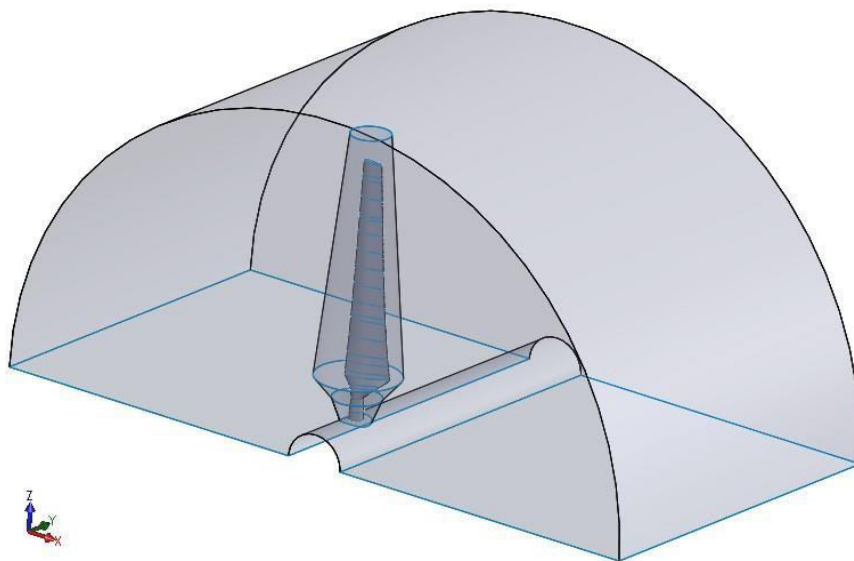


Figure IV.29: Le rotor

### VI.8.1.2 Maillage du volume de calcul :

La première tâche à accomplir lors de la réalisation d'une simulation numérique consiste à définir le domaine de calcul, suivi par la création du maillage pour le domaine retenu. Cette étape peut être considérée à la fois comme la plus importante et la plus délicate dans ce travail préliminaire et en dépendra l'obtention de prédictions robustes et fiables. Tout cela en envisageant une réduction des coûts en termes de puissance de calcul et de temps d'exécution de chaque simulation, la considération d'éléments symétriques et l'application des conditions de périodicité constituent une pratique très courante

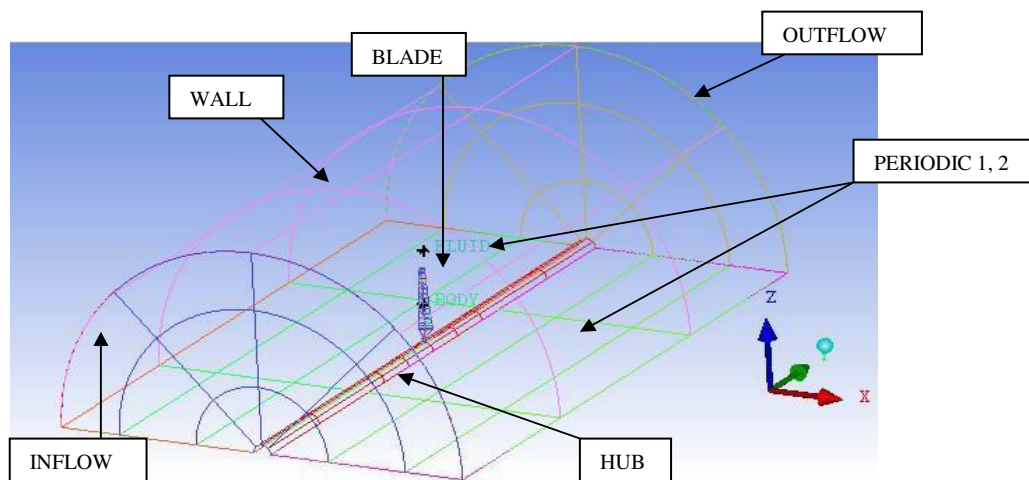


Figure IV.30: définition des limites du domaine de calcul

Le logiciel de maillage utilisé est ICEM CFD il permet la génération des maillages multi-blocs capable d'être distribués pour un calcul en parallèle sur plusieurs machines et structurés afin de permettre une résolution fine et fidèle de l'écoulement près des parois. Une fois que la géométrie de la pale du rotor conçue à l'aide du logiciel de conception assistée par ordinateur fut importée et calée à  $5^\circ$  par rotation, le reste du domaine de calcul est construit en définissant six familles de région ; Inflow pour la région d'entrée de l'écoulement. Outflow pour la sortie de l'écoulement et Wall pour les parois de la veine d'essai ainsi que Hub pour définir le moyeu de l'éolienne et finalement Periodic pour les deux surfaces périodiques et Blade pour la pale du rotor.

#### Méthode General Grid Interface :

La méthode numérique implémentée dans le code de calcul utilisé, adopte un modèle de connexion générale (*general grid interface GGI*) entre les surfaces des domaines définis dans des repères différents à l'interface stationnaire/rotation pour permettre la continuité des calculs. Cette méthode intègre les étapes de projection et d'interpolation. La figure 49 montre le fonctionnement de cette méthode pour un cas simple. Dans un premier temps,

les faces de chaque élément à l'interface sont divisées par le nombre de nœuds de la face. Ces faces, dites IP, sont converties en polygones faits de lignes et colonnes de *pixels* ayant une résolution de  $100 \times 100$ . Puis les polygones ainsi créés sur la face émettrice (le maillage fluide dans notre cas) sont intersectés avec ceux de la face receveuse. On obtient ainsi les surfaces de contrôle. Ces surfaces de contrôle sont ensuite utilisées pour l'échange des grandeurs.

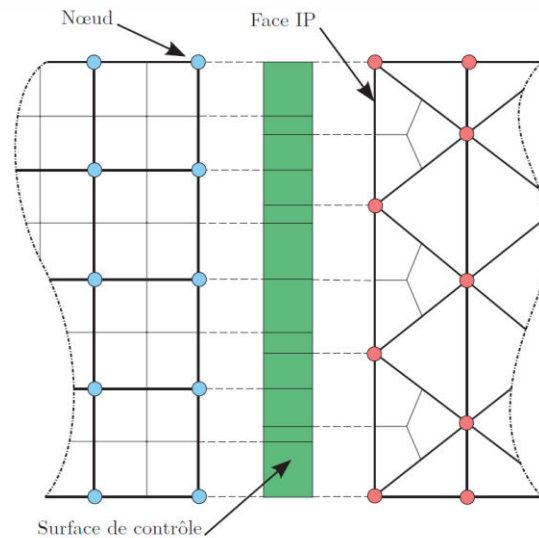


Figure IV.31: Méthode d'échange du type General Grid Interface (GGI)

Le domaine de calcul est maillé avec un maillage structuré généré avec 1,6 million de nœuds points nodaux de volume, ce maillage a été choisi grâce à une étude que nous avons menée pour choisir le nombre de nœuds amélioré, Un maillage structuré dans tout le domaine a été utilisé et  $y^+ = 10$  a été pris.

### VI.8.1.3 L'étude de maillage :

Dans laquelle nous avons étudié quatre d'essais avec des différents de nombre des nœuds et le nombre des nœuds mentionnés précédemment (le troisième) a été choisi car c'est le nombre amélioré de sorte que son résultat Il donne approximativement le même résultat que le nombre de nœuds après lui, qui est le moindre d'entre eux dans le nombre des nœuds et ce dernier signifie le moins de temps que nous passons en simulation c-à-dire c'est le nombre des nœuds optimal pour notre étude.

	Nombre de nœud Total	Puissance KW
Maillage 1	1,190,281	10
Maillage 2	1,298,753	22.4
Maillage 3	1,592,159	23.73
Maillage 4	1,979,223	23.8

Tableau IV.4: l'étude du maillage

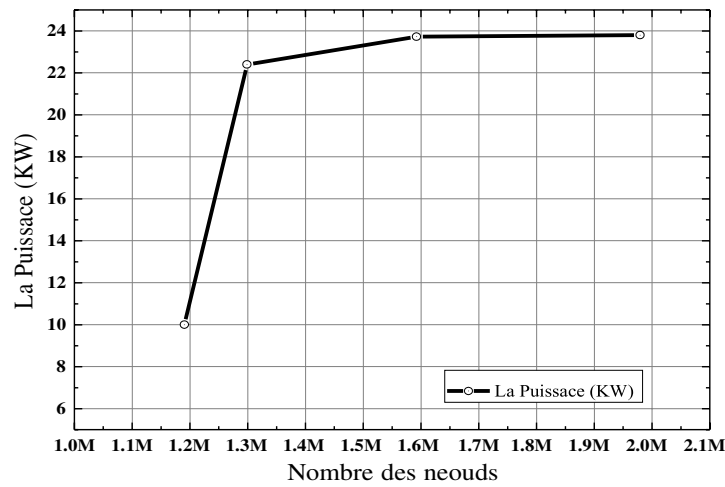


Figure IV.32: Le graphe de l'étude du maillage

Le maillage qui nous a choisis au notre domaine est illustré dans les figures ci-dessous, et le maillage de sous-domaine intérieur DI qui englobe la pale du rotor est plus raffiné (Figure IV.35).

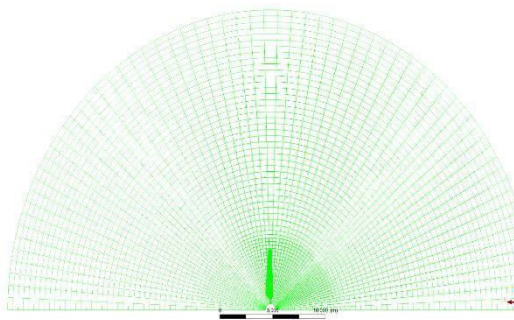


Figure IV.33: Le maillage dans tout le domaine vu de face

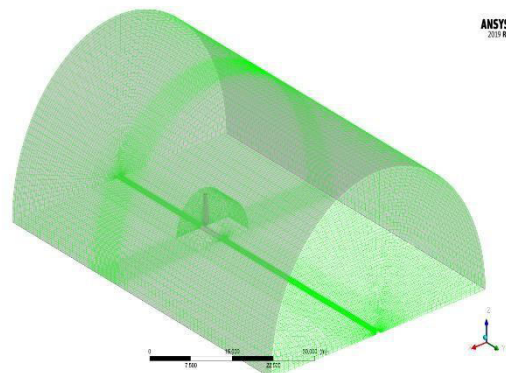


Figure IV.34: Le maillage dans tout le domaine

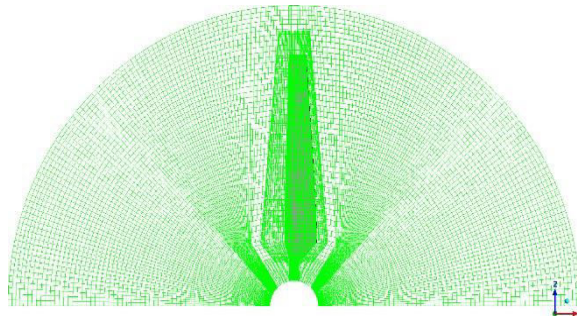


Figure IV.35: Le maillage dans le rotor vu de

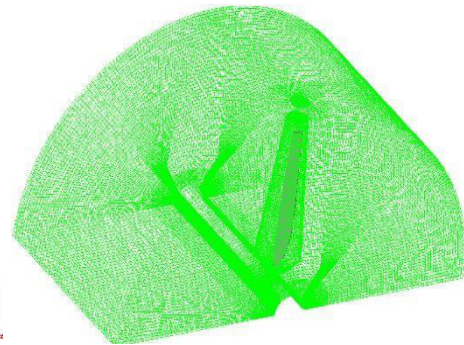


Figure IV.36: Le maillage dans le rotor

La structure de la pale est maillée à l'aide d'un maillage structuré, comme la montre la figure ci-dessous (figure IV.37) :

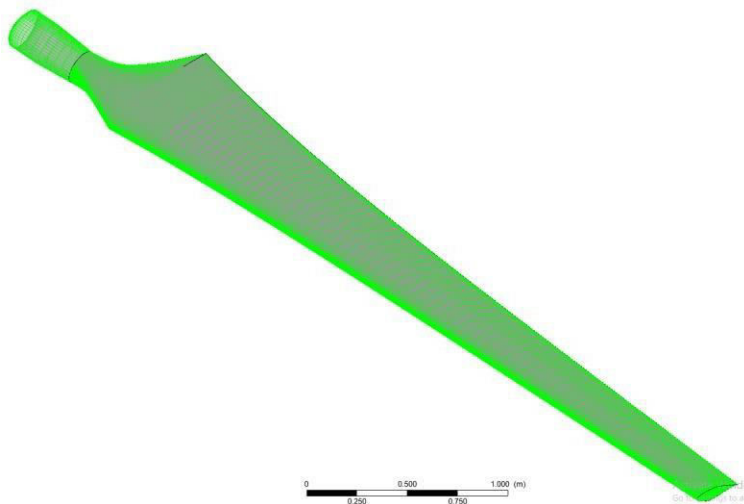


Figure IV.37: Le maillage sur la pale

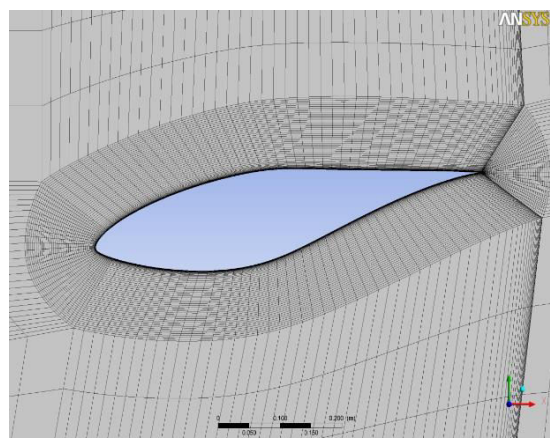
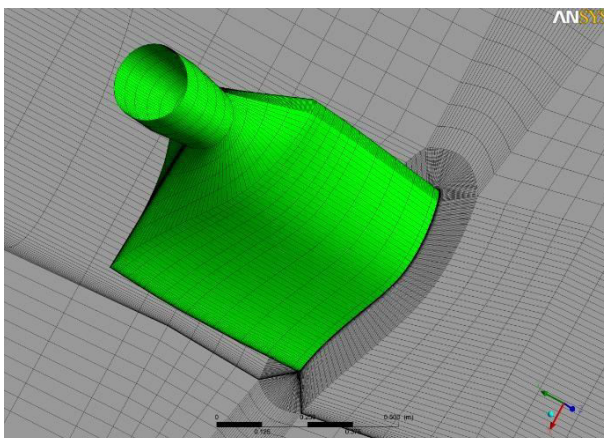


Figure IV.38: La distribution exponentielle du maillage près des parois de la pale

La convention de signe pour les coefficients de force aérodynamique est schématisée sur la figure IV.39. Les forces normales, et tangentielles, ainsi que le moment de tangage adoptent la même convention de mesure. Ceux-ci peuvent être calculés en multipliant les coefficients des forces par la pression dynamique et par la longueur de la corde.

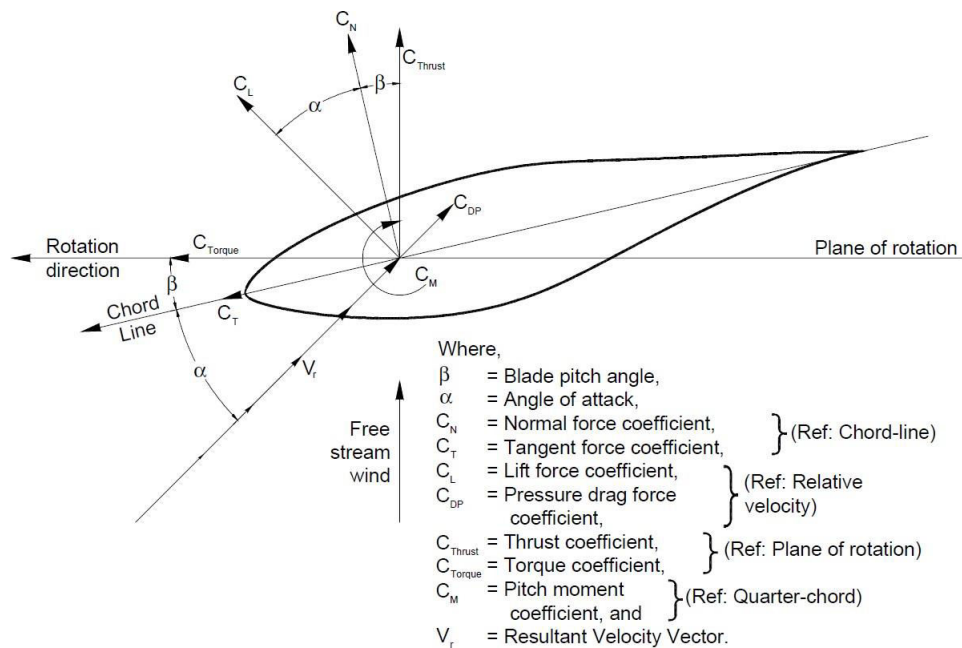


Figure IV.39: Convention de mesure des coefficients des forces aérodynamiques

### VI.8.2 Les Conditions aux limites :

À l'exception des quantités turbulentes et de vitesse en entrée, toutes les conditions aux limites sont maintenues constantes pour tous les cas étudiés. La paroi de la pale du rotor imitant l'entraînement rotatif, visible sur la figure 40, est mise en rotation et la condition de non-glissement y est appliquée. Les autres surfaces de limitation en gris sont en rotation et respectent la condition de glissement.

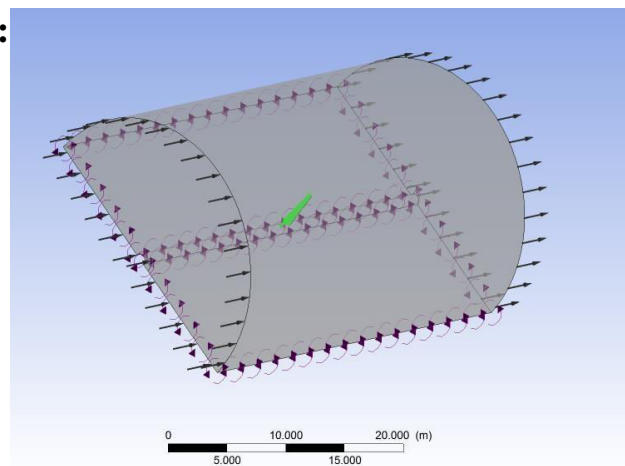


Figure IV.40: la configuration du domaine de calcul générée

En sortie ou le domaine est lié à un repère stationnaire, une condition de type Dirichlet est imposée pour la pression (Pression nulle) et une condition de type Neumann l'est pour la vitesse (gradient de vitesse nul), dans le plan d'entrée lié à un repère stationnaire, situé en amont de l'entrée de la section du calcul, une vitesse normale est imposée en accord avec l'expérimentation retenue.

Entrée : vitesse imposée. (Pour notre étude on a sept vitesses du vent variables =5 m/s, 7 m/s, 10 m/s, 13.1 m/s, 15.1 m/s, 20.1 m/s et 25.1 m/s).

Sortie : Pression de 1 atm.

Limites latérales : Périodique.

La vitesse de rotation du rotor est constante =72.1 tr/min.



### VI.8.3 Résultats et discussions :

La figure (IV.41) c'est l'évolution du couple de l'éolienne on fonction de la vitesse du vent, etaussi présente une comparaison entre les valeurs expérimentales mesurées du couple moteur de l'éolienne et les valeurs calculées numériquement (CFX) à l'aide du domaine de calcul modélisé par la 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> configurations.

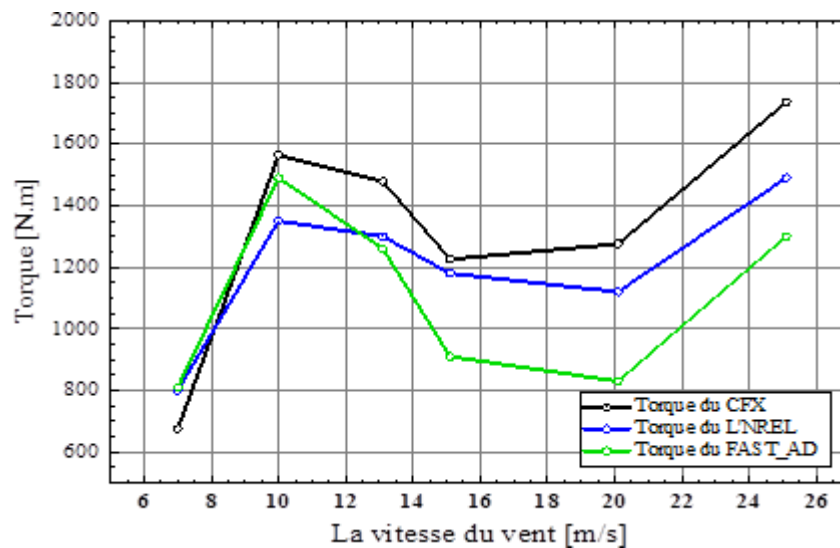


Figure IV.41: l'évolution du le couple de l'éolienne on fonction de la vitesse du vent

La comparaison a montré entre les prévisions et les données mesurées, comme le montre le tableau IV.18, des écarts qui n'y a pas importants entre le couple mesuré de manière expérimentale et le couple calculé (NREL et FAST\_AD avec CFX). Il est particulièrement intéressant de noter qu'aucune tendance ne s'est manifestée quant à la l'ampleur ou à la direction de ces écarts. Et aussi cette comparaison a montré une précision, avec des erreurs faibles allant de 10% à 20%. Et aussi donne clairement des zones distinctes de comportement du modèle numérique : dans le régime pré-décrochage (jusqu'à 10 m/s), le couple de la turbine est parfaitement prévu. Dans le post-décrochage régime - au moins jusqu'à 15 m/s, la turbine couple est de plus en plus pire évaluée avec le décrochage des pales de plus en plus.

Les figures ci-dessous c'est l'évolution des coefficients (Normal et tangentielle) on fonction de la vitesse du vent, et aussi présente une comparaison entre les valeurs expérimentales mesurées du cet coefficients et les valeurs calculées numériquement (CFX) :

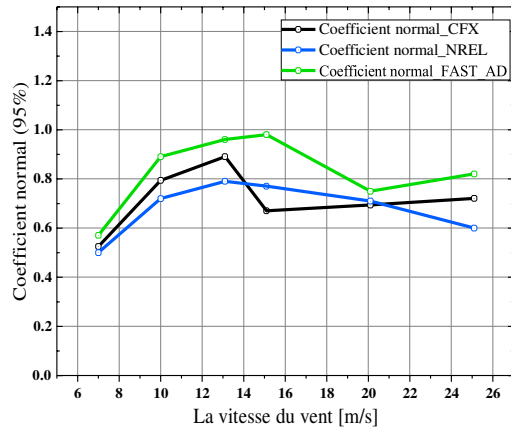


Figure IV.42: Coefficient Normal en fonction de la vitesse du vent à (r/R=95%)

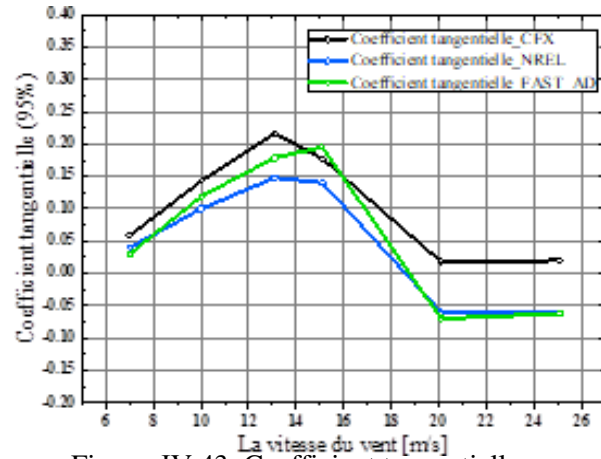


Figure IV.43: Coefficient tangentielle en fonction de la vitesse du vent à (r/R=95%)

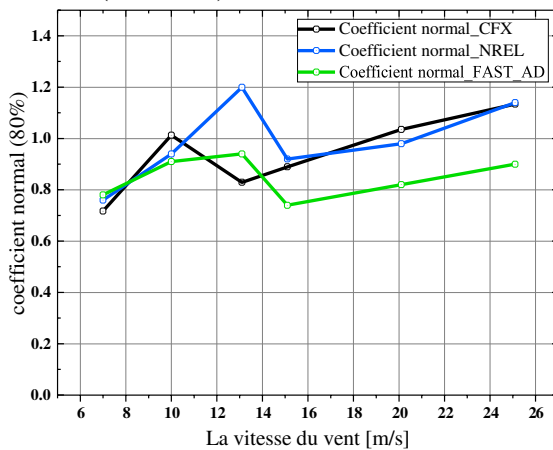


Figure IV.44: Coefficient Normal en fonction de la vitesse du vent à (r/R=80%)

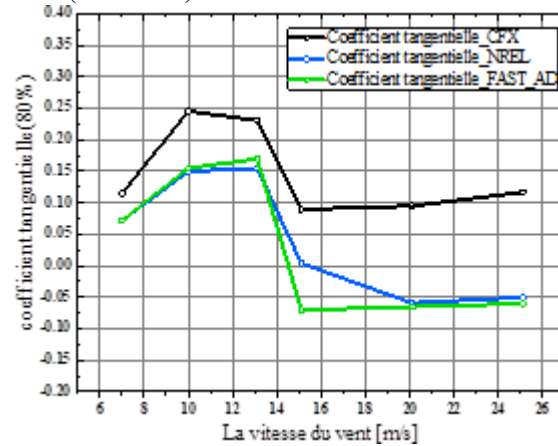


Figure IV.45: Coefficient tangentielle en fonction de la vitesse du vent à (r/R=80%)

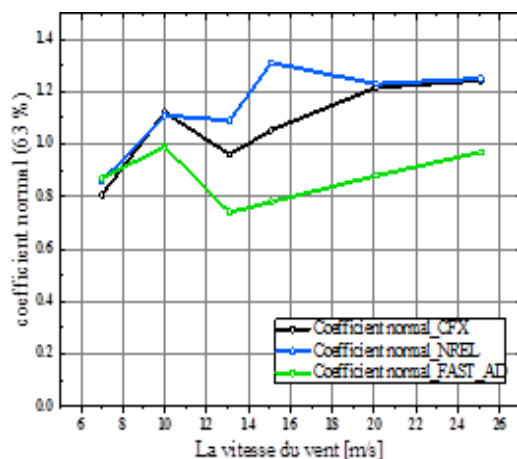


Figure IV.46: Coefficient Normal en fonction de la vitesse du vent à (r/R=63%)

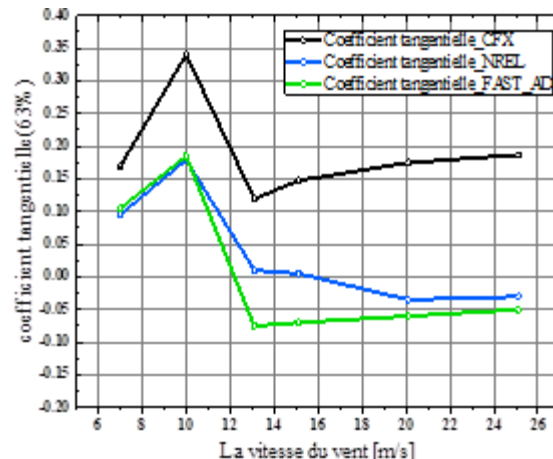


Figure IV.47: Coefficient tangentielle en fonction de la vitesse du vent à (r/R=63%)

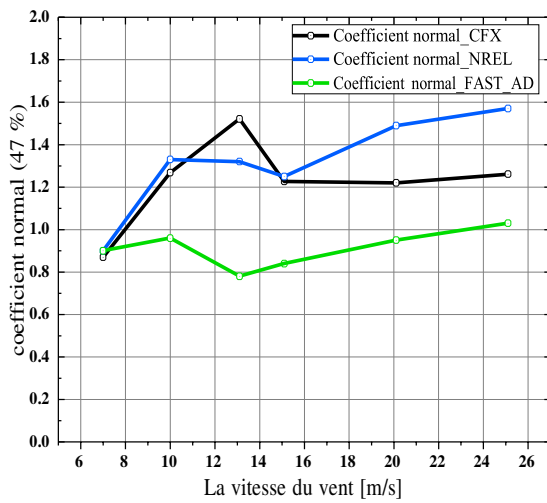


Figure IV.48: Coefficient Normal en fonction de la vitesse du vent à (r/R=47%)

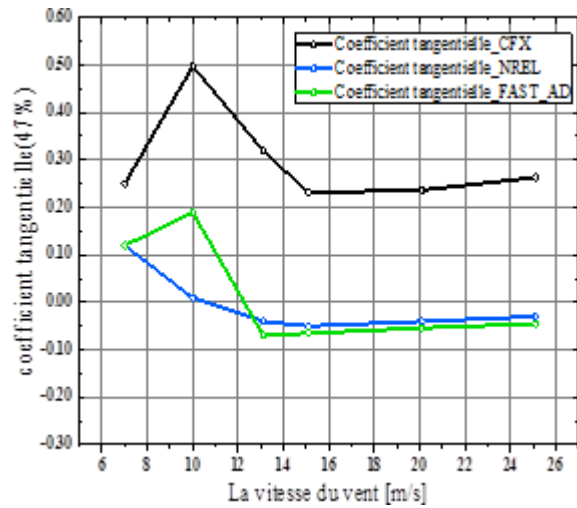


Figure IV.49: Coefficient tangentielle en fonction de la vitesse du vent à (r/R=47%)

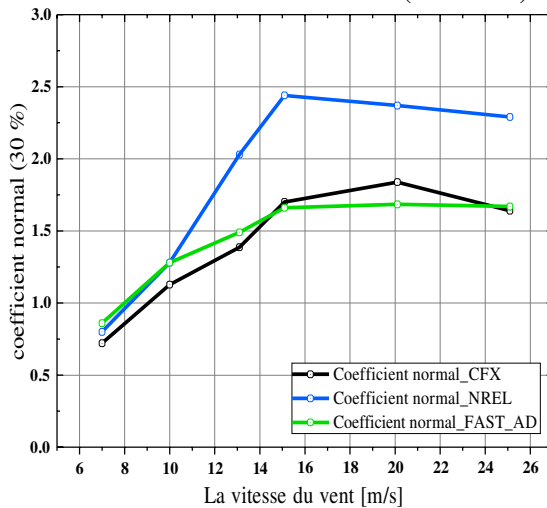


Figure IV.50: Coefficient Normal en fonction de la vitesse du vent à (r/R=30%)

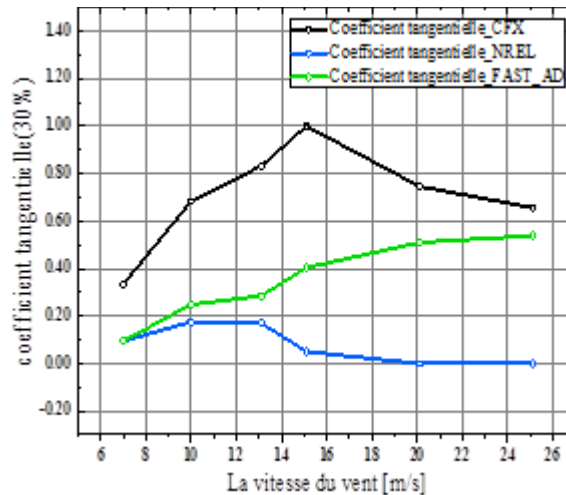


Figure IV.51: Coefficient tangentielle en fonction de la vitesse du vent à (r/R=30%)

La comparaison a montré des marges inattendues de désaccord entre les prévisions et les données mesurées, les figures ci-dessus montrent les écarts importants entre les coefficients mesuré de manière expérimentale et les coefficients calculés (NREL et FAST\_AD avec CFX). Et aussi cette comparaison a montré une précision limitée, avec des erreurs moyennes allant de 50% à 100%, et des erreurs observées supérieures à 200%, et ces erreurs sont perceptibles dans les coefficients tangentiels et surtout au plus près du pied de pale et plus la vitesse du vent est grande.

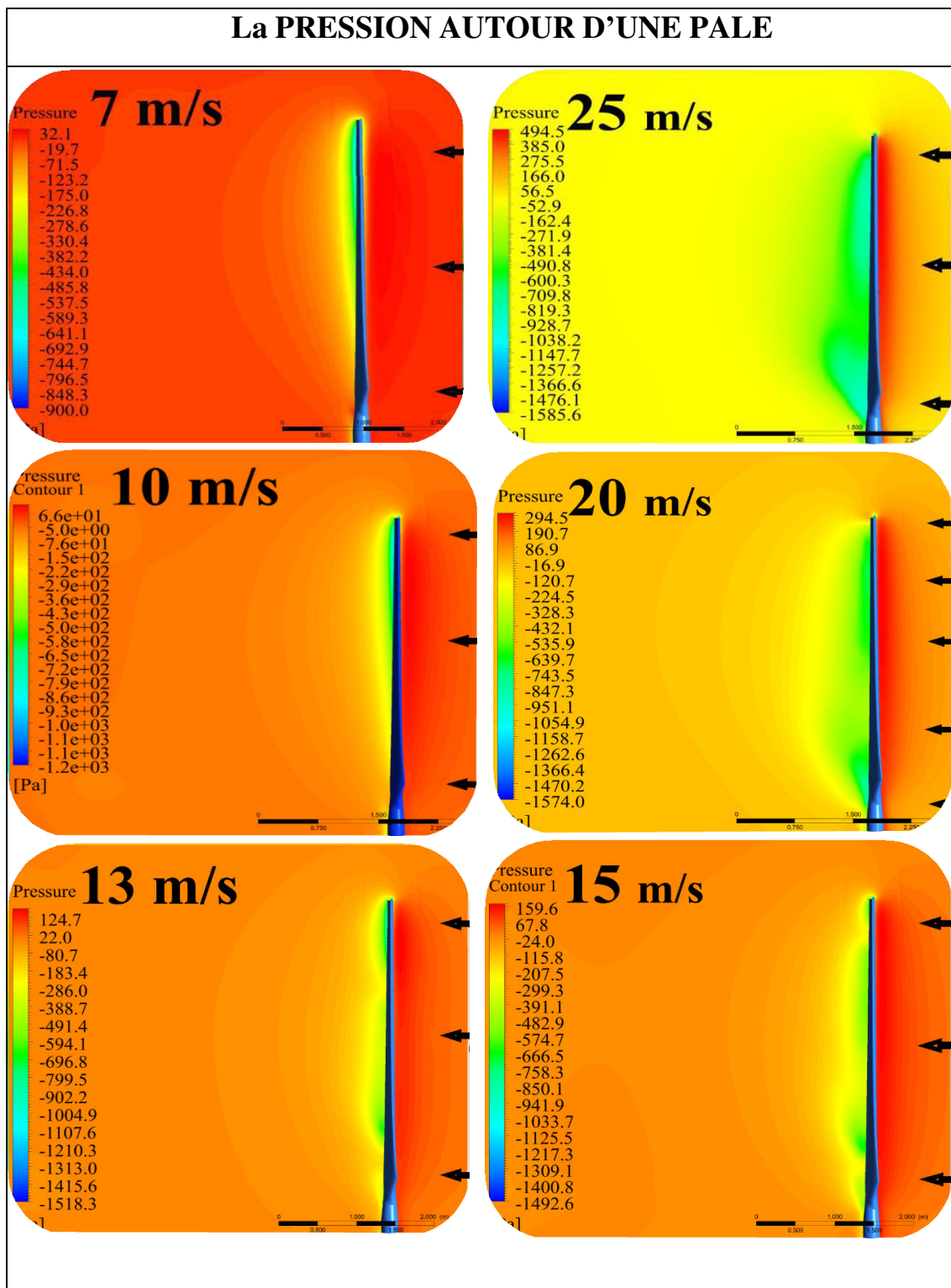


Tableau IV.5: Les contours de la pression autour de la pale

Les tableaux suivants (5,6) sont représentés les contours de pression sur la pale et les contours de la vitesse du vent autour de la pale dans différents de vitesse du vent :

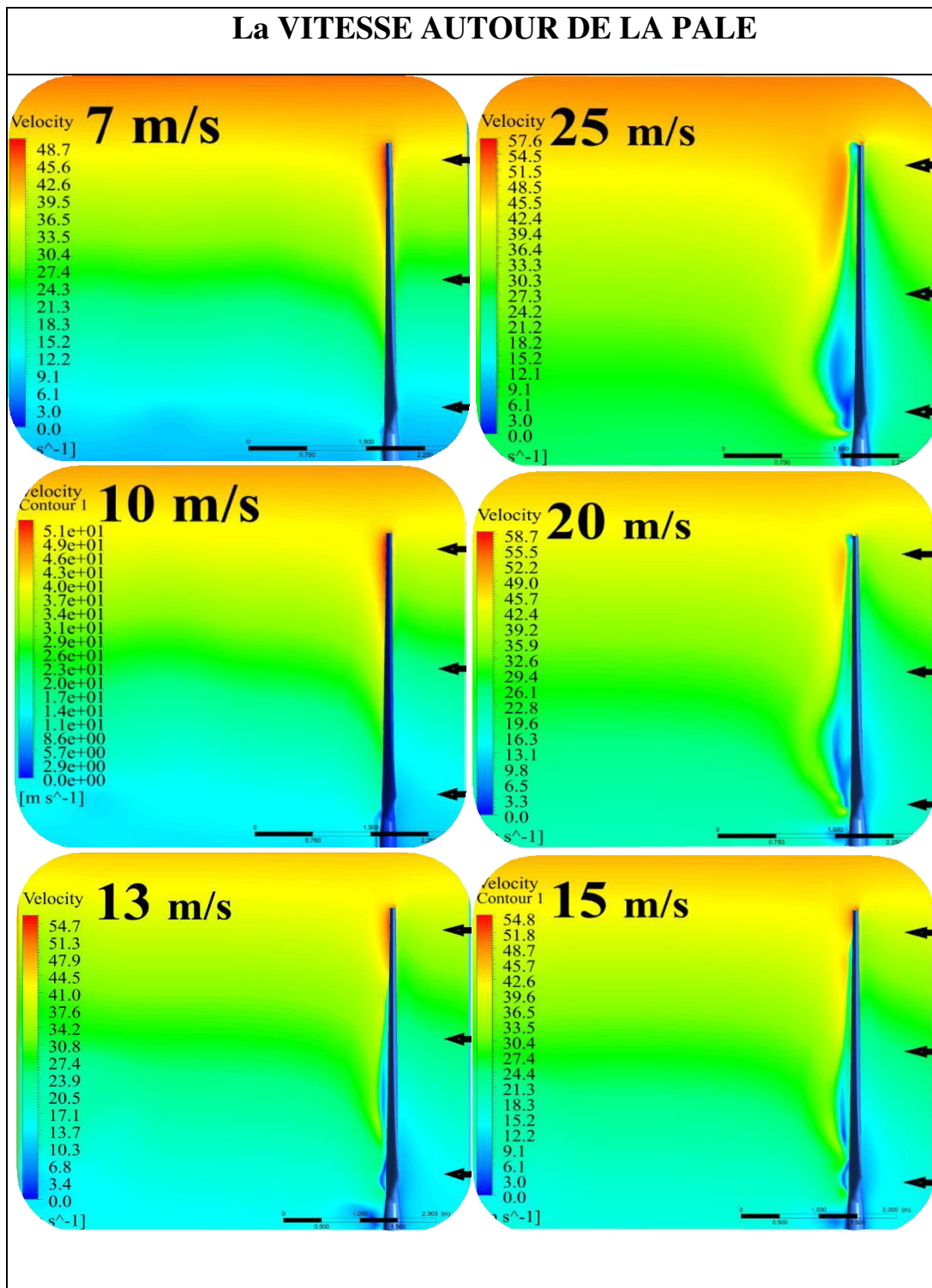


Tableau IV.6: Les contours de la vitesse autour toute la pale

Il est clair que près de la racine (en pied de la pale), une importante séparation de flux sur intrados, un décollement apparaît, lorsque la vitesse du vent est importante, c'est-à-dire que la couche limite décolle sans rattachement de la couche limite sur le profil, Cette séparation influence largement sur la structure de l'écoulement derrière le rotor. L'analyse des vitesses dans le sillage du rotor montre que le moyeu est une source de perturbations et

de l'in-stationnarités aérodynamiques fortes. Ceci résulte de la forme encombrante du moyeu qui comporte la génératrice.

Les gradients de pression adverses sont forts et ne sont plus complètement balancés par l'accélération convective (et les forces de viscosité). On remarque que la limitation des viscosités tourbillonnaires, permet au modèle  $K - \omega$  SST de modéliser le transport des contraintes de cisaillement turbulent, et donc lui permet de modéliser le déplacement des turbulences. Ce qui lui permet notamment de réaliser de bonnes prédictions pour les structures tourbillonnaires.

On peut visualiser bien les résultats de l'écoulement autour de la pale qui est la pression et le comportement de la vitesse du vent avec les lignes de courant, à travers des plans de section aux différentes positions à le long de la pale (figure IV.52), dans les tableaux (7 jusqu'à 16).

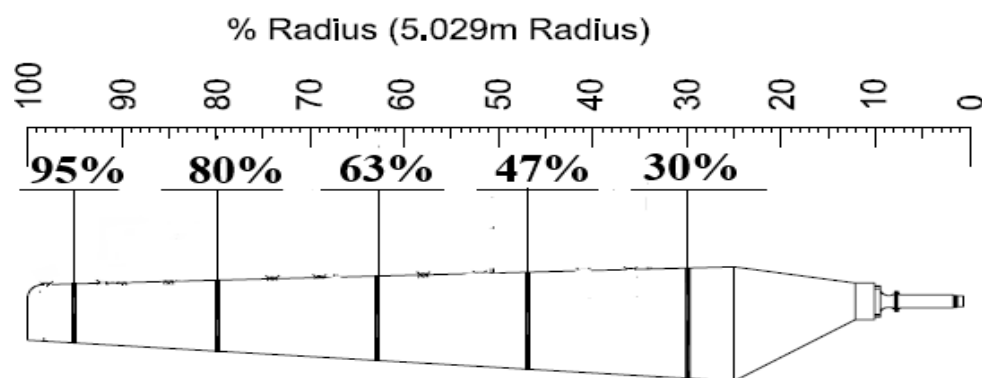


Figure IV.52: les positions des plans de section ont le long de la pale

a) Les contours de pression :

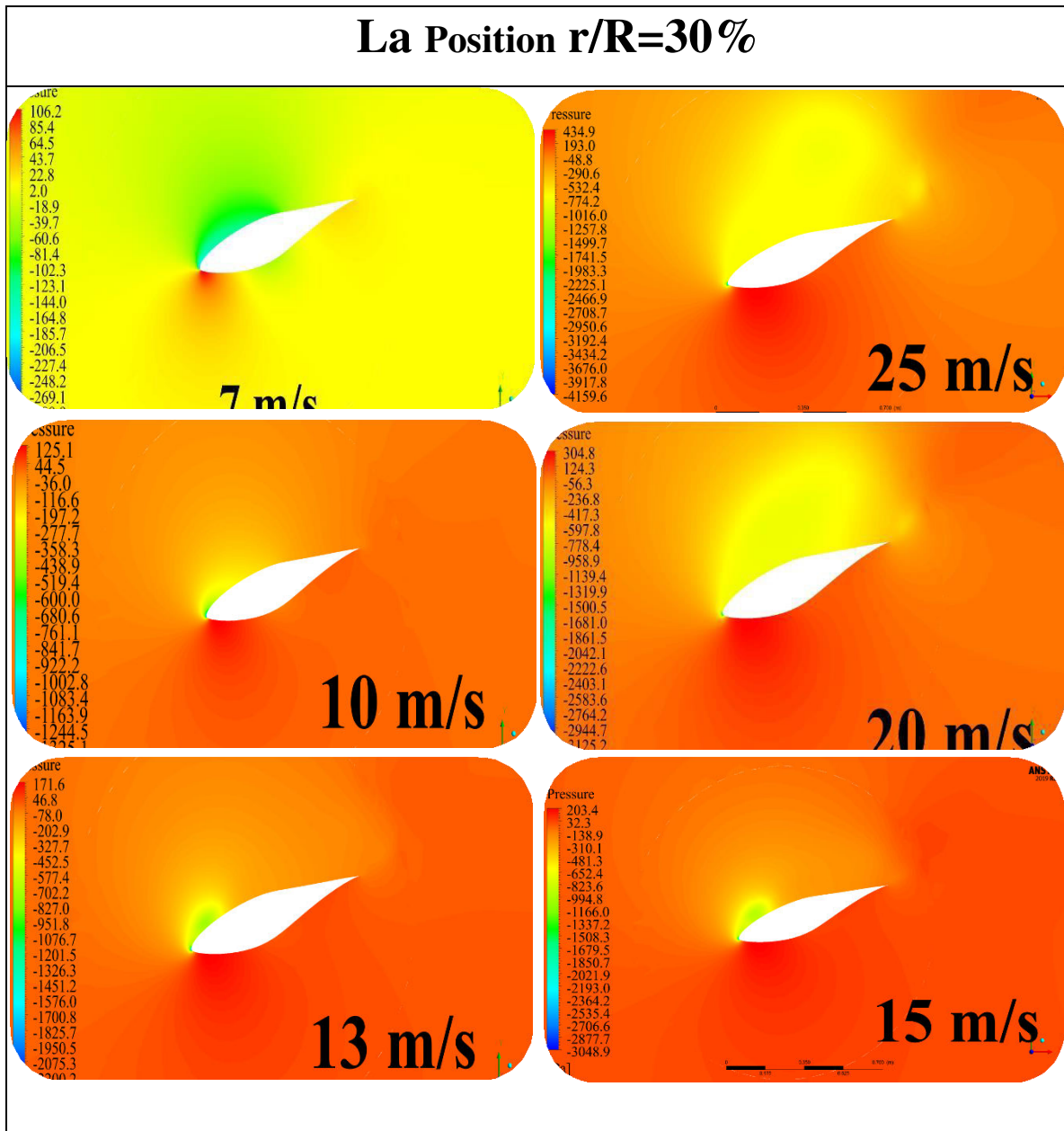


Tableau IV.7: Les contours de pression à la position de 30%

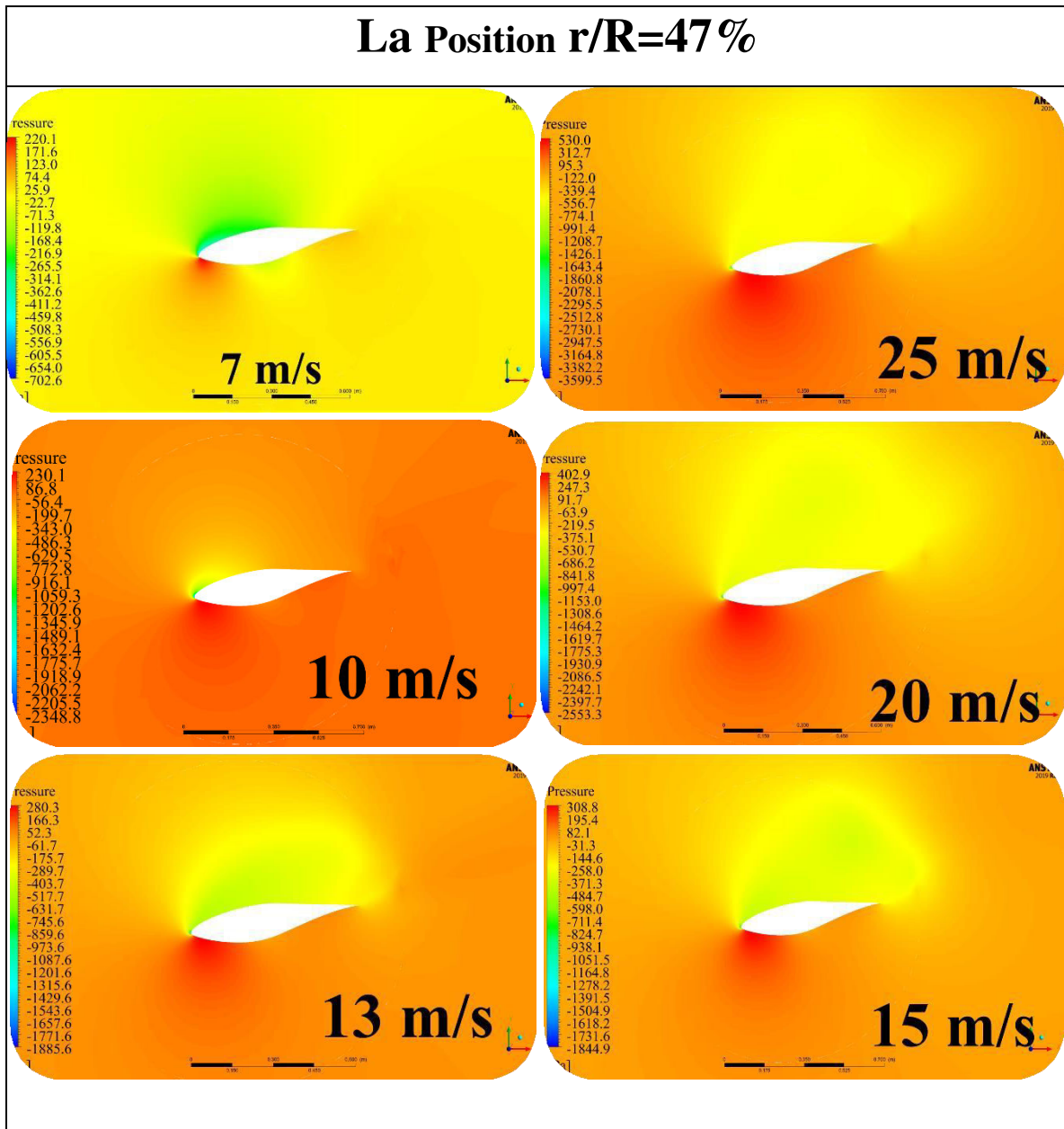


Tableau IV.8: Les contours de pression à la position de 47%



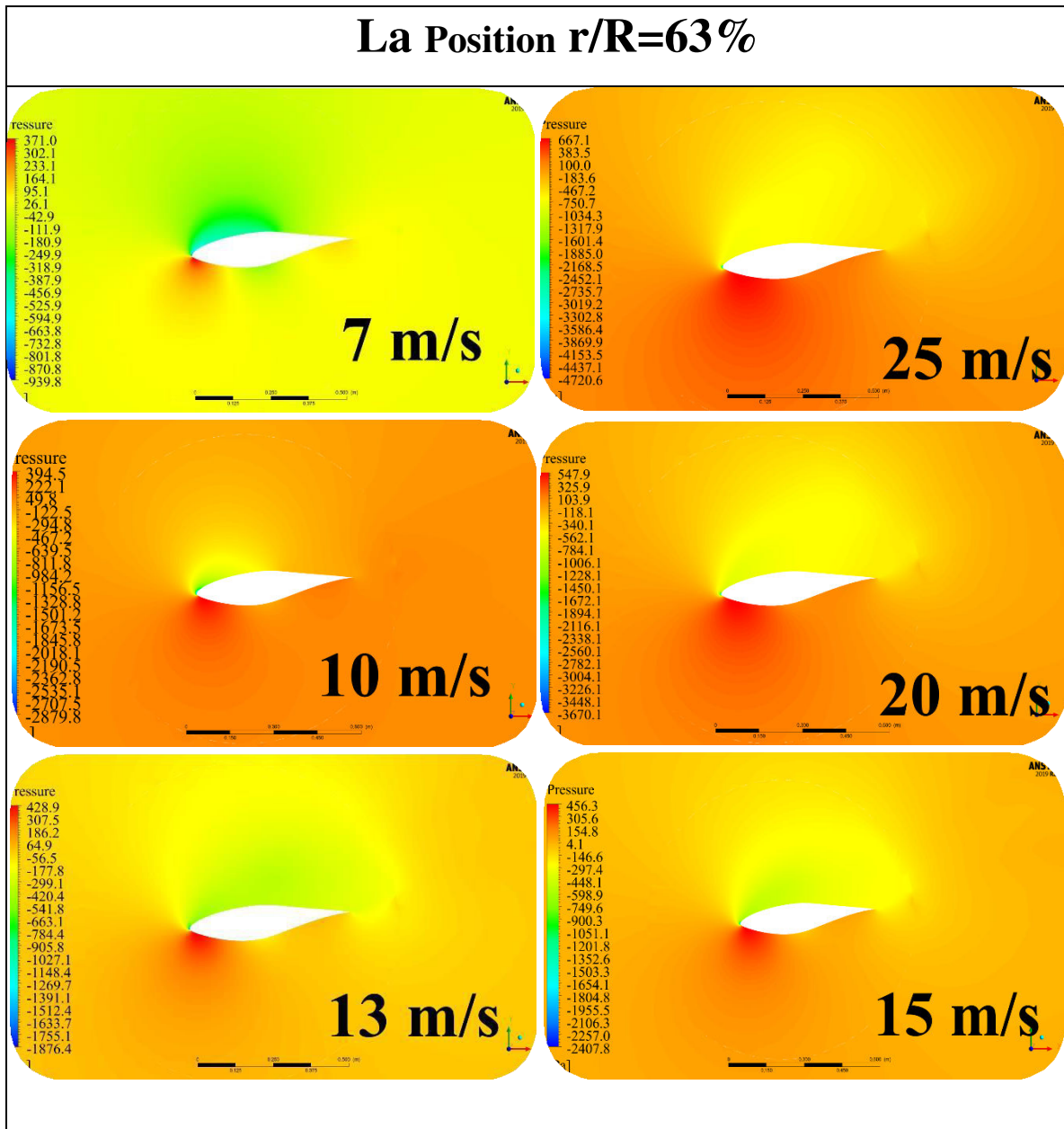


Tableau IV.9: Les contours de pression à la position de 63%

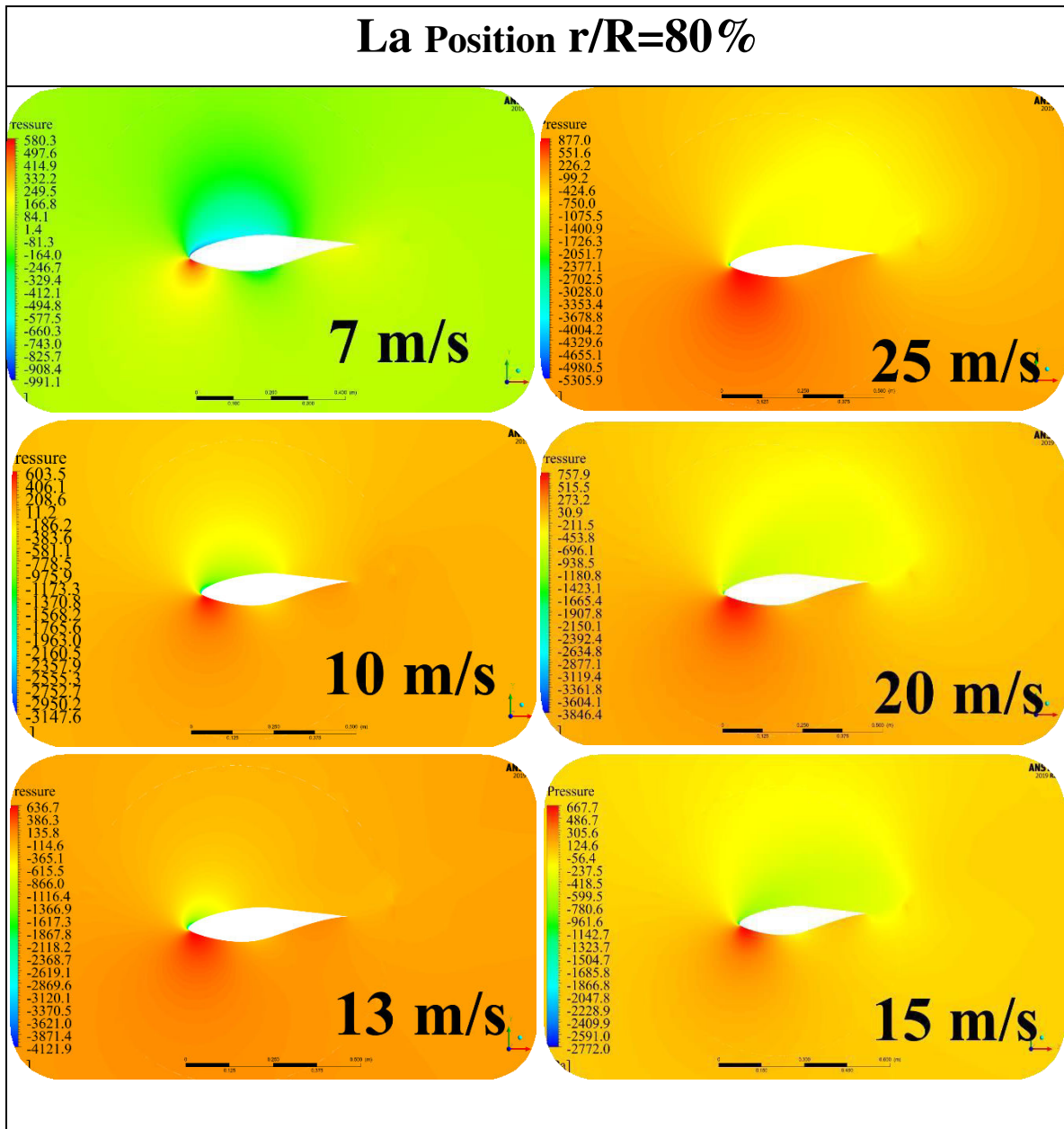


Tableau IV.10: Les contours de pression à la position de 80%

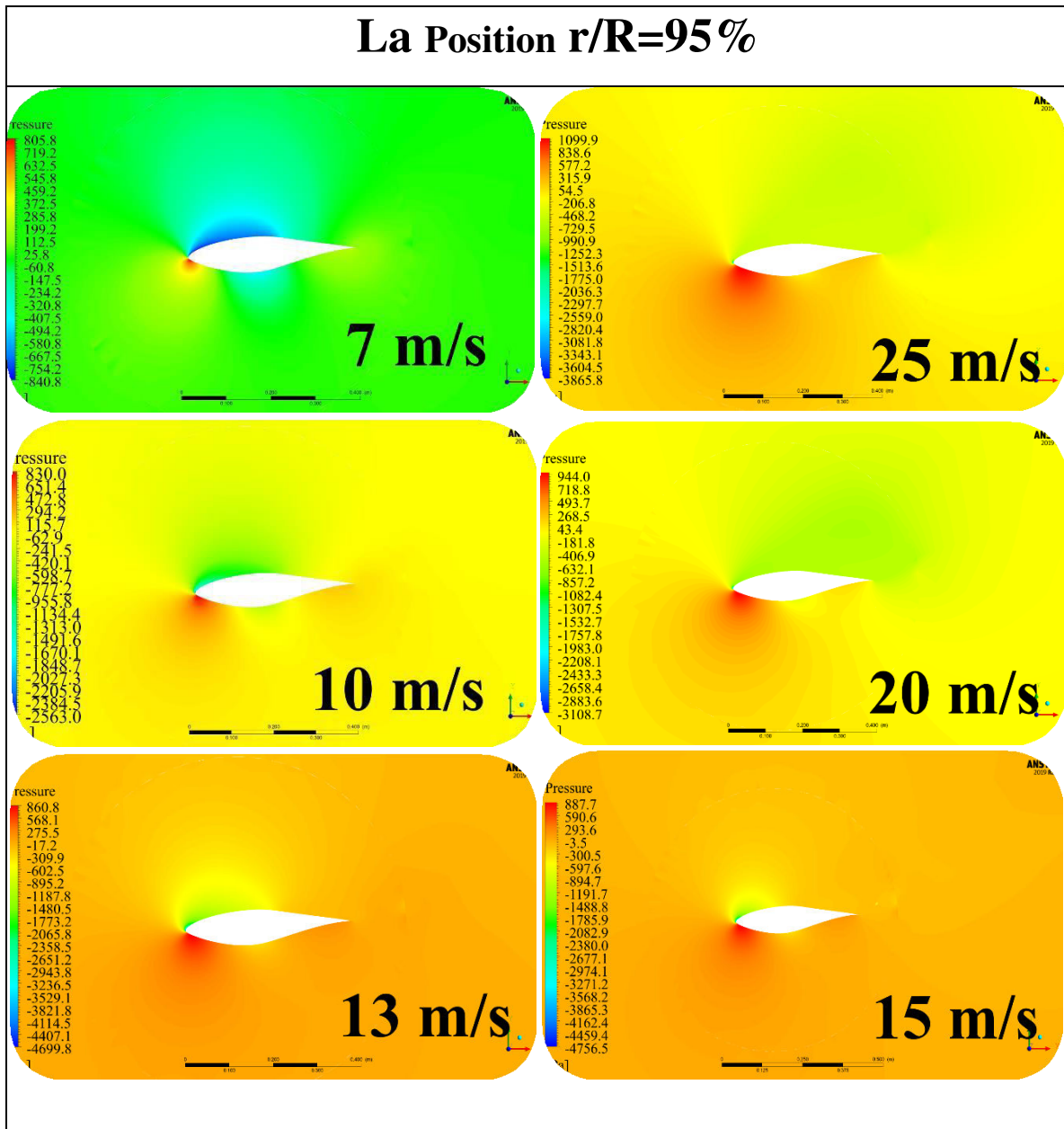


Tableau IV.11: Les contours de pression à la position de 95%

b) Les contours de vitesse :

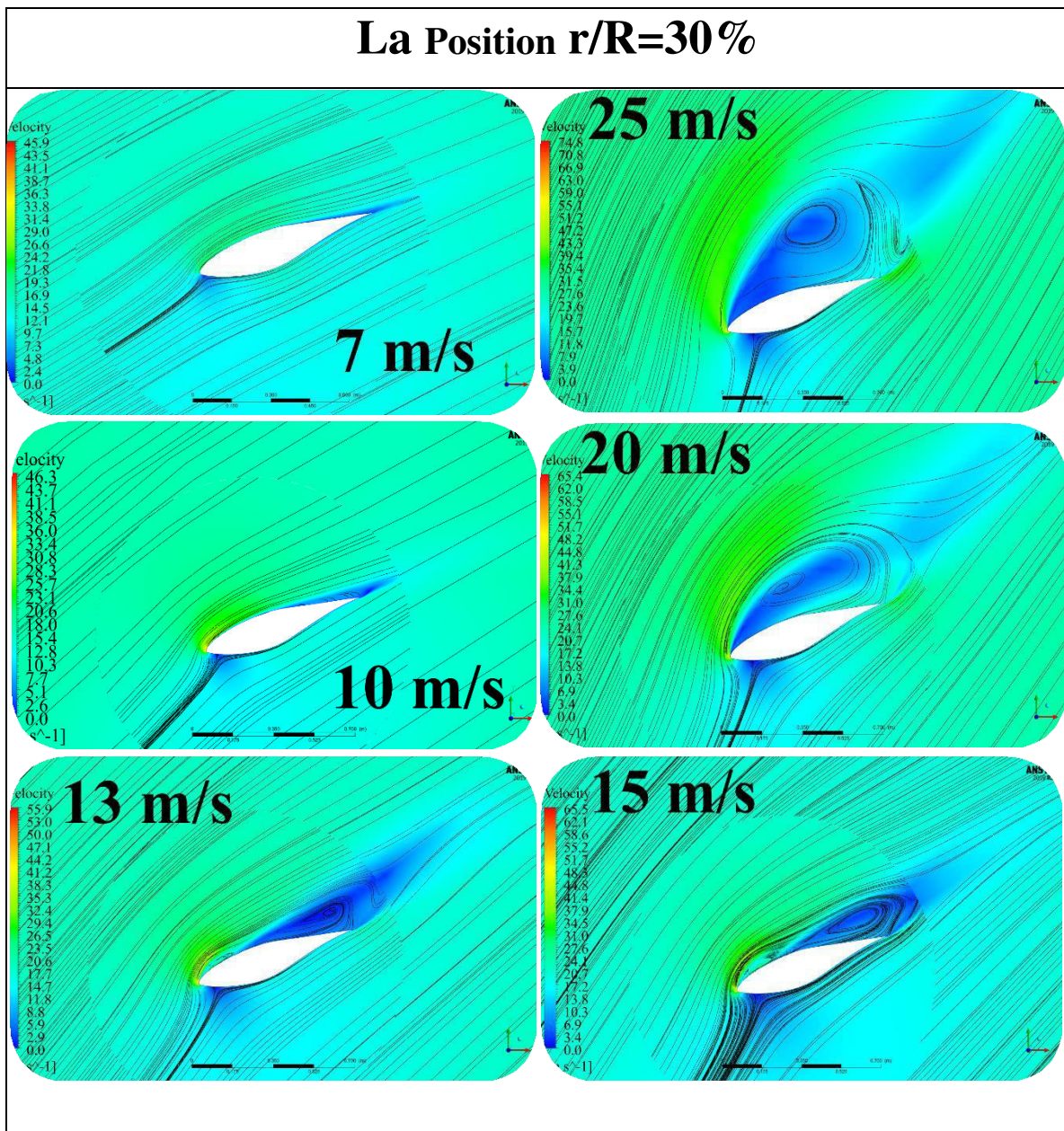


Tableau IV.12: Les contours de vitesse à la position de 30%

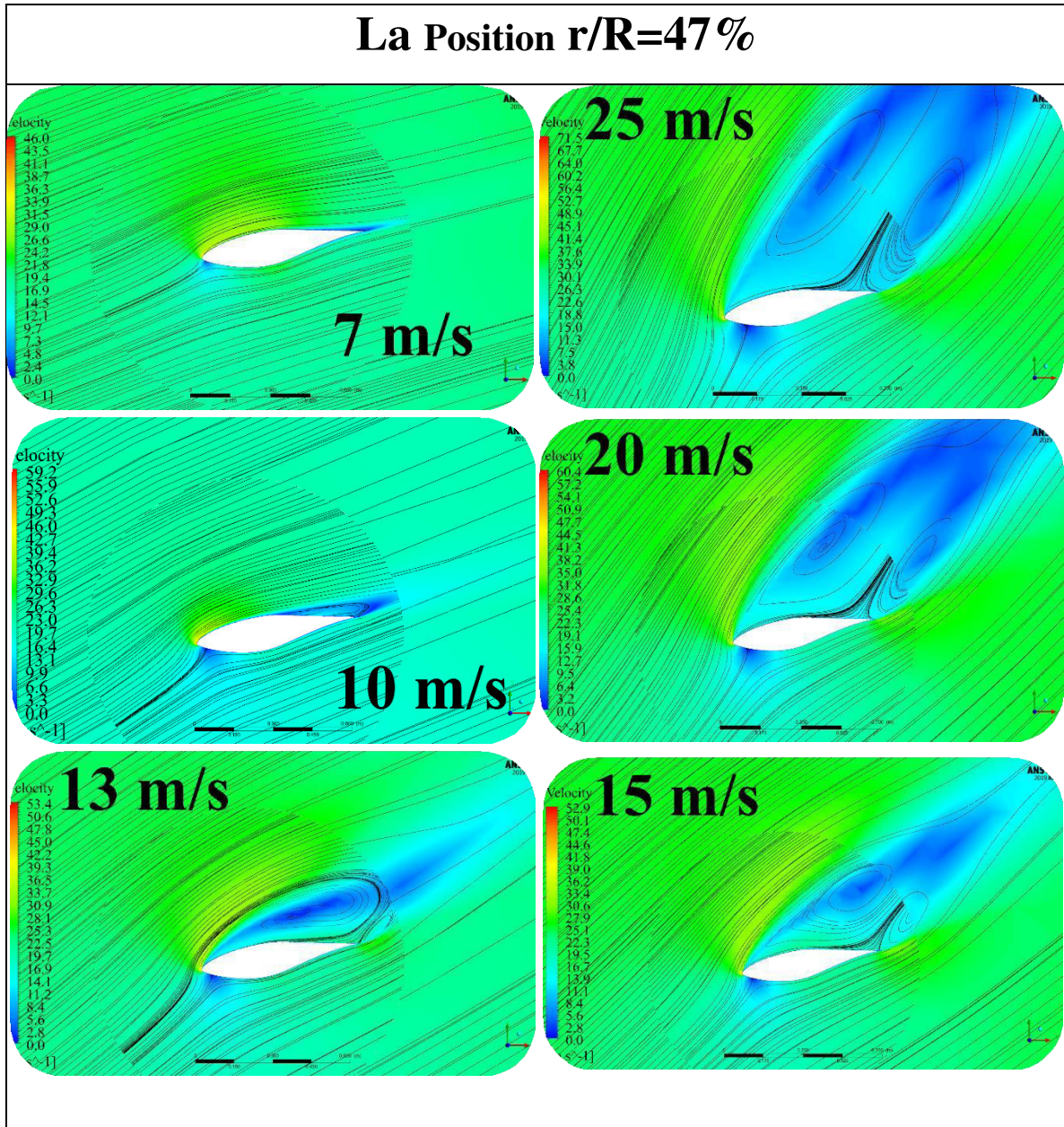


Tableau IV.13: Les contours de vitesse à la position de 47%

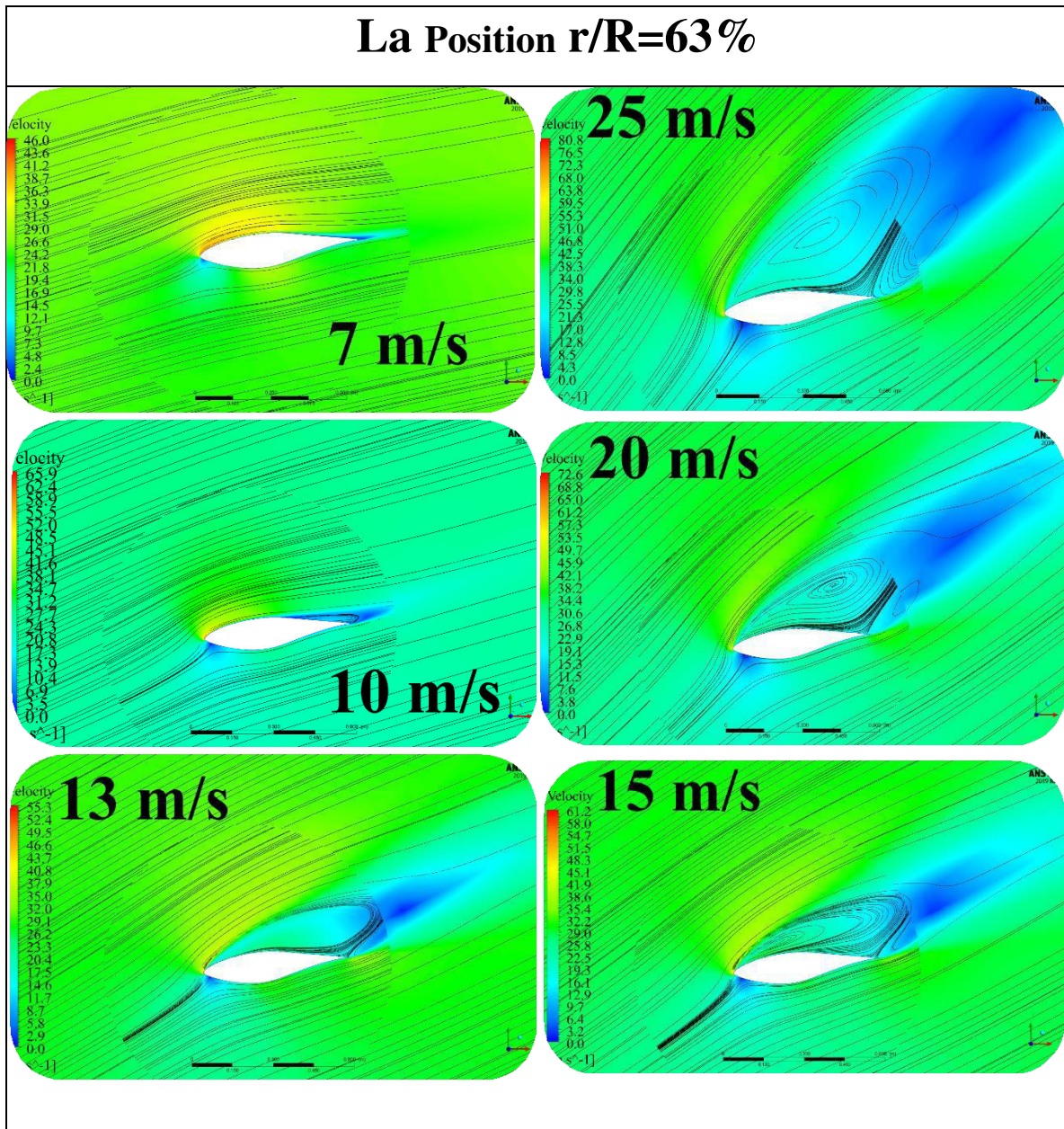


Tableau IV.14: Les contours de vitesse à la position de 63%

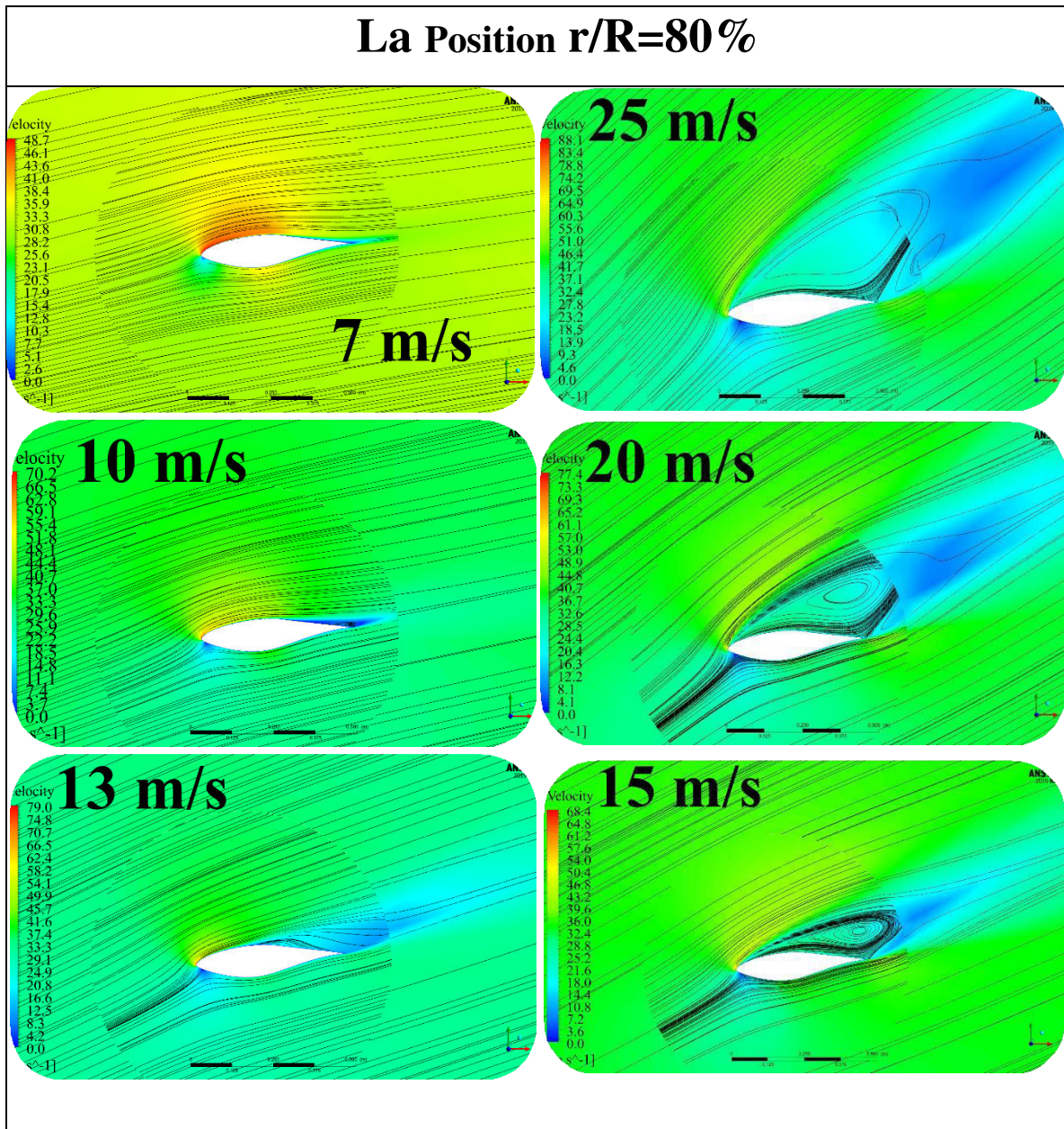


Tableau IV.15: Les contours de vitesse à la position de 80%

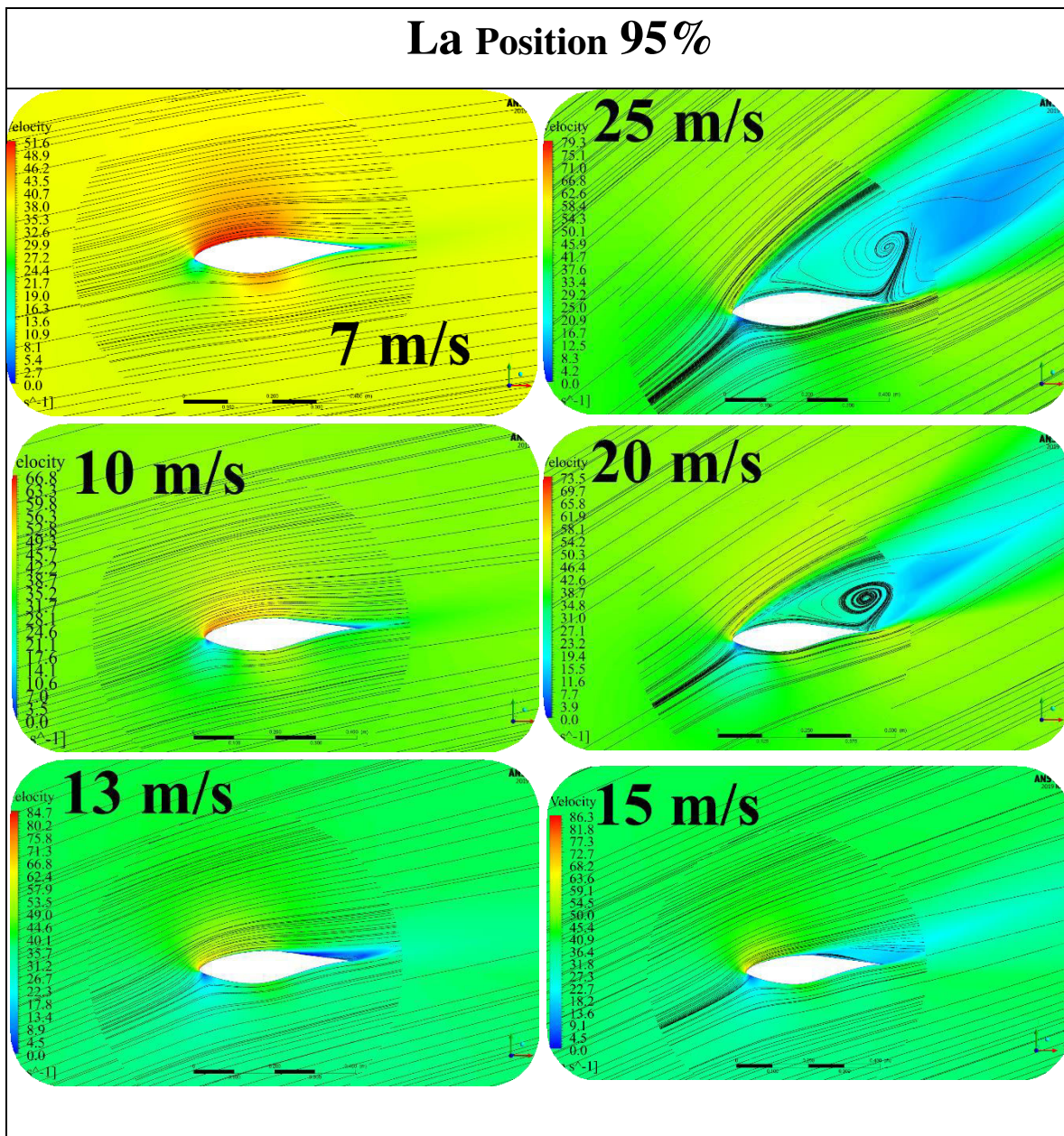


Tableau IV.16: Les contours de vitesse à la position de 95%



On note que plus la vitesse du vent est augmentée, plus la zone de sillage est progressivement grande, et elle est variable le long de la pale, de sorte que plus proche du pied de la pale le changement est clair pour ce phénomène par rapport à la zone avant elle le long de la pale, et il est clair qu'il est directement proportionnel à la zone dans laquelle l'axe du profil est plus grand.

La vitesse maximale du vent est à la surface supérieure de la pale.

On note aussi que la haute pression à la surface de la pale (intrados) qui touche et rencontre le vent en premier. Par contre, la pression est faible sur la face opposée de la pale (extrados)

Il y a des tourbillons qu'ils ont marginaux émis par un rotor éolien et ce sont les principales structures tourbillonnaires dans le sillage, car la nappe tourbillonnaire s'enroule rapidement autour des tourbillons marginaux. (Figure IV.53)

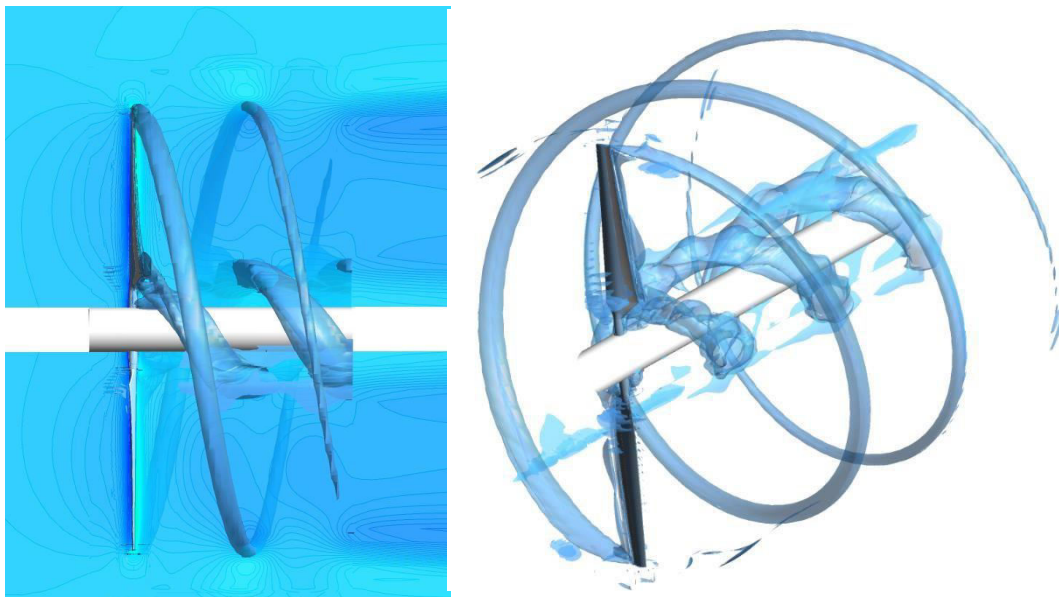


Figure IV.53: Structure du sillage en aval du rotor

### VI.8.4 Conclusion :

En conclusion, quand on considère l'écoulement tri-dimensionnel autour d'une pale, la force de portance est réduite par comparaison à un écoulement bi-dimensionnel pour le même angle d'attaque géométrique, et la force de portance locale possède un composant dans la direction de l'écoulement amont qui n'est autre que la traînée induite. Ces deux effets sont induits par le système tourbillonnaire tri-dimensionnel de la pale d'une éolienne. Mais il est important de comprendre que le système tourbillonnaire produit par l'écoulement tri-dimensionnel autour d'une pale modifie les conditions locales vues par cette pale. En d'autres termes, bien que l'écoulement soit localement bi-dimensionnel, nous ne pouvons pas utiliser l'angle d'attaque géométrique pour estimer les forces exercées sur la pale.

Sur une pale rotative, les forces de Coriolis et les forces centrifuges jouent un rôle important dans la séparation de la couche limite qui se produit au décrochage. Quand la couche limite se sépare, la quantité de mouvement de l'air qui se détache de cette couche est relativement faible. Ainsi, la force centrifuge pousse l'air détaché vers l'extrémité de la pale. Lorsque l'air se déplace radialement vers l'extrémité de la pale en rotation, la force de Coriolis s'exerce sur l'air dans la direction tangentielle et agit alors comme un gradient de pression favorable qui retarde le décrochage. Les effets conjugués de la force centrifuge et de la force de Coriolis modifient ainsi les caractéristiques aérodynamiques 2-D du profil en décrochage.

Nous avons montré que les nappes tourbillonnaires naissent au bord de fuite à cause de la discontinuité de vitesse. Cette dernière est provoquée par les fuites d'air aux extrémités de pale dues à la différence de pression entre la face supérieure et la face inférieure du profil. Quant aux tourbillons marginaux, ils émanent des extrémités de pale et se renforcent ensuite par les nappes tourbillonnaires qui s'y enroulent rapidement en aval de l'écoulement.

Ces structures tourbillonnaires induisent des vitesses axiales et tangentielles qui réduisent la performance aérodynamique du rotor en réduisant les angles d'incidence sur les pales. Le calcul des coefficients aérodynamiques étant incertain à cause du décrochage aérodynamique pour les vitesses élevées, l'évaluation des performances aérodynamiques de l'éolienne reste très difficile.

Puisqu'une éolienne à axe horizontal est constituée de pales tournantes, son système tourbillonnaire est différent de celui d'une aile fixe. En effet, la nappe tourbillonnaire émanant du bord de fuite et constituée par les tourbillons de traînée évolue sur un chemin hélicoïdal derrière le rotor. De même, les tourbillons marginaux qui émanent des extrémités des pales possèdent un mouvement hélicoïdal et se déplacent en aval du rotor. En plus, des

tourbillons marginaux prennent naissance au niveau du moyeu et évoluent ensuite principalement sur une trajectoire linéaire le long de l'axe de rotation.

En outre, si les coefficients de portance et de traînée sont connus pour le profil des pales, il est facile de calculer le chargement des pales, et la puissance de l'éolienne à travers la connaissance du couple (Torque) de celui-ci.

## **Conclusion générale :**

Dans notre mémoire, nous avons étudié l'écoulement autour de la pale a la section de profil aérodynamique NREL S809 pour une éolienne à axe horizontal (en 2D et en 3D). La simulation numérique a été faite à l'aide du logiciel Ansys-CFX, en utilisant un modèle de turbulence K- SST, à plusieurs variables (différents nombres de Reynolds avec des différents angles d'attaques en 2D. et en 3D, des différentes vitesses du vent).

A travers la simulation nous avons extrait des coefficients aérodynamiques comme (la portance, la trainée, la tangentielle), et conclu à travers cette étude qui nous a permis de bien comprendre le phénomène de décrochage dynamique et ses conséquences, de prédire son apparence et d'identifier les étapes de ce processus physique, et il existe des phénomènes physiques qui se produisent au niveau des pales d'éoliennes et qui se produisent en aval de l'éolienne, et ce phénomène c'est le sillage éolien qui est responsables a la création d'une autre phénomène juste derrière le rotor qui sont des structures tourbillonnaires.

## LES ANNEXES

	Le nombre des profils	La distance radial (m)	La position du profile dans la pale(r/5.029)	La corde (mm)	L'épaisseur (mm)	Le vrillage(degrés)	Le centre de vrillage (% la corde)
<b>Section Cylindrique</b>	<b>P1</b>	0	0%	218	218	0	50
	<b>P2</b>	0.508	10%	218	218	0	50
	<b>P3</b>	0.66	13%	218	218	0	50
	<b>P4</b>	0.883	18%	183	183	0	50
<b>Section de Transition</b>	<b>P5</b>	1.008	20%	349	163	6.7	35.9
	<b>P6</b>	1.067	21%	441	154	9.9	33.5
	<b>P7</b>	1.133	23%	544	154	13.4	31.9
	<b>P8</b>	1.257	25%	737	154	20.04	30
<b>S-809</b>	<b>P9</b>	1.343	27%	728	20.95% corde	18.074	30
	<b>P10</b>	1.51	30%	711	20.95% corde	14.292	30
	<b>P11</b>	1.648	33%	697	20.95% corde	11.909	30
	<b>P12</b>	1.952	39%	666	20.95% corde	7.979	30
	<b>P13</b>	2.257	45%	636	20.95% corde	5.308	30
	<b>P14</b>	2.343	47%	627	20.95% corde	4.715	30
	<b>P15</b>	2.562	51%	605	20.95% corde	3.425	30
	<b>P16</b>	2.867	57%	574	20.95% corde	2.083	30
	<b>P17</b>	3.172	63%	543	152.5	1.15	30
	<b>P18</b>	3.185	63%	542	20.95% corde	1.115	30
	<b>P19</b>	3.476	69%	512	20.95% corde	0.494	30
	<b>P20</b>	3.781	75%	482	20.95% corde	-0.015	30
	<b>P21</b>	4.023	80%	457	20.95% corde	-0.381	30
	<b>P22</b>	4.086	81%	451	20.95% corde	-0.475	30
<b>P23</b>	4.391	87%	420	20.95% corde	-0.92	30	
<b>P24</b>	4.696	93%	389	20.95% corde	-1.352	30	
<b>P25</b>	4.78	95%	381	20.95% corde	-1.469	30	
<b>P26</b>	5	99%	358	20.95% corde	-1.775	30	
<b>P27</b>	5.029	100%	355	20.95% corde	-1.815	30	

Tableau IV.17: Les propriétés de la pale 3D du l'éolienne S809

<b>Re = 300,000</b>				
Angle of Attack	Coefficient de portance(Cl) <b>CFX</b>	Coefficient de portance(Cl) <b>CSU</b>	Coefficient de trainée(Cd) <b>CFX</b>	Coefficient de trainée(Cd) <b>CSU</b>
0	0.12478	0.105	0.01489	0.0117
1.99	0.34684	0.307	0.01534	0.0116
4.08	0.5704	0.545	0.01648	0.0139
6.11	0.76839	0.748	0.0189	0.0135
8.14	0.92129	0.88	0.02423	0.0198
10.2	1.00133	0.878	0.03617	0.036
11.2	1.01174	0.87	0.04576	0.0446
12.2	1.01194	0.854	0.05768	0.0496
13.1	1.00003	0.877	0.07058	0.0619
14.1	0.96846	0.894	0.08864	0.0731
15.2	0.90655	0.891	0.11602	0.0865
16.3	0.80845	0.745	0.15682	0.22
17.2	0.75394	0.591	0.19025	0.248
18.1	0.72568	0.592	0.21949	0.265
19.2	0.71115	0.58	0.2513	0.279
20.2	0.70673	0.604	0.27964	0.298
22.1	0.71607	0.588	0.32759	0.323
26.2	0.76197	0.669	0.42329	0.412

<b>Re = 500,000</b>				
Angle of Attack	Coefficient de portance(Cl) <b>CFX</b>	Coefficient de portance(Cl) <b>CSU</b>	Coefficient de trainée(Cd) <b>CFX</b>	Coefficient de trainée(Cd) <b>CSU</b>
-2,23	-0,12627	-0,06	0,01443	0,006
-0,161	0,10588	0,156	0,01426	0,004
1,84	0,32907	0,369	0,01463	0,006
3,88	0,5493	0,571	0,01562	0,008
5,89	0,75033	0,755	0,01774	0,009
7,89	0,9098	0,86	0,02244	0,017
8,95	0,96932	0,887	0,0268	0,024
9,91	1,00267	0,869	0,03274	0,035
10,9	1,0207	0,868	0,04116	0,039
12	1,02834	0,894	0,05297	0,048
12,9	1,02678	0,938	0,06426	0,061
14	1,00686	0,929	0,08137	0,074
14,9	0,97423	0,908	0,09929	0,08
16	0,90604	0,912	0,12939	0,106
17	0,80556	0,655	0,17204	0,271
18	0,73608	0,588	0,2142	0,265
19	0,71414	0,587	0,24565	0,281
20	0,71175	0,597	0,2725	0,299
22	0,72282	0,603	0,3208	0,326
24	0,74519	0,647	0,3673	0,375

## Re = 650,000

Angle of Attack	Coefficient de portance(Cl) <b>CFX</b>	Coefficient de portance(Cl) <b>CSU</b>	Coefficient de trainée(Cd) <b>CFX</b>	Coefficient de trainée(Cd) <b>CSU</b>
1.75	0.31933	0.354	0.01427	0.001
3.81	0.5422	0.561	0.01523	0.002
5.92	0.75298	0.765	0.01749	0.006
7.94	0.91479	0.86	0.02226	0.015
9.98	1.00642	0.848	0.03293	0.031
11	1.02625	0.892	0.04164	0.043
12	1.0336	0.888	0.05231	0.049
13	1.03324	0.927	0.06471	0.043
14	1.01871	0.91	0.07968	0.075
15	0.98545	0.91	0.09892	0.075
16	0.92853	0.928	0.12479	0.107
17	0.84576	0.686	0.16156	0.278
18	0.75203	0.639	0.20915	0.276
19	0.71983	0.576	0.24404	0.273
20	0.71524	0.552	0.27133	0.275
22	0.72625	0.596	0.31974	0.323
23.9	0.74513	0.649	0.36383	0.37
26	0.77166	0.68	0.41258	0.417



<b>Re = 750,000</b>				
Angle of Attack	Coefficient de portance(Cl) <b>CFX</b>	Coefficient de portance(Cl) <b>OSU</b>	Coefficient de traînée(Cd) <b>CFX</b>	Coefficient de traînée(Cd) <b>OSU</b>
0.1	0.13429	0.05	0.01385	0.0029
2	0.33472	0.3	0.01395	0.0056
4.1	0.56879	0.54	0.01547	0.0067
6.2	0.77537	0.79	0.01801	0.0085
8.1	0.92857	0.9	0.0222	0.0127
10.2	1.03173	0.93	0.03194	0.0274
11.3	1.05228	0.92	0.04077	0.0303
12.1	1.05807	0.95	0.04866	0.0369
13.2	1.05766	0.99	0.06115	0.0509
14.2	1.04687	1.01	0.07468	0.0648
15.3	1.01684	1.02	0.09342	0.0776
16.3	0.9669	1	0.11625	0.0917
17.1	0.85653	0.94	0.13374	0.0994
18.1	0.86584	0.85	0.18882	0.2306
19.1	0.752	0.7	0.21975	0.3142
20.1	0.71198	0.66	0.25751	0.3186
22	0.711	0.7	0.30652	0.3694
24.1	0.73021	0.79	0.35432	0.4457
26.2	0.75133	0.88	0.40442	0.526

## Re = 1,000,000

Angle of Attack	Coefficient de portance(Cl) <b>CFX</b>	Coefficient de portance(Cl) <b>DTU</b>	Coefficient de trainée(Cd) <b>CFX</b>	Coefficient de trainée(Cd) <b>DTU</b>
1.02	0.23901	0.258	0.01349	0.0096
2.05	0.3537	0.378	0.01377	0.0099
3.07	0.4649	0.497	0.01419	0.01
4.1	0.57483	0.617	0.01483	0.01
5.13	0.68071	0.736	0.01579	0.0097
6.16	0.77758	0.851	0.0173	0.0095
7.18	0.86345	0.913	0.01947	0.0127
8.2	0.9341	0.952	0.02265	0.0169
9.21	0.9848	0.973	0.02739	0.0247
10.2	1.0145	0.952	0.03424	0.0375
11.21	1.03019	0.947	0.04337	0.0725
12.23	1.0392	1.007	0.05433	0.0636
13.22	1.03751	1.031	0.06683	0.0703
14.23	1.02007	1.055	0.08253	0.0828
15.23	0.98775	1.062	0.10196	0.1081
16.22	0.93452	1.043	0.1272	0.1425
17.21	0.86322	0.969	0.16094	0.1853
18.19	0.78691	0.938	0.20269	0.1853
19.18	0.73128	0.929	0.24372	0.1853
20.16	0.71884	0.923	0.27305	0.1853

<b>La vitesse du vent(m/s)</b>	<b>Torque CFX (N.m)</b>	<b>Torque NREL</b>	<b>Torque FAST_AD</b>	<b>L'erreur (%)</b>
7	675.813	800	810	18.38
10	1563.65	1350	1490	13.66
13.1	1478.18	1300	1260	12.05
15.1	1225.74	1180	910	3.73
20.1	1275.43	1120	830	12.19
25.1	1735.91	1490	1300	14.17

Tableau IV.18: les résultats avec les écarts entre CFX et l'expérience.

<b>95%</b>						
<b>La vitesse du vent (m/s)</b>	<b>CN</b>			<b>Ct</b>		
	<b>CFX</b>	<b>NREL</b>	<b>FAST_AD</b>	<b>CFX</b>	<b>NREL</b>	<b>FAST_AD</b>
<b>7</b>	0.525	0.5	0.57	0.059	0.04	0.03
<b>10</b>	0.794	0.72	0.89	0.143	0.1	0.119
<b>13.1</b>	0.890	0.79	0.96	0.217	0.148	0.179
<b>15.1</b>	0.670	0.77	0.98	0.177	0.14	0.195
<b>20.1</b>	0.694	0.71	0.75	0.018	-0.06	-0.07
<b>25.1</b>	0.721	0.6	0.82	0.020	-0.061	-0.062

<b>80%</b>						
<b>La vitesse du vent (m/s)</b>	<b>CN</b>			<b>Ct</b>		
	<b>CFX</b>	<b>NREL</b>	<b>FAST_AD</b>	<b>CFX</b>	<b>NREL</b>	<b>FAST_AD</b>
<b>7</b>	0.717	0.76	0.78	0.115	0.072	0.072
<b>10</b>	1.013	0.94	0.91	0.246	0.15	0.155
<b>13.1</b>	0.829	1.2	0.94	0.231	0.155	0.17
<b>15.1</b>	0.890	0.92	0.74	0.090	0.004	-0.07
<b>20.1</b>	1.035	0.98	0.82	0.095	-0.059	-0.065
<b>25.1</b>	1.134	1.14	0.9	0.117	-0.05	-0.06

<b>63%</b>						
<b>La Vitesse du vent (m/s)</b>	<b>CN</b>			<b>Ct</b>		
	<b>CFX</b>	<b>NREL</b>	<b>FAST_AD</b>	<b>CFX</b>	<b>NREL</b>	<b>FAST_AD</b>
<b>7</b>	0.807	0.86	0.87	0.169	0.095	0.105
<b>10</b>	1.122	1.11	0.99	0.340	0.179	0.185
<b>13.1</b>	0.961	1.09	0.74	0.120	0.01	-0.075
<b>15.1</b>	1.054	1.31	0.78	0.148	0.005	-0.07
<b>20.1</b>	1.217	1.23	0.88	0.175	-0.035	-0.06
<b>25.1</b>	1.244	1.25	0.97	0.187	-0.03	-0.05

47%						
La vitesse du vent (m/s)	CN			Ct		
	CFX	NREL	FAST_AD	CFX	NREL	FAST_AD
7	0.870	0.9	0.9	0.250	0.12	0.12
10	1.268	1.33	0.96	0.497	0.009	0.189
13.1	1.521	1.32	0.78	0.319	-0.04	-0.069
15.1	1.227	1.25	0.84	0.231	-0.05	-0.065
20.1	1.220	1.49	0.95	0.237	-0.04	-0.054
25.1	1.261	1.57	1.03	0.263	-0.03	-0.045

30%						
la vitesse du vent (m/s)	Cn CFX	Cn NREL	Cn FAST_AD	Ct CFX	Ct NREL	Ct FAST_AD
7	0.722	0.8	0.86	0.335	0.095	0.095
10	1.128	1.28	1.28	0.683	0.175	0.249
13.1	1.388	2.03	1.49	0.833	0.17	0.285
15.1	1.701	2.44	1.66	1.000	0.05	0.405
20.1	1.839	2.37	1.685	0.746	0	0.51
25.1	1.641	2.29	1.67	0.656	0	0.539

30%						
la vitesse du vent (m/s)	CN			Ct		
	CFX	NREL	FAST_AD	CFX	NREL	FAST_AD
7	0.722	0.8	0.86	0.335	0.095	0.095
10	1.128	1.28	1.28	0.683	0.175	0.249
13.1	1.388	2.03	1.49	0.833	0.17	0.285
15.1	1.701	2.44	1.66	1.000	0.05	0.405
20.1	1.839	2.37	1.685	0.746	0	0.51
25.1	1.641	2.29	1.67	0.656	0	0.539

## Bibliographie

---

- [1] Harris, F. D., "Preliminary Study Radial Flow Effects on Rotor Blades," *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 11, (3), 1966.
- [2]. Corrigan, J. J. and Schilling, J. "Empirical Model for Stall Delay Due Rotation," American Helicopter Society Aeromechanics Specialists Conference, Francisco, CA, January 19-21, 1994.
- [3] Mc Croskey, W. J. Et Philippe, J.J. "Unsteady viscous flow on oscillating airfoils." *AAIA J*, Vol-13, N° 1 1975.
- [4] Philippe, J.J. "Décrochage dynamique : un exemple d'interaction forte entre écoulements visqueux et non visqueux " *AGARD-CP-227*, Septembre 1977.
- [5] Hand, M.M., Simms, D.A., Fingersh, L.J., Jager, D.W., Cotrell, J.R., Schreck, S. and Larwood, S.M., 2001. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns (No. NREL/TP-500-29955). National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US).
- [6] Jonkman, J.M., 2003. Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST { } AD (No. NREL/TP-500-34755). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).
- [7] Giguere, P., & Selig, M. S. (1999). *Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor* (No. NREL/SR-500-26173). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).
- [8] Johansen, J., Sørensen, N. N., Michelsen, J. A., & Schreck, S. (2002). Detached-eddy simulation of flow around the NREL Phase VI blade. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 5(2-3), 185-197.
- [9] Duque, E. P., Burklund, M. D., & Johnson, W. (2003). Navier-Stokes and comprehensive analysis performance predictions of the NREL phase VI experiment. *J. Sol. Energy Eng.*, 125(4), 457-467.
-

**Résumé :** Dans ce mémoire une simulation numérique de l'interaction fluide-structure d'un écoulement autour d'un profil aérodynamique S809 a été faite par le code de calcul ANSYS (CFX) sous la base de la méthode des volumes finis. L'objectif de cette étude est de bien comprendre le comportement physique de l'écoulement autour d'un profil aérodynamique. Les résultats obtenus sont comparés avec des données expérimentales de (National Renewable Energy Laboratory (2003) J.M. Jonkman). Basé sur de nombreuses valeurs de Reynolds et l'effet de différents angles d'attaque. En deux dimensions 2D.

En trois dimensions nous comparons les résultats obtenus avec des données l'expérimentales de (National Renewable Energy Laboratory M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrell, S. Schreck, and S.M. Larwood). Basé sur des différents de vitesses du vent (7 ;10;13.1;15.1;20.1;25.1 m/S).

**Mots clés :** Simulation numérique, Profil aérodynamique, méthode volumes finis, Modèles de turbulence, la Couche limite.

**Abstract:** In this thesis a numerical simulation of the fluid flow structure interaction around an S809 airfoil was made by the ANSYS compute code (CFX) under the basis of the finite volume method. The objective of this study is to gain a good understanding of the physical behavior of the flow around an airfoil. The results obtained are compared with experimental data from (National Renewable Energy Laboratory (2003) J.M. Jonkman). Based on numerous Reynolds values and the effect of different angles of attack. In two-dimensional 2D.

In three dimensions we compare the results obtained with experimental data from (National Renewable Energy Laboratory M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrell, S. Schreck, and S.M. Larwood).

Based on different wind speeds (7;10;13.1;15.1;20.1;25.1 m / S).

**Key words:** Numerical simulation, Aerodynamic profile, finite volume method, Turbulence models, the boundary Limit.

**المخلص:** في هذه الأطروحة تم عمل محاكاة رقمية لتدفق الموائع حول الجنيح S809 بواسطة برنامج المحاكاة ANSYS (CFX) بالاعتماد على طريقة الحجوم المتناهية. الهدف من هذه الدراسة هو اكتساب فهم جيد للسلوك الفيزيائي للتدفق حول الجنيح. تمت مقارنة النتائج المتحصل عليها مع البيانات التجريبية من (المختبر الوطني للطاقة المتجددة J.M. Jonkman (2003)). بناءً على قيم رينولدز العديدة وتأثير زوايا الهجوم المختلفة. في ثنائي الأبعاد. في المجال الدراسي ثلاثي الأبعاد نقارن النتائج التي تم الحصول عليها مع البيانات التجريبية من (المختبر الوطني للطاقة المتجددة M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrell, S. Schreck, and S.M. Larwood). بناءً على سرعات الرياح المختلفة (7;10;13.1;15.1;20.1;25.1 متر/ثانية).  
**كلمات مفتاحية:** محاكاة، الشكل الديناميكي الهوائي، طريقة الحجوم المتناهية، نماذج الاضطراب، الطبقة النهائية

