

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de diplôme

Master 2

« Génie Mécanique »

Option :

«Energétique »

Titre :

**Etude de l'effet du profil de pale sur les forces
aérodynamiques d'un rotor type H d'une éolienne à
axe vertical**

Réalisé par :

- ❖ Chaib bassou fatiha
- ❖ Zeblane bekhta

Encadré par :

Mr.Noura Bekheir

Année Universitaire 2016/2017



Dédicaces

*Avant tous je dis EL Hamdou Lillah qui m'a aidé à terminer ce travail, Je dédie
ce modeste travail :*

A Mes chers parents:

Chaib bassou Abdalkadre et khaira

*Que je respecte beaucoup, car ils m'ont tous donné dans ma vie personnel et
professionnel et je souhaite que je rembourse tous ces sacrifices,*

Ma chère sœur : Samia

A mon frère : Okba « yaakobe »

Ma grande mère

À toute la famille

A mon binôme zeblane bekhta

A tous mes amis chacun par son nom

À tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail,

Chaib bassou Fatiha

A decorative border of white and pink flowers, including lilies and smaller blossoms, frames the text on a white background.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents sur qui j'ai pu compter et me ressourcer
d'affection et de bénédictions durant toute ma vie, que dieu me les garde.*

Mes chères soeurs :Fatima et Rabia

Mes chers frères :Djamal, Ali et sa femme Farida.

Mes très chères amies :Mbarka,Zahra,Fatima et Samia

A mon binôme Fatiha

A tous mes chers collègues de Djilali Bounaama de khemis Miliana.

Et tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire.

BEKHTA



Remerciements

Tout d'abord, Nous remercions le Dieu, notre créateur de nos avoir donné les forces Pour accomplir ce travail. Premièrement et avant tout, nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Mr.Noura Bekheir pour ses conseils et ses dirigés.

Nous voulons également remercier tous les étudiants de notre promotion et nous souhaitons le bon courage à tous les étudiants pour finir ces études.

Finalement nous voulons également remercier tout ce qui participe de réaliser ce projet.

Liste des figures

Figure I-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	4
Figure I-2 :l'éolienne Savonius.....	8
Figure I-3 : Différentes formes du rotor de Darrieus.....	9
Figure I-4 : Fonctionnements de l'éolienne DARRIEUS.....	9
Figure I-5 : force et rotation de l'éolienne.....	10
Figure I-6 : Éolienne de type DARRIEUS en forme H.....	10
Figure I-7 : représentation des performances des différents types d'éolienne.....	11
Figure I-8 : représente une description d'un profil	12
Figure I-9 : représente le profil plan	12
Figure I-10 : représente le profil biconvexe dissymétrique	13
Figure I-11 : représente le profil cambré(ou creux)	13
Figure I-12 : représente le profil biconvexe symétrique.....	13
Figure I-13 : représente Le profil à double courbure	13
Figure I-14 : Portance et traînée sur un profil.....	15
Figure I-15 : Décollement de la couche laminaire et transition de la couche limite...	16
Figure II-1:résolution des équations de Navier-Stokes.modélisation de la turbulence.....	20
Figure II-2 : Maillage autour d'un profil.....	26
Figure II-3 : maillage non structuré.....	27
Figure II-4 : Maillage hybride.....	28
Figure II-5 : les étapes de la simulation sur logiciel gambit.....	29
Figure II-6 : les étapes de la simulation sur logiciel FLUENT.....	29
Figure III-1 : Paramètres géométrique d'une éolienne étudiée.....	33
Figure III-2 : Profil NACA 0015.....	33
Figure III-3 : Le fichier importé comporte les coordonnées du profil ; un point par ligne suivant le format X Y Z.....	34
Figure III-4 : Profil NACA 0015.....	34
Figure III-5 : Profil NACA 0015.....	35
Figure III-6 : Géométrie du profil.....	35

Figure III-7 : rotation de profil.....	36
Figure III-8 : translation de profil	36
Figure III-9 : rotation de profil.....	36
Figure III-10 : création de cercle.....	37
Figure III-11 : création de rectangle.....	37
Figure III-12 : soustraction des faces	38
Figure III-13 : les caractéristiques de maillage.....	38
Figure III-14 : maillage des faces.....	39
Figure III-15 : Définition des conditions aux limites sur les parois du domaine.....	39
Figure III-16 : Définition des conditions pour domaine.	40
Figure III-17 : export de mesh.....	40
Figure III-18 : Panneau solve et Panneau viscous model.....	40
Figure III-19 : panneau matériel.....	41
Figure III-20 : panneau Boundary conditions	41
Figure III-21 : panneau fluide.....	41
Figure III-22 : panneau grid interface.....	42
Figure III-23 : panneau solution control.....	42
Figure III-24 : panneau solution initialisation.	43
Figure III-25 : panneau force monitors.....	43
Figure III-26 : panneaux auto-save case.....	43
Figure III-27 : panneau l'itération.....	44
Figure IV-1 : maillage autour du profil.....	46
Figure IV-2 : Résidus de calcul pour l'écoulement en 2D.....	46
Figure IV-3 : Écoulement en 2D autour du rotor éolien.....	47
Figure IV-4 : Représentation du sillage en 2D.....	47
Figure IV-5 : le champ de vitesse de l'écoulement de la Pale 1 à 0°et40°.....	48
Figure IV-6 : le champ de vitesse de l'écoulement de la pale 1 à 80°et 120°.....	48
Figure IV-7 : le champ de vitesse de l'écoulement de la pale1 à 160°et 200°	48
Figure IV-8 : le champ de vitesse de l'écoulement de la pale 1 à 240°et280°.....	49

Figure IV-9 : le champ de vitesse de l'écoulement de la pale 1 à 320° et 360°.....	49
Figure IV -10 : Le champ de pression de l'écoulement de la pale 1 à 0° et 40°.....	49
Figure IV-11 :Le champ de pression de l'écoulement de la pale 1 à pale 1 à 80° et 120°.....	50
Figure IV-12:Le champ de pression de l'écoulement de la pale 1 à 160° et 200°.....	50
Figure IV-13 : Le champ de pression de l'écoulement de la pale 1 à 240° et 280°.....	50
Figure IV-14:Le champ de pression de l'écoulement de la pale 1 à 320° et 360°.....	51
Figure IV-15:Interprétation de l'énergie turbulente de l'écoulement.....	51
Figure IV-16:champ de vecteur de vitesse.....	51
Figure IV-17 : Variation de coefficient de puissance C_p en fonction de TSR.....	52
Figure IV-18 : Coefficient de puissance.	53

Liste des tableaux

Tableau III-1 : Caractéristiques d'une éolienne étudiée.....	33
Tableau III-2 : les paramètres entrant dans le solveur fluent.....	42
Tableau IV-1 : les valeurs de coefficient de puissance en fonction de TSR.....	52

NOMENCLATURE

C_p : coefficient de puissance.

C_l : coefficient sans unité appelé coefficient de portance.

C_m : coefficient sans unité appelé coefficient de trainée.

K : l'énergie cinétique de turbulence m^2 / s .

S : surface paléage éolienne m^2 .

Ma : nombre de mach.

Re : nombre de Reynolds.

a : vitesse du son [m/s].

R : constante universelle des gaz [J/kg.mol.K].

V : vitesse d'écoulement [m/s].

ρ : La masse volumique [kg/m³].

ν_t : viscosité cinématique turbulente [m²/s] μ .

μ : viscosité dynamique [kg/ (m·s)].

ε : le taux de dissipation.

Ω : vitesse de rotation [Rad/s].

TSR : Tip speed ratio.

RNG : Reynolds Normalisation Group.

CFD: Computationnel Fluide Dynamiques.

NACA : National Advisory Committee for Aeronautics.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Synthèse Bibliographique	
I.1- Introduction.....	3
I.2-état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne.....	3
I.3-Définition de l'aérogénérateur.....	4
I.3.1-Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	4
I.4-Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	5
I.5-Les différents Types d'éoliennes.....	6
I.5.1-Les éoliennes à axe horizontal.....	6
I.5.2-Les éoliennes à l'axe vertical.....	7
I.5.2.1-L'éolienne Savonius.....	8
I.5.2.2-L'éolienne Darrieus.....	8
I.6-Principe de fonctionnement d'une éolienne Darrieus.....	9
I.7-Description de l'éolienne DARRIEUS en forme de H.....	10
I.8-Théorie de Betz et coefficient de puissance.....	11
I.8.1-Comparaison du coefficient de puissance des différentes éoliennes.....	11
I.9- Aérodynamique des rotors éoliens.....	12
I.9.1-Différents types des profils.....	12
I.9.1.1-Le profil plan.....	12
I.9.1.2-Le profil biconvexe dissymétrique.....	13
I.9.1.3-Le profil cambré (ou creux).....	13
I.9.1.4-Le profil Le biconvexe symétrique.....	13
I.9.1.5-Le profil à double courbure.....	13

I.10-Caractéristiques de la force exercée sur le profil d'une éolienne.....	14
I.10.1-La force de portance L	14
I.10.2-La force de trainée D.....	15
I.11-La couche limite.....	15
I.12-Le Nombre de Reynolds Re.....	16
I.13-Puissance	17
I.14-Couple sur l'axe vertical	17
I.15-Conclusion.....	18

Chapitre II : Formulation Mathématique

II.1-Introduction	19
II.2-Modèle mathématique	19
II.3-Méthodes de simulation des écoulements	20
II.4-Les équations de NAVIER STOKES moyennées (RANS) pour un fluide incompressible.....	21
2.4.1- Modélisation de la turbulence.....	22
II.4.2-Equation modélisée de K	23
II.4.3-Equation modélisée de ϵ	24
II.5-Présentation de la méthode des volumes finis	24
II.6-Maillage	25
II.6.1-Techniques générales de génération du maillage.....	26
II.6.2-Type de maillage	26
II.6.2.1- Maillage structuré (quadra/hexa)	26
II.6.2.2- Maillage non structuré (tri/tétra)	27
II.6.2.3-Maillage hybride.....	27
II.7- les conditions aux limites	28
II.8- la présentation des logiciels de calcul	28
II.8.1-le meilleur « gambit ».....	29

II.8.2-Solveur Fluent	29
II.9- Conclusion.....	31

Chapitre III: Modalisation numérique de l'écoulement Autour d'un a rotor à axe vertical

III.1-Introduction	32
III.2-Géométrie l'éolienne	32
III.3-construction de la géométrie	33
III.3.1-Les étapes de construction de la géométrie:(gamit)	34
III.4-Maillage du domaine de calcul	38
III.5- Les étapes importantes d'utilisation du Fluent	40
III.6- Conclusion	44

Chapitre IV : résultats et discussion

IV.1-Introduction.....	45
IV.2-Influence du maillage	45
IV.3-Convergence de calcul.....	46
IV.4- Morphologie de l'écoulement in-stationnaire en 2D autour du rotor	46
IV.4.1-Étude du sillage du rotor	47
IV.4.2-Interprétation des champs de vitesse de l'écoulement 2D	48
IV.4.3-Interprétation des champs de pression de l'écoulement 2D.....	49
IV.5- Courbes de Portance et le moment de convergence en 2D.....	51
IV.5.1-Courbes de Portance (Cl)	51
IV.5.2-Courbes de Coefficient de Moment (Cm)	51
IV.5.3-Courbe de coefficient de puissance Cp	52
IV.6-Validation des résultats.....	53
IV.7-Conclusion.....	55

Résumé

Dans ce mémoire, on présente une étude numériquement de l'écoulement d'air incompressible turbulent bidimensionnel à travers les pales du rotor d'une éolienne à axe vertical de type DARRIEUS -H avec des profils NACA symétriques. Pour la résolution numérique, on a fait appel à un code commercial Fluent. L'approche numérique utilisée pour l'étude et l'analyse du comportement aérodynamique du rotor est basée sur la résolution des équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) appliquée sur quatre configurations géométriques en 2D.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence des profils aérodynamiques sur les performances de l'éolienne. La simulation numérique nous a permis de déterminer le champ complexe des vitesses, la pression statique et de l'énergie de turbulence. Aussi nous avons tracé les courbes de coefficient de portance et coefficient de traînée des pales.

Abstract:

This thesis, we present a numerical study of the two-dimensional turbulent incompressible air flow through the rotor blades of a DARRIEUS -H vertical axis wind turbine with symmetric NACA. For numerical resolution using the commercial code Fluent.

The numerical approach used to study and analyze the rotor's aerodynamic behavior is based on the resolution of Navier-Stokes equations (RANS) applied to four geometric 2D configurations.

The aim of this work is to study the influence of aerodynamic profiles on the performance of the wind turbine. Numerical simulation allowed us to determine the complex field of velocities, static pressure and turbulence energy. We have also plotted the coefficient of lift and coefficient of drag of the blades.

ملخص :

في هذه المذكرة قمنا بدراسة عددية لندفق الهواء المضطرب الغير قابل للضغط ثنائي الأبعاد وذلك من خلال شفرات دوران لتوربين الرياح من نوع DARRIEUS-H راسي. ومن اجل الحل العددي استخدمنا code fluent ونستند في هذا النهج العددي استخدام دراسة وتحليل لسلوك هوائية الدوار علي حل معادلات Nvier-Stokes المتوسطة ونطبقها علي أربعة تكوينات هندسية ثنائية الأبعاد. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير جنيحات علي أداء الرياح . وقد سمحت لنا هذه المحاكاة العددية بتحديد المجال المعقد للسرعة والضغط. وقد قمنا أيضا برسم معامل الرفع والسحب.

Mots clés: DARRIEUS, NACA, simulation, turbulent, écoulement.

Introduction générale

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 (4km/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. La production de l'énergie éolienne devient de plus en plus sécuriser, il est maintenant tend à devenir une source d'énergie de premier plan.

Notre travail consiste à mener une étude approfondie basée sur la simulation numérique d'écoulements autour des pales d'éoliennes sont largement abordé par les auteurs dans la Littérature, vue leur grand importance scientifiques et industrielles (l'aérodynamique des éoliennes).

Ce travail comprend une introduction générale et quatre chapitres principaux:

Dans le premier chapitre, une Synthèse bibliographique sur les énergies éolienne, une vue générale sur les types éoliennes.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de l'écoulement turbulent in-stationnaire, Les techniques numériques CFD seront introduites avec les différentes approches relatives à la théorie de l'aérodynamique appliquée dont les principales étapes sont les suivantes : la modélisation RANS, le maillage des domaines de calcul et les conditions aux limites.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre, la modélisation numérique de l'écoulement in-stationnaire dans un rotor d'une éolienne à axe vertical, On utilise le code de calcul Fluent, qui représente un outil de simulation numérique.

Dans le quatrième chapitre est consacré à la présentation de quelques résultats d'une modélisation de l'écoulement in-stationnaire autour d'un rotor éolienne, et on termine par une conclusion générale.

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

Ce chapitre donne une présentation de l'énergie éolienne, nous présenterons les différents types d'éoliennes en particulier l'éolienne à axe vertical de type DARRIEUS- H, Nous définirons tout d'abord les variables aérodynamiques qui caractérisent le fonctionnement et les performances des ces éoliennes, qui sont nécessaires à la compréhension de cette étude.

I.1.Introduction :

Les préoccupations liées aux changements climatiques sont la cause principale de la naissance du développement du domaine des énergies renouvelables, surtout dans le monde développé dans le monde. Le développement est bien vu dans les progrès technologiques de l'amélioration apportée aux capteurs des énergies renouvelables, particulièrement ceux de l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne est une énergie inépuisable et non polluante. Elle ne nécessite que le choix d'un bon lieu d'implantation et l'utilisation d'éolienne la plus adaptée à la construction prévue.

I.2.Etat de l'Art des Systèmes de Conversion d'énergie éolienne :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible.

I.3 Définition de l'aérogénérateur :

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.

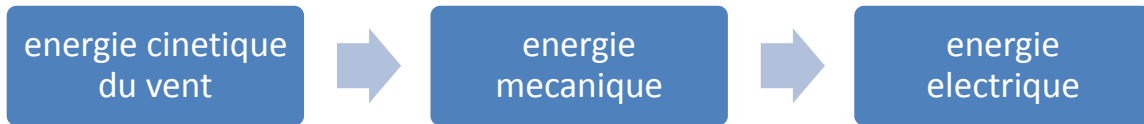


Figure I.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent. [1]

I.3.1. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne :

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable [2]. Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [3]. Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle. [2] C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985. [2] Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW. [2]

Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés). [4]

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte. [4]

I.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

❖ 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.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier. [5]
- 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. [5]
- 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.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables. [6]

❖ Inconvénients :

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

- 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. [5]
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. 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 aéro turbines. [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]

I .5.Les différents Types d'éoliennes:

Tout d'abord, il faut noter qu'il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique. Une classification méthodique, universellement adoptée fait apparaître des groupes, des noms et des formes de ces capteurs. Généralement, on classe les capteurs éoliens selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière deux types d'éolienne :

- les éoliennes à l'axe horizontal. (**HAWT**)
- les éoliennes à l'axe vertical. (**VAWT**).

I .5.1.Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à l'axe horizontal sont des machines actuellement les plus répandues à cause de leur bon rendement. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, des hélices multiples pour le pompage de l'eau. On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent. Ce type d'éolienne nécessite un gouvernail qui lui permettra de suivre la direction du vent, ce qui va alourdir la machine et augmente son encombrement. [7]

Les avantages et les inconvénients des éoliennes à l'axe horizontal sont :

a) Les avantages:

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à l'axe vertical.
 - Cette structure capte le vent en hauteur, donc il est plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
 - Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. [7]
- Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

b) Les inconvénients:

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

I.5.2. Les éoliennes à l'axe vertical:

Ce type d'éolienne se caractérise par leur axe de rotation qui est perpendiculaire à la direction d'incidence du vent. Les éoliennes à axe vertical présentent des qualités particulièrement intéressantes pour des échelles de production d'énergie plus modestes. D'autre part, ce type d'éolienne permet l'emplacement des générateurs sur terre, ce qui facilite fortement les opérations de maintenance et procure une souplesse de fonctionnement.

Les principaux avantages et inconvénients de ce type sont :

a) Les avantages:

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

b) Les inconvénients:

- Elles sont moins performantes que celles à l'axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

Il existe deux familles d'éoliennes à l'axe vertical. D'une part, on trouve les éoliennes basées sur la "portance" dont la plus connue est le modèle de "Darrieus" et, d'autre part, les éoliennes basées sur la "trainée" dont la plus connue est le modèle de "Savonius".

I .5.2.1.L'éolienne Savonius:

Le rotor Savonius est simplement constitué de deux demi cylindres verticaux décalés l'un par rapport à l'autre d'un décalage e , l'ensemble tourne autour d'un axe vertical. Le principe de fonctionnement est basé sur les forces de traînée, résultantes des forces aérodynamiques, qui sont différentes sur les deux pales. Cette différence engendre un couple mécanique qui génère le mouvement, Cette machine a été inventée par l'ingénieur S. J. Savonius en 1925 et a été brevetée en 1929.

Exploite la force de traînée:

- Coefficient de puissance max = 15-25%.
- Vitesse spécifique optimale = 0.8 à 1.
- Vitesse de démarrage = 2-3m/s. [8]

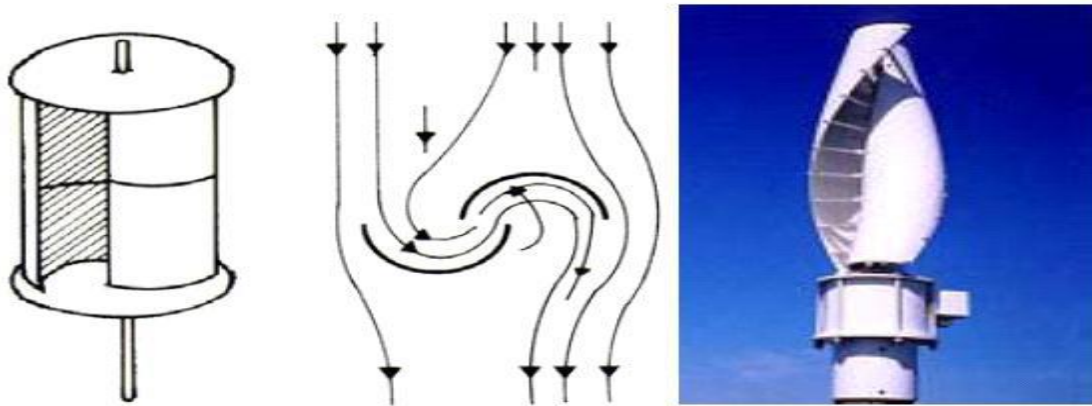


Figure I.2. L'éolienne Savonius.

I .5.2.2 L'éolienne Darrieus:

Darrieus est un type d'éolienne à axe vertical utilisé pour produire de l'électricité à partir de l'énergie du vent. La turbine se compose d'un certain nombre de pales incurvées montées sur un arbre vertical rotatif ou un cadre. Ce concept d'éolienne a été breveté par Georges Darrieus, ingénieur aéronautique français en 1931.

Il existe quatre sortes de rotors de DARRIEUS: le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique.

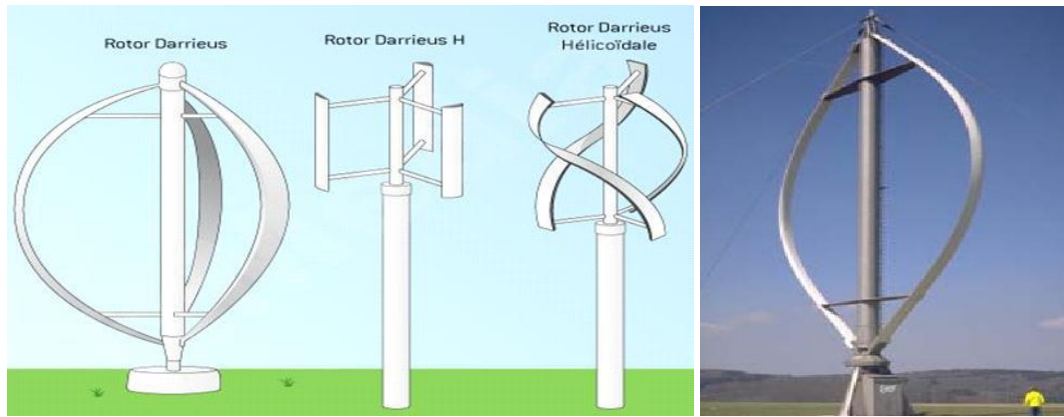


Figure I.3. Différentes formes du rotor de Darrieus.

I.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne Darrieus :

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables (traînée et portance). Ceci explique qu'une étude doit être réalisée sur le profil utilisé afin d'obtenir le rendement maximum. La combinaison de ces forces sur les divers profils du rotor génère alors un couple moteur (figure I.5). En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent incident.

On se rend alors compte que certains profils généreront une traînée plus importante que la portance et se sera l'inverse pour d'autres. La traînée empêchera la rotation alors que la portance la favorisera. De plus, la combinaison entre le vent incident et la rotation donne un vent relatif sur les profils supérieur au vent incident. Au final, la force de portance globale est supérieure à la force de traînée entraînant ainsi le rotor.

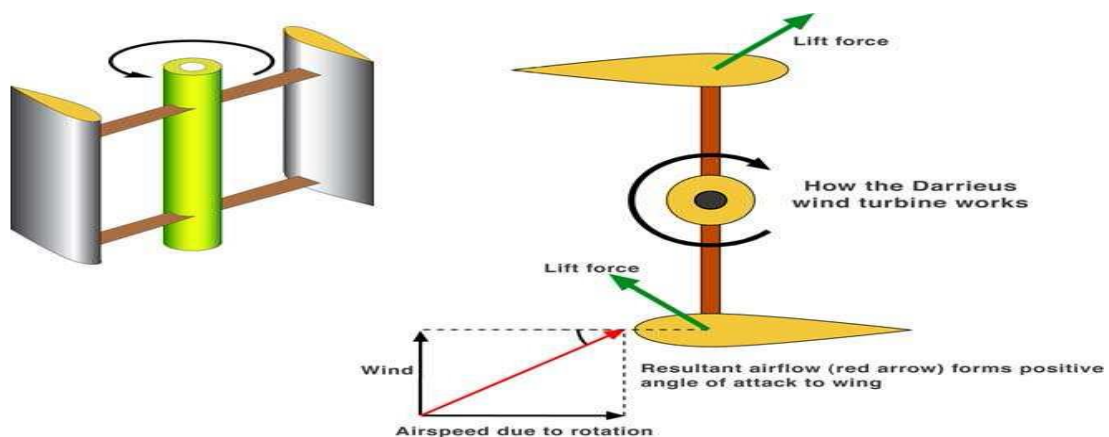


Figure I.4. Fonctionnements de l'éolienne DARRIEUS. [9]

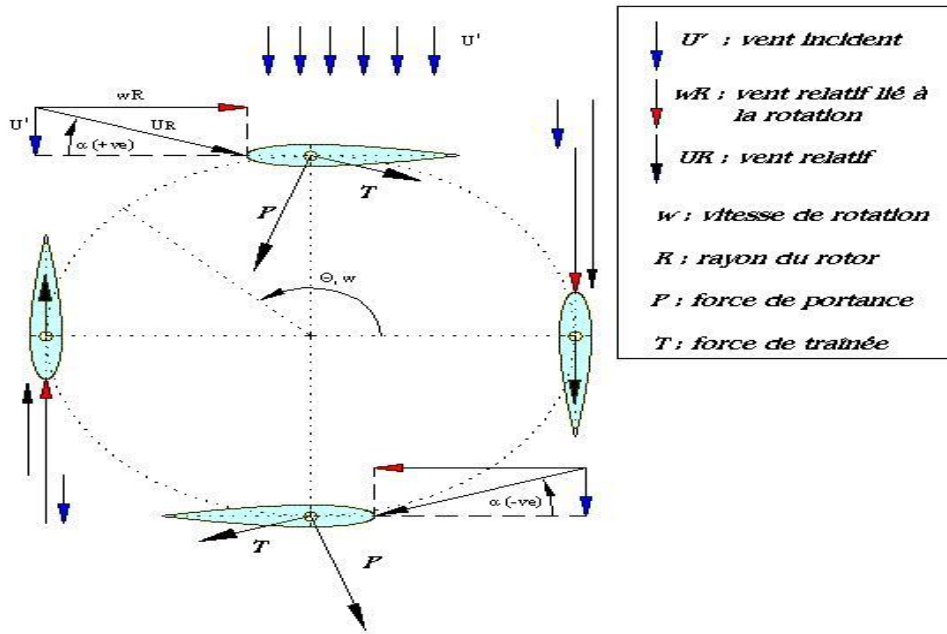


Figure I.5: force et rotation de l'éolienne.

I.7. Description de l'éolienne DARRIEUS en forme de H :

L'éolienne de notre étude DARRIEUS est en forme de H, est construite avec des pales d'haute performance avec des profils symétriques,

On considère N pales profilées et identiques, de corde c , placées à une distance R de l'axe de rotation. Le point d'attache d'une pale est défini comme le point où la ligne radiale partant de l'axe de rotation intercepte la corde de la pale perpendiculairement (voir figure I.6), il est repéré par la distance X_{att} entre le bord d'attaque et le point d'attache.

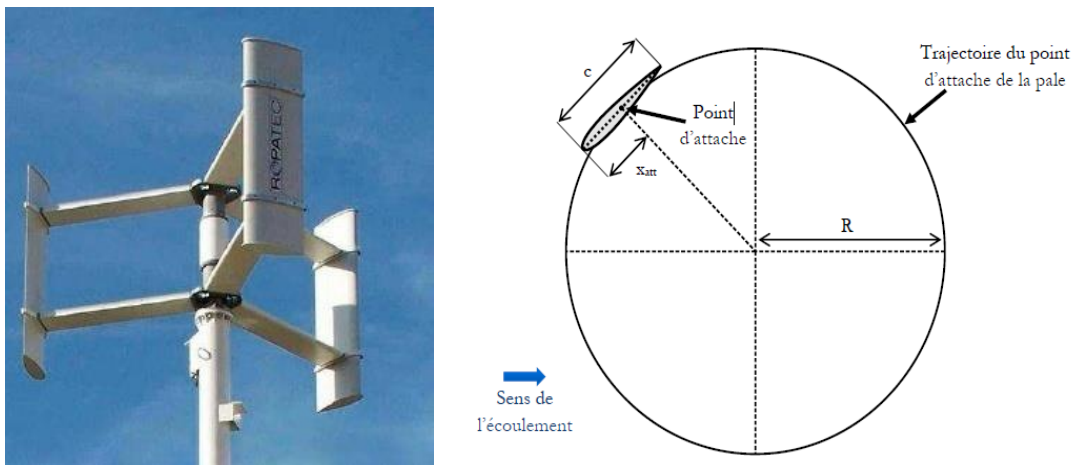


Figure I.6. Éolienne de type DARRIEUS en forme H. [12]

I.8. Théorie de Betz et coefficient de puissance :

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

Pour classer les éoliennes par rapport à cette limite de Betz, on utilise couramment le coefficient de puissance défini par [10] :

$$C_p = \frac{P_{\text{éolienne}}}{\frac{1}{2} \rho \cdot S V_0^3}$$

Où : $P_{\text{éolienne}}$ est la puissance capturée par la turbine et $\frac{1}{2} \rho \cdot S V_0^3$ est la puissance cinétique totale traversant la turbine, S étant la surface balayée par le vent.

Le coefficient C_p est une grandeur variable en fonction de λ , la valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz [11], est de $\frac{16}{27}$.

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

Où : Ω est la vitesse de rotation de la turbine, L est le rayon des pales de l'éolienne et V la vitesse du vent.

I.8.1. Comparaison du coefficient de puissance des différentes éoliennes

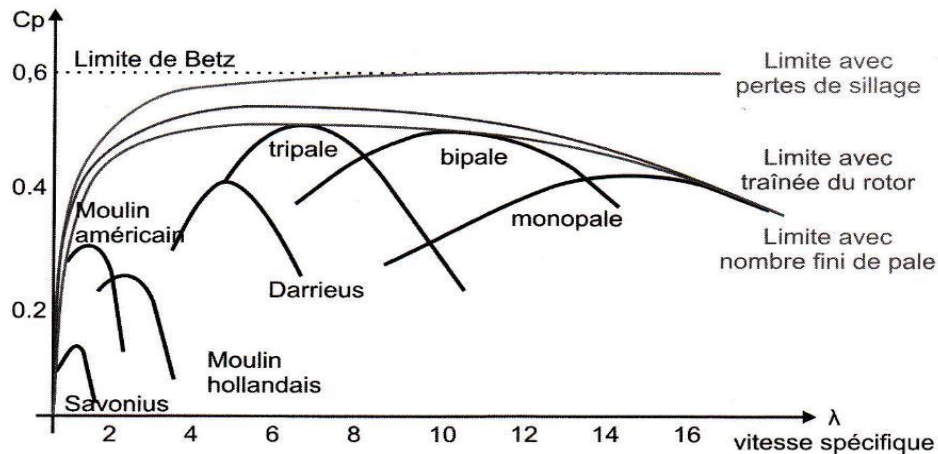


Figure I.7. Représentation des performances des différents types d'éolienne.

On observe dans un premier lieu que les aérogénérateurs à axe vertical de type DARRIEUS et à axe horizontal ont un meilleur rendement aérodynamique.

Les aérogénérateurs « américains » ont un nombre de pales important car ils évoluent à de faibles vitesses de rotation. Ils produisent un couple aérodynamique important afin de produire de l'énergie mécanique (application de pompage).

Enfin, on peut remarquer l'influence du nombre de pales sur le rendement aérodynamique.

I.9. Aérodynamique des rotors éoliens :

Le profil d'un élément aérodynamique est le contour de cet élément dans un fluide en mouvement relatif. Dans le cas d'une aile d'avion, d'une pale d'hélice ou de rotor principal, le profil est le contour de la coupe transversale ou "section", qui peut être constante ou variable d'un bout à l'autre de l'élément.

Dans les années 1930 la N.A.C.A (National Advisory Committee for Aeronautics) étudié de nombreux profils dont les caractéristiques ont été rendues publiques. Depuis d'autres sont venus s'ajouter pour fournir une bibliothèque très complète de profils bien connus. On associe un certain nombre de termes aux profils aérodynamiques :

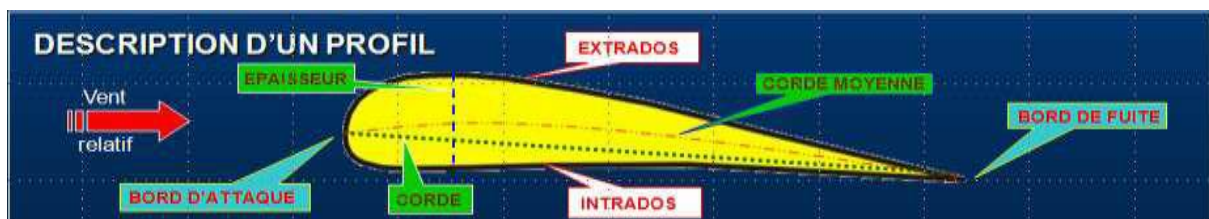


Figure I.8. Représente une description d'un profil.

L'air aborde le profil par le bord d'attaque et le quitte par le bord de fuite. La partie supérieure du profil est appelée extrados et la partie inférieure intrados. Le segment qui joint le bord d'attaque et le bord de fuite est appelé corde du profil.

I.9.1. Différents types des profils :

Les différents types de profils sont classés par familles, suivants la forme générale :

I.9.1.1 : Le profil plan : Le profil plan convexe porte bien même à faible incidence mais il est légèrement instable. Il est utilisé en aviation générale.

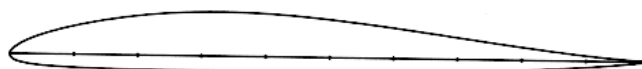


Figure I.9. représente Le profil plan.

I.9.1.2 : Le profil biconvexe dissymétrique : Le profil biconvexe dissymétrique porte également bien même à incidence nulle et est très stable. Très utilisé dans l'aviation de loisir.

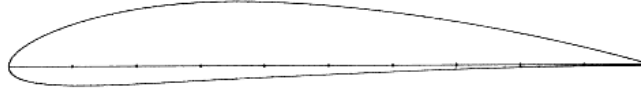


Figure I.10.représente Le profil biconvexe dissymétrique.

I.9.1.3 : Le profil cambré (ou creux) : Le profil cambré (ou creux) est très porteur mais il est assez instable. Lorsque l'incidence augmente, il cherche à cabrer.

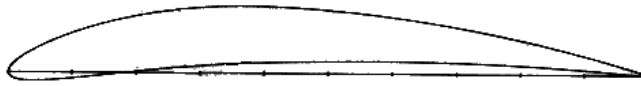


Figure I.11. Représente Le profil cambré (ou creux).

I.9.1.4 : Le profil Le biconvexe symétrique : Le biconvexe symétrique ne porte pas aux faibles très faibles incidences. Il n'est intéressant que pour les gouvernes et la voltige.



Figure I.12.représente Le profil Le biconvexe symétrique.

I.9.1.5 : Le profil à double courbure : Le profil à double courbure (ou auto stable) présente l'avantage d'une grande stabilité mais une portance

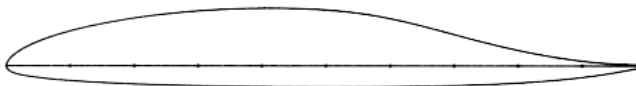


Figure I.13. Représente Le profil à double courbure

I.10. Caractéristiques de la force exercée sur le profil d'une éolienne :

La vitesse relative caractérisée par une certaine intensité et une direction décrite par l'angle d'attaque, induit une force sur le profil. Cette force se décompose en une composante tangentielle, qui contribue positivement à la rotation de l'éolienne, c'est l'effet utile recherché (du moins pour toutes éoliennes basées sur la portance), et une composante axiale perpendiculaire au plan de rotation qui n'a aucun effet utile. Au contraire, cette force axiale soumet l'éolienne par sa poussée à une contrainte mécanique importante. C'est l'élément dominant lors du dimensionnement du mât d'une éolienne. Si on décompose la force aérodynamique selon sa composante de portance et de trainée, on en déduit les propriétés suivantes :

- La portance L , contribue positivement à la rotation de l'éolienne. En d'autres termes, elle induit une force dans le sens de rotation. C'est pourquoi on dit que ces éoliennes sont basées sur la portance.

I.10.1. La force de portance L :

Quand un profil est légèrement incliné par rapport à la direction du vent (faible angle d'attaque), l'écoulement reste attaché au profil, il est accéléré sur la partie inclinée face au vent, soit l'intrados, et il est ralenti sur la partie faisant dos au vent, soit l'extrados. Il se crée alors une dépression sur l'extrados et une surpression sur l'intrados. Cette différence de pression génère une force perpendiculaire à la direction du vent, dirigée de l'intrados vers l'extrados, c'est la portance

- **Coefficient de portance :**

$$C_l = \frac{L}{S\rho}$$

- La trainée, D , contribue négativement à la rotation de l'éolienne. En d'autres termes, elle induit une force dans le mauvais sens, c'est un effet parasite. Elle diminue le rendement de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur le rotor. C'est pourquoi, tout comme un planeur, les pâles d'une éolienne sont conçues pour minimiser la trainée et obtenir ainsi les meilleurs rendements.

I.10.2. La force de traînée D :

Lorsque la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente, une force de résistance à l'air apparaît. Cette force de résistance appelée traînée et notée D.

$$C_D = \frac{D}{SQ}$$

Avec: $Q = \frac{1}{2}\rho V_\infty^2$: pression dynamique.

V_∞ : vitesse du vent non perturbé.

C_l Et C_D sont des coefficients adimensionnels, qui sont propre à la forme d'un profil aérodynamique mais indépendants de son échelle. Pour une géométrie de profil donnée et pour un nombre de Reynolds donné, ces coefficients varient donc en fonction de l'angle d'attaque α .

Une caractéristique essentielle d'un profil est ainsi sa finesse, c'est-à-dire le rapport entre la portance et la traînée qu'il génère. La finesse d'un profil dépend principalement de trois facteurs :

- Sa géométrie,
- L'angle d'attaque auquel il est utilisé.
- Le régime d'écoulement



Figure I.14. Portance et traînée sur un profil.

I.11. La couche limite :

L'air est constitué de gaz différents qui forment une certaine viscosité. Même si elle est faible, cette viscosité joue un rôle dans les vitesses de vol critique. Les particules d'air touchant la surface du profil y adhèrent, leur vitesse d'écoulement devient donc nulle. En s'éloignant de la surface, la vitesse qui s'accroît perpendiculairement et verticalement à la direction de l'écoulement – remonte très rapidement jusqu'à atteindre la vitesse initiale dans

le flux du fluide non perturbé. De plus en plus de particules sont arrêtés en surface par le frottement, créant une zone de forte chute de vitesse nommée «couche limite».

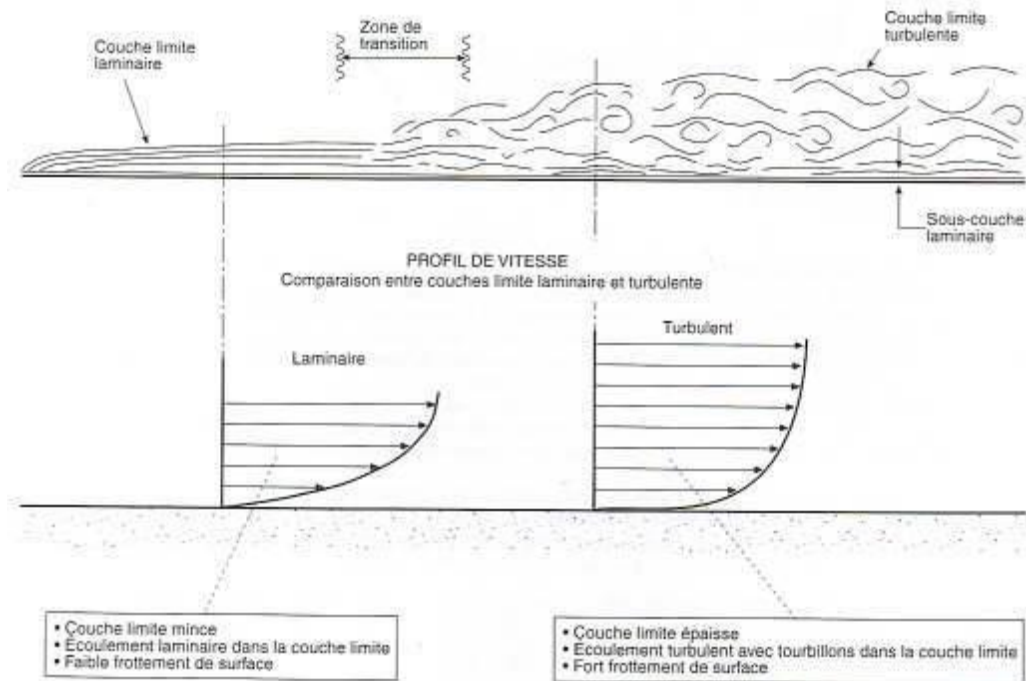


Figure 115. Décollement de la couche laminaire et transition de la couche limite.

I.12. Le Nombre de Reynolds Re :

Le nombre de Reynolds est un coefficient adimensionnel qui caractérise l'importance des forces de viscosité dans un fluide en écoulement. Sert à identifier les courbes qui permettront de déterminer les coefficients de portance et de trainée ainsi que les angles d'attaque et de décrochage. Sert à caractériser le régime d'écoulement perçu par les pales. Son expression est la suivante [13] :

$$Re = \frac{WL}{\nu}$$

Avec : W : vitesse relative du vent sur la pale

L : longueur caractéristique, dans notre cas la corde de la pale

ν : viscosité cinématique de l'air, $\nu \approx 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

- $Re < 2000$: écoulement laminaire
- $Re > 4000$: écoulement turbulent
- Pour $2000 < Re < 4000$, on observe un régime de transition.

I.13. Puissance :

La puissance cinétique totale disponible sur la turbine d'une éolienne est donnée par : [14]

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

La puissance mécanique de la turbine éolienne est alors:

$$P_{\text{turbine}} = \frac{1}{2} C_p \rho \cdot S \cdot V_\infty^2$$

$$C_p = \frac{P_{\text{turbine}}}{P_{\text{vent}}}$$

Avec : C_p le coefficient de puissance.

I.14. Couple sur l'axe vertical :

Le couple sur une pale est obtenu après intégration de la force de traînée multipliée par la distance à l'axe sur l'ensemble de l'éolienne. Il existe une relation entre le couple et la puissance :

$$P = M \cdot \omega$$

Avec ω : vitesse de rotation de l'éolienne (rad/s).

On définit également le coefficient de couple :

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda}$$

En introduisant la solidité δ d'une éolienne par :

$$\delta = \frac{NC}{D}$$

Avec :

δ : Solidité

N: Nombre de pales

C: Corde de pale

D: Diamètre du rotor.

I.15.Conclusion :

On a présenté dans ce chapitre un état de l'art sur les systèmes de conversion éolien qu'on a essayé de les présenter d'une façon générale les différentes structures existantes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal, et leurs avantages et inconvénients les uns par rapport aux autres. En particulier Le principe de fonctionnement et l'aérodynamique de notre type d'éolienne « DARRIEUS » en forme H. on a citée aussi les différents types des profiles aérodynamiques et son caractéristiques.

Chapitre 2 : Formulation Mathématique

On s'intéresse dans ce chapitre à la formulation des équations générales de transport de la mécanique des fluides qu'on présente pour but de représenter l'écoulement de l'air autour d'un rotor éolien de type DARRIEUS. Nous rappelons les équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) qui régissent les écoulements turbulents. En dernier on donne une présentation du logiciel Fluent, qui est un code de calcul commercial qui modélise les écoulements du fluide par la méthode des volumes finis.

II.1. Introduction :

Le CFD « Computational Fluid Dynamics » fournit une approximation numérique des équations qui régissent le mouvement des fluides. Il offre une réduction considérable de temps et de coûts, en fournissant des données pertinentes dans la phase de conception [15]. Est un ensemble d'outils permettant de prédire quantitativement et qualitativement les écoulements de fluides avec des outils tels que la modélisation mathématique à l'aide d'équations des méthodes numériques de discrétisation et de résolution des logiciels.

Le CFD suit le cycle suivant :

- ✓ L'analyse du problème ;
- ✓ La connaissance scientifique (modèles, méthodes) nécessaire pour traduire le problème sous une forme mathématique ;
- ✓ L'algorithme ou la méthode de résolution ;
- ✓ L'ordinateur nécessaire pour réaliser les calculs ;
- ✓ L'interprétation des résultats de simulation.

II.2. Modèle mathématique :

Les équations régissant le problème sont les équations de continuité, qui expriment la Conservation de masse, et de la quantité de mouvement. Pour une formulation simple du problème, Nous allons supposer quelques hypothèses.

Nous supposons, alors, que: L'écoulement est in stationnaire l'écoulement est bidimensionnel. Fluide est incompressible le fluide est visqueux.

- Equation de continuité : [16]

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0$$

- Equation de quantité de mouvement suivant X : [16]

$$u \frac{\partial(u)}{\partial x} + V \frac{\partial(u)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u'_1 u'_2}$$

- Equation de quantité de mouvement suivant Y : [16]

$$u \frac{\partial(v)}{\partial x} + V \frac{\partial(v)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u_2'^2}$$

II.3.Méthodes de simulation des écoulements :

Il y a trois approches principales de simulation de l'écoulement turbulent : la simulation numérique directe (DNS), la simulation des grandes échelles (LES) et la simulation par des équations de Navier-Stokes moyennées (RANS). La figure II-1 résume les différentes méthodes utilisées pour la modélisation de la turbulence dans les équations de Navier-Stokes.

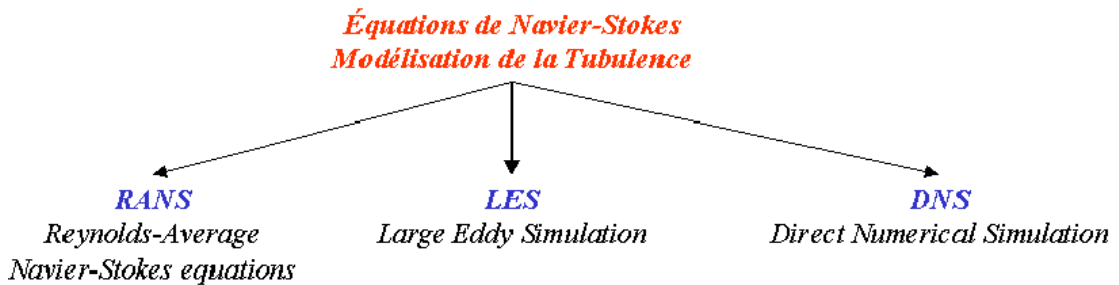


Figure II-1 : Résolution des équations de Navier-Stokes. Modélisation de la turbulence.

La DNS : La simulation Numérique Directe (Direct Numerical Simulation) fournit des informations précises concernant l'écoulement : topologie, corrélations spatio-temporelles, fréquences caractéristiques, champs moyens, statistiques de la turbulence, etc.

L.E.S : Simulation des grandes échelles (ou structures) (Large Eddy Simulation) est à mi-chemin entre la DNS et la modélisation RANS en ce qui concerne les informations obtenues sur l'écoulement et le coût de calcul.

R.A.N.S : Equations de Navier Stokes Moyennées (Reynolds Averaged Navier Stokes) est peu dépendant du nombre de Reynolds et peu gourmand en temps CPU: champs moyens et statistiques en un point de la turbulence uniquement, RANS est largement utilisée dans le monde industriel pour son coût de calcul faible.

II.4. Les équations de NAVIER STOKES moyennées (RANS) pour un fluide incompressible :

L'écoulement turbulent d'un fluide présente des caractéristiques aléatoires et désordonnées. Ceci impose l'utilisation des valeurs moyennes dans les équations de conservation de masse et de la quantité de mouvement. À cet effet, nous utiliserons des moyennes temporelles des équations instantanées de Navier Stokes. Le principe est le suivant :

Considérons une valeur instantanée u_i , elle peut être décomposée comme la somme d'une valeur moyenne \bar{u}_i est d'une valeur de fluctuante u'_i

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i$$

Si l'on calcule la moyenne dans le temps, on obtient :

$$\bar{u}_i = \frac{1}{t} \int_0^t u_i dt = \frac{1}{t} \int_0^t (\bar{u}_i + u'_i) dt$$

$$\int A = \bar{u}_i n_i \rho dA = 0$$

$$\int A \bar{u}_i \bar{u}_j n_i \rho dA = - \int A \overline{u'_i u'_j} n_i \rho dA + \int A [-\bar{p} \delta_{ij} + \mu (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i})] n_i \rho dA +$$

$$\int A_f [(f_n)_i + (f_f)_i] dA$$

On note l'apparition du terme $\int A \bar{u}_i \bar{u}_j n_i \rho dA$ relatif au caractère turbulent de l'écoulement. Plus particulièrement, le terme $\tau_{ij} = -\overline{\partial u'_i u'_j}$ est appelé tenseur de Reynolds. Ce nouveau terme ajoute 6 contraintes additionnelles (3 contraintes de cisaillement et 3 contraintes normales). Il nous faut donc ajouter de nouvelles équations. Pour ce faire, nous allons utiliser un modèle de turbulence. [17]

2.4.1. Modélisation de la turbulence :

Pour notre étude, **Le modèle k- ω** a été choisi. Il est souvent recommandé dans la littérature pour ce genre de calcul, et il est généralement retenu comme la solution la plus appropriée pour l'étude aérodynamique des éoliennes

- **Le modèle k- ω :**

Concurrent du modèle **k- ε** , le modèle **k- ω** fait appel aux mêmes idées directrices, mais remplace l'équation en ε par un bilan de vorticité turbulente.

Fluent propose deux modèles :

- ✓ Le modèle k- ω standard : [18]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k$$

Et

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega$$

- ✓ Le modèle k- ω SST : [18]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k$$

Et

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega$$

- **Le modèle Spalart-Allmaras :**

Le modèle Spalart-Allmaras (S-A) est un modèle relativement simple qui résout une équation de transport modélisée pour la viscosité turbulente.

Le modèle Spalart-Allmaras a été conçu originalement pour les applications aérospatiales, et l'équation et ses coefficients ont été calibrés pour des flux turbulents sur des profils aérodynamiques. C'est la raison pour laquelle le modèle S-A est très efficace pour les flux aérodynamiques attachés. Néanmoins, il l'est moins pour des écoulements détachés.

• **Modèle (k-ε) :**

C'est un modèle à deux équations de transport pour deux paramètres de turbulence. En utilisant l'analogie entre l'échange de quantité de mouvement par interaction moléculaire à l'échelle microscopique (contraintes visqueuses) et l'échange de quantité de mouvement par la turbulence à l'échelle macroscopique (contraintes de Reynolds). L'idée du modèle k- c'est qu'on peut la construire à partir de ces quantités une « viscosité turbulente propre à l'écoulement », où la viscosité turbulente est donnée par la relation suivante : [19]

$$\nu_t = C_\mu \left(\frac{k_2}{\varepsilon} \right)$$

Avec : $\mu_t = \nu_t \rho$ viscosité dynamique turbulente L'expérience montre que cette relation est bien vérifiée pour des écoulements à grand nombre de Reynolds à condition d'avoir une turbulence homogène.

C_μ : est un coefficient sans dimension qui doit être évalué expérimentalement

k : est l'énergie cinétique de turbulence défini par :

$$K = \frac{1}{2} \overline{u_i^2} = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2})$$

ε : Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulence K donné par la suivante:

$$\varepsilon = V \left(\frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial x_j^2} \right)$$

Ce terme de dissipation qui apparaît dans l'équation de l'énergie cinétique turbulente reste à déterminer. L'échelle typique de longueur des grosses structures de la turbulence L est Déduite de :

$$\varepsilon = K^{3/2} / L$$

II.4.2.Equation modélisée de K : [19]

L'équation modélisée de l'énergie cinétique turbulente s'écrit sous la forme suivante :

$$\underbrace{\frac{\partial K}{\partial t}}_1 + \underbrace{\overline{U_j} \frac{\partial K}{\partial x_j}}_2 = \underbrace{\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_3 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{V}{\sigma_{k,l}} + \frac{\nu_t}{\sigma_{k,l}} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right)}_4 - \varepsilon$$

Les termes de l'équation sont dénommés comme suit :

- (1) représente le taux de variation de l'énergie cinétique k
- (2) représente le transport par diffusion de l'énergie cinétique
- (3) représente la production par cisaillement de l'énergie cinétique turbulente
- (4) représente la dissipation de l'énergie cinétique turbulente k.

II.4.3. Equation modélisée de ϵ :

La forme modélisée de l'équation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} V_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{V}{\sigma_{k,t}} + \frac{v_t}{\sigma_{\epsilon,t}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{K}$$

←
←
←
←

1
2
3
4

Les termes (1, 2, 3 et 4) de l'équation sont :

- (1) représente le taux de variation de ϵ .
- (2) représente le taux de production (source) de ϵ .
- (3) représente le transport par diffusion de la dissipation de l'énergie turbulente.
- (4) représente la dissipation (puits) de ϵ .

II.5. Présentation de la méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes de contrôle ainsi dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation tel que le terme source par exemple, la méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes, ou chaque volume entoure un nœud. En utilisant différents schémas d'approximations on peut intégrer les termes des équations différentielles modélisantes sur chaque volume de contrôle, ou les valeurs et les quantités sont stockées aux nœuds du volume de contrôle.

Ces équations algébriques produites expriment la conservation des quantités pour le volume de contrôle et pour tout le domaine de calcul.

En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et celle des éléments finis.

L'équation aux dérivées partielles est résolue de manière approchée à l'aide d'un maillage constitué de volumes finis qui sont des petits volumes disjoints (en 3D, des surfaces en 2D, des segments en 1D) dont la réunion constitue le domaine d'étude. Les volumes finis peuvent être construits autour de points d'un maillage initial, mais ce n'est pas une nécessité.

Ces équations aux dérivées partielles contiennent des termes de divergence. En utilisant le théorème de flux-divergence, les intégrales de volume d'un terme de divergence sont transformées en intégrales de surface et ces termes de flux sont ensuite évalués aux interfaces entre les volumes finis. On utilise une fonction de flux numérique pour élaborer une approximation des flux aux interfaces. Puisque le flux entrant dans un volume donné est égal au flux sortant du volume adjacent, ces méthodes sont conservatives, donc parfaitement adaptées à la résolution de lois de conservation.

Un autre avantage de la méthode des volumes finis est qu'elle est facilement utilisable avec des maillages non-structurés car, en matière de discrétisation des lois de conservation, sa formulation ne tient aucun compte de la complexité du maillage. En revanche, les caractéristiques géométriques du maillage peuvent jouer un rôle prépondérant lorsque des flux diffusifs entrent en jeu. [20]

II.6. Maillage :

L'opération de maillage consiste à discrétiser le domaine de calcul. La spécification du maillage dépend de la complexité de la géométrie, on choisit généralement le maillage suivant les frontières du domaine.

"Fluent" traite plusieurs types de maillages qui sont en général importés directement d'autres logiciels de génération de maillages ("GAMBIT" par exemple). Le choix entre un maillage structuré, non structuré, voire hybride est devenu possible ceci a permis de simplifier ce problème et d'obtenir ainsi d'excellents résultats.

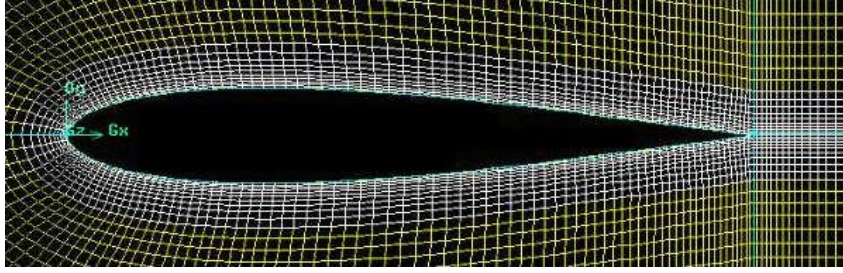


Figure II-2 : Maillage autour d'un profil.

II.6.1. Techniques générales de génération du maillage :

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne **Qualité** des éléments
- Assurer une bonne **Résolution** dans les régions à fort gradient
- Assurer un bon **Lissage** dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier Minimiser le nombre **Total** des éléments (temps de calcul raisonnable). On peut se souvenir de ces règles en utilisant la formulation mnémotechnique **QRLT**.

II.6.2. Type de maillage :

II.6.2.1. Maillage structuré (quadra/hexa) :

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie multi bloc. Cette technique consiste à diviser les domaines de calcul en plusieurs compartiments de formes géométriques simplifiées et de les mailler séparément. Il présente les avantages suivants :

Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent.

Réduit les risques d'erreurs numériques dues à la diffusion numérique si l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients :

Difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe.

Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes. Dans la majorité des cas, la division du domaine de calcul est nécessaire pour faciliter sa génération.

II.6.2.2. Maillage non structuré (tri/tétra) :

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition. [13]

Ses avantages : Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments. Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés d'où un gain de calcul énorme.

L'inconvénient : Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré. Engendre des erreurs numériques (diffusion numérique) qui peuvent être plus importantes si l'on compare avec le maillage structuré.

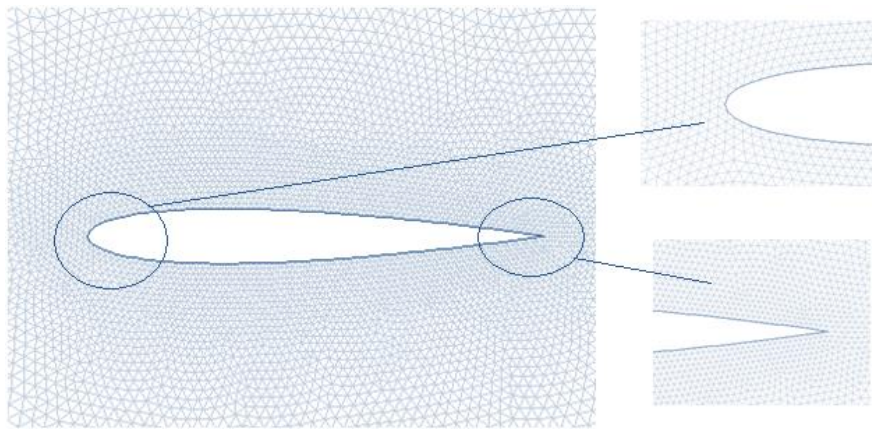


Figure II-3 : maillage non structuré

II.6.2.3. Maillage hybride :

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. Ses avantages : [21]

Combine les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré en réduisant les erreurs dues à la diffusion numérique.

Ses inconvénients :

Ce type de maillage demeure encore difficile à générer notamment dans les endroits de liaison entre le maillage structuré et le maillage non structuré.

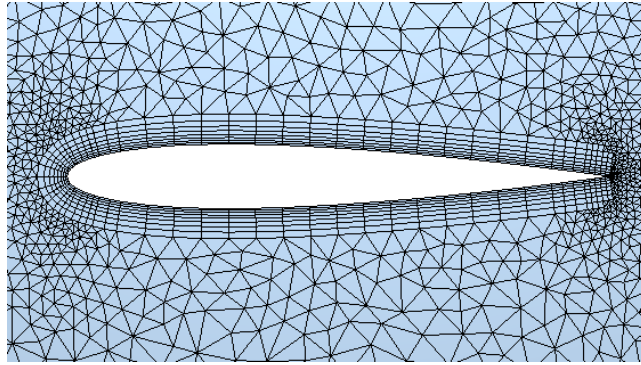


Figure II-4 : Maillage hybride

II.7. les conditions aux limites :

En fonction du problème physique traité, les conditions aux limites sont différentes et leur compatibilité avec les modèles numériques associés à un impact direct sur la convergence et le réalisme des résultats des simulations numériques. Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés en fluent.

-Entrée : inlet-vent :

La condition inlet-vent pour les écoulements compressibles et incompressibles, dont la vitesse d'entrée, est connue. On doit néanmoins veiller à ne pas placer cette entrée trop près d'un obstacle solide ; cela pourrait entraîner des problèmes de stagnation et modifier les propriétés de l'écoulement.

-Sortie : outlet-vent :

La condition outlet-vent est utilisée pour modéliser les écoulements dont on ne connaît à priori aucun détail sur la sortie. Il est approprié pour la modélisation de fluide incompressible.

-Haut : symmetry :

La condition symmetry est utilisée lorsque la géométrie présente une symétrie physique. Dans le cas axisymétrique, la condition symmetry est à une distance radiale de l'axe de symétrie.

-Les parois: wall :

La condition wall doit être utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides. Les pales est une région solide d'où la spécification wall.

II.8. la présentation des logiciels de calcul :

Pour notre simulation numérique nous avons utilisé deux logiciels de calcul qui se complètent et qui sont le meilleur Gambit et le solveur Fluent.

II.8.1. le meilleur « gambit » :

Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers.msh pour Fluent. Gambit regroupe trois fonctions : définition de la géométrie des problèmes (construction si la géométrie est simple ou bien import de la géométrie CAO), le maillage et sa vérification, la définition des frontières (Types de conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.

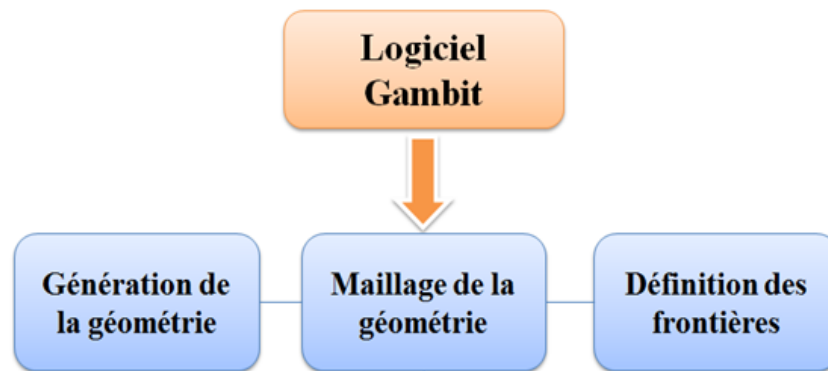


Figure II-5 : les étapes de la simulation sur logiciel gambit

II.8.2. Solveur Fluent :

C'est un logiciel de Simulation numérique des écoulements fluides (CFD). Il est utilisé dans plusieurs domaines : Aéronautique, défense, spatial, automobile, énergie, génie des procédés, environnement, thermique du bâtiment et biomécanique.

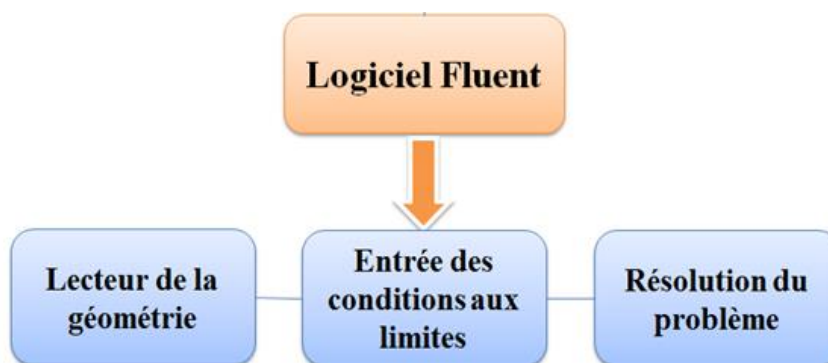


Figure II-6 : les étapes de la simulation sur logiciel FLUENT

Comme tous logiciels CFD, Fluent est composé de trois modules correspondant aux différentes étapes de déroulement d'une étude numérique :

- **Le préprocesseur :**

Il permet de représenter la géométrie du système, et de discrétiser le domaine construit en utilisant plusieurs algorithmes de maillage en deux ou trois dimensions. Il est aussi utilisé pour fixer les conditions aux limites et le type de matériaux (Fluide, solide) dans le domaine. Il est conseillé d'utiliser un maillage structuré pour la discrétisation du domaine. Cela réduit énormément le temps de calcul et assure aussi une bonne convergence.

- **Le solveur :**

Il permet à partir des menus DEFINE et SOLVE qui apparaissent dans l'interface de "Fluent" :

Définir le modèle en introduisant principalement :

Le modèle de turbulence utilisé s'il s'agit d'un écoulement visqueux ; L'équation d'énergie si on prend en considération l'énergie thermique ;

Le régime d'écoulement et le système de coordonnées considérées (2D, axisymétrique, 3D). Il permet aussi d'activer le rayonnement, les réactions chimiques et le modèle acoustique. Définir les conditions opératoires de pression, de température et de gravité Définir numériquement les conditions aux limites (pression, température, flux de chaleur, vitesse...) Introduire des USER DEFINE FUNCTION (UDF), qui permettent entre autres d'introduire des conditions aux limites complexes ou de modifier les variables de l'écoulement. Choisir le processus itératif en proposant notamment plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle. Il offre également une interface qui permet de contrôler à tout moment l'état d'avancement des calculs.

- **Le post-processeur :**

Il permet grâce au menu DISPLAY de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, et surtout d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser les champs de vectrices vitesses, de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées dans un point du domaine, sur une droite, sur une section ou sur la totalité du domaine. Le menu PLOT offre la possibilité de tracer des courbes et d'exporter les résultats sous d'autres formats pour un traitement plus approprié. Le menu REPORT permet de calculer et de récupérer les valeurs numériques des

variables d'écoulement tels que la vitesse, la pression, les flux de chaleur, les débits massiques et volumiques... sur les surfaces déjà définies. Il est à noter que le post-processeur qu'on a utilisé est celui fourni avec Fluent, mais il existe d'autres post-processeur. [22]

II.9. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation mathématique des écoulements avec l'approche RANS, elle basée sur l'application de la méthode des volumes finis sur des maillages structurés et non structurés générés sur des géométries

Dans Ce chapitre, Une étude sur les différents types et qualité de maillage a été faite, on perçoit mieux les difficultés que l'on peut rencontrer lors de la modélisation d'un problème quelconque, que ce soit lors de la création de la géométrie, et la génération de maillage.

Les différents type de maillage ont été présentés, ainsi les conditions aux limites imposées dans Fluent.

Chapitre III

Modalisation numérique de l'écoulement Autour d'un a rotor à axe vertical

Dans ce chapitre on présente une modélisation numérique d'un écoulement in-stationnaire en 2D autour d'un rotor éolien à axe vertical de type DARRIEUS à trois pales avec différents profil NACA en dimension réelles en comparant les résultats obtenus par simulations avec des expérimentaux issu de la bibliographie. La simulation se porte sur le fonctionnement de ce rotor en fonction de certains paramètres. Nous exposerons nos travaux à travers les étapes suivantes : - la construction du domaine de calcul.- génération de maillage. - définition les conditions aux limites de notre domaine et enfin les paramètres numériques.

III.1.Introduction :

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de l'écoulement in-stationnaire en 2D autour d'un rotor éolien à axe vertical de type DARRIEUS à trois pales avec quatre profil NACA0015 ; 0018 ; 0012 ; 0021 à axe vertical à l'aide d'un logiciel de mécanique de fluide industrielle FLUENT.

III.2.Géométrie l'éolienne :

Le modèle de l'éolienne choisi pour notre étude est une éolienne similaire a celle utilisée pour des essais expérimentaux par Qing'an li *et al*, [23]. Ces essais expérimentaux ont été réalisés à la soufflerie du laboratoire de l'Université de Mie au Japon en 2015[23]. Notre modèle possède les mêmes dimensions que l'éolienne à axe vertical DARRIEUS en forme H. Le prototype possède trois pales droites est caractérisée par une hauteur H de **1m**, un diamètre D de **2m**, un nombre de pales N de 3. Chaque pale est construite à partir d'un profil **NACA** projeté sur le cercle de rotation de l'éolienne et une longueur de corde de profile C (**C=0.265m**).

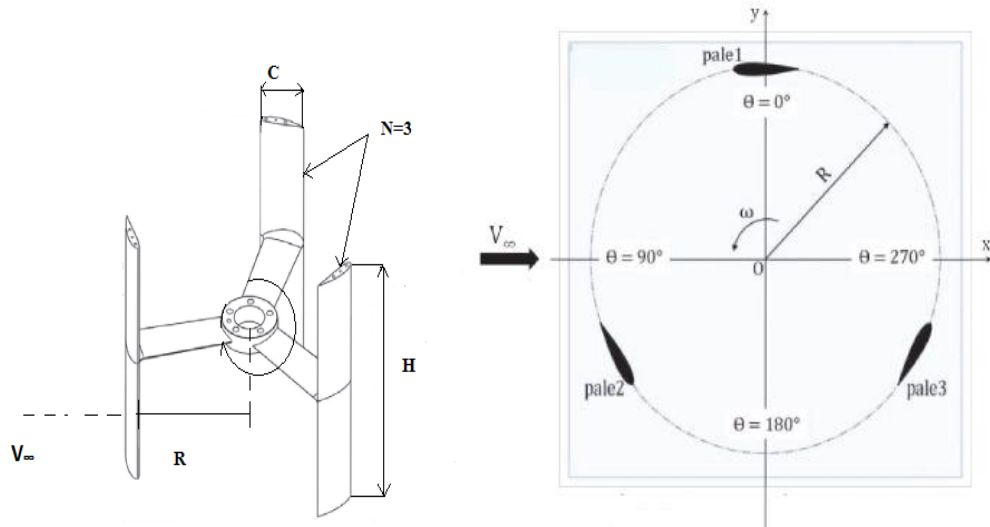


Figure III.1. Paramètres géométrique d'une éolienne étudiée.

Le tableau suivant présente les caractéristiques géométriques de notre éolien

Description	Valeur
Type de pale	Droite
Profil de pale	NACA 0015 ; 0018 ; 0012 ; 0021
L'auteur (H)	1m
Rayon du rotor (R)	2m
Nombre de pales(N)	3
La corde(C)	0,265m

Tableau III.1. Caractéristiques d'une éolienne étudiée.

III.3.construction de la géométrie :

Le rotor retenu dans cette modélisation est un rotor tripale à axe vertical. Les pales ne sont pas vrillées avec un profil aérodynamique NACA (Figure III-2). Ce profil est de forme aérodynamique développés par le comité consultatif national pour l'aéronautique (NACA).

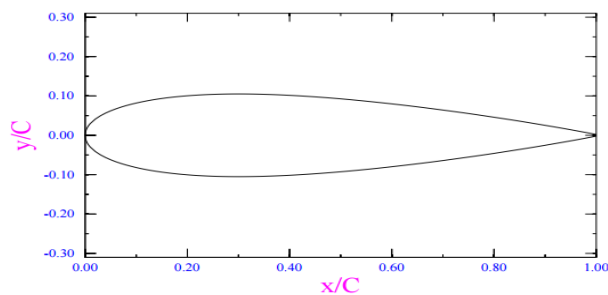
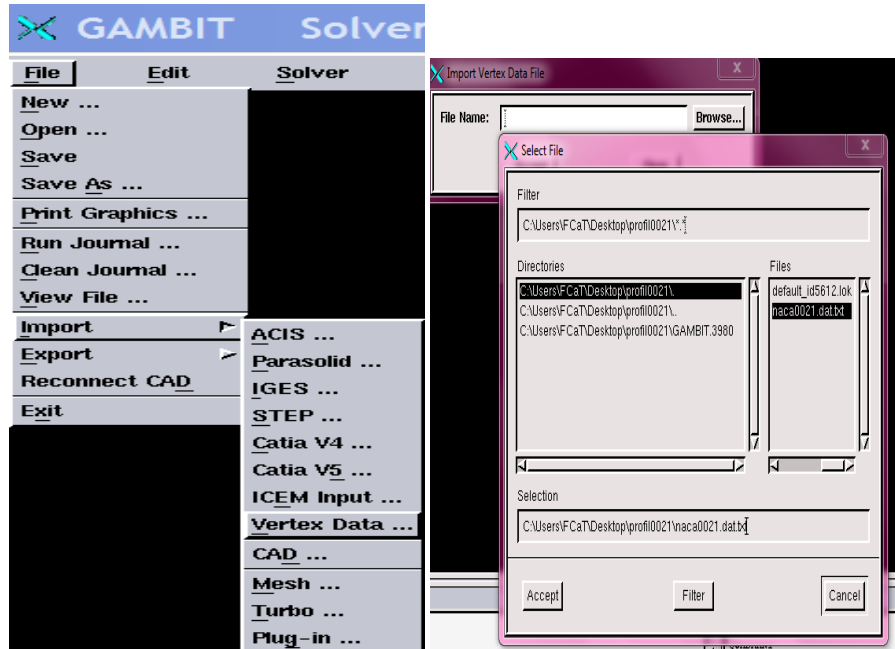


Figure III.2. Profil NACA 0015.

III.3.1. Les étapes de construction de la géométrie: (gamit) :

- Importation des coordonnées du profil

Command: File → Import → Vertex Data → Browse → Sélectionner le fichier naca.txt



- Figure III.3 Le fichier importé comporte les coordonnées du profil ; un point par ligne suivant le format X Y Z.

- Création de la géométrie du profil de base :

Créer les lignes d'intrados et d'extrados du profil à partir des coordonnées à l'aide de NURBS. Pour créer une ligne, il faut sélectionner tous les points de la ligne

Command: Geometry/Edge/ NURBS/Create Edge from Vertices

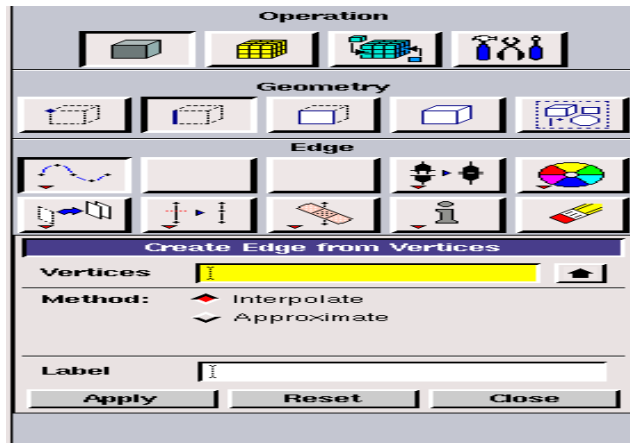


Figure III.4. Profil NACA 0015.

- Créer une surface plane à partir des lignes d'extrados et d'intrados.

Command: Geometry/Face/Create Face from Wireframe

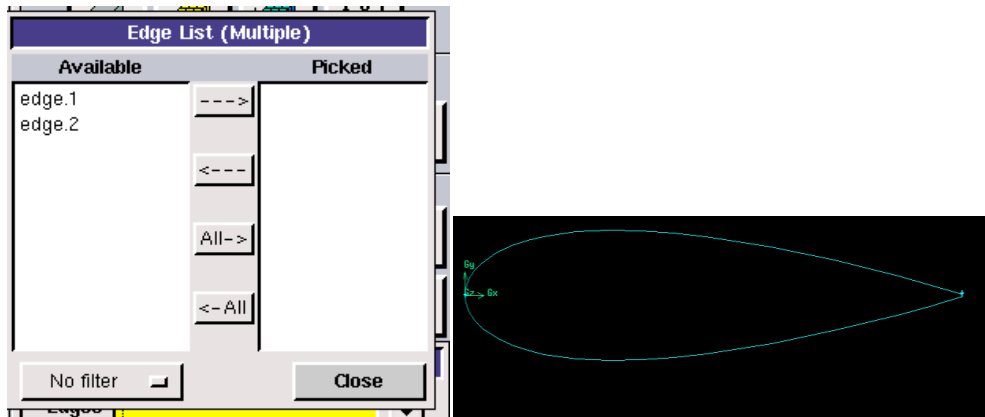


Figure III.5. Profil NACA 0015.

- Déplacer les point de profil, correspondant au 30% de la corde, dans le point (0, 0, 0) : déplacement $\Delta X = -0.0795$

Command: Geometry/Face/Move/Faces/Translate (cocher le cas Move, le cas Translate et taper le déplacement ΔX)

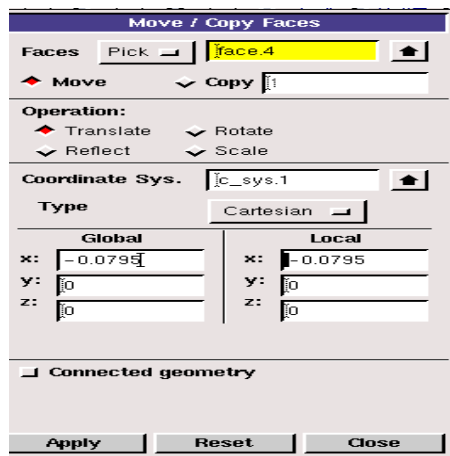


Figure III.6. Géométrie du profil.

- Faire tourner le profil dans un angle égal à l'angle de calage du pied de pale.

Command : Géométrie/Face/Move/Copy (cocher le cas Move, le cas Rotate et taper l'angle de rotation)



Figure III.7 rotation de profil.

- Déplacer le profil résultant dans une distance ΔZ égale au rayon du pied de pale.

Command : Géométrie/Face/Move/Copy (cocher le cas Move, le cas Translate, taper le déplacement $\Delta Z=1$)

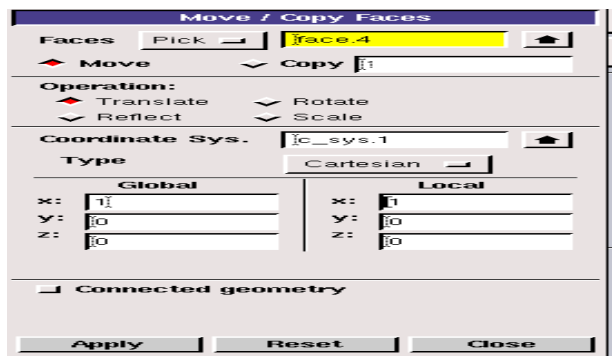


Figure III.8 translation de profil .

- Faire une copie de profil dans un angle A 3 fois

Command : Géométrie/Face/Move/Copy (cocher le cas Move, le cas Rotate et taper l'angle de rotation)

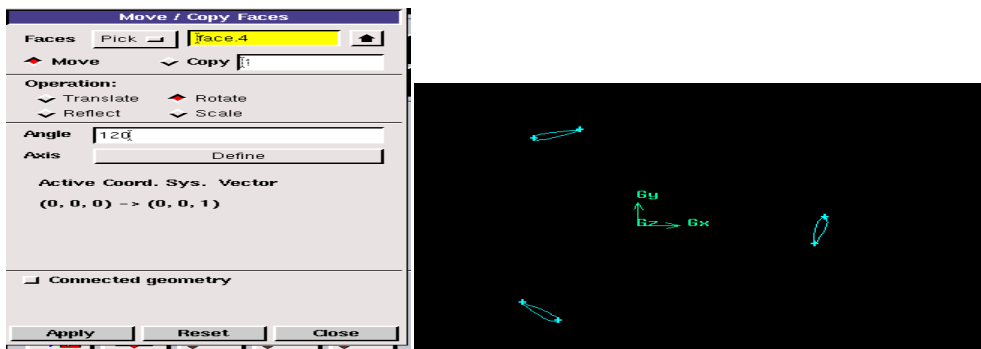


Figure III.9 rotation de profil.

- Créé une face (cercle)

Command : Géométrie/Face/cercle/create real circular face

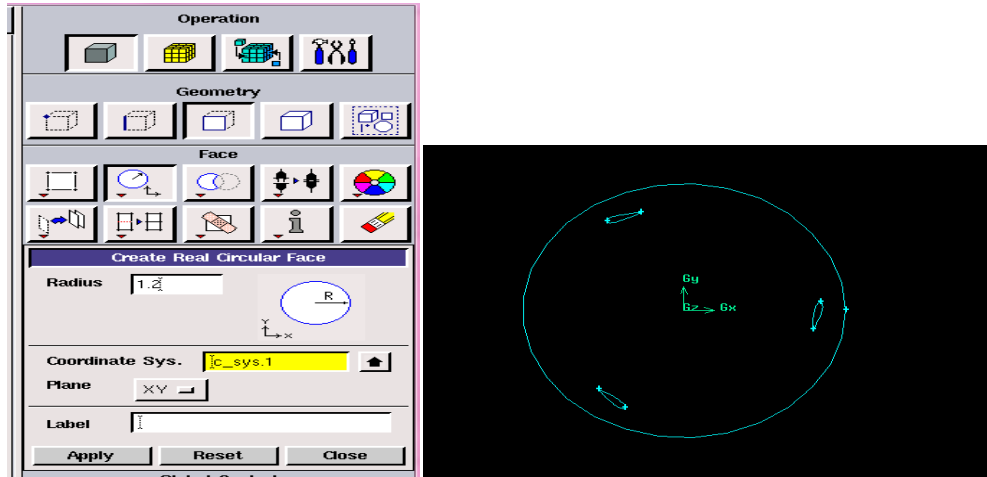


Figure III.10 création de cercle.

- Créé un rectangle :

Command: Géometrie /Face/rectangl/create real rectangle face

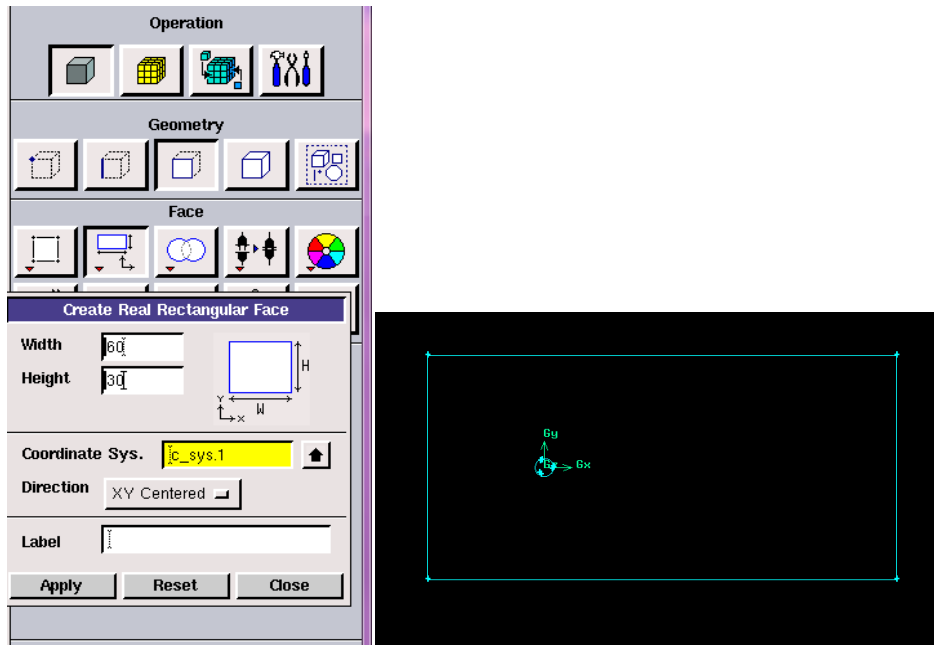


Figure III.11 ceation de rectangle.

- Soustraire les faces

Command:/Geometry/fac/subtract/ subtract real face



Figure III.12 soustraction des faces.

III.4.Maillage du domaine de calcul :

- Création d'une fonction permettant de caractériser le maillage des faces «size function»

Command: Operation/Tools/Size Function/ Create size function

Ici pour "Source" il faut choisir "edges" (sélectionner les surface de la pale) et pour "Attachement" il faut choisir "faces"(sélectionner le volume). Les paramètres de la fonction sont suivants :

- ✓ Start size =0.001
- ✓ Growth rate = 1.1
- ✓ Max. size =0.1



Figure III.13 les caractéristiques de maillage.

➤ Maillage des faces :

La «size function» est suffisante pour mailler directement le domaine de calcul

Command:/Operation/Mesh/faces/mesch face (il faut les choisir éléments «tri»

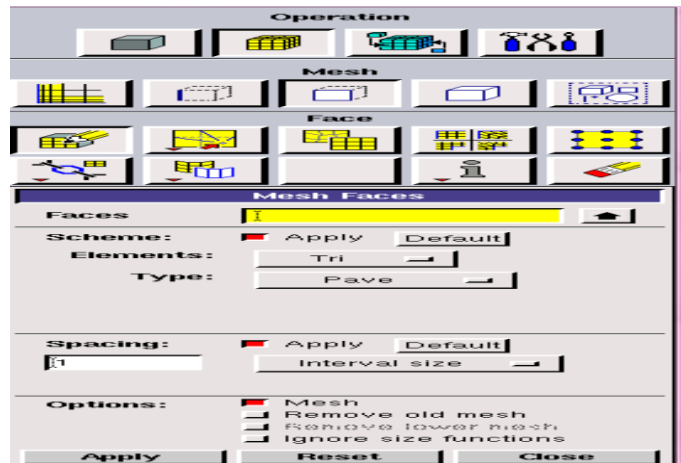


Figure III.14 maillage des faces.

➤ Définition des conditions aux limites sur les parois du domaine

Command:/Operation/Zones/Specify Boundary condition type



Figure III.15 Définition des conditions aux limites sur les parois du domaine.

On impose les conditions suivantes :

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| -ENTRÉE : Velocity Inlet | - SORTIE : Pressure Outlet |
| -Interface1: inetface | -Interface2: interface |
| -Symmetry: symmetry | - Paroi 1: wall |
| -Paroi 2: wall | - Paroi 3: wall |

- Définition des conditions pour domaine :

Command: /Operation/Zones/Specify condition type

Il faut choisir les faces et de le définit comme Fluide (figure III.16)

- Exportation de maillage :

Command : File/Export/Mesh (figure III.17)

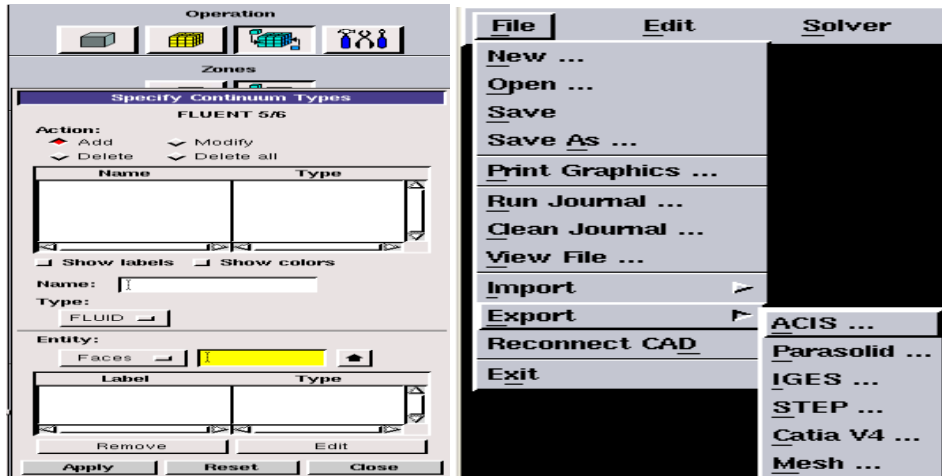


Figure III.16 Définition des conditions pour domaine. Figure III.17 export de mesh.

III.5. Les étapes importantes d'utilisation du Fluent :

- 1^{ère} étape : On lance le solveur FLUENT, on sélectionne (2d).
- 2^{ème} étape : En sélection le menu File → Read → Case...
- 3^{ème} étape : on sélection sur : Display → Grid.

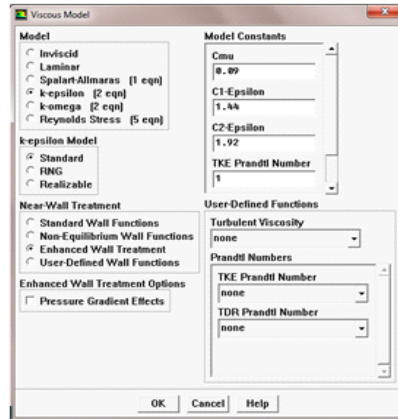
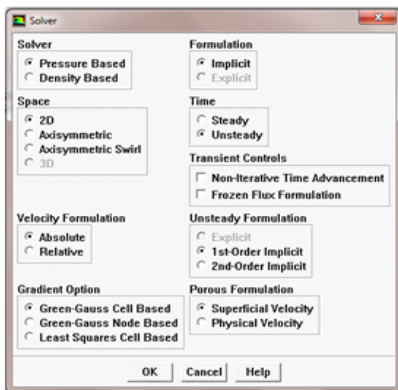


Figure III-18 Panneau solve.

Panneau viscous model.

- 4^{ème} étape (Indication les Propriétés du fluide) :

Pour placer les propriétés de fluide pour notre problème, on sélection sur :

Define • → Materials.

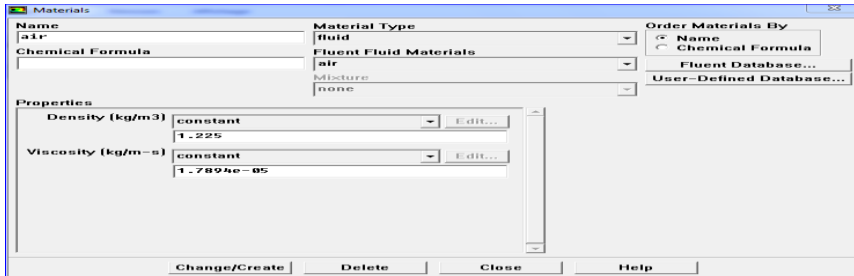


Figure III-19 panneau matériel.

- 5^{ème} étape (Indication des conditions aux limites):

Pour entrer les conditions aux limites, on ouvre le panneau des conditions aux limites

Define → Boundary conditions.

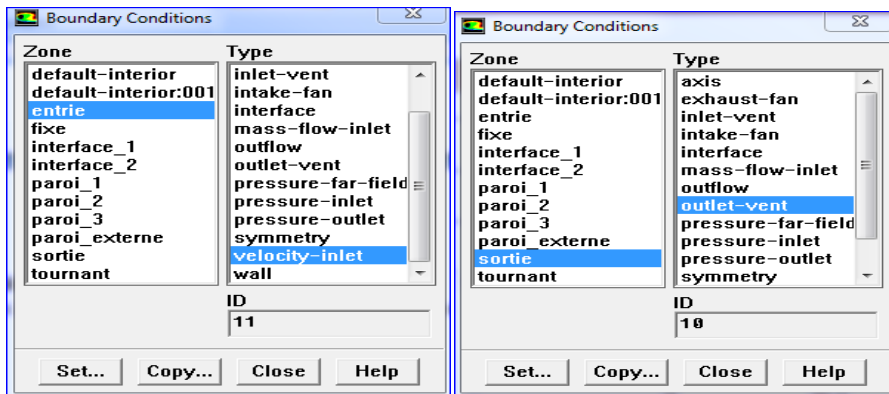


Figure III-20 panneau Boundary conditions.

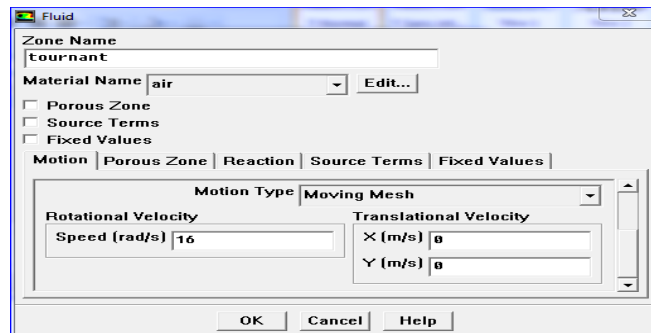


Figure III-21 panneau fluide.

Tableau des paramètres entrant dans le solveur fluent :

Boundary conditions :	
Velocity inlet	8(m/s)
Pressure out let	0(atm)
Rotational speed	16 (rad/s)

Tableau III.2 les paramètres entrant dans le solveur fluent.

➤ 6^{ème} étape : define → Grid interface → create

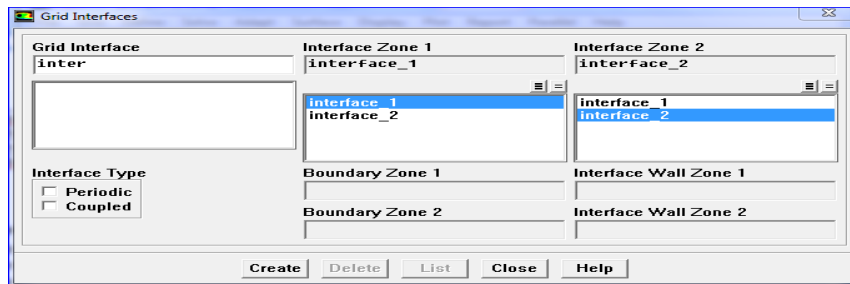


Figure III-22 panneau grid interface.

➤ 7^{ème} étape : solve → controls → solution → OK

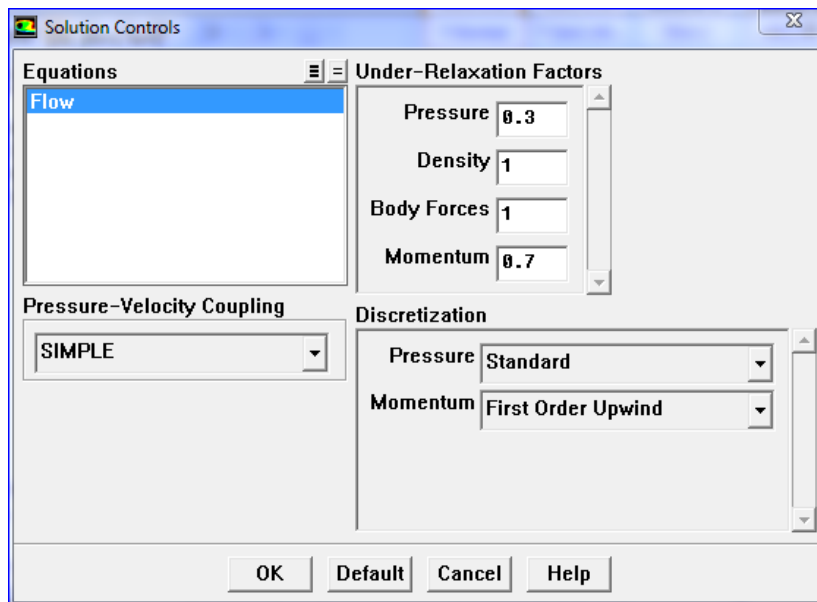


Figure III-23panneau solution control.

- 8^{ème} étape : il faut initialiser le champ d'écoulement pour fournir un point de départ de la solution. On peut donc choisir le calcul de la solution initiale des arrangements d'une condition aux limites où le champ entrant l'écoulement évalue individuellement. En cliquant : Solve → Initialize :

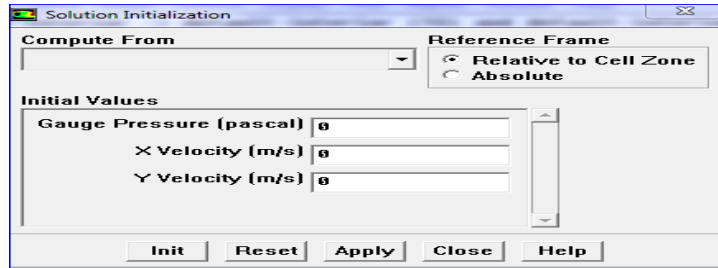


Figure III-24 panneau solution initialisation.

- 9^{ème} étape : solve→ monitor→ force puis on sélection (print, plot ,write, per zone)et wall zone→ apply .

Chaque fois on change le coefficient et sélection options et wall zones→ apply.

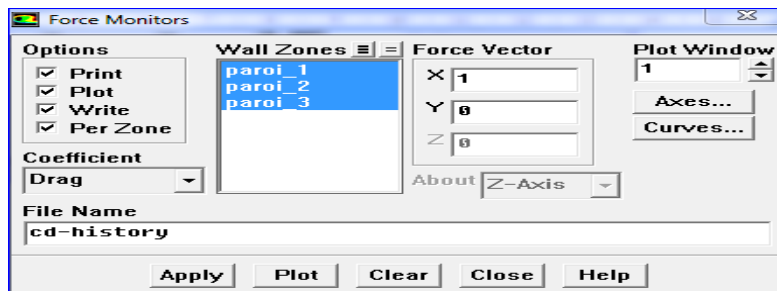


Figure II-25panneau force monitors.

- 10^{ème} étape : Le calcul
File→write→auto save→OK

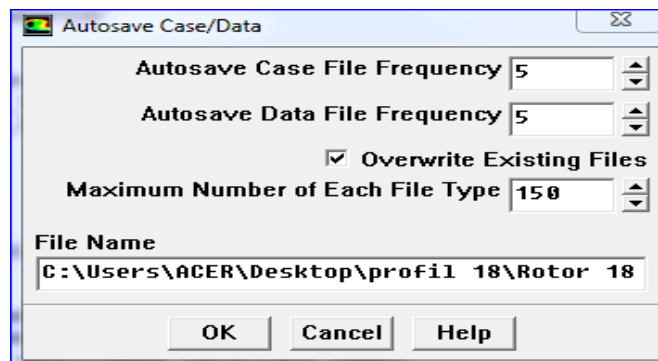


Figure III-26 panneau auto-save case.

Maintenant on peut commencer les itérations. On clique sur : Solve → Itérate, ceci ouvre le panneau de l'itération représenté sur la figure ci-dessous :

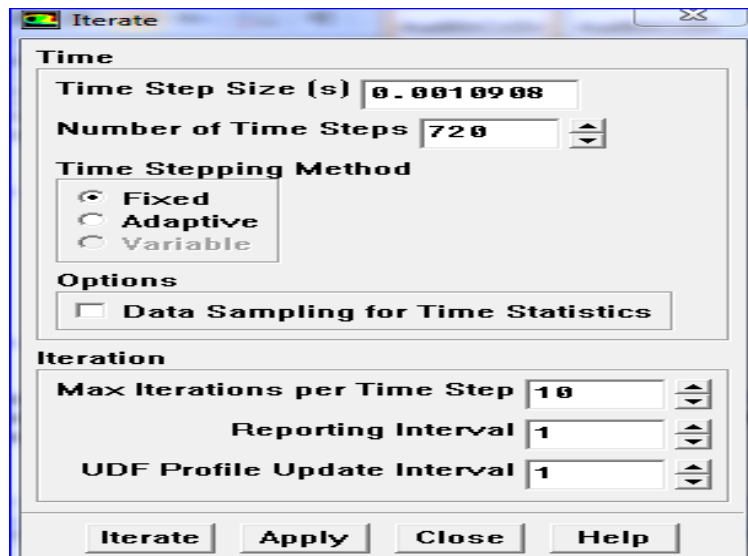


Figure III-27 panneau l'itération.

III.6.Conclusion :

Le présent travail s'est porté essentiellement sur la simulation numérique d'un écoulement Incompressible en 2D autour d'un rotor éolien à axe verticale de type DARRIEUS-H à trois pales de profil NACA, en utilisant comme outil de calcul le code Fluent qui utilise la méthode des volumes finis.

Les principaux objectifs de ce travail sont atteints, notamment une maîtrise avancée du logiciel de calcul «Fluent » ainsi que celui du maillage « Gambit ». Les différents résultats ont porte a travers l'analyse du champ dynamique dans le chapitre qui suit.

Chapitre IV Résultats et Discussion

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats des simulations numériques d'écoulement autour du rotor éolien avec différents profils aérodynamiques. Les simulations numériques sont en 2D. Les résultats numériques présents concernent la distribution du champ de vitesse, pression, turbulence et les courbes des performances aérodynamiques.

IV.1.INTRODUCTION :

L'objectif de ce chapitre est l'analyse numérique de l'écoulement in-stationnaire dans un rotor tripale d'une éolienne en dimensions réelles [23]. Le modèle est une éolienne à axe vertical. Une modélisation de l'écoulement axial et turbulent utilisant l'approche basée sur les équations de Navier Stokes moyennées RANS est effectuée. Les simulations numériques réalisées ont permis d'accéder à la morphologie de l'écoulement et de montrer sa complexité.

Dans ce chapitre on présentera les résultats de la simulation en 2D par simplification de l'étude du rotor. Pour étudier l'influence des profils aérodynamiques sur les performances des rotors éoliens, on a fait des simulations pour quatre géométries avec des profils NACA 0012, 0015, 0018 et 0021 avec différentes vitesses de rotation du rotor ($\omega = 4$ rad/s, $\omega = 8$ rad/s, $\omega = 12$ rad/s, $\omega = 16$ rad/s, $\omega = 20$ rad/s, $\omega = 24$ rad/s). Nous avons utilisé une station de calcul avec 12 microprocesseurs et 128G de RAM pour faire le calcul. Pour le temps de calcul de ces simulations, puisque il y a quatre géométries et chaque géométrie on a 6 vitesses et chaque vitesse il y a presque 6 h de calcul, donc :

$(4 \times 6) \times 6 = 144$ h. Cependant il est indispensable de faire beaucoup de simulation pour optimiser la géométrie, le maillage et les conditions de calcul avant de lancer chaque calcul.

IV.2.Influence du maillage :

Pour obtenir de bons résultats, Nous avons passé beaucoup de temps à créer le maillage de l'éolienne, qui est l'étape la plus délicate. On a dû raffiner le maillage sur la zone proche de la paroi pour bien simuler l'écoulement.

Le maillage choisi a permis d'assurer la convergence des calculs pour tous les angles considérés.

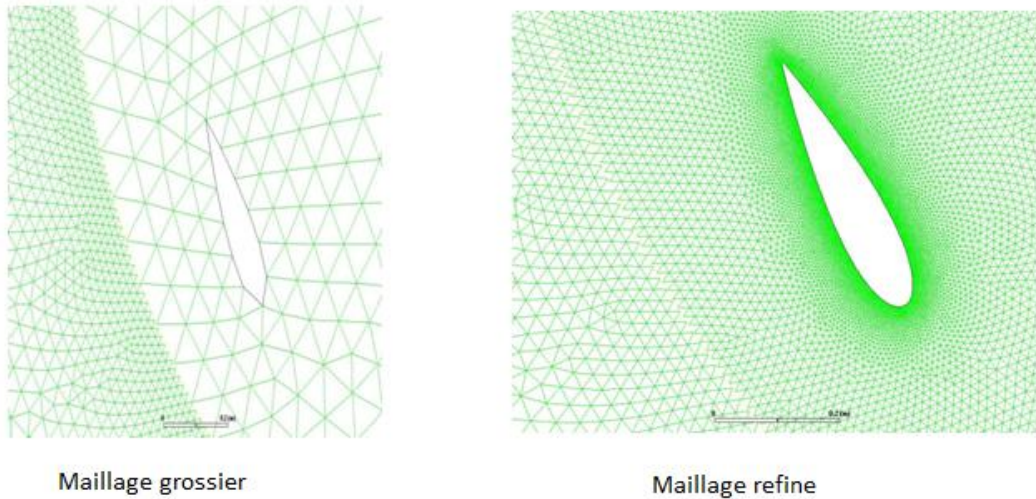


Figure IV.1 maillage autour du profil.

IV.3. Convergence du calcul :

On peut analyser la convergence d'un calcul en se reportant à Figure IV.2. Cette graphie représente l'évolution des résidus au cours des nombres d'itérations. Pour contrôler la convergence de la solution.

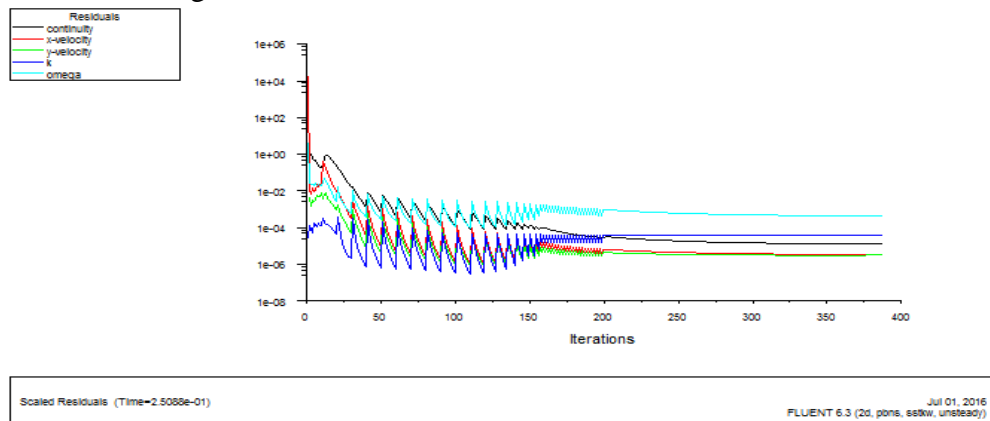


Figure IV.2. Résidus de calcul pour l'écoulement en 2D.

IV.4. Morphologie de l'écoulement in-stationnaire en 2D autour du rotor :

On s'intéresse à l'analyse du champ de vitesse absolue dans le rotor afin de comprendre certains mécanismes générateurs de pertes et d'instabilités aérodynamiques. La figure IV.3 montre la morphologie de l'écoulement.

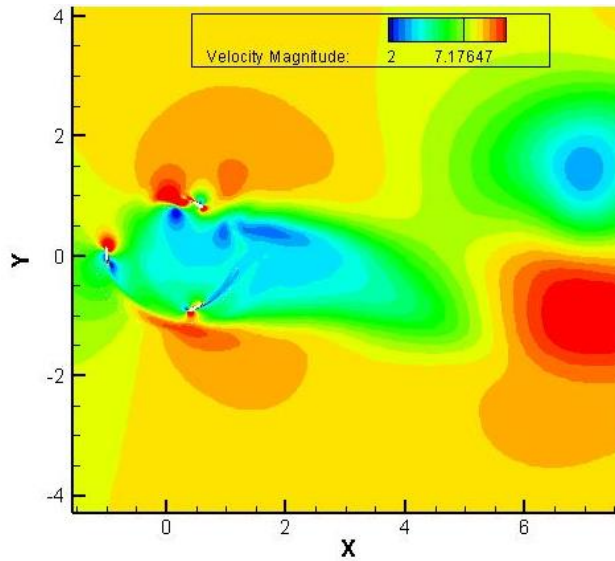


Figure IV.3.Écoulement en 2D autour du rotor éolien.

IV.4.1.Étude du sillage du rotor :

On remarque le sillage selon la direction de l'écoulement en s'éloignant du plan de rotor. Le sillage disparaît à une distance égale 10 le diamètre approximativement. Pour le sillage proche du rotor, voir la figure IV.4. Nous observons à l'extrémité de la pale des tourbillons. Ces tubes tourbillonnaires qui sortent en trajectoire hélicoïdale. L'émission de bord d'attaque peut donner naissance à d'autres tourbillons contrarotatifs au contact avec les pales. Ce qu'on appelle la dynamique des tourbillons.

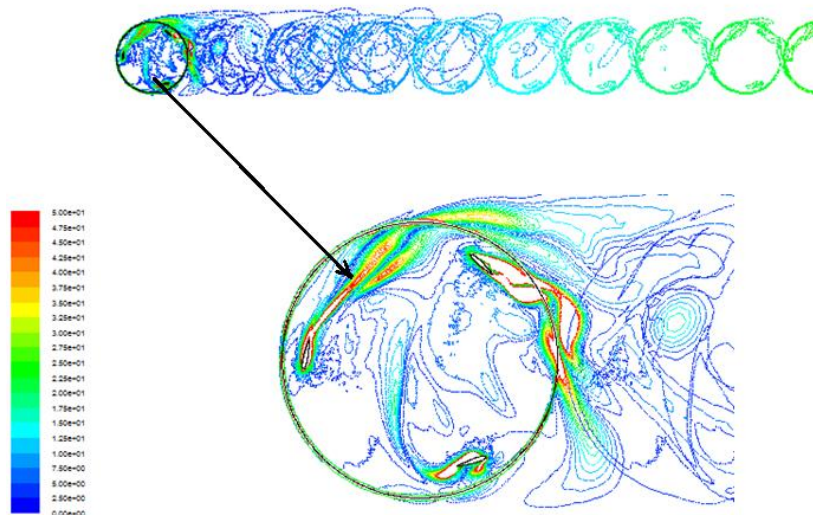


Figure IV.4. Représentation du sillage en 2D.

IV.4. 2. Interprétation des champs de vitesse de l'écoulement 2D :

Pour compléter l'étude du sillage à l'aval du rotor avec la présentation du sillage lointain, des résultats de la simulation sont présentés suivants différents angles azimutal. Ces résultats sont représentés pour la vitesse axiale sur la figure IV

Les figures IV. (5, 6, 7, 8, 9) Présentent une distribution de Champ de la vitesse autour du rotor de l'éolienne pour différent angle azimutal de 0° à 360° en rotation.

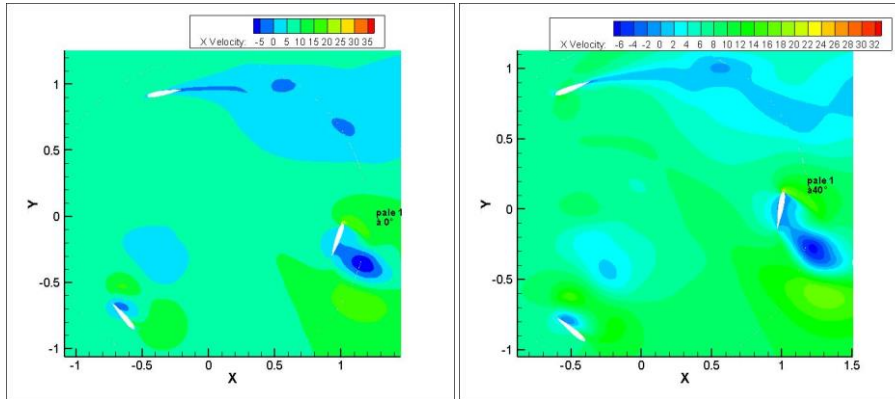


Figure IV.5 le champ de vitesse de l'écoulement de la Pale 1 à 0° et 40° .

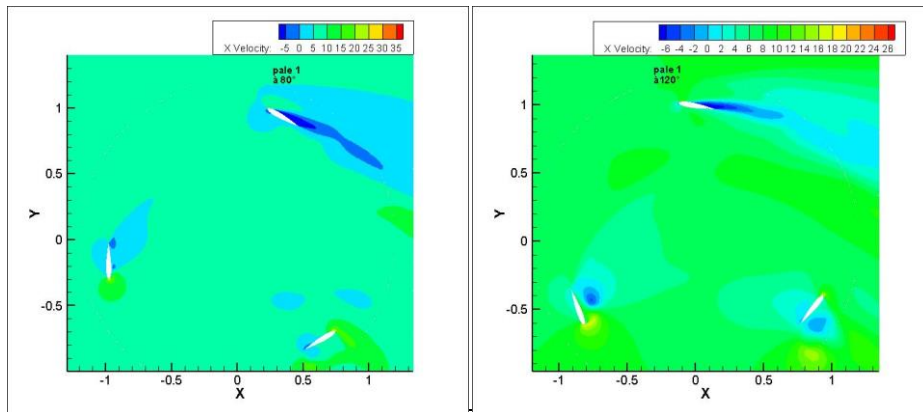


Figure IV.6. Le champ de vitesse de l'écoulement de la Pale 1 à 80° et 120° .

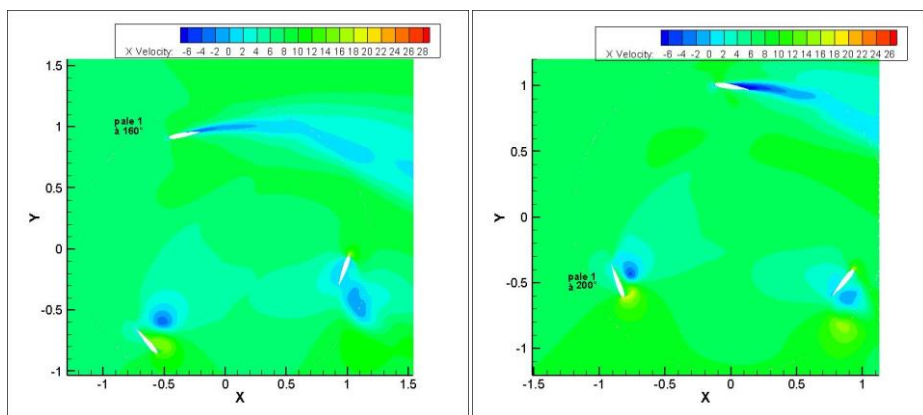


Figure IV.7. Le champ de vitesse de l'écoulement de la pale1 à 160° et 200° .

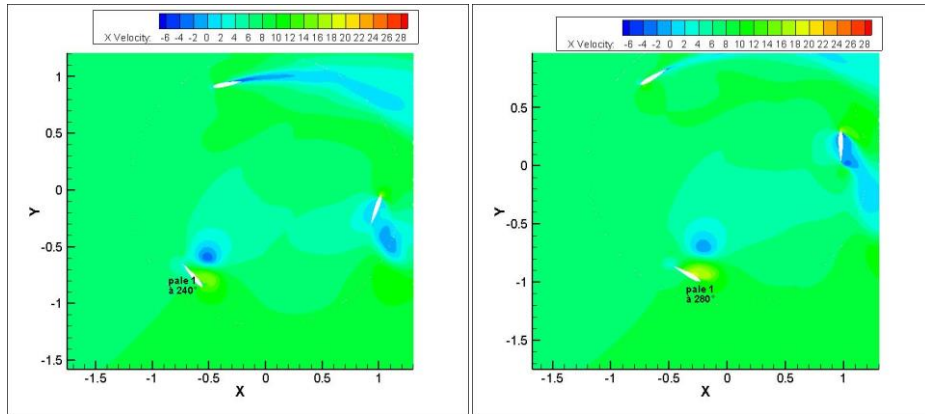


Figure IV.8. Le champ de vitesse de l'écoulement de la pale 1 à 240° et 280°.

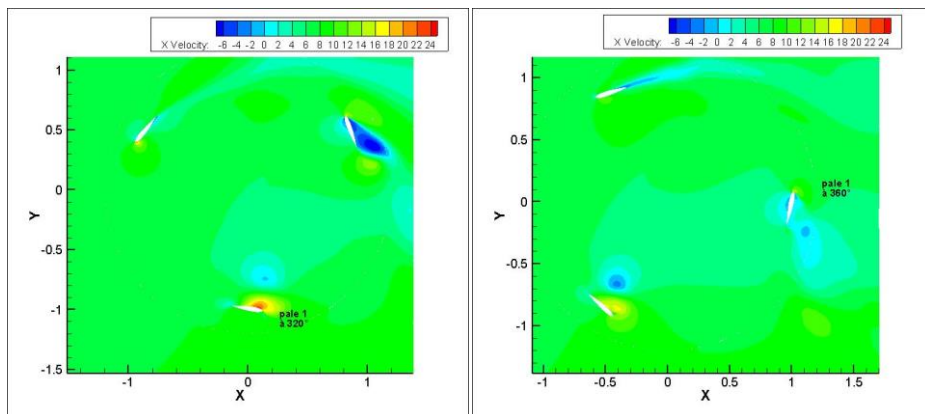


Figure IV.9. Le champ de vitesse de l'écoulement de la Pale 1 à 320° et 360°.

IV.4.3. Interprétation des champs de pression de l'écoulement 2D :

Les figures IV (10, 11, 12, 13, 14) représentent la distribution de pression relative de l'écoulement de l'air autour d'un rotor éolien pour différents angles azimutaux.

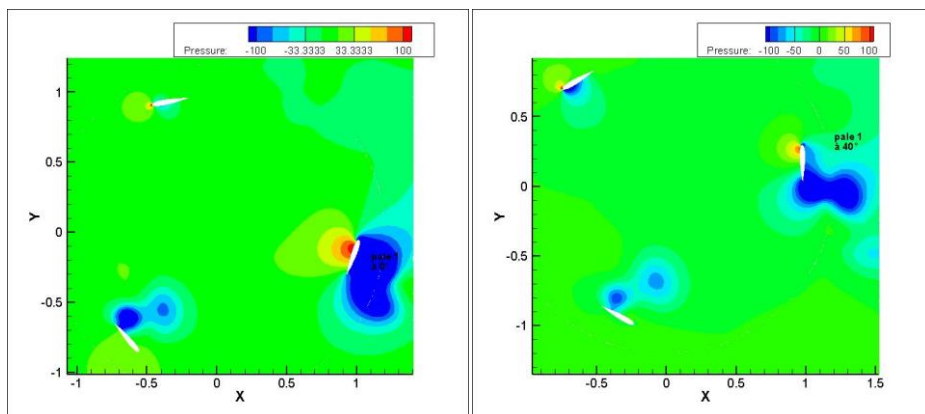


Figure IV.10. Le champ de pression de l'écoulement de la pale 1 à 0° et 40°.

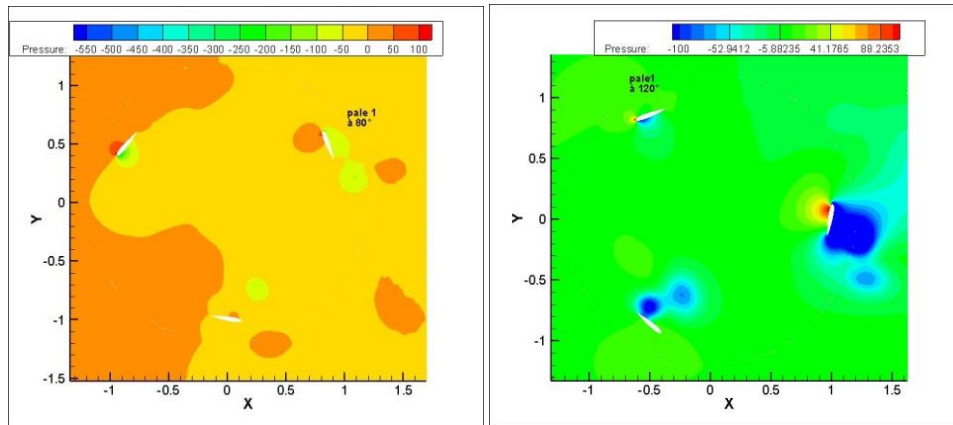


Figure IV.11. Le champ de pression de l'écoulement de la pale 1 à 80° et 120°.

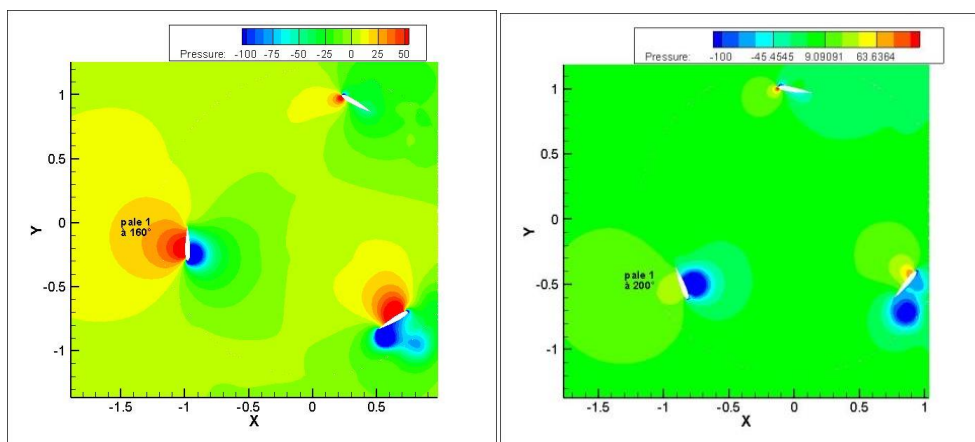


Figure IV.12. Le champ de pression de l'écoulement de la pale 1 à 160° et 200°.

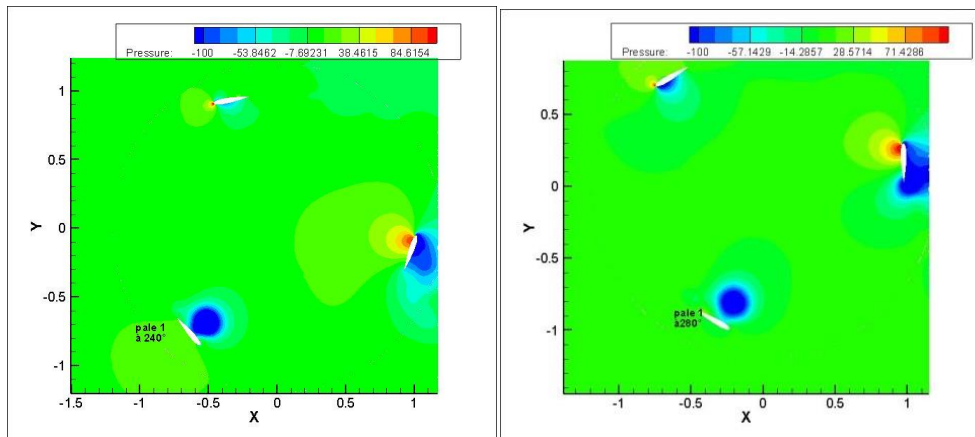


Figure IV.13. Le champ de pression de l'écoulement de la pale 1 à 240° et 280°.

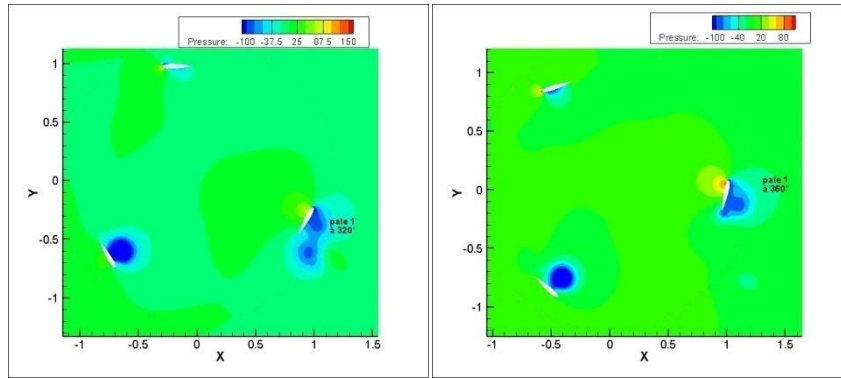
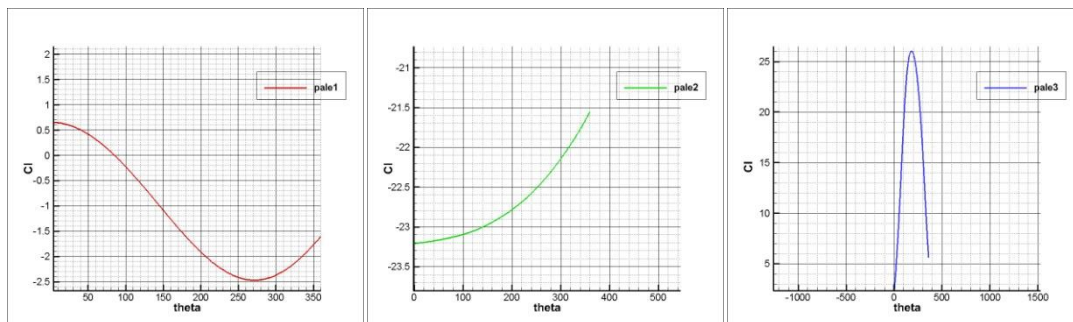


Figure IV.14.le champ de pression de l'écoulement de la pale 1 à 320°et 360°.

IV.5.Courbes de Portance et le moment de convergence en 2D :

IV.5.1.Courbes de Portance (Cl) :

Le Figure (IV.15) représente le coefficient de portance(Cl) en fonction de l'angle azimutal θ .



Graphique IV.15.Variation de coefficient de Portance (Cl).

IV.5.2.Courbes de Coefficient de Moment (Cm) :

Le figure IV.16 représente le coefficient de Moment (Cm) en fonction de l'angle azimutal θ , on remarque que le (Cm) est périodique que la valeur maximale atteinte est de 40Nm.

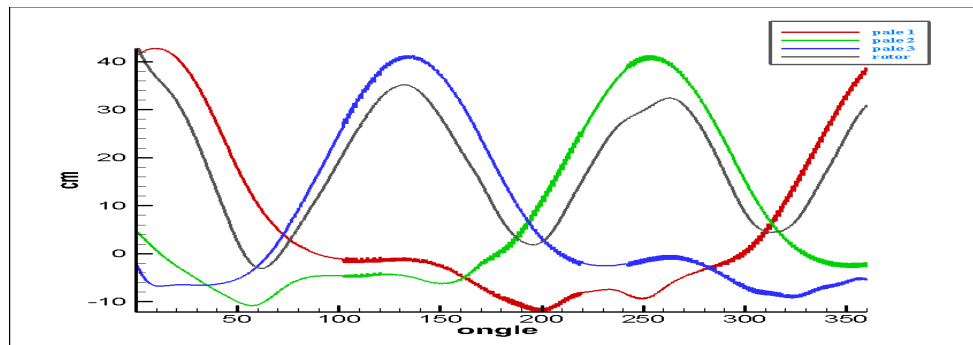
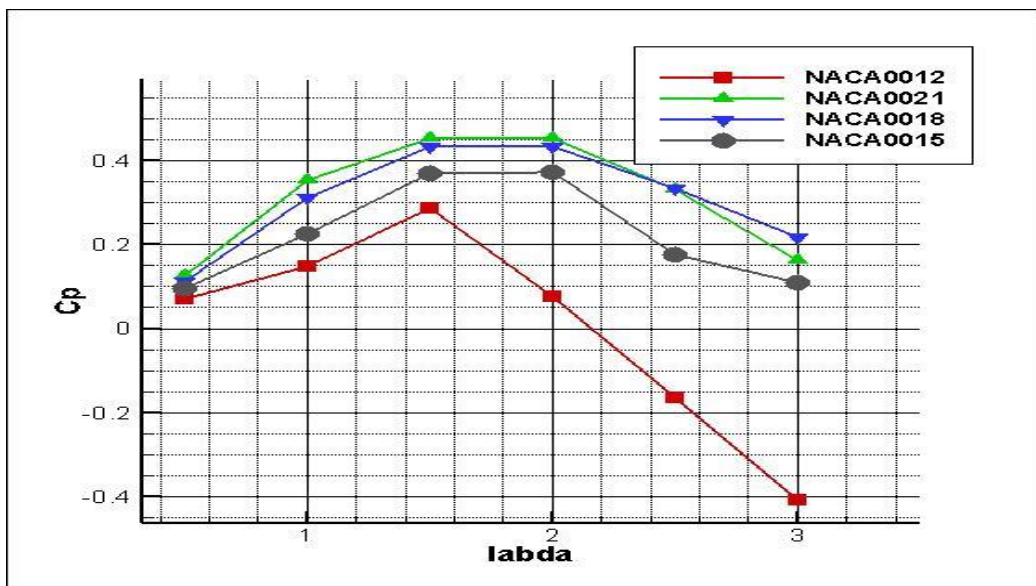


Figure IV.16.Variation de coefficient de Moment(Cm) avec l'angle azimutal θ .

Ce graphe représente le coefficient de moment en fonction d'angle azimutal, on remarque que la pale 1 c'est la première qui commence à produire du couple depuis (0° à 25°) et les autres (pale 2 et 3) sont consommatrice de l'énergie. Le rôle change de 50° à 150° c'est-à-dire la pale 2 qui commence à produire du couple et la pale (1,3) sont consommatrices en suite la pale 3 qui commence à produire du couple de 150° à 252° et ainsi de suite.

IV.5.3. Courbe de coefficient de puissance Cp :

La figure (IV.17) donne une comparaison des variations du coefficient de puissance en fonction du TSR pour différents profil du rotor qui sont le NACA0012,0015,0018 et 0021.



La figure (IV.17).Variation de coefficient de puissance Cp en fonction de TSR.

Les simulations ont été réalisées à TSR = 0,5 ; 1,1.5, 2, 2.5 et 3, ce qui signifie que les vitesses angulaires ont été définies comme $\omega = 4\text{rad/s}$, 8rad/s , 12rad/s , 16rad/s , 20rad/s et 24rad/s . On constate que le meilleurs Coefficient de puissance obtenu est celui du NACA0021 comme il est présenté dans le tableau et que la valeur maximale est 0.37 pour un TSR de 2.

CP	0,09626948	0,22653616	0,36964603	0,37419386	0,17675553	0,10925524
TR S	0.5	1	1.5	2	2.5	3

Tableau IV.1 les valeurs de coefficient de puissance en fonction de TSR.

Le C_p atteint une valeur maximale d'environ 0.374 pour $TSR= 2$, et diminue rapidement lorsque $C_p = 0.109$.

IV.6. Validation des résultats :

Le figure(IV.18) représente une comparaison des résultats numériques et des données expérimentales issues de la bibliographie. Donc, afin de valider notre procédure numérique nous avons comparé nos résultats aux données expérimentales obtenues par les essais de [23]. On remarque que l'écart est important entre les valeurs numériques et expérimentales cet écart est dû à la simplification de l'étude en 2D. Les effets en 3D sont négligés dans cette étude.

Cependant l'allure générale du C_p est obtenue pour les valeurs maximales et minimales est ceci confirme la validité de notre approche numérique.

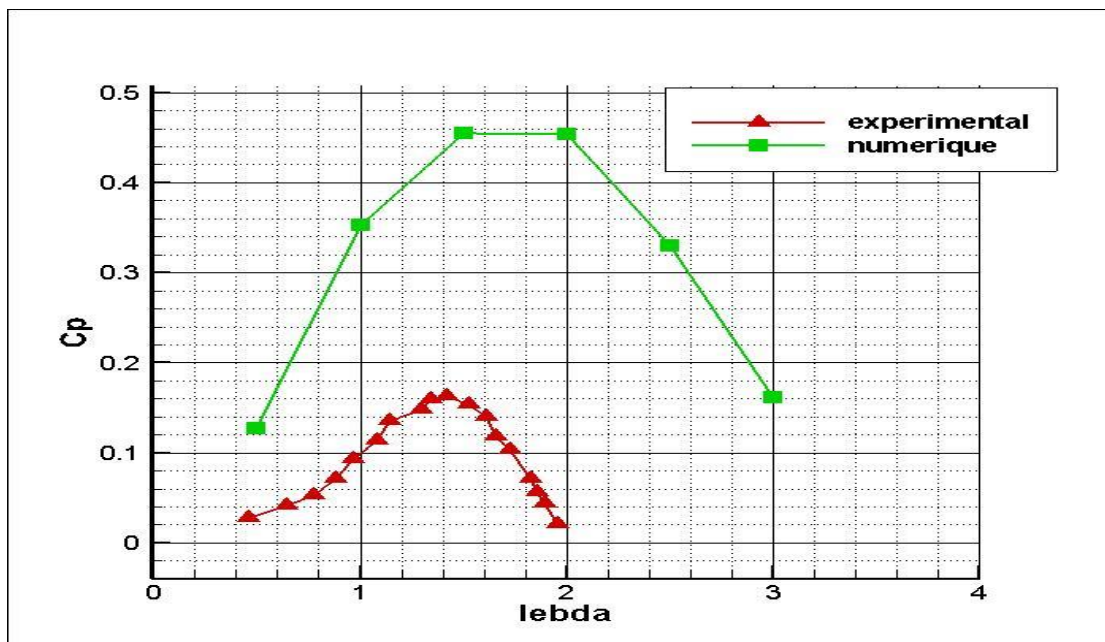


Figure IV.18. Coefficient de puissance.

IV.7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des simulations numériques d'un écoulement in-stationnaire autour du rotor en 2D obtenu par le logiciel de calcul Fluent.

La modélisation numérique s'est principalement axée sur la compréhension et la quantification des champs de vitesse, de pression et des effets des lâchers tourbillonnaires inhérents au fonctionnement de l'éolienne Darrieus-H.

Il était, notamment important de vérifier si les paramètres géométriques ont une influence sur les performances aérodynamiques. Le modèle numérique adoptée a permis donc de reproduire les effets ainsi de les quantifier et de faire une analyse de l'écoulement.

D'après la simulation numérique des quatre géomètres NACA on remarque que le meilleur CP est celui du NACA0021.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, on s'est intéressé à étudier numériquement l'écoulement d'air incompressible turbulent bidimensionnel à travers les pales du rotor d'une éolienne à axe vertical de type DARRIUS –H avec des profils NACA0012, Naca0015, Naca0018 et Naca0021. Pour la résolution numérique, on a fait appel à un code commercial « FLUENT » basé sur la méthode des volumes finis, en utilisant le modèle turbulence $k-\omega$ standard.

La simulation numérique nous a permis de déterminer le champ complexe des vitesses, la pression statique et de l'énergie de turbulence. Aussi nous avons tracé les courbes de coefficient de portance et coefficient de trainé des pales.

L'approche numérique utilisée pour l'étude et l'analyse du comportement aérodynamique du rotor est basée sur la résolution des équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) appliquée sur quatre configurations géométriques en 2D.

Les principaux objectifs de ce travail sont atteints, notamment la compréhension du fonctionnement de ce type d'éolienne, l'influence des profils aérodynamiques sur les performances de l'éolienne.

Pour une analyse plus complète, une simulation en 3D s'avère nécessaire pour se rapprocher des résultats expérimentaux.

Références bibliographiques

- [01] : F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [2] : TOUAL BELKACEM « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010.
- [3] :B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C. NICHITA «état de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002.
- [4] : M. JOURIEH «développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien» Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.
- [5] : HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [6] : ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006.
- [7] : LATRECHE Mohammed Tahar « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » 24 /06 /2012.
- [8] : ABDOU AMEL « étude numérique d'une couche limite turbulente autour d'un profil bidimensionnel » 2010.
- [9] Joseba Goyena , « analysis and design of a vertical axis wind turbine», Pamplona, 27 de Julio de 2011.
- [10]: Wei .Tong, « Wind power generation and wind turbine design», KOLLMORGEN Corp, USA
- [11] Hoan .Tran, « Conception Optimale Intégrée d'une chaine éolienne "passive": analyse de robustesse, validation expérimentale », Thèse doctorat, Université de TOULOUSE, 2010.
- [12] Laurent. Beudet, «Etude expérimentale et numérique du décrochage dynamique sur une éolienne à axe vertical de forte solidité», thèse, Université de Poitiers, 2006.
- [13] Hamid. Lakhdari, « Hydrodynamique d'écoulement dans une cuve mécaniquement agitée », Magister en énergétiques avancés, Université M'HAMED BOUGARA, Boumerdes, 2009
- [14] Zerari .Naziha, « Modélisation et option multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petit taille », thèse doctorat en science ,université BADJE MOKHTAR-Annaba, 2015.
- [15]: Sandia report, « predicting aerodynamic characteristics of typical wind turbine airfoils using CFD », 1997.

[16] D. FEDALA, « Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent applications », Article, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique des Fluides Interne ENSAM, CER de Paris, 2007.

[17] D. Hamane * et O. Guerri, « Caractérisation de sillage d'une éolienne isolée et l'interaction entre deux éoliennes Danwin-180kW », Division Energie Eolienne Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Algiers, Algeria

[18] Ansys Fluent Teory Gide.2008

[19] M.YOUNSI, « Aeroacoustique et aérodynamique in-stationnaire, numérique et expérimentale des ventilateurs centrifuges a action », thèse doctorat en Mécanique de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 2007.

[20] F. Benkhaldoun(16/04/ 2010) : cour 'Méthode des volumes finis' Université Paris 13

[21] Boubkeur.Boukhezzar, « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable », Université paris Xi UFR scientifique d'orage, 2006.

[22] Fluent user's guide (6.3)

[23] Qing'an li et al. 2015, « Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-blades vertical Axis wind Turbine », JOURNAL 2015.

Annexe

Quelque chiffres de Moment Convergence Cm de profil NACA 0015 à vitesse 16 rad/s.

"Flow Time"	paroi_1	paroi_2	paroi_3	wall-15	wall-16
0.0010908	-122.85568	-70.520364	207.41856	0	0
0.0021816001	10.186559	5.2970052	1.8003521	0	0
0.0032724002	9.9909282	4.9477212	4.8738435	0	0
0.0043632002	8.0715573	4.5658948	5.7388417	0	0
0.0054540001	7.4346441	4.7863028	5.6099598	0	0
0.0065448005	6.638512	5.0272781	5.4063116	0	0
0.0076356004	5.7505875	5.231715	5.1602552	0	0
0.0087264003	4.8130996	5.4032841	4.9945806	0	0
0.0098172007	3.8924092	5.5517309	4.8604833	0	0
0.010908	3.1952009	5.6890131	4.6807296	0	0
0.011998801	2.6046024	5.8172219	4.5131309	0	0
0.013089601	2.162506	5.934294	4.3259887	0	0
0.0141804	1.8042514	6.0458775	4.169782	0	0
0.015271201	1.5276392	6.1431186	4.0362737	0	0
0.016362	1.3446836	6.2398456	3.8740302	0	0
0.017452801	1.2152772	6.3207637	3.7458399	0	0
0.018543601	1.1713845	6.3973187	3.5923167	0	0
0.019634401	1.0115255	6.4584282	3.5552808	0	0
0.0207252	1.0314589	6.5165913	3.406687	0	0
0.021816	1.0647817	6.5527352	3.2815013	0	0
0.022906801	1.0532702	6.5989892	3.2187697	0	0

0.023997601	0.9192812	6.6379943	3.2280111	0	0
0.033814803	0.553509	6.9045874	3.3277016	0	0
0.034905601	0.57055789	6.9308648	3.3348302	0	0
0.0359964	0.55616867	6.9587599	3.3617112	0	0
0.037087202	0.55161638	6.9884842	3.3970723	0	0
0.038178001	0.54554088	7.0138277	3.4104405	0	0
0.039268803	0.55757227	7.0407173	3.4543691	0	0
0.040359601	0.56403815	7.0657293	3.4792817	0	0
0.0414504	0.57165395	7.0927359	3.5239412	0	0
0.042541202	0.59287845	7.1187462	3.5587019	0	0
0.043632001	0.5993253	7.1431006	3.5701056	0	0
0.044722803	0.60156327	7.1551791	3.5652598	0	0
0.045813601	0.64776336	7.1748347	3.5582339	0	0
0.0469044	0.63601636	7.1848663	3.5618057	0	0
0.047995202	0.64213335	7.2009713	3.5794771	0	0
0.049086001	0.65773381	7.2145555	3.6078114	0	0
0.050176803	0.67959251	7.2276997	3.6237084	0	0
0.051267602	0.68393311	7.2403461	3.6545152	0	0
0.052358404	0.67013574	7.2530832	3.6827358	0	0
0.053449202	0.68461967	7.2658922	3.7106875	0	0
0.054540001	0.69775352	7.2782645	3.7275487	0	0
0.055630803	0.71641615	7.2905412	3.7536923	0	0
0.056721602	0.72613015	7.3029624	3.7856472	0	0
0.057812404	0.73649284	7.3155153	3.8130463	0	0
0.058903202	0.73499385	7.3287858	3.8415901	0	0

0.059994001	0.75007954	7.3416841	3.8498913	0	0
0.061084803	0.76098082	7.3538356	3.8698417	0	0
0.062175602	0.76260524	7.3660643	3.9158724	0	0
0.063266404	0.77140219	7.3786462	3.9383821	0	0
0.064357199	0.78653247	7.3904111	3.9684855	0	0
0.065448001	0.79873957	7.4030326	3.9871112	0	0
0.066538803	0.80812806	7.4152433	4.0138027	0	0
0.067629606	0.80787944	7.4271296	4.0472169	0	0
0.0687204	0.81781948	7.4403702	4.0669469	0	0
0.069811203	0.8295869	7.4520833	4.0981325	0	0
0.070902005	0.833862	7.4639537	4.1305027	0	0
0.0719928	0.84501665	7.4757956	4.149924	0	0
0.073083602	0.85455546	7.4875274	4.1797831	0	0
0.074174404	0.86050832	7.4993324	4.2185797	0	0
0.075265206	0.86587671	7.5110211	4.250691	0	0
0.076356001	0.86511978	7.5229977	4.2776947	0	0
0.077446803	0.87510017	7.5344883	4.3067319	0	0
0.078537606	0.88541508	7.5459219	4.336892	0	0
0.079628401	0.88625055	7.5578528	4.3618709	0	0
0.080719203	0.89994963	7.5698504	4.3849064	0	0
0.081810005	0.90935252	7.5805782	4.4233967	0	0
0.0829008	0.91446246	7.5918186	4.4558 0	0	
0.083991602	0.9160117	7.6036267	4.4893266	0	0
0.085082404	0.92196666	7.6147061	4.5202162	0	0
0.086173207	0.92423046	7.6259186	4.5478725	0	0