

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE DE TISSEMSILT
INSTITUT DES SCIENCES & TECHNOLOGIES

Visa du chef de
département des
Sciences et de la
Technologie
Signature:.....

Date:.....

Etude d'un profil d'éolienne de type NREL – S809

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de MASTER
académique en «*Installations Energétiques*»

Encadreur: BENLEFKI
Abdelkrim, M.C.B
Signature:

Date:

Réalisé par :
LAADJ Moussa

Signature:

Date :

Membres du jury

FERNINI Brahim, M.C.B	(Président)
KOUIDER Mostefa, M.A.A	(Examineur)
BENLEFKI Abdelkrim, M.C.B	(Encadreur)

Remerciements

On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination. Les deux ans d'étude nous ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple. Ce parcours, en effet, ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour lesquelles les réponses nécessitent de longues heures de travail.

Je tiens à la fin de ce travail à remercier « **ALLAH** » le tout puissant de m'avoir donné la foi et de m'avoir permis d'en arriver là.

En premier lieu, je tiens à remercier Monsieur **Dr. Benlefki, Abdelkrim** maître de conférences au centre universitaire de Tissemsilt, qui m'a orienté et dirigé au cours de ce travail et m'a fait découvrir le monde passionnant de la recherche et avec qui j'ai eu le plaisir de mener tous nos travaux de mémoire. Son entière disponibilité et ses merveilleuses explications ont été précieuses.

Je souhaite également faire part de mes reconnaissances à tous les enseignants.

Un grand merci également à l'ensemble du personnel pédagogique, technique et administratif du département des sciences et de la technologie, principalement mes condisciples lors de la formation.

Je tiens à exprimer mes profonde gratitude à toutes celles et ceux qui m'ont apporté leur soutien, leur amitié ou leur expérience tout au long de ce travail de mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Ma chère mère et mon honorable père pour leur soutien, leur aide

Leur patience et leur amour.

Mes frères

Mes sœurs

A tous mes enseignants chacun par son nom

Toute ma famille

Tous mes amis

A tous mes collègues chacun par son nom

A chaque personne qui m'a aidée.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : La manche à air (à vent)	15
Figure 2 : Eolienne de pompage d'eau ancienne.....	17
Figure 3 : les composantes d'une éolienne horizontale	21
Figure 4 : l'emplacement du rotor aux éoliennes à axe horizontal	21
Figure 5 : Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales	23
Figure 6 : l'éolienne darrieus	25
Figure 7 : l'éolienne savonius.....	25
Figure 8 : Schéma (1) d'une éolienne hydrolienne.....	28
Figure 9 : Schéma (2) d'une éolienne hydrolienne	28
Figure 10 : Schéma d'une éolienne carénée	29
Figure 11 : Principe de la conversion d'énergie	30
Figure 12 : Exemple de système éolien de type aérogénérateur.....	31
Figure 13 : représentation des rayons de vitesse de l'écoulement laminaire.....	34
Figure 14 : comparaison entre les rayons de vitesse des écoulements	34
Figure 15 : représentation de vecteurs vitesse d'un écoulement entre deux plaques parallèles	35
Figure 16 : Décollement de la couche laminaire et transition de la couche limite	38
Figure 17 : géométrie profil aérodynamique hydrodynamique	39
Figure 18 : Caractéristiques 2D d'un profil	42
Figure 19 : Courbe de portance en fonction de l'angle d'attaque pour un profil NACA	44
Figure 20 : Influence de l'angle d'incidence sur l'apparition du décollement de la couche limite puis du décrochage	45
Figure 21 : Visualisation par dégagement d'un traceur (fumée) du sillage d'une éolienne expérimentale bi-pale.....	46
Figure 22 : Résolution des équations de Navier-Stokes. Modélisation de la turbulence.....	49
Figure 23 : Maillage autour d'un profil	55
Figure 24 : maillage non structuré	56
Figure 25 : Maillage hybride.....	57

Figure 26 : les étapes de la simulation sur logiciel gambit	58
Figure 27 : les étapes de la simulation sur logiciel FLUENT	57
Figure 28 : le maillage choisis pour la simulation	61
Figure 29: Comparaison des performances (C_d et C_l) aux tests de validation et de Xfoil prediction, 2018	62
Figure 30: la géométrie du profil amélioré par rapport à l'original	63
Figure 31: Comparaison des performances (C_d et C_l) aux mesures expérimentales et de Xfoil prediction, 2018	63
Figure 32: les variations de la finesse	64
Figure 33: Coefficient de pression pour $\alpha=0^\circ$	65
Figure 34: contours de vitesse pour $\alpha=0^\circ$	65
Figure 35: Coefficient de pression pour $\alpha=3^\circ$	66
Figure 36: contours de vitesse pour $\alpha=3^\circ$	66
Figure 37: Coefficient de pression pour $\alpha=5^\circ$	67
Figure 38: contours de vitesse pour $\alpha=5^\circ$	67
Figure 39: Coefficient de pression pour $\alpha=7^\circ$	68
Figure 40: contours de vitesse pour $\alpha=7^\circ$	68
Figure 41: Coefficient de pression pour $\alpha=10^\circ$	69
Figure 42: contours de vitesse pour $\alpha=10^\circ$	69
Figure 43: Coefficient de pression pour $\alpha=13^\circ$	70
Figure 44: contours de vitesse pour $\alpha=13^\circ$	70
Figure 45: Coefficient de pression pour $\alpha=15^\circ$	71
Figure 46: contours de vitesse pour $\alpha=15^\circ$	71
Figure 47: Coefficient de pression pour $\alpha=17^\circ$	72
Figure 48: contours de vitesse pour $\alpha=17^\circ$	72
Figure 49: Coefficient de pression pour $\alpha=20^\circ$	73
Figure 50: contours de vitesse pour $\alpha=20^\circ$	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : la puissance annuelle d'une éolienne de 500W en fonction de la vitesse du vent en m/s.	16
Tableau 2 : Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.....	20
Tableau 3 : Tableau récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe horizontal en fonction du nombre de pales	22
Tableau 4 : Tableau récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe vertical par rapport aux modèles conventionnels d'éoliennes	26
Tableau 5 : les caractéristiques des maillages choisis	62

Nomenclature

C	Longueur de la corde	[m]
C_a	Coefficient aérodynamique	
C_d	coefficient de traînée	
C_l	coefficient de portance	
C_m	Coefficient de moment	
C_p	Coefficient de pression	
D	Force de traînée	[N]
F	La finesse	
F_a	La force aérodynamique	[N]
Fr	La force de frottement	[N]
L	Force de portance	[N]
p	La pression totale	[Pa]
P_0	La pression de référence	[Pa]
Re	Le nombre de Reynolds	
S	La surface	[m ²]
V	la vitesse en amont de l'éolienne	[m/s]
ΔV	Écart de vitesse entre deux couches	[m/s]
ΔZ	Distance entre deux couches	[m]

Symboles grecques

μ	la viscosité dynamique	[kg/m.s]
ν	la viscosité cinématique	[m ² /s]
ρ	masse volumique	[Kg/m ³]
α	Angle d'incidences géométrique	[°]

Indices

CFD	Computational Fluid Dynamics
D.N.S	La simulation Numérique Directe
HAWT	horizontal axis wind turbine
L.E.S	Simulation des grandes échelles
NACA	National Advisory Commity for Aéronautics
NREL	Laboratoire national des énergies renouvelables
R.A.N.S	Equations de Navier Stokes Moyennées
TSR	tip speed ratio
VAWT	vertical axis wind turbine

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	I
DEDICACES.....	II
LISTE DES FIGURES.....	III
LISTE DES TABLEAUX.....	V
NOMENCLATURE.....	VI
SOMMAIRE.....	VII
INTRODUCTION GENERALE.....	XI

CHAPITRE 1 : Recherche bibliographique

Introduction.....	13
1 La technologie des éoliennes.....	13
1.1 Origine du vent.....	13
1.1.1 La vitesse du vent en région.....	14
1.1.2 Vitesse du vent sur le site d'implantation.....	15
1.1.3 La puissance réelle des éoliennes selon le vent.....	15
1.2 Historique des éoliennes.....	16
1.3 L'énergie éolienne.....	18
1.3.1 Définition.....	18
1.3.2 Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne.....	18
1.3.3 Les typologies d'installations.....	18
1.4 Les éoliennes.....	19
1.4.1 Définition.....	19
1.4.2 Classification.....	19
1.4.2.1 Classification selon la taille.....	19
1.4.2.2 Classification selon le principe de fonctionnement.....	21
1.4.2.2.1 Eoliennes à axe horizontal.....	21
1.4.2.2.1.1 Distinction selon l'emplacement du rotor.....	21
1.4.2.2.1.2 Distinction selon le nombre de pales.....	22
1.4.2.2.1.3 Distinction selon la protection contre les vents importants.....	23
1.4.2.2.2 Eoliennes à axe vertical.....	24
1.4.2.2.2.1 Les éoliennes darrius.....	25
1.4.2.2.2.2 Les éoliennes savonius.....	25
1.4.3 Autres types des éoliennes.....	27
1.4.3.1 Les hydroliennes.....	27
1.4.3.2 Les éoliennes carénées.....	29
1.4 Composition d'une éolienne.....	29
1.4.1 Principe.....	29

1.4.2 Constitution et Fonctionnement d'une éolienne.....	30
1.5 La pale éolienne	31
Conclusion	31

CHAPITRE 2 : Notions d'aérodynamiques

Introduction.....	33
2.1 Notions générales de l'aérodynamique	33
2.1.1 Définition de l'écoulement	33
2.1.2 Types d'écoulement.....	33
2.1.3 Écoulement des fluides autour des objets.....	33
2.1.3.1 Écoulement laminaire	33
2.1.3.2 Écoulement turbulent	34
2.1.4 Fluides compressibles et incompressibles	35
2.1.4.1 Définition	35
2.1.4.2 Fluide compressible	35
2.1.4.3 Fluide incompressibles	35
2.1.5 La viscosité d'un fluide	35
2.1.5.1 Viscosité dynamique	36
2.1.5.2 Viscosité cinématique	36
2.1.6 Nombre de Reynolds	37
2.1.7 Couche limite.....	37
2.2 Aérodynamique	38
2.2.1 Définition.....	38
2.2.2 Différentes approches en aérodynamiques	39
2.2.3 Profil aérodynamique	39
2.2.3.1 Définition	39
2.2.3.2 Caractéristiques géométriques d'un profil.....	39
2.2.4 Désignation d'un profil.....	41
2.2.5 Les forces agissant sur un profil	41
2.2.5.1 La force de portance (F_z ou L)	42
2.2.5.2 La force de trainée (F_x ou D)	43
2.2.5.3 Coefficient de moment.....	43
2.2.5.4 Coefficient de pression	43
2.2.6 Décrochage	43
2.2.7 Sillage d'un profil.....	45
2.2.8 Finesse d'un profil	46
Conclusion	46

CHAPITRE 3 : Modélisation mathématique

Introduction.....	48
3.1 Définition	48
3.2 Modèle mathématique :	48
3.3 Méthodes de simulation des écoulements :	49
3.4 Les équations de NAVIER STOKES moyennées (RANS) pour un fluide incompressible	50
3.5 Modélisation de la turbulence	50
3.6 Présentation de la méthode des volumes finis.....	54
3.7 Maillage.....	54
3.7.1 Techniques générales de génération du maillage	55
3.7.2 Type de maillage	55
3.7.2.1 Maillage structuré (quadra/hexa)	55
3.7.2.2 Maillage non structuré (tri/tétra)	56
3.7.2.3 Maillage hybride	56
3.8 Les conditions aux limites.....	57
3.9 La présentation des logiciels de calcul	57
3.9.1 Le mailleur « gambit » :	57
3.9.2 Solveur Fluent	58
Conclusion	59

CHAPITRE 4 : Résultats et discussion

Introduction.....	61
4.1 Etude de maillage	61
4.2 Validation	62
4.3 Le profil amélioré.....	63
4.4 Discussion des résultats.....	64
4.4.1 Les coefficients aérodynamiques	64
4.4.2 La finesse.....	64
4.5 Les champs de vitesse et coefficient de pression	65
Conclusion	73
CONCLUSION GENERALE	76
Référence bibliographique	76
Résumé.....	78
Abstract.....	78
الملخص.....	78

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie contenue dans le vent fut l'une des premières à être exploitée par l'homme. Elle nous propulsa ainsi à la découverte des océans et permit le développement de l'agriculture moderne avant d'être occultée par l'invention de la machine à vapeur. Les crises pétrolières successives et les problématiques environnementales actuelles relancent l'intérêt général dans la production d'énergie renouvelable telle que l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable idéale. Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre, elle ne nécessite aucun carburant, elle ne crée pas de gaz à effet de serre. Chaque MW d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne de CO₂ rejeté chaque année par la production d'électricité d'origine thermique. Une éolienne est constituée principalement de métal et de matière plastique, elle ne produit pas de déchets toxiques ni radioactifs. Donc la pollution est quasi nulle.

L'exploitation de cette énergie dans l'Algérie est insuffisante si on se compare avec les pays voisins sachant que notre pays est exposé au vent, d'une vitesse considérable presque toute l'année.

Notre contribution à travers la présente étude, est pour développer un modèle de profil éolien en proposant une nouvelle géométrie du profil NREL - S809

Ce mémoire de fin d'étude est constitué d'une introduction générale, quatre chapitres et d'une conclusion générale:

- Introduction générale.
- Premier chapitre présente une recherche bibliographique.
- Deuxième chapitre contient des notions générales de l'aérodynamique.
- Troisième chapitre comprend la partie de simulation numérique par Fluent 6.3.26 .
- Quatrième chapitre représente notre étude et les résultats obtenus.
- Enfin, La conclusion générale de ce mémoire reprend les principaux résultats de nos travaux de recherche.

Chapitre 1

Recherche bibliographique

Introduction

Le principe de fonctionnement des éoliennes consiste à extraire de l'énergie cinétique du vent pour la transformer en énergie mécanique de rotation et entraîner une génératrice ou une pompe. Le couple moteur est produit par les forces aérodynamiques générées sur les pales sous l'action de la vitesse du vent. Donc les pales d'éoliennes doivent être bien conçues de point de vue forme aérodynamique, dimension, type de profil et état de surface.

Ce dernier point a fait l'objet de plusieurs études et travaux du fait que les pales sont dans un environnement qui peut contenir des impuretés, telles que le sable, la neige, les insectes etc. ...

Avec le temps, la surface des pales perd son état lisse et devient rugueuse. Ce nouvel état de surface se traduit par une modification de la structure de l'écoulement autour des pales, des charges appliquées sur les pales et de leurs performances aérodynamiques; d'où l'importance d'étudier les effets de la rugosité. [1]

1 La technologie des éoliennes

1.1 Origine du vent

Le vent est en fait la résultante de plusieurs phénomènes qui engendrent différents types de forces, à l'origine de mouvements d'air. Il y a même trois forces différentes, qui sont :

- les forces de pression
- la force de Coriolis.
- les forces de frottement.

Dans un premier temps, il faut savoir que le vent est indissociable du soleil. En effet, c'est grâce au soleil que les principaux mouvements d'air peuvent avoir lieu.

Prenons pour commencer une atmosphère, celle de la Terre par exemple. Cette atmosphère est constituée de gaz, qui au passage sont principalement de l'azote et de l'oxygène. Jusque là tout va bien. Ces gaz qui constituent notre air vont être chauffés par les rayons du soleil, mais de façon non uniforme, principalement à cause de la forme sphérique de la terre. Car l'inclinaison des rayons du soleil par rapport au sol terrestre aura tendance à plus chauffer l'air qui se trouve au niveau de l'équateur qu'au niveau des pôles. Mais cette non-uniformité est aussi due à la présence d'océans ou de continents, ainsi qu'à l'épaisseur des nuages. Donc une fois l'air chauffé, celui-ci va chercher à occuper un plus grand volume, il va se dilater et être à l'origine d'une force de pression qui va s'exercer sur une partie de l'atmosphère sous forme de mouvements de convection de l'équateur vers les pôles (les volumes de gaz pris en compte étant quand même importants). C'est ce phénomène qui va être à l'origine de notre première force nécessaire à la « fabrication » du vent : la force de pression.[1]

Puis intervient la force de Coriolis qui est directement issue de la rotation de la Terre. En effet, on peut assimiler cette force à celle qui vous projette contre votre voisin quand vous prenez un virage assez sec en voiture. La différence entre la force centrifuge (celle qui intervient dans notre dernier exemple) et la force de Coriolis (celle qui nous intéresse dans le mouvement des vents) est que la première varie en fonction de la position du corps par rapport au centre de rotation et que la seconde dépend de la vitesse même du corps en mouvement. Cette force de Coriolis engendre dans l'hémisphère Nord une force qui a tendance à dévier le vent vers la droite, tandis que dans l'hémisphère sud, le vent sera plutôt dévié vers la gauche. Et c'est par la même occasion cette force qui est responsable du mouvement circulaire des cyclones.

Enfin, voici notre troisième force, qui correspond aux frottements. Il s'agit des frictions entre le sol et les masses d'air déplacées, ou encore entre les différentes masses d'air elle mêmes qui auront modifié leurs trajectoires aux abords des reliefs rencontrés. En effet, on comprendra facilement qu'il se forme des turbulences, quand par exemple, se dresse devant ces masses d'air une chaîne de montagnes.

Donc pour résumer rapidement : trois forces interviennent dans la formation du vent la première force de pression est responsable des grands déplacements d'air, la seconde, force de Coriolis donne les grandes directions du vent et la troisième, la force de frottement est plutôt responsable des caractéristiques locales du vent.[1]

La force du vent est mesurée en km/ h ou en noeud. Les noeuds étant en fait des miles par heure. Cette force correspond à la vitesse du vent à une hauteur standard de 10 mètres au-dessus d'un terrain plat et découvert. Une échelle de valeurs a été mise en place vers 1805 par un contre-amiral anglais Francis Beaufort. Graduée de 0 à 17, l'échelle anémométrique de Beaufort décrit le vent du premier souffle à l'ouragan. [2]

1.1.1 La vitesse du vent en région

La vitesse du vent est l'élément le plus important à prendre en compte dans le choix d'une éolienne domestique. En fonction de la vitesse moyenne du vent qui peut varier énormément selon la région et les micro-climats au sein d'une même région, le rendement d'une éolienne pourra être divisé par trois ou encore multiplié par deux. [3]

Pour obtenir la vitesse du vent correspond à votre région, il faut voir la carte du vent publié par les météos ou des sociétés qui sont intéressent de ce domaine. Pour la l'Algerie, vous pourrez trouver une carte sur cette page (<https://fr.windfinder.com/weather-maps/forecast/algeria>) et qui donne la vitesse du vent selon les zones. Cella donne certaines indications tell que la pression d'air et la direction du vent selon les régions.

1.1.2 Vitesse du vent sur le site d'implantation

Pour exploiter une éolienne domestique il faut faire l'étude préalable de la vitesse du vent sur le site d'implantation, ensuite on peut choisir une éolienne correspondante. L'étude est réalisée pour savoir si l'implantation de l'éolienne sera rentable et laquelle conviendra le mieux au terrain.



Fig.1 - La manche à air (à vent) [3]

La vitesse moyenne du vent cache souvent de grandes disparités. Des sites ayant la même vitesse de vent moyenne peuvent avoir des performances très différentes. Si la vitesse moyenne du vent est élevée car dans l'année il y a quelques jours seulement ou le vent souffle très fort et le reste du temps très peu, l'installation d'une éolienne n'est pas du tout rentable. [3]

Prenons un exemple :

Le vent souffle en moyenne 5m/s sur douze mois (soit 18km/h). En réalité cela pourrait être :

- 9 mois à 2m/s (7,2 km/h)
- 2 mois à 17,5 m/s (63 km/h)
- 1 mois à 7m/s (25,2 km/h)

Mais aussi :

- 6 mois à 1m/s (3,6 km/h)
- 6 mois à 9m/s (32,4 km/h)

En général, les éoliennes pour particuliers sont conçues pour démarrer à des vitesses minimales de 2,5 à 3 m/s (9 km/h). Dans notre exemple, une éolienne implantée sur un tel site ne fonctionnerait que de 3 à 6 mois par an.

1.1.3 La puissance réelle des éoliennes selon le vent

On prend souvent comme référence 5m/s pour estimer la production d'électricité en kW/h d'une éolienne. Ces données sont généralement indiquées dans les caractéristiques techniques de la machine. Méfiez-vous des données indiquant la puissance de l'éolienne à plus de 10m/s car en réalité il s'agit d'une moyenne très élevée et souvent trompeuse. Les éoliennes nécessitent également une vitesse de démarrage : assurez-vous donc bien que cette vitesse soit largement

inférieure à la moyenne du vent calculée dans le site d'implantation de votre éolienne auquel cas vous risqueriez de ne pas voir tourner souvent votre machine

Une autre information très importante : à 4,5 m/s, une éolienne produit en moyenne deux fois plus d'électricité qu'à 3,5 m/s, ce qui n'est pas du tout proportionnel à la vitesse du vent.

Tab.1 la puissance annuelle d'une éolienne de 500W en fonction de la vitesse du vent en m/s [3],

Source : nueva-energia.es

Vitesse du vent en m/s	Puissance (W)
2.5	131
3	228
3.5	368
4	543
4.5	780
5	1069
5.5	1419
6	1848
6.5	2348
7	2935
7.5	3609

On remarquera que si l'on habite dans une zone où le vent souffle en moyenne 5.5 m/s, une éolienne de 500 W suffit à couvrir plus de 40% des besoins en électricité d'une maison (sur la base de 3000 kWh par an). En revanche, si le vent souffle en moyenne 4m/s, cette éolienne de 500W ne produira que 543 kWh par an soit à peine 20% de la consommation électrique annuelle.[3]

1.2 Historique des éoliennes

- **Les moulins à vent**

Vers 1700 av.J.C : L'énergie du vent est utilisée en Mésopotamie pour l'irrigation des cultures.

- **Entre (600 – 700) :**

Les premiers moulins à vent apparaissent en Perse. En Chine, on construit des roues hydrauliques actionnées par le vent. [4]

Les premières utilisations du vent en tant qu'énergie par l'homme remontent aux moulins à vent.

En Egypte, les moulins à vent produisaient une énergie mécanique qui servait à moudre les grains mais aussi à pomper l'eau pour irriguer les cultures.[4]

En Europe un peu avant l'an 1000 en Grande-Bretagne et se sont généralisés ensuite au XIIème siècle dans toute l'Europe. Ils étaient construits sur le modèle des éoliennes à axe vertical.

- **Les premières éoliennes**

Les premières éoliennes ne font leur apparition véritablement qu'à la fin du XIXème siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush qui conçoit ce dispositif en premier pour alimenter sa maison en électricité, en 1888. L'éolienne fonctionne avec des pales à axe vertical et plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite.[5]

Par la suite, le dispositif éolien de Charles F. Bush est repris par le danois Poul La Cour qui dessine plusieurs éoliennes industrielles dont une qui sera vendue en 72 exemplaires au début du XXème siècle. Ces éoliennes visaient à produire de l'hydrogène en utilisant la force du vent pour la convertir en énergie chimique par un processus d'électrolyse.[5]

- **De 1900 à aujourd'hui**

Pendant tout le XXème siècle, de nombreux essais seront réalisés. En 1957, Johannes Juul crée une turbine qu'il appellera Gedser et qui sert encore aujourd'hui de modèle aux éoliennes modernes. Aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en France seront réalisées des éoliennes dont la puissance pourra aller jusqu'à 1 000 kW.



Fig.2 - Eolienne de pompage d'eau ancienne [5]

Malheureusement, le marché de l'énergie éolienne est freiné dans son développement pendant une grande partie XXème siècle en raison de la forte consommation de pétrole et de charbon. Dans les années 70, les premiers chocs pétroliers et l'augmentation brutale du prix des énergies fossiles redonnent un nouveau souffle à l'énergie éolienne. [5]

1.3 L'énergie éolienne

1.3.1 Définition

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins [6] :

- **La transformation en énergie mécanique** : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;

- **La production d'énergie électrique** : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation.[6]

1.3.2 Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est utilisée industriellement afin de produire de grandes quantités d'électricité, cela nécessite l'installation de grands parcs éoliens, qui sont raccordés au réseau électrique. Mais il est possible pour les particulier de posséder leurs propres éoliennes plus petites que les éoliennes industrielles. Deux modes d'exploitations sont fréquemment utilisés :

- Les éoliennes terrestres dites « onshore » sont installées sur la terre.
- Les éoliennes dites « offshore » sont installées en mer.

1.3.3 Les typologies d'installations

Il existe deux sortes d'installations éoliennes, en fonction de leur situation géographique et de la superficie disponible.

- **industrielles** : « les grands parcs éoliens ou fermes éoliennes »

Une ferme éolienne, ou parc éolien, est constituée de 3 à 10 machines distantes entre elles d'au moins 200 m. La production d'électricité, la plupart du temps achetée par EDF à son producteur, est acheminée par un câble jusqu'au réseau électrique. Étant donné l'envergure des éoliennes, il faut disposer d'une grande superficie pour installer un parc éolien significatif. [8]

- **domestiques** : des petites éoliennes installées chez les particuliers. [6]

1.4 Les éoliennes

1.4.1 Définition

Une éolienne est une machine qui convertit l'énergie du vent en énergie mécanique. Pour être plus clair, on considère qu'il y a du vent quand l'air se déplace et donc quand l'air possède une certaine vitesse. À cette vitesse est associée une énergie, l'énergie cinétique. Le vent exerce une force sur le rotor de l'éolienne et le met en rotation : il exerce une certaine puissance. A proprement parler, cette force est transmise à un axe qui correspond à une certaine puissance. En langage d'ingénieur, nous sommes en présence d'une machine motrice.

Cette énergie mécanique peut être utilisée directement. Par exemple, on pense à l'actionnement d'une pompe à des endroits non desservis par le réseau électrique ou à nos anciens moulins à vent. Néanmoins, ces applications mécaniques sont assez marginales. Dans la majorité des cas, l'énergie mécanique du rotor de l'éolienne est transformée en énergie électrique via une génératrice. En tout cas, comme l'énergie mécanique est de "qualité" élevée, il est regrettable de la transformer en chaleur, par exemple en utilisant l'énergie éolienne pour se chauffer. [9]

1.4.2 Classification

On peut classer les éoliennes suivant leur taille ou suivant leur principe de fonctionnement :

1.4.2.1 Classification selon la taille

On définit différentes classes de taille d'éoliennes. En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor. Néanmoins, dans le cas des grandes éoliennes, une règle de bonne pratique veut que la hauteur du mât, h , soit égale au diamètre du rotor, d . Dans ce cas, il y a un lien indirect entre la hauteur du mât et la puissance. Dans le tableau suivant sont repris les dénominations de taille et les ordres de grandeur de puissances associées. Attention, il s'agit bien d'ordres de grandeur de puissance. Le but est uniquement de se donner une idée. En outre, cette puissance n'a de sens que si on a défini la vitesse de vent à laquelle elle est délivrée.

Tab2 - Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé

[10]

Dénomination	Diamètre du rotor, d [m]	Aire balayée [m ²]	Puissance [kW]
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.25
Mini	1.25-3	1.2-7.1	1.5
Domestique	3-10	7-79	15
Petite commerciale	10-20	79-314	100
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	1000
Grande commerciale	50-100	1963-7854	3000

Pour être plus parlant, on trouve classiquement ces éoliennes pour les applications suivantes :

- Micro-éoliennes : en général pour couvrir des besoins très limités et sites isolés (par exemple, des sites de pêche, des bateaux, des caravanes).
- Mini-éoliennes : essentiellement pour recharger des batteries sur des sites isolés du réseau, les plus puissantes peuvent servir pour l'alimentation domestique hors du réseau (maisons isolées).
- Eoliennes domestiques : elles balayent un spectre assez large allant de rotors de 3 à 10 m de diamètre. C'est typiquement le genre d'éoliennes proposées pour les particuliers.
- Eoliennes petites commerciales : elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, les fermes, ... mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme.
- Eoliennes moyennes commerciales : elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voire des petits parcs éoliens.
- Eoliennes grands commerciales : ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes, ce sont aussi les plus efficaces.[10]

1.4.2.2 Classification selon le principe de fonctionnement

1.4.2.2.1 Eoliennes à axe horizontal

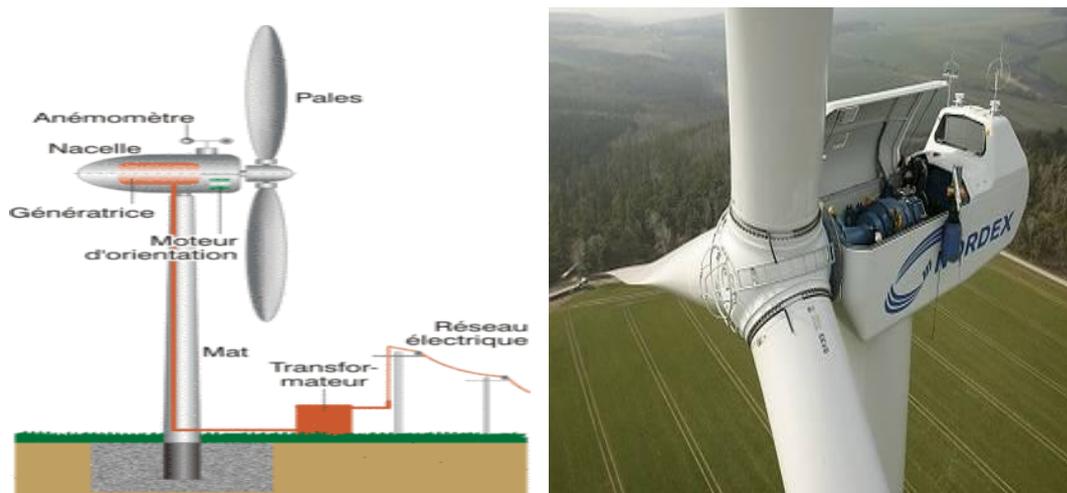


Fig.3 - les composantes d'une éolienne horizontale [10]

Les plus connues sont les éoliennes à axe **horizontal** (*HAWT*, *horizontal axis wind turbine*). Leur typologie est souvent identique. A la base, on a un mât sur lequel est placée la nacelle. Cette nacelle contient la génératrice ainsi que le système de transmission, c'est-à-dire les éléments d'accouplement mécanique entre le rotor et la génératrice. Celle-ci convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. [10]

1.4.2.2.1.1 Distinction selon l'emplacement du rotor

En suivant le sens de parcours du vent, le rotor peut être placé en amont ou en aval de la nacelle. Cette dernière configuration a été à la mode, mais devient anecdotique. Elle présentait l'avantage que la nacelle et le rotor se mettent automatiquement face au vent. Lorsque le rotor se situe en amont, il faut un dispositif particulier pour que l'éolienne se positionne correctement. Par exemple, on peut trouver une aile fixe verticale qui stabilise l'éolienne face au vent (même principe que la gouverne verticale d'un avion) ou un moteur qui réalise cette tâche. On parlera alors d'un dispositif de positionnement *passif* ou *actif*, respectivement.

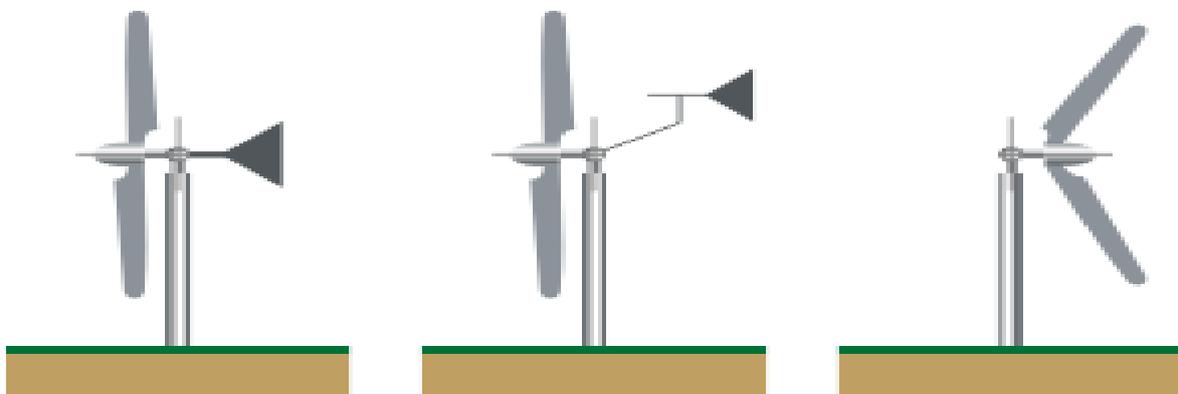


Fig.4 - l'emplacement du rotor aux éoliennes à axe horizontal [10]

Distinction entre éoliennes à axe horizontal avec le rotor placé en amont avec gouverne (Figure 4 à gauche), en amont avec contrôle actif (Figure 4 en centre) et en aval (Figure 4 à droite).

L'avantage du rotor placé en aval est qu'il se positionne naturellement face au vent, c'est-à-dire de manière passive. Par contre, le vent est d'abord perturbé par la nacelle et le pylône avant d'agir sur le rotor. D'une part, le régime de vent devient non uniforme sur la surface balayée par le rotor. Cela engendre des contraintes mécaniques variables dans le temps ce qui provoque une usure prématurée du matériel (phénomène de fatigue mécanique). D'autre part, le vent perturbé vient impacter les ailettes de l'éolienne ce qui a tendance à générer beaucoup de bruit (bruit d'origine aérodynamique). Pour ces deux raisons, on préfère la configuration avec le rotor en amont. En effet, le vent est moins perturbé avant de rencontrer les pales de l'éolienne (à moins qu'un obstacle se trouve en amont, mais ce n'est idéalement pas le cas). Finalement, on peut dire que l'éolienne à axe horizontal avec le rotor en amont est devenue le standard, en tout cas pour les applications de puissance élevée.

1.4.2.2.1.2 Distinction selon le nombre de pales

On peut faire une distinction entre les éoliennes suivant le nombre de pales.

Dans le cas des éoliennes à axe horizontal, la plupart des éoliennes ont 3 pales. En fait, il s'agit du meilleur compromis entre différentes contraintes. Une éolienne à 3 pales (ou plus) tourne plus régulièrement qu'une éolienne à 1 ou 2 pales, on a un meilleur équilibre du rotor. D'un point de vue esthétique, les effets de battement visuel sont plus importants pour les éoliennes à moins de 3 pales. Le rendement aérodynamique, c'est-à-dire la capacité à convertir l'énergie du vent en énergie mécanique (et donc, in fine, en électricité), est équivalent de 2 à 4 pales. Il augmente sensiblement à partir de 5. Le seul avantage d'avoir une éolienne à deux pales plutôt qu'à trois est qu'elle sera meilleur marché, mais elle tournera de manière moins régulière ce qui est synonyme de durée de vie plus courte. On ne monte pas au-delà de 4 pales à cause de la diminution de la tenue mécanique : en effet, la "corde" des pales diminue avec le nombre de pales.[10]

Tab.3 Tableau récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe horizontal en fonction du nombre de pales.[10]

Nombre de pâles	1	2	3	4	5
Équilibre du rotor	-	-	+	+	+
Esthétique (effet de battement visuel)	-	-	+	+	+
Rendement aérodynamique	-	=	=	=	+
Bruit et fatigue	-	-	+	+	+
Tenue mécanique	+	=	=	-	-

Pour conclure cette rubrique, on peut mettre en garde contre certaines conclusions intuitives qui peuvent induire en erreur. Dans le cas des éoliennes à axe vertical, il existe des modèles avec un grand nombre d'ailettes donnant à l'ensemble un aspect très compact. Cette forte densité n'est pas nécessairement synonyme de meilleures performances (aérodynamiques). Comme il sera montré par la suite, la puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor. Or, cette surface ne varie pas en augmentant le nombre de pales. Tout au plus, on balaye cette surface de manière plus efficace. Néanmoins, on peut aussi alourdir inutilement la structure ce qui grève les performances.[10]

1.4.2.2.1.3 Distinction selon la protection contre les vents importants

C'est un aspect fondamental. En effet, en présence de vents importants ou de rafales, il s'agit d'éviter les contraintes mécaniques trop importantes et les vitesses de rotation excessives, c'est-à-dire d'éviter la casse, d'assurer l'intégrité du matériel.

On distingue d'une part les stratégies de contrôle par l'aérodynamique. On joue sur l'orientation des ailes pour modifier leurs propriétés aérodynamiques et donc réduire la force exercée par le vent. [10]



Fig.5 - Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales

- Soit on réduit l'angle d'attaque des pales qui présentent alors un rendement plus faible. On peut aller jusqu'à mettre les pales face au vent où elles seront soumises à une force nulle.

- Soit on augmente l'angle d'attaque jusqu'au décrochage du profil ("stall control" en anglais).

Une autre manière de procéder est de placer directement un frein aérodynamique sur l'aile (mais cela est physiquement équivalent à chercher le décrochage).

Ces modifications des propriétés aérodynamiques peuvent être réalisées sur l'entièreté de l'aile ou sur seulement une fraction de celle-ci, par exemple sur le bout d'aile. [10]

À noter que l'on peut jouer sur l'orientation de l'éolienne à axe horizontal. Dans ce cas de figure, il s'agit de réduire la surface présentée au vent par le rotor de l'éolienne en la décalant par rapport à la direction du vent. Comme cette surface est réduite, la puissance du vent est directement réduite. Typiquement, on décale l'éolienne à gauche ou à droite suivant son axe vertical, soit on place l'éolienne en "hélicoptère" en tirant le rotor vers l'arrière.

D'autre part, on trouve le freinage dynamique ou électrique. Dans ce cas, c'est un frein mécanique qui limite la vitesse de rotation. Cette fonction peut être réalisée par la génératrice électrique. [10]

Le freinage aérodynamique est une stratégie dont on ne peut se passer pour les grandes éoliennes. On peut se limiter au freinage dynamique que pour les éoliennes de faible puissance.

1.4.2.2.2 Eoliennes à axe vertical

On rencontre aussi des éoliennes à axe vertical (*VAWT*, *vertical axis wind turbine*) pour les applications de petite voire de moyennes puissances. Les avantages de cette configuration sont que l'éolienne est toujours bien positionnée par rapport au vent, que le dispositif d'accouplement ainsi que la génératrice se trouvent au niveau du sol ce qui facilite la maintenance. En outre, de par les diamètres de rotor inférieurs aux éoliennes à axe horizontal, les vitesses absolues sont plus faibles ce qui, du moins théoriquement, devrait engendrer moins de bruit. [10]

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier. Une éolienne à axe vertical est surtout utile dans les endroits où il n'y a pas beaucoup de place : en ville, sur le toit d'un immeuble par exemple. [11]

Classiquement, on distingue deux grandes familles parmi les éoliennes à 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**". On invite le lecteur qui veut approfondir ces concepts à consulter des sites spécialisés. Retenons néanmoins que par le principe physique de ces modèles, elles donnent peu de couple au démarrage. Par conséquent, elles ne démarrent qu'à une certaine vitesse de vent, ou il faut assurer mécaniquement le démarrage de l'éolienne pour qu'elle fonctionne. [10]

1.4.2.2.1 Les éoliennes darrieus

Elles sont peu encombrantes, ne nécessitent pas de systèmes d'orientations et sont simples à installer. Par contre, elles ont un faible rendement et ne démarrent pas toutes seules.

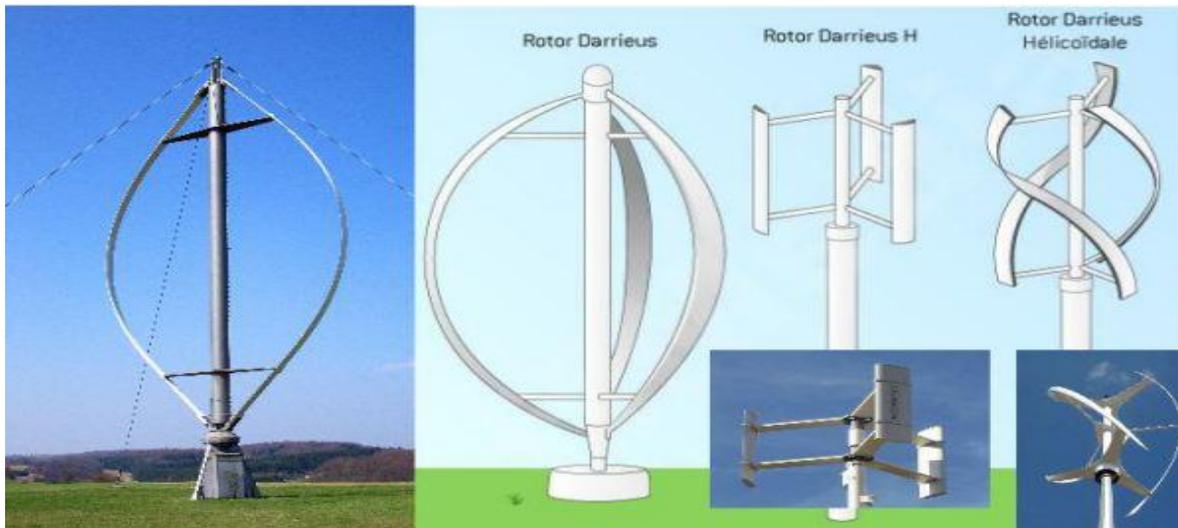


Fig.6 - l'éolienne darrieus [11]

1.4.2.2.2 Les éoliennes savonius

Cette éolienne a également un faible rendement par rapport à une éolienne classique mais elle a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions du vent. L'éolienne est compacte et le fait d'être sur un axe vertical diminue les vibrations ce qui peut être très contraignant sur un bâtiment.

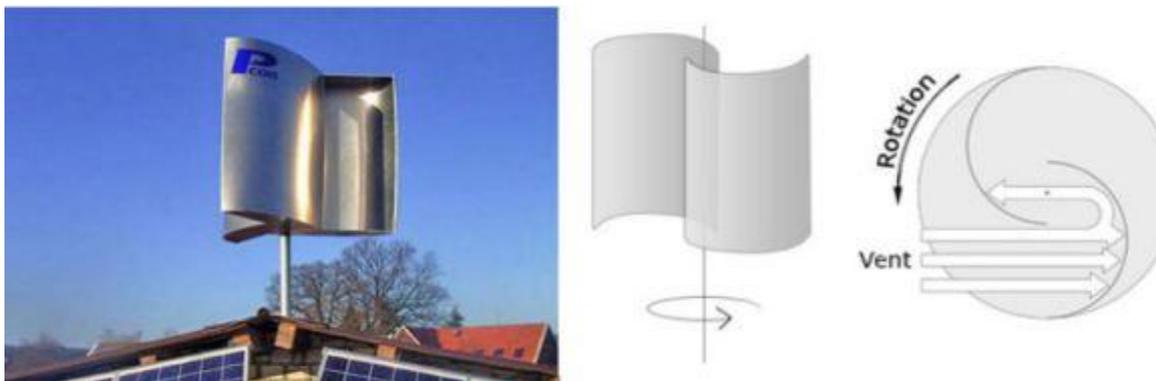


Fig.7 - l'éolienne savonius [11]

Dans l'histoire des éoliennes, on trouve de manière cyclique un regain d'intérêt pour les éoliennes à axe vertical. Les nouveaux concepts proposés sont sensés dépasser les limites technologiques du standard actuel qui est l'éolienne à axe horizontal avec rotor en amont. Pour

répondre de manière nuancée, voici quelques éléments de réflexion pour situer le débat sur ces VAWT : [10]

- En ce qui concerne les nouvelles éoliennes à axe vertical, il s'agit souvent de la redécouverte de vieux concepts.

- De manière générale, on manque de retour d'expérience sur le comportement des nouvelles éoliennes à axe vertical, notamment en ce qui concerne leurs performances aussi bien techniques que d'un point de vue économique.

- Beaucoup d'experts qui ont accumulé une longue expérience dans l'éolien sont sceptiques.

- Beaucoup d'effets d'annonce sur les performances de ces nouveaux concepts sans pour autant les valider.

Pour résumer la situation, nous reprenons le point de vue nuancé de Paul Gipe : "Avec des éoliennes à axe vertical, on peut dans certain cas réaliser les mêmes performances technico-économiques qu'avec des éoliennes à axe horizontal, mais plus que probablement pas mieux".[10]

Tab.4 Tableau récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe vertical par rapport aux modèles conventionnels d'éoliennes.[10]

Propriétés des éoliennes à axe vertical par aux modèles standards	Avantages	Inconvénients
Simplicité.	Parfois oui, on peut arriver à un concept plus simple	Parfois non, on n'aboutit pas systématiquement à plus de simplicité
Meilleure fiabilité.	-----	Peu probable, mais peu de retour d'expérience.
Positionnement.	Toujours bien placé par rapport au vent.	-----
Entretien.	Équipement au niveau du sol.	-----
Prix.	Moins cher, mais le rendement est-il égal ?	-----
Rendement mécanique (transformation énergie du vent).	-----	Peu de retour d'expérience.
Rendement économique.	-----	Peu de retour d'expérience.
Émission de bruit.	Théoriquement moins bruyantes parce que les vitesses sont plus faibles.	-----

- **Distinction selon le mode de régulation de la vitesse du rotor : vitesse constante ou variable**

Le rendement aérodynamique instantané, ou coefficient de performance, d'une éolienne dépend du rapport entre la vitesse en bout de pâles et la vitesse du vent (évaluée bien en amont de l'éolienne) :

$$\text{Lambda} = \text{TSR} = u / V$$

1.1

Avec :

- u , la vitesse en bout de pale induite par la vitesse de rotation du rotor,
- V , la vitesse en amont de l'éolienne.

Pour optimiser la conversion de la puissance du vent en puissance mécanique appliquée au rotor, il faut que le rapport Lambda ne soit ni trop faible, ni trop élevé. Si la vitesse du vent change, la vitesse de rotation de l'éolienne devrait idéalement pouvoir s'adapter pour maintenir le TSR constant et donc toujours travailler avec les meilleurs rendements. Par conséquent, on distingue les éoliennes à vitesse de rotation constante des éoliennes à vitesse de rotation variable. Ces dernières permettent de suivre le régime de vent et d'obtenir de meilleurs rendements en adaptant la vitesse de rotation de l'éolienne.

Il existe une deuxième raison qui justifie de travailler avec une éolienne à vitesse de rotation variable. De part nature, la vitesse du vent est fluctuante. Si l'éolienne a une vitesse de rotation constante alors ces fluctuations de vitesse se traduisent par des fluctuations du couple mécanique exercé sur l'arbre. Nous sommes alors en présence de contraintes mécaniques fluctuantes qui peuvent accélérer l'usure de la transmission entre le rotor et la génératrice. Travailler avec un rotor à vitesse variable permet d'absorber les fluctuations de vitesse par une accélération de la vitesse du rotor.

Une éolienne à vitesse de rotation variable suppose d'avoir systématiquement recours à de l'électronique de puissance. Fort heureusement, cette technique a évolué très positivement ces dernières années ce qui permet de conserver un bon rendement et un prix acceptable. Par conséquent, le choix d'une éolienne à vitesse de rotation variable est tout à fait abordable et cohérent. Néanmoins, il faut savoir qu'une éolienne à vitesse de rotation constante reste, théoriquement du moins, plus simple.[10]

1.4.3 Autres types des éoliennes

1.4.3.1 Les hydroliennes

Les hydroliennes sont des éoliennes spécifiques qui fonctionnent sous l'eau en utilisant l'énergie des courants marins. Ce sont des éoliennes sous-marines ou aérogénérateurs marins.

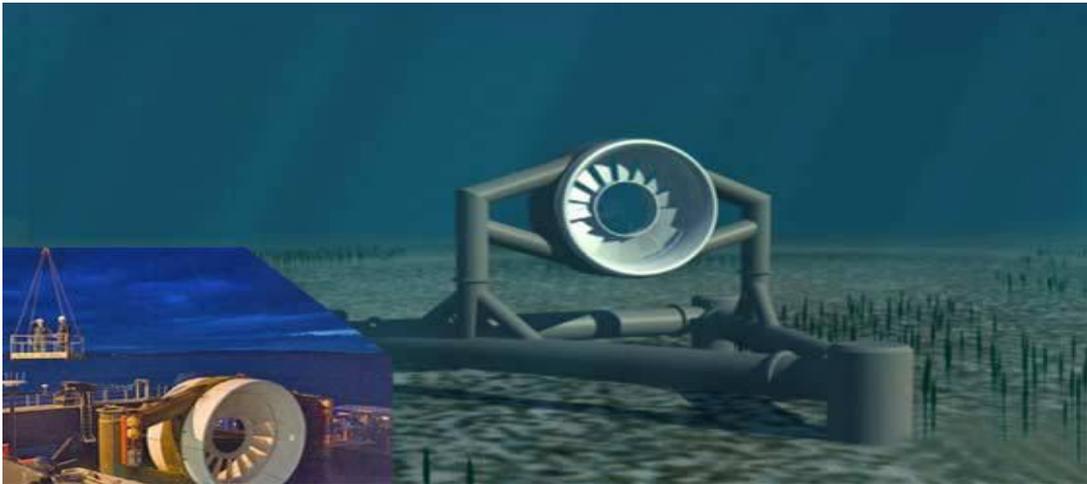


Fig.8 - Schéma (1) d'une éolienne hydrolienne [11]

Le développement des hydroliennes est très récent et déjà très prometteur. Si la fabrication des éoliennes terrestres est beaucoup moins complexe que celle des hydroliennes, ces dernières peuvent déployer une puissance beaucoup plus grande pour une taille beaucoup plus petite. Cela est dû au fait que l'énergie des courants marins est 800 fois supérieure à celle du vent. Les variations au sein des courants marins sont également beaucoup plus faibles que les variations du vent.

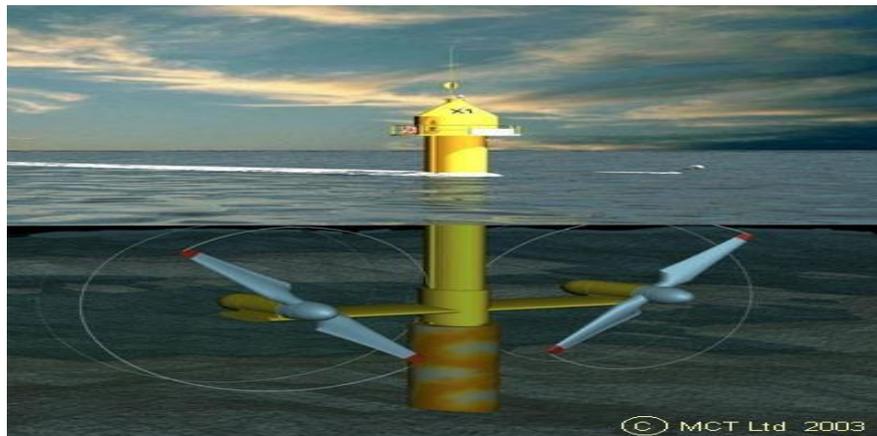


Fig.9 - Schéma (2) d'une éolienne hydrolienne [11]

L'inconvénient majeur des hydroliennes est son impact sur l'environnement marin : si les hélices tournent assez lentement et créent moins de perturbations que les hélices d'un bateau, les hydroliennes créent cependant des zones de turbulence plus grandes empêchant le développement de la faune et de la flore marine sur de grands périmètres.

Les hydroliennes étant sous l'eau, l'érosion est très forte et pour l'instant la durée de vie des hydroliennes est assez limitée. L'installation d'hydroliennes notamment au niveau des courants de marée reste une voie très intéressante pour la production d'énergie nouvelle.[11]

1.4.3.2 Les éoliennes carénées

Certaines éoliennes sont munies d'éléments externes au rotor dont l'objectif est de concentrer le vent sur le celui-ci. On pense principalement aux éoliennes carénées où un conduit convergeant ou divergeant enveloppe le rotor de l'éolienne. [10]

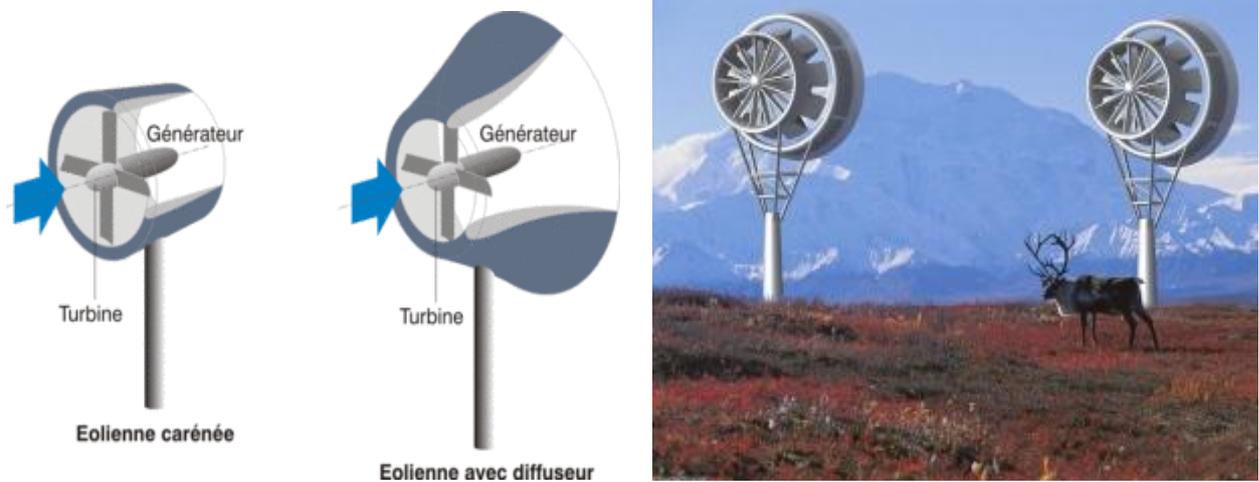


Fig.10 - Schéma d'une éolienne carénée [10]

Certains de ces modèles présentent des puissances supérieures aux éoliennes traditionnelles non carénées. Il ne faut pas y voir pour autant un effet révolutionnaire. L'explication est relativement simple. Lorsque l'on définit la puissance instantanée du vent, il faut être vigilant à la définition de la surface rencontrée par l'éolienne que l'on utilise. Dans le cas d'une éolienne classique, il s'agit de la surface balayée par le rotor. Par contre, dans le cas de modèles carénés, il faut tenir compte de ces éléments supplémentaires extérieurs. Typiquement, il faut prendre la surface frontale de l'éolienne, carénage inclus. En gros, celui-ci augmente la puissance instantanée du vent en augmentant la surface exposée au vent. Les puissances plus élevées obtenues par ces éoliennes ne sont donc pas dues à un meilleur rendement, mais à une augmentation de la puissance du vent rencontrée, c'est-à-dire la source d'énergie. [10]

1.4 Composition d'une éolienne

1.4.1 Principe

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

- **au niveau de la turbine**, qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- **au niveau de la génératrice**, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique.

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine. Ce fonctionnement général est illustré par (la figure 11)

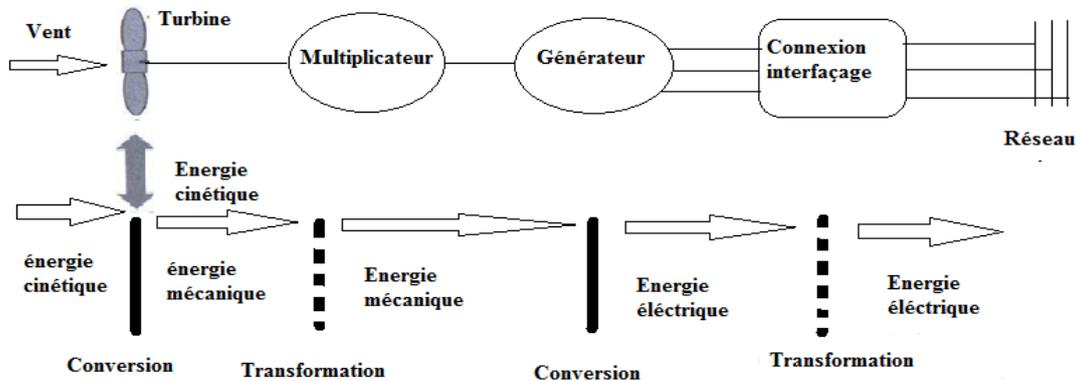


Fig.11 – Principe de la conversion d'énergie éolienne

1.4.2 Constitution et Fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments qui sont présentés sur (la figure12) Un mât, un rotor, la nacelle, les pales.

- **Le mât :** il permet de déplacer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal), le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande multiplicateur, générateur, etc.).
- **Le rotor :** composé de trois pales en général et du nez de l'éolienne, il est entraîné par l'énergie du vent et peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes à pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Il est lié à la nacelle par le moyeu.
- **La nacelle :** elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine (dans le cas des éoliennes produisant des électricités, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite par ce mât électromagnétique).
- **Les pales :** elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il ya plusieurs

points à prendre en contact pour la construction des pales qui sont l'aérodynamisme et la structure).

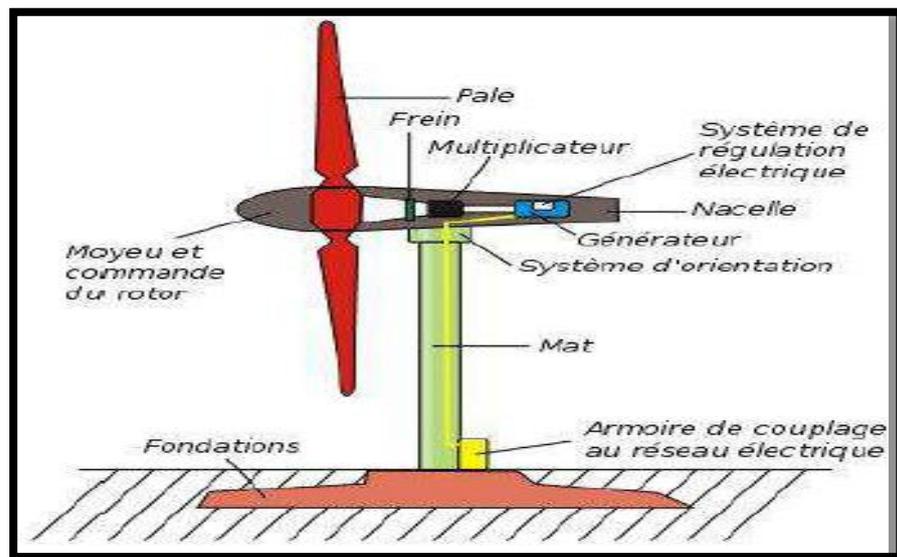


Fig.12 - Exemple de système éolien de type aérogénérateur [1]

1.5 La pale éolienne

C'est l'organe premier de la conversion d'énergie réalisée en matériau composite, les pales sont soumises à des efforts cycliques bien différents de ceux des pales d'avion. Elles sont calculées pour résister plus de vingt ans et subissent des tests de résistance impressionnants. Les pales d'un seul tenant ont atteint les dimensions maximum pour pouvoir circuler sur le réseau routier (Siemens fabrique des pales de 75 mètres de longueur d'un seul tenant). Les fabricants imaginent des pales en plusieurs parties et essaient d'autres renforts (fibre de carbone par exemple) et d'autres résines que le polyester. Les profils d'une pale sont définis pour qu'elle prenne correctement le vent aux différentes plages de vitesses avec un minimum de bruit. Le sifflement du vent en bout de pale est un phénomène que les ingénieurs cherchent constamment à réduire. Il suffit d'observer les pales de différents modèles d'éolienne pour se rendre compte de la créativité des ingénieurs pour réduire le bruit et augmenter la portance. Pour former un rotor les pales doivent être de même poids et équilibrées pour qu'elles ne transmettent pas de vibrations. [12]

Conclusion

On a présenté dans ce chapitre un état de l'art sur éoliens 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, on a citée le principe de fonctionnement des éoliennes et tous les facteurs qui entourent ce domaine tel que le vent et sa vitesse, l'énergie éolienne.

Chapitre 2

Notions d'aérodynamiques

Introduction

La connaissance de l'aérodynamique d'une pale implique non seulement la compréhension des caractéristiques des profils utilisés mais aussi l'influence de leur répartition le long de l'envergure. Il convient donc d'utiliser une bonne évolution de la corde, de l'épaisseur et du vrillage de chaque section, ce que l'on nomme la forme en plan, pour obtenir la meilleure efficacité possible sur toute la plage de vitesse. Enfin, la définition des profils et des extrémités de pale peut influencer sur le niveau acoustique du rotor.

2.1 Notions générales de l'aérodynamique

2.1.1 Définition de l'écoulement

Généralement un écoulement est défini comme le déplacement d'un fluide d'une zone haute pression à une zone basse pression, le comportement cet écoulement peut être corrigé ou modifié par l'effet d'une ou plusieurs forces extérieures sous forme de champs de forces ou de gravité, la viscosité aussi est un facteur important qui peut modifier le comportement d'un écoulement. Indépendamment de la variation de pression, un gradient de température peut lui aussi de déclencher un écoulement sous l'effet de la variation de la masse volumique.

- **Écoulement uniforme (stable)** : Dans l'écoulement du fluide stable, la vitesse de l'écoulement du fluide est constante à n'importe quel point de sa route. Un fluide est dit écoulement stable si son écoulement reste inchangé et constant durant une période de temps spécifique.

- **Écoulement non-uniforme (instable)** : Lorsque l'écoulement est instable, la vitesse du fluide peut différer entre n'importe deux points sur sa route.

2.1.2 Types d'écoulement

- **Dynamique** : notion relative aux systèmes qui entraînent le mouvement des fluides
- **Aérodynamique**: étude des phénomènes accompagnant tout mouvement relatif entre un corps et l'air qui le baigne.
- **Hydrodynamique**: étude de l'écoulement des liquides, généralement de l'eau autour des objets solides. [13]

2.1.3 Écoulement des fluides autour des objets

La façon dont les fluides s'écoulent autour d'un objet est déterminée par la forme de celui-ci.

2.1.3.1 Écoulement laminaire

Le flot d'une rivière profonde, vide de tout obstacle, sera rapide et facile. L'eau coule en ligne droite ou presque. Ce phénomène est connu sous le nom d'écoulement laminaire. Dans la dynamique des fluides, l'écoulement laminaire (ou les flux) se produit lorsqu'un fluide s'écoule dans des couches parallèles, sans interruption.

Les lignes de courant associé à flux laminaire ressemblent à un paquet de cartes. Ce profil d'écoulement d'un fluide dans un tuyau montre que le fluide agit come des couches qui glissent sur une autre.[13]

L'écoulement d'un fluide se produit lorsque chaque particule du fluide suit une trajectoire lisse, les chemins qui ne gênent ni ne touchent pas les uns les autres. Une des conséquences de

L'écoulement laminaire est que la vitesse du fluide est constante à n'importe point dans le fluide. Les fluides ayant l'écoulement laminaire ont également souvent l'écoulement constant.

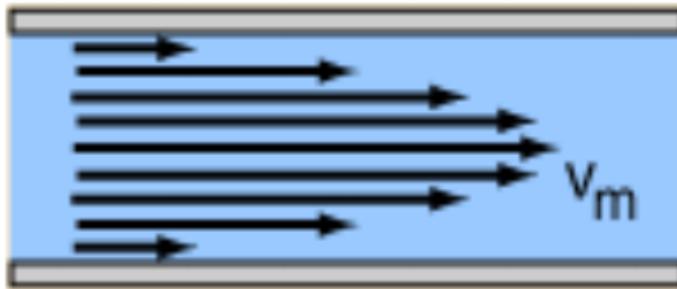


Fig.13 - représentation des rayons de vitesse de l'écoulement laminaire [13]

2.1.3.2 Écoulement turbulent

Le flot d'une rivière peu profond et hérissée de rochers serait difficile. L'eau ne coulera pas en ligne droite. Le flot sera irrégulier et agité. C'est un écoulement turbulent. L'écoulement irrégulier qui se caractérise par de minuscules régions spirales et tourbillons. La vitesse de ce fluide n'est certainement pas constante à chaque point

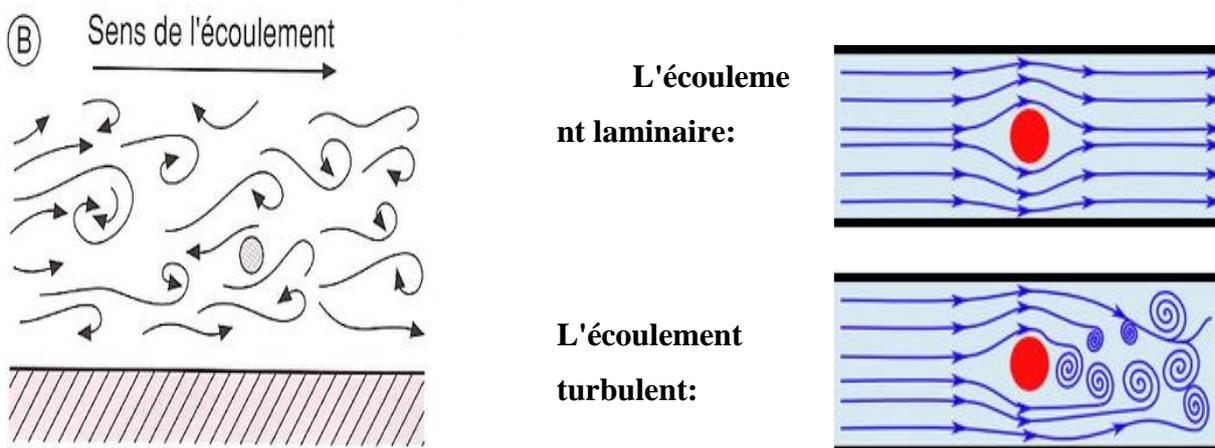


Fig.14 - comparaison entre les rayons de vitesse des écoulements [13]

2.1.4 Fluides compressibles et incompressibles

2.1.4.1 Définition

Un fluide est une substance déformable et peut changer sa forme correspondant au contenant dans lequel elle se trouve. Les fluides se divisent en nombre catégories qui incluent les gaz et les plasmas, qui sont des fluides compressibles, et les liquides, qui sont des fluides peu compressibles.

2.1.4.2 Fluide compressible

Est un fluide dont on peut changer le volume. En d'autres mots, c'est possible de le comprimer dans un espace plus restreint. Les gaz sont des fluides compressibles (air, hydrogène, azote,). [14]

2.1.4.3 Fluide incompressibles

Est un fluide dont on ne peut changer le volume. En d'autres mots, ce n'est pas possible de le garder dans un espace restreint. Les liquides sont des fluides incompressibles (le sang, jus, l'eau).

2.1.5 La viscosité d'un fluide

C'est une grandeur qui caractérise les frottements internes du fluide, autrement dit sa capacité à s'écouler. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. C'est à dire, les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement. Elle peut être mesurée par un viscosimètre à chute de bille, dans lequel on mesure le temps écoulé pour la chute d'une bille dans le fluide. Elle peut également être mesurée par un récipient dont le fond comporte un orifice de taille standardisée. La vitesse à laquelle le fluide s'écoule par cet orifice permet de déterminer la viscosité du fluide.

La viscosité est déterminée par la capacité d'entraînement que possède une couche en mouvement sur les autres couches adjacentes. Par exemple, si on considère un fluide visqueux placé entre deux plaques P_1 et P_2 , tel que la plaque P_1 est fixe et la plaque P_2 est animée d'une vitesse V_2 . [15]

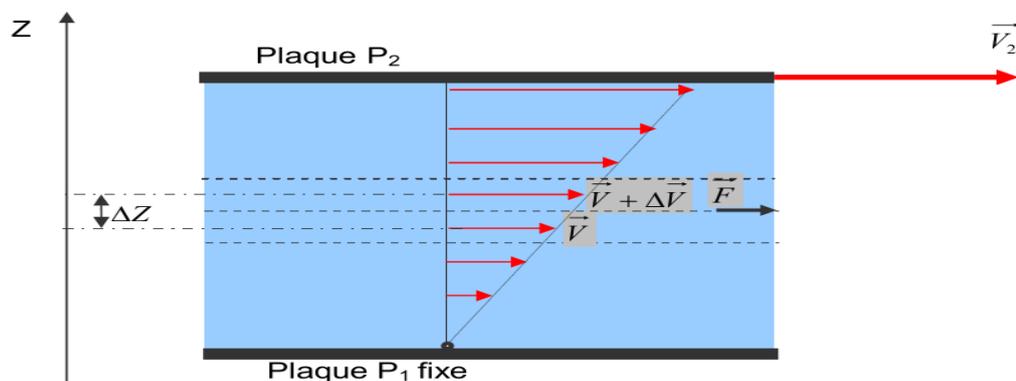


Fig.15 - représentation de vecteurs vitesse d'un écoulement entre deux plaques parallèles. [15]

Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement, la courbe lieu des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse. Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres. La vitesse de chaque couche est une fonction de la distance Z. On distingue la viscosité dynamique et la viscosité cinématique. [15]

2.1.5.1 Viscosité dynamique

La viscosité dynamique exprime la proportionnalité entre la force qu'il faut exercer sur une plaque lorsqu'elle est plongée dans un courant et la variation de vitesse des veines de fluide entre les 2 faces de la plaque. ...Elle est exprimée par un coefficient représentant la contrainte de cisaillement nécessaire pour produire un gradient de vitesse d'écoulement d'une unité dans la matière.

Considérons deux couches de fluide adjacentes distantes de Δz . La force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit Δv , à leur surface S et inversement proportionnelle à Δz :

Le facteur de proportionnalité μ est le coefficient de viscosité dynamique du fluide. [15]

$$\mathbf{F} = \mu \cdot \mathbf{S} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta z} \quad (2.1)$$

Où :

F : force de glissement entre les couches en (N)

μ : Viscosité dynamique en (kg/m.s)

S : surface de contact entre deux couches en (m^2)

ΔV : Écart de vitesse entre deux couches en (m/s)

ΔZ : Distance entre deux couches en (m).

Remarque : Dans le système international (SI), l'unité de la viscosité dynamique est le Pascal seconde (Pa.s) ou Poiseuille (Pl) : $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1 \text{ Pl} = 1 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$

2.1.5.2 Viscosité cinématique

$$\mathbf{v} = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.2)$$

L'unité de la viscosité cinématique est le (m^2/s).

Remarque 1 (Unité) :

On utilise souvent le Stokes (St) comme unité de mesure de la viscosité cinématique. $1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Remarque 2 (Influence de la température) :

Lorsque la température augmente, la viscosité d'un fluide décroît car sa densité diminue.

Remarque 3 : (différence entre viscosité dynamique et viscosité cinématique)

La viscosité cinématique caractérise le temps d'écoulement d'un liquide. Par contre, la viscosité dynamique correspond à la réalité physique du comportement d'un fluide soumis à une sollicitation (effort). En d'autre terme, cette dernière exprime la « rigidité » d'un fluide à une vitesse de déformation en cisaillement (voir la relation 2.2).

2.1.6 Nombre de Reynolds

Reynolds nous a donné une passerelle entre les différents fluides et les différentes échelles.

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension liant la viscosité, la masse volumique, et une longueur de référence. [16]

La longueur de référence peut être :

- Le diamètre intérieur de la conduite (pour les écoulements en conduites)
- Pour l'étude de la trainée des corps géométriques non profilés, cette longueur de référence est la largeur de la surface frontale (perpendiculaire à l'écoulement)
- Pour l'étude de la portance, de la trainée des corps profilés, cette longueur est prise parallèlement à l'écoulement.
- Pour l'étude de la trainée de friction des surfaces planes, cette longueur de référence est la longueur de la surface mouillée, prise parallèlement à l'écoulement. [16]

$$\mathbf{Re} = \mathbf{V.L} / \mathbf{\nu} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{Re} = ((\text{vitesse moyenne}) \times (\text{longueur de référence})) / (\text{viscosité cinématique du fluide})$$

Ou encore en utilisant la viscosité dynamique :

$$\mathbf{Re} = \mathbf{\rho.V.L} / \mathbf{\mu} \quad (2.4)$$

$\mathbf{Re} = ((\text{masse volumique}) \times (\text{vitesse moyenne}) \times (\text{longueur de référence})) / (\text{viscosité dynamique du fluide})$. [16]

Le nombre de Reynolds permet de déterminer le régime d'écoulement, Laminaire, Transitoire ou Turbulent et les équations à utiliser. [16]

2.1.7 Couche limite

Lorsqu'un fluide se déplace autour d'un obstacle, les champs de vitesse et de pression sont perturbés par ce dernier. La couche limite est la zone de fluide contiguë à la paroi, dans laquelle se produit l'accommodation entre la vitesse nulle en paroi et la pleine vitesse locale du fluide libre. De nombreuses propriétés de l'écoulement (frottement, transferts thermiques et présence éventuelle de

décollements) dépendent de cette couche limite. La notion de la couche limite est due à L.Prandtl, 1904. Il permit de livrer une interprétation à bon nombre de phénomènes que la théorie des fluides parfaits ne suffisait à expliquer. C'est la couche limite qui conditionne directement la résistance de frottement du corps. En revanche, en dehors de la couche limite on pourra considérer que le fluide a une viscosité nulle.

Il existe donc près de la paroi une région dans laquelle la vitesse passe de 0 sur la paroi à la vitesse de l'écoulement de fluide parfait à une distance de l'ordre de $(Re^{-1/2})$ de la paroi.

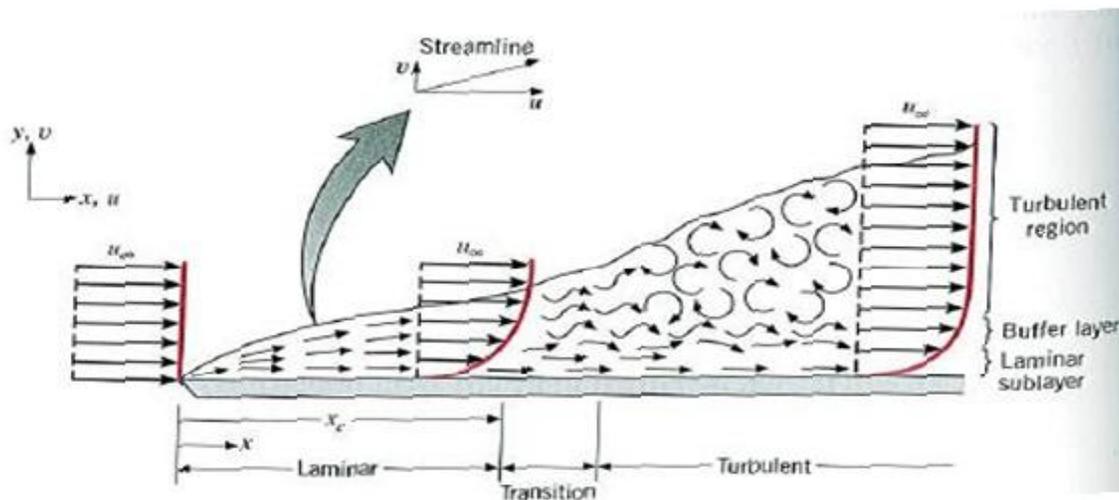


Fig.16 - Décollement de la couche laminaire et transition de la couche limite. [23]

2.2 Aérodynamique

2.2.1 Définition

Branche de la dynamique des fluides qui porte sur la compréhension et l'analyse des écoulements d'air, ainsi que sur leurs effets sur des éléments solides qu'ils environnent.

Ces effets peuvent naturellement être provoqués par un corps immobile soumis à un flux d'air animé d'une vitesse ou par un corps se déplaçant dans l'atmosphère ou encore par la combinaison des deux propositions précédentes. [18]

Le champ d'études peut se subdiviser en aérodynamique incompressible et compressible en fonction du nombre de Mach :

➤ L'aérodynamique incompressible

Concerne les écoulements pour lesquels le nombre de Mach est inférieur à 0.2 environ (250 km/h), et se placer dans cette classe d'écoulements permet de prendre certaines hypothèses simplificatrices lors de l'étude des ces écoulements.[18]

➤ L'aérodynamique compressible quant à elle se subdivise en aérodynamique subsonique à Mach compris entre 0.2 (250 km/h) et le Mach critique (environ 1200 km/h), transsonique, supersonique de Mach 1 à 5 et hypersonique au-delà de Mach 5. [18]

2.2.2 Différentes approches en aérodynamiques

- Aérodynamique théorique.
- Aérodynamique appliquée.
- Aérodynamique expérimentale.
- Aérodynamique numérique.

2.2.3 Profil aérodynamique

2.2.3.1 Définition

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.

2.2.3.2 Caractéristiques géométriques d'un profil

La forme des profils des ailes ou des pales déterminent leur performance aéro ou hydrodynamique mais aussi leur résistance. Le compromis entre performance et résistance mécanique est au cœur du problème de la définition et de l'optimisation de la géométrie de l'aile ou de la pale. Du point de vue aérodynamique ou hydrodynamique, plus le profil est fin moins il génère de résistance à l'avancement. Une légère courbure pour la portance et notre feuille s'envole sans effort.[19]

On définit un profil aérodynamique comme le contour géométrique qu'on obtient par la coupe verticale d'une aile d'avion, d'une pale d'hélicoptère et d'une pale de turbine à gaz ou de turbine à vent. La forme du profil est une caractéristique essentielle d'une aile et influe grandement sur les caractéristiques aérodynamiques et les performances d'un avion.[19]

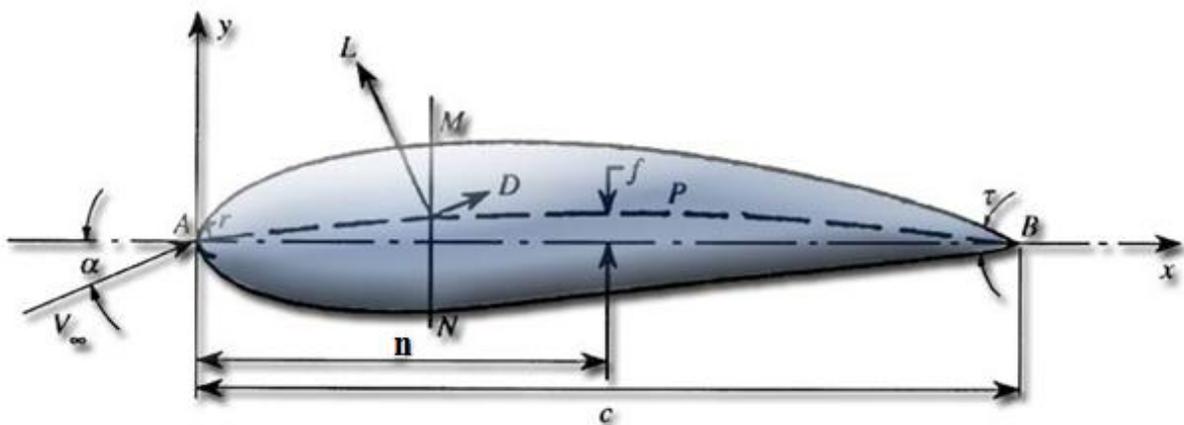


Fig.17 - géométrie profil aérodynamique hydrodynamique.[19]

Selon la figure ci dessus, on définit les grandeurs géométriques suivantes d'un profil aérodynamique

L = Force de portance perpendiculaire au déplacement du fluide exprimée en newtons (Lift en anglais)

D = Force de traînée résistante parallèle au déplacement du fluide exprimée en newtons (Drag en anglais)

α = Angle d'attaque (ou d'incidences géométrique)

A = Bord d'attaque

C = Longueur de la corde de référence

B = Bord de fuite

n = Position de la cambrure maximale du profil

AB = Corde de référence du profil

f = Cambrure maximale

AMB = Extrados

r = Rayon du bord d'attaque

ANB = Intrados

APB = Ligne de cambrure du profil par rapport à la vitesse de l'écoulement,

V_{infini} = Angle du bord de fuite

Le milieu des segments perpendiculaires à la corde de référence, tel MN , est appelé squelette du profil ou ligne de cambrure moyenne.

On note f la plus grande ordonnée de la ligne de cambrure moyenne par rapport à AB .

Le rapport f/c est dit cambrure relative. La valeur maximale du segment MN représente l'épaisseur maximale du profil, e_{max}

L'expression: $e_{\text{max}}/c = t$ correspond à l'épaisseur relative maximale. Les profils classiques ont une épaisseur relative de 6 à 20 % située environ à $c/3$.

La cambrure relative est de l'ordre de 6 à 8 % et d/e_{max} varie de 15 à 50 %. Sur la même figure apparaissent les forces aérodynamiques : L (la portance) et D (la traînée).

Différents types de profils aérodynamiques sont catalogués dans le monde. On notera, par exemple, les profils Joukowski, Eppler, Wortmann, NACA, RAE, Göttingen, NLR, NASA/LRC et SANDIA. Parmi ces derniers, les profils de type NACA sont très connus, et on en utilise certains couramment tant en pratique que pour la validation des méthodes numériques.

Heliciel fournit gratuitement les bases de données de profils avec leurs polaires d'environ 1000 profils de toutes sortes.

2.2.4 Désignation d'un profil

Le prédécesseur de la NASA était le NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Cet organisme a étudié différentes familles de profils répondant à diverses applications. Parmi ces dernières, il faut distinguer la famille de profils à quatre chiffres, celle à cinq chiffres et les profils laminaires portant la désignation NLF dans la documentation.[19]

❖ NACA à quatre chiffres

Dans cette famille, on identifie un profil par quatre chiffres, le premier spécifiant la cambrure relative maximale en pourcentage de la corde, le deuxième indiquant la position de cette cambrure en pourcentage de la corde et les deux derniers chiffres représentant l'épaisseur relative maximale, toujours en pourcentage de la corde.

Par exemple, dans le cas du profil **NACA 4417**

- le 4 représente la cambrure relative maximale (4 %) ;
- le 4 représente la position de la cambrure maximale (40 %) ;
- le 17 représente l'épaisseur relative maximale (17 %).

❖ NACA à cinq chiffres

Exemple : NACA 230-12

Le premier chiffre (2) indique la valeur de la flèche maximale en pourcent par rapport à la corde, le deuxième et le troisième chiffre (30) indiquent le double de la distance du bord d'attaque à la position de la flèche maximale en pourcent par rapport à la corde, les deux derniers chiffres (12) indiquent l'épaisseur maximale en pourcent par rapport à la corde [20]

2.2.5 Les forces agissant sur un profil

La vitesse relative caractérisée par une certaine intensité et une direction décrite par l'angle d'attaque, induit une force aérodynamique 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 traînée, on en déduit les propriétés suivantes : [21]

- 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.

- La traînée, 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 traînée et obtenir ainsi les meilleurs rendements.

La force aérodynamique définit par :

$$F_a = \frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S \times C_a \quad (2.5)$$

Avec :

C_a : Coefficient aérodynamique.

ρ : Masse volumique de l'air en (kg.m^{-3}).

V : Vitesse en (m.s^{-1}).

S : Surface référence en (m^2).

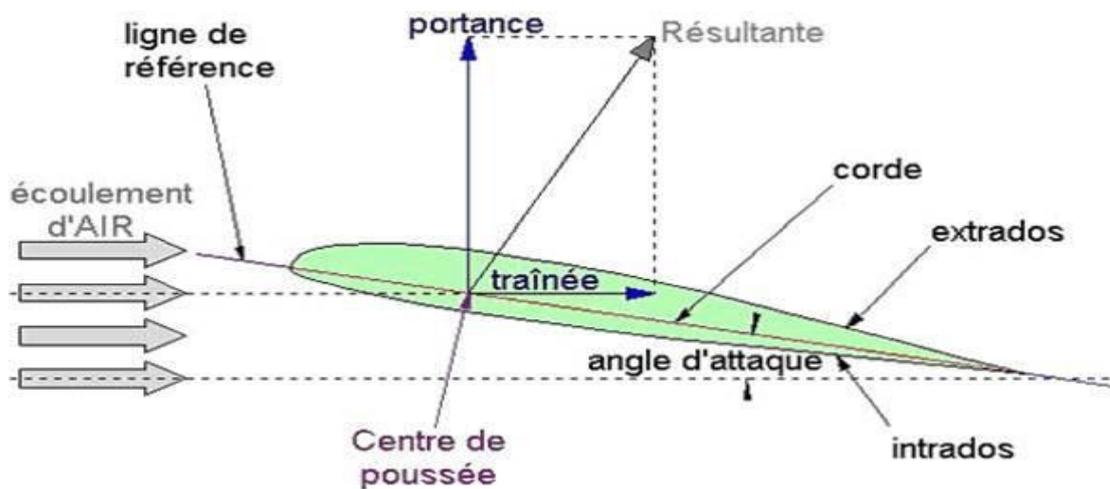


Fig.18 - Caractéristiques 2D d'un profil [22]

2.2.5.1 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.[21]

$$L = \frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S \times C_l \quad (2.6)$$

C_l : coefficient de portance

2.2.5.2 La force de trainée (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 trainée et notée D .

$$D = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_d \quad (2.7)$$

C_d : coefficient de trainée

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

- Sa géométrie, [21]
- L'angle d'attaque auquel il est utilisé.
- Le régime d'écoulement

2.2.5.3 Coefficient de moment

Afin de déterminer la position de la résultante aérodynamique sur la corde de l'aile, nous pouvons calculer (grâce au banc de soufflerie), le moment de cette force par rapport au bord d'attaque de l'aile (le bord d'attaque est la partie de l'aile qui rencontre le vent relatif en premier), puis en construire un abaque soit en fonction de l'incidence soit en fonction du coefficient de portance. Le moment de la résultante aérodynamique par rapport au bord d'attaque sera donc caractérisé par un coefficient appelé C_m .

2.2.5.4 Coefficient de pression

Le coefficient de pression est un facteur très important dans l'aérodynamique, c'est le rapport de la pression totale par rapport à la pression de référence. Le coefficient de pression est défini comme suit:

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2.8)$$

2.2.6 Décrochage

Sur base de la courbe ci-dessous qui reprend l'évolution de la portance en fonction de l'angle d'attaque, on voit que cette force augmente progressivement jusqu'à un certain angle au-delà duquel la portance chute brusquement. Ce phénomène est appelé décrochage et l'angle à partir duquel il intervient, l'angle de décrochage. On voit qu'une fois l'angle de décrochage dépassé, les performances aérodynamiques du profil sont nettement dégradées. On imagine assez facilement ce que cela peut engendrer dans le cas d'un avion : une perte de portance brusque risque simplement d'engendrer une chute de l'appareil. A priori, on pourrait croire qu'il est assez farfelu d'introduire un

tel phénomène dans le cas des éoliennes, mais comme cela sera expliqué, dans ce domaine d'application, le décrochage est parfois mis à profit pour contrôler la vitesse de rotor. [9]

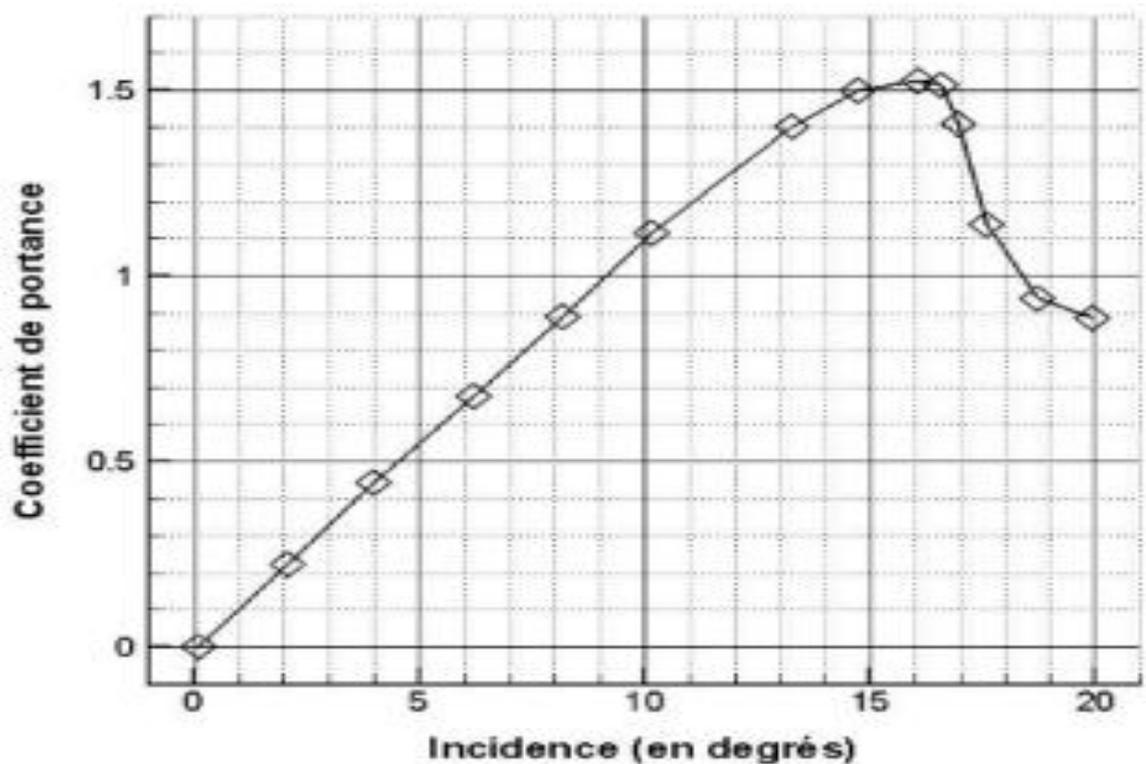


Fig.19 - Courbe de portance en fonction de l'angle d'attaque pour un profil NACA

[9]

❖ Explication du phénomène de décrochage

Le lecteur curieux aura peut-être envie d'en savoir un peu plus sur le principe du décrochage. Un élément de réponse simple est donné ci-dessous. Il n'a pas vocation d'être complet ou particulièrement rigoureux. Il cherche plutôt à démystifier le phénomène. Dans le cas d'un profil à angle d'attaque inférieur à la limite de décrochage, les trajectoires du fluide, à savoir l'air, sont infléchies par la présence du profil. Comme expliqué précédemment, on a une accélération côté extrados et une décélération côté intrados, accompagnée d'une diminution et une augmentation de pression, respectivement. Cette différence de pression sur les deux faces du profil est la base de la génération de portance.[9]

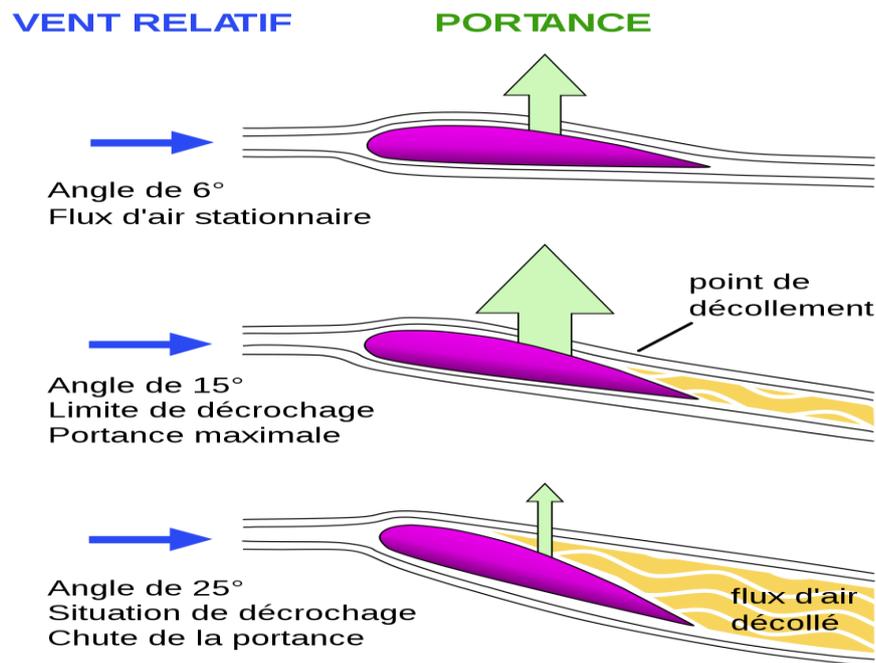


Fig.20 - Influence de l'angle d'incidence sur l'apparition du décollement de la couche limite puis du décrochage. [24]

Lorsque le profil décroche, les angles d'attaques sont trop importants et le fluide ne parvient plus prendre les trajectoires imposées par le profil (fortement incliné). Les trajectoires de fluides ont tendance à rester plus proches de leur situation initiale (avant que l'aile ne passe). Comme il y a moins de déformation de trajectoire, il y a moins d'accélération du fluide côté extrados du profil. Du coup, la dépression est moins importante et, sans surprise, la portance devient moins importante.

2.2.7 Sillage d'un profil

A l'arrière d'une éolienne, un sillage tourbillonnaire se développe. Dans ce sillage, la vitesse moyenne du vent est diminuée puisque l'éolienne a capté une partie de l'énergie cinétique du vent naturel et l'intensité de turbulence est augmentée. Le vent partant de l'hélice a une capacité énergétique plus faible que le vent arrivant dans l'hélice.[25]

Le sillage d'une éolienne a donc un double effet sur l'environnement immédiat :

- une diminution de la vitesse du vent derrière l'éolienne entraînant notamment une baisse de production des éoliennes environnantes
- une augmentation des charges de fatigue (et donc une diminution de la durée de vie) liée à l'augmentation de l'intensité de turbulence

La réduction de la turbulence du vent et l'évacuation de la chaleur hors de la zone environnante peuvent entraîner des changements de température. D'après plusieurs études réalisées

sur la base de modèles de simulation, les effets locaux des parcs d'éoliennes pourraient être non-négligeables.



Fig.21 - Visualisation par dégagement d'un traceur (fumée) du sillage d'une éolienne expérimentale bi-pale. [9]

2.2.8 Finesse d'un profil

La finesse d'un profil ou d'une aile est le rapport entre le coefficient de portance et le coefficient de trainée :

$$\mathbf{F} = \frac{C_l}{C_d} \quad (2.9)$$

La finesse est fonction de la forme du profil ou de l'aile, mais également de l'angle d'incidence. Pour une aile d'avion, elle est de l'ordre de 25 et atteint 50 pour une aile de planeur, la finesse F correspond aussi au rapport entre la distance parcourue horizontalement et la distance parcourue verticalement pour un vol plané sans vent extérieur.

Conclusion

On a présenté dans ce chapitre l'aérodynamique et les caractéristiques des profils et ses désignations, ainsi que leur géométrie.

L'aérodynamisme est défini par le coefficient de portance C_l et par le coefficient de trainée C_d pour l'air. Les deux coefficients sont mesurés expérimentalement en fonction du nombre de Reynolds, du profil et de son incidence par l'utilisation d'une soufflerie ou bien des différentes méthodes de simulation.

Chapitre 3

Modélisation mathématique

Introduction

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 profil d'éolienne de type « NREL S809 ».

Nous rappelons les équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) qui régissent les écoulements turbulents. En dernier on donne une présentation du logiciel Fluent, qui on l'a utilisé pendant la simulation numérique pour modéliser les écoulements du fluide par la méthode des volumes finis.

3.1 Définition

Le CFD « Computational Fluid Dynamics », consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont en général le résultat d'un compromis en termes de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisation disponibles, les équations résolues peuvent être les équations d'Euler, les équations de Navier-Stokes, etc.

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.

3.2 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 : [21]**

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

➤ **Equation de quantité de mouvement suivant X :**

$$U \frac{\partial(U)}{\partial x} + V \frac{\partial(V)}{\partial y} = -\frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial x} + V \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + V \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{U'_1 U'_2} \quad (3.2)$$

➤ **Equation de quantité de mouvement suivant Y : [26]**

$$U \frac{\partial(V)}{\partial x} + V \frac{\partial(V)}{\partial y} = -\frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial x} + V \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) + V \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{U_2'^2} \quad (3.3)$$

3.3 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 (22) résume les différentes méthodes utilisées pour la modélisation de la turbulence dans les équations de Navier-Stokes.

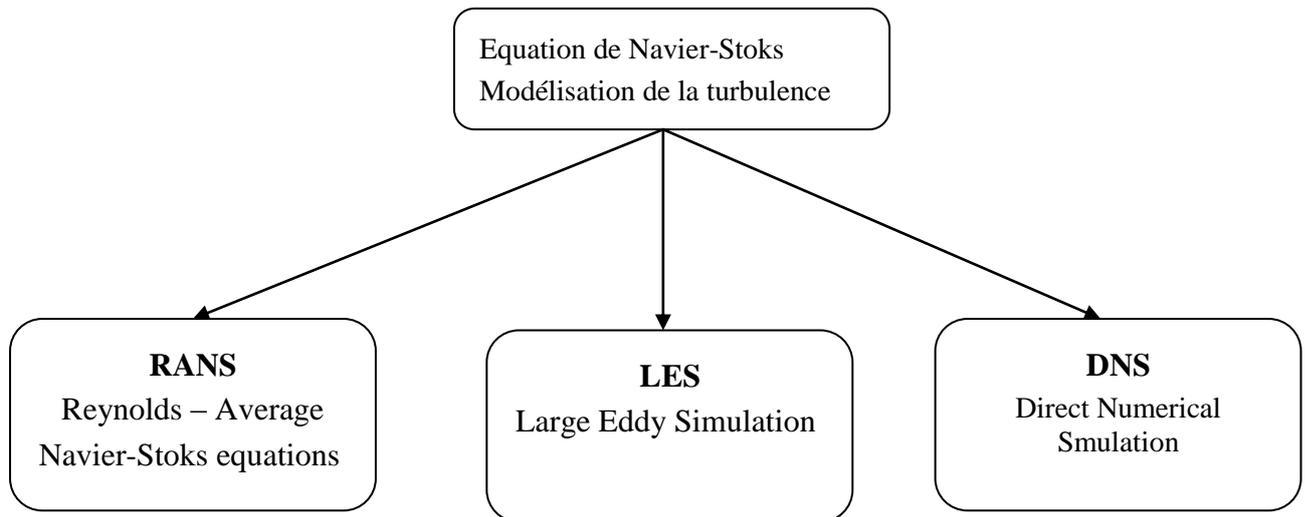


Fig.22 - Résolution des équations de Navier-Stokes. Modélisation de la turbulence.[21]

D.N.S : 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.

3.4 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

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3.4)$$

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

$$\bar{u}_i = \frac{1}{t} \int_0^t u_i dt = \frac{1}{t} \int_0^t (\bar{u}_i + u'_i) dt \quad (3.5)$$

$$\int A = \bar{u}_i n_i \rho dA = 0 \quad (3.6)$$

$$\int A \bar{u}_i \bar{u}_j n_i \rho dA = - \int A \overline{u'_i u'_j} n_i \rho dA + \int A [-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)] n_i \rho dA + \int A_f [(f_n)_i + (f_f)_i] dA \quad (3.7)$$

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 $\tau_{ij} = - \overline{u'_i u'_j}$ 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. [21]

3.5 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 modèle :

• **Le modèle k- ω standard**

Le modèle k-oméga est un modèle largement répandu basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulence et de dissipation. Il prédit des résultats cohérents notamment pour les écoulements cisailés simples. Néanmoins il a une dépendance locale et linéaire des tensions de Reynolds et du champ moyen et il est peu adapté pour les écoulements complexes (recirculation, anisotropie forte, production négatives,...). [26]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{PK}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mathbf{PK}u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial x_j} \right) + \mathbf{G}_k - \mathbf{Y}_k + \mathbf{S}_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{Pw}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mathbf{Pw}u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_w \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial x_j} \right) + \mathbf{G}_w - \mathbf{Y}_w + \mathbf{S}_w$$
(3.8)

Avec:

- **G** : terme de production.
- **Γ** : terme de diffusivité
- **Y** : terme de dissipation.
- **S** : terme source.

➤ **Le modèle k- ω SST (Shear Stress Transport model)**

Nouveau modèle, qui comporte un avantage certain en ayant les avantages de k-oméga en proche paroi et de K-epsilon loin du corps mais qui n'a pas la même notoriété que k-oméga. Il comporte également un terme supplémentaire de diffusion dans l'équation de transport de la dissipation pour que la prédiction dans les zones transitoires (à la fois près de la paroi et dans la zone 'far-field') soit bonne.[26]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{PK}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mathbf{PK}u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial x_j} \right) + \mathbf{G}_k - \mathbf{Y}_k + \mathbf{S}_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{Pw}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mathbf{Pw}u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_w \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial x_j} \right) + \mathbf{G}_w - \mathbf{Y}_w + \mathbf{D}_w + \mathbf{S}_w$$
(3.9)

❖ **Différence notable entre les deux modèles**

➤ La principale différence résulte dans le fait que le modèle SST utilise le modèle k-oméga en zone de proche paroi et le modèle k-epsilon dans les zones loin des parois à nombre de Reynolds important.

➤ Modification de la formulation du terme de viscosité turbulente pour exprimer correctement les effets de transport de la contrainte de cisaillement turbulente.[26]

❖ **Le modèle Spalart-Allmaras**

Ce modèle a pour avantage d'être assez simple et de prendre en compte l'histoire de la turbulence. Mais le choix de l'échelle de longueur est empirique et l'extension au cas tridimensionnel est difficile.[26]

▪ La principale différence résulte dans le fait que le modèle SST utilise le modèle k-oméga en zone de proche paroi et le modèle k-epsilon dans les zones loin des parois à nombre de Reynolds important.

▪ Modification de la formulation du terme de viscosité turbulente pour exprimer correctement les effets de transport de la contrainte de cisaillement turbulente.

❖ **Modèle (k-ε)**

Il s'agit d'un modèle à deux équations qui donne une description générale de la turbulence au moyen de deux équations de transport (EDP) une pour l'énergie cinétique turbulente (k) et l'autre pour la dissipation (epsilon). La dissipation turbulente est la vitesse à laquelle les fluctuations de vitesse se dissipent. Les coefficients sont dérivés empiriquement; Valable uniquement pour les débits turbulents. Dans le modèle k-ε standard, la viscosité turbulente est déterminée à partir d'une échelle de longueur de turbulence unique, de sorte que la diffusion turbulente calculée est celle qui ne se produit qu'à l'échelle spécifiée, alors qu'en réalité toutes les échelles de mouvement contribueront à la diffusion turbulente. Le modèle k-ε utilise l'hypothèse de la diffusion du gradient pour relier les contraintes de Reynolds aux gradients de vitesse moyenne et à la viscosité turbulente. Ce modèle s'avère peu performant pour les courants impliquant un gradient de pression inverse, séparation, forte courbure des conduites.

La faiblesse la plus troublante est le manque de sensibilité aux gradients de pression négatifs; Un autre inconvénient est la rigidité numérique lorsque les équations sont intégrées à travers la sous-couche visqueuse qui est traitées avec des fonctions d'amortissement qui ont des problèmes de stabilité.[27]

L'idée du modèle k-ε 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 :

$$\nu_t = C_\mu \left(\frac{k^2}{\epsilon} \right) \quad (4.1)$$

Avec :

$\mu_t = \nu_t \cdot \rho$: 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 :[21]

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'_t{}^2} = \frac{1}{2} (\overline{u'_1{}^2} + \overline{u'_2{}^2} + \overline{u'_3{}^2}) \quad (4.2)$$

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

$$\varepsilon = V \left(\frac{\partial^2 \overline{u'}}{\partial x_j} \right) \quad (4.3)$$

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 :

$$\varepsilon = K^{3/2}/L \quad (4.4)$$

➤ Equation modélisée de K [21]

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

$$\underbrace{\frac{\partial K}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial K}{\partial x_j}}_1 = \underbrace{V_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}}_2 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{V}{\sigma k, l} + \frac{v_t}{\sigma k, l} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right)}_3 - \underbrace{\varepsilon}_4 \quad (4.5)$$

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.

➤ Equation modélisée de ε

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

$$\underbrace{\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}}_1 = \underbrace{C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} V_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}}_2 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{V}{\sigma k, t} + \frac{v_t}{\sigma k, t} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right)}_3 - \underbrace{C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K}}_4 \quad (4.6)$$

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 de ε .

3.6 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.[21]

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. [21]

3.7 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.

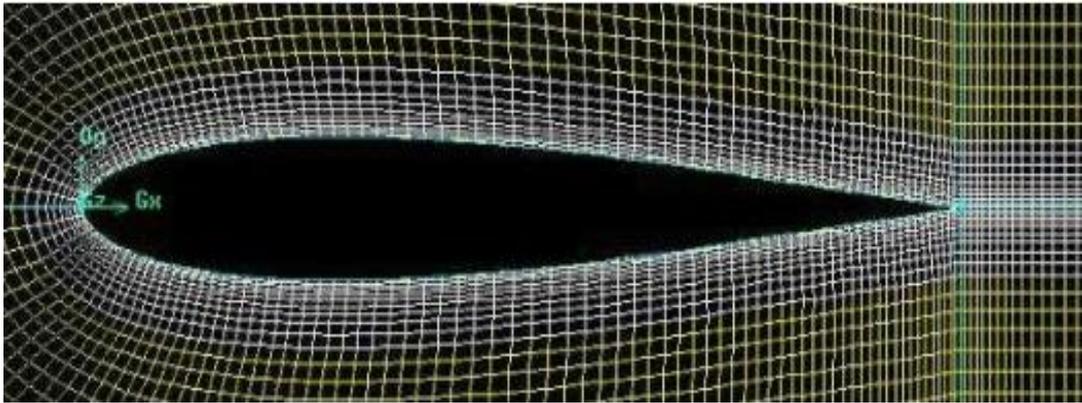


Fig.23 - Maillage autour d'un profil.

3.7.1 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.

3.7.2 Type de maillage

3.7.2.1 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.

3.7.2.2 Maillage non structuré (tri/tétra) :

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition. [28]

➤ 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.

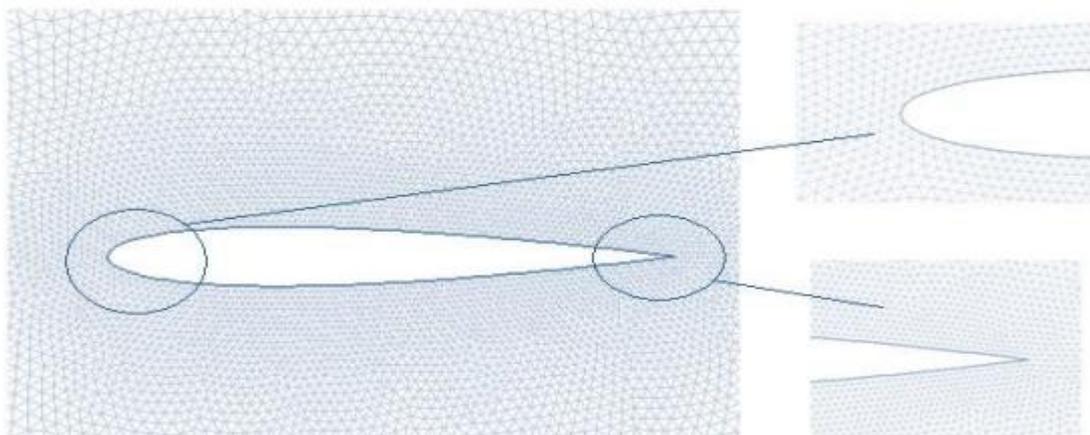


Fig.24 - maillage non structuré [21]

3.7.2.3 Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. [29]

➤ Avantages

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

➤ 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.

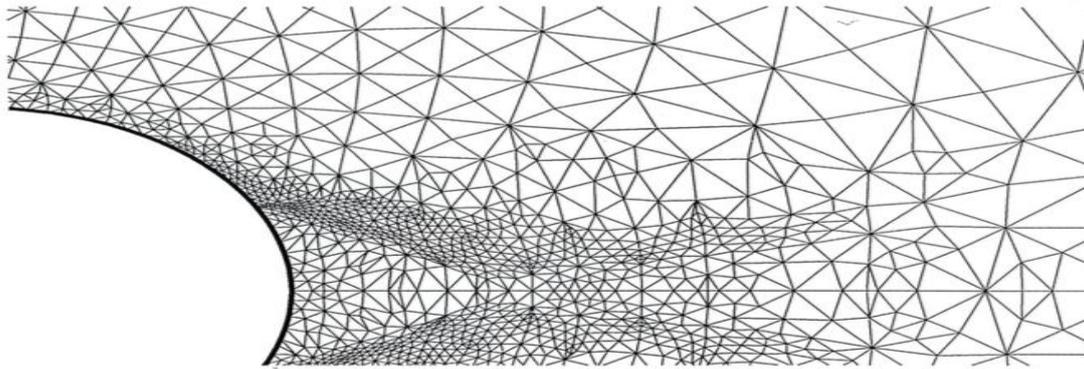


Fig.25 - Maillage hybride

3.8 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** : velocity inlet

La condition « velocity inlet » 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** : outflow

La condition « outflow » 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.

➤ **Les parois** : wall

La condition « wall » est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides. Le profil est une région solide d'où la spécification wall.

3.9 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.

3.9.1 Le mailleur « 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.

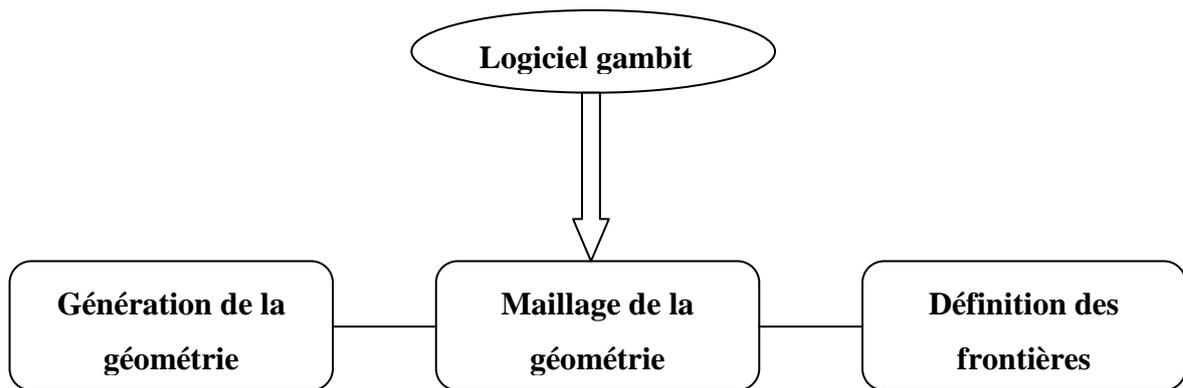


Fig.26 - les étapes de la simulation sur logiciel gambit

3.9.2 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.

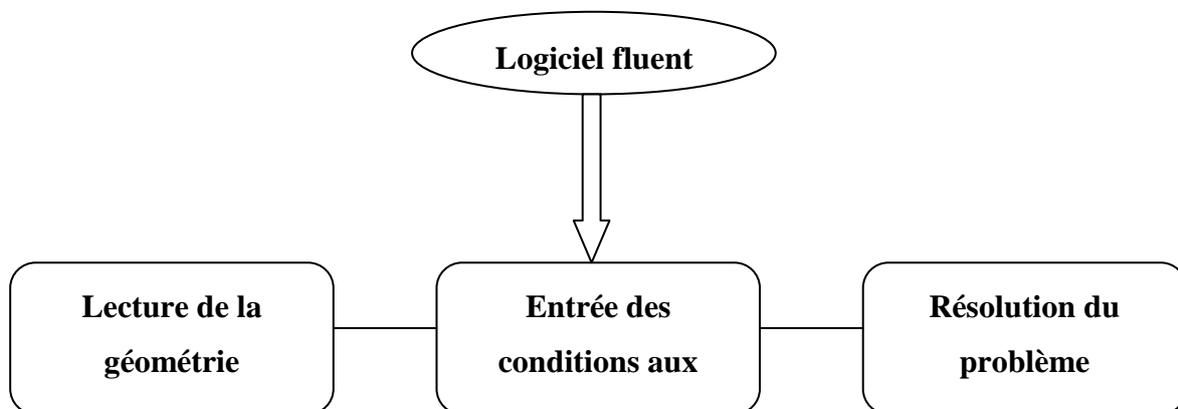


Fig.27 - les étapes de la simulation sur logiciel FLUENT

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 forces de portance et de trainée, 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.

[30]

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.

Chapitre 4

Résultats et discussion

Introduction

Le contenu de cette section sert à fournir des informations sur le maillage adopté pour le calcul, la validation des résultats numériques par la comparaison avec des mesures expérimentaux. En outre, les performances des ailes étudiées seront discutées et le détail sur les écoulements en termes des contours et des profils sera fourni.

4.1 Etude de maillage

La sensibilité du maillage est un jugement essentiel dans le processus de simulation numérique. L'étude de sensibilité du maillage fournit une confirmation qu'un maillage donné d'une part peut fournir une solution convergente qui est indépendante du rapport de maillage et d'autre part il minimise les erreurs numériques pour donner une autre convergence physique vers les grandeurs réelles du phénomène étudié. Ce processus permet l'utilisation la plus efficace du nombre de cellules grâce à la sélection d'un maillage qui fournit des résultats identiques tout en utilisant moins de cellules, et même pour gagner dans le temps de calcul pour les calculs consistants.

L'étude de sensibilité au maillage comporte deux maillages ($2 \cdot 10^5$ et $5 \cdot 10^5$ cellules) ont été testés avec des angles d'incidence de 0, 3, 5, 7, 10, 13, 15, 17 et 20° avec un nombre de Reynolds 50000 utilisant le modèle de turbulence $k-\varepsilon$.

On a observé que ce maillage ($5 \cdot 10^5$) fournissait des résultats similaires à ceux du maillage avec un nombre de cellules beaucoup plus raffinés de $5 \cdot 10^5$ Mailles. L'avantage d'utiliser le modèle $k-\varepsilon$ est que, les résultats sont plus rapides par rapport à d'autres modèles de turbulence. Ceci est tout à fait compréhensible puisqu'il n'utilise qu'une seule équation de transport pour modéliser la viscosité cinématique. Dans la simulation actuelle, la correction de courbure est activée dans Fluent afin de capturer avec précision les tourbillons autour de la courbure du profil aérodynamique.

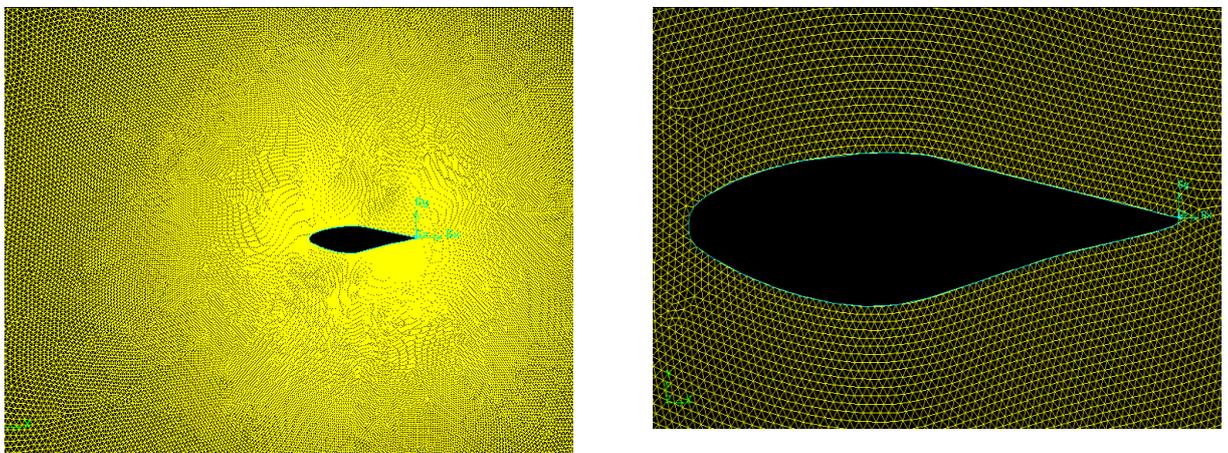


Fig.28 – le maillage choisis pour la simulation

Tab.5 les caractéristiques des maillages choisis

Nœuds sur les lignes	6.10^2
Nœuds sur les surfaces	5.10^5
Quadrangles (rectangle)	200248
Nombre d'itérations	1246(0°),...,2426(20°)

4.2 Validation

Avant qu'une analyse du comportement de flux pour les modèles RANS individuels puisse être examinée, une étude de validation du logiciel CFD était requise. Pour valider les techniques de modélisation mises en œuvre dans le logiciel, les coefficients de portance, de traînée et de pression ont été analysés conjointement avec des résultats publiés par Xfoil prediction, 2018. Pour répliquer ces résultats, toutes les simulations ont été complétées comme étant instables avec un nombre de Reynolds égal à 1000 000 à les mêmes angles d'incidence (de 0°, 3°, 5°, ... , 20°).

La Figure 29 montre une comparaison des coefficients de traînée et de portance pour un large intervalle d'angle d'incidence et un régime turbulent $Re = 1000000$.

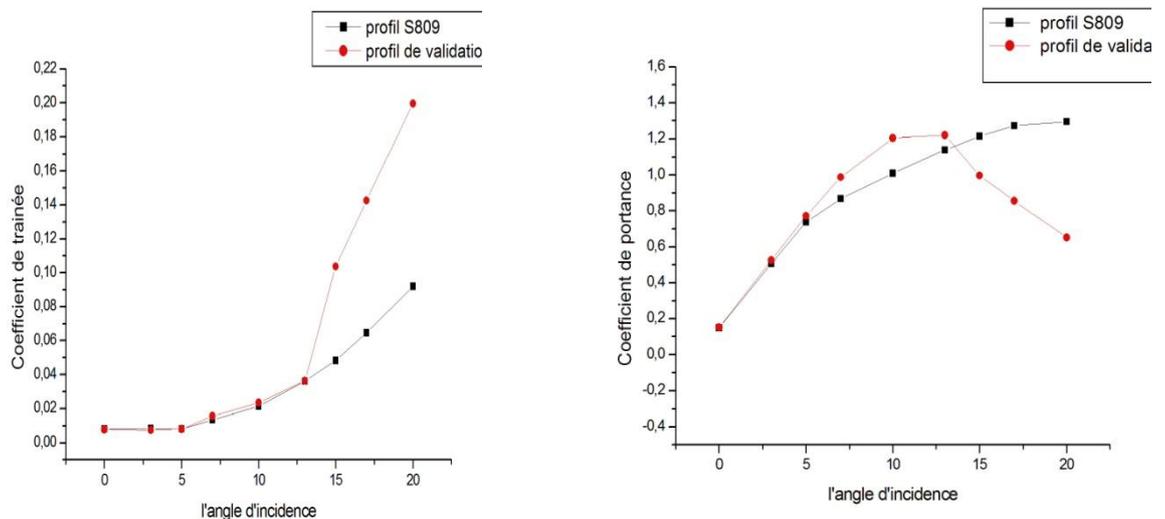


Fig.29 - Comparaison des performances (C_D et C_L) aux tests de validation et de Xfoil prédiction, 2018

Du première vue, les résultats de simulation numérique montrent une concordance relativement bonne avec les données expérimentales particulièrement dans l'intervalle d'angle d'incidence de 0 à 13° ou on remarque que les valeurs du coefficient de traînée et quasiment confondue avec ceux de l'expérimentales, mais à partir de cet angle le C_d augmente d'une façon brusque et continue d'augmenter jusqu'au dernier angle étudié (20°). Simultanément au coefficient

de trainée, le coefficient de portance représente quasiment la même évolution de tel façon que ce coefficient est très proche aux valeurs expérimentales (et même il est confondu) pour des angles d'incidence inférieurs à 5° , entre 5 et 15° les valeurs sont comparables et à partir de cet angle l'évolution est complètement inversée.

Cette étude comparative nous conduit pour dire que le modèle numérique choisi dans le cadre de ce travail donne de bons résultats conformément aux stratégies de validation pour des angles inférieurs à 15° . Cela est principalement dû à la capacité de ce type de modèle numérique de capter les formes de turbulence de taille plus au moins importante ce qui le cas pour les angles d'incidence supérieurs à 15° ; avec l'apparition du phénomène de décollement de la couche limite.

4.3 Le profil amélioré

Dans cette opération d'amélioration on a créé une nouvelle géométrie pour le profil S809 en modifiant l'intrados (voir la Figure 30) .

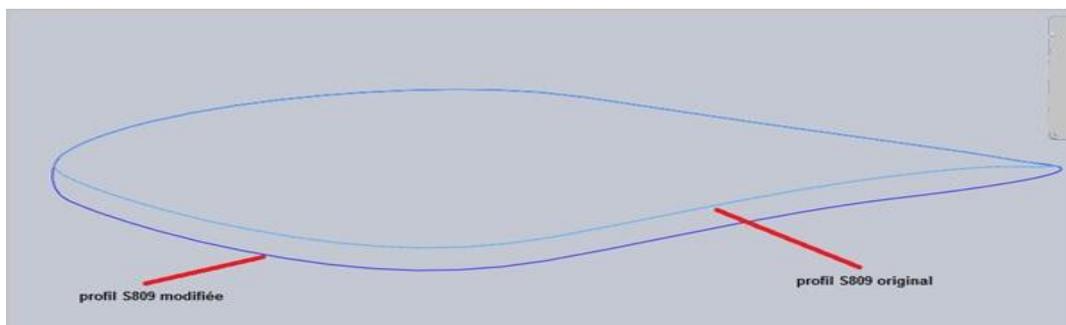


Fig.30 – la géométrie du profil amélioré par rapport à l'original

Ensuite on a suivi les mêmes procédures de simulation aussi que les mêmes conditions aux limites et on obtient les résultats représentés dans la Figure 31.

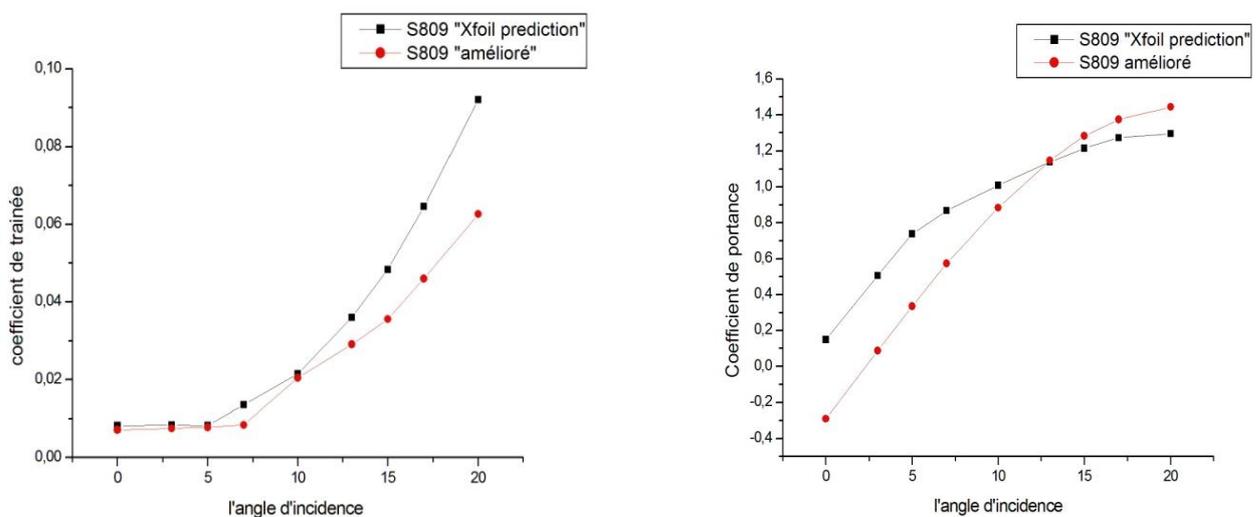


Fig.31 - Comparaison des performances (C_d et C_l) aux mesures expérimentales et de Xfoil prediction, 2018.

4.4 Discussion des résultats

Pour faire une comparaison directe entre les performances aérodynamiques représentées par le coefficient de trainée et de portance du profil amélioré et le profil original, on a tracé l'évolution de ces deux coefficients en fonction de l'angle d'incidence qui varie entre 0 et 20, similaire au cas de validation, cette configuration graphique est montrée dans la Figure 31.

4.4.1 Les coefficients aérodynamiques

- Coefficient de portance : on a remarqué que C_l de notre profil amélioré est faible par rapport au C_l du profil original pour des angles d'incidence comprises entre 0 et 13°, à partir de cet angle le coefficient atteint des valeurs supérieures que celle-ci du profil original jusqu'au dernier angle.

- Coefficient de trainée : en observant le graphe à gauche de la Figure 31, le coefficient de profil amélioré est inférieur par rapport au coefficient du profil original pour tous les angles d'incidence, bien qu'il y'a un écart important entre les deux graphes à partir de l'angle d'incidence 10° jusqu'au dernier angle.

4.4.2 La finesse

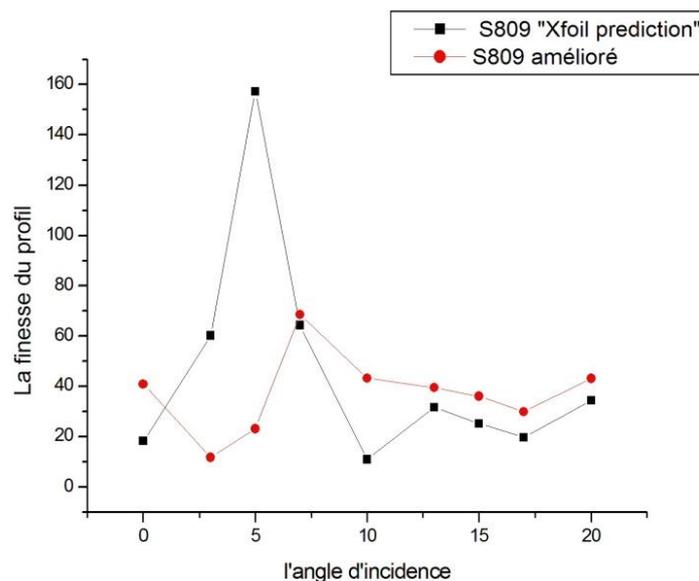


Fig.32 – les variations de la finesse

Malgré que l'étude comparative des coefficients de portance a montrée que ce coefficient du profil modifié est inférieur à celui du profil original au dessous d'un angle très bien déterminé, l'intervention de critère de la finesse donne une interprétation un peu différente, de tel façon qu'on remarque pour les angle comprises entre 0 et 2° la finesse de notre profil amélioré est considérablement supérieur à celui du profil original, cela reviens essentiellement au fait que le coefficient de trainée diminue lui aussi considérablement et par conséquent la finesse peut prendre d'autre forme de variations. Dans notre cas la variation initiale de la finesse est tracée en valeur absolue pour éviter l'apparition du signe moins.

La finesse du profil amélioré montre une faiblesse claire et apparente entre les angles 2 et 7°, dans ce cas on dire que le profil origine représente une performance aérodynamique meilleure par apport au profil modifié.

Dans l'intervalle des angles comprises entre 7 et 20° la performance de finesse de notre profil prend son rôle de supériorité relativement au profil original, cela nous conduit à être convaincu que notre amélioration a donnée de bons résultats non seulement sur le plan numérique mais aussi sur le plan pratique et expérimentale.

4.5 Les champs de vitesse et coefficient de pression

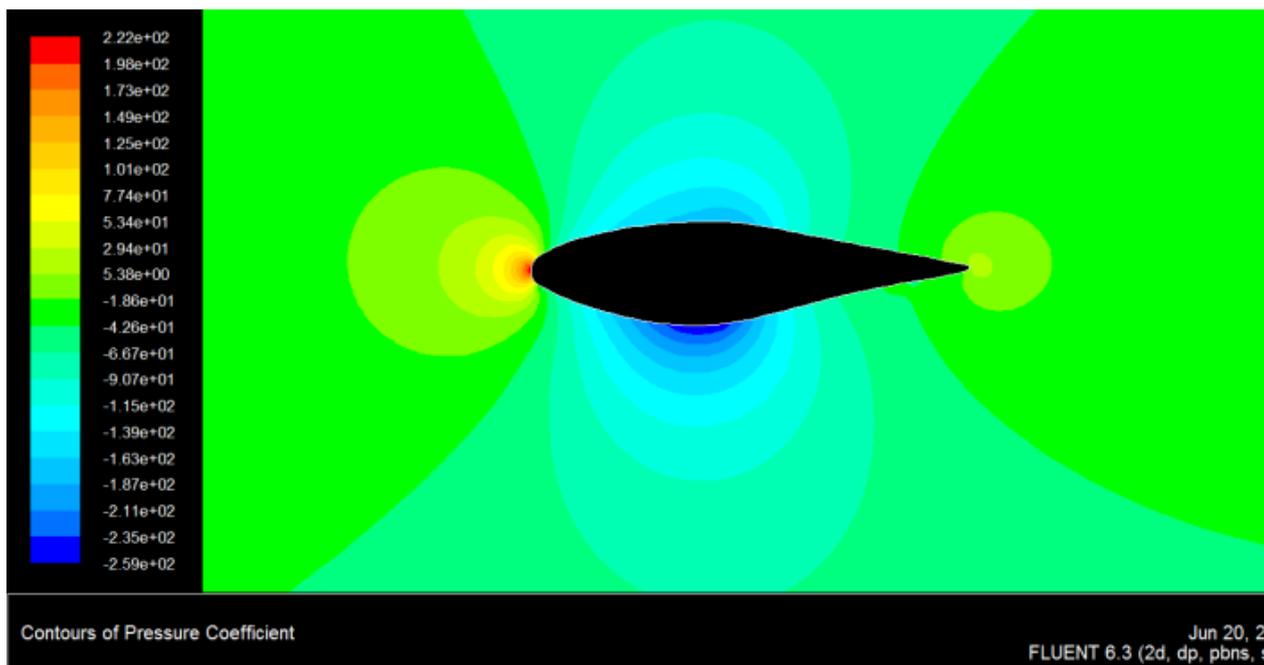


Fig.33 - Coefficient de pression pour $\alpha=0^\circ$

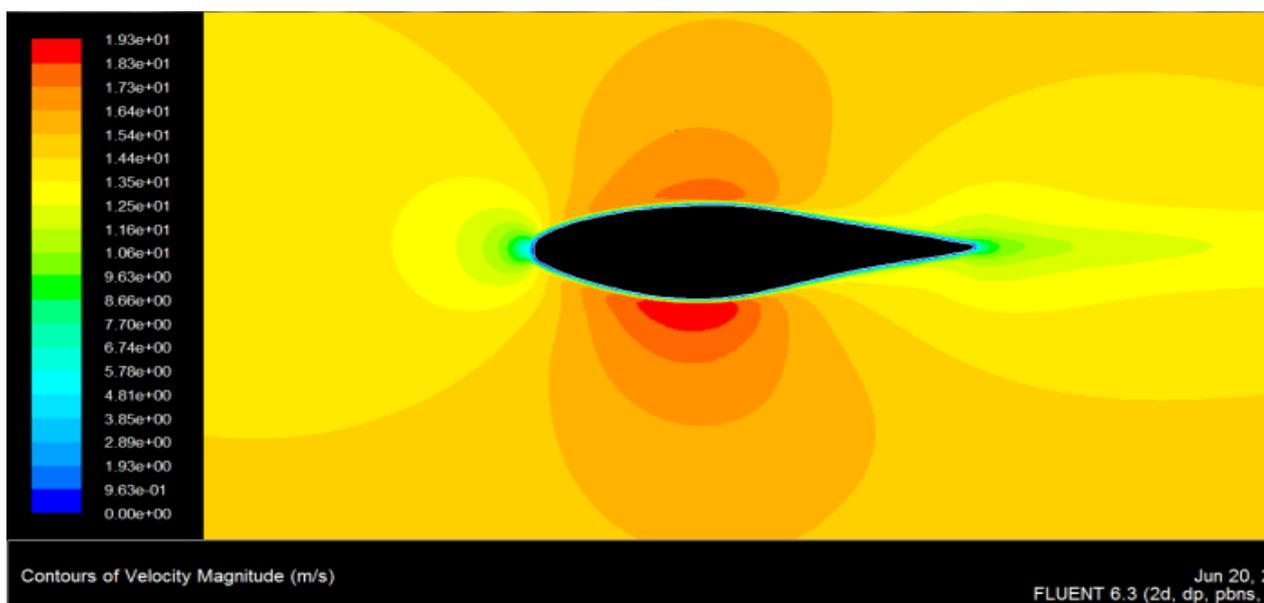


Fig.34 – contours de vitesse pour $\alpha=0^\circ$

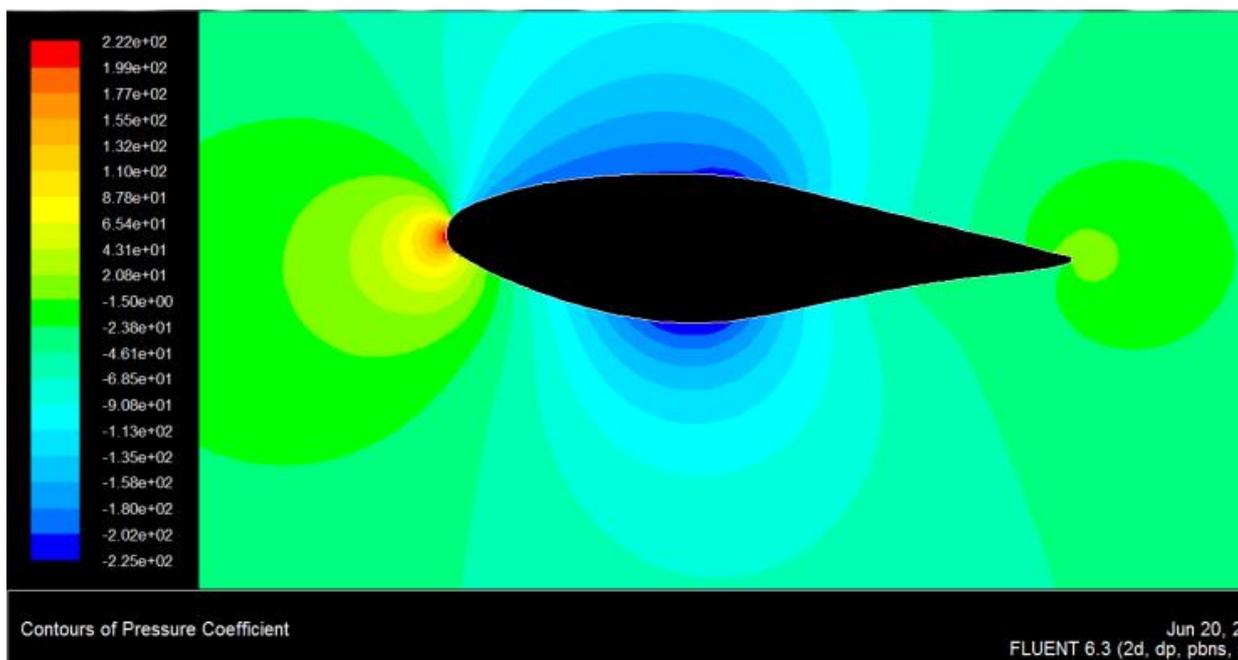


Fig.35 - Coefficient de pression pour $\alpha = 3^\circ$

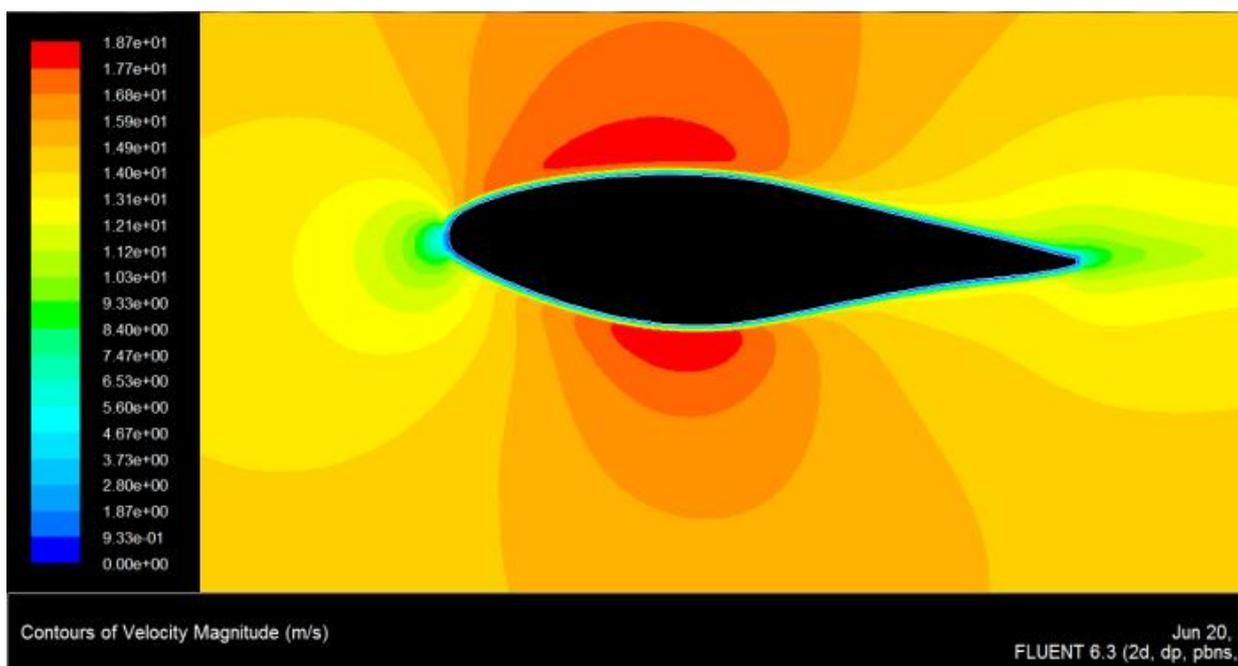


Fig.36- contours de vitesse pour $\alpha = 3^\circ$

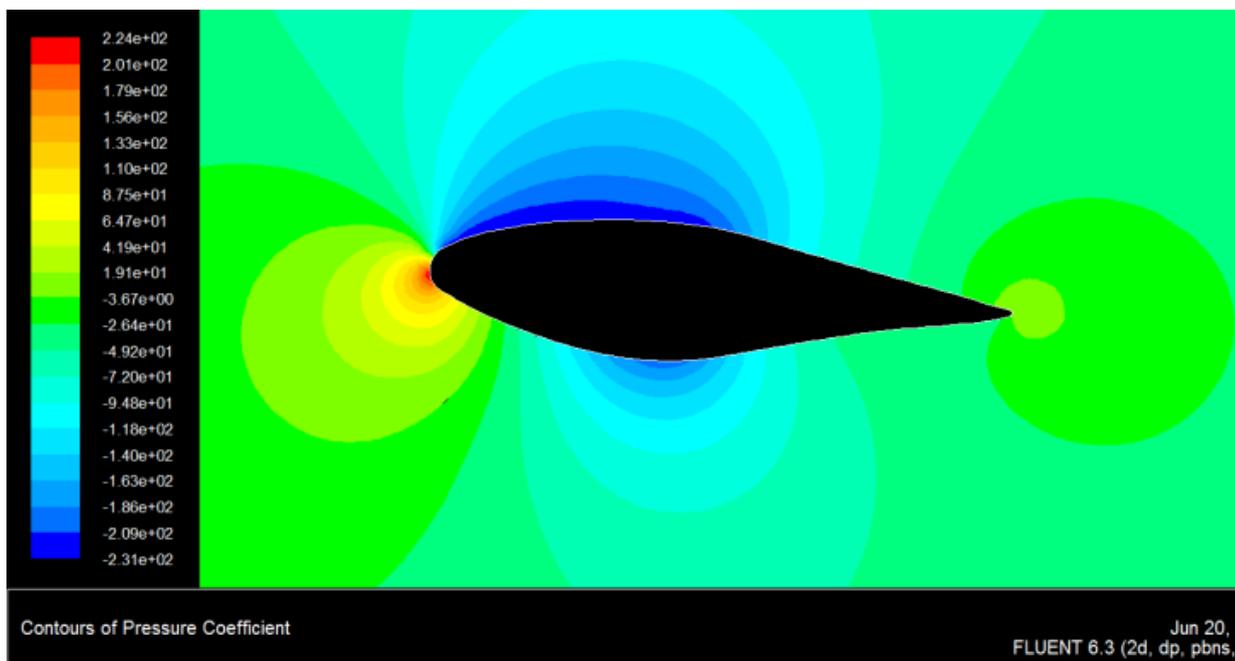


Fig.37 - Coefficient de pression pour $\alpha = 5^\circ$

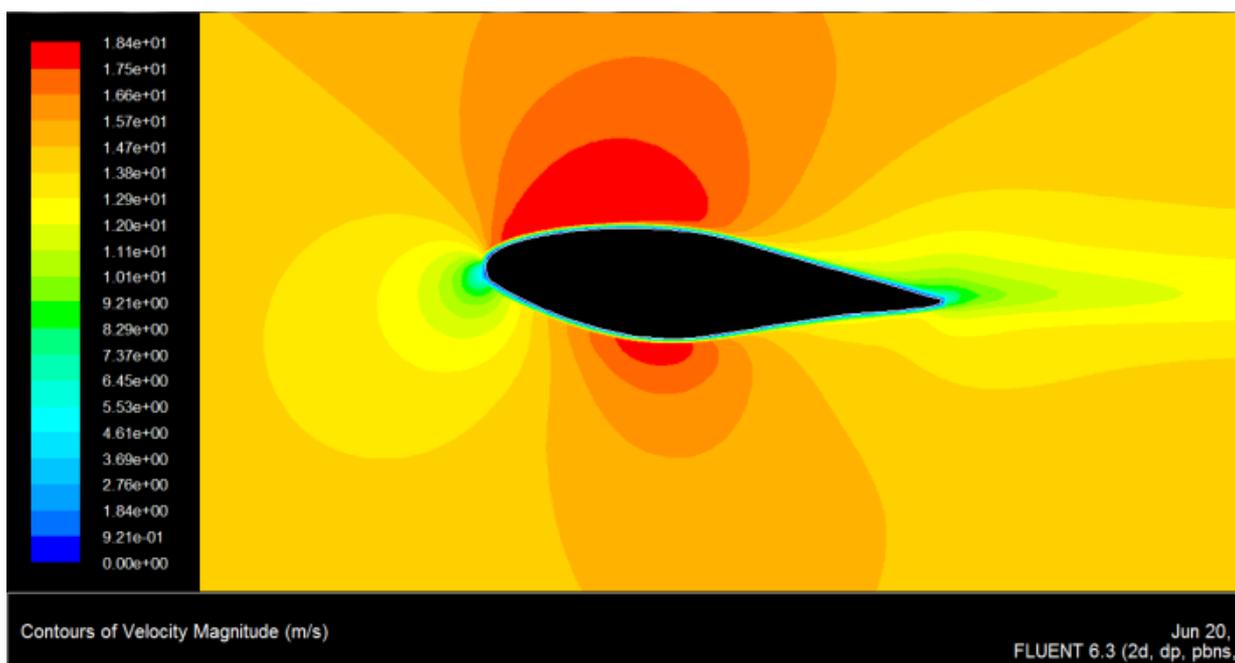


Fig.38 - contours de vitesse pour $\alpha = 5^\circ$

➤ **Interprétation des résultats pour les angles d'incidence de 0 à 5°**

Dans les figures (33, ..., 38) : On remarque premièrement l'apparition d'un champ de coefficient de pression sur le bord d'attaque et le bord de fuite dont l'angle est égal à 0°, puis ce champ varie d'une manière croissante pour les angles 3° et 5°, ou il atteint une valeur maximale ($2.24 \cdot 10^{+2}$), ainsi qu'une faible pression existe sur l'intrados et l'extrados .

Les contours de vitesse ont apparus seulement sur l'intrados pour l'angle 0° , ensuite ils augmentent rapidement dans les angles 3 et 5 et atinent une valeur maximal à angle 5° précisément sur l'extrados du profil (18.4 m/s).

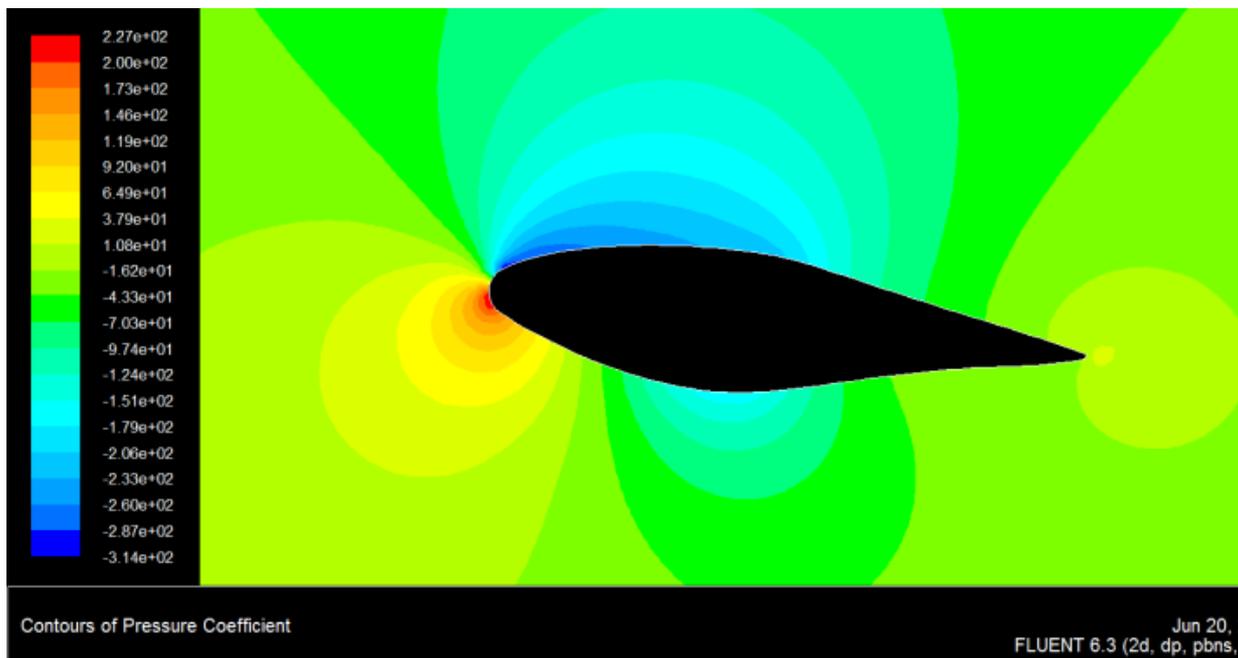


Fig.39 - Coefficient de pression pour $\alpha = 7^\circ$

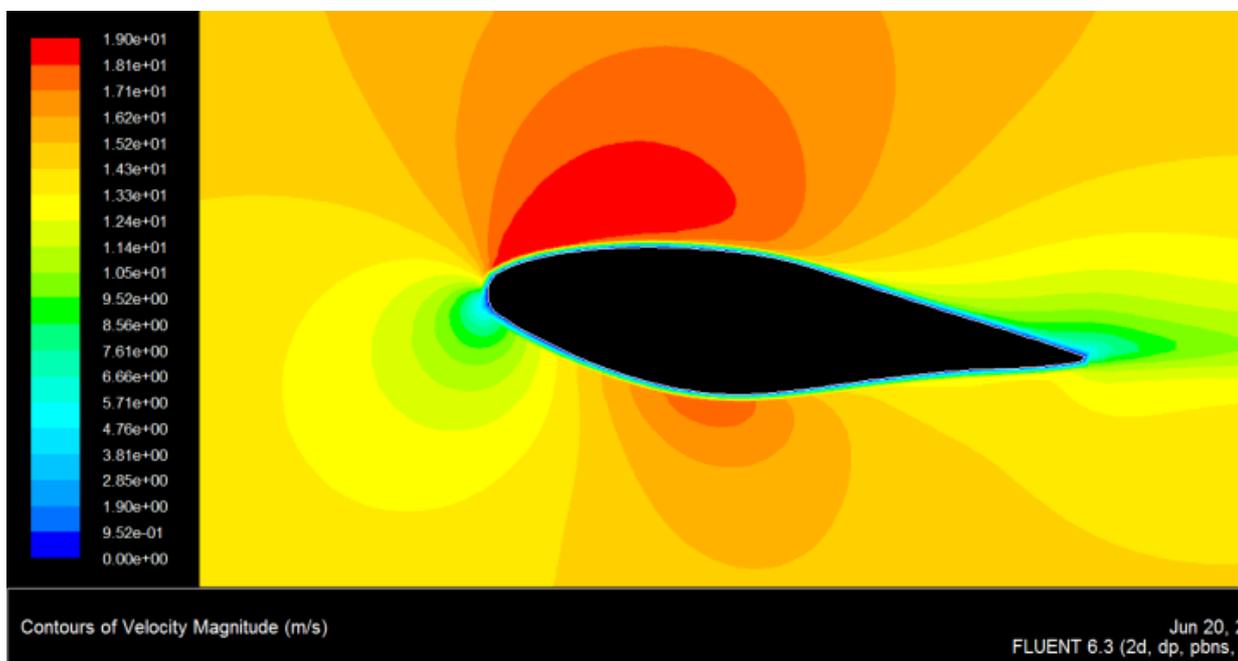


Fig.40 - contours de vitesse pour $\alpha = 7^\circ$

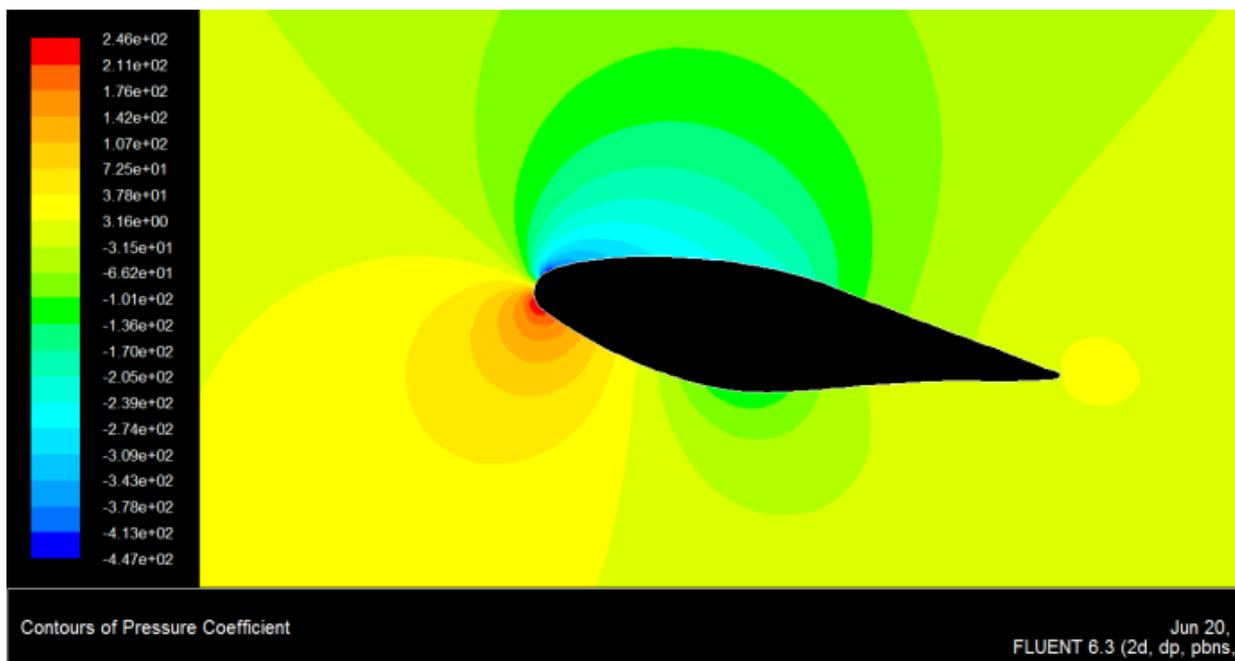


Fig.41 - Coefficient de pression pour $\alpha = 10^\circ$

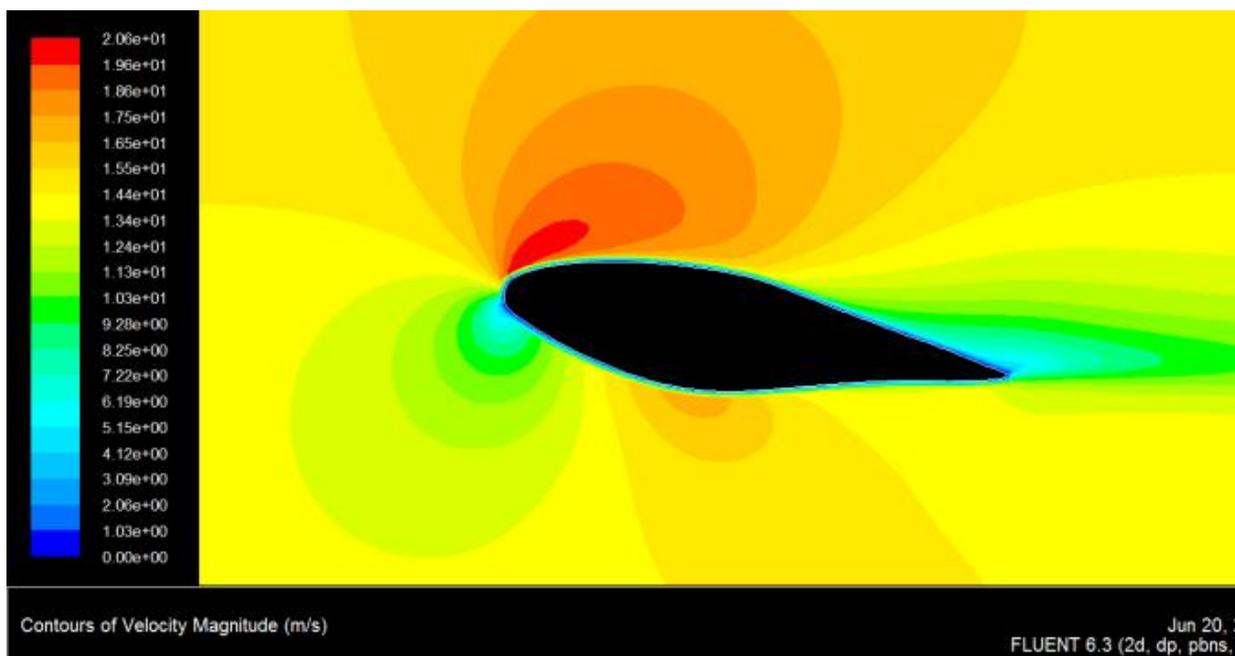


Fig.42 - contours de vitesse pour $\alpha = 10^\circ$

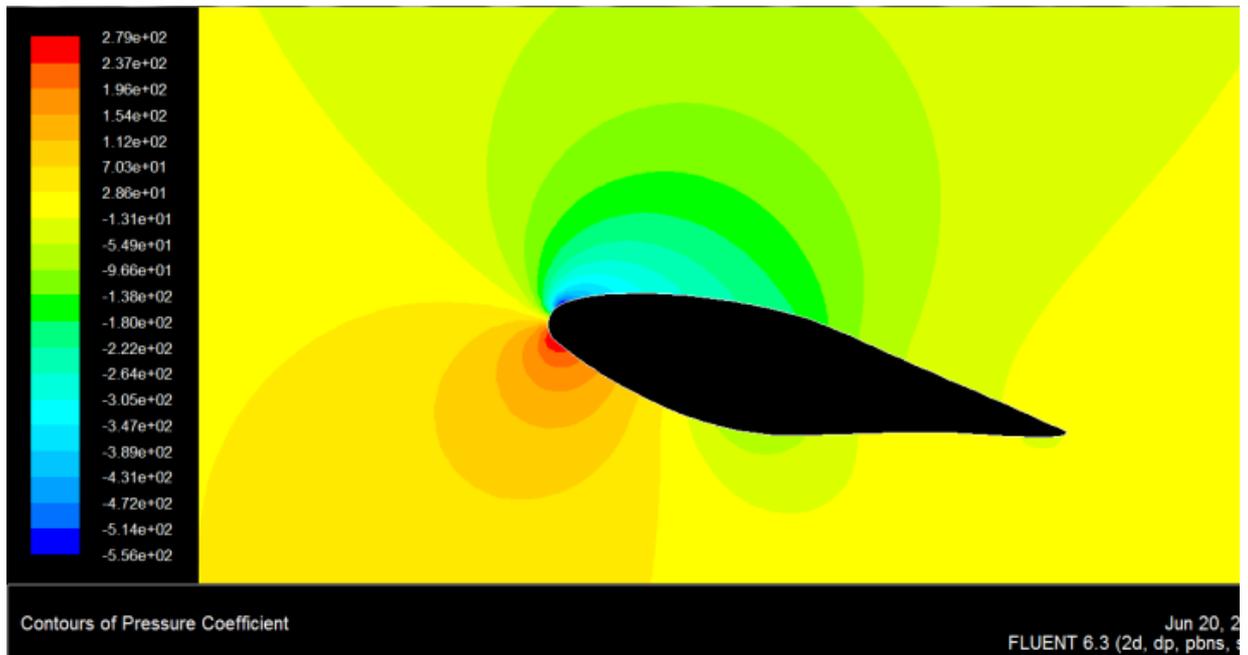


Fig.43 - Coefficient de pression pour $\alpha = 13^\circ$

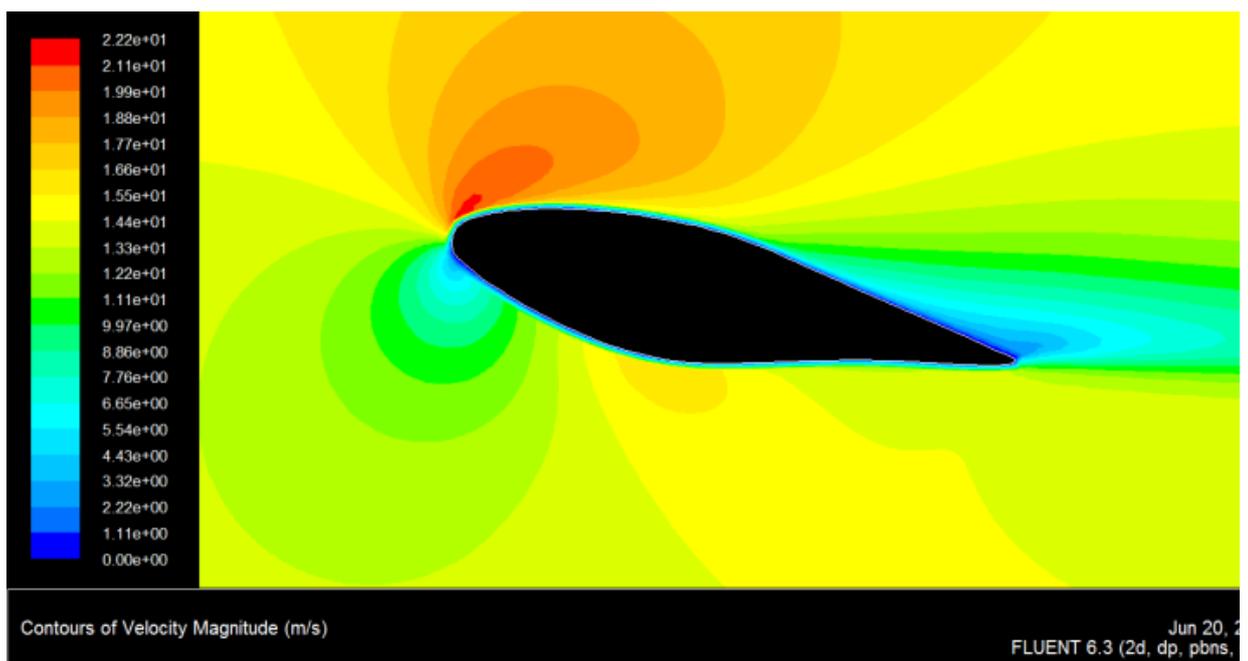


Fig.44 - contours de vitesse pour $\alpha = 13^\circ$

➤ **Interprétation des résultats pour les angles d'incidence de 7 à 13°**

Dans les figures (39,..., 44) : On observe que les champs de coefficient de pression sont augmentés d'une manière remarquable sur l'intrados, bord d'attaque et le bord de fuite dont l'angle est égal à 10° et 13° malgré qu'il est presque nul à 7°. Les contours de vitesse varient d'une manière inversement proportionnel au coefficient de pression car ils sont presque nul à l'angle de 13°.

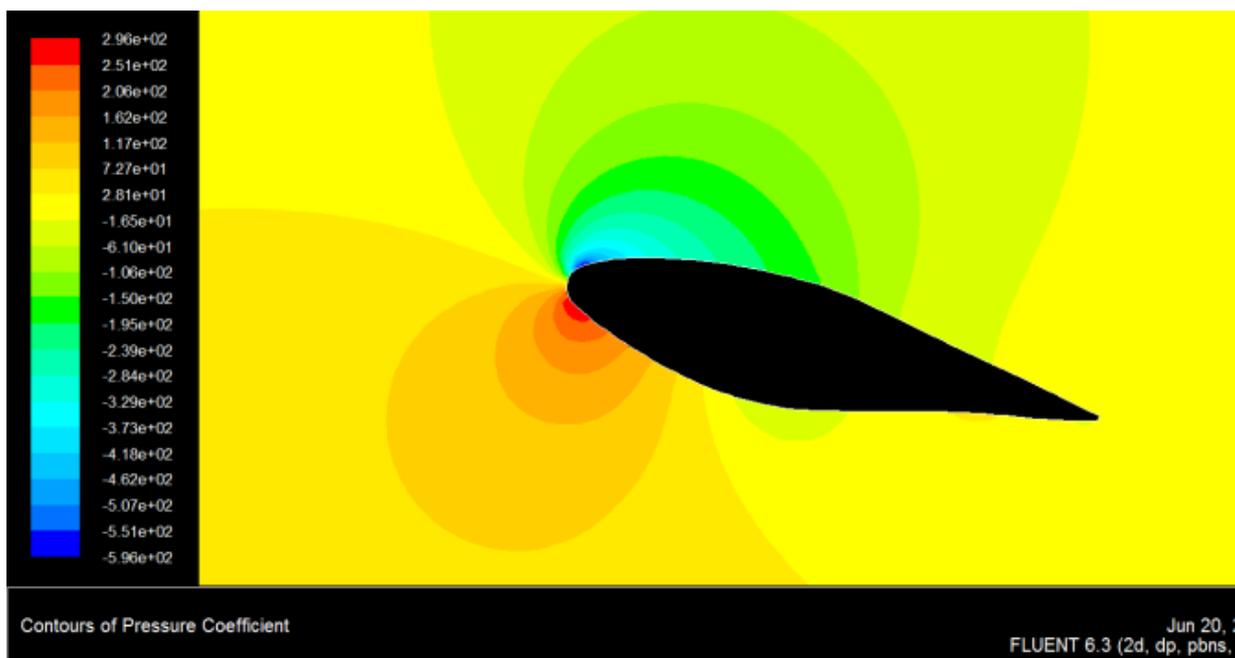


Fig.45 - Coefficient de pression pour $\alpha = 15^\circ$

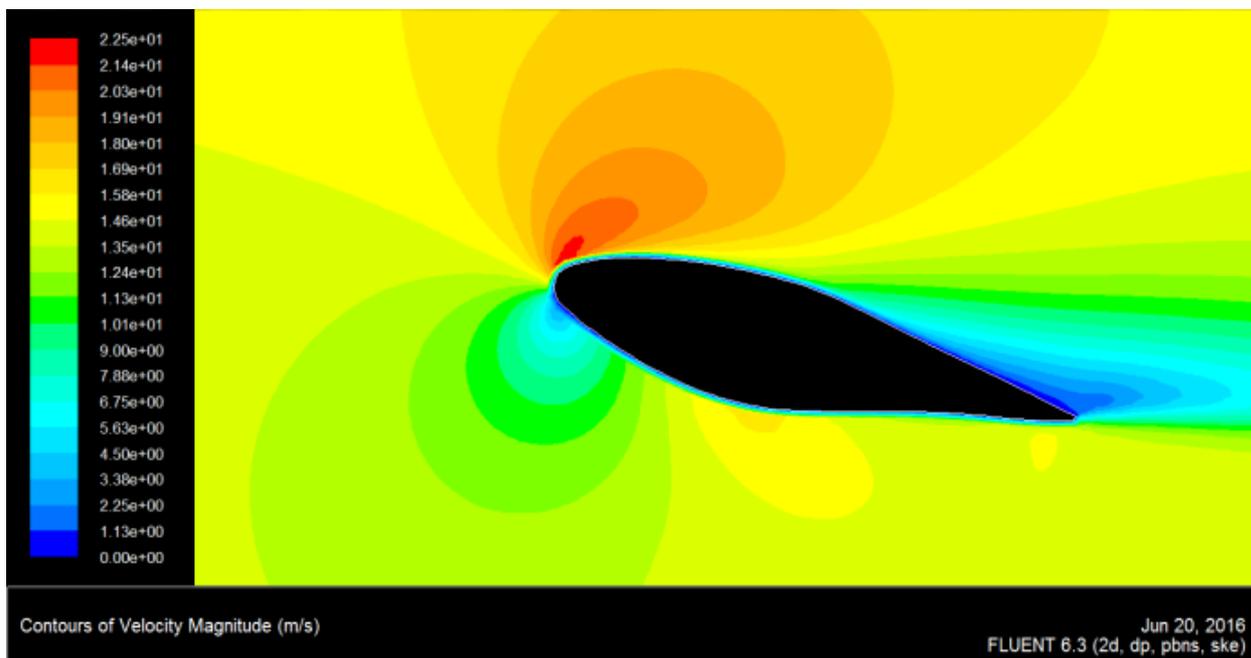


Fig.46 - contours de vitesse pour $\alpha = 15^\circ$

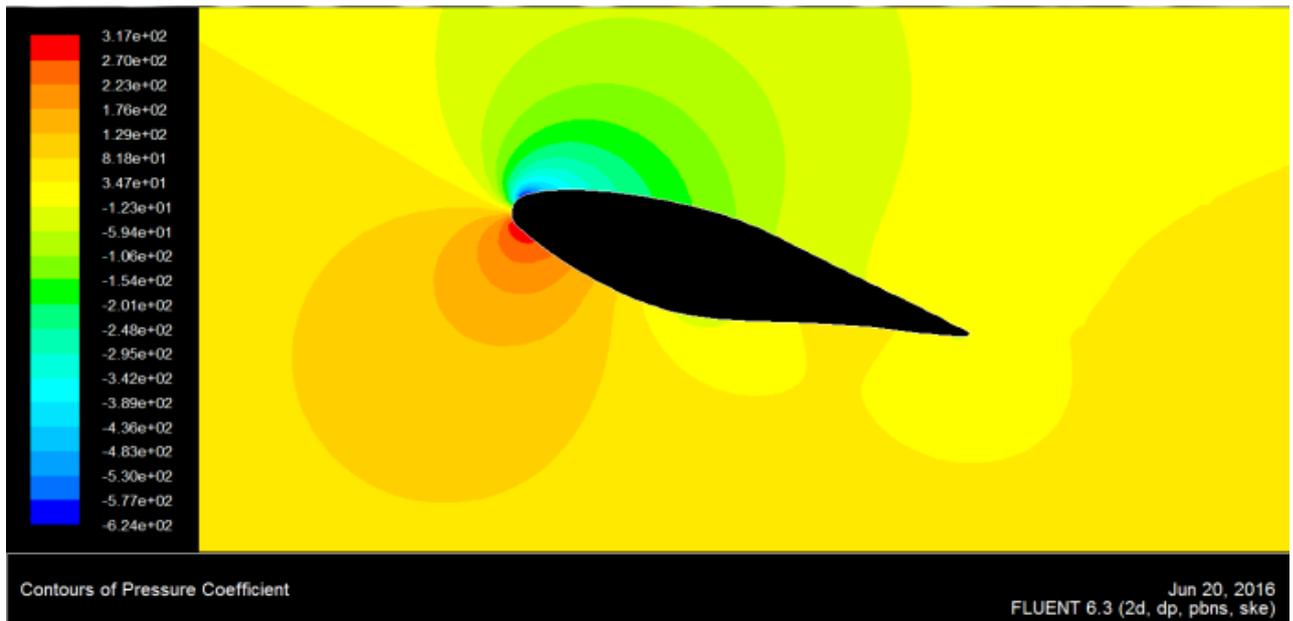


Fig.47 - Coefficient de pression pour $\alpha = 17^\circ$

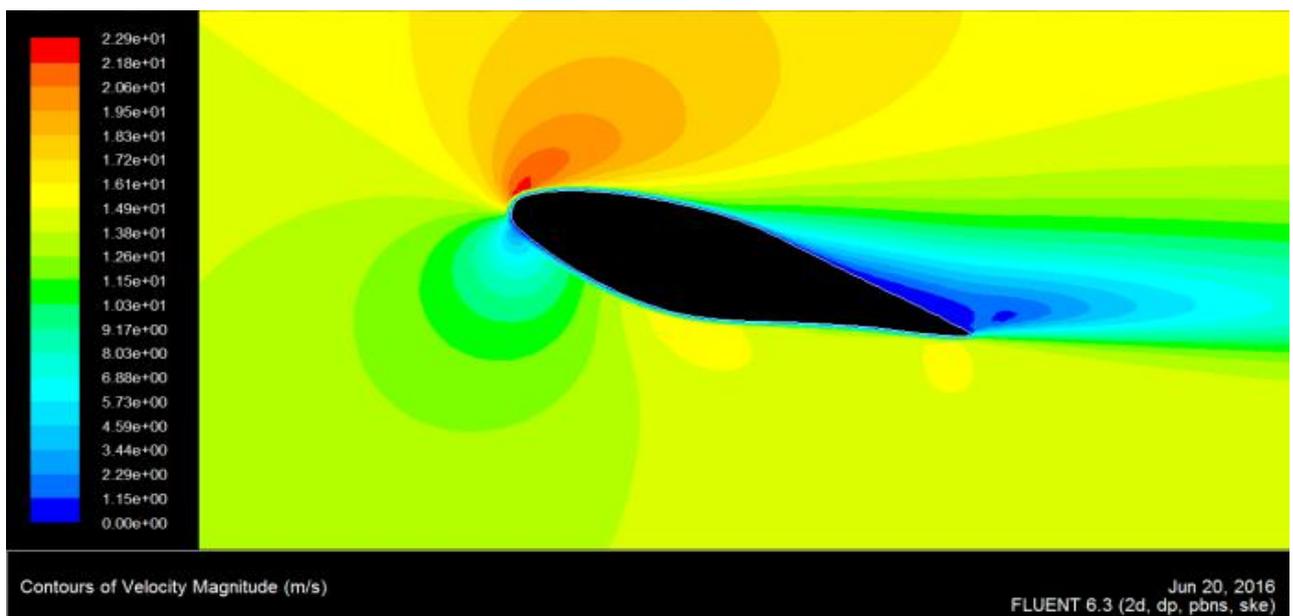


Fig.48 – contour de vitesse pour $\alpha = 17^\circ$

➤ **Interprétation des résultats pour les angles d'incidence de 15 à 20°**

Dans les figures (45,..., 50) : On voit que les champs de coefficient de pression sont continus à augmenter dans les deux côtés (positive et négative) en même point au bord d'attaque surtout dont l'angle est 20 augmentés beaucoup le bord d'attaque. La vitesse du vent est diminuée au bord d'attaque du côté de l'extrados avec l'apparition de phénomène de décrochage à l'angle de 20°.

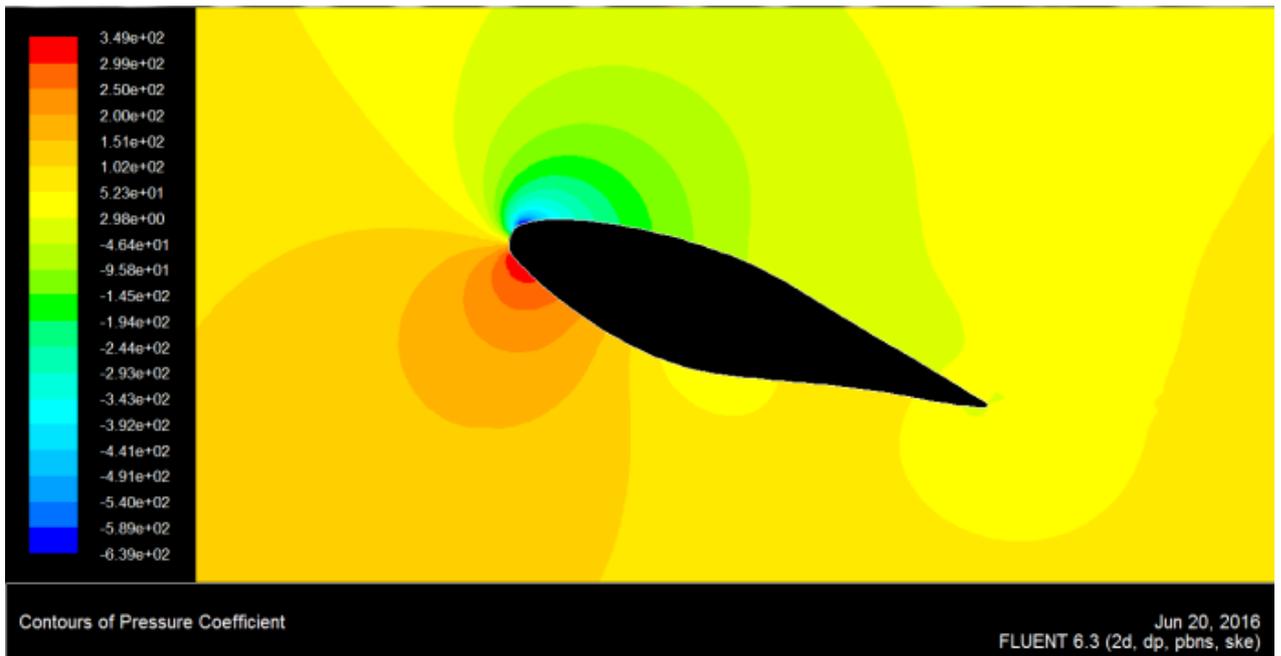


Fig.49 - Coefficient de pression pour $\alpha = 20^\circ$

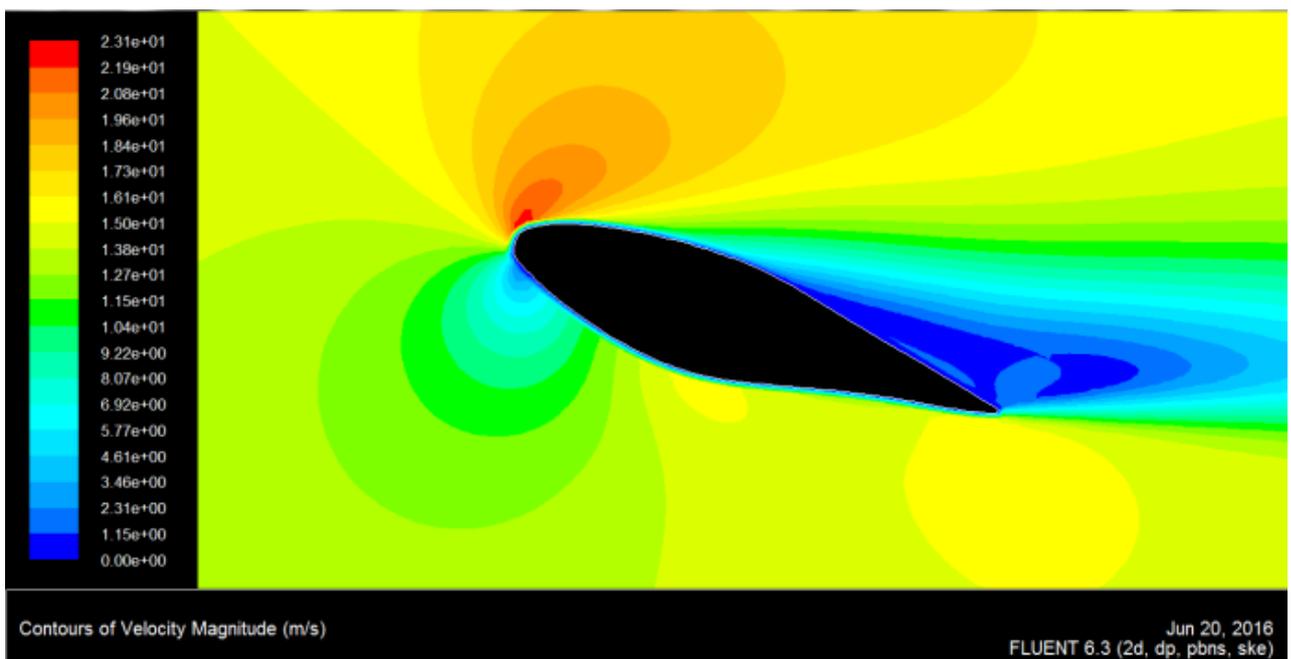


Fig.50 - contours de vitesse pour $\alpha = 20^\circ$

Conclusion

Cette étude nous a permis de bien comprendre l'influence de la géométrie d'un profil éolienne sur le coefficient de portance et de trainée ainsi que la pression, la vitesse. Dans l'ensemble, les résultats sont en bon accord avec les données expérimentales puisque le décrochage est prédit pour tout les cas. Nous avons montré que la finesse de notre profil amélioré est super avec des angles d'incidences comprises entre 7 et 20°, pour les rotations du profil au sens positive « sens horaire ».

Conclusion générale

Conclusion générale

Grâce au développement technologique dans les domaines scientifiques, l'utilisation des moyens informatique, devient une obligation parce qu'il nous a permis de réduire le temps de travail et le cout de fabrications et de production.

La simulation numérique représente la solution la plus utile dans la recherche scientifique et surtout dans les études qui prend long de temps et ses matériels expérimentaux très rares ou n'existe pas. Cette méthode de recherche considérée comme un chemin d'arriver pour un chercheur numéricien, parce qu'il l'offre l'analyse et l'étude des déférents phénomènes scientifique.

Pour qu'une simulation doit être réussir dans n'importe quel projet donné, il très important de choisir quant aux hypothèses, des phénomènes physiques étudiés et un bon logiciel de simulation, parce que les simulateurs numérique sont divers et chacun et son code de calcul. Ces calculs de simulation permettent de prédire le comportement du phénomène étudié sans avoir à passer par la construction de prototypes ou la réalisation d'essais réels.

Dans une opération d'optimisation, la simulation numérique peut aboutir à des économies rationnelles de matériaux, à une amélioration de la qualité ou de la durée de vie des produits et à une optimisation des procès de production.

L'étape principale dans la simulation est de choisir un maillage qui convient à l'étude bien précisé pour obtenir des résultats équivalents ou approximatif aux résultats expérimental.

Ce maillage consiste à deviser virtuellement la géométrie étudiée en plusieurs éléments. De façon simplifiée, il est nécessaire de réaliser un maillage plus fin pour que le modèle de calcul numérique adopté soit efficace pendant le calcul itératif.

Notre étude est précisément à caractère numérique basée sur un logiciel de simulation fluent, utilisé pour modéliser l'écoulement d'air autour d'un profile amélioré du profil NREL-S809.

Les résultats présentés dans ce travail sont les coefficients de portance et de trainé ainsi que la finesse du profil amélioré par rapport au profil original, dépendent à la vitesse de déplacement, l'angle d'incidence et la distribution du coefficient de pression sur l'intrados et l'extrados du profil modifiée.

A la fin de ce modeste travaille, on a réussi à créer une nouvelle géométrie du profil S809, cette nouvelle géométrie a des performances mieux que celle-ci du profil original, dans des intervalle très bien déterminés et particulièrement concernant la finesse qui présente un performances supérieure dans un intervalle d'angle [7° - 20°].

Référence bibliographique

- [1] : Revue des Energies Renouvelables-Vol. 15 N°2 (2012) 235 - 247 235- Influence de la rugosité sur les caractéristiques aérodynamiques d'un profil de pale d'éolienne .A. Bekhti et O. Guerri
- [2] : <http://www.pomms.org/d-ou-vient-le-vent--021.html>. date de la dernière consultation de site 30/07/2017
- [3] : <http://www.info-eolien.com/eolienne-vent.html>. date de la dernière consultation de site 30/07/2017
- [4] : <http://www.suisse-eole.ch/fr/energie-eolienne/technique/histoire/> . date de la dernière consultation de site 30/07/2017
- [5] : <http://www.info-eolien.com/historique.html>. date de la dernière consultation de site 30/07/2017
- [6] : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne> date de la dernière consultation de site 19/08/2017
- [7] : <https://www.samse.fr/guide-enr/energie-eolienne> date de la dernière consultation de site 19/08/2017
- [8] : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-d-eoliennes> date de la dernière consultation de site 19/08/2017
- [9] : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16656#c20289> date de la dernière consultation de site 19/08/2017
- [10] : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16656#c20289+c20314> date de la dernière consultation de site 19/08/2017
- [11] : <https://eolupjv.wordpress.com/les-types-deoliennes/> date de la dernière consultation de site 20/08/2017
- [12] : Marc rapin, jean-marc Noël. 2009. Énergie éolienne : principes études de cas, paris
- [13] : <http://lesfluides8sciences.weebly.com/types-deacutecoulement.html> date de la dernière consultation de site 29/08/2017
- [14] : <http://sciencequotidien.weebly.com/les-fluides-compressibles-et-incompressibles.html> date de la dernière consultation de site 09/09/2017
- [15] : Riadh BEN HAMOUDA, octobre 2008. Notions de mécanique des fluides. Cours et exercices corrigés. Centre de Publication Universitaire, Tunis.
- [16] : http://www.mecaflux.com/nombre_reynolds.htm date de la dernière consultation de site 09/09/2017
- [17] : <https://www.lavionnaire.fr/AerodynEcoulAir.php#AeroReynolds> date de la dernière consultation de site 09/09/2017
- [18] : André PARIS, décembre 2013. Cours théoriques BIA. Aérodynamique mécanique du vol performances avion.
- [19] : <https://heliciel.com/aerodynamique-hydrodynamique/profils%20aile%20profil%20pale.htm> date de la dernière consultation de site 22/03/2018
- [20] : Kadri mohammed ayoub., 2015. étude numérique de l'écoulement d'air à travers une éolienne darriues de type h à pale naca4412, universite kasdi merbah Ouargla

[21] : Chaib bassou fatiha, Zeblane bekhta ; 2017. Etude de l'effet du profil de pale sur les forces aérodynamiques d'un rotor type H d'une éolienne à axe vertical, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana

[22] : <https://www.paperblog.fr/3989958/portance-et-trainee/> date de la dernière consultation de site 30/03/2018

[23] : <http://docplayer.fr/4698727-Mecanique-des-fluides.html> date de la dernière consultation de site 06/04/2018

[24] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9crochage_\(a%C3%A9rodynamique\)#/media/File:Angles_d_e_portance_et_de_d%C3%A9crochage.svg](https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9crochage_(a%C3%A9rodynamique)#/media/File:Angles_d_e_portance_et_de_d%C3%A9crochage.svg) date de la dernière consultation de site 06/04/2018

[25] : <https://eolienne.f4jr.org/sillage> date de la dernière consultation de site 06/04/2018

[26] : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0708/beiep/10/html/ModeleTurb.html> date de la dernière consultation de site 28/05/2018

[27] : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/beiepe/book/export/html/1124> date de la dernière consultation de site 28/05/2018

[28] : Hamid. Lakhdari, 2009 .Hydrodynamique d'écoulement dans une cuve mécaniquement agitée , Magister en énergétiques avancés, Université M'HAMED BOUGARA, Boumerdes.

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

[30] : Fluent user's guide (6.3)

Résumé

Le présent travail est une étude par simulation numérique de l'écoulement d'air autour d'un profil d'éolienne de type NREL-S809 pour créer un nouvel profil avec des performances supérieures par rapport à l'original. Pour bien comprendre le comportement physique de l'écoulement autour de ce profil on a utilisé un code de calcul numérique Fluent. Le but principal de cette simulation est de déterminer les caractéristiques aérodynamiques de ce profil amélioré et les comparer avec celle-ci du l'original, les contours de vitesse et les champs de coefficient de pression pour différentes angles d'incidence ont été tracés.

Les résultats obtenus montrent l'influence de la géométrie du profil utilisé sur ses caractéristiques aérodynamiques comme le coefficient de portance et de trainé. Enfin, la comparaison entre la finesse du profil amélioré et l'original nous a permis à dire que notre travail mélioratif est réussi à 100%.

Mots Clés: simulation numérique, écoulement, éolienne, profil NREL-S809, code de calcul, Fluent, caractéristiques aérodynamiques, profil amélioré, géométrie du profil.

Abstract

The present work is a study by digital simulation of the air flow around a profile of type NREL-S809's wind turbine to create a new profile with superior performances compared with the original. To well understand the physical behavior of the flow around this profile we used a code of numeral calculation Fluent. The main purpose of this simulation is to determine the aerodynamic characteristics of this improved profile and to compare them with this one of the original, the outlines of speed and the fields of coefficient of pressure for different angles of incidence were drawn.

The obtained results show the influence of the geometry of the profile used on its characteristics aerodynamic as the coefficient of lift and drag. Finally, the comparison between the sharpness of the improved profile and the original allowed us to say that our mélioratif work is fully made a success.

Keywords: simulation digital technology, flow, wind turbine, profile NREL-S809, code of calculation, Fluent, aerodynamic characteristics, improved profile, geometry of the profile.

الملخص

هذا العمل هو دراسة بالمحاكاة الرقمية لتدفق الهواء حول مقطع خاص بالتوربينات الهوائية من نوع NREL- S809's ، من أجل انشاء نموذج جديد بمواصفات ممتازة مقارنة بالمقطع الاصلي. من أجل الفهم الجيد للخواص الفيزيائية لتدفق الهواء حول هذا النموذج استخدمنا برنامج حساب عددي يسمى Fluent. الغرض الرئيسي من هذه المحاكاة الرقمية هو تحديد خصائص الديناميكية الهوائية للمقطع المحسن، ومقارنتها بالاصلية، تغيرات السرعة و مجالات معامل الضغط الخاصة بكل زوايا التدوير المختلفة، تم رسمها.

النتائج المتحصل عليها تظهر تأثير نموذج المقطع على خصائصه الايروديناميكية مثل معامل الرفع 'portance' و الخفض 'trainé'. واخيرا ,المقارنة بين معامل الحدة 'la finesse' للمقطع المحسن و الاصلى يسمح لنا بالقول ان عملنا التطويري للنموذج كان ناجحا 100%.

الكلمات المفتاحية : محاكاة رقمية، تدفق الهواء، التوربينات الهوائية، المقطع NREL-S809 ، برنامج الحساب، fluent، خصائص الديناميكية الهوائية، المقطع المحسن، نموذج المقطع.