

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU



DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

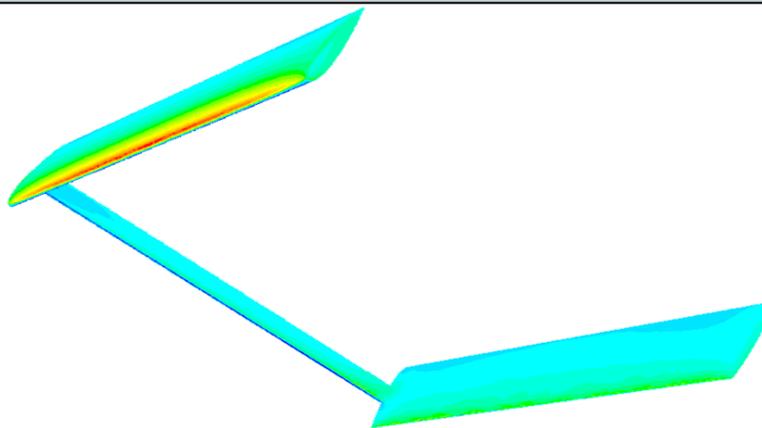
MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE MECANIQUE
OPTION : ENERGETIQUE**

THEME

***Evaluation des Caractéristiques
Aérodynamique d'une Eolienne à Axe
Vertical de Type DARRIEUS à Profil
NACA0015***



Proposé et dirigé par :

M^r : I.BOUMRAR

Etudié par :

**Mr: BOUBEKKI MOULOU
M^r: CHETTOUH DJAMEL**

**PROMOTION:
2012-2013**

Remerciements

On remercie Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage d'aller au bout de ce travail.

On remercie aussi Mr Boumrar pour son attention constante et toute l'aide qu'il a apporté à ce travail on lui exprime toute notre gratitude.

Nous remercions aussi tout les travailleurs du Hall de Technologie de OUED AISSI, sans oublier les travailleurs de la bibliothèque du département Génie mécanique.

On remercie les membres de jury qui on bien voulu accepter de juger notre travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont apportés leurs contributions de près ou de loin.

Merci

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon grand père paternel Mohand Ouamara.

A la mémoire aussi de mon arrière grand-mère maternel Fatma.

A ma grand- mère paternel Djouhra .

A ma mère qui ma toujours soutenue, et qui a veillé pour ma réussite.

A mon père que dieu le garde parmi nous, qu'il lui donne la foi et le courage de se battre contre sa maladie.

A mon grand frère Boussad qui m'a vraiment soutenu.

A ma grand sœur Ghinouche , et que je lui souhaite un heureux mariage avec Malik Akkou.

A ma petite sœur bien aimé Soraya, a qui je lui un bon courage et une belle réussite dans ses études.

A mon oncle Khelifa et a sa petite famille.

A ma tante Ouardia, à qui je lui souhaite un bon rétablissement.

A ma tante Ghania et à son marie Mourad, sans oublier leur petit bout de chou Rayane.

A mes grands-parents Fatma et Hocine.

A mes deux tantes Djouhra et dahbia ainsi qu'à leurs familles.

A tous mes amis et camarades de la fac, Omar, Chabane, Boudji, Hakim, Djigo, Nacer , Samir, Boukhalifa, Nassim, Moh , Mahdi, Yacine, Hocine.

A mes amis du café bastos.

Et à tous ceux qui me son chers et que j'aime.

Mouloud.

Sommaire

| | |
|--|---------------|
| Notations et Symboles. | iv |
| Listes des Figures. | vi |
| Liste des Tableaux. | ix |
| | Pages. |
| Introduction Générale. | 1 |
| Chapitre I : Généralités sur les Eoliennes. | 4 |
| I.1. Notions sur les énergies renouvelables. | 4 |
| Introduction. | 4 |
| I.1.2. Présentation des différents types de ressources. | 4 |
| I.2. Généralités sur les éoliennes. | 5 |
| I.2.1. Historique. | 5 |
| I.2.1.1. Un peu d'Histoire. | 5 |
| I.2.2. Objectifs. | 6 |
| I.2.3. Avantages et inconvénients des éoliennes. | 6 |
| I.2.3.1. Avantage. | 6 |
| I.2.3.2. Désavantage. | 6 |
| I.2.4. Structure d'une éolienne. | 7 |
| I.2.4.1. principaux composants d'une éolienne. | 7 |
| I.2.5. Les différents types d'éoliennes. | 7 |
| I.2.5.1. Axe horizontal. | 8 |
| I.2.5.2. Axe vertical. | 9 |
| I.2.5.2.1. Principe de l'éolienne verticale. | 10 |
| I.2.5.2.2. Les avantages de l'éolienne verticale type Darrieus. | 10 |
| I.2.6. Comparaison. | 11 |
| I.2.7. Situation actuelle de l'énergie éolienne. | 12 |
| I.2.8. Recherche et développement. | 14 |
| I.2.8.1. Quelques chercheurs scientifiques. | 14 |
| I.2.8.2. Albert Betz et sa théorie. | 14 |
| I.2.8.3. Waloddi Weibull. | 14 |
| I.2.8.4. Georges Darrieus, ingénieur français. | 14 |
| I.2.9. Approche par la mécanique des fluides. | 15 |
| I.2.9.1. Les pales : système de récupération de l'énergie du vent. | 15 |
| I.2.9.2. Actions mécaniques génératrices et résistantes. | 16 |
| I.2.9.3. Energies, puissances, rendements. | 17 |
| Chapitre II : Approche Théorique. | 19 |
| Introduction. | 19 |
| II.1. Géométrie de l'éolienne Darrieus. | 19 |
| II.2. Vitesse autour du profilé. | 20 |
| II.3. Forces aérodynamiques. | 22 |
| II.4. Méthode d'évaluation des coefficients aérodynamique d'un profil aérodynamique. | 24 |
| II.5. Puissance générée par l'éolienne. | 24 |
| II.6. Profils simulés. | 25 |
| Chapitre III : Approche Expérimentale. | 26 |

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction. | 26 |
| III.2. Matériel utilisé. | 26 |
| a) Soufflerie subsonique. | 26 |
| b) Tube de Pitot. | 27 |
| c) Balance aérodynamique à jauges de contrainte. | 28 |
| d) Indicateur de contraintes. | 31 |
| e) Système d'acquisition de données. | 31 |
| f) Multi-manomètre. | 32 |
| g) Maquette de mesure I (profil NACA 0015). | 33 |
| h) Maquette de mesure (II) turbine d'une éolienne d'axe vertical de type darrieus au profil (NACA 0015). | 34 |
| III.3. Réalisation de la pale avec prises de pression (maquette I). | 34 |
| III.3.1. Procédé de réalisation de la pale avec prises de pression. | 34 |
| III.3.1.1. Répartition des prises de pression. | 35 |
| III.3.1.2. Procédé de réalisation des prises de pression. | 35 |
| III.4. Réalisation de la turbine de l'éolienne Darrieus (maquette II). | 37 |
| III.5. Mesures expérimentales sur les deux maquettes aux profils (NACA0015). | 39 |
| III.5.1. Manipulation de la maquette I. | 39 |
| III.5.2. Exploitation de la maquette I. | 40 |
| III.5.3. Interprétation des résultats. | 43 |
| a) Courbes du coefficient de pression (Figures III.16). | 43 |
| b) Courbes de portance (Figures III.17). | 44 |
| c) Courbes de traînée (Figures III.18). | 44 |
| d) Conclusion. | 44 |
| III.5.4. manipulation de la maquette II à pales verticales. | 44 |
| III.5.5. exploitation de la maquette II. | 44 |
| III.5.6. interprétation des résultats. | 46 |
| a) Courbe de portance. | 46 |
| b) Courbe de traînée. | 46 |
| c) Courbe du coefficient de puissance. | 46 |
| III.5.7. manipulation de la maquette II à pales inclinées de 6°. | 46 |
| III.5.8. exploitation de la maquette II inclinée de 6°. | 47 |
| III.5.9. interprétation des résultats. | 49 |
| a) Courbes de portance. | 49 |
| b) Courbes de traînée. | 49 |
| c) Courbes du coefficient de puissance. | 49 |
| Conclusion. | 50 |
| Chapitre IV: Simulation Numérique. | 51 |
| IV.1. Introduction. | 51 |
| IV.2. Méthodologie des simulations. | 51 |

| | |
|---|----|
| IV.3. Introduction au CFD. | 51 |
| IV.4. Description de la géométrie. | 52 |
| IV.5. Maillage de la géométrie sous GAMBIT. | 52 |
| IV.6. Modèle mathématique. | 53 |
| IV.7. Régime d'écoulement du fluide. | 55 |
| IV.8. Propriétés de l'air. | 58 |
| IV.9. Conditions aux limites. | 59 |
| IV.1. Le calcul itératif. | 59 |
| IV.11. Simulation numérique à deux dimensions (2D). | 60 |
| IV.11.1. Simulation numérique de la maquette N° 1 (système à une pale). | 60 |
| a). Résultats de la simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=0^\circ$ pour $V=20,3$ m/s. | 60 |
| b). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=5^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 61 |
| c). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=10^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 62 |
| d). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=15^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 63 |
| e). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=20^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 64 |
| IV.11.2. Simulation numérique de la maquette N° 2 (système à deux pales). | 65 |
| a). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 65 |
| b). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=15^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 66 |
| c). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=30^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 67 |
| d). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=45^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 68 |
| IV.12. Simulation numérique à trois dimensions (3D). | 69 |
| a). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=0^\circ$. | 69 |
| b). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=5^\circ$. | 69 |
| c). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=10^\circ$. | 70 |
| d). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=15^\circ$. | 70 |
| e). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=20^\circ$. | 71 |
| Conclusion. | 71 |
| Chapitre V : Confrontation des Résultats. | 72 |
| V.1. Introduction. | 72 |
| V.2. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques obtenus. | 72 |
| V.2.1. Comparaison des courbes du coefficient de dépression (-Cp). | 72 |
| V.2.2. Comparaison de valeurs numériques et expérimentales de Cz et Cx en 3D. | 73 |
| a) courbes de Cz. | 73 |
| b) courbes du coefficient de traînée Cx (N). | 74 |
| V.2.3. Comparaisons des valeurs numériques et expérimentales de Cz et Cx pour la maquette II (système à deux pales). | 74 |
| a) courbes du coefficient de portance Cz . | 74 |
| b) Courbes du coefficient de traînée Cx. | 75 |
| c) courbes du coefficient de puissance Cp. | 75 |
| V.3. Conclusion. | 76 |
| Conclusion Générale. | 77 |
| Références Bibliographiques. | |
| Références Webographiques. | |
| Annexes. | |

Notations et symboles

Lettres latines:

C_p: Coefficient de pression.

C_L, C_x: Coefficient de traînée.

C_D, C_z: Coefficient de portance.

CDF : Coefficient de traînée relié à la friction.

CT : Coefficient tangentiel.

CP : Coefficient de puissance.

d: Longueur et largeur de la veine d'essai (m)

e: Epaisseur du profil (m)

g: Accélération de la pesanteur (m/s²)

i : Angle d'incidence (°)

*l*_o : Corde de l'aile (m)

L: Envergure de l'aile (m)

m: Masse (Kg)

m : Point matériel

Oxyz: Système d'axes de coordonnées cartésiennes

O_y : axe transversal dans le plan de l'aile

O_z : axe vertical perpendiculaire à la surface de l'aile

L , P: Portance (N)

R : Résistance nominale de la jauge

r : rayon vecteur (m)

Re: Nombre de REYNOLDS

A, S: Surface de l'aile (m²)

D, T: Traînée (N)

U, V_o: Vitesse d'écoulement libre (m/s)

W : vitesse angulaire (rad/s)

Lettres grecques:

α : Angle d'incidence (°)

$\Delta h, \Delta z$: Différence des hauteurs d'huile lues sur le manomètre (mm)

ε : Longueur des jauges de contrainte

λ : Allongement de l'aile(m)

ρ_H : Masse volumique de l'huile (Kg/m³)

ρ : Masse volumique de l'air (Kg/m³)

γ : angle d'attaque

Indices:

d : décrochage

x,y,z : Projections suivant les axes

| | |
|---|----|
| Figure III-17 : courbes de portances (a) intrados (b) extrados. | 42 |
| Figure III-18 : les courbes de trainées (a) intrados (b) extrados. | 43 |
| Figure III-19 : la variation du C_z en fonction de l'incidence des pales verticales. | 45 |
| Figure III-20 : la variation de la trainée en fonction de l'incidence pour les pales verticales. | 45 |
| Figure III-21 : L'évolution du coefficient de puissance pour la cas des pales verticales. | 46 |
| Figure III-22 : la turbine de l'éolienne Darrieus inclinée de 6° . | 47 |
| Figure III-23 : L'évolution du C_z pour les pales inclinées de 6° . | 48 |
| Figure III.24 : l'évolution du C_x pour les pales inclinées de 6° . | 48 |
| Figure III.25 : l'évolution du coefficient de puissance dans le cas des pales inclinées de 6° . | 49 |
| Figure IV.1 : Description de la géométrie. | 52 |
| Figure IV.2 : Maillage triangulaire de la géométrie considérée. | 54 |
| Figure IV.3 : Le maillage de la géométrie. | 55 |
| Figure IV.4 : Activation de la commande Scale. | 56 |
| Figure IV.5 : choix du type de Solveur. | 57 |
| Figure IV.6 : Sélection du modèle de turbulence. | 58 |
| Figure IV.7 : Initialisation de la solution. | 59 |
| Figure IV.8 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ autour du profil NACA 0015 à l'incidence $i=0^\circ$ Pour $V_o=20,3$ m/s. | 60 |
| Figure IV.9 : Valeurs du coefficient de dépression ($-C_p$) suivant l'axe des abscisses O_x à l'extrados et l'intrados du profil à $i=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 60 |
| Figure IV.10 : Contours du coefficient de dépression ($-C_p$) autour du profil à $i=5^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 61 |
| Figure IV.11 : Valeurs du coefficient de dépression $-C_p$ suivant l'axe des abscisses O_x à l'extrados et l'intrados du profil NACA 0015 à $i=5^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 61 |
| Figure IV-12 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ autour du profil NACA 0015 à l'incidence $i=10^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 62 |
| Figure IV-13 : Valeurs du coefficient de dépression $-C_p$ à l'extrados et l'intrados du Profil NACA 0015 avant le décrochage pour $i=10^\circ$ à $V_o=20,3$ m/s. | 62 |
| Figure IV-14 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ autour du profil NACA 0015 à l'incidence $i=15^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 63 |
| Figure IV-15 : Valeurs du coefficient de dépression $-C_p$ à l'extrados et l'intrados du profil NACA 0015 considéré pour $i=15^\circ$ à $V_o=20,3$ m/s. | 63 |
| Figure IV-16 : Evolution de l'écoulement au voisinage du bord d'attaque du profil NACA 0015 avec un décalage léger du point d'arrêt vers l'intrados à $i=20^\circ$. | 64 |
| Figure IV-17 : Visualisation de l'écoulement au voisinage du bord de fuite à l'incidence $i=20^\circ$ Pour $V_o=20,3$ m/s. | 64 |
| Figure IV-18 : visualisation de l'écoulement au voisinage des deux bords à l'incidence $i=20^\circ$ pour $V_o=20,3$ m /s. | 65 |
| Figure IV-19 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 65 |
| Figure IV-20 : visualisation de l'écoulement au voisinage des deux bords pour chaque profil à l'incidence $i=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 66 |
| Figure IV-21 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i=15^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 66 |
| Figure IV-22 : Visualisation de l'écoulement au voisinage des deux bords pour chaque profil à l'incidence $i=30^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 67 |
| Figure IV-23 : contours du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i=30^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 67 |
| Figure IV-24 : contours de la turbulence au voisinage de maquette N°2 à l'incidence $i=30^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 68 |
| Figure IV-25 : Visualisation de l'écoulement au voisinage des deux bords pour chaque profil à l'incidence $i=45^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 68 |
| Figure .IV.26 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ du système à deux pales verticales à l'incidence $i=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 69 |

| | |
|---|----|
| Figure .IV.27 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ du système à deux pales verticales à l'incidence $i=5^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 69 |
| Figure IV.28 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ du système à deux pales verticales à l'incidence $i=10^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 70 |
| Figure IV.29: Contours du coefficient de dépression $-C_p$ du système à deux pales verticales à l'incidence $i=15^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 70 |
| Figure IV.30 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ du système à deux pales verticales à l'incidence $i=20^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s. | 71 |
| Figure V-1 : Comparaison des valeurs Numériques et expérimentales du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i=5^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s, du profil NACA0015. | 72 |
| Figure V-2 : Comparaison des valeurs numériques et expérimentaux du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i=10^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s, du profil NACA0015. | 73 |
| Figure V-3 : comparaison entre les valeurs numériques en 3D et expérimentales du coefficient de portance C_z pour l'éolienne complète. | 73 |
| Figure V-4 : comparaison entre les valeurs numériques en 3D et expérimentales du coefficient de traînée C_x et pour l'éolienne complète. | 74 |
| Figure V.5 : comparaison des valeurs expérimentales du coefficient de portance C_z des deux rotors Darrieus (à pales verticales et inclinées). | 74 |
| Figure V.6 : comparaison des valeurs expérimentales du coefficient de traînée C_x des deux rotors Darrieus (à pales verticales et inclinées). | 75 |
| Figure V.7: comparaison des valeurs expérimentales du coefficient de puissance CP des deux rotors Darrieus (à pales verticales et inclinées). | 75 |

Liste des tableaux :

| | |
|--|------|
| Tableau I: Evolution de la capacité mondiale d'énergie éolienne (1995-2012). | 13 |
| Tableau III.1 : Localisation des prises de pression pour l'aile étudiée. | 36 |
| Tableau Annexe .1 : Coordonnées du profil NACA0015. | T.1 |
| Tableau Annexe .2 : les résultats du coefficient de dépression ($-C_p$) à l'extrados pour une vitesse $V_o=20,3$ m/s. | T.5 |
| Tableau Annexe.3 : des valeurs expérimentales des coefficients de portance C_z et de traînée C_x pour $V_o=20,3$ m/s. | T.6 |
| Tableau Annexe .4 : les valeurs expérimentales des coefficients de portance C_z , traînée C_x et de puissance C_p , à pales verticales pour une vitesse $V_o=20,3$ m/s. | T.8 |
| Tableau Annexe .5 : les valeurs expérimentales des coefficients de portance C_z , de traînée C_x et de puissance C_p , à pales inclinées pour une vitesse $V_o=20,3$ m/s. | T.10 |

Introduction Générale

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité. A l'aube du vingtième siècle, les premières éoliennes rapides entraînant des générateurs électriques font leur apparition en France puis se répandent dans le monde. Leur invention en 1925, est l'œuvre de l'Académicien français G.J.M. Darrieus.

Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un grand succès. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque, à la réalisation de ses desseins. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, leur exploitation a été négligée et souvent abandonnée. De leur côté, en raison de la présence sur le marché, des nouveaux moyens de production d'énergie, les aérogénérateurs n'arrivent pas à s'imposer. L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée.

Cependant, l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures, la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité. Son exploitation peut s'avérer très rentable dans les régions ventées. Des machines d'une puissance supérieure à 1000 KW ont été construites et éprouvées et il existe de nombreux projets.

La recherche en énergie éolienne a débuté en 1969. Elle était surtout axée sur le développement de petites unités. Dans le cas du rotor Darrieus il réapparaît en 1965, pour être étudié par les Canadiens South P. et Rangi R.S. du N.R.C. depuis, de nombreux groupes de chercheurs à travers le monde travaillent pour l'application de ces projets à l'échelle industrielle.

L'écoulement de l'air autour des pales du rotor en rotation crée des effets aérodynamiques très complexes. On note particulièrement le passage d'une pale dans le sillage à l'aval, l'influence d'une pale par rapport à une autre, le phénomène du décrochage dynamique (d.d.) et les phénomènes tridimensionnels de l'écoulement.

Le décrochage dynamique est associé à une série de phénomènes aérodynamiques se produisant lorsqu'un profil, un élément de pale ou une aile, se trouve soumis à des conditions aérodynamiques variables dans le temps. Ce phénomène est provoqué par l'émission ou le passage des tourbillons sur le profil aérodynamique. Il se traduit par des chutes de portance ou des accroissements brutaux de moments de tangage. Le plus souvent ce phénomène a lieu lorsqu'on augmente assez rapidement l'incidence du vent relatif. Une diminution du nombre de Reynolds lorsque la pale est en incidence peut également amener un décrochage dynamique.

Le processus physique de la formation et de l'alimentation des tourbillons d'extrados reste encore mal défini et donc difficile à traduire par le calcul. Il faut des expériences regroupant des moyens de mesures très complets pour pouvoir interpréter au mieux les phénomènes complexes liés à de telles configurations.

Les aspects tridimensionnels des configurations de décrochage dynamique restent encore un sujet peu abordé dans le détail ; il est indispensable de s'assurer au moins que la transposition des résultats acquis en écoulement bidimensionnel soit suffisamment précise pour la résolution des problèmes pratiques qui se posent aux constructeurs.

De nombreux travaux de recherche ont été effectués, dans le but de mieux comprendre ces phénomènes. La grande majorité de ces travaux concernent les pales d'hélicoptères, ou les mêmes phénomènes rencontrés différent de ceux de l'éolienne Darrieus.

Parmi les études sur l'éolienne Darrieus on trouve beaucoup de modèles théoriques. Les références, présentent une description détaillée des différents modèles existants et qui peuvent être classés en trois groupes :

a) Modèle du tube de courant (stream- tube model).

La vitesse axiale à travers le rotor est obtenue à partir du flux moyen du moment à l'intérieur du tube.

b) Modèle à sillage fixe (fixed wake model).

Les émissions tourbillonnaires sont traitées comme des feuillets de tourbillons indépendants du temps, de positions fixes et d'intensités inconnues.

c) Modèle de tourbillons libres (free vortex model).

Le sillage consiste en des tourbillons libres émis par les pales et se déplacent vers l'aval dans le sillage.

Si ces modèles présentent des résultats intéressants pour l'analyse des performances du rotor Darrieus, ils n'en demeurent pas autant pour expliquer certains phénomènes tel que le phénomène du décrochage dynamique et les phénomènes de tridimensionnalité.

La connaissance des caractéristiques du rotor Darrieus a suscité l'attention de plusieurs chercheurs. Ainsi en 1981, des études expérimentales portant sur l'aérodynamique du rotor Darrieus ont été effectuées dans le laboratoire d'aérodynamique de l'université de Sherbrooke.

En 1981 et 1982 les premières mesures de forces aérodynamiques sur des pales verticales de rotor Darrieus ont été obtenues dans l'air. en 1983, la distribution de pression a été mesurée sur un profil NACA 0018 simulant en soufflerie la cinématique du rotor Darrieus.

Pour obtenir une vision globale des événements qui se succèdent, dans un écoulement dépendant du temps, des techniques visuelles ont été utilisées. Le résultat représentant le phénomène observé peut être confronté aux résultats basés sur des hypothèses.

La présente étude est une suite et un complément aux travaux précédents. Les buts visés par cette étude sont :

- 1- Mesurer les forces aérodynamiques sur les pales du rotor en rotation en fonction de leur azimut, pour différents angles d'inclinaison.
- 2- Déterminer l'influence d'un certain nombre de paramètres, caractérisant l'écoulement de l'air, sur les forces aérodynamiques mesurées. Les paramètres étudiés sont :
 - l'angle d'inclinaison de la pale
 - la vitesse spécifique de l'air.
 - le nombre de Reynolds.
- 3- Déterminer les coefficients de traînée et de portance statiques dans les mêmes conditions des essais dynamiques.

La conception des montages d'essai statique a été la première étape de ce travail. La description de l'ensemble des montages est donnée au chapitre 3.

-Les instruments utilisés, constituant la chaîne de mesures, sont décrits au chapitre 3.

-Les calibrations ont nécessité une manipulation rigoureuse, les différents détails de cette étape se trouvent décrits au chapitre 3.

-L'acquisition, le traitement du signal et le stockage des données constituent une étape particulièrement importante à ce travail. La démarche suivie est présentée de façon détaillée dans le même chapitre.

La résolution numérique des équations de continuité et les équations de Navier-Stokes par le code de calcul Fluent, qui seront présentés dans le chapitre 4.

L'analyse, l'influence de plusieurs paramètres et les comparaisons avec la littérature font finalement l'objet de larges discussions au chapitre 5.

Chapitre I

Généralités sur les éoliennes et l'aérodynamique

I.1. Notions sur les énergies renouvelables

I.1.1. Introduction:

Les énergies renouvelables représentent la meilleure solution pour le développement réellement durable, elles apparaissent comme la source propre par excellence. L'inépuisement des ressources renouvelables et sa propreté sont les meilleurs atouts de ses énergies. Aujourd'hui, près de 86% de la production électrique mondiale est d'origine fossiles ou de la fission nucléaire d'uranium 235, qui sont des énergies épuisables. Elles contribuent ainsi abondamment à la production de déchets nuisibles pour l'environnement. Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres.

I.1.2. Présentation des différents types de ressources [1]:

Biomasse: La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Différents types sont à considérer : le bois – énergie, les biocarburants, le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde.

Géothermie: Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Dans certaines zones favorables, on trouve, en effectuant des forages plus ou moins profonds, de l'eau à température élevée. Dans la plage de 150-350 °C, on parle de géothermie haute énergie. L'eau est pompée vers la surface et passe dans des échangeurs; la vapeur produite est ensuite turbinée comme dans les centrales thermiques classiques. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1000 °C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères. [14]

Photovoltaïque: Elle est obtenue à partir du rayonnement solaire, et c'est la conversion de l'énergie solaire en électrique à l'aide de panneaux photovoltaïques composés de cellules photovoltaïques à base de silicium qui ont la capacité de transformer les photons en électrons et la création d'un courant continu directement utilisable.

L'énergie de la mer : L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut-être transformée en courant

électrique à l'aide de dispositifs et de technologie adéquate pour la conversion de cette énergie mécanique en énergie électrique.

L'énergie éolienne: C'est l'une des plus anciennes sources d'énergie. L'énergie éolienne résulte de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique avec des systèmes qui sont appelés les éoliennes.

I.2. Généralités sur les éoliennes :

I.2.1. Historique:

Le mot éolien vient du terme grec « Eole ». Dans la Grèce Antique, Eole était le dieu du vent. L'énergie éolienne est l'énergie tirée du vent à l'aide d'un dispositif nommé aérogénérateur c'est-à-dire une éolienne, un moulin à vent. Elle fait partie des énergies dites : énergies renouvelables. [1]

L'énergie du vent est utilisable de trois manières :

- Pour faire avancer les voiliers, pour puiser de l'eau ou encore pour moudre le grain dans un moulin : conservation de l'énergie mécanique.
- Par l'intermédiaire d'une éolienne, l'énergie mécanique du vent est transformée en énergie électrique utilisable par les hommes, ce qui est le sujet de ce projet.
- Comprimer, pomper des liquides : transformation en force motrice.

I.2.1.1. Un peu d'Histoire:

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisée par les hommes. Elle était présente bien avant l'exploitation du charbon et d'autres énergies fossiles. Son abandon est dû en principe à l'apparition de la machine à vapeur, du moteur à explosion et diesel qui fournissaient à l'homme une énergie mécanique bien plus importante et plus indépendante que l'énergie éolienne.

Les premières éoliennes ou aérogénérateurs étaient plus connus sous le nom de moulins à vent. Ce fut durant l'antiquité que l'on a vu apparaître les premiers moulins notamment en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine. Certains scientifiques s'accordent à dire qu'ils datent de sept siècles avant Jésus-Christ. Ils étaient utilisés principalement pour puiser l'eau du sol afin d'irriguer les cultures, et pour moudre le grain.

Il a fallu attendre le Moyen-âge pour les voir apparaître en Europe, sans doute permis grâce aux Croisés qui revenaient de l'Asie mineure. Leur utilisation sert encore à moudre le blé et quelques autres grains. En Hollande, ils seront utilisés pour assécher les polders. L'éolienne se développe aussi à l'étranger. Elle fait sa première apparition en Amérique en 1870. La production d'électricité à partir de l'énergie du vent date du début du 20ème siècle et est permise par l'ingénieur français Darrieus. Mais comme nous le verrons, la part de l'énergie produite à partir d'aérogénérateurs est faible comparé aux énergies fossiles. Cet écart se creuse depuis 1830, date à laquelle les énergies fossiles ont pris le pas sur cette source d'énergie.

Mais alors voilà que depuis quelques années cette énergie délaissée depuis des décennies revient d'actualité. En effet, les hommes ont pris conscience que les ressources en énergies fossiles étaient limitées sur terre mais que le vent soufflerait toujours. Ils ont pris conscience qu'à l'heure du réchauffement climatique, elle était une énergie non émettrice de gaz à effet de serre. Et ils ont pris conscience que c'était une énergie gratuite. [6]



Figure I-1: Moulins à vent dans la région de *La Mancha*, Espagne

I.2.2. Objectifs :

- Créer un banc d'essai éolien à partir de plusieurs types d'éoliennes en ayant comme support la soufflerie de mécanique des fluides.
- Conception, modélisation, étude, comparaison d'une éolienne à axe vertical de type Darrieus.
- A partir du banc d'essai éolien, réaliser des mesures de puissances, de trainées, de vitesses de rotations.
- Exploiter les résultats en comparant les caractéristiques principales avec les éoliennes génératrices d'électricité, à pales inclinées. [2]

I.2.3. Avantages et inconvénients des éoliennes [1], [5], [14] :

I.2.3.1. Avantage:

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie sans risque contrairement aux énergies fossiles et nucléaire.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement en ne laissant pas de trace.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux énergies fossiles,
- les générations futures pourront toujours en bénéficier.

I.2.3.2. Désavantage:

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- Le coût de cette technologie reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

I.2.4. Structure d'une éolienne:

- 1 : pales, 2 : moyeu rotor,
 3 : nacelle, 4 : cardan,
 5 : transmission,
 6 : multiplicateur de vitesse,
 7 : frein à disque,
 8 : accouplement,
 9 : génératrice,
 10 : radiateur de refroidissement,
 11 : centrale de mesures du vent,
 12 : contrôle,
 13 : centrale hydraulique,
 14 : mécanisme d'orientation face au vent,
 15 : paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque,
 16 : capot, 17 : mât.

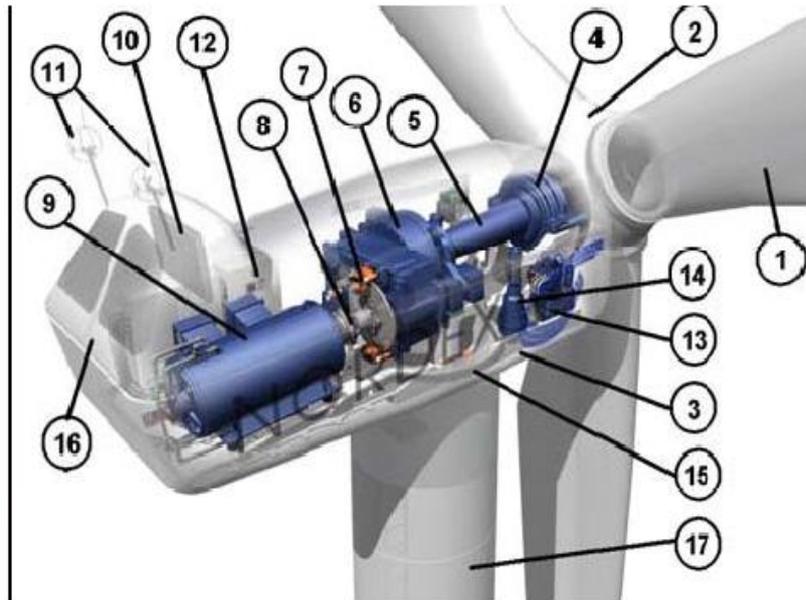


Figure I.2: Structure d'une éolienne.

I.2.4.1. Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne se compose de six éléments principaux :

- Un rotor qui sert à convertir d'une manière aérodynamique l'énergie du vent en une énergie mécanique sur un arbre tournant lentement.
- Une boîte à vitesse qui sert à accroître la vitesse de l'arbre du rotor pour le générateur.
- Un générateur d'électricité.
- Un système de commande et de protection qui sert à optimiser le rendement et à conserver l'éolienne en état de fonctionnement dans des limites de sécurité.
- Une tour qui permet d'élever le rotor au-dessus du sol, où la vitesse du vent est plus élevée et les effets des obstacles locaux sont minime.
- Une base qui soutient l'éolienne. [6]

I.2.5. Les différents types d'éoliennes :

Il existe deux grands types d'aéromoteurs :

- ceux à axe horizontal
- ceux à axe vertical

I.2.5.1. Axe horizontal :

Parmi les éoliennes à axe horizontal [7], se distinguent les aéromoteurs classiques tripales. Cette conception s'est imposée sur le marché mondial pour des raisons de stabilité de la structure.



Figure I.3: Eolienne à axe horizontal.



Figure I.4: Eoliennes à axe horizontal.

Nous trouvons dans cette famille d'aéromoteurs deux catégories, « on shore » et « off shore », ces termes américains permettent de distinguer si l'éolienne est implantée sur terre ou à la surface de la mer.

Ces dernières présentent de nombreux avantages :

Au niveau des nuisances sonores car elles sont éloignées des habitations.

De plus, les vents marins sont plus nombreux, plus forts et surtout plus réguliers. Ce sont des conditions essentielles pour la bonne production d'électricité. En revanche, ces éoliennes sont beaucoup plus difficiles à installer et donc plus coûteuses. [6]



Figure I.5 : Aérogénérateur à axe horizontal de type Darrieus.

Sur la photo [I-5] ci-dessus, on observe un aéromoteur à axe horizontal implanté sur la toiture d'un bâtiment. La particularité de cette structure est que les six pales forment un « fouet ».

I.2.5.2. Axe vertical :

Parmi les aéromoteurs à axe vertical, se distingue deux catégories. Les éoliennes dites de type Savonius et celles dites de type Darrieus.

Un des principaux atouts de ces aéromoteurs est le générateur qui peut être placé au sol, ce qui simplifie la structure et la construction. Les éoliennes de type Savonius ont l'avantage de démarrer à de faible vitesse du vent contrairement aux éoliennes de type Darrieus. [6]



Figure I.6 : Eolienne de type Savonius.



Figure I.7 : Eolienne de type Darrieus.

I.2.5.2.1. Principe de l'éolienne verticale:

Les pales de l'éolienne verticale sont également appelée VAWT (Vertical Axis Wind Turbin) elles tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique. Cette éolienne est moins répandue que sa sœur à axe horizontale mais tend progressivement à la remplacer. Son principal atout est sa capacité à capter les vents faibles, car elle n'a pas besoin de rafale ou de vent puissant, ou bien de violent pour son fonctionnement, elle n'a pas besoin aussi de l'orientation par rapport au vent. De plus elle demande moins d'espace qu'une éolienne à axe horizontal, et elle peut fonctionner quelque soit le sens du vent.

I.2.5.2.2. Les avantages de l'éolienne verticale de type Darrieus :

- Elle peut être installée dans des zones très venteuses, puisqu'elle peut subir des vents dépassant les 220 km/h.
- En outre, cette éolienne émet moins de bruit qu'une éolienne horizontale et occupe moins de place. De plus, vous pouvez l'installer directement sur le toit.
- Autre aspect pratique, son générateur peut ne pas être installé en haut de l'éolienne, au centre des rotors, mais en bas de celle-ci. Ainsi plus accessible, il peut être vérifié et entretenu plus facilement.

Eolienne Darrieus

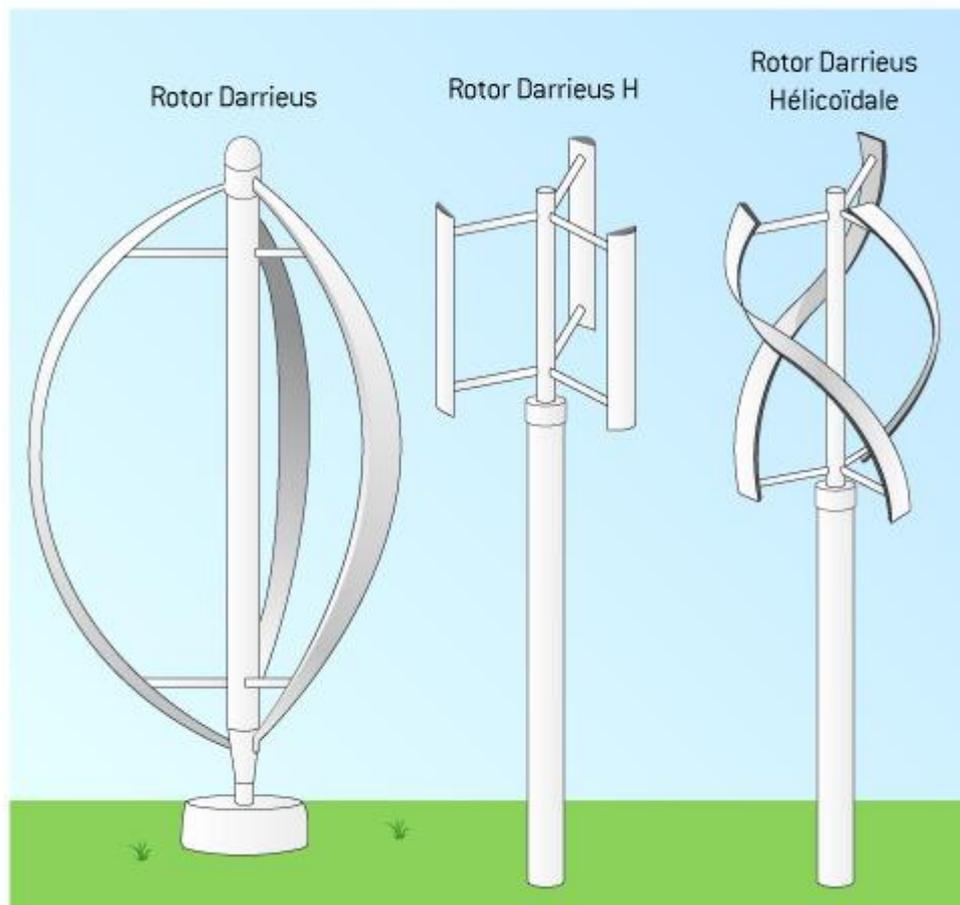


Figure I.8 : Différentes éoliennes de type Darrieus.

I.2.6. Comparaison :

Sur le graphique [figure I-9] ci-dessous, on remarque dans un premier temps que les aéromoteurs à axe horizontal et à axe vertical de type Darrieus ont un meilleur rendement aérodynamique.

Les aéromoteurs « américains » ont un nombre de pales important car ils évoluent à de faibles vitesses de rotation.

Ils produisent un couple aérodynamique important afin de produire de l'énergie mécanique (application de pompage).

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

Remarque : Le tip-speed ratio est le rapport entre la vitesse de rotation et la vitesse du vent.

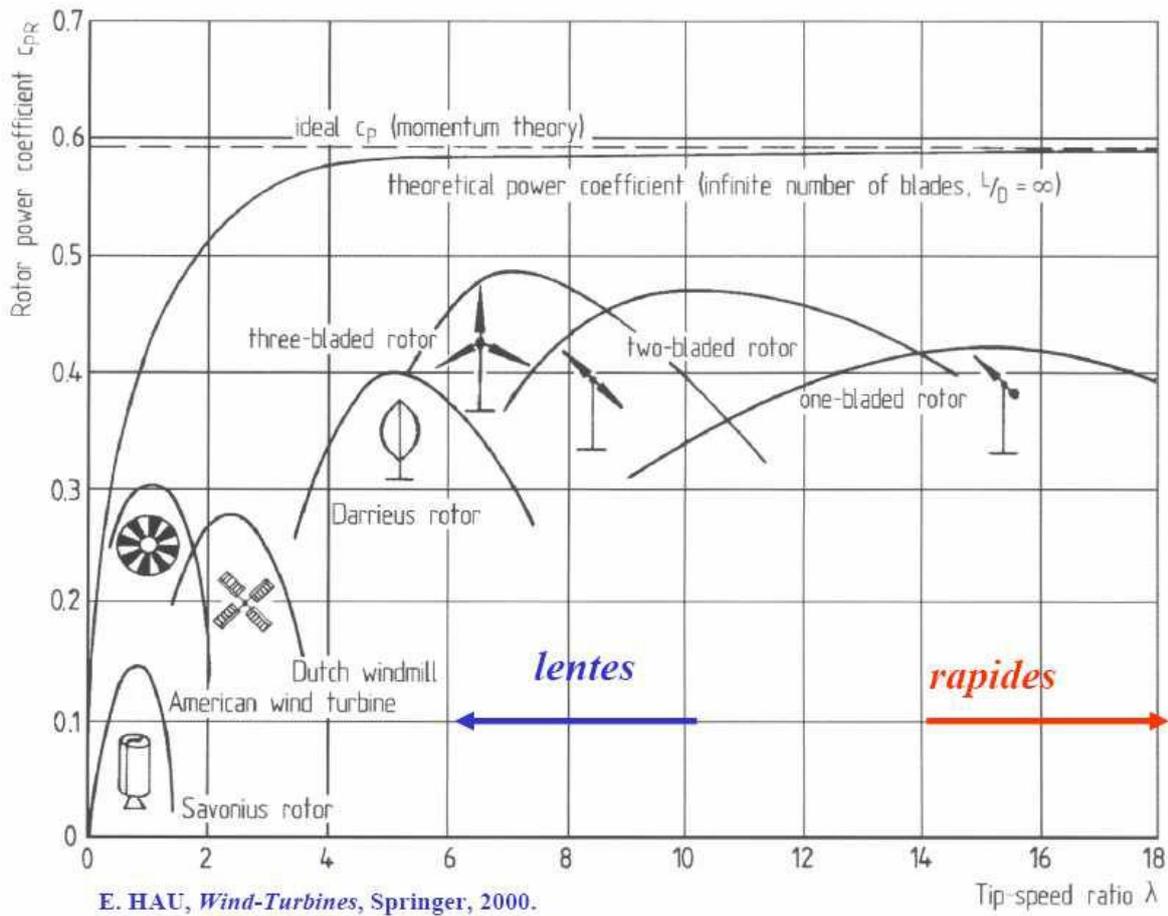


Figure I.9 : Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ .

I.2.7. Situation actuelle de l'énergie éolienne:

Le rapport annuel publié par le GWEC (Global Wind Energy Council) pour l'année 2012 montre l'énorme intérêt vouée pour cette énergie à travers le monde, en effet la puissance totale installée dans le monde jusqu'à cette année est estimée à plus de 282,5 GW contre 237 GW pour l'année précédente (2011) et cela malgré la crise financière qui a secoué le monde durant ces 5 dernières années.

| Année | Capacité (MW) | Croissance (MW) | Croissance (%) |
|-------|---------------|-----------------|----------------|
| 1995 | 4 800 | - | - |
| 1996 | 6 100 | 1 300 | 27.1 |
| 1997 | 7 482 | 1 382 | 22.7 |
| 1998 | 9 670 | 2 188 | 29.3 |
| 1999 | 13 699 | 4 029 | 64.3 |
| 2000 | 18 040 | 4 341 | 31.7 |
| 2001 | 24 318 | 6 279 | 34.9 |
| 2002 | 31 184 | 6 866 | 28.3 |
| 2003 | 39 333 | 8 150 | 26.2 |

| | | | |
|------|---------|--------|------|
| 2004 | 47 662 | 8 330 | 21.2 |
| 2005 | 59 063 | 11 401 | 24 |
| 2006 | 74 175 | 15 112 | 25.6 |
| 2007 | 93 959 | 19 784 | 26.7 |
| 2008 | 121 247 | 27 289 | 29.1 |
| 2009 | 157 910 | 36 664 | 30.3 |
| 2010 | 194 559 | 36 649 | 23.3 |
| 2011 | 237 029 | 42 471 | 21.9 |
| 2012 | 282 410 | 45 381 | 19.2 |

Tableau 1 : Evolution de la capacité mondiale d'énergie éolienne (1995-2012).

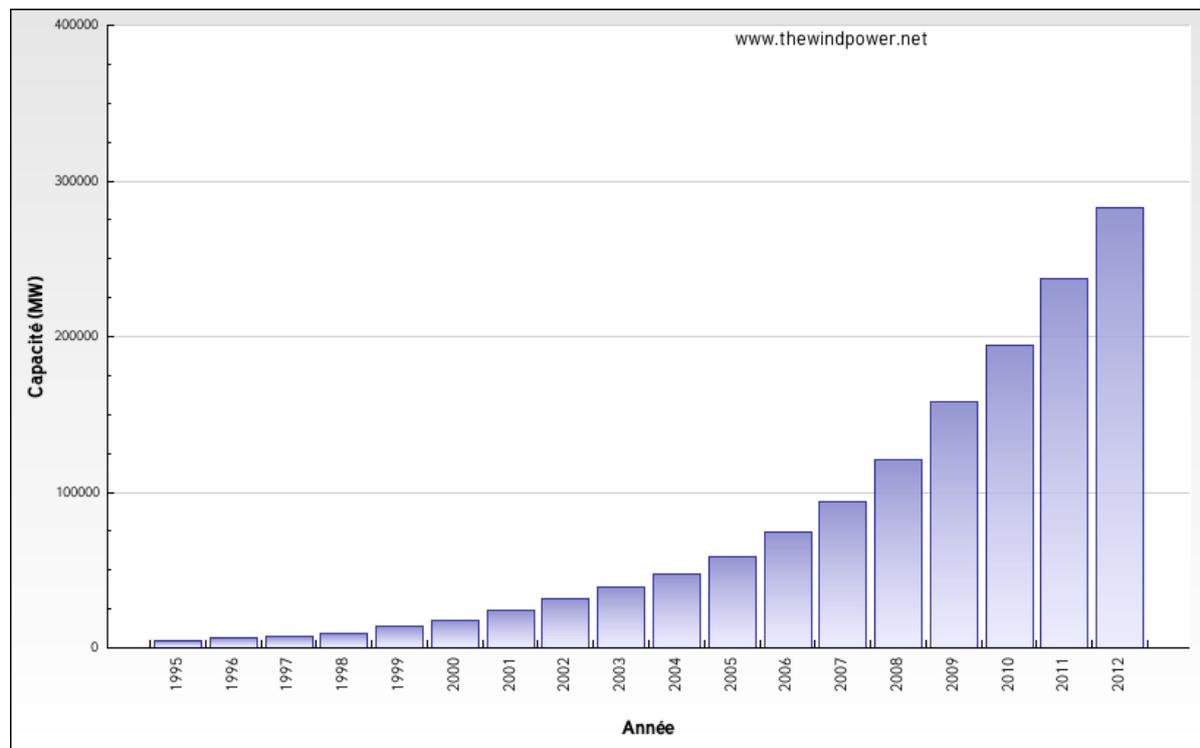


Figure I.10 : Evolution de la capacité d'énergie éolienne (1995-2013).

Les installations records nouvellement raccordées aux Etats-Unis et en Europe ont conduit à une puissance éolienne mondiale cumulée de 44,8 GW en 2012, soit 10% de plus qu'en 2011. La capacité mondiale installée a atteint 282,5 GW, soit une hausse cumulée de près de 19%. Les experts prévoient toutefois un ralentissement modéré en 2013, suivie d'une reprise à partir de 2014. Avec une capacité globale en croissance de 13,7% en moyenne jusqu'en 2017, elle aura presque doublé à 536 GW. [11]

Les États-Unis ont repris la place de numéro 1 sur les marchés mondiaux en 2012 pour la première fois depuis 2009, sortant modestement la Chine de 164 MW. Cependant, la fin de la prolongation du crédit d'impôt au 1er janvier 2013 signifie que le marché américain de l'éolien chutera brutalement en 2013, mais avec une forte reprise attendue en 2014. Les installations record d'Europe en 2012 ont aussi peu de chances d'être reconduits en 2014, en raison de l'incertitude et des volte-face politiques. [11]

I.2.8. Recherche et développement :

I.2.8.1. Quelques chercheurs scientifiques

Plusieurs savants sont à l'origine d'avancés mathématiques, physique et technologiques permettant le développement des éoliennes.

I.2.8.2. Albert Betz et sa théorie [2]

Albert Betz (1885-1968) est un physicien allemand, pionnier des technologies éoliennes. Il obtient en 1910 son diplôme d'ingénieur naval de l'Université technique de Berlin. En 1911, Betz devient chercheur au laboratoire d'aérodynamique de l'Université de Göttingen, où il obtient en 1919 son Doctorat pour des travaux sur «la minimisation des pertes d'énergie des hélices de propulsion des bateaux».

Il publie en 1920 l'article *Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren* («Maximisation de l'exploitation potentielle théorique du vent dans les moteurs à vent»).

La Formule de Betz démontre qu'indépendamment du modèle de turbine, seuls 16/27ièmes (environ 59%) de l'énergie cinétique peuvent être transformés en énergie mécanique. Son livre *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen* («L'énergie éolienne et son exploitation dans les moulins à vent»), publié en 1926, donne un bon aperçu de la connaissance de l'énergie et des turbines éoliennes à cette époque. La démonstration de la limite de Betz sera démontrée en **annexe 1**.

I.2.8.3. Waloddi Weibull [2][6]

Waloddi Weibull (1887-1979) ; en 1924, il devient professeur et obtient huit ans plus tard son Doctorat à l'université d'Uppsala. Il est employé dans différentes sociétés suédoises ou allemandes comme chercheur (roulements à billes et à rouleaux, marteau-piqueur) et ingénieur consultant.

En 1939, il publie ses travaux sur la distribution de Weibull, utilisée en probabilité et statistique. Puis en 1941, il est nommé professeur de physique appliquée à l'Institut royal de Stockholm, grâce à la société de fabrique d'armes Bofors.

En 1951, il présente sa plus célèbre étude devant l' "American Society of Mechanical Engineers", à partir de sept études de cas.

Ses travaux seront récompensés par la médaille d'or de l'ASME en 1972 et par la grande médaille d'or de l'Académie royale des sciences de Suède en 1978 pour l'ensemble de son travail (plus de 70 publications). La démonstration de la théorie de Weibull sera elle aussi démontré en **annexe 2**.

I.2.8.4. Georges Darrieus, ingénieur français [2]

Georges Darrieus (1888-1979), est un ingénieur français.

Il fut membre de l'Académie des sciences. Il est connu principalement pour son éolienne à axe vertical, robuste et indépendante de la direction du vent.

I.2.9. Approche par la mécanique des fluides:

I.2.9.1. Les pales : système de récupération de l'énergie du vent [2]

Une pale d'aéromoteur n'est pas comparable du point de vue de l'utilisation à une aile d'avion. Elle a un objectif essentiellement moteur contrairement au rôle porteur dans l'aéronautique. Comme on peut le voir sur l'image ci-dessous, l'extrados est plus long que l'intrados, ce qui a pour conséquence que le fluide a une vitesse plus importante au niveau de l'extrados et donc crée une différence de pression.

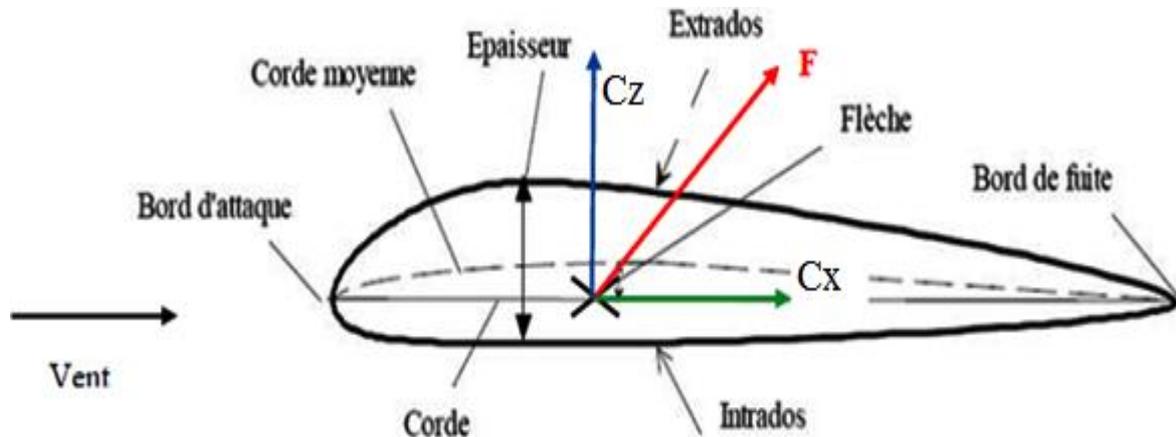


Figure I.11 : Forces aérodynamiques.

Cette différence de pression est à l'origine de la portance. Une autre force rentre en jeu : la trainée. Les fabricants d'éolienne ont pour objectifs de réduire au maximum la trainée car elle agit comme un frein. [2], [6]

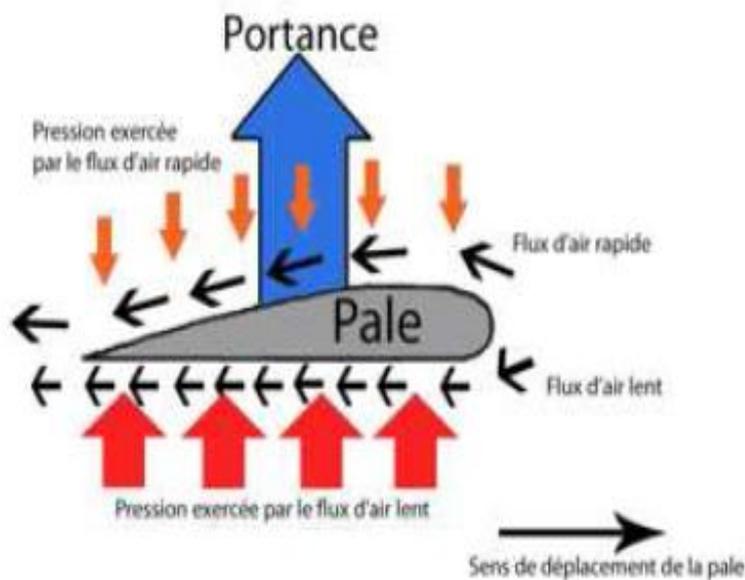


Figure I.12 : Forces de pressions exercées sur le profil.

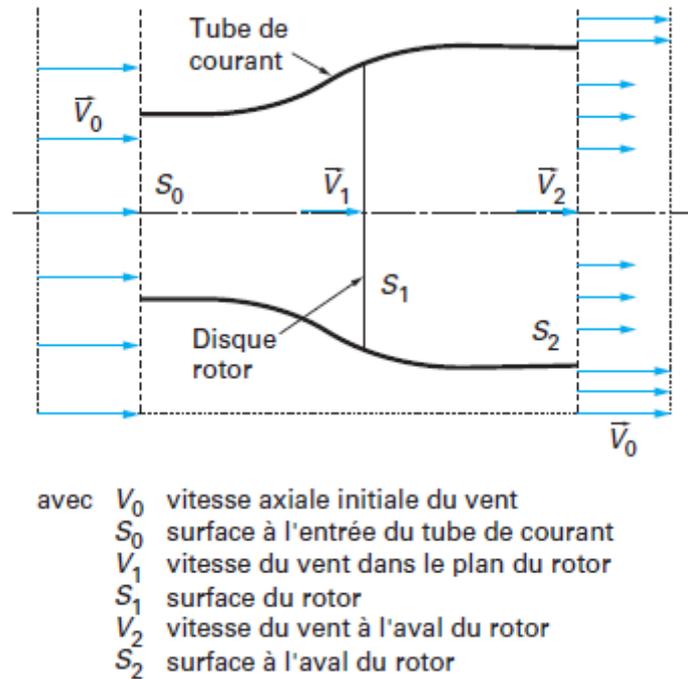


Figure I.13: Disque actuateur.

I.2.9.2. Actions mécaniques génératrices et résistantes :

Une aile est soumise à deux grands types de forces :

- la force de portance

$$F_z = \frac{1}{2} C_z \rho S V^2 \quad (\text{I.1})$$

Avec :

F_z : force de portance (N)

C_z : coefficient de portance

ρ : masse volumique du fluide (kg.m⁻³)

S : surface de référence (m²)

V : vitesse du fluide (m.s⁻¹)

- la force de traînée

$$F_x = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2 \quad (\text{I.2})$$

Avec :

F_x : force de traînée (N)

C_x : coefficient de traînée

ρ : masse volumique du fluide (kg.m⁻³)

S : surface de référence (m²)

V : vitesse du fluide (m.s⁻¹)

L'action aérodynamique totale ou résistance de l'air est la résultante de ces deux forces

$$F = \frac{1}{2} C_r \rho S V^2 \quad (\text{I.3})$$

Avec :

F : force totale (N)

C_r : coefficient aérodynamique total

ρ : masse volumique du fluide (kg.m⁻³)

S : surface de référence (m²)

V : vitesse du fluide (m.s⁻¹)

Les trois forces sont reliées par les relations :

$$F_x^2 + F_z^2 = F^2 \text{ et } C_x^2 + C_z^2 = C_r^2 \quad (\text{I.4})$$

I.2.9.3. Energies, puissances, rendements :

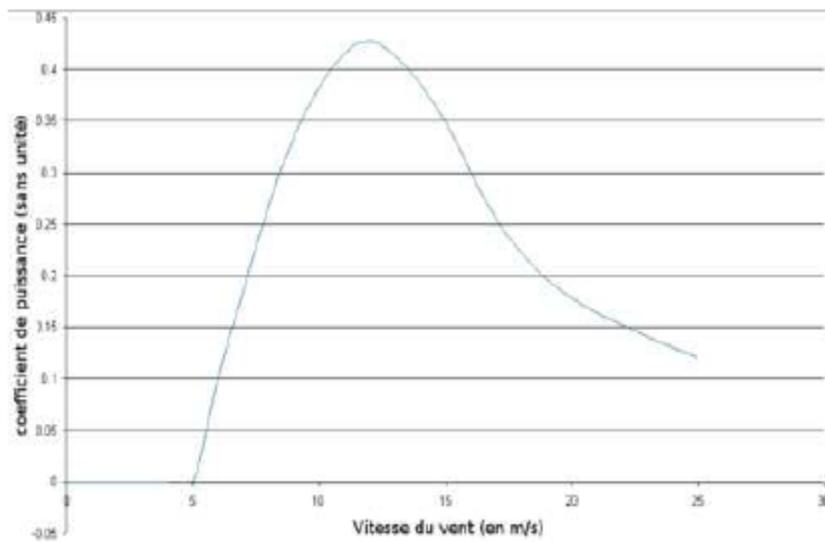


Figure I.14 : Variation du coefficient de puissance.

On peut remarquer qu'une éolienne possède une vitesse optimale de fonctionnement pour laquelle son coefficient de puissance ou rendement est maximum. Ce pic varie selon les caractéristiques de l'éolienne c'est-à-dire la vitesse du vent, le diamètre de son rotor, la charge du système de génération, le profil des pales.

Le C_p ou coefficient de puissance d'une éolienne est égal au rapport de la puissance électrique récupérée en sortie de la génératrice divisé par la puissance totale offert par le vent et auquel est soumis l'aérogénérateur. Afin, d'avoir une approche plus réaliste de ce rendement, il est préférable de prendre en compte le rendement de 60% de la théorie de Betz en remplaçant la puissance totale par la puissance expérimentalement récupérable. La puissance délivrée par le vent dépend de la masse volumique de l'air, de la surface de référence de la turbine, ainsi que de la vitesse du vent. [2], [6]

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{I.5})$$

Il existe donc un rendement entre la puissance du vent et la puissance récupérable théoriquement. Cela est appelé la limite de Betz, c'est-à-dire qu'une éolienne parfaite ne pourra extraire seulement 60 % de la puissance du vent disponible car la vitesse du vent en sortie ne peut être nul, il faut obligatoirement un écoulement d'air en sortie de turbine.

$$P_{\text{Betz}} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{I.6})$$

Par conséquent, on définit le C_p de la manière suivante :

$$C_p = \frac{P_{\text{récupérée}}}{P_{\text{Betz}}} \quad (\text{I.7})$$

Chapitre II

Approche théorique

Introduction :

De nos jours plusieurs organismes reconnus s'intéressent aux éoliennes de type Darrieus, entre autre l'IREQ [8], le CNRS [9] et la NASA [10]. Ces organismes cherchent à modéliser le fonctionnement de tels aérogénérateurs afin de prévoir leur comportement et les puissances soutirables en fonction de certains paramètres d'opération.

II.1. Géométrie de l'éolienne Darrieus:

L'éolienne de type Darrieus comporte généralement deux ou trois pales. Ces pales sont recourbées. Lorsque le rapport de la hauteur du rotor et son diamètre est d'environ 1, on assume la forme de la pale à une parabole. Cette approximation facilite les calculs et n'est pas une restriction essentielle.

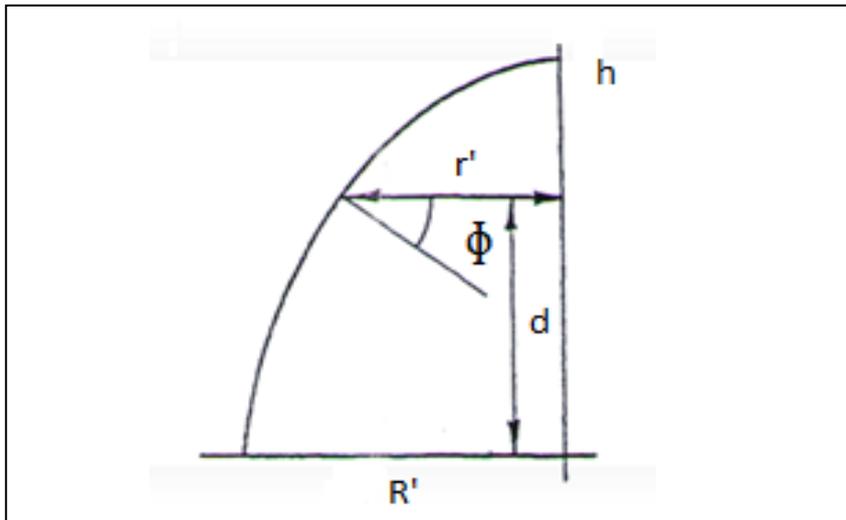


Figure II.1 : Pale d'une éolienne à pales courbées.

Pour une forme parabolique :

$$\begin{aligned} \text{à } y=H & \quad r'=0 \\ \text{à } y=0 & \quad r'=R' \end{aligned}$$

$$r'=R' - R' (d/h)^2 \quad (1.1)$$

L'angle Φ entre la droite normale à l'élément de pale et l'horizontale est :

$$\Phi = \tan^{-1} \left[\frac{2d R'}{h^2} \right] \quad (1.2)$$

II.2. Vitesse autour du profilé :

Les pales effectuent une rotation autour de la tour centrale (le mât), ce qui produit la puissance développée par le rotor. L'intensité du vent qui frappe la pale de l'éolienne peut se décomposer suivant la direction parallèle à sa corde et suivant la direction perpendiculaire. La valeur de ces composantes dépend de la position de la pale lors de sa rotation (figure II.2 et II.3).

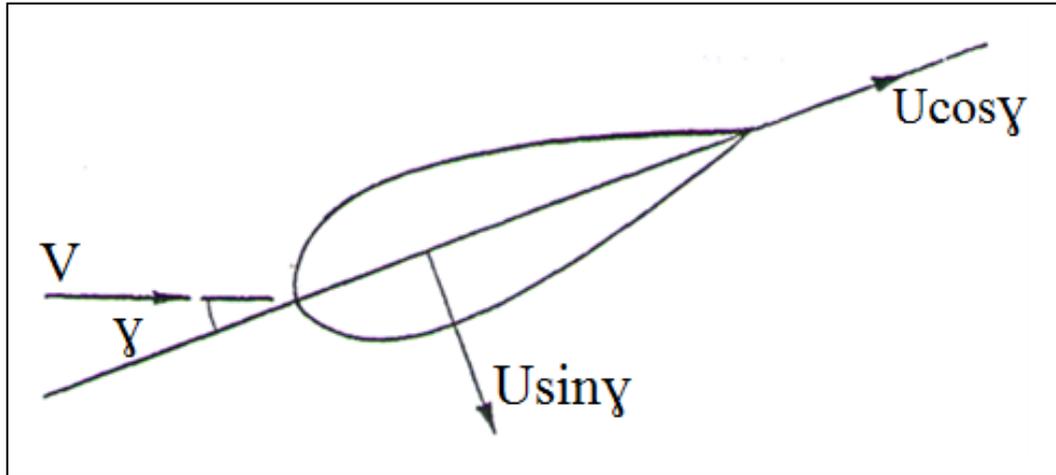


Figure II.2 : Composantes de la vitesse.

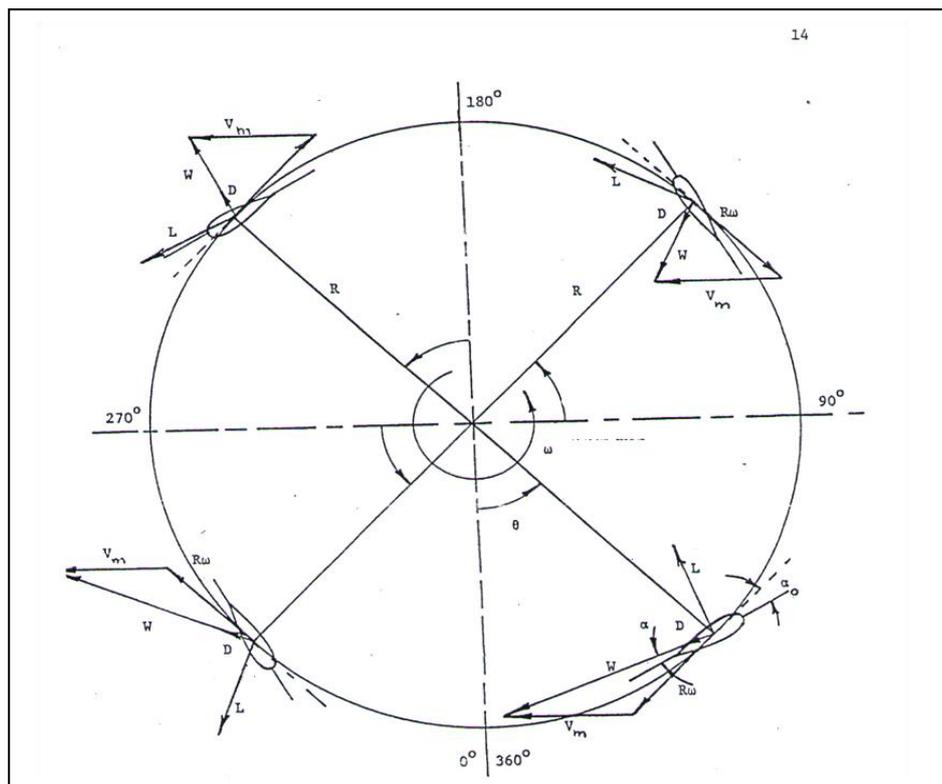


Figure II.3 : Rotation de la pale.

Comme la pale tourne autour de son axe de rotation, elle a donc une vitesse tangentielle U qui s'ajoute à $u \cos \gamma$:

$$U = \omega t \ r' \tag{1.3}$$

Ou ωt : vitesse de rotation de la pale, rad/s

$$W_T = u \cos \gamma + \omega t r' \quad (1.4)$$

On a donc la résultante de vitesse perpendiculaire agissant sur la pale dans un plan horizontal:

$$W_p = u \sin \gamma \quad (1.5)$$

Cette composante est orientée suivant un angle θ par rapport à la section de la pale (figure II.4)

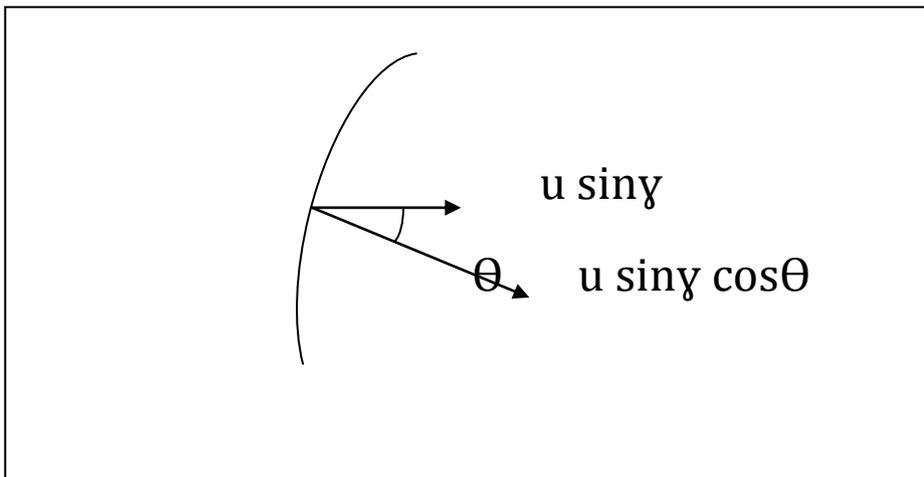


Figure II.4 : Orientation de la composante de vitesse perpendiculaire.

La composante $u \sin \gamma \cos \theta$ est dans le plan de la section de la pale.

Pour connaître la vitesse résultante qui agit sur la pale on fait la somme vectorielle de ces deux composantes : figure II.5

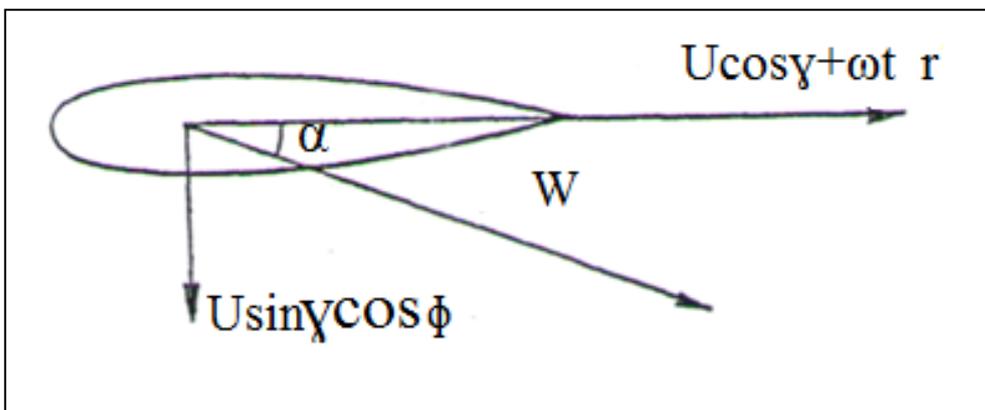


Figure II.5 : Résultante de vitesse.

$$|w| = [(u \cos \gamma + \omega t r')^2 + (u \sin \gamma \cos \Theta)^2]^{1/2} \quad (1.6)$$

L'angle d'incidence de cette vitesse sur la pale se calcule :

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{u \sin \gamma \cos \Theta}{u \cos \gamma + \omega t r'} \right] \quad (1.7)$$

- α est nul lorsque la vitesse relative du vent W est parallèle à la surface balayée par le rotor.
- α est positif pour $0^\circ < \gamma < 180^\circ$.
- α est négatif pour $180^\circ < \gamma < 360^\circ$.

II.3. Forces aérodynamiques :

Lorsqu'un profilé est placé dans un écoulement d'air, deux forces sont engendrées par l'écoulement. La première, perpendiculaire à la direction de la vitesse, s'appelle la portance (L). La seconde, orientée parallèlement à l'écoulement, la traînée (D).

Ces forces sont fonction de la différence de pression entre son extrados et son intrados. Elles s'exercent perpendiculairement au profil à son centre aérodynamique. Elles sont dues à la pression qu'exerce le fluide sur le profil d'aile et au frottement de ce même fluide sur la surface.

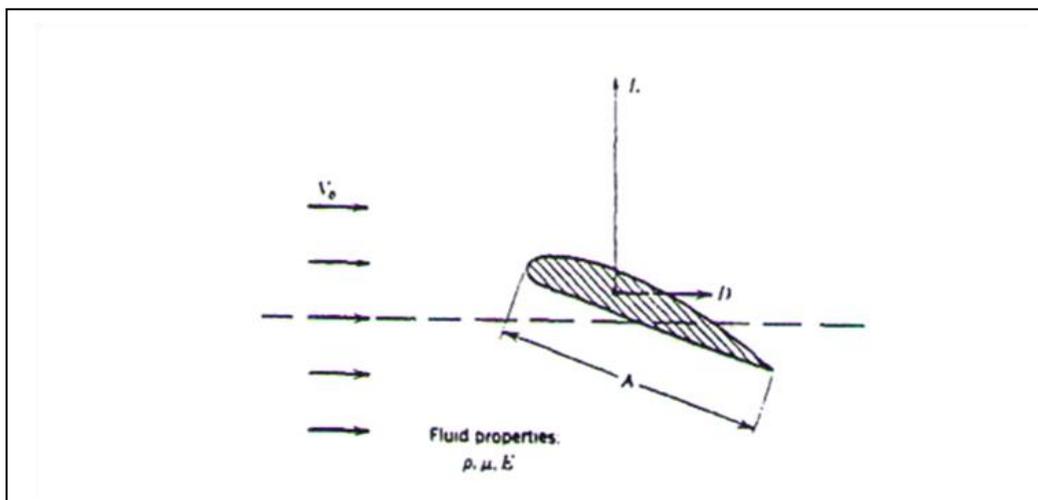


Figure II.6 : Forces aérodynamiques exercées sur un profil.

Pour calculer chacune de ces forces, il suffit donc d'intégrer sur la surface de la forme les effets décrits précédemment.

Pour un élément de forme quelconque :

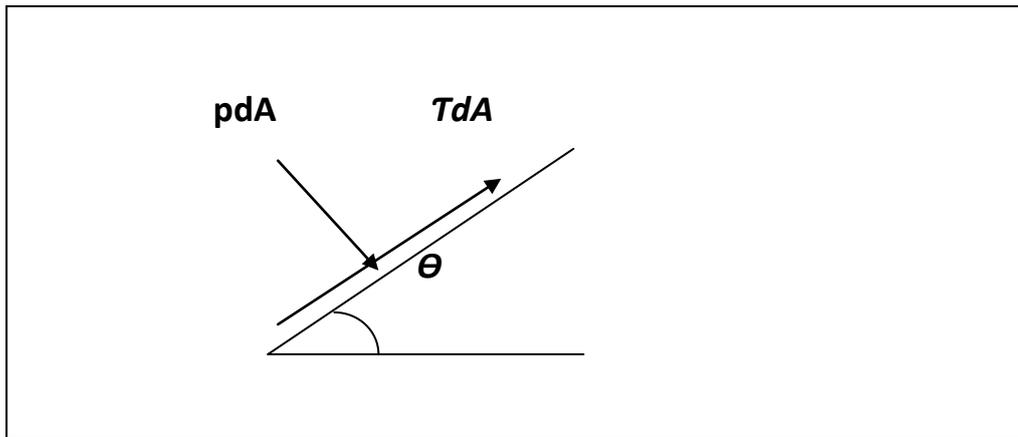


Figure II.7 : Composantes des forces aérodynamiques.

$$L = - \int_0^s p dA \cos\theta + \int_0^s T dA \sin\theta \quad (1.8)$$

$$D = \int_0^s p dA \sin\theta + \int_0^s T dA \cos\theta \quad (1.9)$$

Comme $dA \cos\theta = dx$

$dA \sin\theta = dy$

En ce qui concerne la portance, la force créée par la friction est négligeable par rapport à la pression sur la surface, donc :

$$L = - \int_0^s p dx \quad (1.10)$$

$$D = \int_0^s p dy + \int_0^s T dx \quad (1.11)$$

Habituellement, ces termes sont ramenés sous forme adimensionnelle à l'aide de coefficients :

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} = - \int_0^s \frac{p dx}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} = - \int_0^s \left[1 - \left(\frac{v}{V_0} \right)^2 \right] dx \quad (1.12)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} = \int_0^s \frac{p dy}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} = \int_0^s \left[1 - \left(\frac{v}{V_0} \right)^2 \right] dy \quad (1.13)$$

$$C_{DF} = \frac{D_f}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} = \int_0^s \frac{\tau_0 dy}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad \text{où } \tau_0 = C_{F0} \rho V_0^2 / 2 \quad (1.14)$$

Où C_F : coefficient de friction locale.

Le coefficient de pression devient :

$$C_p = 1 - \left(\frac{v}{V_0}\right)^2 \quad (1.15)$$

$$\text{Et } C_D = C_{DP} + C_{DF} \quad (1.16)$$

$$C_L = -\int_0^s C_p dx \quad (1.17)$$

$$C_D = \int_0^s C_p dy + \int_0^s C_F dx \quad (1.18)$$

L'étude du coefficient de portance implique donc seulement la connaissance de la vitesse à l'extérieur de la couche limite. Tandis que pour l'évaluation du coefficient de traînée, on doit en plus faire l'analyse de la couche limite qui entoure le corps immergé.

II.4. Méthode d'évaluation des coefficients aérodynamique d'un profil aérodynamique:

Le calcul des coefficients aérodynamique (C_L , C_D) implique la connaissance de la distribution de pression autour de la forme étudiée. Pour le cas choisi, l'écoulement est turbulent et il n'y a pas de décollement de la couche limite. Une méthode simple et efficace pour résoudre ce problème est de solutionner l'extérieur de la couche limite par un écoulement à potentiel. Ensuite, on peut résoudre l'écoulement visqueux à l'intérieur de la couche limite. Pour évaluer les coefficients aérodynamiques de la forme étudiée, il ne reste qu'à déterminer les coefficients de pression de surface à chaque nœud sur la forme ainsi que les coefficients de friction.

II.5. Puissance générée par l'éolienne:

Les pales effectuent une rotation de 360° autour de la tour centrale. La puissance développée par l'aérogénérateur dépend des forces qui agissent sur chaque élément de pales durant la rotation. La puissance générée par l'éolienne se calcule comme suit :

$$P = \frac{nc}{2\pi} \int_{-H}^H \int_0^{2\pi} \frac{CT W^2 r' dy dy}{2 \cos y} \quad (1.19)$$

$$\text{Où } CT = CL \sin\gamma - CD \cos\gamma \quad (1.20)$$

On voit donc que le calcul des coefficients aérodynamiques de portance (CL) et de traînée (CD) prend une grande importance. L'évaluation de ces coefficients pour des angles de 0° à 360° s'avère nécessaire.

II.6. Profils simulés:

Pour l'application des éoliennes de type Darrieus plusieurs centres de recherche dont le CNRC, l'IREQ et la NASA font des simulations et des expérimentations. Les profils utilisés par ces organismes sont généralement les NACA0012, NCA0015 et NACA0018.

Dans ce mémoire, le profil simulé est le NACA0015 vu la disponibilité des résultats expérimentaux et théoriques dans la littérature. Le programme profili a permis de bâtir les fichiers pour la simulation numérique. L'équation (1.21) qui permet de calculer dans le programme, les coordonnées des points qui limitent la forme est :

$$y_t = \frac{t}{0.20} (0.2969\sqrt{xt} - 0.12600 xt - 0.35160 xt^2 + 0.28430 xt^3 - 0.10150 xt^4) \quad (1.21)$$

L'annexe 3 comprend les données des fichiers utilisés dans le cas du profil ainsi que l'illustration de la forme avec les nœuds géométriques. Le centre de gravité de la pale se situe à 25% de la corde sur l'axe des (x) à partir du bord d'attaque.

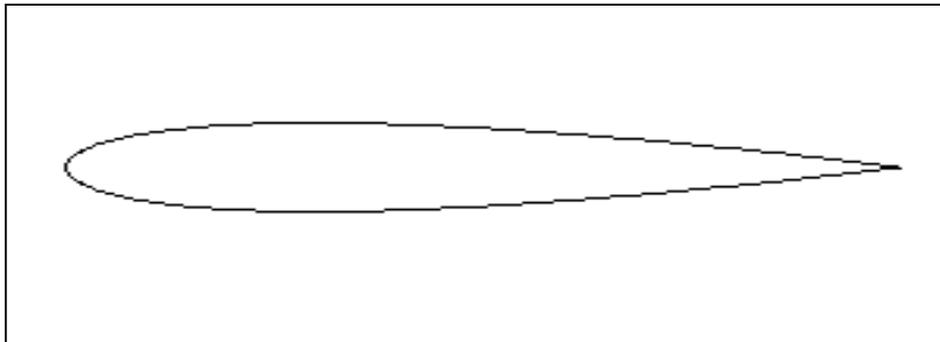


Figure II.8 : Profil NACA0015.

Chapitre III

Approche Expérimentale

III.1. Introduction :

On se propose de mesurer les coefficients aérodynamiques C_p , C_x et C_z en fonction de l'angle d'attaque α d'une pale de forme rectangulaire de profil NACA0015. Ces essais ont été effectués au laboratoire d'aérodynamique de Génie Mécanique de l'université de Tizi-Ouzou.

Les résultats obtenus seront comparés à ceux obtenus avec la simulation numérique effectuée avec le code de calcul FLUENT.

III.2. Matériel utilisé [3] [4]:

a. Soufflerie subsonique :

C'est une soufflerie subsonique, voir figure III.1, vitesse maximale 45m/s Veine d'essais de section carrée : $0.30 \times 0.30 \text{ m}^2$, puissance installée 4 kw.



Figure III.1.a : La soufflerie Delta-Lab EA103 du laboratoire

| | |
|-----------------|-------------------------|
| 1-Convergent | 8-Balance aérodynamique |
| 2-Hublot | 9-Moteur électrique |
| 3-Tube de Pitot | 10-Interrupteur |
| 4-Veine d'essai | 11-Turbine |
| 5-Divergent | 12-Variateur de vitesse |
| 6-Diffuseur | 13-Vanne papillon |
| 7-Table | |

Figure III.1.b : Description de la soufflerie Delta-Lab EA103 du laboratoire

b. Tube de Pitot :

C'est un tube qui permet de mesurer la vitesse de l'écoulement en un point. Il est constitué de deux tubes coaxiaux munis de deux prises de pressions permettant de calculer, par l'application du théorème de Bernoulli, en :

- a : la pression totale
- m : la pression statique

L'application du théorème de Bernoulli entre le point d'arrêt a et un point m de la surface du tube permet d'écrire :

$$P_a = P_m + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2 \quad (\text{III.1})$$

D'autre part sur le manomètre on a :

$$P_a = P_m + \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (\text{III.2})$$

d'où :

$$V_m = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_H \cdot g \cdot \Delta h}{\rho}} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

P_a : pression d'arrêt.

P_m : pression statique au point m.

ρ : masse volumique de l'air à la température d'essai.

ρ_H : masse volumique de l'huile.

Δh : dénivellation d'huile lue sur le multi-manomètre.

c. Balance aérodynamique à jauges de contraintes:

Elle nous permet de mesurer les efforts aérodynamiques (portance, traînée) qui s'exercent sur la pale. Les éléments qui rentrent dans la composition de la balance aérodynamique à jauges de contraintes sont cités ci-dessous:

- *Platine:*

Qui a pour fonction l'orientation du fléau dynamométrique par rapport à la veine d'essais.

- *Pied support :*

Il permet d'avoir une balance autoporteuse indépendante de la veine. Ce pied transmet des efforts aérodynamiques à la table de manipulation à laquelle il est lié rigidement.

Figure III.3 : Balance aérodynamique**-Fléau dynamométrique:**

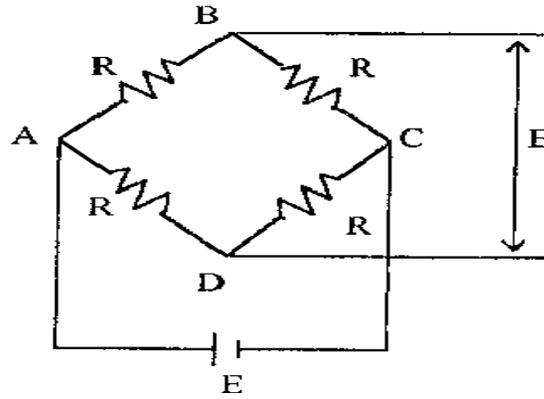
Cette pièce maîtresse de la balance est équipée de jauges de déformation collées sur des surfaces sollicitées en flexion par les actions dynamométriques. Le découplage des actions de portance et traînée, est réalisé par câblage des jauges.

Figure III.4 : Disposition des jauges de contrainte.

La balance ne comporte aucune liaison partielle, et n'est donc sujette à aucune hystérésis de frottement.

- Jauges de contraintes et pont de Wheatstone:

La résistance nominale d'une jauge est donnée par la formule :



$$R = \frac{\rho \cdot n \cdot L}{S} \quad (\text{III.4})$$

ρ : Résistivité du métal de la jauge

n : nombre de brins

L : longueur de chaque brin

S : section du fil résistant

Lorsque la tige sur laquelle la jauge est collée subit une variation relative de longueur :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{III.5})$$

La jauge subit la même déformation ce qui entraîne une variation relative de sa résistance électrique:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \left(\frac{\Delta L}{L} \right) = K \cdot \varepsilon \quad (\text{III.6})$$

La mesure de la variation relative de la résistance est obtenue à l'aide d'un pont de Wheatstone qui est un ensemble de quatre résistances; il est alimenté par une tension continue $E = V_A - V_C$ appliquée entre les points B et D.

Le pont est dit équilibré si les points B et D sont au même potentiel; pour cela il faut qu'on ait l'égalité suivante:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (\text{III.7})$$

Si on rompt l'équilibre en donnant aux résistances des petites variations ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 et ΔR_4 , il apparaît entre B et D une différence de potentiel $\Delta E = V_D - V_B$ dite tension de déséquilibre.

- *Élément de liaison:*

Cet élément permet de monter la maquette sur la balance, et de l'orienter en incidence.

- *Dispositif électronique de mesure:*

Pour la mesure des efforts aérodynamique on a utilisé un indicateur de contrainte emprunté au laboratoire de résistance des matériaux.

d. Indicateur de contraintes:

Cet appareil électronique nous permet de transformer le déséquilibre du pont de Wheatstone ΔE dû à la déformation mécanique des jauges en un signal électronique qui sera traité en traversant plusieurs étages (amplification, filtrage, conversion,...); par la suite il sera obtenu sous forme d'une tension à la sortie Out Put de l'appareil, ou bien sous forme d'un chiffre sur l'afficheur digital , ainsi on pourra obtenir les deux principaux efforts s'exerçant sur la pale à savoir la portance et la traînée, par conséquent les deux coefficients aérodynamiques correspondants C_z et C_x ; l'étalonnage ayant été effectué au préalable par pesé .

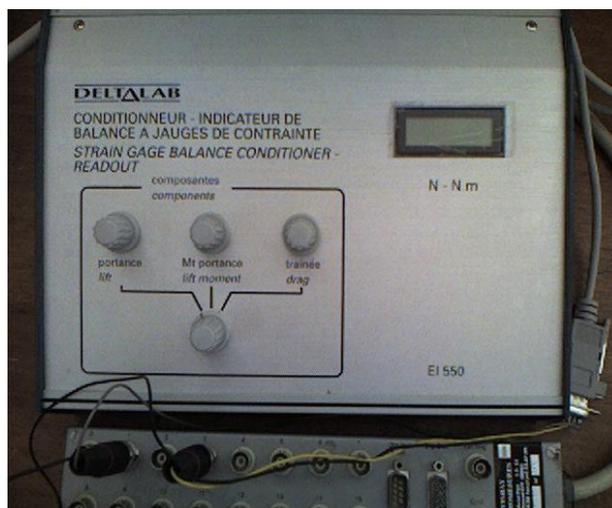


Figure III.6 : Indicateur de contraintes

e. Système d'acquisition de données :

Les signaux bas- niveau (pont de jauges) sont amplifiés avec un gain de 1000 et filtrés par un filtre passe bas à une fréquence de coupure de 1 Hz. Ils sont numérisés sur 12 bits au moyen d'une carte d'acquisition incorporée dans un ordinateur.

L'ordre des voies est le suivant :

Voie 1 : Coefficient de portance C_x

Voie 2 : Coefficient de traînée C_z

Voie 3 : Coefficient de moment C_m

Par sécurité la mesure de l'angle d'attaque α est manuelle, mais la saisie des mesures est pilotée en continu par l'ordinateur.

L'acquisition des différents résultats est gérée par ordinateur, après chaque cycle de 10 acquisitions, le logiciel ESAM1000, forme la moyenne des mesures, calcule en temps réel les valeurs C_x , C_z et les trace sur l'écran.



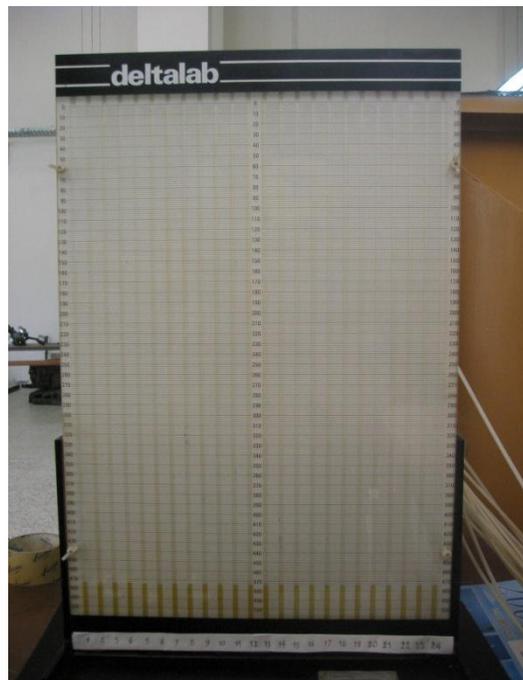
Figure III.7; a) Entrée de chaîne d'acquisition de données

b) Micro-ordinateur

f. Multi-manomètre :

Cet appareil comporte 24 tubes d'arrivée numérotés de 0 à 24 que l'on relie aux prises de pression (voir figure III.8), un raccord met successivement chacun des tubes en communication avec un capteur de pression unique.

La pression sélectionnée est mesurée dans un capteur différentiel référencé à la pression statique de la veine p_0 et qui délivre donc des dénivellations de hauteurs d'huile lues sur le multi-manomètre proportionnelles aux différences de pression $(p-p_0)$, ces dénivellations sont photographiés avec un appareil à photo numérique à un instant t donné et seront amplifiées et filtrées sur un microordinateur d'où une lecture minutieuse des différentes pressions évoluant sur l'extrados et l'intrados de la pale et ces pressions lues seront exploitées pour tracer les différentes courbes évolutives.



g. Maquette de mesure I (profil NACA 0015) :

Les mesures porteront sur une pale tridimensionnelles de surface $S = c \times b = 0.030m^2$, d'envergure $b = 0.30$ m et d'allongement $\lambda = 3$ dont le profil de base est un NACA 0015 qui est un profil symétrique.

Maquette I: Pale rectangulaire tridimensionnelle spatiale de Longueur $L = 0.30$ m et de corde $c = 0.10$ m.



Figure III.9 : Pale rectangulaire munie de prises de pression.

h. Maquette de mesure II turbine d'une éolienne d'axe vertical de type Darrieus au profil NACA0015 :

Les mesures porteront sur deux pales d'éolienne tridimensionnelle spatiale de surface $S=c.b= 0,15.0,24 =0,036$, d'envergure $b= 0.15$ m, de corde $C = 0.05$ m et d'allongement $\lambda=3$. Le profil de base est un NACA0015 qui est un profil symétrique.

Une tige de fer plat de 0.24m de longueur et de $l= 0,02$ m de largeur sur laquelle on fixe une petite barre cylindrique de 0,08m de longueur de deux diamètre différents (0,01m et 0,02m).

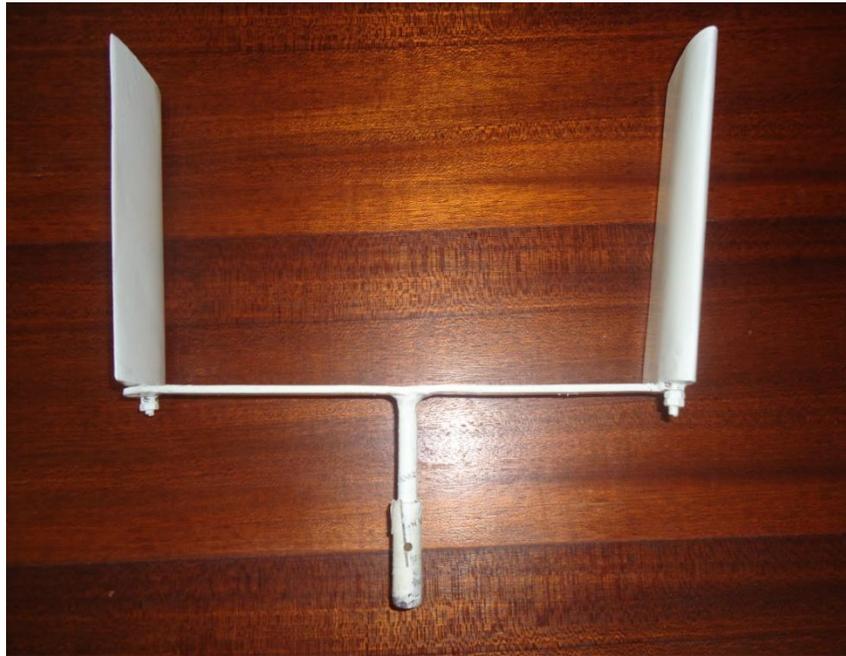


Figure III.10 : Rotor de l'éolienne Darrieus étudiée

III.3. Réalisation de la pale avec prises de pression (maquette I) :

Avant de se lancer dans la réalisation de la maquette pale, nous avons établi un dessin représentatif qui définit la pale à réaliser avec ses dimensions respectives.

La maquette a été réalisée à partir d'une plaque de métal d'épaisseur 2.5mm. Sur cette dernière on a dessiné la pale avec un stylo inhibiteur. Elle a été découpée par la suite à l'aide d'une scie électrique puis ajusté avec du papier verre.

Le choix du métal n'est pas fortuit puisqu'il offre une facilité d'usinage (réalisation de la pale, perçage de trous,...).

Au total deux pales seront étudiées, la première est destinée à la mesure du coefficient de pression C_p , une deuxième du profil NACA0015 est acquise avec la soufflerie Delta lab qui sera utilisée pour la mesure des coefficients de portance C_z et de traînée C_x .

III.3.1. Procédé de réalisation de la pale avec prises de pression :

D'après des études antérieures, on déduit que le profil de la pale est symétrique par rapport à la ligne de cambrure moyenne, d'où la disposition des prises de pression sur une seule face de la pale destinées aux mesures du coefficient de pression C_p , voir Tableau (III.10).

III.3.1.1. Répartition des prises de pression :

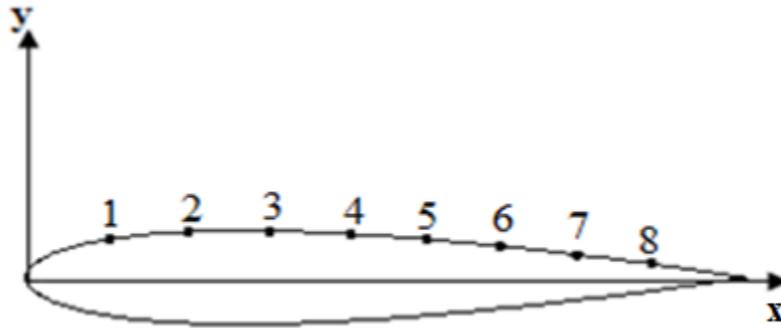


Figure III.11 : Représentation du positionnement des prises de pression sur la surface de la pale

Ainsi le nombre maximal de prises de pression (08) sont réparties sur la surface externe de la pale comme le montre la figure (III.11) et leurs coordonnées sont représentées dans le tableau suivant :

| Prise n° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| x (cm) | 2.46 | 3.46 | 4.46 | 5.46 | 6.46 | 7.46 | 8.46 | 9.46 |
| y (cm) | 0.741 | 0.742 | 0.698 | 0.626 | 0.523 | 0.401 | 0.261 | 0.109 |

III.3.1.2. Procédé de réalisation des prises de pression :

Une fois la pale destinée à la mesure du coefficient de pression C_p est découpée, elle doit subir les opérations suivantes :

- Traçage de la rangée de prise de pression à des points préalablement situés.
- Canalisation des tubes capillaires jusqu'à la sortie du profil.
- Perçage de trous pour recevoir les tubes.
- Placement des tubes en cuivre préalablement coudés de manière à ce que l'axe des trous soit perpendiculaire à la surface extérieure de la pale (extrados et intrados).
- Fixation des tubes dans la pale à l'aide d'une colle rapide.
- Remplissage de l'espace creux avec du mastic pour tôles.
- Ponçage de la surface externe des prises de pression à l'aide du papier verre.



(a)



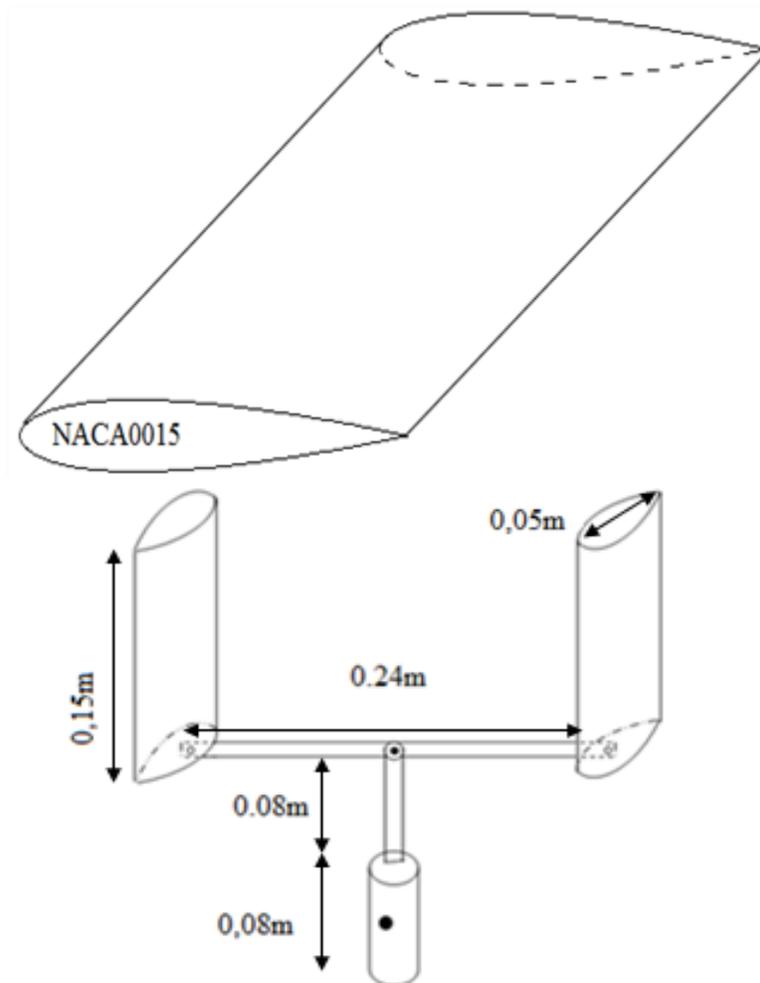
(b)



(c)

III.4.Réalisation du rotor de l'éolienne Darrieus (maquette II):

Nous avons établi au début un dessin de définition représentatif des pales à réaliser avec leurs dimensions respectives:



- La maquette a été réalisée à partir d'une plaque métallique de 2.5mm d'épaisseur sur laquelle on a dessiné les pales avec un stylo inhibiteur par la suite les pales ont été découpé à l'aide un sécateur puis ajusté à l'aide du papier verre.
- On perse les profiles NACA0015 à l'aide d'un foré du même diamètre que la tige filetée.
- Création de squelette des pales avec une tige filetée sur laquelle on fixe les profiles NACA0015 à l'aide d'écrous de fixation.



Figure III.15 : Structure intérieure de la pale

- On recouvre ce squelette de pales avec une tôle en aluminium à laquelle on ajoute une colle et on la fixe à l'aide d'étaux de fixation
- Remplissage de l'espace creux avec du mastic pour tôles.
- Ponçage de la surface externe à l'aide du papier verre.
- On la recouvre d'une fine couche de peinture.



Figure III.15.b : Présentation du résultat final de la pale.

- Pour ce qui est du support des pales on dispose d'une tige de longueur $L=0,24\text{m}$ et de largeur $l=0,02\text{m}$ qui comporte des trous aux extrémités sur lesquelles on fixe les pales ,et au milieu de cette tige on a relié perpendiculairement une barre cylindrique à une longueur de 80mm qu'on insère dans la balance aérodynamique par l'intermédiaire d' un encastrement de 40mm .Le mouvement de torsion qui pouvait intervenir lors des essais en soufflerie a été éliminé à l'aide d' une goupille fixée au niveau de la balance aérodynamique.

III.5. Mesures expérimentales sur les deux maquettes aux profils (NACA0015) :

L'acquisition des coefficients C_p , C_x et C_z est effectuée sur une maquette de pale pour les angles d'incidence α variant de 0° à 45° pour la Maquette de mesure de pression (profil NACA 0015) à l'aide de multi-manomètre.

Tandis que l'acquisition des valeurs des coefficients C_x et C_z de la turbine d'éolienne Darrieus (maquette II) pour les angles d'incidences α variant de 0 à 360° avec un pas de 5° seront obtenus en se servant de la balance aérodynamique.

Les mesures porteront premièrement sur une pale rectangulaire d'allongement $\lambda = 3$, ensuite sur une turbine d'éolienne à pales verticales de type Darrieus.

Les valeurs de C_p , C_x et C_z en fonction de l'angle d'attaque α seront comparées, dans le chapitre V, à celles obtenues avec le code de calcul Fluent.

La valeur de la vitesse du vent a été obtenue par la station météorologique de boukhalfa, et cette valeur représente la vitesse maximale du vent enregistrée pour la wilaya de Tizi-Ouzou

III.5.1. Manipulation de la maquette I :

- On fixe la pale avec prises de pression au support pour la mesure de C_p qui est disposé d'un système de réglage de l'incidence à partir de l'extérieur de la veine d'essais, le système de fixation comporte aussi des vis de blocage et un cadran gradué de degré en degré, donnant l'incidence de la pale.
- Avant le lancement des acquisitions, à l'aide du tube de Pitot et du variateur de vitesse on détermine la vitesse de l'écoulement dans la veine $V_0=20,3\text{m/s}$, soit $p_i-p=70\text{mm}$ de hauteur. La valeur de ce paramètre sera lue sur le multi-manomètre en indicateur de pression.
- Remise à niveau de la pale lors de son montage dans la veine à l'aide de niveau de chantier par un réglage visuel, avec la meilleure précision possible, l'incidence nulle du profil par comparaison entre les répartitions obtenues sur l'extrados et l'intrados, vérifier et, éventuellement, régler la valeur lue sur l'afficheur d'incidence.
- Recueillir sur le multi-manomètre les variations de hauteur et la répartition de pression en fonction de l'incidence qui change d'un pas de 5° .
- Mesurer les pressions pour les différentes incidences imposées sur la première maquette.
- On mesure à l'aide de la balance aérodynamique les coefficients de portance et de traînée pour la pale de profil symétrique NACA0015.

III.5.2. Exploitation de la maquette I :

La relation utilisée pour calculer la valeur du coefficient de pression C_p est donnée comme suit :

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \cdot \rho V_0^2} \quad (\text{III. 8})$$

En posant :

$$P - P_0 = -\rho g \Delta h \quad (\text{III.9})$$

Alors on aura :

$$C_p = \frac{-\rho g \Delta h}{\frac{1}{2} \cdot \rho V_0^2} \quad (\text{III. 10})$$

Les courbes de répartition de pressions en fonction de l'abscisse sont tracées pour les différentes incidences (C_p négatif sur l'extrados). Quel que soit le signe du C_p , on tracera sur le diagramme $C_p(x/l_0)$ pour les différentes incidences et on mettra en évidence les zones de dépression et de surpression.

(a)

(b)

Figure III.16: Evolution du coefficient de dépression $-C_p$ à différentes incidences.

La chaîne d'acquisition de donnée montée précédemment permet de fournir les coefficients de portance C_z , de traînée C_x dans un repère lié au profil et en suivant les différentes étapes de manipulation.

En mettant en commun toutes les valeurs de C_z et C_x obtenues dans le repère lié au vent, on tracera les courbes C_z et C_x pour les différentes incidences.

(c)

(d)

Figure III.17 : Courbes de portances pour le profil NACA0015.

(e)

(f)

Figure III.18 : Les courbes de traînées pour le profil NACA0015.

III.5.3. Interprétation des résultats :

a. Courbes du coefficient de pression (Figures III-16) :

➤ *Évolution du coefficient de la pression C_p sur l'extrados du profil :*

Pour cette étude on remarque que C_p augmente avec l'augmentation de l'incidence jusqu'aux incidences supérieures à 15° où on remarque une stabilité au niveau de la variation de C_p .

➤ *Évolution du coefficient de la pression C_p sur l'intrados du profil :*

Pour la vitesse d'écoulement considérée on remarque que C_p diminue avec l'augmentation de l'incidence.

b. Courbes de portance (Figures III-17) :

La variation de la portance en fonction de l'angle d'attaque est linéaire jusqu'à approximativement 10° . Sur les figures, les courbes de portance expérimentale montrent que la portance maximale atteinte, à un angle d'attaque fixé, est de même ordre de grandeur pour la vitesse d'écoulement considérée.

c. Courbes de traînée (Figures III-18) :

On remarque que la traînée est très influencée par l'angle d'attaque α , elle est minimale à l'incidence nulle puis elle augmente indéfiniment avec l'augmentation de l'incidence.

d. Conclusion :

Les résultats expérimentaux recueillis sur la deuxième pale démontrent que le décrochage (décollement) se fait pour un angle d'attaque de 10° .

Notre pale rectangulaire a été testée dans la soufflerie subsonique et équipée d'un NACA 0015 qui est un profil symétrique d'une épaisseur de 15 %.

La pale montée dans la soufflerie a une envergure $b= 0.3\text{m}$, un allongement $\lambda= 3$, et par conséquent une surface S . Pour cette pale, la corde $c= 0.10\text{m}$ et le nombre de Reynolds dans cette soufflerie pour une vitesse $V_0=20,3\text{m/s}$ est approximativement égal à 2.10^5 .

Dans ces conditions, pour les angles d'attaque positifs, on dispose d'une couche limite laminaire positive au bord d'attaque. Le point de transition provoque un décollement rapide. Ce dernier engendre un écoulement turbulent rapide sur la pale entière du à la chute du nombre de Reynolds.

III.5.4 Manipulation de la maquette II à pales verticales:

➤ L'extrémité de la barre de la turbine est cylindrique sur une longueur de 45 mm et relié à la balance aérodynamique par l'intermédiaire d'un encastrément de 40 mm. Le mouvement de torsion qui pouvait intervenir lors des essais en soufflerie a été éliminé à l'aide d'une goupille fixée au niveau de la balance aérodynamique.

- On garde toujours la même vitesse d'écoulement dans la veine.
- On s'assure que la turbine est bien à l'horizontale lors de son montage sur la balance.
- Lancement de l'expérience et acquisition des résultats.

➤

III.5.5. Exploitation de la maquette II:

On tracera les courbes de répartition de portance C_z et de traînée C_x en fonction de l'incidence. Mais pour les valeurs du coefficient de puissance CP , on utilisera l'équation suivante :

$$CP = \frac{\sqrt{C_z^2 + C_x^2}}{\frac{1}{2} \cdot \rho AV^2} \quad (\text{III.11})$$

La surface balayée par la turbine est de forme rectangulaire Avec:

$$A=L_{\text{tige}} \cdot b = 0.24 \cdot 0.15 = 0.036 \text{ m}^2$$

Figure III.19 : Evolution de C_z en fonction de l'incidence pour l'éolienne Darrieus

Figure III.20 : Evolution de C_x en fonction de l'incidence pour l'éolienne Darrieus.

Figure III.21 : Evolution du coefficient de puissance pour le cas de l'éolienne à pales verticales.

III.5.6. Interprétation des résultats:

a. Courbe de portance:

L'évolution de la portance en fonction de l'incidence est sinusoïdale d'une période $T=180^\circ$, ou elle atteint son maximum qui est de 0,3145 à l'incidence $i^\circ=10^\circ$, puis elle diminue en passant par l'incidence égale à 80° , pour atteindre son minimum à l'incidence $i^\circ=160^\circ$ qui est $C_z=-0,3151$.

b. Courbe de traînée:

La variation de la courbe du coefficient de traînée en fonction de l'angle d'incidence représente une forme périodique de 180° avec une valeur du coefficient de la traînée maximal atteint à l'incidence $i^\circ=70^\circ$ qui est $C_x=0,5356$, avec une valeur minimale à l'incidence $i^\circ=175^\circ$ qui est $C_x=0,0524$, on remarque que la traînée ne diminue pas au dessous de 0.

c. Courbe du coefficient de puissance :

La courbe de variation de du coefficient de puissance possède une forme périodique tous les 180° , on remarque sa similitude avec la traînée, sa valeur maximale est de 0,5486 pour une incidence de 70° et une valeur minimale de 0,0991 pour l'incidence de 180° . Le coefficient de puissance qui est toujours positif a une valeur moyenne de $0,4002 \approx 40\% < 0.59\%$ (limite de Betz).

III.5.7. Manipulation de la maquette II à pales inclinées de 6° :

Pour cette manipulation, on change l'angle de positionnement des pales sur la tige, et on garde les mêmes conditions et procédure d'exploitation lors du lancement de l'expérience tel que la vitesse d'écoulement et les mêmes incidences que la manipulation précédente.



Figure III.22 : La turbine de l'éolienne Darrieus inclinée de 6°

III.5.8. Exploitation de la maquette II inclinée de 6° :

La répartition de la portance et de la trainée en fonction de l'incidence sera représentée par les courbes suivantes, tandis que les C_p seront calculés par l'équation suivante :

$$C_p = \frac{\sqrt{C_z^2 + C_x^2}}{\frac{1}{2} \cdot \rho A v^2} \quad (\text{III. 12})$$

On remarque que la surface balayée par le rotor a une forme de trapèze qui est égale à :

$$A' = \frac{[(L_{\text{tige}} + 2(b \sin 6^\circ)) + L_{\text{tige}}] \cdot b \cos 6^\circ}{2} = \frac{[(0,24 + 2(0,15 \sin 6^\circ)) + 0,24] \cdot 0,15 \cos 6^\circ}{2} = 0,03813 \text{ m}^2$$

Figure III.23 : Evolution du C_z pour l'éolienne Darrieus à pales inclinées de 6°

Figure III.24 : Evolution du C_x pour l'éolienne Darrieus à pales inclinées de 6°

Figure III.25 : Evolution du coefficient de puissance dans le cas de l'éolienne Darrieus pales inclinées de 6°

III.5.9. Interprétation des résultats:

a. Courbes de portance:

La variation de la portance en fonction de l'incidence est sinusoïdale d'une période $T=180^\circ$, ou elle atteint son maximum qui est de $C_z=0,2975$ à l'incidence $i^\circ=10^\circ$, puis elle diminue en passant par C_z égale à 0, pour atteindre son minimum à l'incidence $i^\circ=160^\circ$ qui est $C_z=-0,2853$, et une valeur de $C_z=-0.3093$ pour une incidence de 345° .

Ces valeurs sont presque identiques à celles obtenues avec l'éolienne à pales verticales car l'angle d'inclinaison est vraiment petit (6°), vu que les moyens qui sont mis à notre disposition (les dimensions intérieures de la veine nous permettent pas une inclinaison plus de 6°).

b. Courbes de traînée:

La variation de la courbe de traînée en fonction de l'angle d'incidence représente une forme périodique de 180° , avec une valeur du coefficient de traînée maximal $C_x = 0,48734$ atteint à l'incidence $i^\circ = 70^\circ$, et une valeur minimale $C_x = 0,03415$ à l'incidence $i^\circ = 175^\circ$. On remarque que la traînée est toujours supérieure à 0.

c. Courbes du coefficient de puissance :

On remarque une similitude du comportement entre la variation du coefficient de puissance et celle de la traînée, avec des pics de 0.5037 à une incidence de 65° , et un CP minimal de 0,04886 pour l'incidence de 355° .

Le coefficient de puissance dans ce cas est toujours supérieur à 0, et dont la valeur moyenne est de $0.3692 \approx 0,37 < 0.59$ (limite de Betz).

Conclusion:

On peut valider nos résultats à travers les valeurs du coefficient de puissance CP obtenues, qui sont toujours dans la limite de la théorie de Betz c'est à dire $CP < 0.59$

Chapitre IV

Simulation Numérique

IV.1. Introduction :

Les modèles numériques de dynamique des fluides sont aujourd'hui très performants. La vitesse élevée des processeurs permet de réduire les temps de calculs pour obtenir des solutions numériques complexes et précises. Les simulations numériques se comparent maintenant à de véritables essais expérimentaux virtuels. Les modèles physiques utilisés peuvent être présentés en 2D ou 3D et de complexités différentes. Les modèles 3D les plus avancés comme ceux utilisés dans Fluent, utilisent la théorie des éléments finis ou des volumes finis pour résoudre les équations de Navier Stokes.

En effet, compte tenu de l'écoulement se développant au dessus (à l'extrados) de profil NACA 0015, nous avons fait appel à une simulation numérique d'une part pour mieux comprendre le phénomène physique et d'autre part pour faire un lien avec les résultats précédents obtenus en soufflerie.

IV.2. Méthodologie des simulations

Hypothèse : Etant donné que nous ferons des calculs numériques en 2D, on ne prendra pas en compte les variations de l'écoulement dans le plan vertical. Par conséquent, dans le plan vertical, on considère une vitesse de vent de distribution uniforme, et des pales droites. D'autre part, on néglige les pertes en bout de pale. En cas réel, les effets de pertes en bout de pale sont négligeables si les pales sont d'une longueur importante par rapport au diamètre du rotor, ou si elles sont terminées par un élément (comme un disque) qui empêche l'air de s'échapper verticalement, par hypothèse c'est ce cas que l'on considère.

IV.3. Introduction au CFD

Le CFD « Computational Fluid Dynamics » fournit une approximation numérique des équations qui régissent le mouvement des fluides. Il offre une réduction considérable de temps et de coûts, en fournissant des données pertinentes dans la phase de conception. Un code CFD contient trois éléments principaux:

- *Un préprocesseur*, qui prend en entrée le maillage défini selon la géométrie étudiée, les paramètres d'écoulement et les conditions limites.
- *Un solveur*, qui est utilisé pour résoudre les équations régissant le fluide dans les conditions prévues.
- *Un post-processeur*, qui permet de manipuler les données et d'afficher les résultats sous forme graphique.

Il existe quatre différentes méthodes utilisées pour résoudre les équations numériques de fluide: La méthode de différences finies, la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis, et la méthode spectrale. La plupart des programmes CFD comme celui qui a été utilisé dans ce projet (FLUENT) sont basés sur la méthode des volumes finis.

L'utilisation du CFD pour analyser un problème nécessite les étapes suivantes. Tout d'abord, le domaine est divisé en petits éléments. Puis, les modèles mathématiques appropriés sont sélectionnés. Alors, les équations mathématiques décrivant l'écoulement du fluide sont discrétisées et formulées sous forme numérique. Puis, les conditions aux limites du problème sont définies. Enfin, le système algébrique est résolu en utilisant un processus itératif. Nous détaillerons toutes ces étapes dans ce chapitre, afin d'expliquer comment les calculs CFD ont été réalisés pour analyser les performances de l'éolienne à l'étude.

IV.4. Description de la géométrie :

Le profil NACA 0015 est symétrique par rapport à son axe médian il a une épaisseur maximale ($e=15\text{ mm}$), une corde $c=10\text{ cm}$ et une envergure $b=300\text{ mm}$ (voir Chapitre III) le milieu extérieur est définie comme un cube d'air de hauteur et longueur $h=300\text{ mm}$ de vitesse supposée constante, voir la figure (IV.1) ci après.

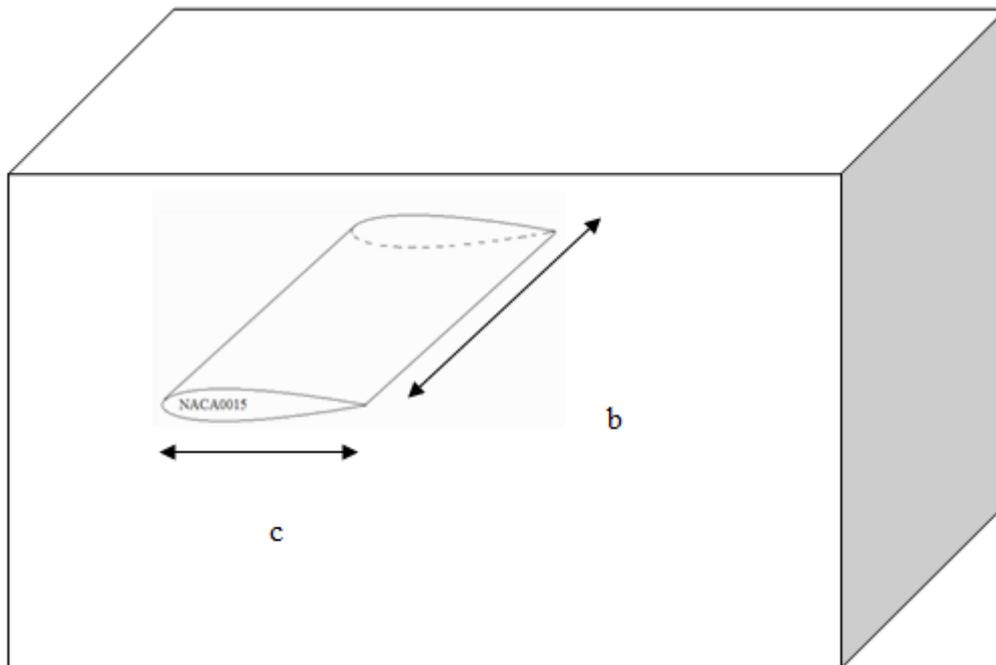


Figure IV.1 : Description de la géométrie.

IV.5. Maillage de la géométrie sous GAMBIT:

La génération du maillage a pour but la discrétisation du domaine de calcul. Dans la méthode des volumes finis la grille de points générés par le maillage forme un ensemble de volumes qui sont

appelées cellules. Chaque cellule constitue un volume de contrôle où les valeurs des variables mécaniques, comme la vitesse et la pression, seront calculées.

Le raffinement du maillage est nécessaire pour résoudre les petites variations du flux. En augmentant le nombre de nœuds on augmente la précision, mais cela augmente aussi la charge de calcul. Par conséquent, l'une des principales difficultés de la génération du maillage est d'accroître le raffinement là où les gradients élevés sont attendus et de diminuer le raffinement là où les gradients sont censés être faibles.

Généralement, le raffinement est nécessaire près des murs, des points de stagnation, dans les régions de séparation, et dans les sillages. En particulier, le raffinement est nécessaire le long des surfaces solides où la couche limite est développée.

Les maillages peuvent être catégorisés en deux groupes : les maillages structurés et les maillages non structurés. Les programmes de calculs numériques basés sur le modèle de différences finies nécessite d'avoir un maillage structuré, alors que les programmes basés sur le modèle de volumes finis peuvent utiliser l'un ou l'autre, bien qu'un maillage de structure régulière est toujours préférable.

Le meilleur choix pour un type de grille dépend de plusieurs facteurs: la facilité de production, les besoins en mémoire, la précision numérique, l'adaptabilité aux géométries complexes et de l'adaptabilité du raffinement pour des régions localisées.

Dans ce projet, des maillages non structurés ont été utilisés afin de bénéficier de la flexibilité dans la conception, d'une meilleure précision et de la réduction du temps de calcul. Le concept suivi dans le maillage a été d'aligner les lignes du maillage avec la forme de l'écoulement envisagé de façon à suivre les lignes de courants. Le raffinement du maillage varie selon l'intensité des gradients envisagés, comme expliqué précédemment.

Nous ferons nos calculs en 2D en considérant des éoliennes à pales droites, dont l'écoulement varie essentiellement dans le plan horizontal. Par la suite, ce type de maillage non structuré 2D peut facilement être transformé en 3D par extrusion.

Utilisant le logiciel Gambit, nous avons dessiné des maillages 2D avec des architectures originales qui permettent de réduire le nombre de points de mesures nécessaires, par une distribution judicieuse, avec un raffinement croissant vers les parois et les bords de fuite.

Pour la turbine Darrieus, nous avons construit un maillage triangulaire (Figure IV-3). Le maillage en forme triangulaire est un maillage de référence utilisé dans l'étude des profils aérodynamiques.

IV.6. Modèle mathématique

Les équations régissant le mouvement des fluides sont les trois principes fondamentaux de la conservation de la masse, la conservation de la quantité de mouvement, et la conservation de l'énergie. Les écoulements fluides Darrieus, où le nombre de Mach est inférieur à 0,3 peuvent être considéré comme incompressible. Puisque les vitesses étudiées avec les éoliennes sont bien en dessous de ce nombre critique, nous pouvons considérer l'écoulement comme incompressible.

Ainsi, nous n'aurons pas besoin de calculer l'équation d'énergie, ni la loi des gaz parfaits, mais seulement les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Ces équations dans leur notation vectorielle peuvent être écrites comme suit :

Conservation de la masse:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{IV.1})$$

Où ρ est la densité et $\rho \vec{v}$ le débit massique élémentaire.

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (\text{IV.2})$$

Où p est la pression statique, $\bar{\tau}$ le taux de cisaillement, $\rho \vec{g}$ la force gravitationnelle, et \vec{F} représente d'autres forces externes. Cette formule est aussi désignée comme l'équation de Navier-Stokes (N-S).

Sous Gambit on a la possibilité de vérifier la qualité du maillage par la commande <<EXAMINE-MESH>>

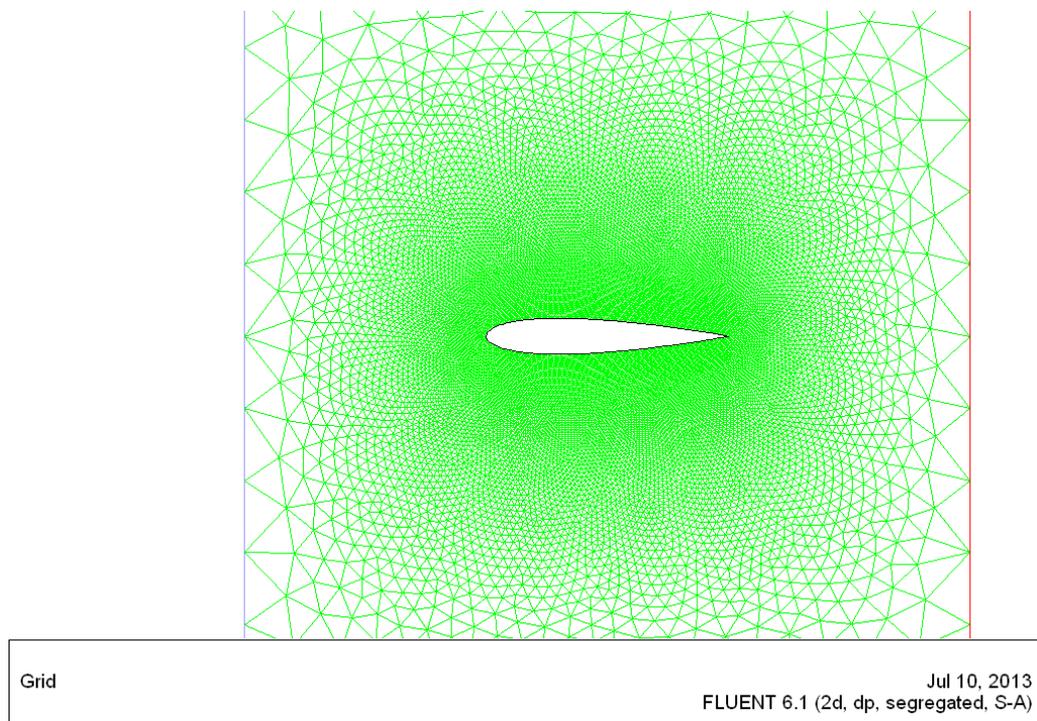


Figure IV.2 : Maillage triangulaire de la géométrie considérée en (2D).

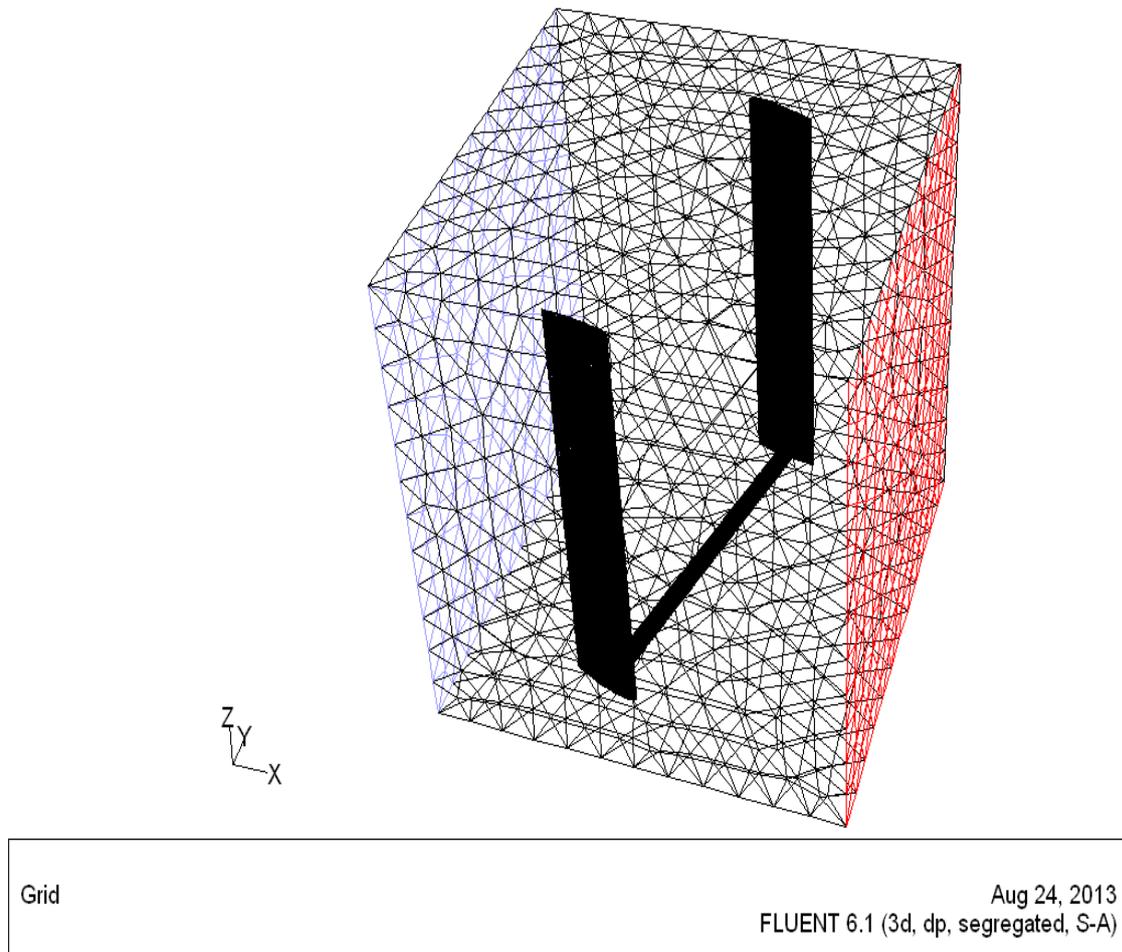


Figure IV.3 : Maillage de la géométrie à trois dimensions (3D).

En exploitant la symétrie du profil et dans le but de diminuer le temps de calcul, on peut considérer seulement la moitié de l'aile, option disponible sur *Fluent*.

La dernière étape sous *Gambit* consiste à exporter la géométrie vers *Fluent* en utilisant la commande <<Export-Mesh >>.

IV.7. Régime d'écoulement du fluide

L'activation de la commande <<Check>> permet de contrôler le fichier Nom.msh, la commande <<Scale>> permet de changer l'échelle de la géométrie en question.

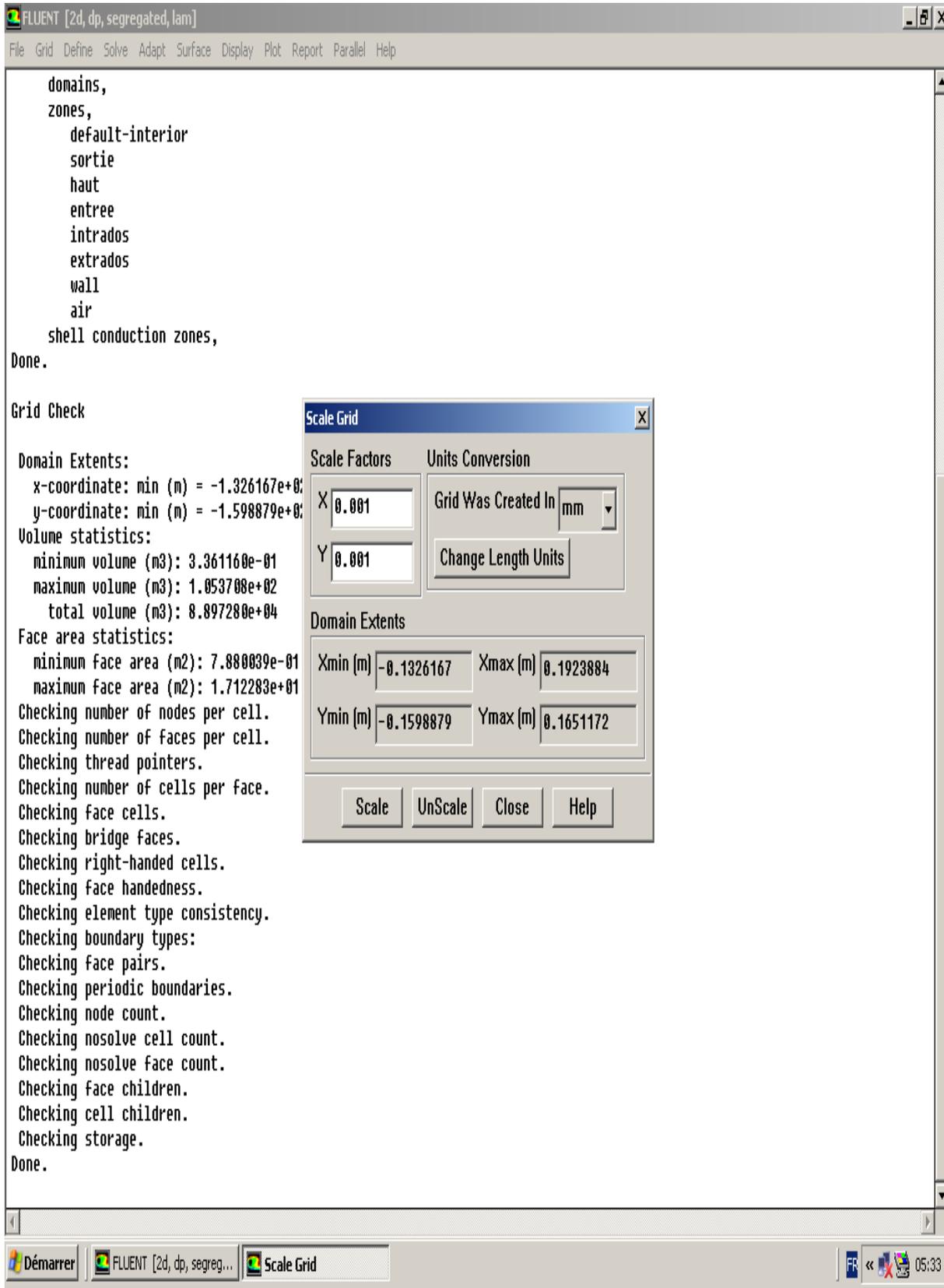


Figure IV.4 : Activation de la commande Scale.

Solver permet de choisir le type de solveur que l'on souhaite utiliser (implicite, explicite, stationnaire, 2D ,3D...) on sélectionne le solveur avec la commande <<Define-Models-Solver >>

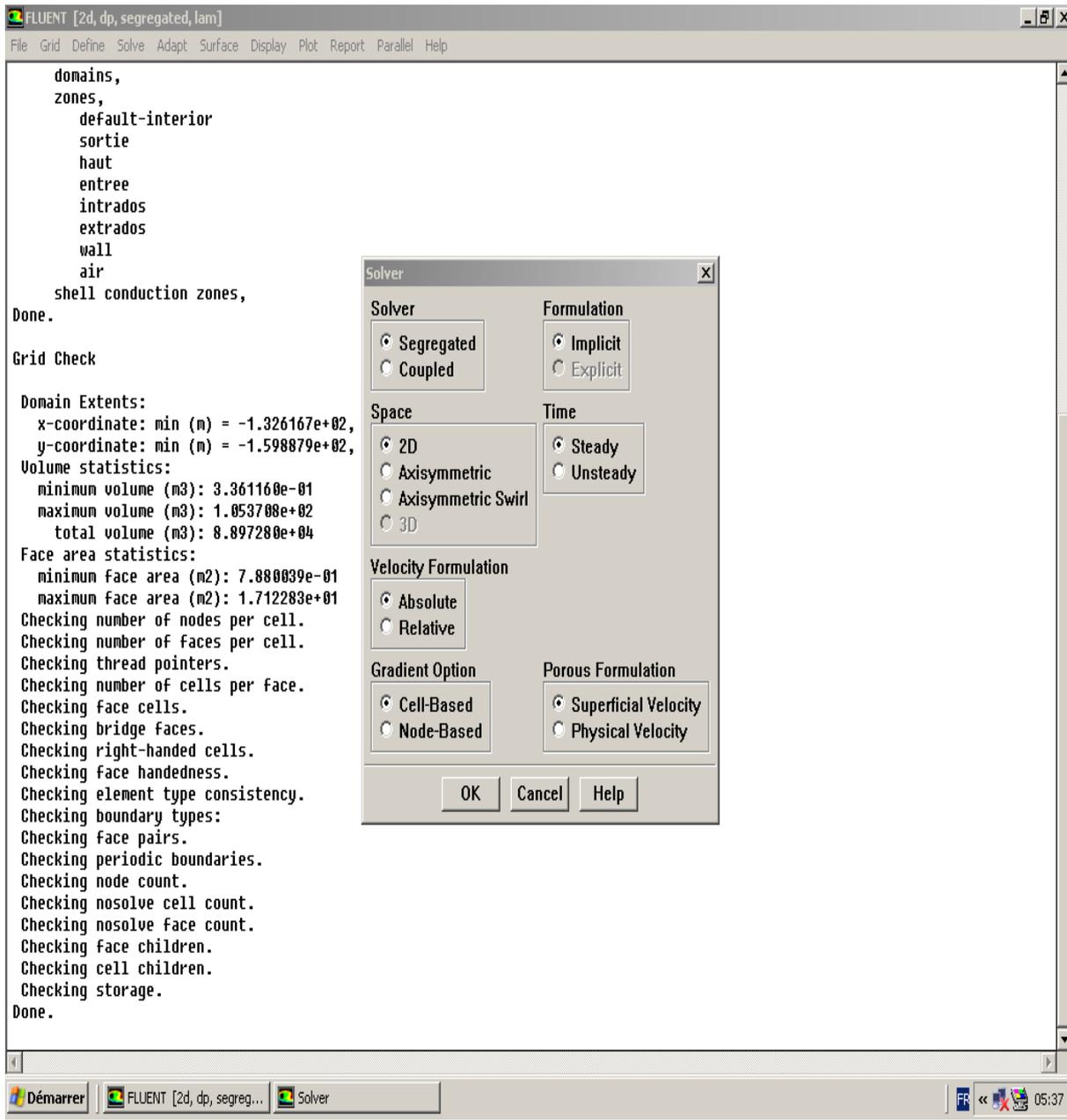


Figure IV.5 : choix du type de Solveur.

Ensuite il s’agit de sélectionner le modèle de turbulence, pour notre cas on va opter pour le modèle à une équation le modèle recommandé pour les écoulements autour des obstacles en activant la touche <<Define-Models-Viscous >>

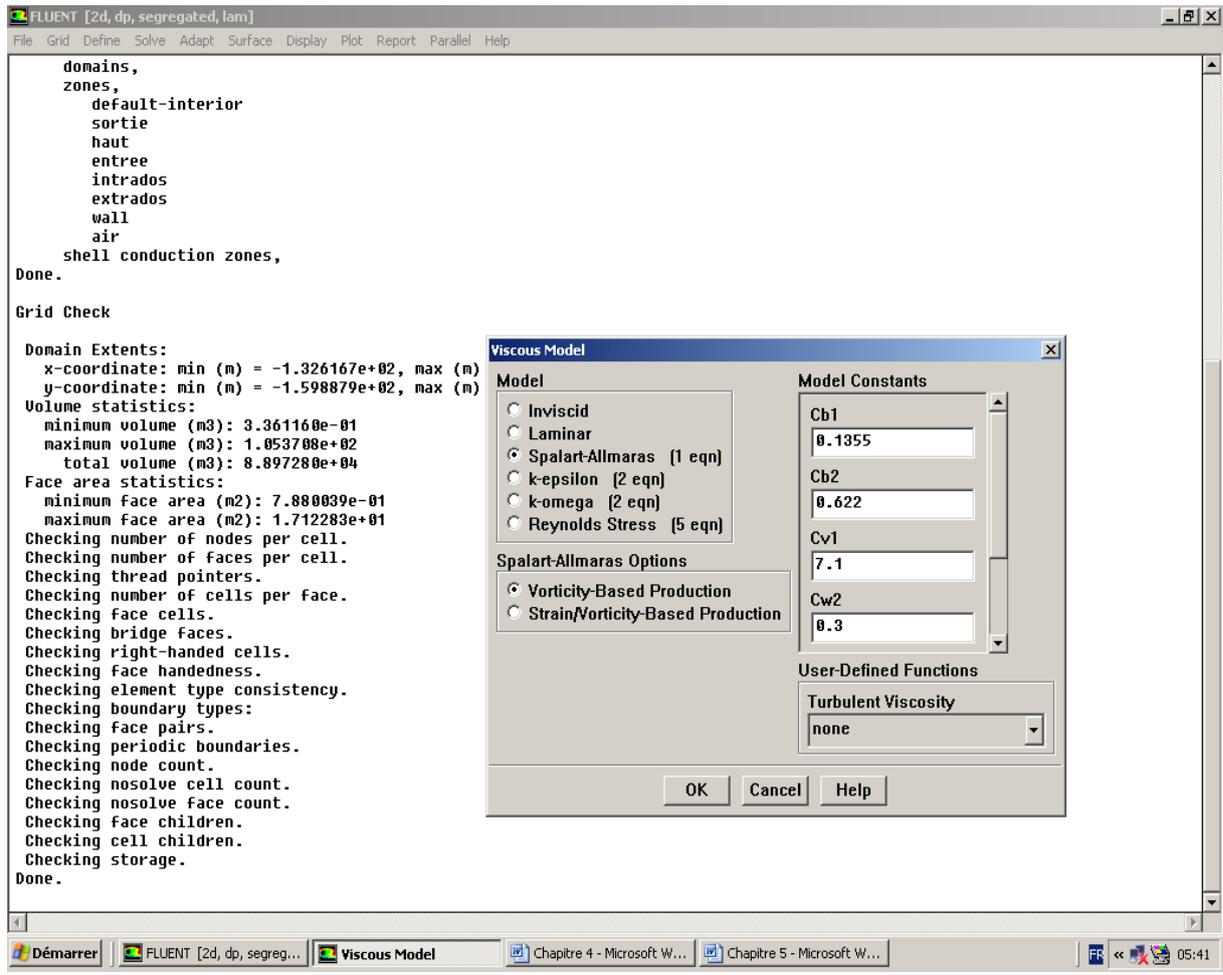


Figure IV.6 : Sélection du modèle de turbulence.

IV.8. Propriétés de l’air:

Le profil NACA 0015 est immergé dans l’air en écoulement avec une vitesse constante donnée, cet air a les propriétés suivantes :

Conductivité thermique : $\lambda = 0,0242 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Capacité calorifique : $C = 1006,43 \text{ j.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Masse volumique : $\rho = 1.225 \text{ Kg.m}^{-3}$

Elles sont représentées sous *Fluent* par la figure ci-dessus.

IV.9. Conditions aux limites

On définit les conditions aux limites par la commande <<Define-Boundary Conditions>>

-Les parois de l'aile sont solides, et l'écoulement est freiné au contact de ces parois (condition de non glissement).

Milieu extérieur :

-Entrée du milieu extérieur : l'air arrive avec une vitesse constante et une température statique de 293°K à la pression atmosphérique 101325 Pa.

- Les parois qui définissent le milieu extérieur sont solides (conditions de non glissement).

-Sortie du milieu extérieur : L'air sort à la pression atmosphérique 101325 Pa.

IV.10. Le calcul itératif :

Avant de lancer les itérations on doit d'abord initialiser la solution en activant la commande <<Initialize-Initialize- solution- Initialization>>

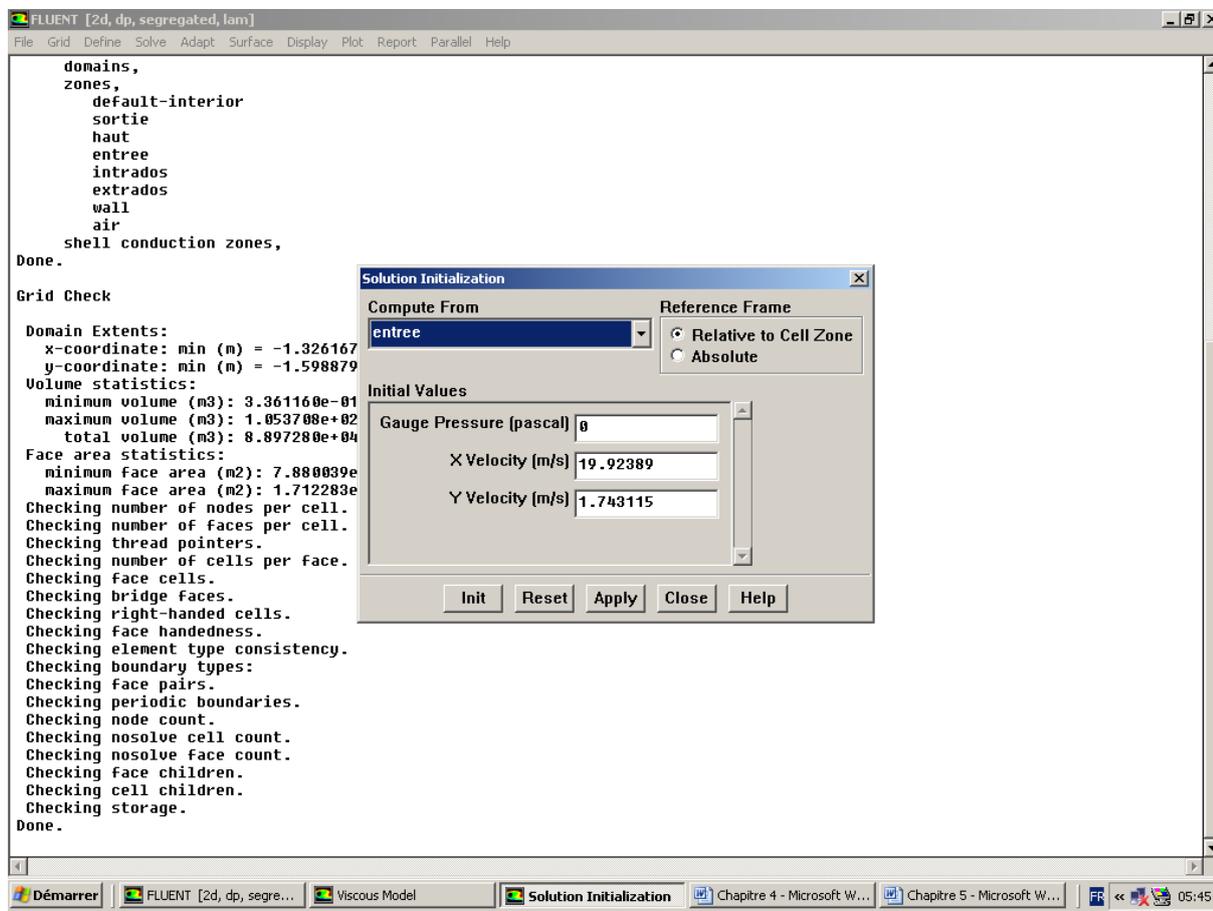


Figure IV.7 : Initialisation de la solution.

Les critères de convergence sont fixés en activant la commande <<Monitors-Residual-Residual Monitors>>

IV.11. Résultats de la simulation numérique à deux dimensions (2D) :

IV.11.1. Simulation numérique de la maquette N° 1 (une pale NACA 0015) :

a). Résultats de la simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s :

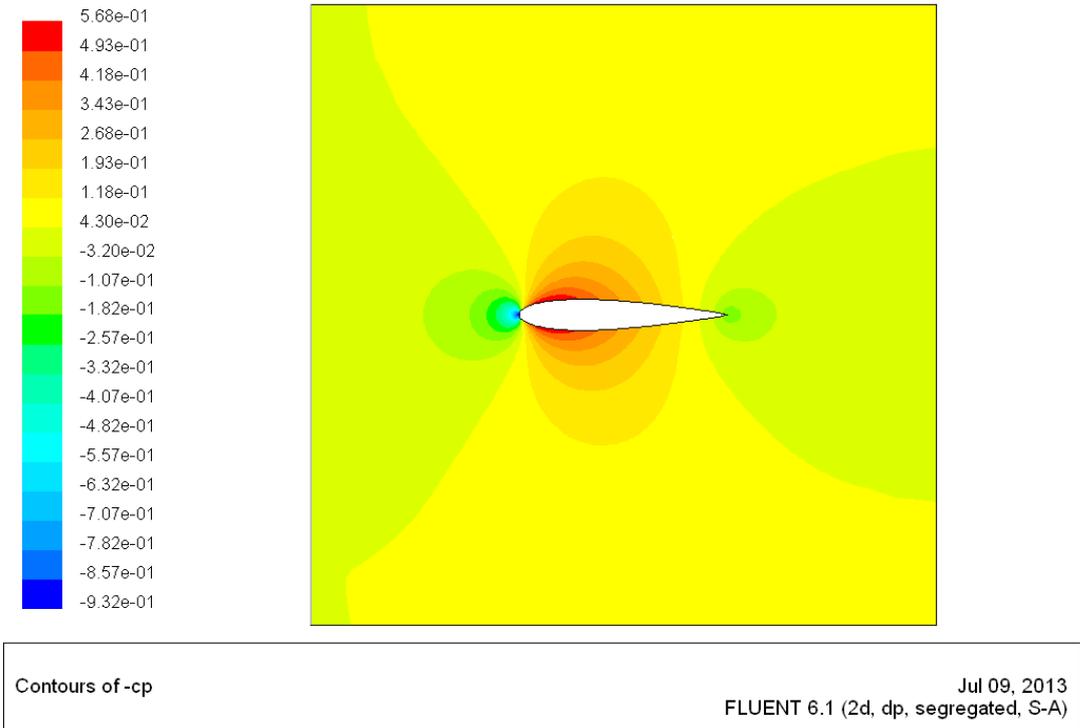


Figure IV.8 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ autour du profil NACA 0015 à l'incidence $i=0^\circ$ Pour $V_o=20,3$ m/s.

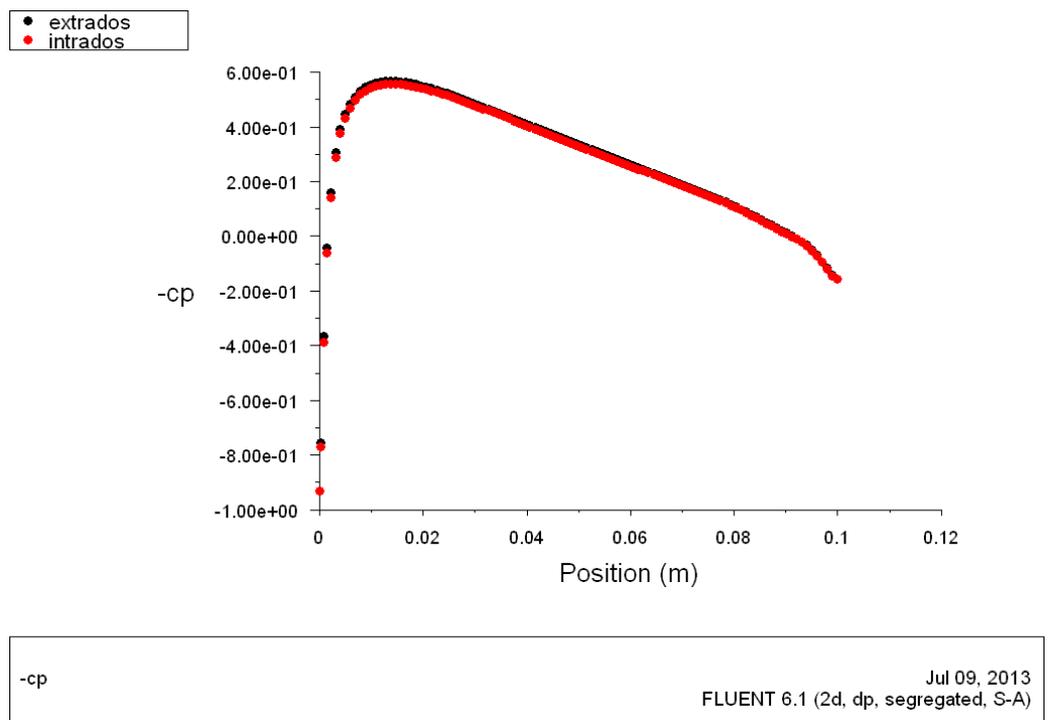


Figure IV.9: Valeurs du coefficient de dépression ($-C_p$) suivant l'axe des abscisses ox à l'extrados et l'intrados du profil à $i=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

On remarque que les valeurs du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i=0^\circ$ sont confondues pour l'extrados et l'intrados.

b). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=5^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s:

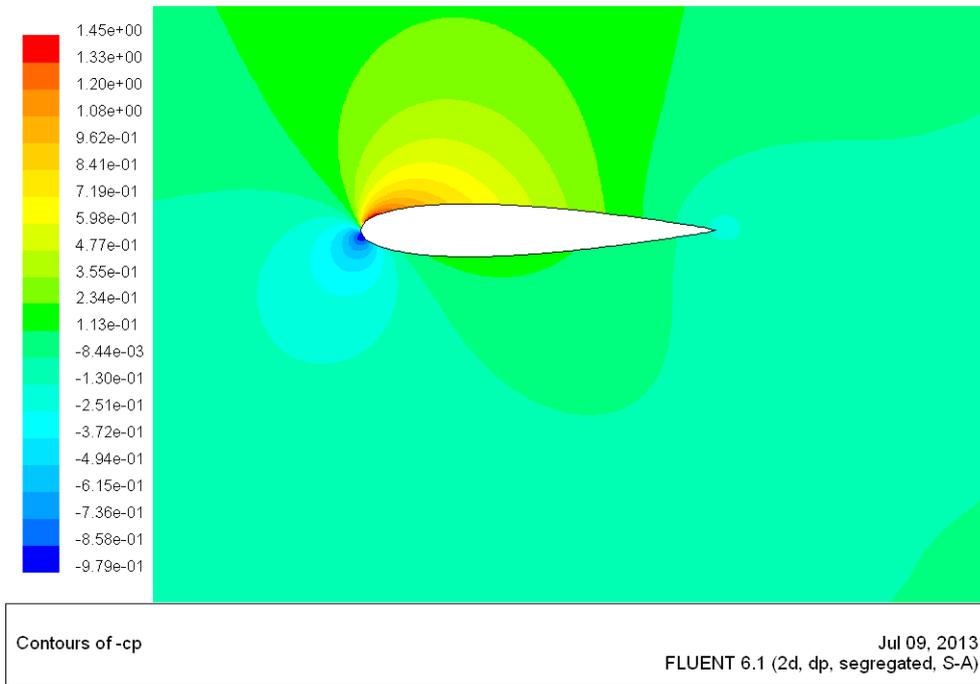


Figure IV.10: Contours du coefficient de dépression autour du profil à $i=5^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

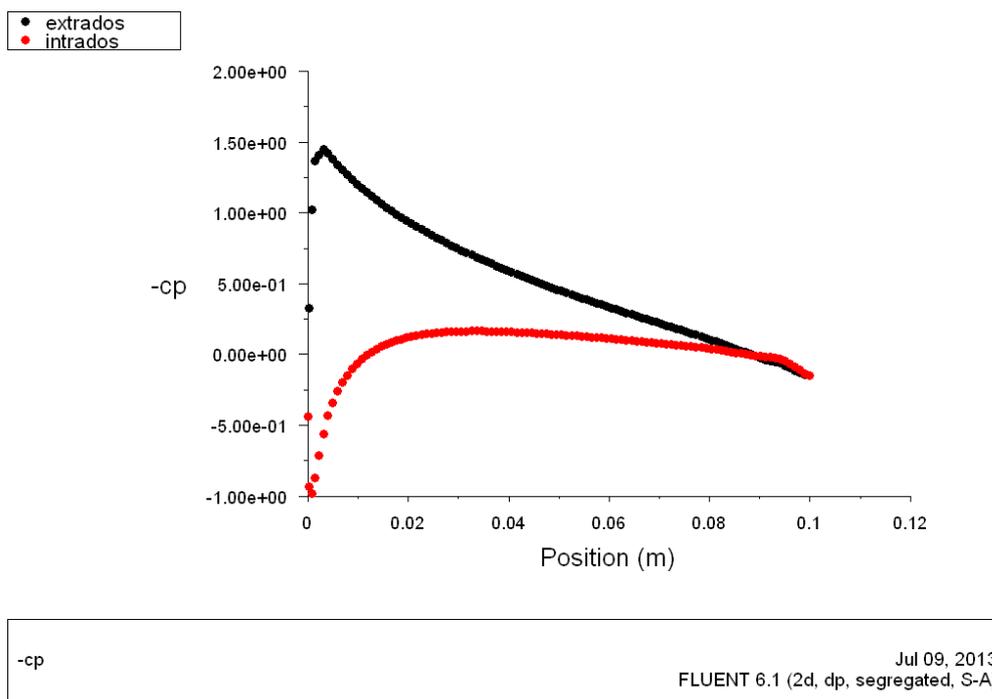


Figure IV.11 : Valeurs du coefficient de dépression $-C_p$ suivant l'axe des abscisses Ox à l'extrados et l'intrados du profil NACA 0015 à $i=5^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

On voit bien que les valeurs du coefficient de dépression à l'extrados sont très repérables que celles obtenues à l'intrados.

c). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=10^\circ$ pour $V_0=20,3$ m/s :

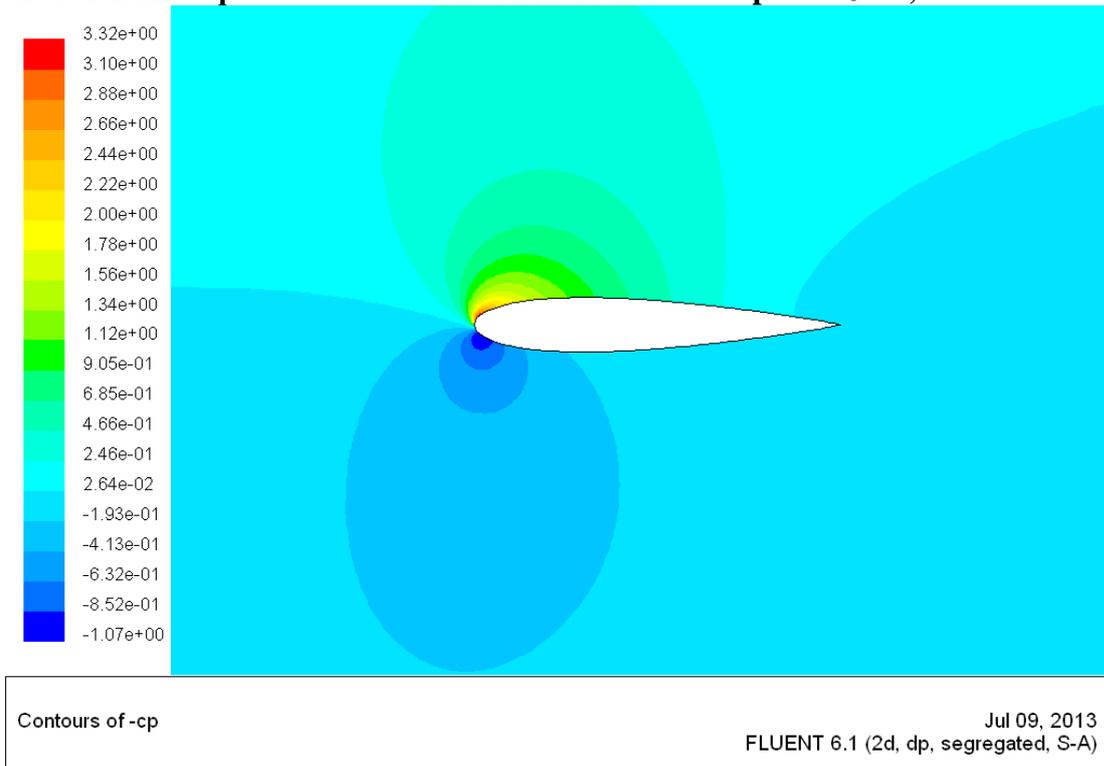


Figure IV-12 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ autour du profil NACA 0015 à l'incidence $i^\circ=10^\circ$ pour $V_0=20,3$ m/s.

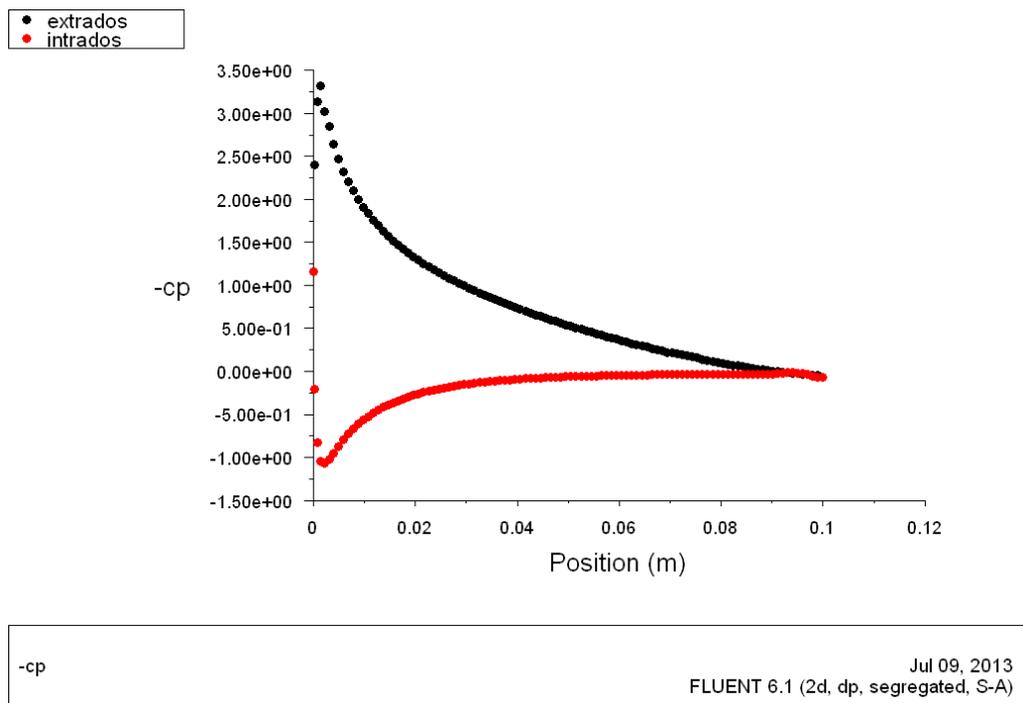


Figure IV-13 : Valeurs du coefficient de dépression $-C_p$ à l'extrados et l'intrados du profil NACA 0015 avant le décrochage pour $i^\circ=10^\circ$ à $V_0=20,3$ m/s.

On constate que les valeurs du coefficient de dépression $-C_p$ à l'extrados ont augmenté remarquablement avec l'augmentation de l'incidence de $i=5^\circ$ à $i=10^\circ$.

d). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=15^\circ$ pour $V_o=20,3$ m /s :

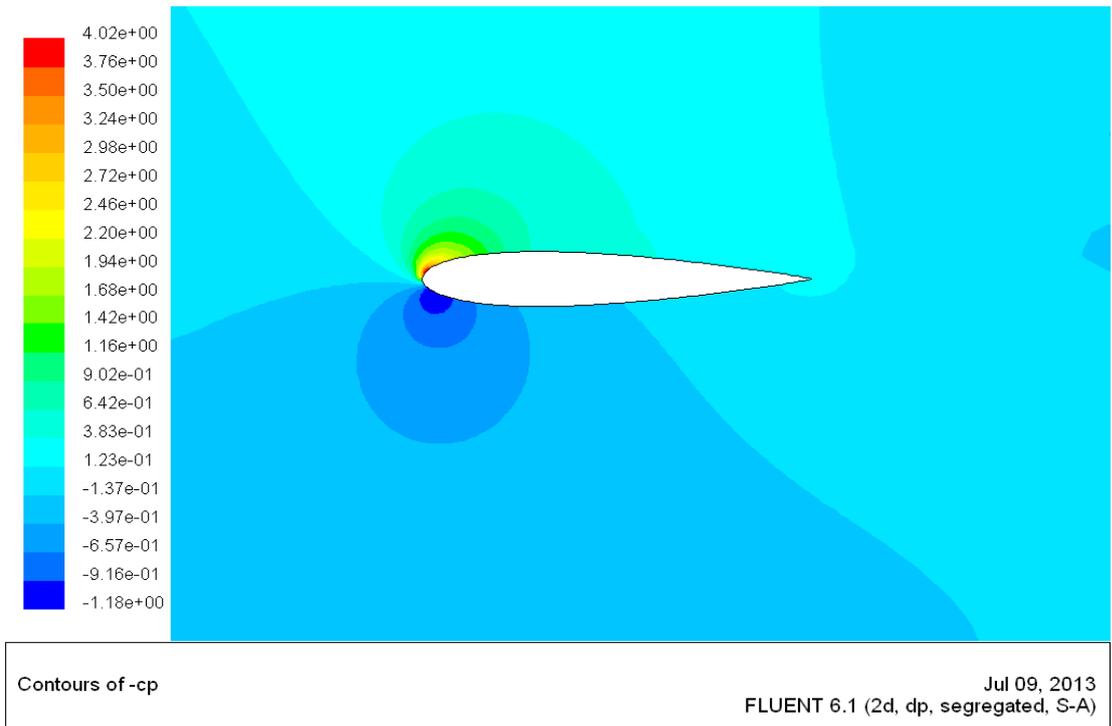


Figure IV-14: Contours du coefficient de dépression $-C_p$ autour du profil NACA 0015 à l'incidence $i=15^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

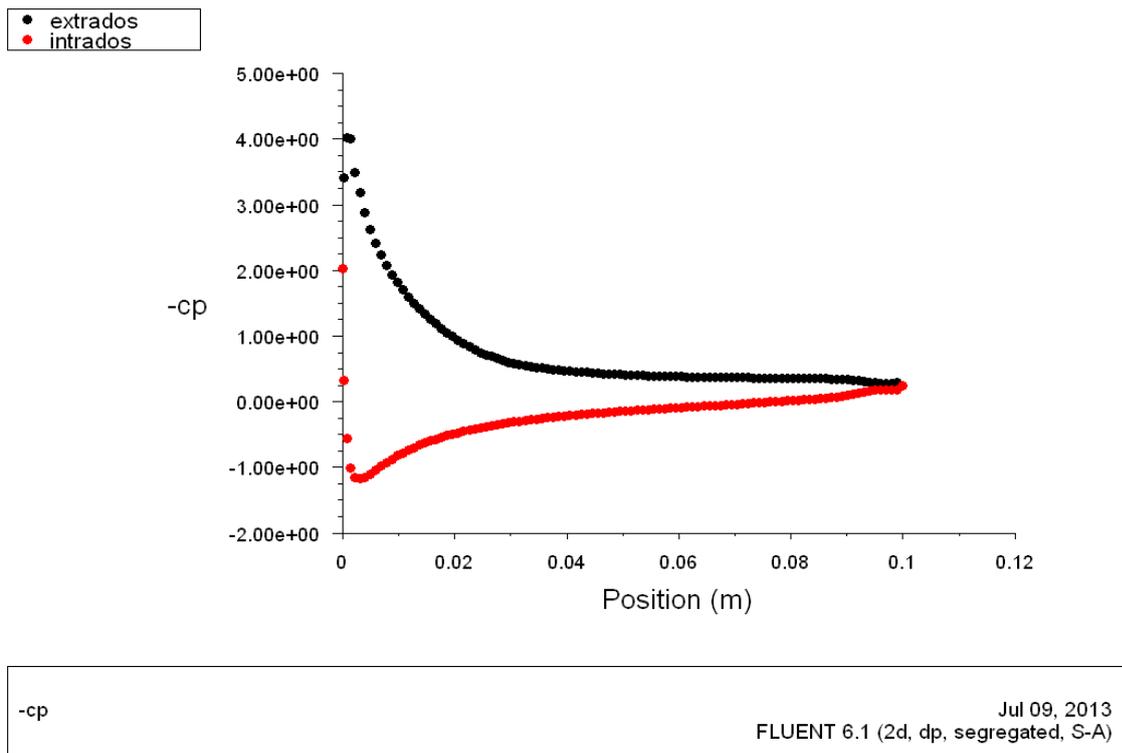


Figure IV-15 : Valeurs du coefficient de dépression $-C_p$ à l'extrados et l'intrados du profil NACA 0015 considéré pour $i=15^\circ$ à $V_o=20,3$ m/s.

A cette incidence on remarque la chute des valeurs du coefficient de dépression $-C_p$ à l'extrados du profil pour $x=0,02$ m.

e). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i^\circ=20^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s :

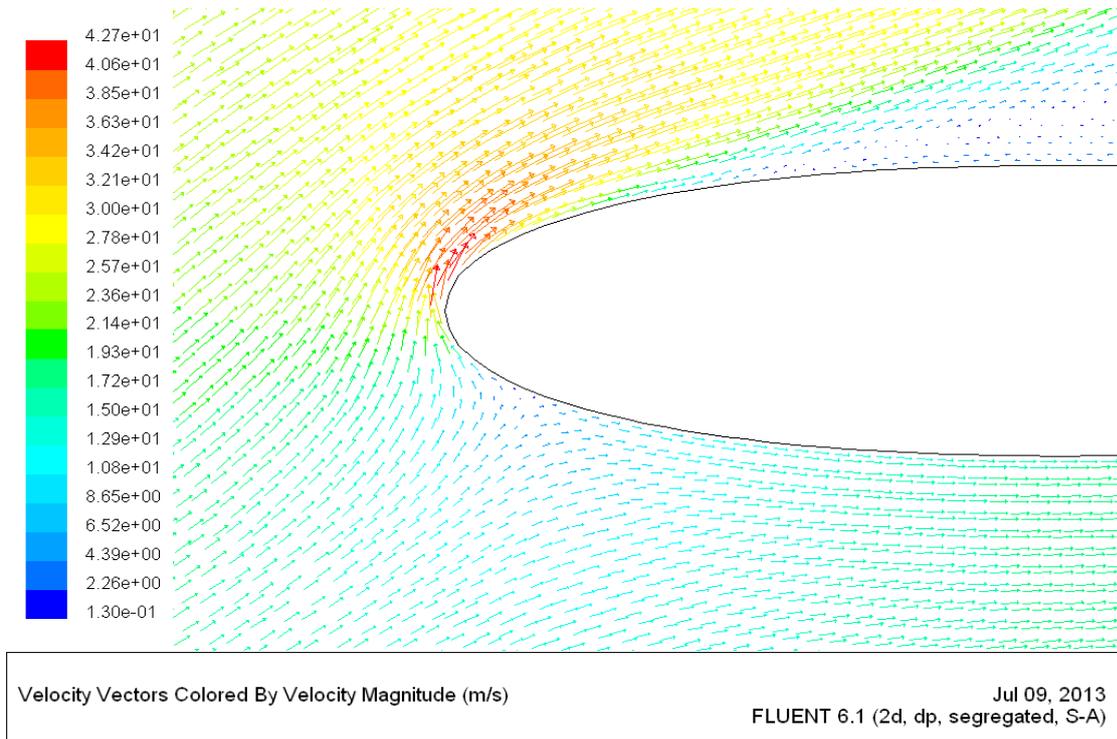


Figure IV-16 : Evolution de l'écoulement au voisinage du bord d'attaque du profil NACA 0015 avec un décalage léger du point d'arrêt vers l'intrados à $i^\circ=20^\circ$.

On voit un nuage tourbillonnaire au bord de fuite qui caractérise le décrochage (le décollement de la couche limite).

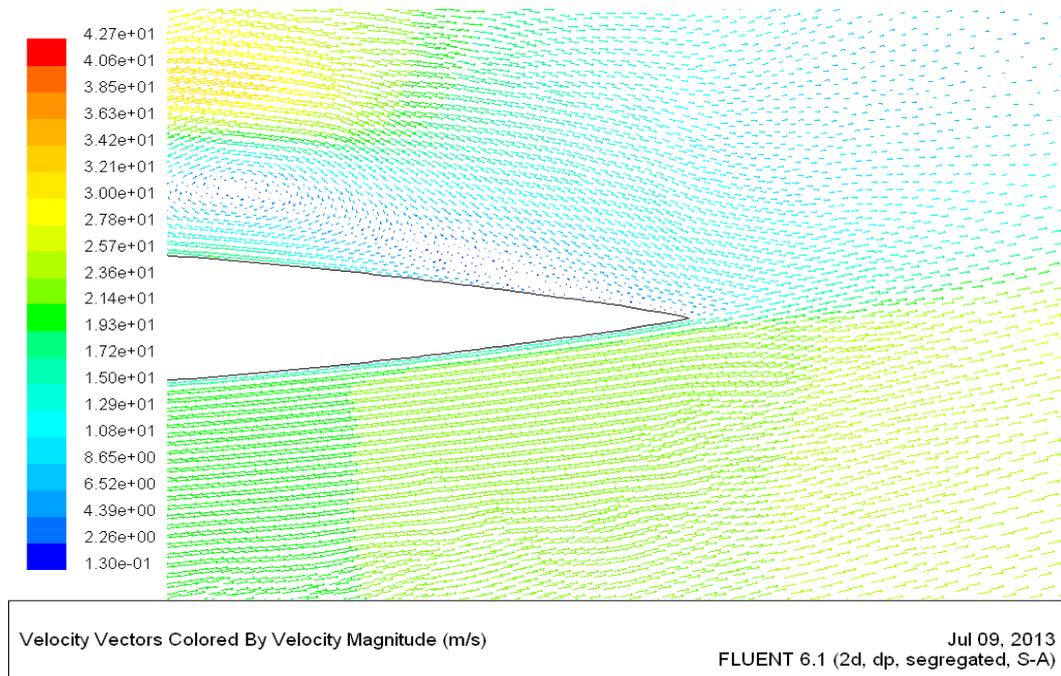


Figure IV-17 : Visualisation de l'écoulement au voisinage du bord de fuite à l'incidence $i^\circ=20^\circ$ Pour $V_o=20,3$ m/s.

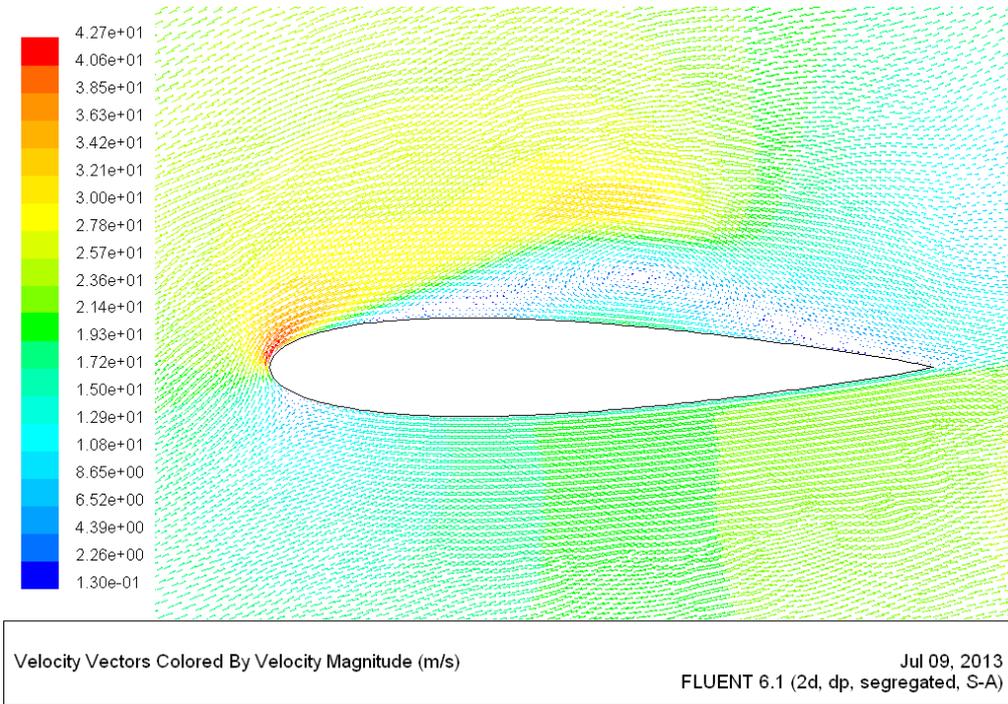


Figure IV-18: Visualisation de l'écoulement au voisinage des deux bords à l'incidence $i^\circ=20^\circ$
Pour $V_o=20,3$ m /s.

IV.11.2. Simulation numérique de la maquette N° 2 (éolienne complète):

a). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i^\circ=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s :

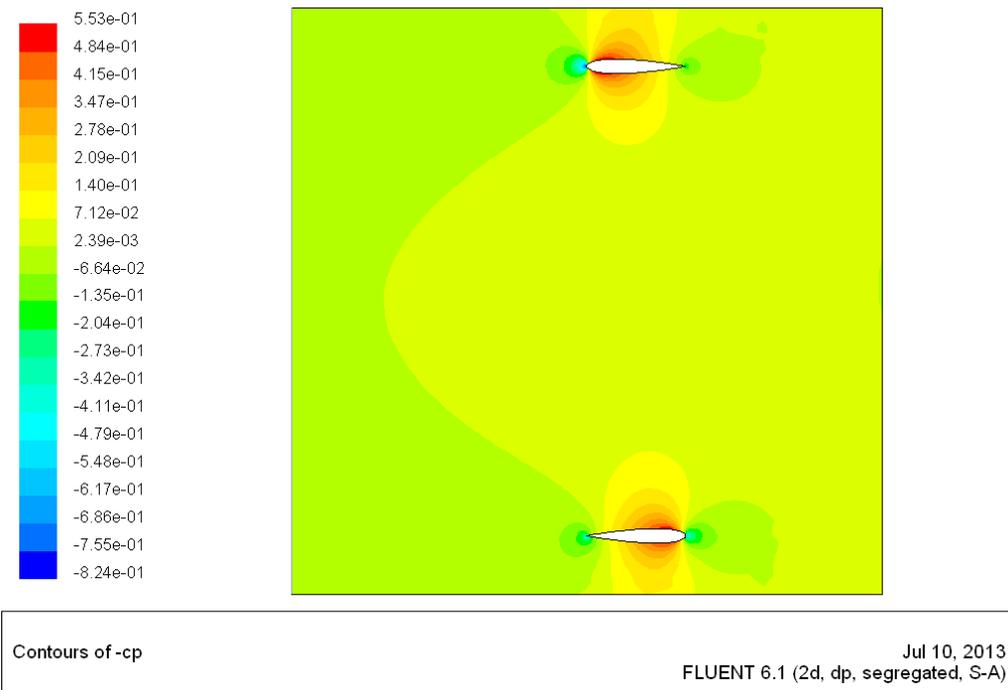


Figure IV-19 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i^\circ=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

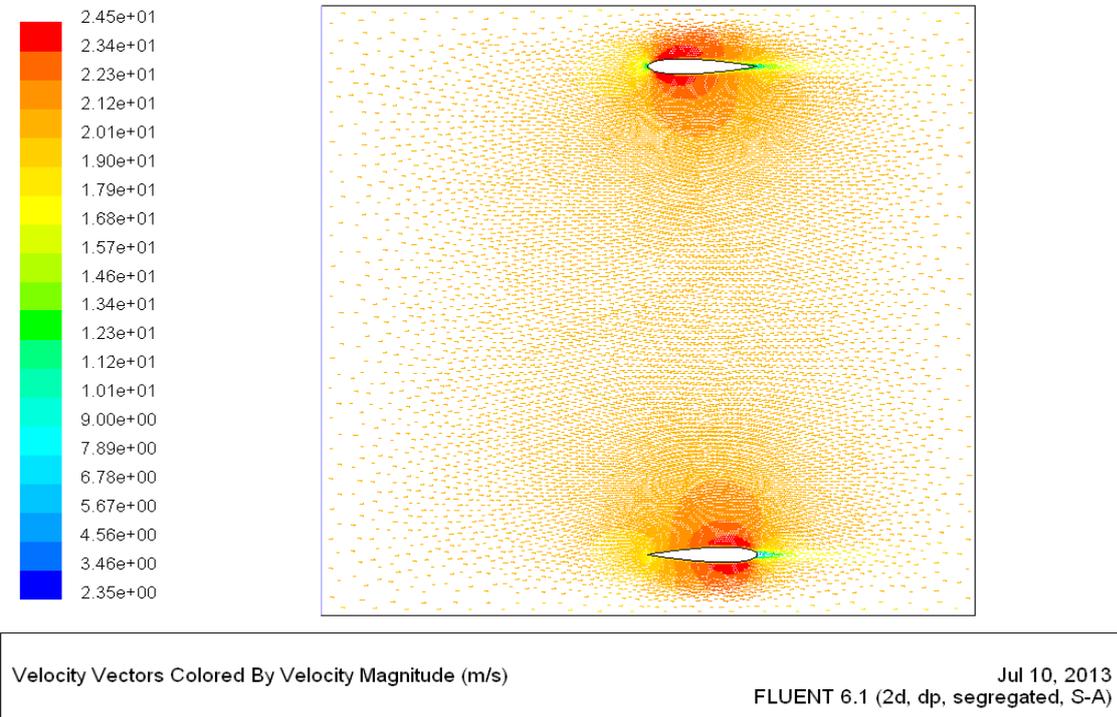


Figure IV-20 : Visualisation de l'écoulement au voisinage des deux bords pour chaque profil à l'incidence $i^\circ=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

A cette incidence l'écoulement autour de la pale 1 n'est pas affecté par la présence de l'autre pale 2.

b). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i= 15^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s :

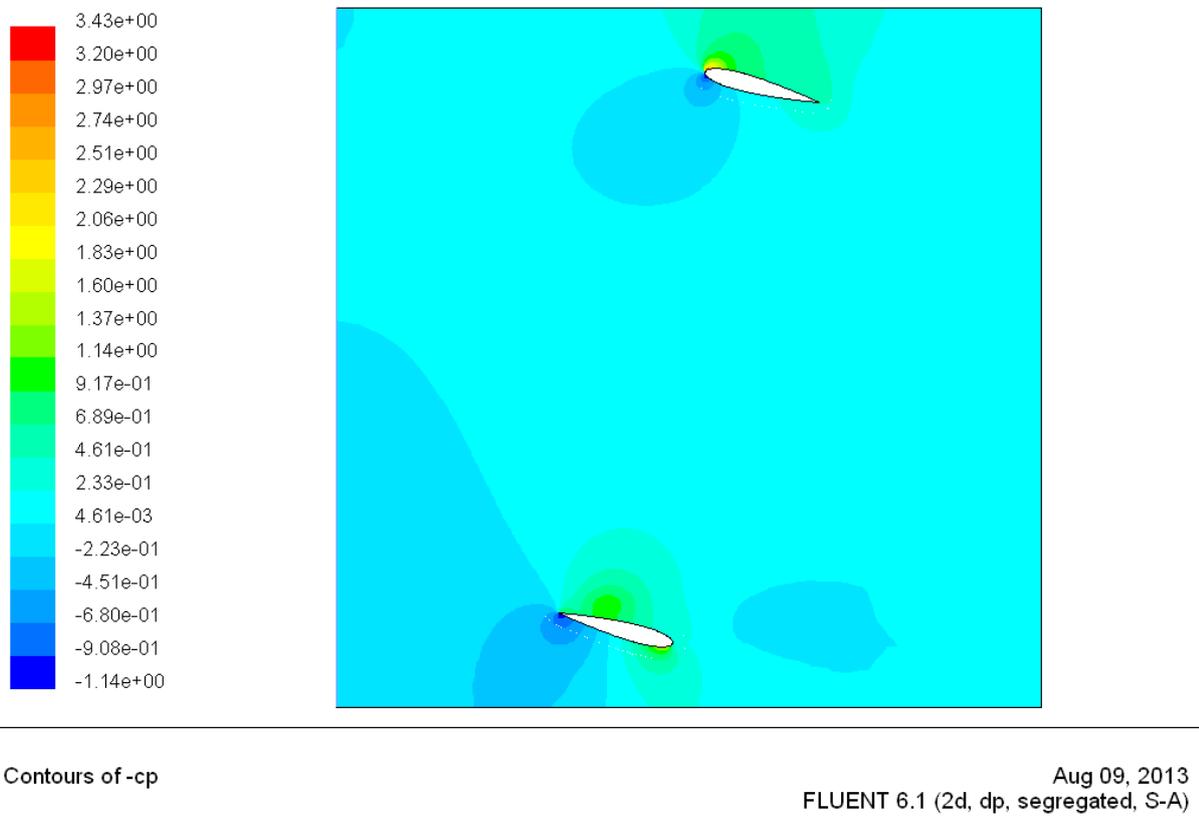


Figure IV-21 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i^\circ=15^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

Aucun effet de la présence de l'autre pale.

c). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=30^\circ$ pour $V_0=20,3$ m/s :

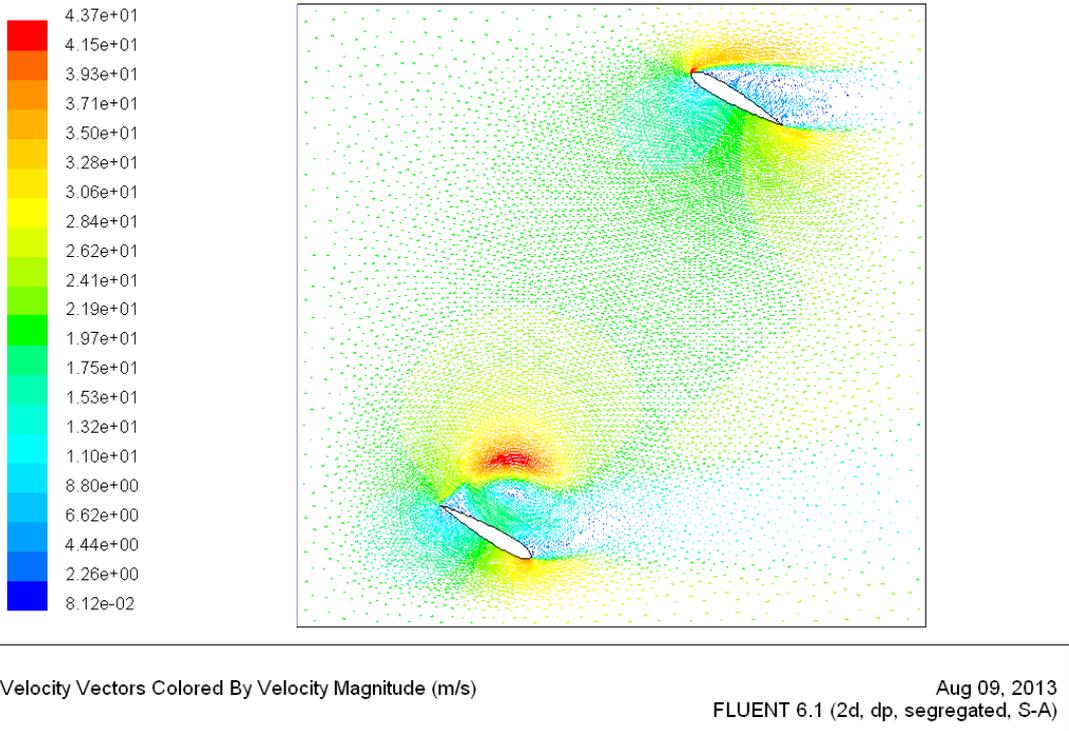


Figure IV-22 : Visualisation de l'écoulement au voisinage des deux bords pour chaque profil à l'incidence $i^\circ=30^\circ$ pour $V_0=20,3$ m/s.

On constate qu'on a un effet minimal de la pale 2 sur la pale 1 même si elle n'est pas tout à fait dans son sillage.

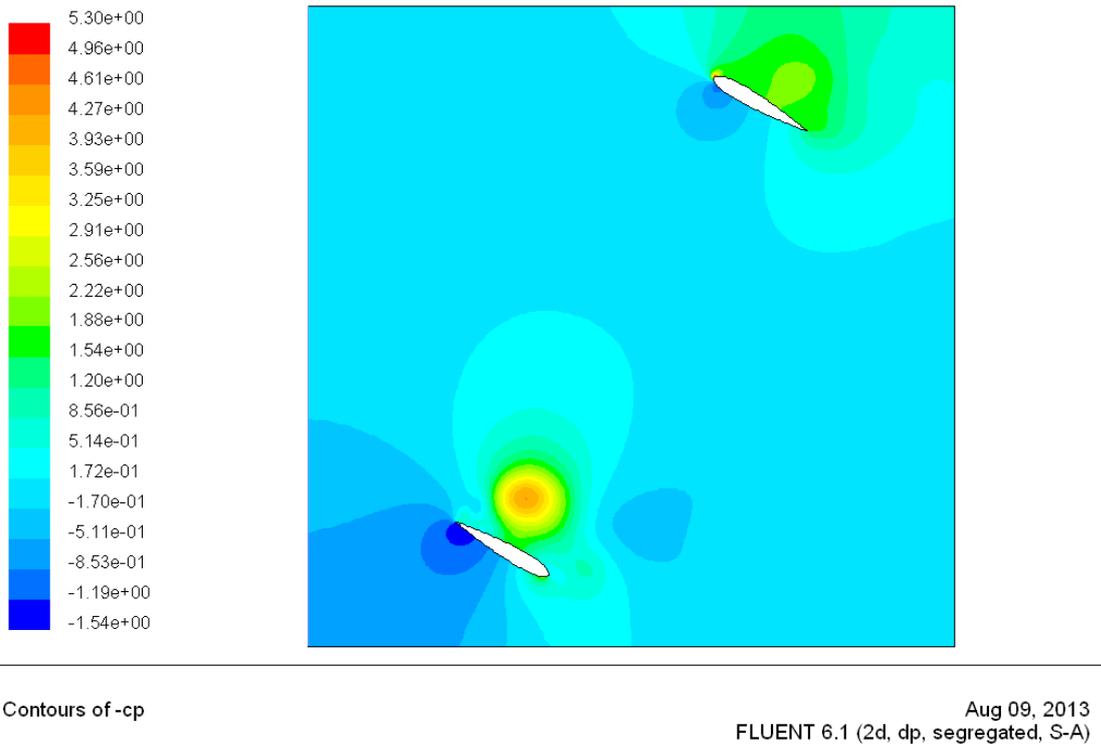


Figure IV-23 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i^\circ=30^\circ$ pour $V_0=20,3$ m/s.

d). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=45^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s :

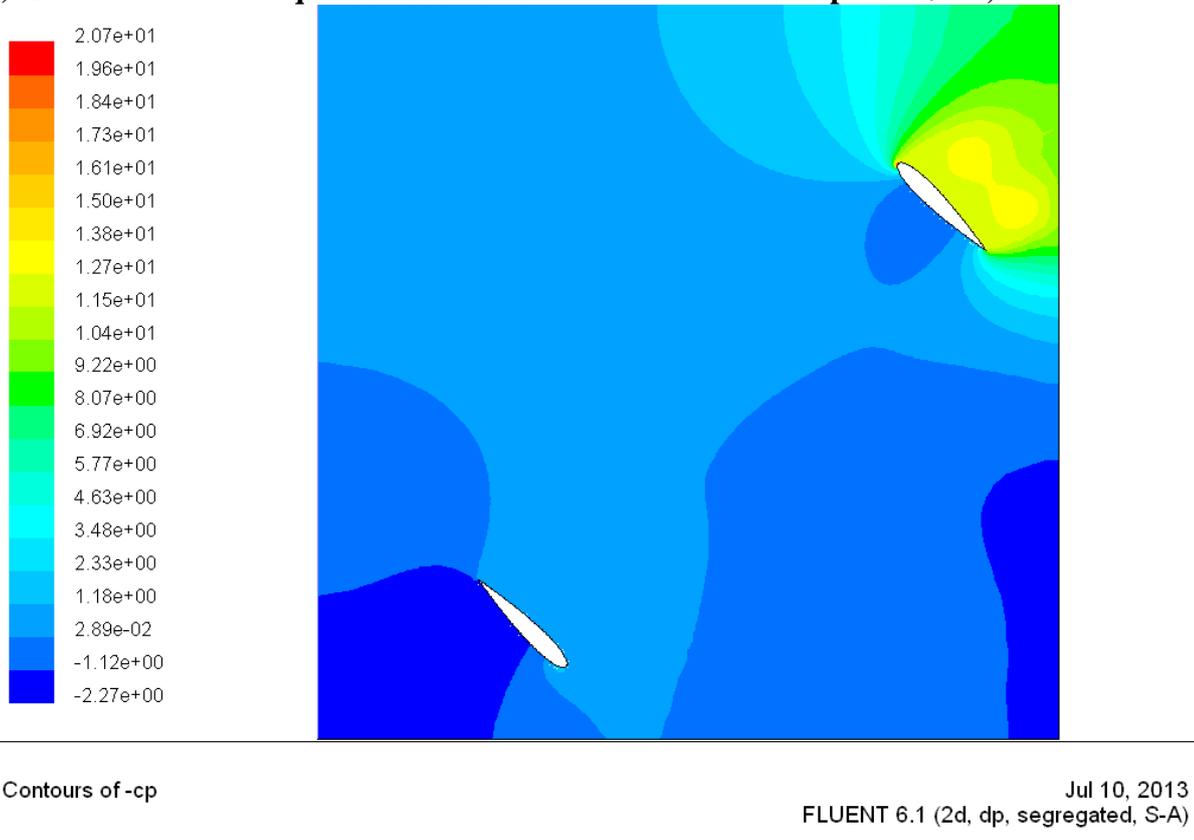


Figure IV-24 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i^\circ=45^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

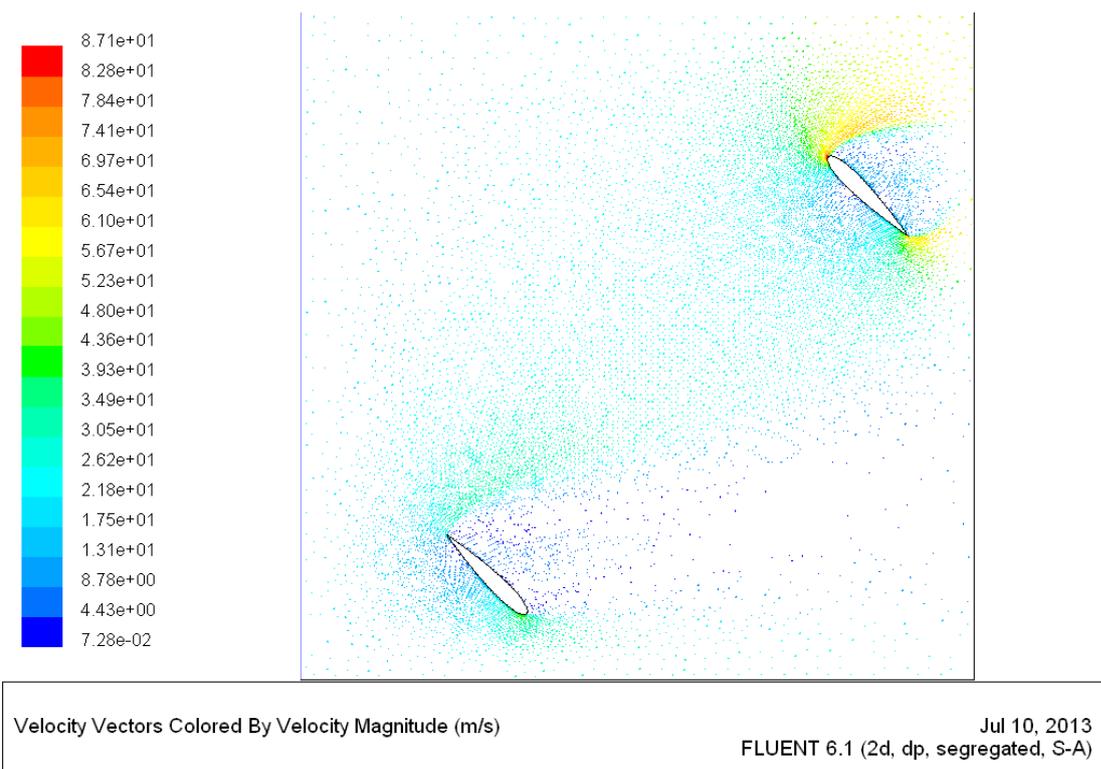


Figure IV-25 : Visualisation de l'écoulement au voisinage des deux bords pour chaque profil à l'incidence $i^\circ=45^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

IV.12. Simulation numérique à trois dimensions (3D) :

a). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s :

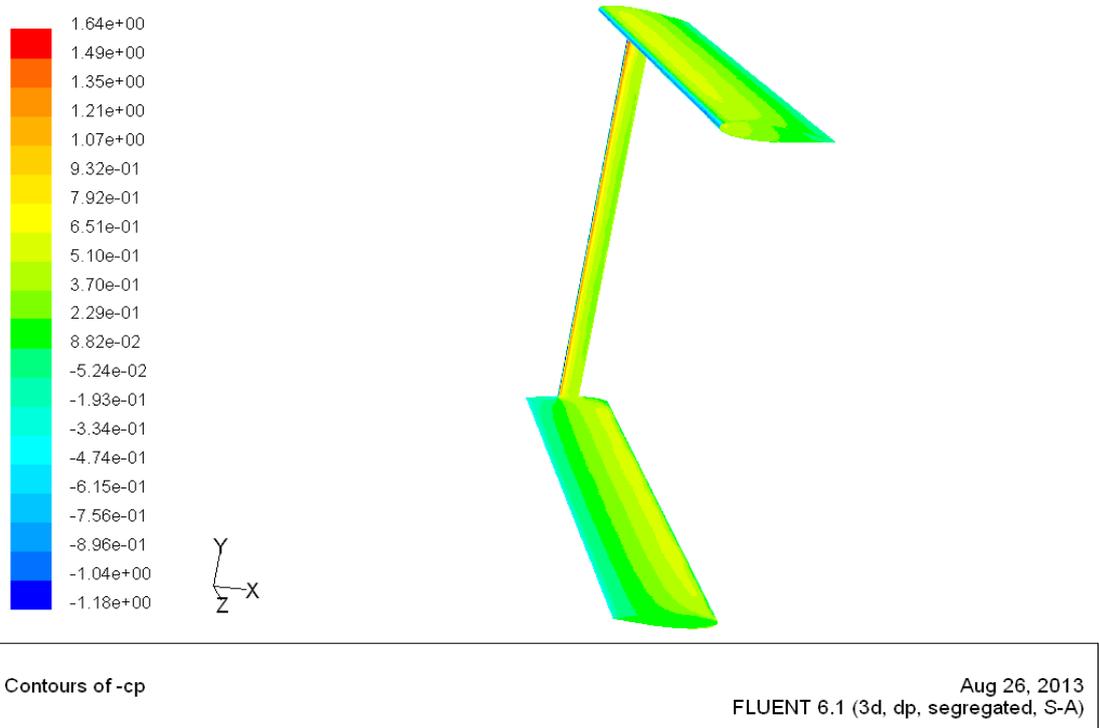


Figure .IV.26 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ du système à deux pales verticales à l'incidence $i=0^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

Ou on a déduit les valeurs numériques des coefficients de portance (C_z) et de traînée (C_x) :

$C_z=0,0053264$ et $C_x=0,034297$ à l'incidence $i=0^\circ$.

b). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=5^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s :

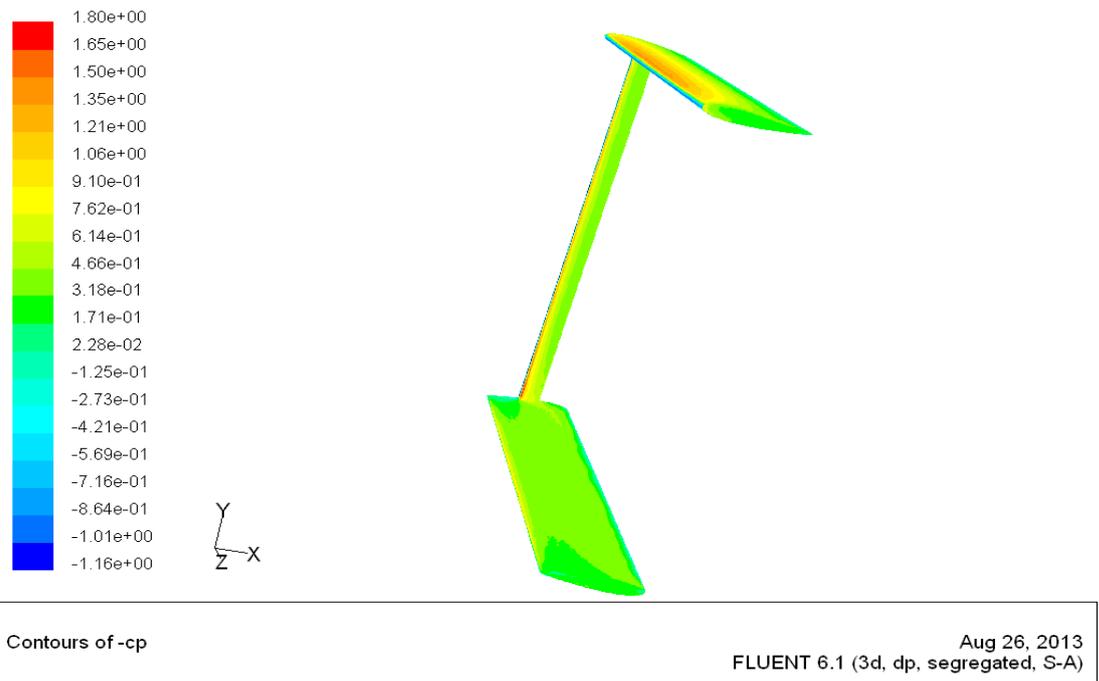


Figure .IV.27 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ du système à deux pales verticales à l'incidence $i=5^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

Ou on a déduit les valeurs numériques des coefficients de portance (C_z) et de traînée (C_x) :

$C_z = 0,1.5154$ et $C_x = 0,05.4739$ à l'incidence $i = 5^\circ$.

c). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i = 10^\circ$ pour $V_o = 20,3$ m/s :

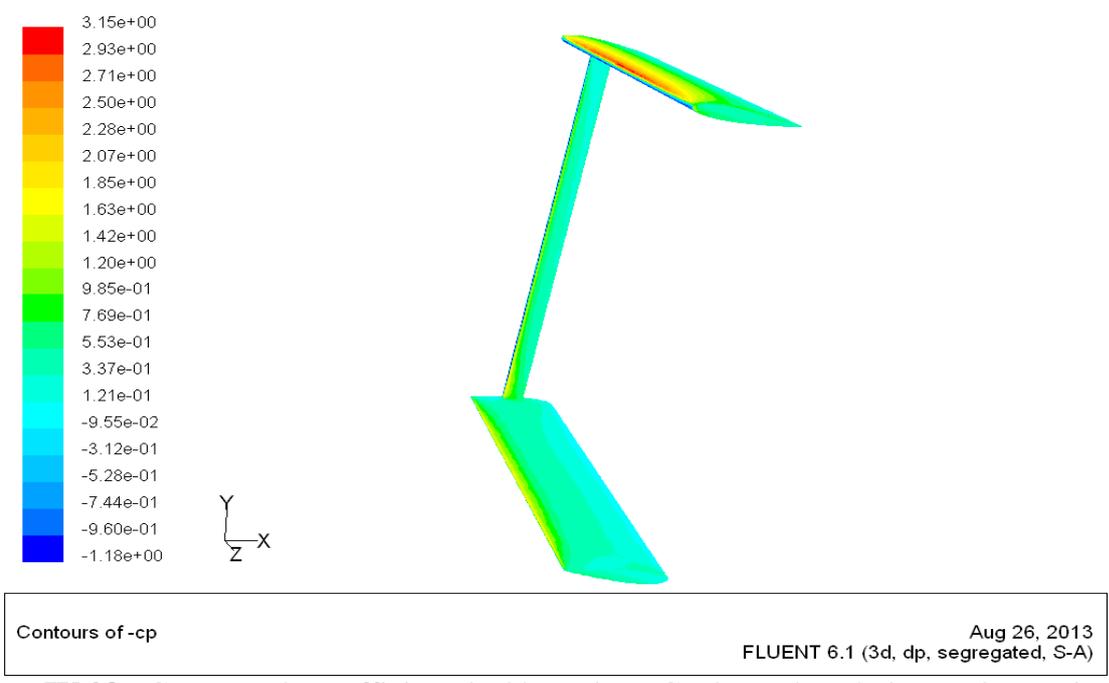


Figure IV.28 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ du système à deux pales verticales à l'incidence $i = 10^\circ$ pour $V_o = 20,3$ m/s.

Ou on a déduit les valeurs numériques des coefficients de portance (C_z) et de traînée (C_x) :

$C_z = 0,27154$ et $C_x = 0,10836$ à l'incidence $i = 10^\circ$.

d). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i = 15^\circ$ pour $V_o = 20,3$ m/s :

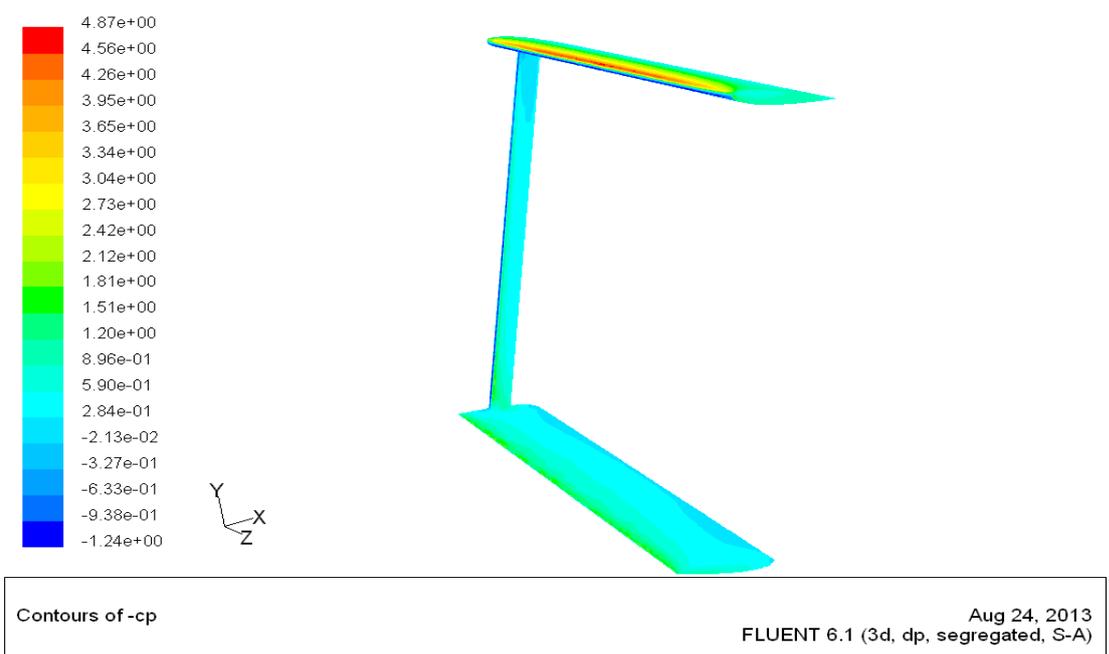


Figure IV.29: Contours du coefficient de dépression $-C_p$ du système à deux pales verticales à l'incidence $i = 15^\circ$ pour $V_o = 20,3$ m/s.

Ou on a déduit les valeurs numériques des coefficients de portance (C_z) et de traînée (C_x) :
 $C_z= 0.36753$ et **$C_x= 0.18818$** à l'incidence $i= 15^\circ$.

e). Simulation numérique de l'écoulement à l'incidence $i=20^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s :

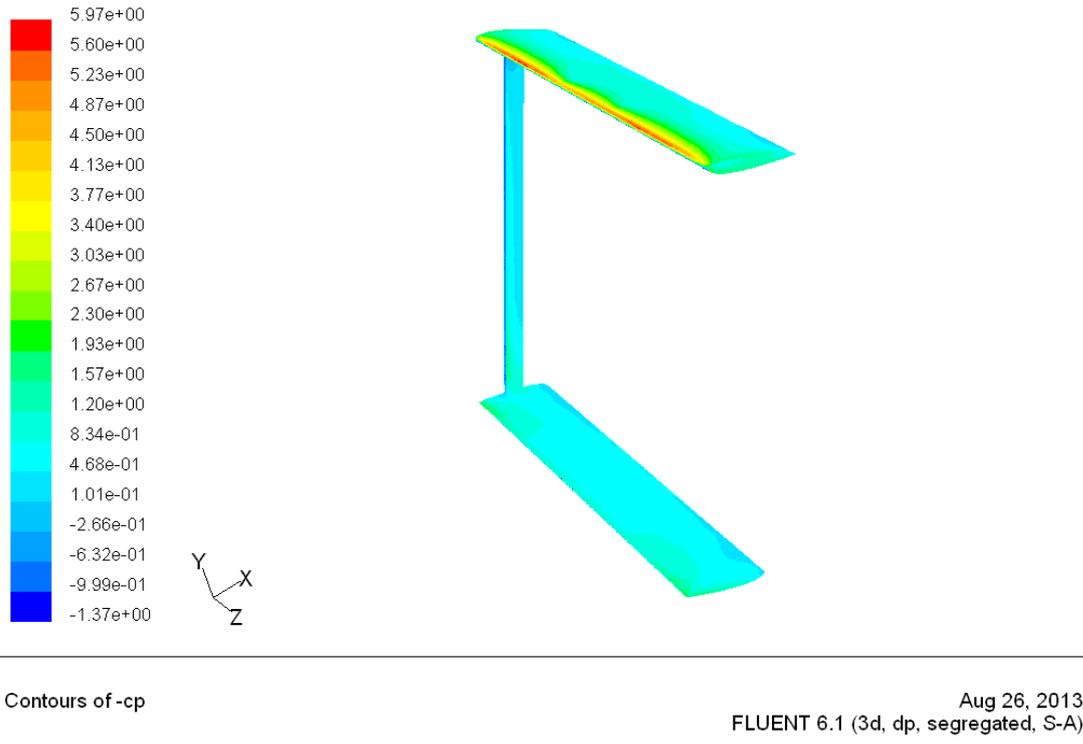


Figure IV.30 : Contours du coefficient de dépression $-C_p$ du système à deux pales verticales à l'incidence $i=20^\circ$ pour $V_o=20,3$ m/s.

Ou on a déduit les valeurs numériques des coefficients de portance (C_z) et de traînée (C_x) :

$C_z= 0,44011$ et **$C_x= 0,28997$** à l'incidence $i= 20^\circ$.

Conclusion :

Cette étude numérique nous a permis d'évaluer les caractéristiques aérodynamique du profil NACA0015 utilisé dans notre éolienne à échelle réduite, elle nous a montré aussi les zones de turbulences.

La simulation numérique à (3D) nous a permis de déterminer les coefficients aérodynamiques, de portance (C_z), de traînée (C_x) à différentes incidences ce qui nous permet d'effectuer une étude comparative dans le chapitre V.

Chapitre V

Confrontation des Résultats

V.1. Introduction :

Dans ce dernier chapitre on a eu à comparer les résultats obtenus à partir des deux méthodes employées précédemment dans notre mémoire, où les résultats numériques obtenus avec le code de calcul Fluent pour le profil NACA0015 seront confrontés aux résultats obtenus expérimentalement avec se même profil testé dans la soufflerie subsonique de notre Département.

V.2. Comparaison de résultats expérimentaux et numériques obtenus :

V.2.1. Comparaison des valeurs du coefficient de dépression $-C_p$ en (2D) :

Actuellement, on a développé une méthode couramment utilisé pour assurer la qualité des simulations numériques qui consiste à calculer les forces aérodynamiques agissantes sur un profil, la distribution de pression, la traînée et la portance, etc....A partir des solutions numériques et ensuite de les comparer aux résultats obtenus expérimentalement en soufflerie subsonique.

A cet effet, pour mettre en évidence la concordance des résultats numériques obtenus à partir de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux, nous avons procédé à une comparaison entre ces deux résultats pour les incidences qui précèdent le décrochage, voir figure (V.1) et (V.2), pour mieux élucider la différence.

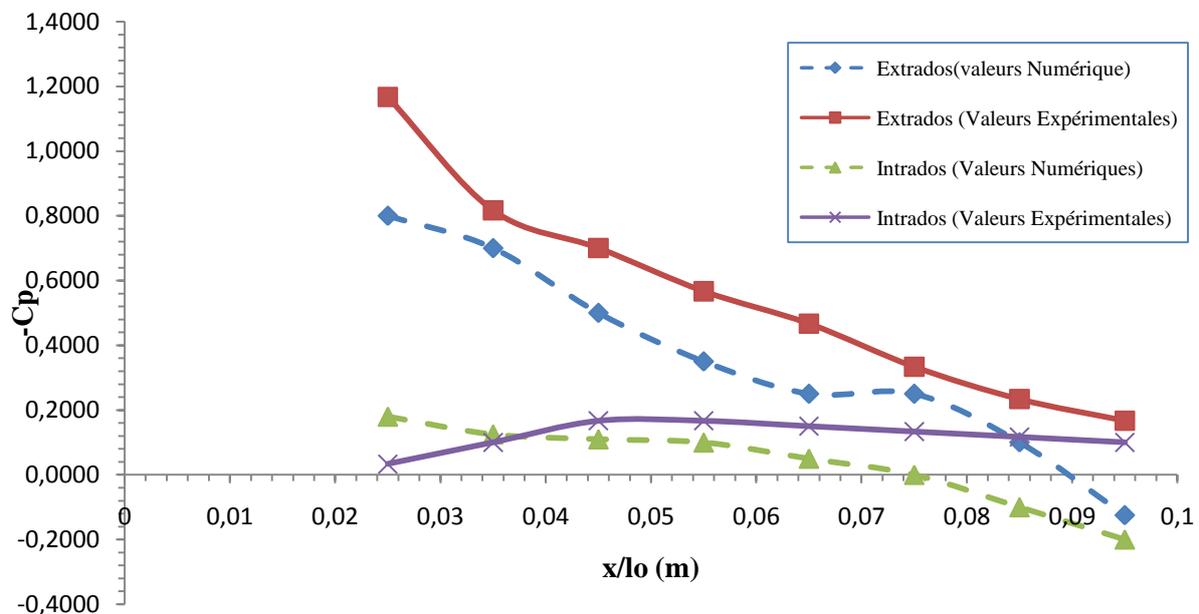


Figure V.1 : Comparaison des valeurs numériques et expérimentales du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i=5^\circ$ pour $V=20,3$ m/s, du profil NACA 0015.

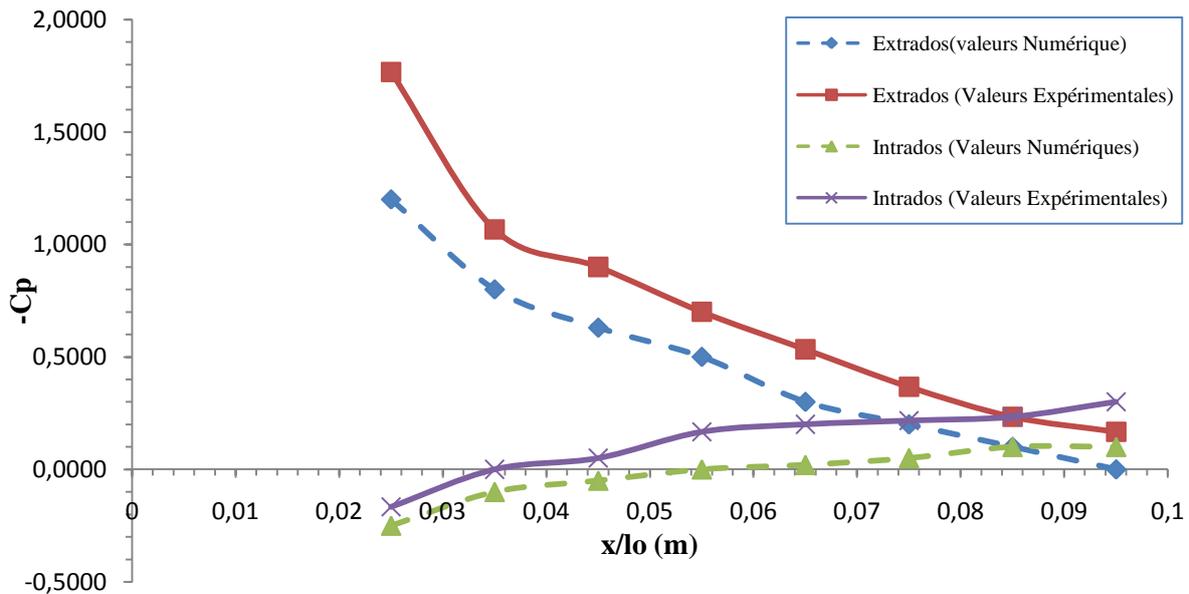


Figure V.2 : Comparaison des valeurs numériques et expérimentales du coefficient de dépression $-C_p$ à l'incidence $i=10^\circ$ pour $V_o=20,3$ m /s, du profil NACA 0015.

V.2.2. Comparaison des valeurs numériques et expérimentales des coefficients de portance C_z et de traînée C_x en trois dimensions (3D):

a) Courbes de portance C_z :

On remarque que les deux courbes ont presque la même allure, on déduit que les valeurs numériques concordent avec les valeurs expérimentales jusqu'à l'incidence $i=10^\circ$, car au-delà de cette incidence commence le décrochage de la couche limite, voir **figure (V.3)**.

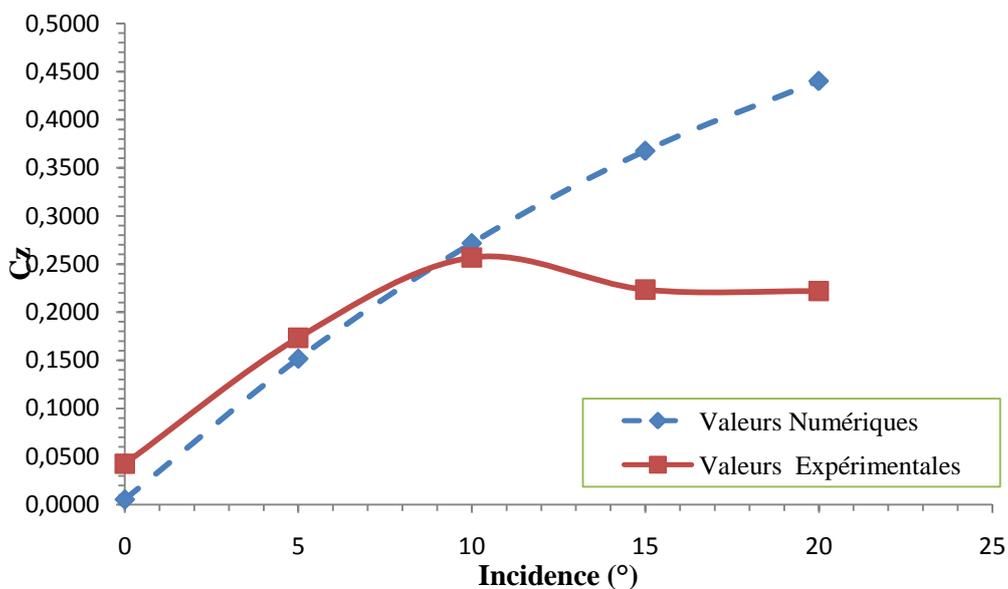


Figure V.3 : Comparaison des valeurs numériques en 3D et expérimentales du coefficient de portance C_z , pour l'éolienne complète.

b) Courbes du coefficient de traînée C_x :

On constate presque la même allure des deux courbes, les valeurs numériques concordent avec les valeurs expérimentales, avec un léger écart entre elles, à partir du décollement de la couche limite à l'incidence $i=10^\circ$, voir **figure (V.4)** ci-dessous.

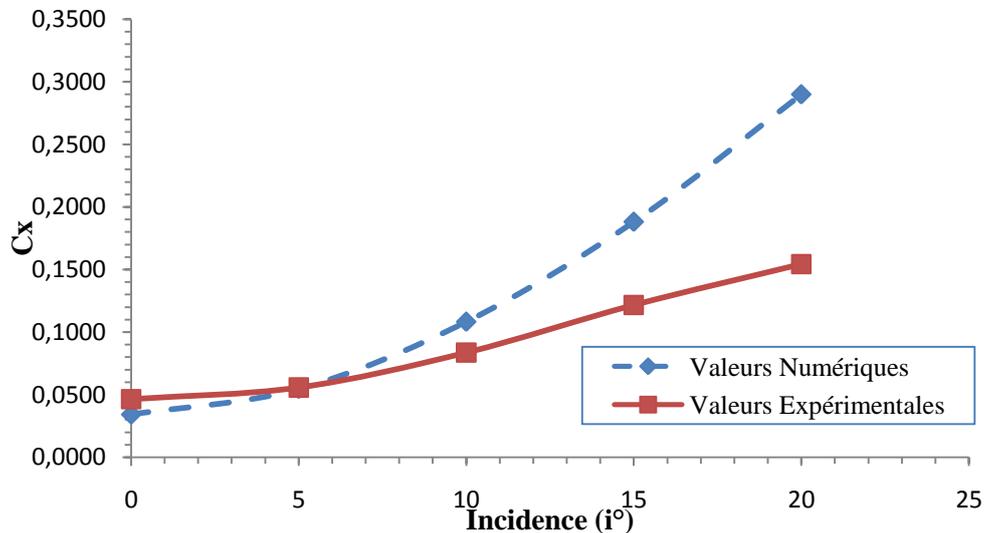


Figure V.4 : Comparaison des valeurs numériques en 3D et expérimentales du coefficient de traînée C_x , pour l'éolienne complète.

V.2.3. Comparaison de valeurs expérimentales du coefficient de portance C_z et de traînée C_x pour le rotor Darrieus à pales verticales et inclinées de 6° :

a) Courbes du coefficient de portance C_z :

On remarque une légère augmentation du coefficient de portance des pales verticales par rapport aux pales inclinées.

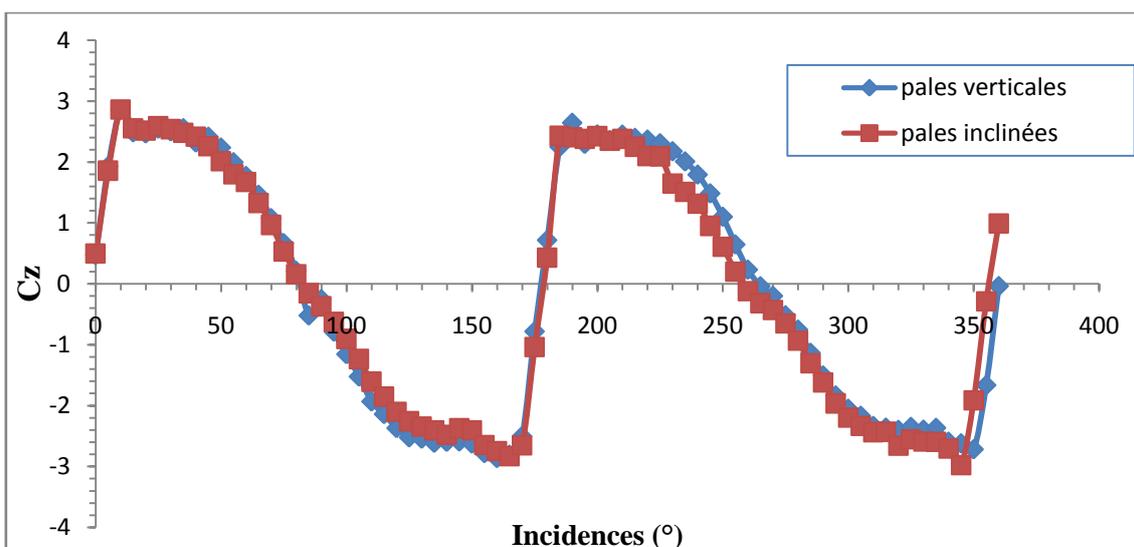


Figure V.5 : Comparaison des valeurs expérimentales du coefficient de portance C_z des deux rotors Darrieus (à pales verticales et inclinées).

b) Courbes du coefficient de traînée C_x :

On remarque une légère diminution du coefficient de traînée C_x pour les pales inclinées par rapport aux pales verticales.

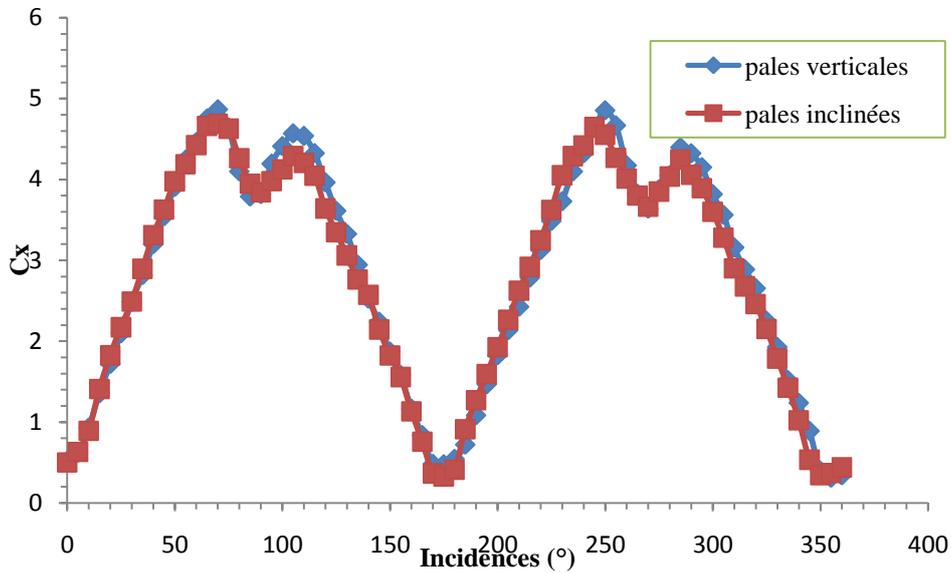


Figure V.6 : Comparaison de valeurs expérimentales du coefficient de traînée C_x des deux rotors Darrieus (à pales verticales et inclinées).

c) Courbes du coefficient de puissance CP :

On constate que le coefficient de puissance CP du rotor Darrieus à pales verticales est plus important que pour celui à pales inclinées.

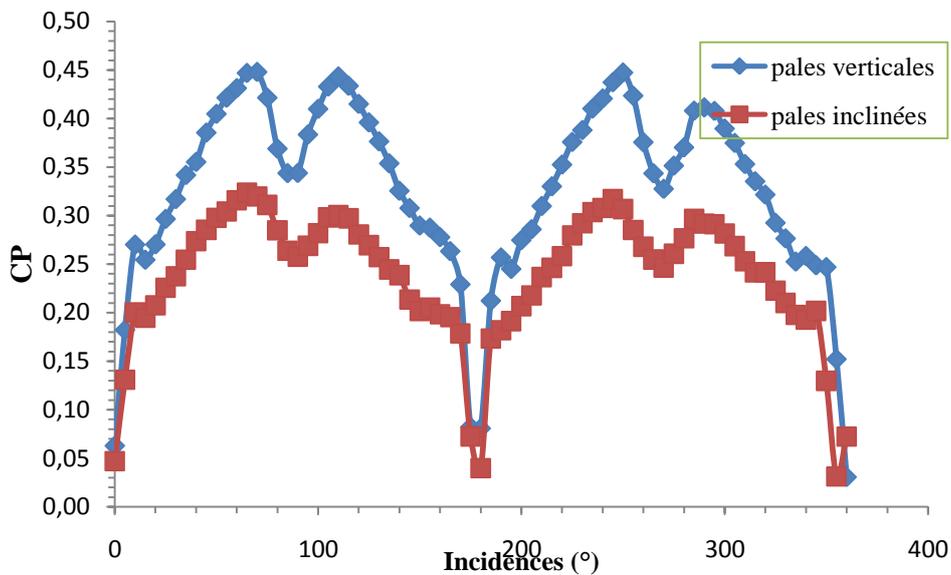


Figure V.7 : Comparaison des valeurs expérimentales du coefficient de puissance des deux rotors Darrieus (à pales verticales et inclinées).

V.3. Conclusion :

Dans ce dernier chapitre on a eu à comparer les résultats obtenus expérimentalement dans la soufflerie subsonique avec ceux obtenus numériquement avec le code de calcul Fluent.

En premier lieu, les résultats obtenus avec le code de calcul Fluent de la simulation numérique autour du profil étudié NACA0015 nous a permis de bien comprendre le phénomène physique à travers les différents contours obtenus (de pression, de dépression et celui des vitesses).

Les résultats obtenus expérimentalement concordent bien avec les résultats obtenus numériquement, car elles évoluent dans le bon sens, on a eu aucune simulation contradictoire avec les expériences effectuées dans la soufflerie subsonique, voir **figures** (de **V.1** à **V.4**).

L'inclinaison des pales vers l'extérieur du rotor Darrieus fait diminuer remarquablement le coefficient de puissance CP.

Conclusion Générale

L'objectif principal de notre travail consiste à mesurer le coefficient de dépression ($-C_p$) pour montrer son évolution sur l'extrados et l'intrados du profil NACA0015 à une vitesse constante, et pour différentes incidences, puis mesurer les coefficients de portance (C_z) et de traînée (C_x) pour en déduire le coefficient de puissance (C_p) de notre rotor Darrieus à pales verticales, et à pales inclinées vers l'extérieur, en dernier nous avons fait une simulation numérique à l'aide du code de calcul *Fluent* pour une comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux de la simulation.

- Sur l'extrados on remarque que le coefficient de dépression ($-C_p$) augmente avec l'augmentation de l'incidence même après l'incidence de décrochage qui est voisine de 10° , pour une vitesse constante $V_o=20,3$ m/s.
- Sur l'intrados on remarque que le coefficient de dépression ($-C_p$) diminue avec l'augmentation de l'incidence même après l'incidence de décrochage, pour une vitesse constante de $20,3$ m/s.
- La variation de la portance avec l'incidence de la pale est linéaire jusqu'au décrochage, à l'incidence $i=10^\circ$.
- La variation de la traînée est linéaire.
- La simulation numérique nous a permis de suivre l'évolution de l'écoulement autour du profil, et à détecter les zones à forte et faible turbulence.
- Pour les faibles incidences (avant décrochage), on remarque que les résultats numériques concordent avec les résultats expérimentaux, mais cela ne dure pas longtemps car avec l'augmentation des incidences (après décrochage) un écart se forme entre les deux résultats.
- Les résultats expérimentaux des caractéristiques aérodynamiques du rotor Darrieus à pales verticales à plus de performance que pour les pales inclinées vers l'extérieur.
- Les moyens de mesure dont dispose la soufflerie tendent à limiter la précision de nos mesures, nous recommandons une étude élargie dans ce domaine avec des moyens de mesure plus élaborés.
- Par ailleurs, ce projet nous a permis d'acquérir des connaissances sur l'aérodynamique des éoliennes en général, et sur les éoliennes de type Darrieus en particulier, et nous initier à la simulation numérique et nous aider à la maîtrise du code de calcul *Fluent* pour notre vie professionnel.

Références bibliographiques :

- [1] **C.Ploesteanu, D.Tarziu, T.Maitre**, « Modélisation de l'écoulement dans une turbine Darrieus à nombre de Reynolds modéré », 9^{ème} journée de l'hydrodynamique 10.11.12 Mars 2012, Poitier-Futuroscope.
- [2] **N.C. Batista, R. Melício, J.C.O. Matias and J.P.S. Catalão**, « Self-Start Performance Evaluation in Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbines: Methodology and Computational Tool Applied to Symmetrical Airfoils ». University of Beira Interior, Centre for Aerospace Science and Technologies, Covilha, Portugal, 2011.
- [3] **N.belouaggadia** « énergie éolienne », mémoire de fin d'étude, Université Hassan II, Mohammedia, Faculté des sciences Ben M'Sik, 2010.
- [4] **Manuel Franquesa Voneschen**, « Brève introduction aux éoliennes Darrieus », Auteur du livre « Kleine Windräder : Berechnung u. Konstruktion » - Wiesbaden ; Berlin, Allemagne, 2010.
- [5] **Pr. H. Fatmaoui**, « éléments de base de l'aérodynamique des pales d'éoliennes », Master GMEE/FSA, Université Ibn Zohr, faculté des sciences, Maroc, 2013.
- [6] **Sylvain Delenclos**, « cours énergie éolienne », Université du littoral Cote D'Opale, France, 2012.
- [7] **Philippe Leconte, Marc Rapin, Edmond Szechenyi**, « Eoliennes », Ingénieur de l'Ecole Nationale supérieure D'Arts et Métiers, France, 1999.
- [8] **Bernard Multon**, « Aérogénérateurs électriques », Techniques de l'ingénieur, Traités de Génie électrique D 3960, Novembre 2004.
- [9] **J.C.Guyard**, « L'énergie éolienne », Groupement d'Analyses et d'Etudes de Loire-Atlantique, France, 2011.
- [10] **HASSINI née BELGHITRI HOUDA**, « Modélisation, Simulation et Optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », mémoire de magister, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, département de physique, 2010.
- [11] **WWW.Google.com/** Principe de fonctionnement d'une éolienne Darrieus.
- [12] **Munif.Jourieh**, « Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien » thèse de Docteurat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ENAM, 2007.
- [13] **Pierre Boscq, Baptiste Dumortier, Aurore Dutin et Kevin Friry**, « TP éolienne » mémoire de fin d'étude, IUT GTE, 2006.
- [14] **G. Bedon, M. Raciti Castellì, E. Benini**, « Evaluation of the Effect of Rotor Solidity on the Performance of a H-Darrieus Turbine Adopting a Blade Element-Momentum Algorithm », 2012.
- [15] **WWW.Google.com/** Le développement de l'éolienne dans le monde. Juin 2012.
- [16] **Adrian ILINCA**, « L'aérodynamique de la turbine éolienne et ses composantes mécaniques » Ph.D. Ing., Professeur à l'UQAR Laboratoire de Recherche en énergie éolienne (LREE), Université du Québec à Rimouski, Canada 2007.
- [17] **Christian Masson**, « Technologie éolienne », département de génie mécanique, Ecole de Technologie supérieure, 2008.
- [18] **Saïd CHKIR**, « Contribution à l'étude aérodynamique d'une éolienne par une méthode de sillage libre », Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité " Génie énergétique ", France, 2010.
- [19] **Fady.Jamati**, « Etude numérique d'une éolienne hybride asynchrone », Diplôme de maîtrise des sciences appliquées, département de génie mécanique, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada 2011.
- [20] **Mahri Zine Labidine**, « Etude Dynamique et optimisation des pales d'un aérogénérateur », Thèse de doctorat en génie climatique, Université Mentouri de Constantine, faculté des sciences de l'ingénieur, 2012.
- [21] **A.Bouhedda**, « contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne », mémoire de magister, département d'électrotechnique, faculté de génie électrique et informatique, UMMTO, 2011.
- [22] **M.Godard, J.David, G.Genou** « Optimisation d'une éolienne Darrieus à pales droites, analyse du couple de démarrage et réalisation d'un prototype », 2004.
- [23] **DJ. Djemati**, « Etude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius, et Simulation des performances de l'éolienne » diplôme de master, Université de l'Hadj Lakhdar en physique option : ' énergétique', Batna, 2011.
- [24] **Melle AGGOUN GHANIA**, « étude comparative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique de génération éolienne », mémoire de magister, département d'électrotechnique, faculté de génie électrique et informatique, UMMTO, 2011.
- [25] **Wiki éolien**, production d'électricité éolienne.
- [26] **Wiki média Commons**, « énergie éolienne ».
- [27] **H.Alimiraoussaid**, « Evaluation des caractéristiques aérodynamiques du profil NACA0015 », mémoire de fin d'études, département de génie mécanique, faculté de génie de la construction, UMMTO, 2010.
- [28] **I.Boumrar**, « Comportement des ailes delta à Apex privilégiés avec et sans fuselage Etude expérimentale et simulation

numérique », thèse de doctorat en génie mécanique, département de génie mécanique, faculté de génie de la construction, UMMTO , 2012.

[29] **J.F.Manwell, J.G.McGowan et A.L.Rogers**, « Wind Energy Explained », 2006.

[30] **A.Kragten**, «The Darrieus rotor, a vertical axis wind turbine (VAWT) with only a few advantages and many disadvantages », 2004.

ANNEXE 1

THÉORIE DU DISQUE ACTUATEUR

Le rotor de l'éolienne est modélisé par un disque appelé disque actuateur. Il s'agit d'un simple disque qui capte l'énergie cinétique du vent mais qui ne tient pas compte du design particulier de la turbine éolienne. Pour capter de l'énergie, la vitesse du vent V_3 (voir Figure A-1) en aval du disque est nécessairement inférieure à la vitesse v_1 en amont du disque. Il en résulte une perte de quantité de mouvement axiale dans le sillage (en aval du disque). Le débit d'air doit cependant rester constant, le tube de courant doit donc s'élargir après le passage du disque comme le montre la Figure A-1.

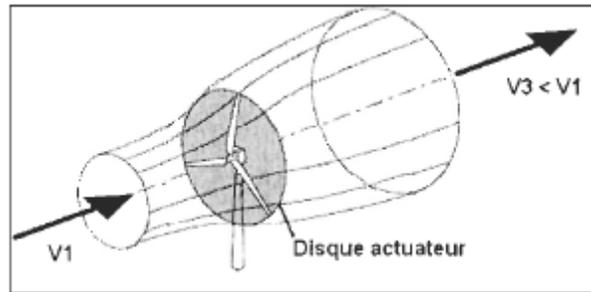


Figure A-1 : Tube de courant et disque actuateur.

La Figure A-2 présente la répartition des vitesses dans le tube de courant. Il, est la vitesse en amont du disque, V_2 la vitesse au niveau du disque et V_3 la vitesse en aval du disque.-- V_3

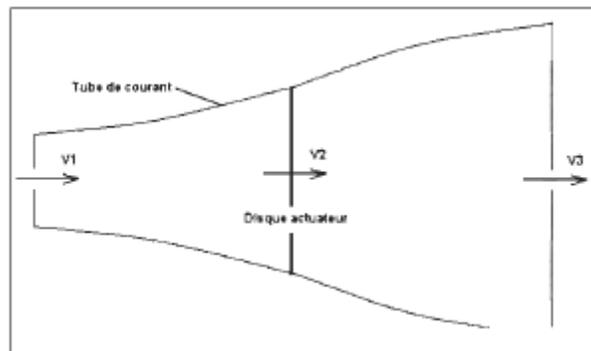


Figure A-2 : Répartition des vitesses dans le tube de courant.

Les vitesses V_1 , V_2 et V_3 s'expriment de la façon suivante :

$$v_1 = V_\infty \quad (\text{A-1})$$

$$v_2 = v_1(1-a) \quad (\text{A-2})$$

$$v_3 = v_1(1-2a) \quad (\text{A-3})$$

Où a est le facteur d'induction axiale.

La puissance de vent extraite par le disque actuateur se calcule en considérant la différence d'énergie cinétique en amont et en aval du disque :

$$P = \frac{1}{2} (v_1^2 - v_3^2) A v_2 \quad (\text{A-4})$$

Où A est la surface balayée par le rotor, et ρ la masse volumique de l'air.

Le coefficient de puissance de l'éolienne C_p vaut alors :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 A} = \frac{\frac{1}{2}(v_1^2 - v_3^2) A v_2}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 A} = 4a(1-a)^2 \quad (\text{A-5})$$

C_p est maximum pour $a = 1/3$:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (\text{A-6})$$

$C_p \text{ max}$ correspond à la limite de Betz et représente la part maximale d'énergie cinétique du vent que l'éolienne peut capter.

ANNEXE 2 :

Description de la variation du vent : distribution de Weibull

Il est très important pour l'industrie éolienne de décrire les variations de la vitesse du vent. Les fabricants utilisent ces informations pour optimiser la conception des éoliennes dans le but de minimiser les coûts liés à la production d'électricité. Les investisseurs, eux, ont besoin de ces informations afin de pouvoir estimer le revenu lié à la production d'électricité.

On décrit normalement les variations du vent sur un site donné en utilisant une distribution de Weibull comme celle que vous voyez sur l'image ci-dessus. La vitesse moyenne du vent est de 7 m/s.

Ceux qui sont déjà habitués à travailler avec des statistiques se rendront tout de suite compte que ce que le graphe ci-dessus représente est une distribution de probabilité. La probabilité que le vent souffle à une vitesse quelconque (zéro inclus) étant obligatoirement égale à 100 %, la zone au-dessous de la courbe sera toujours égale à exactement 1.

La moitié de la zone bleue se trouve à gauche de la ligne verticale noire située à 6,6 m/s. On dit alors que 6,6 m/s est la médiane de la distribution. Cela signifie que le vent souffle à moins de 6,6 m/s la moitié du temps, et à plus de 6,6 m/s pendant l'autre.

La vitesse moyenne est en fait la moyenne des vitesses de vent enregistrées sur le site en question.

Comme vous pouvez le voir sur le graphe, la distribution des vitesses du vent est oblique, donc asymétrique. Parfois il y aura des vents très forts, mais ce ne sera que très rarement. En revanche, les vitesses de vent de 5,5 m/s sont les plus fréquentes. On dit alors que 5,5 mètres par seconde est la valeur modale de la distribution.

La distribution statistique des vitesses du vent varie d'un endroit à l'autre vu qu'elle dépend des conditions climatiques locales, le paysage et sa surface. La distribution de Weibull tend donc à varier, tant en forme qu'en valeur moyenne.

Tableau annexe.1: Coordonnées du profil NACA 0015:

| Extrados X (mm) | Extrados Y (mm) | | | | |
|-----------------|-----------------|----------|---------|----------|---------|
| 0.00000 | 0.00000 | 10.11310 | 5.87720 | 37.88690 | 7.34340 |
| 0.00620 | 0.17520 | 10.59410 | 5.97500 | 38.65420 | 7.31290 |
| 0.02490 | 0.34920 | 11.08480 | 6.07010 | 39.42430 | 7.27990 |
| 0.05610 | 0.52190 | 11.58530 | 6.16230 | 40.19710 | 7.24450 |
| 0.09970 | 0.69350 | 12.09530 | 6.25160 | 40.97230 | 7.20670 |
| 0.15570 | 0.86380 | 12.61480 | 6.33800 | 41.74980 | 7.16660 |
| 0.22410 | 1.03290 | 13.14350 | 6.42140 | 42.52930 | 7.12410 |
| 0.30500 | 1.20070 | 13.68150 | 6.50190 | 43.31070 | 7.07950 |
| 0.39820 | 1.36720 | 14.22850 | 6.57930 | 44.09370 | 7.03270 |
| 0.50380 | 1.53230 | 14.78450 | 6.65370 | 44.87830 | 6.98370 |
| 0.62180 | 1.69610 | 15.34920 | 6.72510 | 45.66410 | 6.93270 |
| 0.75200 | 1.85850 | 15.92250 | 6.79340 | 46.45090 | 6.87960 |
| 0.89450 | 2.01940 | 16.50440 | 6.85850 | 47.23870 | 6.82460 |
| 1.04930 | 2.17890 | 17.09460 | 6.92060 | 48.02710 | 6.76770 |
| 1.21620 | 2.33690 | 17.69300 | 6.97950 | 48.81610 | 6.70900 |
| 1.39540 | 2.49340 | 18.29940 | 7.03530 | 49.60530 | 6.64850 |
| 1.58660 | 2.64830 | 18.91380 | 7.08800 | 50.39470 | 6.58620 |
| 1.78990 | 2.80160 | 19.53580 | 7.13740 | 51.18390 | 6.52220 |
| 2.00520 | 2.95330 | 20.16550 | 7.18370 | 51.97280 | 6.45670 |
| 2.23250 | 3.10320 | 20.80260 | 7.22690 | 52.76130 | 6.38960 |
| 2.47160 | 3.25140 | 21.44700 | 7.26680 | 53.54910 | 6.32090 |
| 2.72260 | 3.39780 | 22.09860 | 7.30360 | 54.33590 | 6.25080 |
| 2.98540 | 3.54240 | 22.75700 | 7.33720 | 55.12170 | 6.17940 |
| 3.26000 | 3.68510 | 23.42230 | 7.36770 | 55.90630 | 6.10660 |
| 3.54610 | 3.82590 | 24.09410 | 7.39500 | 56.68930 | 6.03250 |
| 3.84390 | 3.96470 | 24.77250 | 7.41920 | 57.47070 | 5.95720 |
| 4.15310 | 4.10150 | 25.45710 | 7.44020 | 58.25020 | 5.88070 |
| 4.47380 | 4.23620 | 26.14780 | 7.45820 | 59.02770 | 5.80310 |
| 4.80580 | 4.36880 | 26.84450 | 7.47300 | 59.80290 | 5.72440 |
| 5.14910 | 4.49920 | 27.54700 | 7.48480 | 60.57570 | 5.64480 |
| 5.50360 | 4.62740 | 28.25500 | 7.49350 | 61.34580 | 5.56410 |
| 5.86910 | 4.75330 | 28.96850 | 7.49920 | 62.11310 | 5.48260 |
| 6.24560 | 4.87690 | 29.68720 | 7.50190 | 62.87740 | 5.40030 |
| 6.63310 | 4.99820 | 30.41100 | 7.50160 | 63.63850 | 5.31710 |
| 7.03140 | 5.11700 | 31.13960 | 7.49840 | 64.39620 | 5.23330 |
| 7.44030 | 5.23340 | 31.87300 | 7.49230 | 65.15030 | 5.14870 |
| 7.85990 | 5.34720 | 32.61090 | 7.48340 | 65.90060 | 5.06350 |
| 8.29000 | 5.45850 | 33.35310 | 7.47150 | 66.64690 | 4.97770 |
| 8.73050 | 5.56720 | 34.09940 | 7.45690 | 67.38910 | 4.89140 |
| 9.18120 | 5.67320 | 34.84970 | 7.43960 | 68.12700 | 4.80460 |
| 9.64210 | 5.77660 | 35.60380 | 7.41950 | 68.86040 | 4.71730 |
| | | 36.36150 | 7.39670 | 69.58900 | 4.62970 |
| | | 37.12260 | 7.37140 | 70.31280 | 4.54180 |

| | | | | | |
|----------|---------|------------|------------|----------|----------|
| 71.03150 | 4.45350 | 95.52620 | 0.92110 | 1.21620 | -2.33690 |
| 71.74500 | 4.36500 | 95.84690 | 0.86770 | 1.39540 | -2.49340 |
| 72.45300 | 4.27640 | 96.15610 | 0.81600 | 1.58660 | -2.64830 |
| 73.15550 | 4.18760 | 96.45390 | 0.76610 | 1.78990 | -2.80160 |
| 73.85220 | 4.09860 | 96.74000 | 0.71800 | 2.00520 | -2.95330 |
| 74.54290 | 4.00970 | 97.01460 | 0.67160 | 2.23250 | -3.10320 |
| 75.22750 | 3.92070 | 97.27740 | 0.62710 | 2.47160 | -3.25140 |
| 75.90590 | 3.83180 | 97.52840 | 0.58450 | 2.72260 | -3.39780 |
| 76.57770 | 3.74300 | 97.76750 | 0.54370 | 2.98540 | -3.54240 |
| 77.24300 | 3.65430 | 97.99480 | 0.50490 | 3.26000 | -3.68510 |
| 77.90140 | 3.56580 | 98.21010 | 0.46800 | 3.54610 | -3.82590 |
| 78.55300 | 3.47750 | 98.41340 | 0.43310 | 3.84390 | -3.96470 |
| 79.19740 | 3.38950 | 98.60460 | 0.40010 | 4.15310 | -4.10150 |
| 79.83450 | 3.30180 | 98.78380 | 0.36920 | 4.47380 | -4.23620 |
| 80.46420 | 3.21450 | 98.95070 | 0.34030 | 4.80580 | -4.36880 |
| 81.08620 | 3.12750 | 99.10550 | 0.31350 | 5.14910 | -4.49920 |
| 81.70060 | 3.04100 | 99.24800 | 0.28880 | 5.50360 | -4.62740 |
| 82.30700 | 2.95500 | 99.37820 | 0.26610 | 5.86910 | -4.75330 |
| 82.90540 | 2.86960 | 99.49620 | 0.24560 | 6.24560 | -4.87690 |
| 83.49560 | 2.78470 | 99.60180 | 0.22720 | 6.63310 | -4.99820 |
| 84.07750 | 2.70050 | 99.69500 | 0.21090 | 7.03140 | -5.11700 |
| 84.65080 | 2.61690 | 99.77590 | 0.19680 | 7.44030 | -5.23340 |
| 85.21550 | 2.53400 | 99.84430 | 0.18480 | 7.85990 | -5.34720 |
| 85.77150 | 2.45190 | 99.90030 | 0.17500 | 8.29000 | -5.45850 |
| 86.31850 | 2.37060 | 99.94390 | 0.16730 | 8.73050 | -5.56720 |
| 86.85650 | 2.29010 | 99.97510 | 0.16190 | 9.18120 | -5.67320 |
| 87.38520 | 2.21050 | 99.99380 | 0.15860 | 9.64210 | -5.77660 |
| 87.90470 | 2.13180 | 100.00000 | 0.15750 | 10.11310 | -5.87720 |
| 88.41470 | 2.05410 | | | 10.59410 | -5.97500 |
| 88.91520 | 1.97740 | Intrados X | Intrados Y | 11.08480 | -6.07010 |
| 89.40590 | 1.90180 | (mm) | (mm) | 11.58530 | -6.16230 |
| 89.88690 | 1.82720 | 0.00000 | 0.00000 | 12.09530 | -6.25160 |
| 90.35790 | 1.75380 | 0.00620 | -0.17520 | 12.61480 | -6.33800 |
| 90.81880 | 1.68160 | 0.02490 | -0.34920 | 13.14350 | -6.42140 |
| 91.26950 | 1.61060 | 0.05610 | -0.52190 | 13.68150 | -6.50190 |
| 91.71000 | 1.54080 | 0.09970 | -0.69350 | 14.22850 | -6.57930 |
| 92.14010 | 1.47240 | 0.15570 | -0.86380 | 14.78450 | -6.65370 |
| 92.55970 | 1.40520 | 0.22410 | -1.03290 | 15.34920 | -6.72510 |
| 92.96860 | 1.33950 | 0.30500 | -1.20070 | 15.92250 | -6.79340 |
| 93.36690 | 1.27520 | 0.39820 | -1.36720 | 16.50440 | -6.85850 |
| 93.75440 | 1.21230 | 0.50380 | -1.53230 | 17.09460 | -6.92060 |
| 94.13090 | 1.15090 | 0.62180 | -1.69610 | 17.69300 | -6.97950 |
| 94.49640 | 1.09110 | 0.75200 | -1.85850 | 18.29940 | -7.03530 |
| 94.85090 | 1.03280 | 0.89450 | -2.01940 | 18.91380 | -7.08800 |
| 95.19420 | 0.97610 | 1.04930 | -2.17890 | 19.53580 | -7.13740 |

| | | | | | |
|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| 20.16550 | -7.18370 | 53.54910 | -6.32090 | 85.21550 | -2.53400 |
| 20.80260 | -7.22690 | 54.33590 | -6.25080 | 85.77150 | -2.45190 |
| 21.44700 | -7.26680 | 55.12170 | -6.17940 | 86.31850 | -2.37060 |
| 22.09860 | -7.30360 | 55.90630 | -6.10660 | 86.85650 | -2.29010 |
| 22.75700 | -7.33720 | 56.68930 | -6.03250 | 87.38520 | -2.21050 |
| 23.42230 | -7.36770 | 57.47070 | -5.95720 | 87.90470 | -2.13180 |
| 24.09410 | -7.39500 | 58.25020 | -5.88070 | 88.41470 | -2.05410 |
| 24.77250 | -7.41920 | 59.02770 | -5.80310 | 88.91520 | -1.97740 |
| 25.45710 | -7.44020 | 59.80290 | -5.72440 | 89.40590 | -1.90180 |
| 26.14780 | -7.45820 | 60.57570 | -5.64480 | 89.88690 | -1.82720 |
| 26.84450 | -7.47300 | 61.34580 | -5.56410 | 90.35790 | -1.75380 |
| 27.54700 | -7.48480 | 62.11310 | -5.48260 | 90.81880 | -1.68160 |
| 28.25500 | -7.49350 | 62.87740 | -5.40030 | 91.26950 | -1.61060 |
| 28.96850 | -7.49920 | 63.63850 | -5.31710 | 91.71000 | -1.54080 |
| 29.68720 | -7.50190 | 64.39620 | -5.23330 | 92.14010 | -1.47240 |
| 30.41100 | -7.50160 | 65.15030 | -5.14870 | 92.55970 | -1.40520 |
| 31.13960 | -7.49840 | 65.90060 | -5.06350 | 92.96860 | -1.33950 |
| 31.87300 | -7.49230 | 66.64690 | -4.97770 | 93.36690 | -1.27520 |
| 32.61090 | -7.48340 | 67.38910 | -4.89140 | 93.75440 | -1.21230 |
| 33.35310 | -7.47150 | 68.12700 | -4.80460 | 94.13090 | -1.15090 |
| 34.09940 | -7.45690 | 68.86040 | -4.71730 | 94.49640 | -1.09110 |
| 34.84970 | -7.43960 | 69.58900 | -4.62970 | 94.85090 | -1.03280 |
| 35.60380 | -7.41950 | 70.31280 | -4.54180 | 95.19420 | -0.97610 |
| 36.36150 | -7.39670 | 71.03150 | -4.45350 | 95.52620 | -0.92110 |
| 37.12260 | -7.37140 | 71.74500 | -4.36500 | 95.84690 | -0.86770 |
| 37.88690 | -7.34340 | 72.45300 | -4.27640 | 96.15610 | -0.81600 |
| 38.65420 | -7.31290 | 73.15550 | -4.18760 | 96.45390 | -0.76610 |
| 39.42430 | -7.27990 | 73.85220 | -4.09860 | 96.74000 | -0.71800 |
| 40.19710 | -7.24450 | 74.54290 | -4.00970 | 97.01460 | -0.67160 |
| 40.97230 | -7.20670 | 75.22750 | -3.92070 | 97.27740 | -0.62710 |
| 41.74980 | -7.16660 | 75.90590 | -3.83180 | 97.52840 | -0.58450 |
| 42.52930 | -7.12410 | 76.57770 | -3.74300 | 97.76750 | -0.54370 |
| 43.31070 | -7.07950 | 77.24300 | -3.65430 | 97.99480 | -0.50490 |
| 44.09370 | -7.03270 | 77.90140 | -3.56580 | 98.21010 | -0.46800 |
| 44.87830 | -6.98370 | 78.55300 | -3.47750 | 98.41340 | -0.43310 |
| 45.66410 | -6.93270 | 79.19740 | -3.38950 | 98.60460 | -0.40010 |
| 46.45090 | -6.87960 | 79.83450 | -3.30180 | 98.78380 | -0.36920 |
| 47.23870 | -6.82460 | 80.46420 | -3.21450 | 98.95070 | -0.34030 |
| 48.02710 | -6.76770 | 81.08620 | -3.12750 | 99.10550 | -0.31350 |
| 48.81610 | -6.70900 | 81.70060 | -3.04100 | 99.24800 | -0.28880 |
| 49.60530 | -6.64850 | 82.30700 | -2.95500 | 99.37820 | -0.26610 |
| 50.39470 | -6.58620 | 82.90540 | -2.86960 | 99.49620 | -0.24560 |
| 51.18390 | -6.52220 | 83.49560 | -2.78470 | 99.60180 | -0.22720 |
| 51.97280 | -6.45670 | 84.07750 | -2.70050 | 99.69500 | -0.21090 |
| 52.76130 | -6.38960 | 84.65080 | -2.61690 | 99.77590 | -0.19680 |

| | |
|------------------|-----------------|
| 99.84430 | -0.18480 |
| 99.90030 | -0.17500 |
| 99.94390 | -0.16730 |
| 99.97510 | -0.16190 |
| 99.99380 | -0.15860 |
| 100.00000 | -0.15750 |

Tableau annexe .2: les résultats expérimentaux du coefficient de dépression (-Cp) à l'intrados pour une vitesseV₀=20,3 m/s.

| Prise de pression | 0° | | 5° | | 10° | | 15° | | 20° | |
|-------------------|-----|--------|-------|--------|-------|---------|-----|---------|-----|---------|
| | Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp |
| 1 | 441 | 0,2000 | 444 | 0,1000 | 438 | 0,3000 | 434 | 0,4333 | 436 | 0,3667 |
| 2 | 440 | 0,2333 | 443,5 | 0,1167 | 440 | 0,2333 | 437 | 0,3333 | 440 | 0,2333 |
| 3 | 438 | 0,3000 | 443 | 0,1333 | 440,5 | 0,2167 | 439 | 0,2667 | 442 | 0,1667 |
| 4 | 436 | 0,3667 | 442,5 | 0,1500 | 441 | 0,2000 | 440 | 0,2333 | 444 | 0,1000 |
| 5 | 434 | 0,4333 | 442 | 0,1667 | 442 | 0,1667 | 442 | 0,1667 | 446 | 0,0333 |
| 6 | 432 | 0,5000 | 442 | 0,1667 | 444 | 0,1000 | 444 | 0,1000 | 449 | -0,0667 |
| 7 | 431 | 0,5333 | 444 | 0,1000 | 447 | 0,0000 | 448 | -0,0333 | 454 | -0,2333 |
| 8 | 428 | 0,6333 | 446 | 0,0333 | 452 | -0,1667 | 455 | -0,2667 | 461 | -0,4667 |

| 25° | | 30° | | 35° | | 40° | | 45° | |
|------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-------|---------|
| Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp |
| 438 | 0,3000 | 437 | 0,3333 | 438 | 0,3000 | 441 | 0,2000 | 443 | 0,1333 |
| 440 | 0,2333 | 442 | 0,1667 | 444 | 0,1000 | 448 | -0,0333 | 451 | -0,1333 |
| 443 | 0,1333 | 445 | 0,0667 | 448 | -0,0333 | 452 | -0,1667 | 456 | -0,3000 |
| 446 | 0,0333 | 448 | -0,0333 | 452 | -0,1667 | 456 | -0,3000 | 460,5 | -0,4500 |
| 448 | -0,0333 | 452 | -0,1667 | 456 | -0,3000 | 460 | -0,4333 | 464 | -0,5667 |
| 452 | -0,1667 | 456 | -0,3000 | 462 | -0,5000 | 465 | -0,6000 | 469 | -0,7333 |
| 457 | -0,3333 | 462 | -0,5000 | 466 | -0,6333 | 470 | -0,7667 | 473 | -0,8667 |
| 465 | -0,6000 | 469 | -0,7333 | 473 | -0,8667 | 475 | -0,9333 | 476,5 | -0,9833 |

Tableau annexe.3: les résultats expérimentaux du coefficient de dépression (-Cp) à l'extrados pour une vitesseV_o=20,3 m/s.

| Prise de pression | 5° | | 10° | | 15° | | 20° | | 25° | |
|-------------------|-------|--------|-----|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp |
| 1 | 442 | 0,1667 | 442 | 0,1667 | 424 | 0,7667 | 420 | 0,9000 | 420 | 0,9000 |
| 2 | 440 | 0,2333 | 440 | 0,2333 | 423 | 0,8000 | 421 | 0,8667 | 421,5 | 0,8500 |
| 3 | 437 | 0,3333 | 436 | 0,3667 | 421,5 | 0,8500 | 421 | 0,8667 | 421 | 0,8667 |
| 4 | 433 | 0,4667 | 431 | 0,5333 | 420 | 0,9000 | 421 | 0,8667 | 421 | 0,8667 |
| 5 | 430 | 0,5667 | 426 | 0,7000 | 419,5 | 0,9167 | 421,5 | 0,8500 | 422 | 0,8333 |
| 6 | 426 | 0,7000 | 420 | 0,9000 | 419 | 0,9333 | 421 | 0,8667 | 422 | 0,8333 |
| 7 | 422,5 | 0,8167 | 415 | 1,0667 | 419 | 0,9333 | 423 | 0,8000 | 423 | 0,8000 |
| 8 | 412 | 1,1667 | 394 | 1,7667 | 410 | 1,2333 | 420 | 0,9000 | 421 | 0,8667 |

| 30° | | 35° | | 40° | | 45° | |
|-----|--------|-------|--------|-----|--------|-----|--------|
| Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp | Z | Cp |
| 418 | 0,9667 | 414,5 | 1,0833 | 410 | 1,2333 | 406 | 1,3667 |
| 419 | 0,9333 | 416 | 1,0333 | 411 | 1,2000 | 408 | 1,3000 |
| 419 | 0,9333 | 415 | 1,0667 | 410 | 1,2333 | 407 | 1,3333 |
| 418 | 0,9667 | 415 | 1,0667 | 410 | 1,2333 | 406 | 1,3667 |
| 419 | 0,9333 | 415,5 | 1,0500 | 410 | 1,2333 | 406 | 1,3667 |
| 419 | 0,9333 | 416 | 1,0333 | 411 | 1,2000 | 407 | 1,3333 |
| 422 | 0,8333 | 418 | 0,9667 | 412 | 1,1667 | 409 | 1,2667 |
| 419 | 0,9333 | 416 | 1,0333 | 411 | 1,2000 | 407 | 1,3333 |

Tableaux annexe .4 : des valeurs expérimentales des coefficients de portance C_z et de traînée C_x pour $V=20,3$ m/s.

A l'intrados :

| i° | P (N) | T (N) | C_z | C_x |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0,0647 | 0,0727 | 0,0085 | 0,0096 |
| 5 | 5,094 | 0,4459 | 0,6727 | 0,0589 |
| 10 | 6,3686 | 1,3418 | 0,8411 | 0,1772 |
| 15 | 5,4601 | 2,3933 | 0,7211 | 0,3161 |
| 20 | 5,2095 | 2,8061 | 0,6880 | 0,3706 |
| 25 | 5,687 | 3,7354 | 0,7510 | 0,4933 |

A l'extrados :

| i° | P (N) | T (N) | C_z | C_x |
|-----------|---------|--------|---------|--------|
| 0 | 0,0647 | 0,0727 | 0,0085 | 0,0096 |
| -5 | -4,2914 | 0,1018 | -0,5667 | 0,0134 |
| -10 | -6,9254 | 0,2081 | -0,9146 | 0,0275 |
| -15 | -6,1875 | 1,4002 | -0,8171 | 0,1849 |
| -20 | -5,189 | 2,0333 | -0,6853 | 0,2685 |
| -25 | -2,9154 | 2,1712 | -0,3850 | 0,2867 |

Tableau annexe .5: les valeurs expérimentales des coefficients de portance Cz, trainée Cx et de puissance Cp, a pales verticales pour une vitesse V=20, 3 m/s.

| I ° | P (N) | T (N) | Cz (N) | Cx (N) | Cp |
|-----|---------|--------|---------|--------|--------|
| 0 | 0,4732 | 0,5174 | 0,0425 | 0,0465 | 0,0630 |
| 5 | 1,9302 | 0,621 | 0,1734 | 0,0558 | 0,1822 |
| 10 | 2,8580 | 0,9313 | 0,2568 | 0,0837 | 0,2701 |
| 15 | 2,4874 | 1,3541 | 0,2235 | 0,1217 | 0,2545 |
| 20 | 2,4696 | 1,7179 | 0,2219 | 0,1544 | 0,2703 |
| 25 | 2,5473 | 2,0976 | 0,2289 | 0,1885 | 0,2965 |
| 30 | 2,5027 | 2,4854 | 0,2249 | 0,2233 | 0,3169 |
| 35 | 2,5556 | 2,8171 | 0,2296 | 0,2531 | 0,3418 |
| 40 | 2,3217 | 3,1997 | 0,2086 | 0,2875 | 0,3552 |
| 45 | 2,4153 | 3,5444 | 0,2170 | 0,3185 | 0,3854 |
| 50 | 2,2382 | 3,9085 | 0,2011 | 0,3512 | 0,4047 |
| 55 | 1,9966 | 4,2427 | 0,1794 | 0,3812 | 0,4214 |
| 60 | 1,7710 | 4,4606 | 0,1591 | 0,4008 | 0,4313 |
| 65 | 1,4618 | 4,753 | 0,1314 | 0,4271 | 0,4468 |
| 70 | 1,0772 | 4,8668 | 0,0968 | 0,4373 | 0,4479 |
| 75 | 0,6661 | 4,6423 | 0,0599 | 0,4172 | 0,4214 |
| 80 | 0,2111 | 4,1 | 0,0190 | 0,3684 | 0,3689 |
| 85 | -0,5210 | 3,7894 | -0,0468 | 0,3405 | 0,3437 |
| 90 | -0,2542 | 3,8181 | -0,0228 | 0,3431 | 0,3439 |
| 95 | -0,7862 | 4,1944 | -0,0706 | 0,3769 | 0,3835 |
| 100 | -1,1565 | 4,4117 | -0,1039 | 0,3964 | 0,4098 |
| 105 | -1,5241 | 4,5696 | -0,1370 | 0,4106 | 0,4329 |
| 110 | -1,9334 | 4,5385 | -0,1737 | 0,4078 | 0,4433 |
| 115 | -2,1410 | 4,3246 | -0,1924 | 0,3886 | 0,4336 |
| 120 | -2,3708 | 3,9632 | -0,2130 | 0,3561 | 0,4150 |
| 125 | -2,5243 | 3,6117 | -0,2268 | 0,3245 | 0,3960 |
| 130 | -2,5462 | 3,326 | -0,2288 | 0,2989 | 0,3764 |
| 135 | -2,6132 | 2,9444 | -0,2348 | 0,2646 | 0,3538 |
| 140 | -2,5974 | 2,5254 | -0,2334 | 0,2269 | 0,3255 |
| 145 | -2,5918 | 2,2391 | -0,2329 | 0,2012 | 0,3078 |
| 150 | -2,6268 | 1,8698 | -0,2360 | 0,1680 | 0,2897 |
| 155 | -2,7828 | 1,5804 | -0,2501 | 0,1420 | 0,2876 |
| 160 | -2,8635 | 1,1643 | -0,2573 | 0,1046 | 0,2778 |
| 165 | -2,8087 | 0,8372 | -0,2524 | 0,0752 | 0,2634 |
| 170 | -2,5050 | 0,4804 | -0,2251 | 0,0432 | 0,2292 |
| 175 | -0,7826 | 0,4762 | -0,0703 | 0,0428 | 0,0823 |
| 180 | 0,7178 | 0,5433 | 0,0645 | 0,0488 | 0,0809 |

| | | | | | |
|-----|---------|--------|---------|--------|--------|
| 185 | 2,2500 | 0,7204 | 0,2022 | 0,0647 | 0,2123 |
| 190 | 2,6450 | 1,0837 | 0,2377 | 0,0974 | 0,2569 |
| 195 | 2,2988 | 1,4675 | 0,2066 | 0,1319 | 0,2451 |
| 200 | 2,4530 | 1,8252 | 0,2204 | 0,1640 | 0,2747 |
| 205 | 2,3576 | 2,1364 | 0,2119 | 0,1920 | 0,2859 |
| 210 | 2,4506 | 2,4255 | 0,2202 | 0,2180 | 0,3098 |
| 215 | 2,3964 | 2,7847 | 0,2153 | 0,2502 | 0,3301 |
| 220 | 2,3690 | 3,1263 | 0,2129 | 0,2809 | 0,3525 |
| 225 | 2,3087 | 3,4867 | 0,2075 | 0,3133 | 0,3758 |
| 230 | 2,1768 | 3,7298 | 0,1956 | 0,3352 | 0,3881 |
| 235 | 2,0099 | 4,0982 | 0,1806 | 0,3683 | 0,4102 |
| 240 | 1,7935 | 4,3227 | 0,1612 | 0,3884 | 0,4205 |
| 245 | 1,4850 | 4,6341 | 0,1334 | 0,4164 | 0,4373 |
| 250 | 1,1011 | 4,8545 | 0,0989 | 0,4362 | 0,4473 |
| 255 | 0,6460 | 4,6681 | 0,0580 | 0,4195 | 0,4235 |
| 260 | 0,2315 | 4,1734 | 0,0208 | 0,3750 | 0,3756 |
| 265 | -0,0413 | 3,8223 | -0,0037 | 0,3435 | 0,3435 |
| 270 | -0,1994 | 3,6397 | -0,0179 | 0,3271 | 0,3276 |
| 275 | -0,5187 | 3,8758 | -0,0466 | 0,3483 | 0,3514 |
| 280 | -0,7543 | 4,0508 | -0,0678 | 0,3640 | 0,3703 |
| 285 | -1,1353 | 4,3965 | -0,1020 | 0,3951 | 0,4080 |
| 290 | -1,5075 | 4,3228 | -0,1355 | 0,3884 | 0,4114 |
| 295 | -1,8348 | 4,1506 | -0,1649 | 0,3730 | 0,4078 |
| 300 | -2,0540 | 3,8182 | -0,1846 | 0,3431 | 0,3896 |
| 305 | -2,1695 | 3,5618 | -0,1949 | 0,3201 | 0,3748 |
| 310 | -2,3361 | 3,1589 | -0,2099 | 0,2839 | 0,3530 |
| 315 | -2,3639 | 2,8871 | -0,2124 | 0,2594 | 0,3353 |
| 320 | -2,4011 | 2,6541 | -0,2158 | 0,2385 | 0,3216 |
| 325 | -2,3522 | 2,2506 | -0,2114 | 0,2022 | 0,2925 |
| 330 | -2,3973 | 1,928 | -0,2154 | 0,1732 | 0,2764 |
| 335 | -2,3674 | 1,5161 | -0,2127 | 0,1362 | 0,2526 |
| 340 | -2,5961 | 1,2366 | -0,2333 | 0,1111 | 0,2584 |
| 345 | -2,6218 | 0,8889 | -0,2356 | 0,0799 | 0,2488 |
| 350 | -2,7193 | 0,3971 | -0,2444 | 0,0357 | 0,2469 |
| 355 | -1,6652 | 0,311 | -0,1496 | 0,0279 | 0,1522 |
| 360 | -0,0383 | 0,3405 | -0,0034 | 0,0306 | 0,0308 |

Tableau annexe.6: les valeurs expérimentales des coefficients de portance C_z , de trainée C_x et de puissance C_p , à pales inclinées pour une vitesse $V=20,3$ m/s.

| $i(^{\circ})$ | P (N) | T (N) | C_z (N) | C_x (N) | C_p |
|---------------|---------|---------|-----------|-----------|--------|
| 0 | 0,4983 | 0,5007 | 0,0518 | 0,0520 | 0,0471 |
| 5 | 1,8594 | 0,6309 | 0,1932 | 0,0656 | 0,1311 |
| 10 | 2,8634 | 0,8917 | 0,2975 | 0,0927 | 0,2002 |
| 15 | 2,5537 | 1,4106 | 0,2653 | 0,1466 | 0,1947 |
| 20 | 2,5173 | 1,8265 | 0,2616 | 0,1898 | 0,2076 |
| 25 | 2,5887 | 2,1733 | 0,2690 | 0,2258 | 0,2256 |
| 30 | 2,5409 | 2,4904 | 0,2640 | 0,2588 | 0,2375 |
| 35 | 2,4831 | 2,8964 | 0,2580 | 0,3009 | 0,2546 |
| 40 | 2,4192 | 3,312 | 0,2514 | 0,3441 | 0,2737 |
| 45 | 2,2605 | 3,6277 | 0,2349 | 0,3769 | 0,2853 |
| 50 | 2,0161 | 3,9787 | 0,2095 | 0,4134 | 0,2977 |
| 55 | 1,8002 | 4,1883 | 0,1870 | 0,4352 | 0,3043 |
| 60 | 1,6741 | 4,4261 | 0,1739 | 0,4599 | 0,3158 |
| 65 | 1,327 | 4,6631 | 0,1379 | 0,4845 | 0,3236 |
| 70 | 0,9692 | 4,6903 | 0,1007 | 0,4873 | 0,3197 |
| 75 | 0,5297 | 4,6301 | 0,0550 | 0,4811 | 0,3110 |
| 80 | 0,1578 | 4,2637 | 0,0164 | 0,4430 | 0,2848 |
| 85 | -0,1534 | 3,9498 | -0,0159 | 0,4104 | 0,2638 |
| 90 | -0,3682 | 3,8432 | -0,0383 | 0,3993 | 0,2577 |
| 95 | -0,6247 | 3,9798 | -0,0649 | 0,4135 | 0,2689 |
| 100 | -0,9029 | 4,1257 | -0,0938 | 0,4287 | 0,2819 |
| 105 | -1,2349 | 4,2928 | -0,1283 | 0,4460 | 0,2981 |
| 110 | -1,6071 | 4,2055 | -0,1670 | 0,4370 | 0,3005 |
| 115 | -1,8532 | 4,0487 | -0,1926 | 0,4207 | 0,2972 |
| 120 | -2,1006 | 3,6425 | -0,2183 | 0,3785 | 0,2806 |
| 125 | -2,2571 | 3,3484 | -0,2345 | 0,3479 | 0,2695 |
| 130 | -2,3431 | 3,0617 | -0,2435 | 0,3181 | 0,2573 |
| 135 | -2,4051 | 2,7646 | -0,2499 | 0,2873 | 0,2446 |
| 140 | -2,4807 | 2,5745 | -0,2578 | 0,2675 | 0,2386 |
| 145 | -2,3729 | 2,1457 | -0,2466 | 0,2229 | 0,2135 |
| 150 | -2,4073 | 1,8253 | -0,2501 | 0,1897 | 0,2016 |
| 155 | -2,6484 | 1,5582 | -0,2752 | 0,1619 | 0,2051 |
| 160 | -2,7463 | 1,1341 | -0,2854 | 0,1178 | 0,1983 |

| | | | | | |
|-----|---------|--------|---------|--------|--------|
| 165 | -2,8296 | 0,7577 | -0,2940 | 0,0787 | 0,1955 |
| 170 | -2,6511 | 0,3655 | -0,2755 | 0,0380 | 0,1786 |
| 175 | -1,0373 | 0,3287 | -0,1078 | 0,0342 | 0,0726 |
| 180 | 0,4321 | 0,4104 | 0,0449 | 0,0426 | 0,0398 |
| 185 | 2,4324 | 0,9123 | 0,2527 | 0,0948 | 0,1734 |
| 190 | 2,4089 | 1,2727 | 0,2503 | 0,1322 | 0,1818 |
| 195 | 2,3805 | 1,5954 | 0,2473 | 0,1658 | 0,1913 |
| 200 | 2,4259 | 1,9275 | 0,2521 | 0,2003 | 0,2068 |
| 205 | 2,3492 | 2,2655 | 0,2441 | 0,2354 | 0,2178 |
| 210 | 2,3823 | 2,6264 | 0,2475 | 0,2729 | 0,2367 |
| 215 | 2,254 | 2,9207 | 0,2342 | 0,3035 | 0,2462 |
| 220 | 2,1007 | 3,2503 | 0,2183 | 0,3377 | 0,2583 |
| 225 | 2,0962 | 3,6254 | 0,2178 | 0,3767 | 0,2795 |
| 230 | 1,647 | 4,0533 | 0,1711 | 0,4212 | 0,2920 |
| 235 | 1,5098 | 4,2901 | 0,1569 | 0,4458 | 0,3035 |
| 240 | 1,318 | 4,4214 | 0,1369 | 0,4594 | 0,3079 |
| 245 | 0,9522 | 4,6519 | 0,0989 | 0,4834 | 0,3169 |
| 250 | 0,6091 | 4,5545 | 0,0633 | 0,4732 | 0,3067 |
| 255 | 0,2016 | 4,2687 | 0,0209 | 0,4435 | 0,2852 |
| 260 | -0,1193 | 4,0129 | -0,0124 | 0,4170 | 0,2680 |
| 265 | -0,3162 | 3,8032 | -0,0329 | 0,3952 | 0,2547 |
| 270 | -0,4289 | 3,6656 | -0,0446 | 0,3809 | 0,2463 |
| 275 | -0,6481 | 3,852 | -0,0673 | 0,4002 | 0,2607 |
| 280 | -0,9339 | 4,0379 | -0,0970 | 0,4196 | 0,2766 |
| 285 | -1,3056 | 4,2467 | -0,1357 | 0,4413 | 0,2965 |
| 290 | -1,6198 | 4,0595 | -0,1683 | 0,4218 | 0,2917 |
| 295 | -1,9634 | 3,8932 | -0,2040 | 0,4045 | 0,2910 |
| 300 | -2,1981 | 3,6001 | -0,2284 | 0,3741 | 0,2815 |
| 205 | -2,3314 | 3,2802 | -0,2422 | 0,3408 | 0,2686 |
| 310 | -2,4351 | 2,9028 | -0,2530 | 0,3016 | 0,2529 |
| 315 | -2,4302 | 2,6796 | -0,2525 | 0,2784 | 0,2414 |
| 320 | -2,6565 | 2,4588 | -0,2760 | 0,2555 | 0,2416 |
| 325 | -2,5517 | 2,151 | -0,2651 | 0,2235 | 0,2227 |
| 330 | -2,5908 | 1,7868 | -0,2692 | 0,1857 | 0,2101 |
| 335 | -2,596 | 1,4267 | -0,2697 | 0,1482 | 0,1977 |
| 340 | -2,704 | 1,0221 | -0,2810 | 0,1062 | 0,1929 |
| 345 | -2,9769 | 0,5354 | -0,3093 | 0,0556 | 0,2019 |
| 350 | -1,9142 | 0,3426 | -0,1989 | 0,0356 | 0,1298 |
| 355 | -0,2886 | 0,3713 | -0,0300 | 0,0386 | 0,0314 |
| 360 | 0,9905 | 0,4409 | 0,1029 | 0,0458 | 0,0724 |