

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 1



FACULTE DE TECNOLIGIE

DEPERTEMENT DES ENRGIES RENOUVELABLES

# Projet de Fin d'Etude

Présenté pour l'obtention du diplôme

**De Master en ENERGIES RENOUVELABLES**

**Option** : conversion thermique

Thème :

**Caractéristiques des performances  
aérodynamiques des différents profils**

**Par:** SIMAHDI Abdlhak

**dirige par :**Dr O -Guerri

Année universitaire: 2015/2016

# **Remerciements**

*Je remercie avant tout Dieu d'avoir éclairé notre route et nous avoir donné la force, le courage et la volonté qui ont permis de réaliser ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes respectueux Remerciements à Mlle Ouahiba Guerri directrice de la division Energie Eolienne au CDER qui a dirigé ce mémoire, merci pour ses conseils et ses orientations qui m'ont été précieux tout au long de ce travail.*

*Merci également à monsieur AHMED BAKHTI pour leur aide et ses conseils*

*Je tiens aussi à remercier tous les enseignants qui ont assuré notre Formation au cours de l'année théorique, mes reconnaissances vont Également à tout le personnel de département des énergies redevables l'Université de Blida et le Centre de Développement des Energies Renouvelables, particulièrement la division Energie Eolienne*

*Je remercie très sincèrement monsieur karime Hassan du département d'électroniques l'université de Blida, qui m'a encouragé et m'a aidé à la réintégration a l'Université .*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mes collègues de la Promotion 2015/2016 conversion thermique et à tous ceux qui, par leurs travaux, Leurs idées, leurs présentations, leurs collaborations, ont participé de près Ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*De manière plus personnelle, mes pensées les plus profondes et Intimes vont vers ma famille.*

# Liste de figures

---

## Liste des figures

| <b>Figures</b> | <b>Titre</b>  | <b>Pages</b> |
|----------------|---|--------------|
| Figure I-1     | Principe de conversion de l'énergie éolienne est énergie électrique   | 1            |
| Figure (1.2)   | Éoliennes à axe horizontal (a) et vertical (éolienne de Darrieus) (b).( <a href="http://www.windpower.org">www.windpower.org</a> )  | 2            |
| Figure I-3     | Éolienne à axe vertical de type Darrieus [1]  | 3            |
| Figure I.4     | une éolienne multiple (lente)( <a href="http://www.univ-bechar.dz/SN2E/PROCEEDING/59.pdf">www.univ-bechar.dz/SN2E/PROCEEDING/59.pdf</a> )                                   | 4            |
| Figure I.5     | Composants d'une éolienne [2]   | 5            |
| Figure I.6     | Éléments d'une nacelle  | 6            |
| Figure 1-7     | Variation de la puissance en fonction de la vitesse vent [4]  | 7            |
| Figure 1-8     | Variation de l'écoulement autour de la turbine [5]  | 7            |
| Figure 1-9     | Coefficient de puissance des différents types d'éolienne [5]  | 9            |
| Figure 1-10    | Zone de fonctionnement d'une éolienne [7]   | 10           |
| Figure II.1    | Grandeurs caractéristiques d'un profil  | 11           |
| Figure II.2    | Pale à profil variable suivant sa longueur.<br>( <a href="http://www.chez.com/aerodynamique/aerodyn">http://www.chez.com/aerodynamique/aerodyn</a> )                        | 12           |
| Figure II-3    | Angles définis à partir de la corde du profil   | 13           |
| Figure II.4    | Exemple de profil d'aile [9].   | 13           |
| Figure II.5    | Profil symétrique lors d'une poussée nulle.<br>( <a href="http://www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf">www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf</a> ) | 14           |
| Figure II.6    | Pale asymétrique lors d'une poussée positive.   | 14           |
| Figure II.7    | Profil asymétrique lors d'une poussée nulle   | 15           |
| Figure II.8    | Pale asymétrique lors d'une poussée positive  | 15           |
| Figure II.9    | Forces agissantes sur un profil.  | 16           |
| Figure II-10   | Portance et trainée appliquée au centre aérodynamique   | 17           |
| Figure 3-1     | Les conditions aux limites  | 24           |
| Figure 4-1     | Les différents domaines de calcul   | 27           |
| Figure 4-2     | Coefficient de portance pour différents domaines  | 28           |
| Figure 4-3     | Coefficient de trainée en fonction des différents domaines  | 29           |
| Figure 4-4     | Coefficient de portance en fonction des différents domaines   | 29           |

# Liste de figures

---

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figure 4-5  | Coefficient de trainée en fonction des facteurs de grossissements   | 32 |
| Figure 4-6  | Coefficient de portance en fonction des facteurs de grossissements  | 33 |
| Figure 4-7  | Coefficient de trainée en fonction du nombre d'éléments le long du profil   | 34 |
| Figure 4-8  | Coefficient de portance en fonction du nombre d'éléments le long du profil  | 35 |
| Figure 4.9  | <i>Evolution des résidus pendant le calcul</i>  | 36 |
| Figure 4.11 | Distribution du coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque $\alpha$   | 36 |
| Figure 4.12 | Distribution du coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque $\alpha$  | 37 |
| Figure 4.13 | Contours des vitesses et des pressions statiques autour du profil S822 placé sous différents valeurs de l'angle d'attaque | 39 |
| Figure 4.14 | Evolution des résidus pendant le  | 40 |
| Figure 4.16 | Distribution du coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque $\alpha$   | 41 |
| Figure 4.17 | Distribution du coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque $\alpha$  | 41 |
| Figure 4.18 | Contours des vitesses et pressions statiques autour du profil S834  | 44 |
| FIGURE B.1  | Discretisation de l'espace 2D   | 51 |
| Figure C.1  | Volume de contrôle autour du point P  | 54 |
| Figure C-2  | création de la géométrie  | 55 |
| Figure C-3  | Définition du domaine   | 56 |
| Figure C-4  | Création des points I et J  | 56 |
| Figure C-5  | Maillage du profil  | 57 |
| Figure C-6  | Mailler les segments des faces  | 58 |
| Figure C-7  | Maillage "C" généré autour de profil S822   | 58 |

# Liste de figures

---

# Liste de figures

---

# Liste des tableaux

| <b>Tableau</b> | <b>Titre</b>   | <b>Pages</b> |
|----------------|--|--------------|
| Tableau 4-1    | Description des domaines                                 | 27           |
| Tableau 4-2    | Valeurs fixes pour le domaine de calcul )                | 27           |
| Tableau 4-3    | Valeurs fixes pour l'étude de la partie avale            | 31           |
| Tableau 4-4    | Valeurs variables pour l'étude du partie avale )         | 31           |
| Tableau 4-5    | Valeurs fixes pour l'étude de maillage sur le profil     | 33           |
| Tableau 4-6    | Valeurs variables pour l'étude de maillage sur le profil | 33           |
| Tableau A-1    | Le profil S822 [21]                                      | 48           |
| Tableau A-2    | Le profil S834 [22]                                      | 49           |
| Tableau D-1    | Coordonnées du domaine                                   | 55           |
| Tableau D-4    | Le domaine de maillage retenu                            | 59           |

# Nomenclature

|           |   |
|-----------|---|
| Re        | Nombre de Reynolds                              |
| T         | force de poussée (N)                            |
| t         | Temps (s)                                       |
| t         | Temps adimensionnel                             |
| $U_1$     | vitesse de l'écoulement amont (m /s)            |
| $u$       | vitesse de l'écoulement suivant x (m /s)        |
| $u_2$     | vitesse de l'écoulement en aval (m/s)           |
| $\bar{u}$ | vitesse moyenne de l'écoulement turbulent (m/s) |
| $u'$      | fluctuation de vitesse (m/s)                    |
| $V_R$     | vitesse de l'écoulement suivant y (m/s)         |
| $x,y$     | coordonnes spatiales (m)                        |

## Symboles grecques

|             |   |
|-------------|---|
| $\alpha$    | angle d'incidence ( $^\circ$ )                  |
| $\beta$     | angle de calage ( $^\circ$ )                    |
| $\Delta p$  | différence de pression                          |
| $\epsilon$  | Taux de dissipation de turbulence ( $m^2/S^3$ ) |
| $\Phi$      | angle de l'écoulement ( $^\circ$ )              |
| $\lambda$   | vitesse spécifique                              |
| $\mu$       | viscosite dynamique (kg/m.s)                    |
| $\mu_t$     | viscosite turbulente (kg/m.s)                   |
| $\nu$       | viscosite cinematique ( $m^2/s$ )               |
| $\vartheta$ | volume ( $m^3$ )                                |
| $\rho$      | masse volumique (kg / $m^3$ )                   |
| $\sigma$    | solidite locale locale                          |
| $\Omega_1$  | vitesse angulaire an amont ( $^\circ/s$ )       |
| $\Omega_2$  | vitesse angulaire an aval ( $^\circ/s$ )        |
| $\omega$    | pulsation ( $s^{-1}$ )                          |

# Résumé

Dans ce travail, nous étudions des performances aérodynamiques de deux profils de pale d'éoliennes S834 et S822 conçus par NREL pour les petites éoliennes à axe horizontal. Cette étude est effectuée par simulation numérique avec la résolution des équations moyennées de Navier Stokes. La turbulence est représentée par le modèle SST  $k-\omega$ . Les calculs sont effectués dans un domaine bidimensionnel, pour un fluide incompressible, en régime stationnaire. Les champs de pression et de vitesse développés autour des profils ont été déterminés pour différentes valeurs de l'angle d'attaque. De même, des grandeurs caractérisant les performances aérodynamiques de l'éolienne (coefficients de portance, traînée) ont été déterminés. Les résultats de simulation sont en bonne concordance avec ceux disponibles dans la littérature. Les calculs ont été exécutés à l'aide du logiciel Fluent (version 15.0) au Centre de développement des énergies renouvelables (CDER).

# Abstract

In this work, we study the aerodynamic performance of two profiles of blade S834 and S822 turbines designed by NREL for small horizontal axis wind turbines. This study is performed by numerical simulation with the resolution of the averaged Navier Stokes. Turbulence is represented by the  $k-\omega$  SST model. Calculations are performed in a two-dimensional area, for an incompressible fluid in steady state. The pressure field and velocity developed around the profiles were determined for different values of the angle of attack. Similarly, quantities characterizing the aerodynamic performance of wind (lift coefficient, drag) were determined. Simulation results agree well with those available in the literature. Calculations were performed using the Fluent software (version 15.0) to the renewable energy Development Centre (CDER).

## ملخص

يتمثل هذا العمل في محاكاة لتدفق الهواء حول جناحين لتربينات الهوائية S822, S834 بغرض حساب المعاملات الايروديناميكية وفهم السلوك الفيزيائي لتدفق حول الجناحين

ترتكز المحاللة أساسا على حل معادلات Navier-Stokes بصيغة Reynolds ذات القيمة الوسطية

مع نموذج الاضطراب SST K- $\omega$  - الحسابات تمت في اطار تنائي الابعاد في حالت الهواء الغير قابل لضغط تم حساب معدل السرعة و الضغط حول الجناحين في حالات مختلفة لزاوية الورود . و أيضا تم حساب المعاملات الايروديناميكية النتائج المحصل عليها تم مقارنتها مع النتائج التجريبية و اعطت نتائج متقاربة . هذه الدراسة تمت في مركز التطوير الطقات المتجددة CDER

# Introduction générale

Depuis des siècles, les hommes ont toujours cherché un moyen d'exploiter l'énergie contenue dans les vents. Aujourd'hui, cette énergie propre et renouvelable est généralement exploitée au moyen d'un dispositif appelé éolienne. Une éolienne est constituée d'un mat, d'une nacelle et d'un rotor composé de pales. La rotation des pales entraînées par le vent permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis électrique. Aujourd'hui, pour bien des gens, les éoliennes sont devenues un moyen de réaliser des économies substantielles sur leurs consommations d'énergie et ainsi réduire leurs factures d'électricité. Aussi, le secteur de l'éolien est en plein essor. Cependant, pour devenir un acteur de poids dans ce secteur concurrentiel, il faut offrir une éolienne dotée de pales dont les caractéristiques aérodynamiques permettent de tirer le maximum de puissance du vent.

Une prédiction précise des caractéristiques aérodynamiques d'un profil d'une pale d'une éolienne est considérée comme étant la clé pour atteindre une évaluation satisfaisante des charges aérodynamiques, permettant ainsi la conception des éoliennes fiables et performantes. Dans ce contexte, un calcul des coefficients aérodynamiques de portance et de trainée est fait pour un écoulement d'air autour de deux profils S834 et S822 conçus pour les pales des petites éoliennes. Ce calcul est basé sur la résolution des équations moyennées de Navier Stokes en bidimensionnel avec un modèle de turbulence SST  $k-\omega$  pour un écoulement incompressible.

Les simulations numériques sont effectuées au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) à l'aide du logiciel Fluent version 15.0, qui permet de donner des prédictions fines sur les champs de pression et de vitesse autour d'un élément de pale. De même, il fournit des grandeurs caractérisant les performances aérodynamiques du profil de pale de l'éolienne (coefficients de portance et de trainée,).

L'organisation de notre mémoire porte sur les chapitres suivants :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les éoliennes.
- Dans le deuxième chapitre, les paramètres caractéristiques des profils de pale sont présentés. Une revue bibliographique relative au problème étudiée est ensuite effectuée, ce qui nous permet de mieux comprendre le sujet et de bien cerner notre étude.

## Introduction générale

---

- Le troisième chapitre est réservé à la méthodologie adoptée pour la simulation numérique de l'écoulement de l'air autour du profil. Les formulations des équations caractéristiques de l'écoulement ainsi l'algorithme et le schéma de résolution sont expliqués en détail. Une description du domaine d'étude (géométrie et maillage) et des conditions aux limites et initiales appliquées est également effectuée
- Les résultats obtenus font l'objet du quatrième chapitre : on présentera successivement l'étude sur le domaine de calcul, sur l'indépendance du maillage sur la solution puis les résultats obtenus pour les deux profils.

Ce quatrième chapitre est suivi par une conclusion générale et les perspectives concernant le présent travail.

# Chapitre I. Généralités sur les éoliennes

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique contenue dans le vent en énergie électrique (figure 1-1) ou mécanique. Dans le cas de la production d'électricité, la transformation peut se résumer par les étapes suivantes :

- le vent fait tourner les pales de l'éolienne en lui transmettant son énergie cinétique,
- la rotation des pales permet de produire une énergie mécanique qui sera transformée en énergie électrique grâce à un alternateur,
- il faut ajouter un multiplicateur de vitesse avant la génératrice afin d'accroître la vitesse de rotation du rotor,
- un transformateur augmente la tension du courant électrique produit,
- l'énergie électrique produite est ensuite envoyée sur le réseau électrique pour être utilisée par les consommateurs ou stockée,
- le fonctionnement (arrêt, marche) est géré par un système de contrôle.

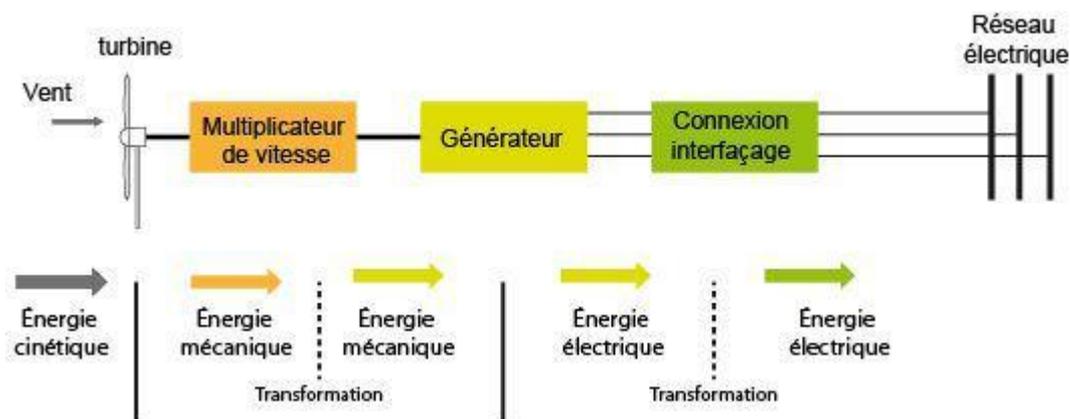
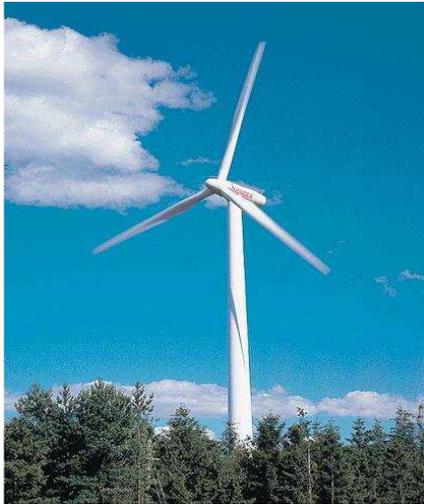


Figure I-1 : Principe de conversion de l'énergie éolienne est énergie électrique

## 1.1 Classification des éoliennes

Les éoliennes ou les aérogénérateurs sont généralement classés selon deux types, à savoir les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical. La figure (1.2) montre des représentations de ces deux types d'éoliennes. Dans ces vingt dernières années, différentes configurations ont été développées et il n'en est pas ressorti une configuration qui soit vraiment plus développée que d'autres. Par contre l'éolienne à axe horizontal est beaucoup

plus populaire que l'éolienne à axe vertical. Par la suite, dans cette présente étude, l'attention sera essentiellement portée sur les éoliennes à axe horizontal, mais il faut savoir que de nombreux aspects restent pertinents pour les éoliennes à axe vertical.



(a)



(b)

[www.windpower.org](http://www.windpower.org)

Figure (1.2) : Éoliennes à axe horizontal (a) et vertical (éolienne de Darrieus) (b).

### 1.1.1 Éoliennes à axe vertical (figure 1.3)

Les roues hydrauliques classiques sont construites de façon à laisser arriver l'eau perpendiculairement à l'axe de rotation de la roue. Dans ce sens, les éoliennes à axe vertical ressemblent un peu aux roues hydrauliques. En effet, certaines éoliennes à axe vertical pourraient également fonctionner avec un axe horizontal mais il est peu probable qu'elles soient aussi efficaces qu'une éolienne munie d'un rotor du type hélice.

Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivants :

- Elle nous permet de placer la génératrice et d'autres composants à même le sol et nous n'avons pas besoin de munir la machine d'une tour.
- Le mécanisme d'orientation n'est plus nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- Les vents sont assez faibles à proximité de la surface du sol, donc supprimer la tour implique des vents très faibles sur la partie inférieure du rotor.
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical est plus faible que celle des éoliennes à axe horizontal.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement et elle nécessite un couple de démarrage. Ainsi, il faut pousser les éoliennes de Darrieus pour qu'elles démarrent. Cependant, cela ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau car il est possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne.
- Pour tenir l'éolienne, on utilise souvent des haubans ce qui est peu pratique dans des zones agricoles exploitées intensivement.
- Pour remplacer le palier principal du rotor, il faut enlever tout le rotor. Cela vaut autant pour les éoliennes à axe vertical que pour celles à axe horizontal, mais dans le cas du rotor de Darrieus, cela implique un véritable démontage de l'éolienne entière.



Figure I-3 : Éolienne à axe vertical de type Darrieus [1]

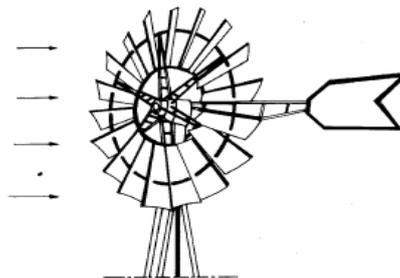
### 1.1.2 Eoliennes à axe horizontal

La plus grande partie de la technologie éolienne décrite dans ce qui va suivre se réfère aux éoliennes à axe horizontal. La raison est simple : la majorité des éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui construites avec un rotor de type hélice, monté sur un axe horizontal (un arbre principal horizontal). Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion. La portance de ces ailes placées dans le vent ne sert pas ici à sustenter un aéronef mais à générer un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique telle qu'une génératrice électrique, une pompe...

Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue les éoliennes lentes et les éoliennes rapides :

#### Les éoliennes lentes (figure 1.4) :

Une catégorie particulière d'éoliennes à axe horizontal est celle des machines multi pales de faibles diamètres (jusqu'à 10 m environ). La masse importante de la roue aubée, et les vitesses de rotation peu élevées (en regard du diamètre) font que ces machines de faible puissance sont utilisées principalement pour le pompage de l'eau. Cependant, une application récente de ce type de machine (avec des diamètres de l'ordre d'un mètre) génère de l'électricité à bord de bateaux de plaisance ou de bateaux de compétition.



[www.univ-bechar.dz/SN2E/PROCEDING/59.pdf](http://www.univ-bechar.dz/SN2E/PROCEDING/59.pdf)

Figure (I.4) : une éolienne multiple (lente)

**Les éoliennes rapides :**

Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 2 et 4 et peuvent développer des puissances élevées (jusqu'à 3 mégawatts et plus). Elles sont aussi beaucoup plus légères que les éoliennes lentes mais leur démarrage difficile reste un inconvénient.

**1.2 Architecture d'une éolienne à axe horizontal**

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne : le rotor, la nacelle et la tour (comme illustré dans la **figure 1.5** pour une machine de type « amont »).

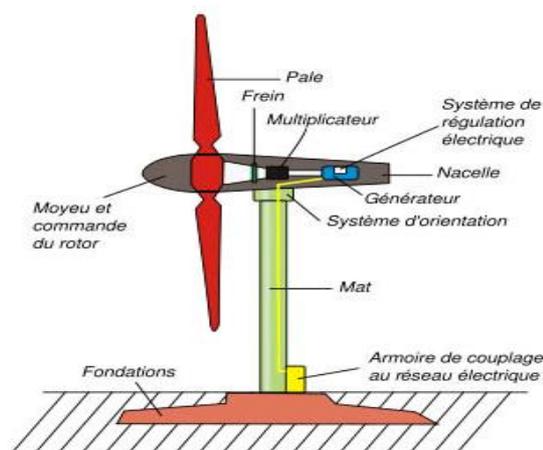


Figure (I.5) : Composants d'une éolienne [2].

**Rotor :** C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variable, freinage du rotor...).

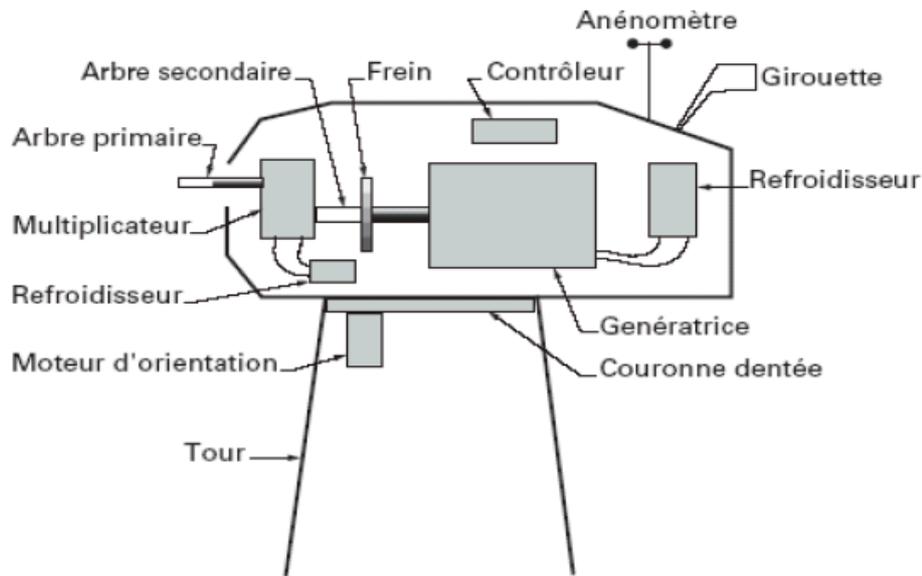


Figure (I.6) : Éléments d'une nacelle [2].

**Nacelle :** Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure I.6 présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants.

**Tour :** Son rôle n'est pas seulement de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol [3], améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor + nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation.

### 1.3 Conditions de fonctionnement

Les conditions de fonctionnement d'une turbine éolienne dépendent essentiellement des conditions de vent. Puisque la puissance est fonction de la vitesse du vent (figure 1-7), les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et de la fréquence des vents disponibles. L'efficacité d'une éolienne dépend donc de son emplacement.

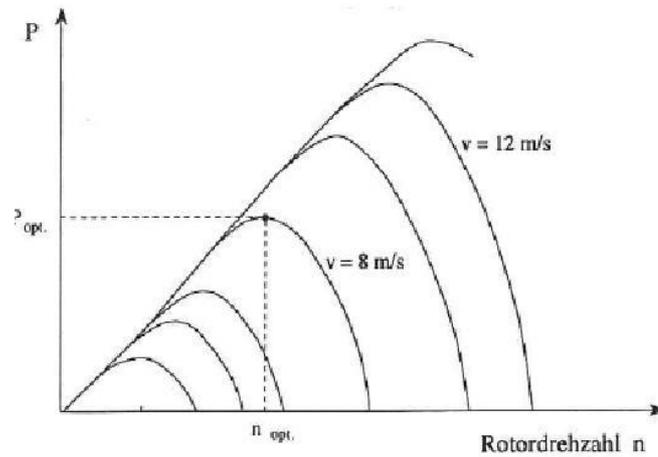


Figure 1-7 : Variation de la puissance en fonction de la vitesse vent [4]

#### 1.4 Théorie de Betz et coefficient de puissance maximal [5]

La théorie de Betz indique la limite maximale de puissance récupérable du vent. Elle introduit un coefficient de puissance  $C_p$  dans le calcul de la puissance. Ce coefficient représente l'efficacité de l'éolienne à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation. Il est fonction de la vitesse du vent amont (avant les pales)  $V_1$  ainsi que de la vitesse aval (après les pales)  $V_2$ . La figure 1-8 présente la variation de l'écoulement autour de la turbine.

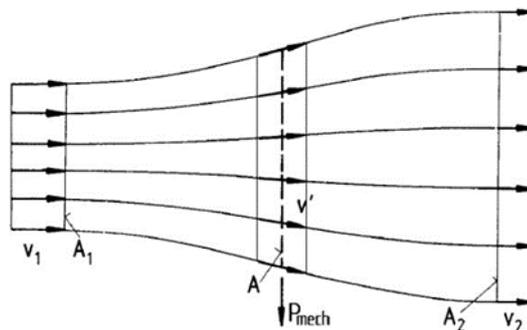


Figure 1-8 : Variation de l'écoulement autour de la turbine [5]

La puissance à l'entrée des pales est définie comme suit :

$$P_{\text{entrée}} = \frac{1}{2} Q v_1^3 A \quad (W) \quad (1.1)$$

Tandis que la puissance à la sortie des pales est définie comme suit :

$$P_{\text{sortie}} = \frac{1}{4} Q A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (W) \quad (1.2)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  indique le ratio entre la puissance de sortie et d'entrée

$$C_p = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}} = \frac{\frac{1}{4} Q A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} Q v_1^3 A} \quad (1.3)$$

Après simplification :

$$C_p = \frac{1}{2} \left| 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{v_2}{v_1} \right| \quad (1.4)$$

Le rapport de vitesses donnant le  $C_p$  maximal est le suivant :

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3} \quad (1.5)$$

Finalement,

$$C_{p, \text{max}} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left( \frac{1}{3} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{1}{3} \right| = 0.5926 \quad (1.6)$$

Autrement dit, d'après la théorie de Betz, le maximum d'énergie récupérable du vent est d'environ 59,30%.

### 1.5 Puissance générée par une turbine éolienne [6]

La puissance se divise en trois catégories pour une turbine éolienne, soit : la puissance récupérable directement du vent, la puissance mécanique et la puissance électrique. Au niveau de la puissance du vent, elle peut être exprimée par la relation suivante :

$$P_S = \frac{1}{2} C_p A \rho V^3 \quad (1.7)$$

Où A est l'aire balayée par les pales du rotor

En tenant compte du critère de Betz suivant l'équation (1.6) la puissance maximale à l'arbre s'exprime selon la relation :

$$P_{S,max} = \frac{8}{27} A \rho V^3 \quad (1.8)$$

Dans le cas d'une éolienne tripale, le coefficient de puissance Cp devrait se situer entre 0,4 et 0,48 tel que le montre la figure 1-9. Il faut aussi préciser que la puissance mécanique varie en fonction des rendements de tous les éléments mécaniques, qui sont généralement estimés à 95%.

Dans le cas d'une éolienne tripale, la plage admissible de valeur peut se lire directement sur la figure 1-9. La méthode consiste à identifier la plage de valeurs de coefficient de puissance ou de vitesse spécifique correspondante au type d'éolienne.

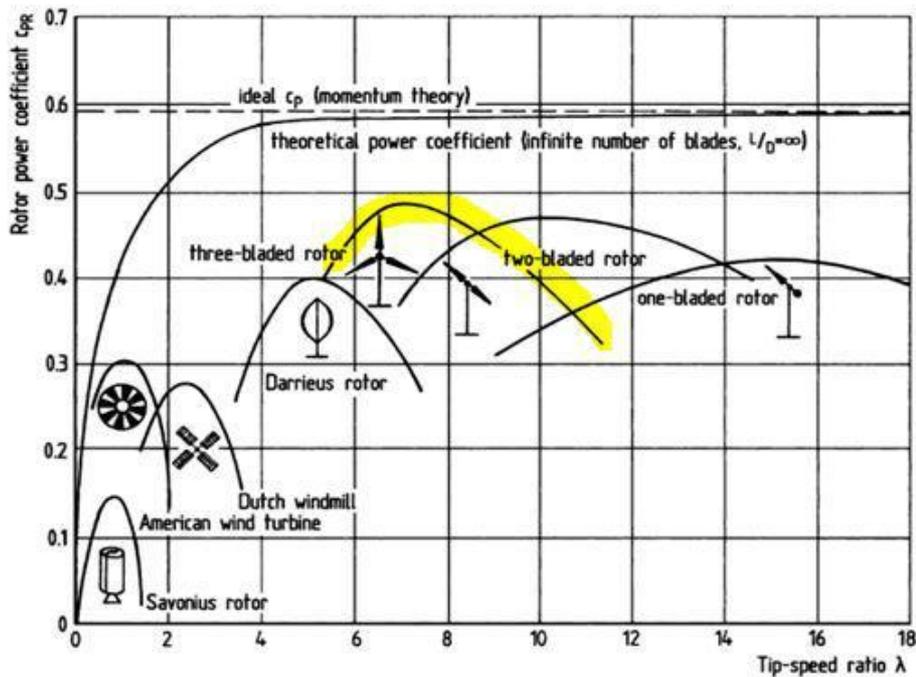


Figure 1-9 : Coefficient de puissance des différents types d'éolienne [5]

**Zones de fonctionnement [7]**

La courbe de puissance électrique fournie par une éolienne présentée dans la figure 1-10 permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent.

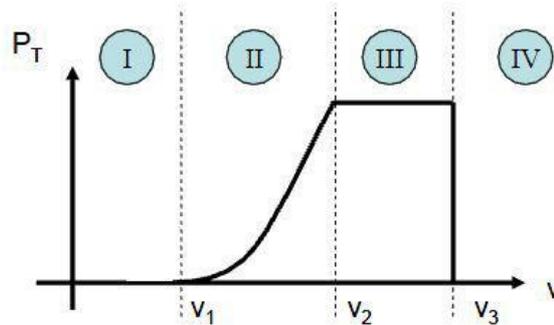


Figure 1-10 : Zone de fonctionnement d'une éolienne [7]

$V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  sont les vitesses de vent caractéristiques de l'éolienne :

- $V_1$  est la vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine
- $V_2$  est la vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice
- $V_3$  est la vitesse de décrochage (souvent = 25m/s)

La figure 1-10 peut être interprétée de la façon suivante :

- zone I ( $V < V_1$ ) la turbine peut tourner mais l'énergie captée est trop faible.
- zone II ( $V_1 < V < V_2$ ) le maximum de puissance est capté pour chaque vitesse de vent.
- zone III ( $V_2 < V < V_3$ ), la puissance disponible devient trop importante. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge,
- zone IV ( $V > V_3$ ), la vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

## Chapitre II.

# Paramètres caractéristiques des profils et étude bibliographique

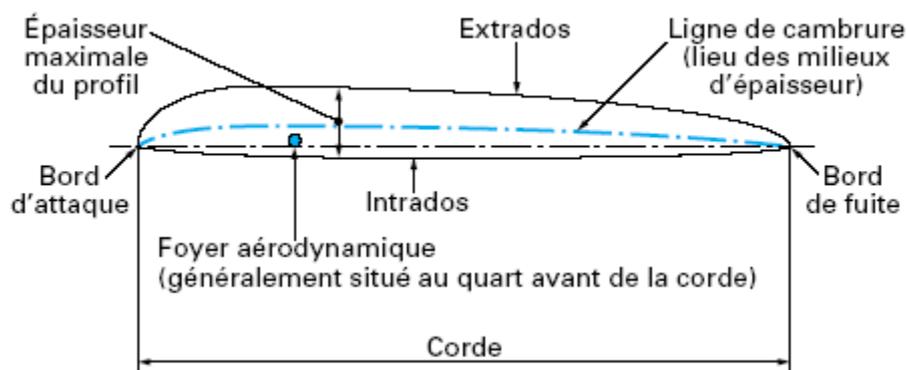
### 2.1 Paramètres caractéristiques des profils d'ailes

Les pales sont l'élément principal des éoliennes. Le rendement, le bon fonctionnement et la durée de vie l'éolienne dépendront de leur conception. Il est donc primordial de présenter certains de leurs paramètres caractéristiques :

- le profil de pale
- les angles d'attaque et de calage
- les profils utilisés dans les pales d'éoliennes
- les coefficients de portance et de traînée

#### 2.1.1 Géométrie du profil

Le profil d'une aile d'avion, d'une pale d'hélice ou d'une pale d'éolienne se rapporte à son contour en coupe transversale. Le profil détermine les forces aérodynamiques qui s'exercent sur la pale quand il est en mouvement relatif à un fluide.

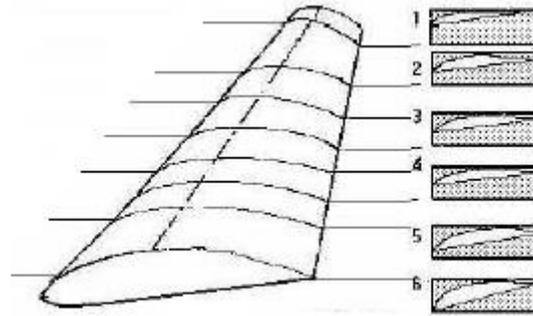


Techniques de l'ingénieur : « Hélices aériennes » BM4540

Figure (II.1) : Grandeurs caractéristiques d'un profil

Les profils d'ailes destinés à produire une portance à des vitesses subsoniques ont à peu près tous un bord d'attaque arrondi et épais sur l'avant et un bord de fuite fin sur l'arrière, de forme

cambrée. Les grandeurs caractéristiques d'un profil sont représentées dans la figure 2.1. Le dessus du profil est appelé extradados, le dessous intrados. La corde du profil est le segment de droite reliant le bord d'attaque (partie avant du profil) au bord de fuite (Partie arrière du profil). La corde peut être de largeur fixe (pales à largeur fixe) ou variable (pales à largeurs variables, figure II.2).



<http://www.chez.com/aerodynamique/aerodyn>

Figure (II.2) : Pale à profil variable suivant sa longueur.

**Le bord d'attaque** d'un **profil aérodynamique** (aile d'avion, hélice, pale d'éolienne... ) entre en premier en contact avec le fluide. Le bord d'attaque est de forme arrondie avec un rayon de l'ordre de 1,5% de la corde sur les ailes d'avions subsoniques. Il est plus petit et plus pointu sur les machines supersoniques à ailes fines.

L'allongement d'une pale est le rapport entre l'envergure et la corde moyenne. C'est l'un des facteurs qui contribuent à l'augmentation de la finesse. Plus l'allongement est grand, plus la finesse de l'aile est grande. La pente de portance dépend de l'allongement.

### 2.1.2 Angle d'attaque, de calage et vrillage [8]

L'angle d'attaque (ou angle d'incidence) est l'angle  $\alpha$  qui existe entre la corde (C) du profil et la vitesse du vent agissante (V). Plus cet angle est important, plus les filets d'air sont déviés par le profil. L'angle qui existe entre la corde et le plan de rotation de l'éolienne s'appelle angle de calage ( $\theta$ ). Le vrillage d'une pale est la variation de l'angle de calage le long de la pale. Le vrillage d'une pale, lorsqu'il existe, permet d'avoir un même angle d'attaque sur toute la longueur de la pale. La figure 2-3 présente les angles d'attaque  $\alpha$  et de calage  $\theta$ .

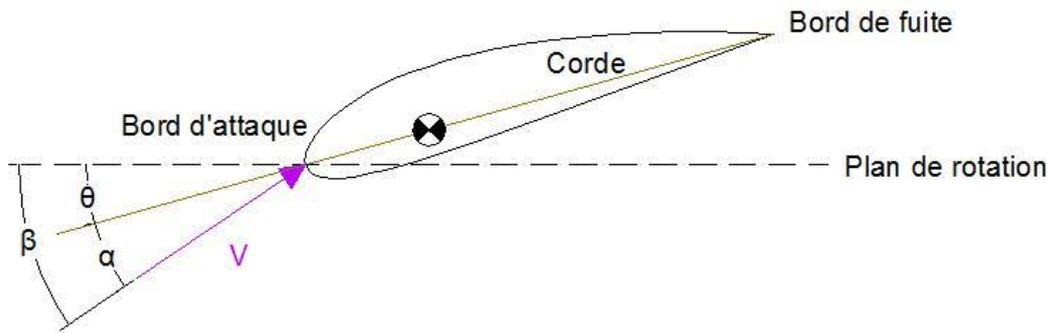


Figure II-3 : Angles définis à partir de la corde du profil

### 2.1.3 Les profils utilisés dans les éoliennes

La conception et le choix d'un profil d'aile sont l'un des aspects les plus importants de la conception. Pour les pales d'éoliennes, les concepteurs utilisent souvent, pour la partie la plus extrême, des profils classiques destinés à l'aviation c'est pour cela qu'on constate une certaine ressemblance des ailes d'avion. Par contre, les profils de la partie la plus intérieure sont plus épais. Ils sont conçus spécialement pour les éoliennes.

Les profils les plus utilisés dans la conception des éoliennes sont : les profils *NACA*, notamment, *NACA0012*, *NACA4412*, *NACA4415* et les profils de la série *S*, tel que le *S809*, *S822*, *S834* *SD2030* de NREL laboratoire américain et le *FX 63 137*. D'une manière générale, on utilise les profils symétriques pour les éoliennes à axe vertical et les profils cambrés pour les pales d'éoliennes à axe horizontal.

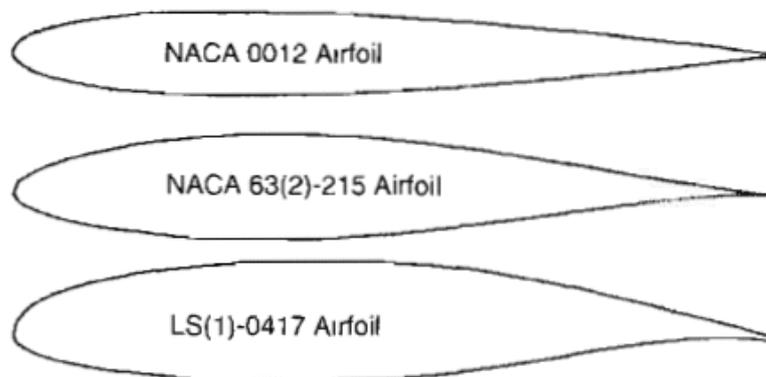
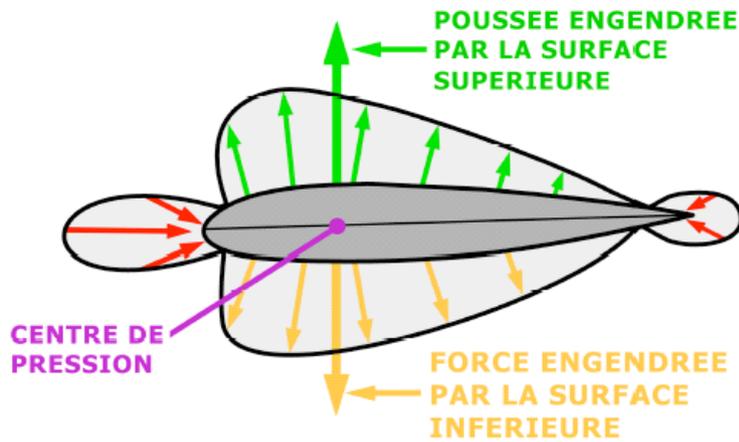


Figure (II.4) : Exemple de profil d'aile [9].

#### *a- Les profils symétriques :*

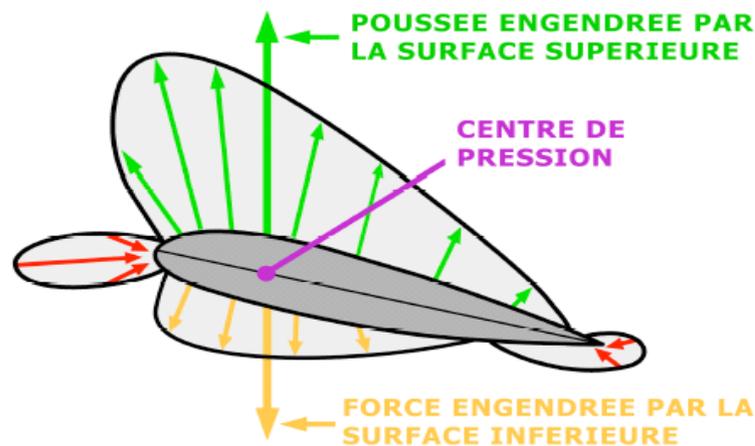
Les **profils symétriques** ont des surfaces inférieures et supérieures identiques. Le trajet de l'air autour de la pale reste à peu près constant ce qui assure le meilleur ratio poussée/trainée.

Un autre avantage est le coût réduit. Ce type de pale ne peut produire autant de poussée qu'une pale asymétrique et elle peut provoquer des décrochages, effet indésirable en aérodynamique de l'éolienne.



[www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf](http://www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf)

Figure (II.5) : Profil symétrique lors d'une poussée nulle.



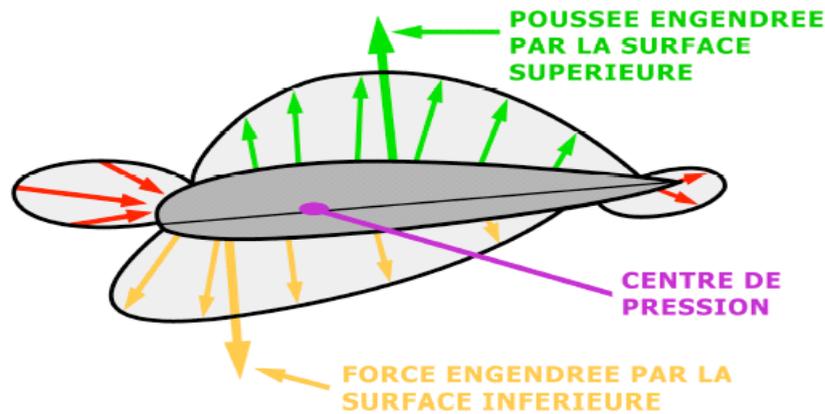
[www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf](http://www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf)

Figure (II.6) : Profil symétrique lors d'une poussée positive.

Lorsque l'angle d'attaque augmente pour créer une poussée positive, le centre de pression ne bouge que très légèrement. Les vecteurs mis en jeu restent alors opposés et aucune force de torsion n'est exercée.

### *b- Profils asymétriques :*

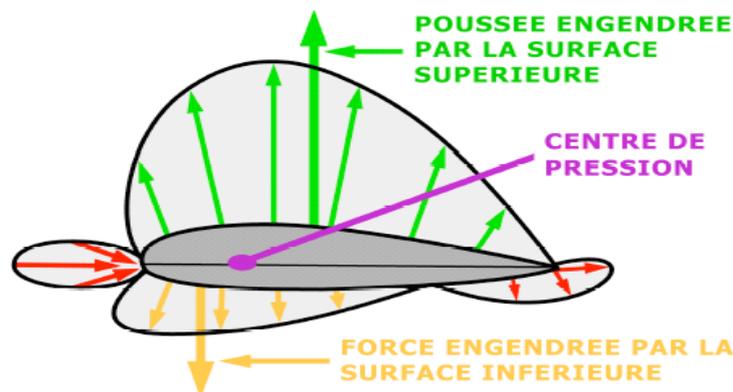
Les **profils asymétriques ou cambrés** peuvent avoir une surface haute très différente de la surface basse. Ces profils n'ont aucun problème de décrochage et leur ratio poussée/trainée est bon.



[www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf](http://www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf)

Figure (II.7) : Profil asymétrique lors d'une poussée nulle.

Les pressions exercées sur la surface supérieure ont tendance à soulever l'appareil (éolienne). Au contraire, sur la surface inférieure la pression s'oppose au mouvement de montée. La poussée globale qui est concentrée au centre de pression est la différence entre les forces engendrées par les différentes pressions.



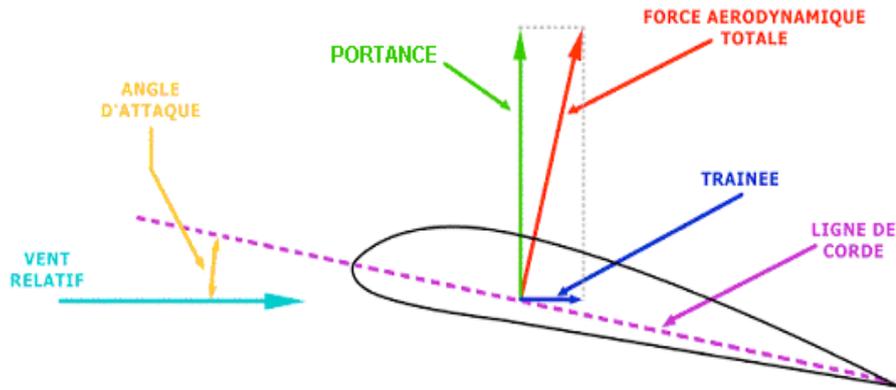
[www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf](http://www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf)

Figure (II.8) : Pale asymétrique lors d'une poussée positive.

Lorsque l'angle d'attaque augmente, la force mise en jeu sur la surface supérieure augmente. Cela provoque une poussée positive. De plus, le centre de pression se déplace, les vecteurs des forces mis en jeu n'étant plus opposés.

#### 2.1.4 Forces agissantes sur un profil

La force aérodynamique totale (aussi appelée force résultante), peut être divisée en deux : la traînée et la portance. La portance agit dans une direction perpendiculaire au vent relatif et la traînée qui est une force résistante s'oppose au mouvement de l'aile dans l'air. La traînée est parallèle à la direction du vent relatif.



[www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf](http://www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf)

Figure (II.9) : Forces agissantes sur un profil.

### Coefficients de portance et de trainée [1]

Pour des angles d'attaques faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée une force qui aspire la pale vers le haut (l'avant). Cette force s'appelle la portance  $L$  (*Lift*). Elle est définie par la relation 2.1

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad (2.1)$$

Où  $C_l$  représente le coefficient de portance.

Lorsque la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente, une force de résistance à l'air apparaît. Cette force de résistance appelée trainée est notée  $D$  (*Drag*) et s'exprime par la relation :

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_d \quad (2.2)$$

Où  $C_a$  représente le coefficient de trainée.

La portance et la trainée s'appliquent au centre aérodynamique du profil, situé à approximativement à 25% la corde, à partir du bord d'attaque. Les coefficients de portance  $C_l$  et de trainée  $C_a$  dépendent de l'angle d'attaque  $\alpha$  et de la géométrie du profil.

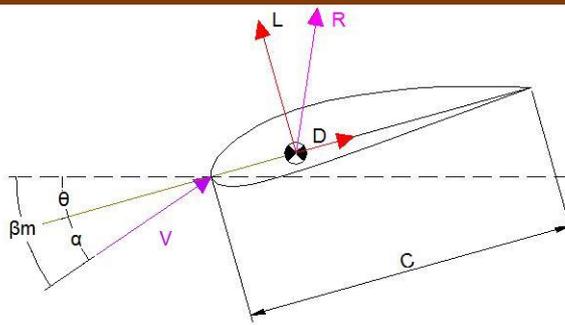


Figure II-10 : Portance et trainée appliquée au centre aérodynamique

### Rapports des paramètres caractéristiques [6]

Plusieurs rapports des paramètres cités précédemment sont souvent utilisés dans la sélection de profils de pale. Il s'agit notamment :

- de la finesse ou le rapport du coefficient de portance sur celui de la trainée

$$finesse = \frac{c_l}{c_d} \quad (2.3)$$

- du rapport de l'épaisseur  $e$  du profil sur la corde  $C$

$$\frac{epaisseur}{corde} = \frac{e}{c} \quad (2.4)$$

## 2.2. Etude bibliographique

L'étude des performances aérodynamiques des éoliennes à axe horizontal a beaucoup suscité les chercheurs pendant ces dernières années à cause des applications potentielles dans la production de l'électricité à base de l'énergie cinétique du vent qui rentre dans la catégorie des énergies renouvelables propres à l'environnement.

Cette étude est basée sur la simulation CFD (Computation Fluid Dynamic) à l'aide du logiciel Fluent [23] qui permet de résoudre les équations de la mécanique des fluides pour des écoulements 2D, intégrant un modèle de turbulence SST K- $\omega$ .

De nombreux travaux de recherche ont été effectués pour déterminer la structure fine de l'écoulement à travers les pales des éoliennes à axe horizontal. A titre d'exemples, nous citons quelques travaux effectués dans ces dernières années, tels que

Chandrala et al. ([24], 2012), qui porte sur l'analyse aérodynamique d'un rotor éolien du type NACA 4402 en comparant les résultats de calcul CFD avec les mesures pour différents angles d'attaque,

Yilei He et al.([25], 2014) qui s'intéresse à l'optimisation du profil S809[26], utilisant un algorithme multi-objectifs MOGA ([27], 2006),

MEMON et al. ([28], 2012), qui utilise le modèle de surface active pour la modélisation et la simulation des écoulements autour du profil éolien S809 [26], en comparant les résultats de simulation à ceux obtenus par des essais expérimentaux à l'aide d'une soufflerie.

Bekhti et al. ([29], 2010) ont travaillé sur la simulation de l'écoulement de l'air autour d'un profil NREL S809 pour prédire le phénomène de décrochage dynamique et de bien comprendre le comportement physique de l'écoulement autour d'un rotor éolien. Ces travaux sont basés sur la résolution des équations de Navier-Stokes moyennées en utilisant le modèle RANS, pour la turbulence.

Geissler et al. [30] ont étudié l'influence des différents modèles de turbulences (Baldwin-Lomax, Spalart-Allmaras, k -  $\omega$ , SST k -  $\omega$ ) par des calculs des écoulements instationnaires séparés (décrochage dynamique). Après comparaison des résultats avec d'autres calculs publiés et des données expérimentales, ils ont conclu que les différents modèles de turbulence donnent des résultats très différents

Des simulations numériques ont été effectuées par Ren et al. [31] pour un profil NACA 63-430. Ces simulations étaient basées sur la résolution des équations Moyennées de Navier-Stokes, la turbulence étant représenté par le modèle SST  $k-\omega$  de Menter. Les auteurs ont comparé leurs résultats avec des données expérimentales et ont Montré que pour un profil d'un mètre de corde, les coefficients aérodynamiques Variaient rapidement lorsque la rugosité augmente et ce, jusqu'à une valeur critique de 0.3 Mm: la portance diminue et la traînée augmente. Au-delà de cette valeur critique, la Variation des forces devenait lente

Ferrer et al. [32] ont utilisé Fluent 12.0.3, un code industriel de simulation numérique de dynamique des fluides (Computational Fluids Dynamics) pour l'étude des effets de la rugosité sur un profil de pale d'éolienne de type S814 de NREL.

Ces simulations étaient également basées sur la résolution des équations moyennées de Navier-Stokes, mais la turbulence était représentée par un modèle SST  $k-\omega$  Modifié.

Le modèle de turbulence SST  $k-\omega$  a été aussi utilisé par D. Li et al. [33] pour Étudier l'écoulement autour d'un profil DU 95-W-180 et les performances Aérodynamiques dans l'état lisse et rugueux. Ils avaient trouvé des bons résultats, Comparés à des données expérimentales.

Parmi les études expérimentales, on peut citer l'étude de D.M. Somers ET M.D. Maughmer sur six profils de NREL des petits éoliens tels que le S834 S822 LE SD2030 FX63 137 et E 387 a Pennsylvania Period of Performance: July 11, 2002–October 31, 2002 [21].

Et les travaux de Michael S. Selig and Bryan D. McGranahan a Université de Illinois at Urbana-Champaign Urbana, sur les six profils de NREL des petits éoliens tel que S834 S822 LE SD2030 SH3055 FX63 137 et E 387 Period of Performance: October 31, 2002 January 31, 2003 [22]

### **Conclusion :**

L'objectif ultime de ce travail c'est de simuler l'écoulement prés et autour des pales d'éolienne, pour la détermination les coefficients de portance et de trainée ainsi les contours de pression et de vitesse. Afin d'apprécier ces effets, la comparaison de nos résultats avec des résultats expérimentaux s'avèrent nécessaires.

## Chapitre III. Méthodologie

Dans ce chapitre on présente la méthode appliquée pour la simulation numérique de l'écoulement d'un fluide autour des profils S822 et S834, placés sous différents angles d'incidence fixes.

L'approche retenue est basée sur la résolution des équations moyennées de Navier Stokes, la turbulence étant représentée par le modèle SST  $k - \omega$ . Les simulations de l'écoulement sont effectuées en calculs stationnaires, pour un fluide newtonien incompressible (l'air), le profil étant placé dans un domaine bidimensionnel.

### 3.1 Equations résolues

Considérons un domaine fluide  $\Omega$  dans un système de coordonnées cartésiennes  $O(x, y)$  et soit  $U(x, y) = (u, v)$  le vecteur vitesse. Les équations de Navier Stokes s'écrivent en 2D :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3.3)$$

**Equations moyennées de Navier Stokes.** Pour stimuler l'écoulement turbulent, on utilise la décomposition de Reynolds (la moyenne de Reynolds utilisée pour les écoulements incompressibles ([10][11]) qui est la première approche de traitement soit sur le temps pour les problèmes pseudo-permanents, soit sur un grand nombre de configuration et seules les valeurs moyennes sont explicitées. Mais comme dans de nombreux cas on ne s'intéresse qu'à ces moyennes, ce traitement est suffisant pour la plupart des problèmes industriels [12]. En introduisant la moyenne de Reynolds, les équations de Navier-Stokes pour un écoulement stationnaire s'écrivent comme suit :

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \left( -\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} \right) \quad (1.4)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \left( -\frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} \right) \quad (1.5)$$

La non-linéarité des équations entraîne, dans ce mode de traitement, l'apparition d'inconnues supplémentaires qui rendent ouvert le système classique d'équations (nombre d'inconnues supérieur au nombre d'équations) ; Des équations complémentaires dites équations de fermeture sont alors formulées afin de résoudre le problème. C'est cette formulation qui correspond à la modélisation de la turbulence.

**Equations de turbulence.** On peut trouver dans la littérature différents modèles de turbulence. Pour nos simulations, nous avons retenu le modèle SST K- $\omega$  de Menter [13]. Ce choix a été guidé par son efficacité et sa précision pour la simulation des écoulements avec forts gradients de pression et les applications complexes comparé à d'autres modèles [14], [15], [16], [17], [18]. Le Modèle SST K- $\omega$  combine le modèle k- $\omega$  Wilcox avec le modèle k- $\epsilon$  (formulé pour les grands nombres de Reynolds). Ce modèle tend à regrouper les avantages de ces deux modèles où le modèle k- $\omega$  est utilisé dans la zone proche de la paroi (sous-couche de la couche limite), tandis que le modèle k- $\epsilon$  est appliqué dans les zones lointaines du profil [12].

Le Modèle SST K- $\omega$  de Menter [13] est un modèle à deux équations. Pour les formuler on définit les paramètres suivants :

1. *L'Energie cinétique du mouvement turbulent K :*

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (1.6)$$

$i$  est l'indice de dimension ( $i=1$  pour  $x$  et  $i=2$  pour  $y$ ).

2. *Le taux de dissipation de turbulence  $\epsilon$  :*

$$\epsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \quad (1.7)$$

3. Le taux de dissipation spécifique de l'énergie cinétique turbulente  $\omega$  :

$$\omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (1.8)$$

Les équations pour  $k$  et  $\omega$  s'écrivent :

$$\rho u_j \frac{\partial y}{\partial x_j} = P - \beta^2 \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1.9)$$

$$\rho u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma \omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (1.10)$$

Avec :

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (1.11)$$

Et

$$\tau_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (1.12)$$

La viscosité turbulente est définie par la relation :

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (1.13)$$

Les fonctions additionnelles sont définies par les relations :

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (1.14)$$

Et

$$F_2 = \tanh(\arg_1^2) \quad (1.15)$$

Avec

$$\arg_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \mathcal{V}}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma \omega_2 k}{CD_{K\omega} y^2} \right] \quad (1.16)$$

$$CD_{K\omega} = \max \left( 2 \rho \sigma \omega_2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (1.17)$$

$$arg_2 = \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \quad (1.18)$$

Les valeurs des constantes sont :

$$\beta^* = 0,09 \quad k = 0,41 \quad a_1 = 0,31$$

Pour les autres constantes, on applique la relation générale suivante :

$$\Psi = F_1 \Psi_1 + [1 - F_1] \Psi_2$$

Avec

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma \omega_1 K^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma \omega_2 K^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

$$\sigma_{K1} = 0,850 \quad \sigma_{\omega 1} = 0,5$$

$$\sigma_{K2} = 1,0 \quad \sigma_{\omega 2} = 0,856$$

$$\beta_1 = 0,075 \quad \beta_2 = 0,0828$$

### 3.2 Algorithmes et schémas de discrétisation

La méthode de résolution appliquée est la méthode des volumes finis. Les calculs sont exécutés à l'aide du code FLUENT. Les équations sont résolues à l'aide de l'algorithme SIMPLE. Le schéma de discrétisation retenu est celui qui était par défaut i.e. le schéma décentré UPWIND. Les descriptions de l'algorithme SIMPLE et du schéma UPWIND sont données dans les annexes B et C respectivement.

### 3.3 Domaine de calcul et maillage

Le domaine de calcul retenu est un domaine en C et le maillage construit est du type structuré. Les dimensions du domaine de calcul ainsi que la taille du maillage ont fait l'objet d'une étude.

L'étude du domaine de calcul repose sur un compromis entre le fait que les frontières doivent être suffisamment éloignées afin que les conditions limites n'influencent pas les résultats obtenus, et d'un autre côté éviter un domaine trop grand qui demanderait un nombre d'éléments et des temps de calculs trop importants. Dans la littérature la présence de différents domaines de tailles diverses ne permet pas de déterminer à priori une dimension optimale. En effet, pour une étude similaire (étude d'un profil sous Fluent) les travaux [19] et [20] proposent deux domaines de tailles assez différentes. Dans cette étude nous avons donc déterminé les dimensions optimales du domaine qui, pour un coût de calcul restreint, donnent des résultats suffisamment proches de ceux donnés par un domaine plus large.

Les résultats de ces deux études sont présentés dans le chapitre 4 suivant.

### 3.4 Conditions aux limites

Il faut définir le type de conditions aux limites que l'on souhaite imposer sur les différentes limites du domaine de calcul. A la surface du le profil, on imposera des conditions d'adhérence (« Wall »). En amont du profil et sur les surfaces Sud et Nord du domaine de calcul, on supposera que la vitesse de l'écoulement est connue et on imposera des conditions aux limites de type vitesse imposée (« Velocity inlet »). A la sortie du domaine de calcul, on imposera la valeur de la pression, la pression atmosphérique et on optera pour des conditions de type sortie à pression imposée (« pressure outlet »). Les conditions aux limites appliquées sont récapitulées dans la figure 3-1.

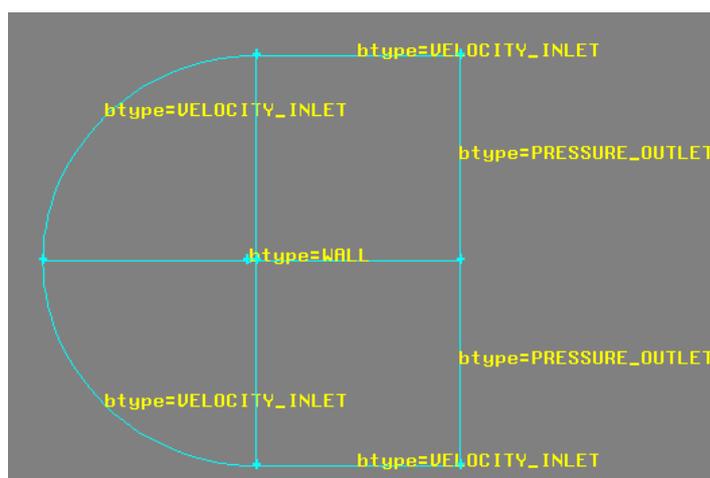


Figure 3-1 Les conditions aux limites

### 3.5 Profils étudiés

L'étude est appliquée aux profils d'aile S822 et S834 spécialement conçus par NREL (National Renewable Energy laboratory, USA) pour les pales d'éoliennes.

Les profils aérodynamiques S834 et S 822 sont destinés à l'application des petites éoliennes. Leur géométrie complexe les rend difficile à étudier. Elle n'est pas définie par une formule analytique mais par un certain nombre de points (voir coordonnées dans l'annexe (A) [1] [2]). Ces profils ont fait l'objet d'expérimentation dans la soufflerie du laboratoire NREL (USA), pour différents nombres de Reynolds.

Pour la validation de nos calculs on a comparé nos résultats avec des données expérimentales extraites des travaux [21] et [22]. Les travaux présentés dans la référence [21] ont été réalisés en 2002 par D.M. Somers et M.D. Maughmer dans le laboratoire NREL (**National Renewable Energy Laboratory**) dans le cadre d'une étude qui a porté sur 6 modèles de profils. Des expérimentations ont été effectuées sur les profils S822 et S834 avec des modèles ayant une corde de 1 mètre, pour des nombres de Reynolds variant de  $0.2 \times 10^6$  à  $0.7 \times 10^6$ . Les travaux présentés dans la référence [22] ont été réalisés dans le même laboratoire en 2003 par Michael S. Selig et Bryan D. McGranahan. Les expérimentations ont été effectuées pour les mêmes profils avec des modèles de corde de 1 mètre et pour des nombres de Reynolds de  $0.1 \times 10^6$  à  $0.7 \times 10^6$ . Afin de pouvoir comparer avec les données expérimentales disponibles, nous avons choisi de réaliser cette étude pour un nombre de Reynolds de  $0.7 \times 10^6$ .

## Chapitre 4. Résultats et discussions

Dans un premier temps nous avons étudié l'indépendance des dimensions du domaine d'étude et du maillage sur les résultats pour déterminer le maillage optimal. Ces calculs sont effectués pour le profil S822. Ensuite nous avons repris les simulations pour le profil S834 avec le domaine et le maillage optimal qui ont été déterminés.

Pour toutes les simulations effectuées, le fluide considéré est de l'air ambiant et incompressible (nombre de Mach=0.038) à une température  $T_0=288.16\text{ K}$  (ou  $15\text{ C}^\circ$ ), le coefficient de viscosité dynamique est  $\mu=1.5\times 10^{-5}\text{ Kg/m.s}$ , la masse volumique  $\rho=1.225\text{ kg.m}^{-3}$ . La vitesse du vent incident est  $V=10.5\text{ m/s}$  ce qui correspond à un nombre de Reynolds  $Re=0.7\times 10^6$ , la corde du profil étant égale à 1m. Les profils ont été placés dans l'écoulement sous différents angles d'incidence  $\alpha = 0^\circ, 6^\circ, 8^\circ$  et  $12^\circ$ . La pression de référence est la pression atmosphérique ( $P_{atm}= 101325\text{ Pa}$ ). Pour les conditions aux limites du domaine d'étude, nous avons imposé à l'entrée la vitesse du vent dont les composantes  $v_x = v \cos(\alpha)$  et  $v_y = v \sin(\alpha)$ , à la sortie la pression atmosphérique ( $P=P_{atm}$ ) et la condition de non glissement sur la paroi solide du profil ( $V_x=0, V_y=0$ ).

### 4.1 Indépendance du domaine de calcul

L'objectif de cette étude est de voir comment la distance entre les frontières (portant les conditions limites) et le profil influe sur les résultats. Les simulations numériques ont été effectuées pour plusieurs tailles du domaine d'étude.

#### 4.1.1 Les différents essais

Nous avons fait évoluer les distances  $l_1$  et  $l_2$  (voir dans la figure 3.1 l'identification de ces deux grandeurs  $I_1$  et  $I_2$ ).

Dans la **figure 4-1** sont présentés les différents domaines de maillage appliqués. Un résumé de tous les essais est présenté dans le **Tableau 4-1**. Comme les longueurs  $l_1$  et  $l_2$  vont croître et décroître le nombre d'éléments lui aussi va évoluer. Dans le Tableau 4-2 sont répertoriées les valeurs fixes pour toutes les simulations de l'étude du domaine de maillage.

Tableau 4-1 : Description des domaines

| Description des domaines |              |              |              |               |               |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Domaine                  | Domaine 1    | Domaine 2    | Domaine 3    | Domaine 4     | Domaine 5     |
| l1                       | 8            | 10           | 11           | 12.5          | 13            |
| l2                       | 20           | 21           | 22           | 25            | 30            |
| Nbre d'éléments          | <b>49856</b> | <b>70260</b> | <b>97842</b> | <b>125624</b> | <b>143422</b> |

Tableau 4-2 Valeurs fixes pour le domaine de calcul

| Description   | Symbole         | valeur   |
|---|-----------------|----------|
| taille du premier élément en amont de profil                        | $a_1$           | $0.02*c$ |
| taille des éléments le long du profil (entre I et G) (entre J et G) | $a_2$           | $0.02*c$ |
| taille du premier élément proche de G et C entre (AG BC EG DC)      | $a_3$           | $0.02*c$ |
| taille du premier élément proche A, G et E entre (AB GC DE)         | $a_4$           | $0.02*c$ |
| nombre d'éléments le long du profil (entre I et G)                  | $N_{11}$        | 40       |
| nombre d'éléments le long du profil (entre J et G)                  | $N_{1j}$        | 40       |
| nombre d'éléments le long du profil (entre H et I)                  | $N_{21}$        | 35       |
| nombre d'éléments le long du profil (entre H et J)                  | $N_{2j}$        | 35       |
| nombre d'éléments le long du profil (extrados)                      | $N_{11}+N_{21}$ | 75       |
| nombre d'éléments le long du profil (intrados)                      | $N_{1j}+N_{2j}$ | 75       |
| facteur de grossissement en amont du profil                         | $f_1$           | 1.15     |
| facteur de grossissement dans le sillage du profil                  | $f_2$ et $f_3$  | 1.15     |

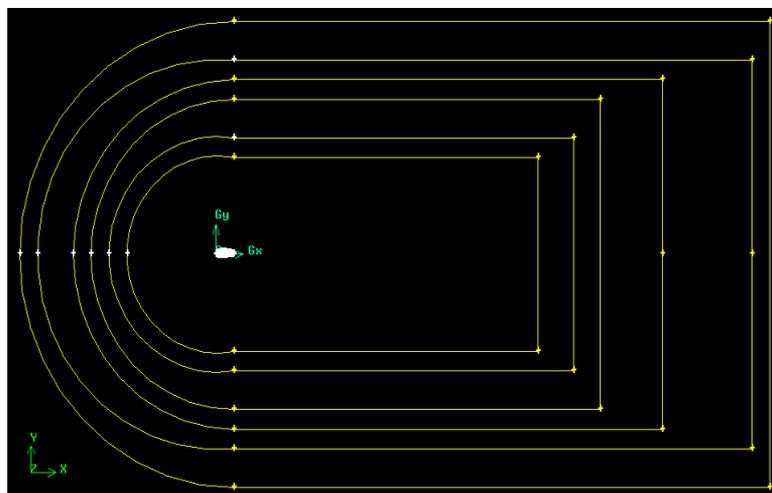


Figure 4-1 : Les différents domaines de calcul

#### 4.1.2 Résultats de l'étude sur le domaine de calcul

La comparaison des valeurs expérimentales avec celles trouvées à l'aide de nos simulations numériques est présentée sur la **Figure 4-2**.

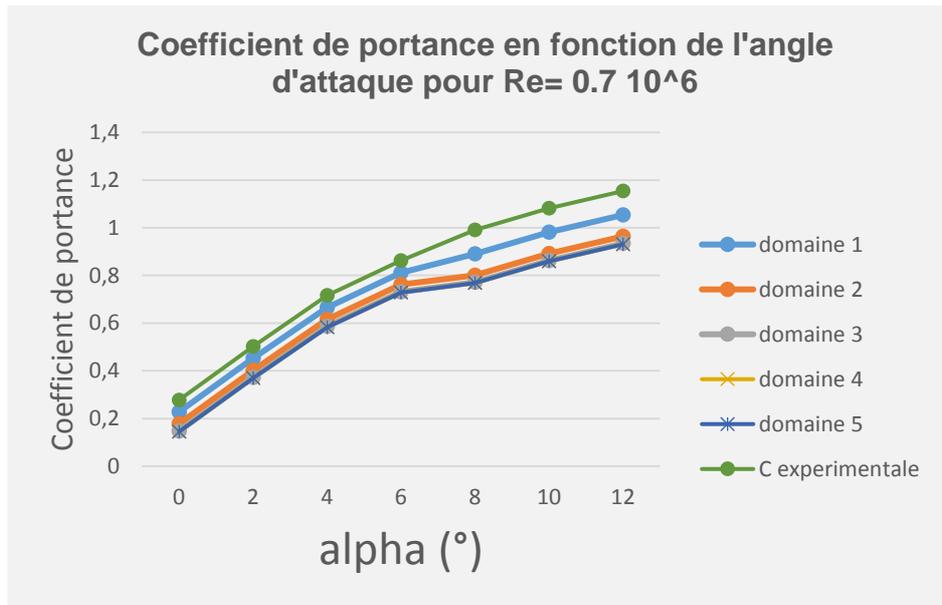


Figure 4-2 : Coefficient de portance pour différents domaines

Cette figure montre qu'il semble difficile de comparer réellement les valeurs des différents domaines entre eux en même temps qu'avec les valeurs expérimentales car les simulations donnent des résultats trop proches entre eux. On a donc préféré présenter les résultats des simulations entre eux en fonction des différents domaines et donc les **Figures 4-3** et **4-4** donnent respectivement les coefficients de trainée, et de portance en fonction des différents domaines pour des angles d'attaque différents.

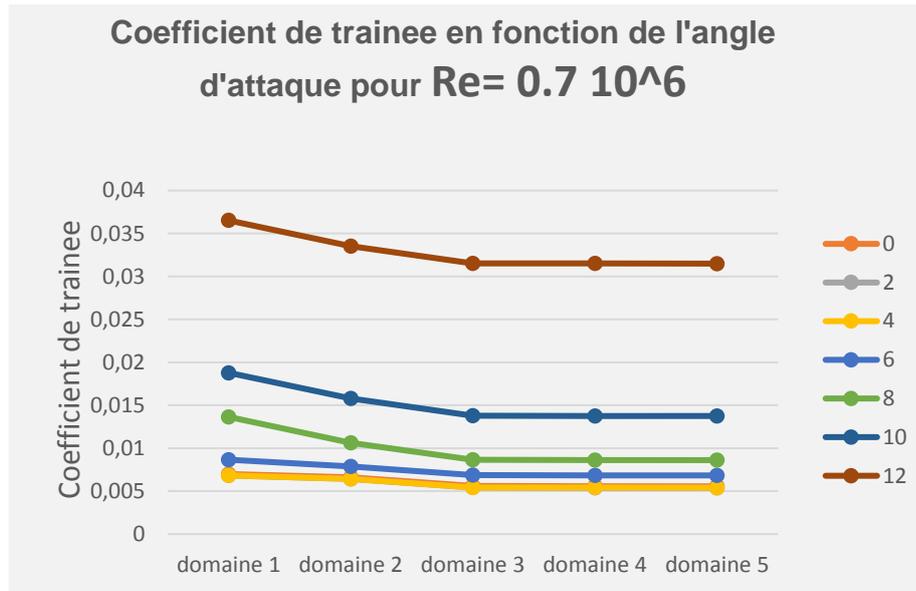


Figure 4-3 : Coefficient de trainée en fonction des différents domaines

Les évolutions du coefficient de trainée en fonction des longueurs  $I_1$  et  $I_2$  sont assez similaires suivant les angles d'attaques. On note que le coefficient de trainée décroît à mesure que les longueurs  $I_1$  et  $I_2$  augmentent, mais qu'il tend à se stabiliser. Cette stabilisation est plus rapide pour des angles d'incidence faibles et semble se faire de plus en plus tard (pour les longueurs  $I_1$  et  $I_2$  de plus en plus grands) au fur et à mesure que l'angle d'attaque augmente.

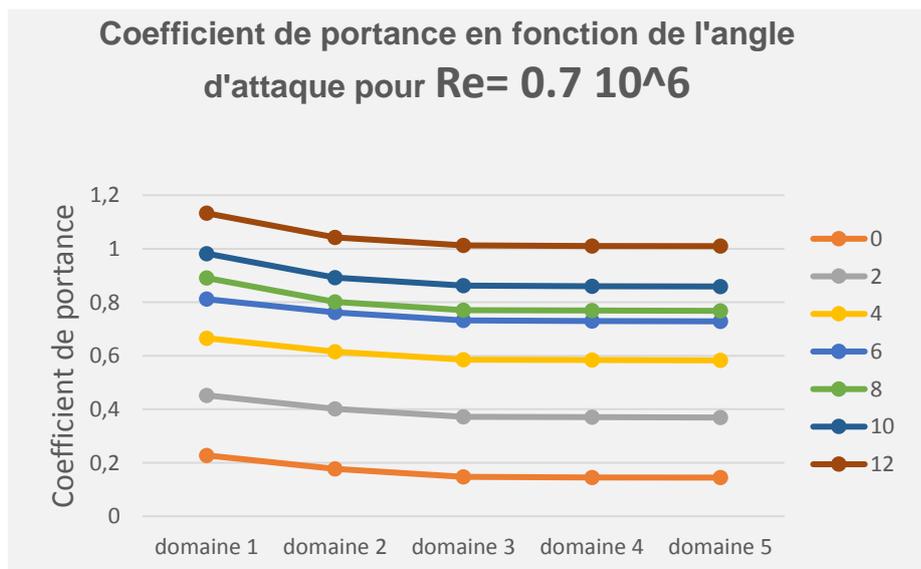


Figure 4-4 : Coefficient de portance en fonction des différents domaines

Les évolutions du coefficient de portance en fonction de la longueur  $I_1$  et  $I_2$  sont assez similaires pour les différents angles d'attaques, On note que le coefficient de portance décroît de manière plus ou moins importante (en fonction des angles d'attaque), et comme précédemment tend à se stabiliser. Cette stabilisation est plus rapide pour des angles d'incidence faible. Comme précédemment la stabilisation semble se faire de plus en plus tard à mesure que l'angle d'attaque augmente.

#### 4.1.3 Analyse

L'évolution des valeurs des coefficients vers une stabilisation met en avant un phénomène physique important : plus les frontières sont éloignées du profil, plus cela laisse la place aux turbulences du sillage de s'estomper avant d'atteindre la condition limite imposée aux frontières. On note notamment que plus l'incidence est grande plus il faut des longueurs  $I_1$  et  $I_2$  importantes pour atteindre la stabilisation. Cela confirme que plus l'incidence est importante plus il y a de turbulence et donc plus il faut un grand domaine afin de permettre à la turbulence de s'estomper.

On constate donc que suivant les angles d'incidence que l'on va étudier il sera judicieux ou non d'utiliser un domaine de maillage plus petit permettant moins de calculs ou permettant une plus grande finesse de maillage pour une même durée de temps de calculs. Ainsi dans ce cas les résultats nous permettent de conclure que pour Le domaine 1 et 2, les frontières sont proches et ne permettent pas de bien modéliser le flux. Le domaine 5 semble être le plus indiqué, mais le nombre d'éléments pour ce maillage est important comparé aux deux autres maillages (le domaine 5 comporte 143422 éléments alors que le domaine 3 n'en comporte que 97842, c'est-à-dire environ 1/3 de moins). Un domaine de calcul aux dimensions du domaine 3 est suffisant et donnerait des résultats voisins de ceux donnés par les domaines 4 et 5 pour un temps de calculs bien inférieur. Il est à noter que pour un maillage plus fin le nombre d'éléments croît encore davantage ce qui pourrait demander trop de temps de calculs.

#### Domaine de calcul choisi

Les résultats donnés par le domaine 3 sont suffisamment proches des valeurs expérimentales. De même, les résultats donnés par les domaines 4 et 5 ne diffèrent pas beaucoup comparés à ceux de domaine 3. On admet alors que le domaine 3 est le domaine optimal (voir coordonnées dans l'annexe C, Tableau **D-4** et **Figure D -1**).

## 4.2 Etude de l'indépendance du maillage sur les résultats

Plusieurs paramètres peuvent influencer la qualité de maillage. Dans cette étude, nous avons choisi d'effectuer des essais sur le maillage en aval au profil en modifiant les facteurs de grossissement  $f_1$  et  $f_2$ . Puis on a fait des essais sur le nombre des éléments le long du profil. Concernant la partie en amont du profil, le maillage est modifié en même temps que celui du profil, le nombre d'éléments sur le demi disque étant égal au nombre d'éléments sur le profil.

### 4.2.1 Facteurs de grossissement $f_1$ et $f_2$

Ainsi nous avons réalisé trois maillages différents où ont été gardées constantes les valeurs définissant le maillage sur le profil :  $a_1$ ,  $f_1$  et le nombre d'éléments sur le profil. Ces valeurs sont résumées dans le **Tableau 4-3**. Les valeurs choisies pour les maillages des différents essais sont résumées dans le **Tableau 4-4**.

Nous avons ajouté à ces différents essais les résultats obtenus pour le domaine 3 celle de l'étape précédente.

**Tableau 4-3 : Valeurs fixes pour l'étude de la partie avale**

| Dénomination    | Valeur |
|-----------------|--------|
| $a_1$ (m)       | 0.02   |
| $a_2$ (m)       | 0.02   |
| $a_3$ (m)       | 0.02   |
| $f_1$           | 1.15   |
| $N_{1i}+N_{2i}$ | 75     |
| $N_{1j}+N_{2j}$ | 75     |

**Tableau 4-4 : Valeurs variables pour l'étude du partie avale**

| Denomination | Valeurs |         |         |
|--------------|---------|---------|---------|
|              | essai 1 | essai 2 | essai 3 |
| $f_2$        | 1.1     | 1.05    | 1.02    |
| $f_3$        | 1.1     | 1.05    | 1.02    |

Résultats pour différentes valeurs du facteur f (en aval du profil).

Les Figures 4-5 et 4-6 présentent les résultats obtenus, c'est-à-dire respectivement le coefficient de trainée et de portance en fonction de l'angle d'attaque pour les différents essais.

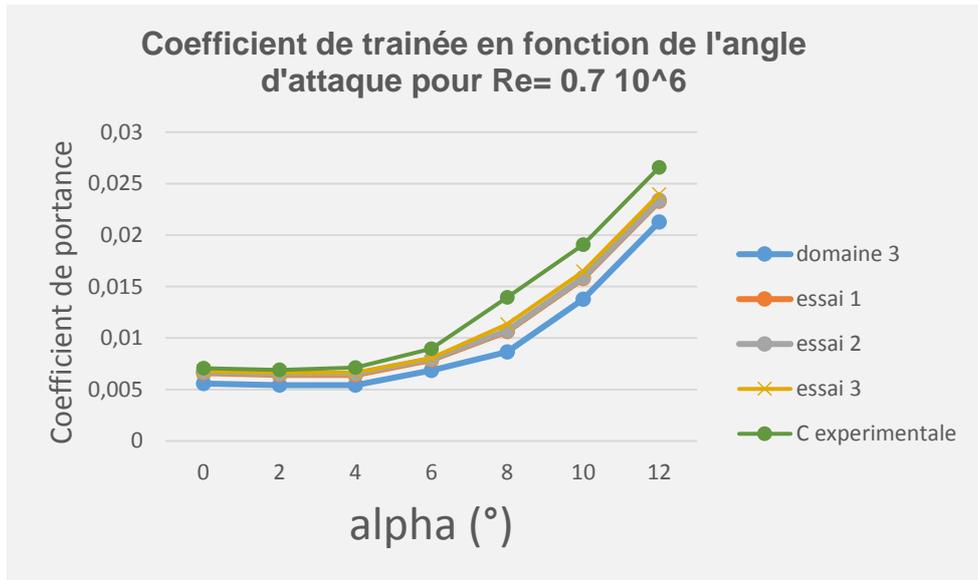


Figure 4-5 : Coefficient de trainée en fonction des facteurs de grossissements

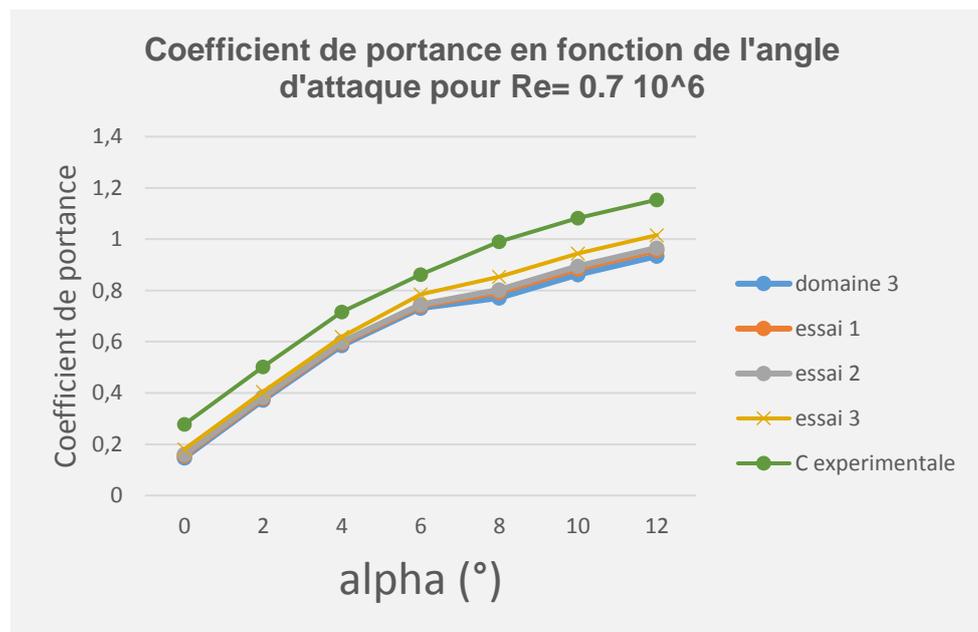


Figure 4-6 : Coefficient de portance en fonction des facteurs de grossissements

Les évolutions du coefficient de trainée et de portance en fonction du facteur  $f_1$  et  $f_2$  sont assez similaires suivant les angles d'attaques. On note que le coefficient de trainée croit à mesure que les facteurs  $f_1$  et  $f_2$  diminuent, mais qu'il tend à se stabiliser. Cette stabilisation est la même pour tous les angles d'incidence. On remarque que les résultats obtenus avec le facteur de essai 4 est le plus proches aux résultats expérimentaux. Ce que nous amène à choisir les valeurs suivantes pour les facteurs de grossissement  $f_1$  et  $f_2 = 1.02$ , i.e. ceux de l'essai 3.

#### 4.2.2 Variation du nombre de points à la surface du profil

Nous avons essayé dans cette partie de voir l'influence du nombre d'éléments sur le profil qui en **variant** fait varier la taille des mailles à la surface du profil ainsi que le facteur de grossissement  $f_1$ .

Ainsi nous avons réalisé trois maillages différents où ont été gardées constantes la valeur définissant les extrémités du domaine d'étude (partie aval). On note que ces valeurs fixes sont celles de l'essai 3 qui a été choisi précédemment. Les valeurs appliquées sont résumées dans les **Tableaux 4-5 et 4.6**.

Nous avons ajouté à ces différents essais les résultats obtenus dans l'étude de l'influence du facteur  $f_3$  de l'étape précédente.

**Tableau 4-5 : Valeurs fixes pour l'étude de maillage sur le profil**

| Dénomination   | Valeur |
|----------------|--------|
| $a_2$ (m)      | 0.02   |
| $a_3$ (m)      | 0.02   |
| $a_4$ (m)      | 0.02   |
| $f_2$ et $f_3$ | 1.02   |

**Tableau 4-6 : Valeurs variables pour l'étude de maillage sur le profil**

| Dénomination    | Valeurs |         |         |
|-----------------|---------|---------|---------|
|                 | essai 1 | essai 2 | essai 3 |
| $f_1$           | 1.1     | 1.05    | 1.02    |
| $N_{1i}+N_{2i}$ | 100     | 130     | 150     |
| $N_{1j}+N_{2j}$ | 100     | 130     | 150     |

Résultats relatifs à l'influence du maillage de la surface du profil.

Les Figures 4-7 et 4-8 présentent les résultats obtenus, c'est-à-dire respectivement le coefficient de portance et de trainée en fonction de l'angle d'attaque pour les différents essais.

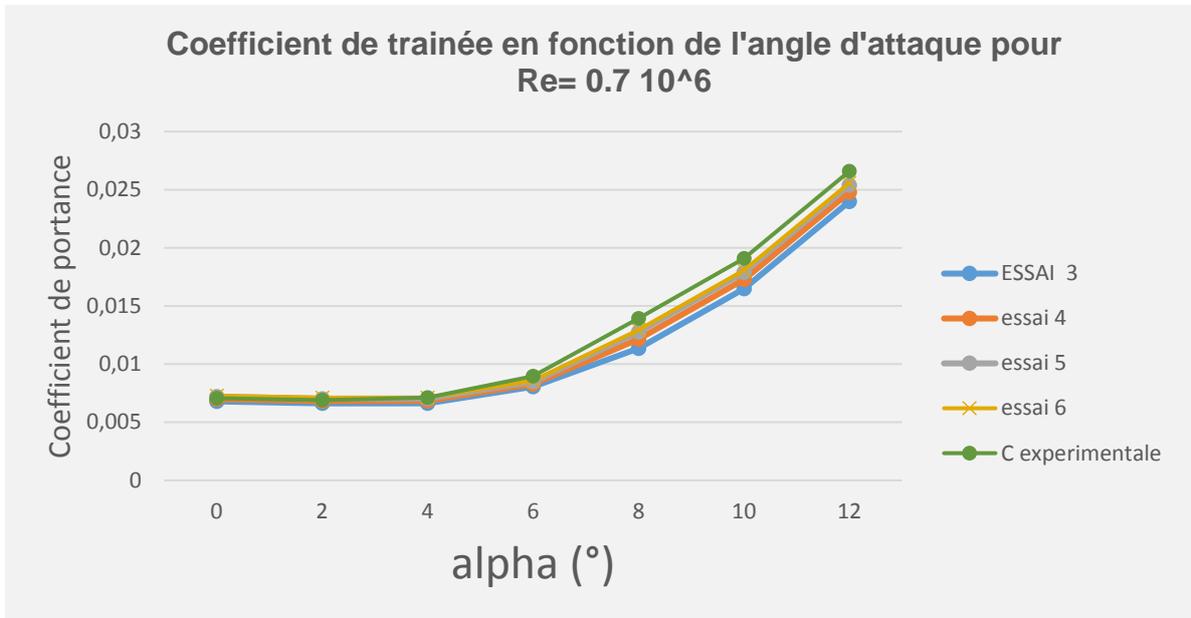


Figure 4-7 : Coefficient de trainée en fonction du nombre d'éléments le long du profil

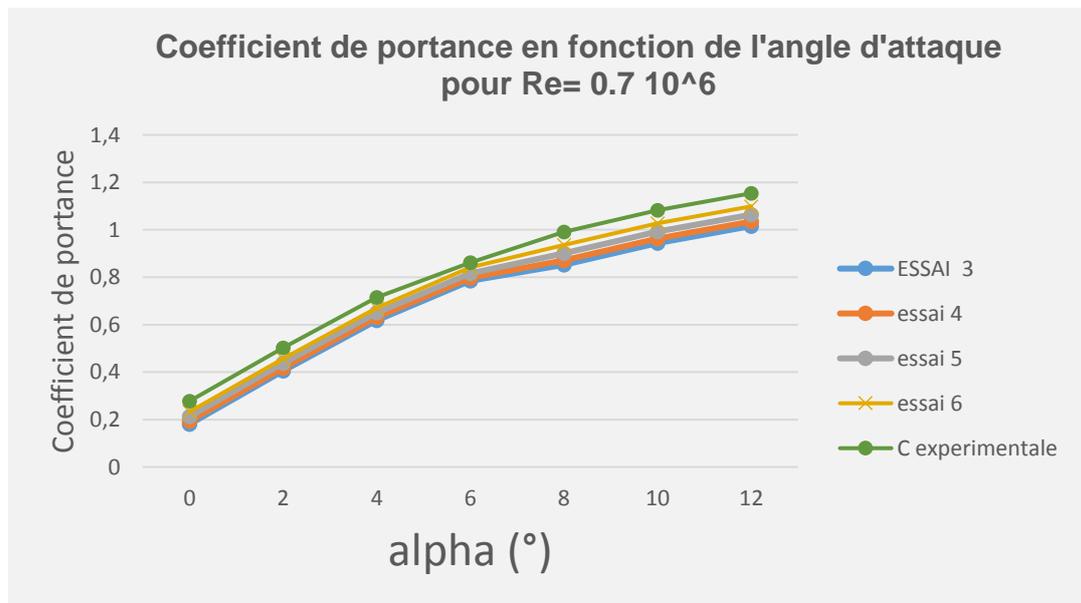


Figure 4-8 : Coefficient de portance en fonction du nombre d'éléments le long du profil

Les figures montrent que pour le coefficient de trainée, et pour des angles inférieure à 8°, les différences entre les résultats prédits par les essais, 5 et 6 semblent être très proches aux valeurs expérimentales. Mais pour des angles supérieurs à 8°, les résultats deviennent en dessous des valeurs expérimentales.

Pour le coefficient de portance, c'est le même cas que le coefficient de trainée les résultats de l'essai 4 semblent être en dessous des valeurs expérimentales pour des angles d'attaque supérieurs à 8° alors que ceux des essais 6 semblent bien plus proches pour tous les angles d'attaque.

### 4.2.3 Conclusion

Cette étude a permis de constater l'importance de la finesse du maillage le long du profil. En effet, un maillage trop grossier ne permet pas de mettre en évidence les phénomènes complexes de la turbulence (comme dans l'essai 1). Cependant on remarque qu'une trop grande finesse mène à des maillages très encombrés mais qui n'apportent pas forcément de grandes différences de résultats comme dans l'essai 5 et l'essai 6, notamment si les angles d'attaque sont faibles comme notre cas. Dans cette étude on retiendra que le maillage de l'essai 6 est le plus adapté. En effet, nous constatons que les résultats des calculs obtenus avec le maillage de l'essai 6 sont en bonne concordance avec les données expérimentales. Ce maillage est donc retenu pour la suite des calculs.

### 4.3 Profil S822

Les calculs ont été poursuivis jusqu'à ce que la solution atteigne une valeur stable. L'évolution des résidus nous montre que le maillage utilisé nous a permis d'assurer la stabilité de la solution (voir figures 4.9 et 4.10).

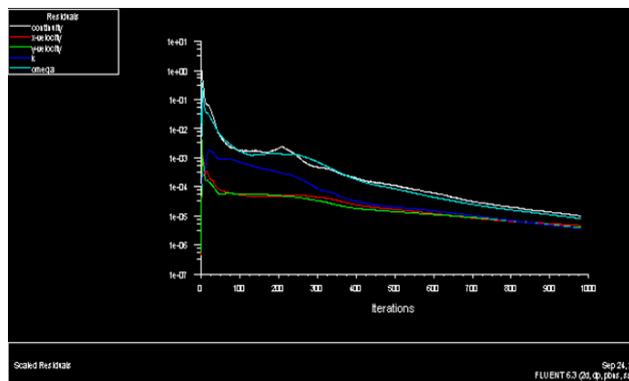


Figure 4.9 Evolution des résidus pendant le calcul  $\alpha=0$

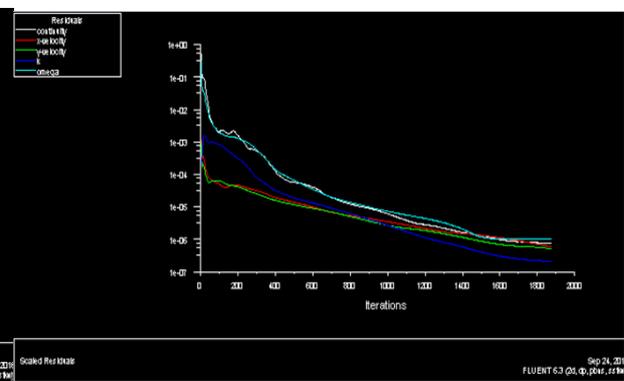


Figure 4.10 Evolution des résidus pendant le calcul  $\alpha=12^\circ$

4.3.1 Coefficients CL et CD

Nous avons calculé les coefficients de portance et de traînée du profil S822. Les résultats sont présentés dans les figures 4.11 et 4.12 illustrant respectivement, le coefficient de portance et de traînée en fonction de l'angle d'incidence de l'écoulement  $\alpha$  qui varie de 0 à 12°. Ces figures montrent que les résultats obtenus sont assez proches des résultats expérimentaux et ce, pour les deux coefficients de portance et de traînée.

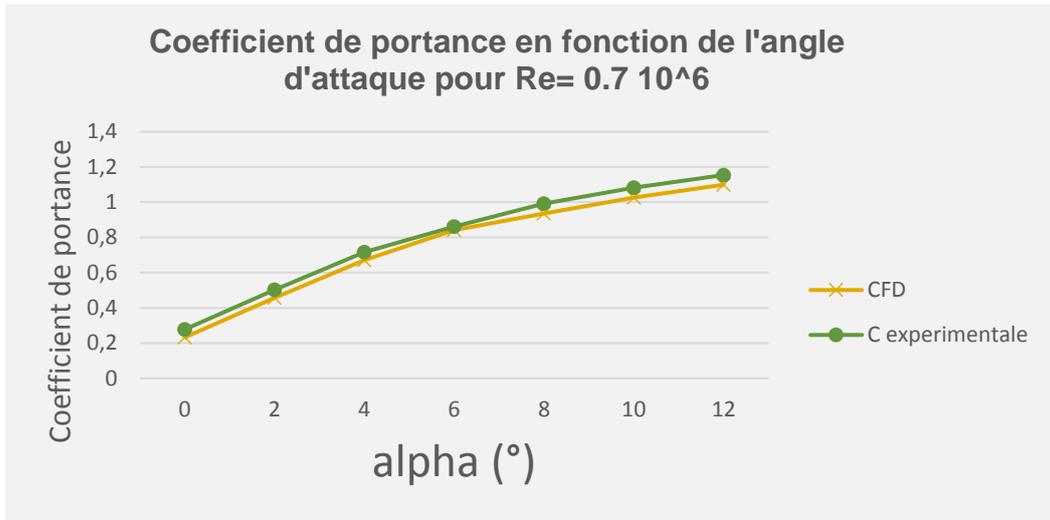


Figure 4.11 Distribution du coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque  $\alpha$

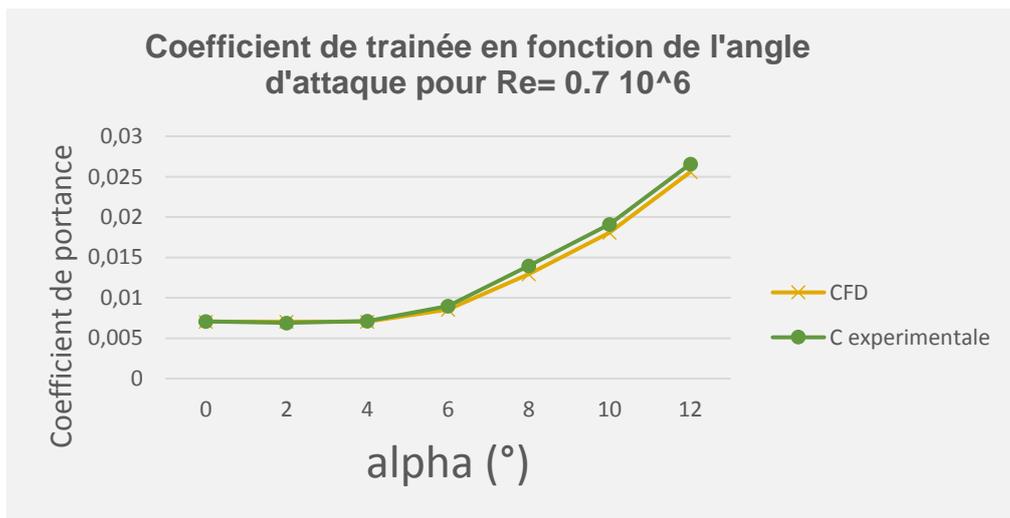
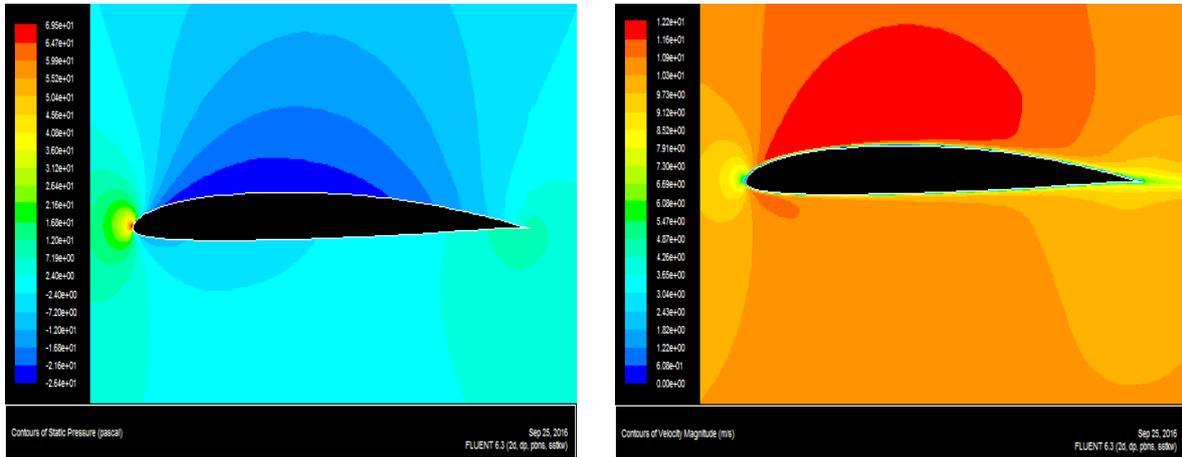


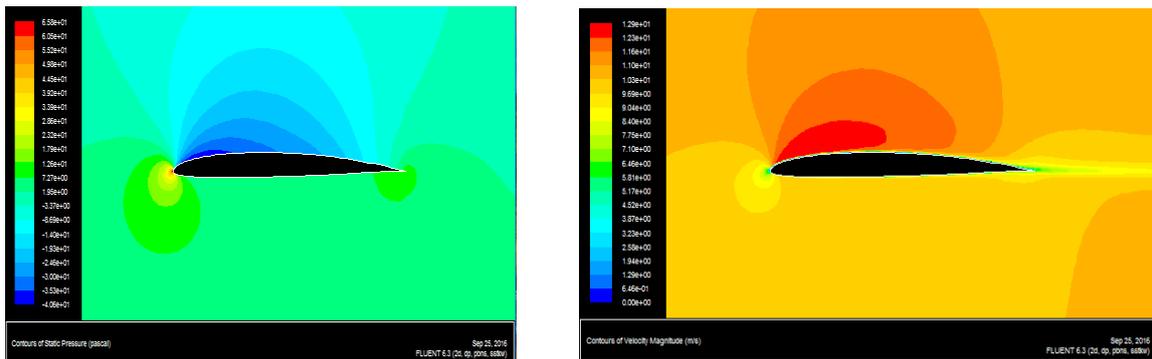
Figure 4.12 Distribution du coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque  $\alpha$

4.3.2. Contours des pressions et vitesses

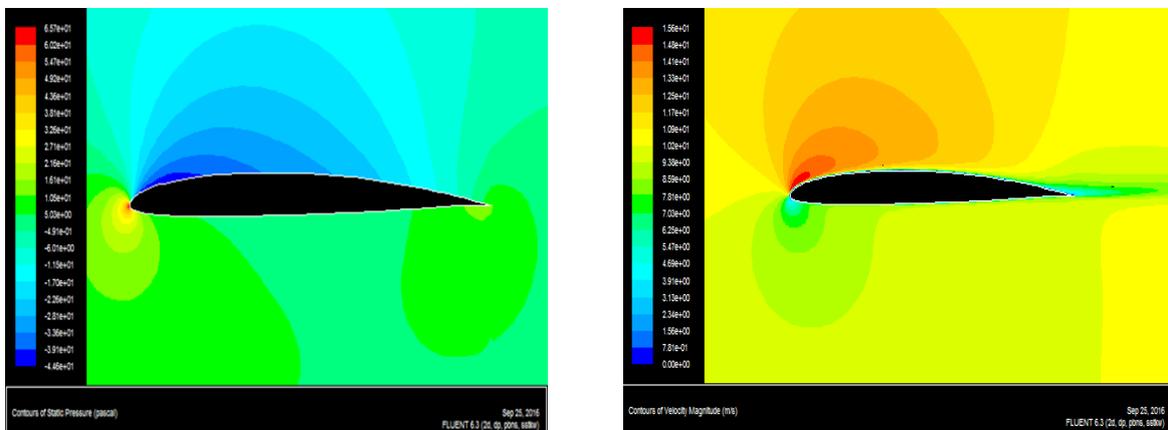
Les contours de pression et vitesses autour du profil sont présentés dans les figures 4.13 (a) à 4.13 (g). On peut voir que l'écoulement reste attaché à la surface du profil lorsque l'angle d'attaque est faible (jusqu'à 8°) et que le décollement devient visible lorsque l'angle d'attaque atteint 12°.



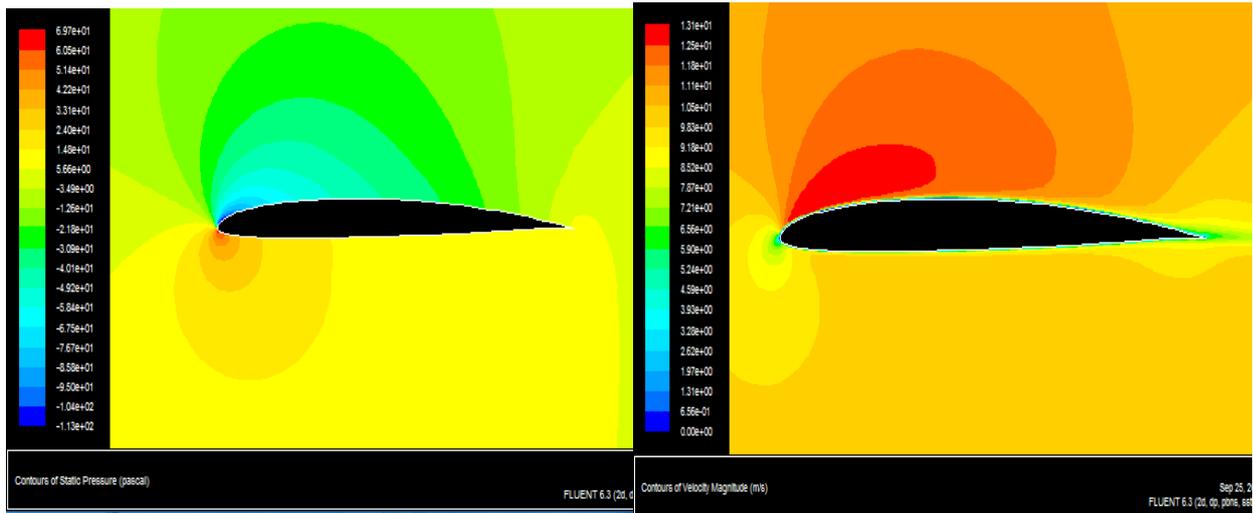
(a) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 0^\circ$



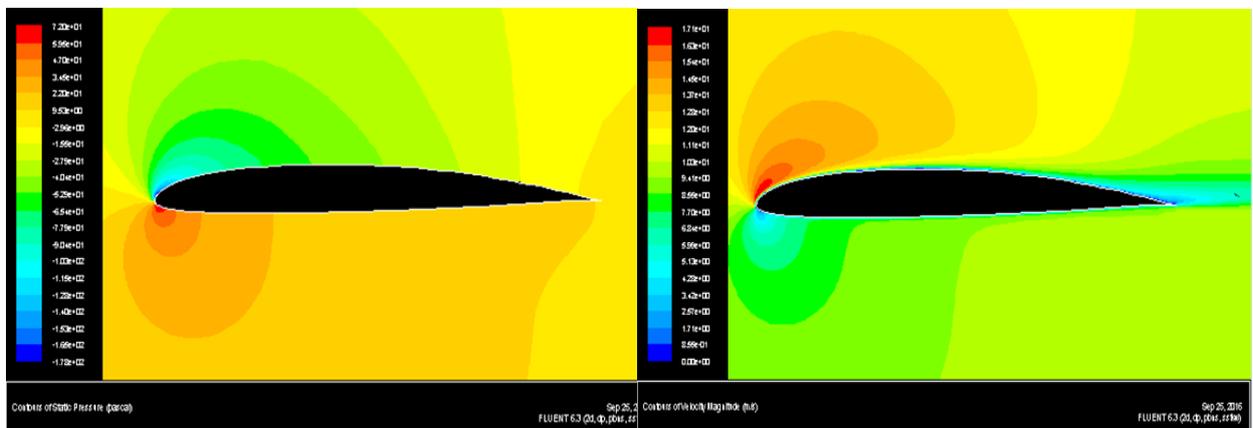
(b) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 2^\circ$



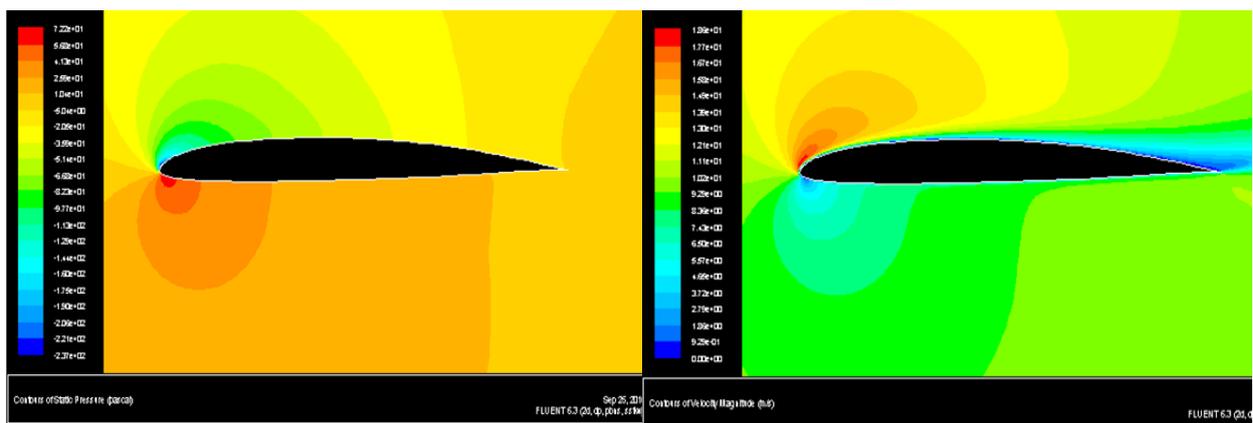
(c) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 4^\circ$



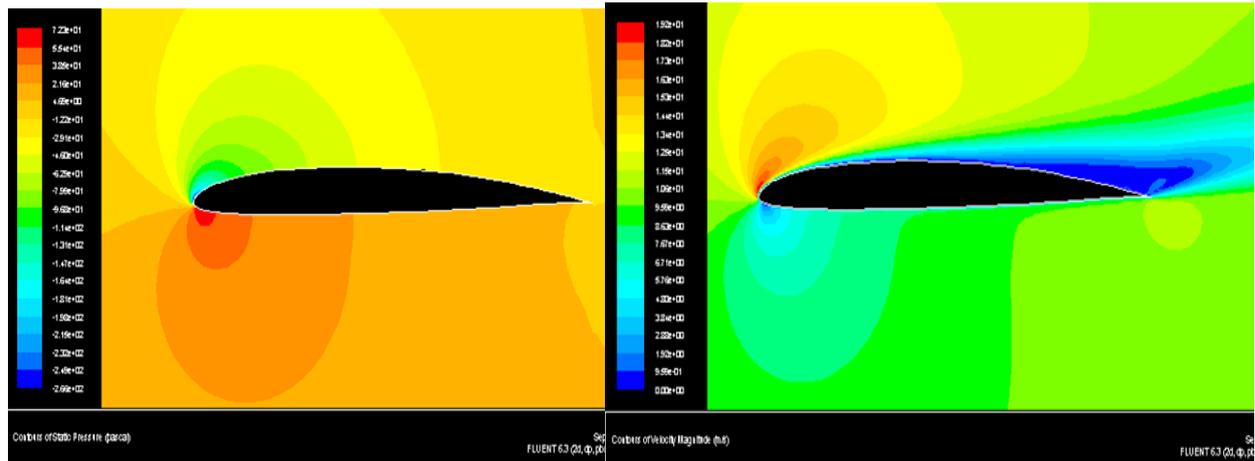
(d) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 6^\circ$



(e) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 8^\circ$



(f) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 10^\circ$



(g) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 12^\circ$

Figure 4.13. Contours des vitesses et des pressions statiques autour du profil S822 placé sous différents valeurs de l'angle d'attaque

#### 4.4 Résultats des calculs relatifs au profil S834

Le maillage utilisé nous a permis d'assurer la convergence des calculs comme le montre la figure 4.1 qui représente l'évolution des résidus avec le nombre d'itération qui est plus important pour les grandes incidences s'explique par l'effet de turbulence et les lâchers tourbillonnaires propre à ces incidences . Il est à noter que la condition de convergence a été fixée à  $\epsilon = 10^{-6}$  pour tous les résidus.

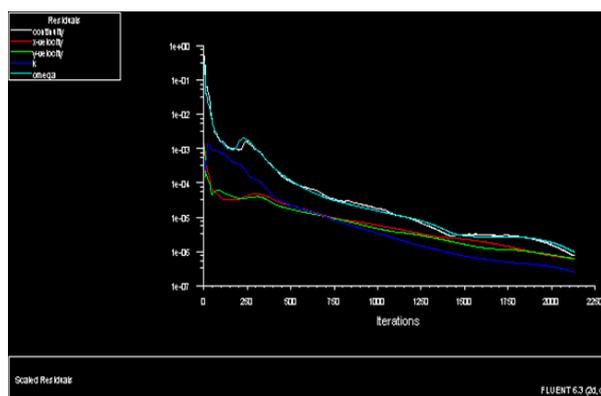


Figure 4.14 Evolution des résidus pendant le calcul  $\alpha=0^\circ$

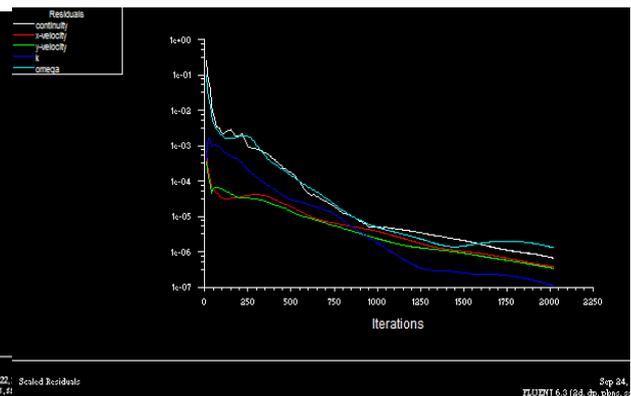


Figure 4.15 Evolution des résidus pendant le calcul  $\alpha=12^\circ$

On constate que pour les faibles incidences, la solution évolue rapidement vers une solution stable. Alors que pour les angles plus élevées, nous avons besoin de faire un plus grand nombre d'itérations.

#### 4.4.1 Coefficients de portance et de traînée

Nous avons calculé les coefficients de portance et de traînée du profil S834. Les résultats de calcul sont présentés dans les figures 4.16 et 4.17 illustrant respectivement, le coefficient de portance et celui de traînée en fonction de l'angle d'incidence de l'écoulement initial  $\alpha$  qui varie de 0 à 12°. Ces figures montrent que les résultats obtenus sont assez proches des résultats expérimentaux. Pour les deux coefficients, de portance et de traînée.

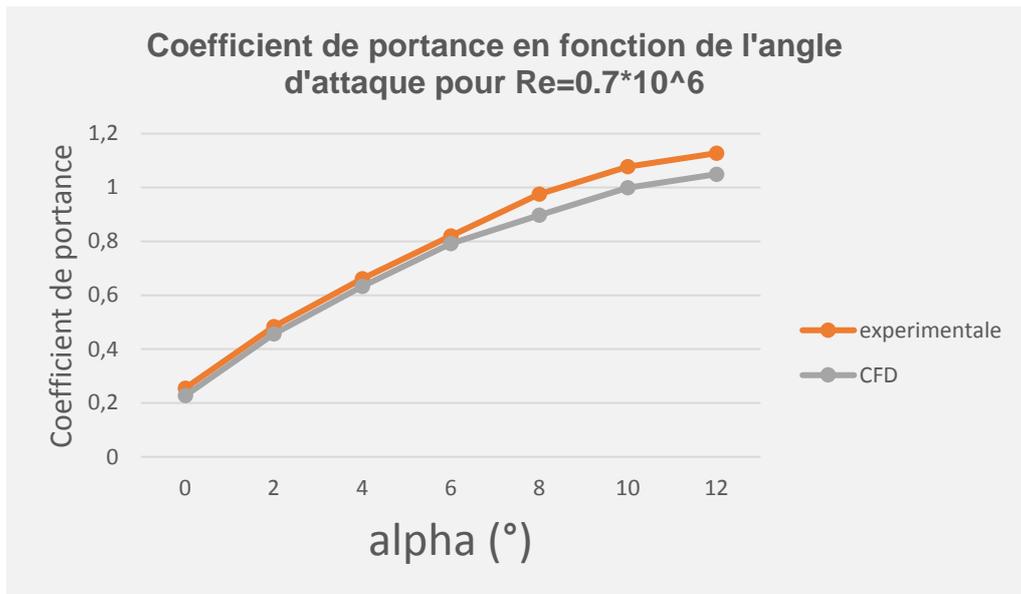


Figure 4.16 Distribution du coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque  $\alpha$

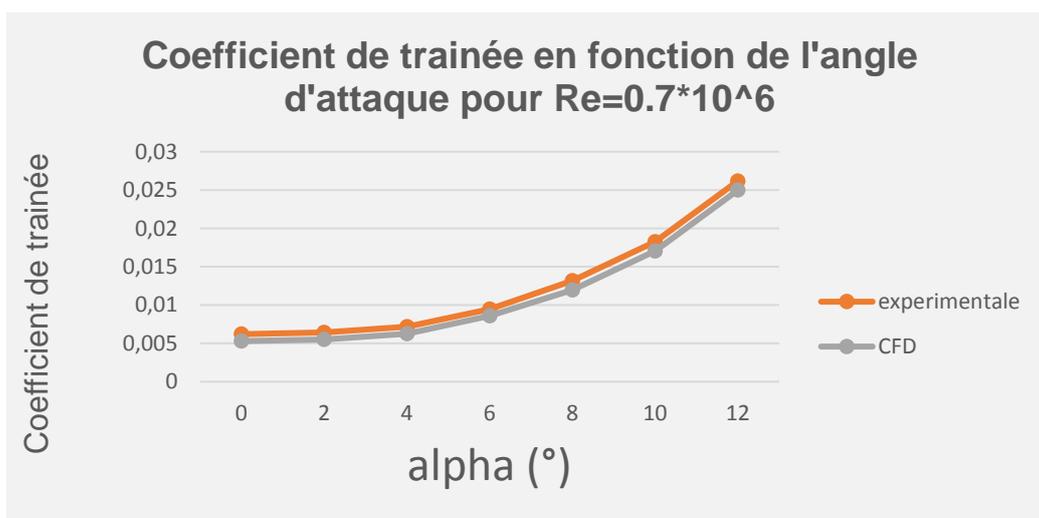


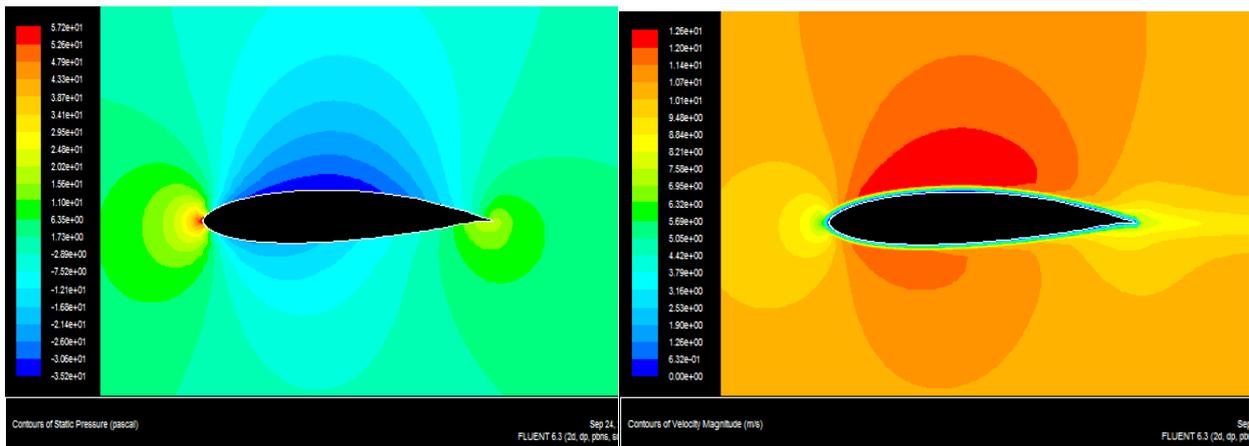
Figure 4.17 Distribution du coefficient de traînée en fonction de l'angle d'attaque  $\alpha$

Pour le coefficient de portance on constate que la courbe est une droite ascendante jusqu'au  $\alpha=10^\circ$ , puis subit une inflexion au-delà de cette valeur. Ce point d'inflexion se traduit par un début de décrochage de l'écoulement au niveau de l'extrados au bord de fuite du profil.

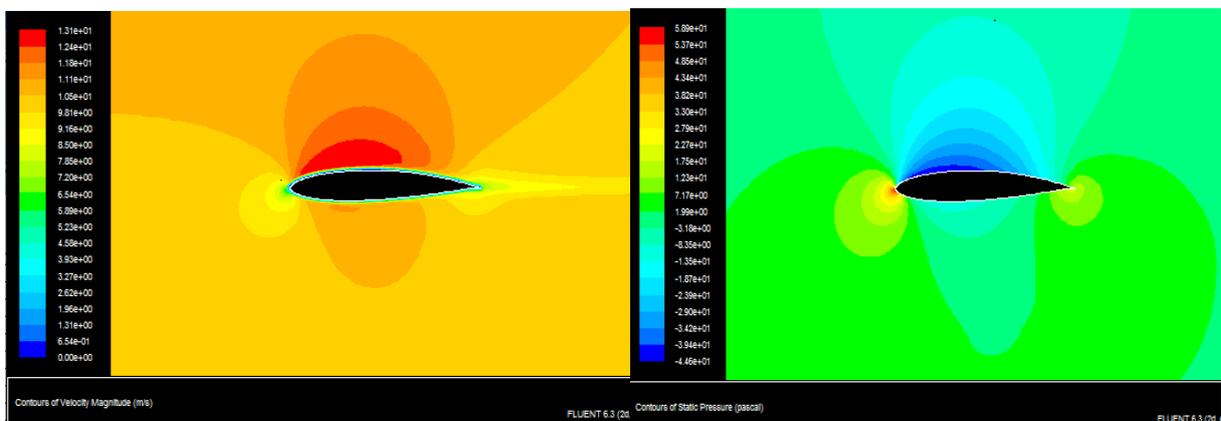
La figure 4.17 montre que le coefficient de traînée augmente avec l'angle d'incidence. Ce résultat ne permet pas de se prononcer sur le phénomène de décrochage. Mais il reste à dire qu'ils sont très proches des résultats expérimentaux

#### 4.4.2 Contours des pressions et vitesses

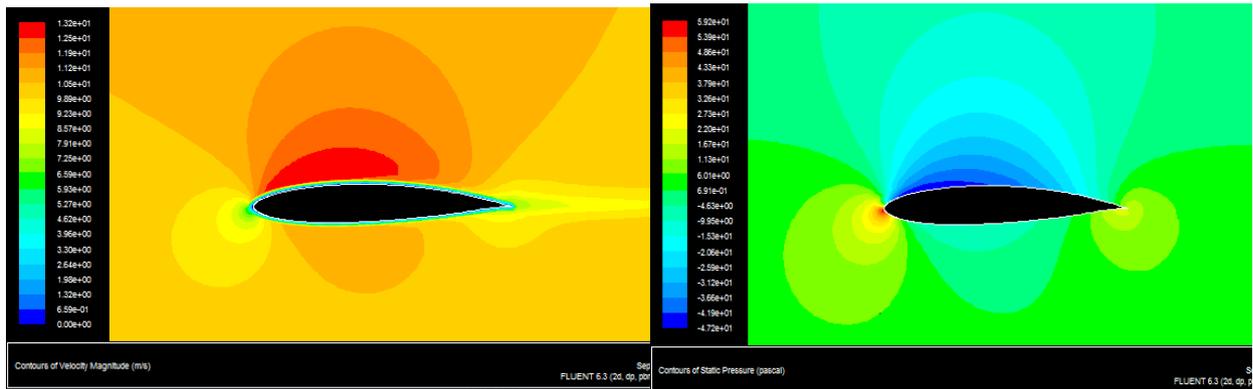
Les contours de pression et vitesses autour du profil S834 sont présentés dans les figures 4.18(a) à 4.18 (g). On peut voir que l'écoulement reste attaché à la surface du profil lorsque l'angle d'attaque est faible (jusqu'à  $8^\circ$ ) et que le décollement devient visible lorsque l'angle d'attaque atteint  $12^\circ$ .



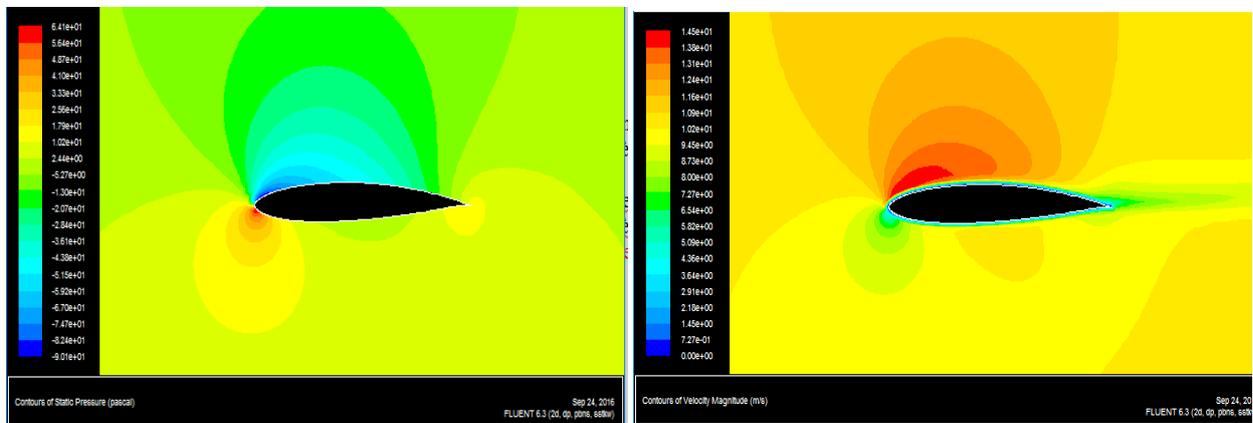
(a) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 0^\circ$



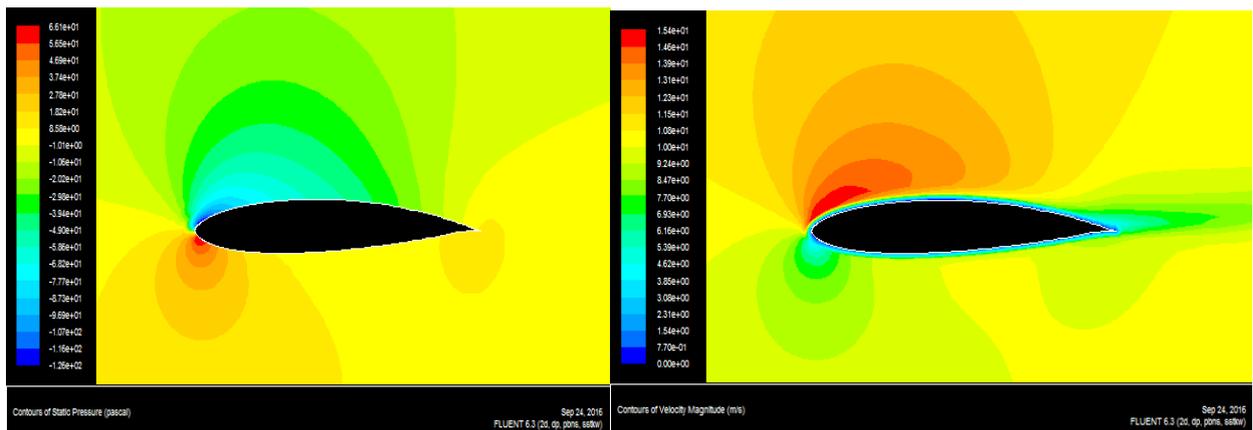
(b) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 2^\circ$



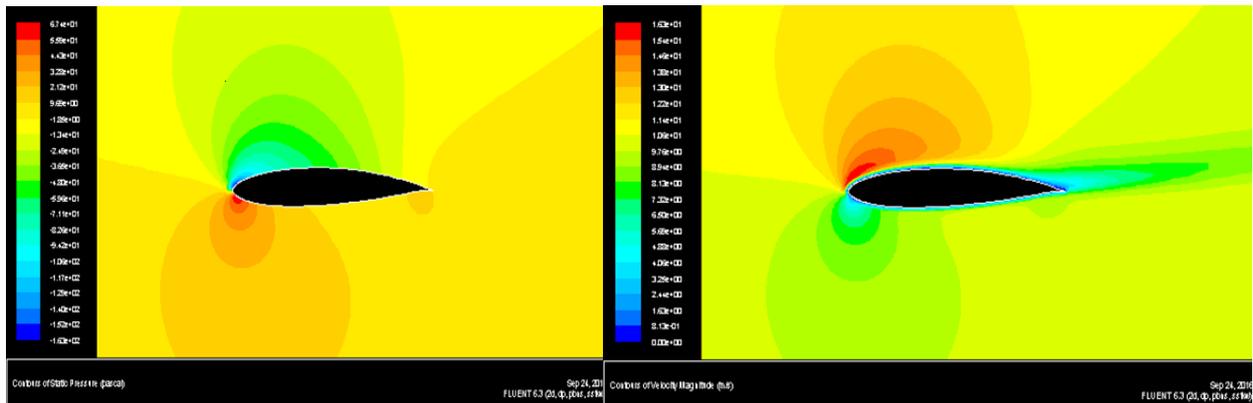
(c) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 4^\circ$



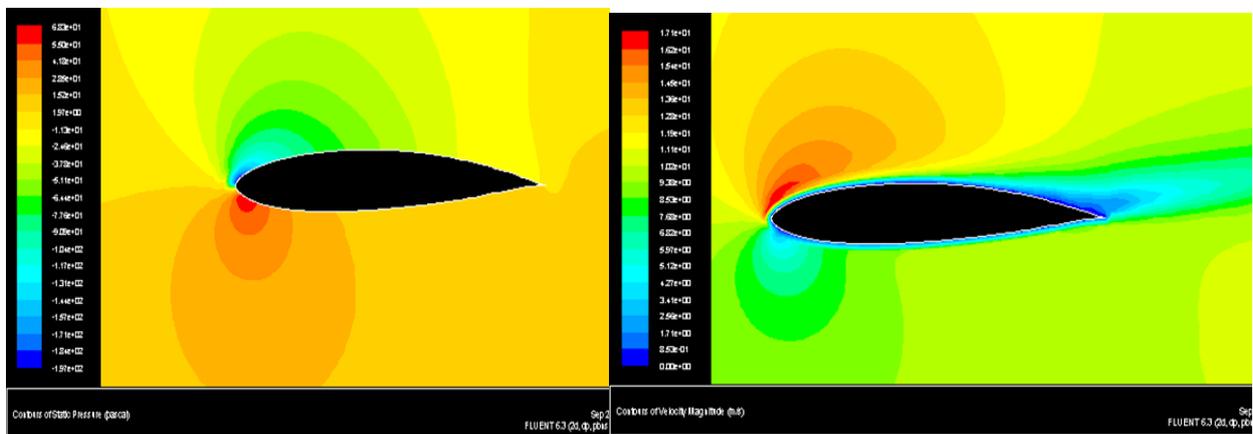
(d) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 6^\circ$



(e) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 8^\circ$



(f) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 10^\circ$



(g) Contour de vitesse et de pression statique pour  $\alpha = 12^\circ$

Figure 4.18 Contours des vitesses et pressions statiques autour du profil S834

### 4.5 Commentaires

La comparaisant entre les résultats obtenu montre que le profil S822 qui est plus épais que le S834 et plus efficace placé dans la base d'une pale a profil variable contrairement au S 834 qui est plus efficace au bout de la pale

# Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié l'écoulement autour des profils S834 et S822 conçu par NREL pour des petites éoliennes à axe horizontal. La simulation numérique est faite à l'aide du logiciel Fluent, en utilisant un modèle de turbulence. L'étude sur le domaine de calcul et sur le maillage a permis d'assurer la convergence des calculs. Les résultats de simulation sont en bonne concordance avec les données expérimentales disponibles [3]. Pour les deux profils, S834 et S822, les coefficients de portance et de traînée ainsi que les contours des vitesses ont permis d'identifier un angle d'attaque optimal  $\alpha=10^\circ$  pour des conditions de fonctionnement correspondant à  $Re=0.710^6$ . A cette valeur de  $\alpha$  on observe un début de décollement qui est plus important pour le profil S822 que pour le profil S834.

La présente étude a été faite en 2D pour des angles d'incidence faibles. Les calculs 2D ne permettent pas d'étudier des phénomènes qui peuvent apparaître pour des angles d'incidence plus importants notamment le décollement de la couche limite et le décrochage aérodynamique de l'écoulement. Parmi les perspectives futures il est envisagé de poursuivre ces simulations pour des angles d'incidence à des valeurs supérieures pour étudier et évaluer d'autres phénomènes et aussi d'étudier l'influence des autres paramètres sur le comportement aérodynamique sur ce type de profil notamment les paramètres de la couche limite

# Références bibliographiques

---

## Références Bibliographiques

- [1] UQAT PHOTOPRESSE, *Éolienne par Annie Boudreau*,
- [2] Philippe LECONTE : « Techniques de l'ingénieur, traité Génie mécanique : éolienne »  
N° de la fiche doc : BM4640. 2000
- [3] D. Le Gouriere, "Energie Eolienne" Edition Eyrolles, Paris (1982).
- [4] DITUBA NGOMA, Guyh, (2009), Les turbines éoliennes, note de cours *Théorie et conception des turbomachines*
- [5] HAU, Erich (2005), Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2e édition, Springer, 783 p.
- [6] W.PENG, William (2008), Fundamentals of turbomachinery, 1er édition ,Wiley, 369 p
- [7] LAVERDURE, Nicolas, (2005), Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires, thèse de doctorat, 280 p
- [8] M.Q.Islam "A theoretical investigation of the design of horizontal- axis wind turbines",  
Thèse de Doctorat, Université de Brussel (1986)
- [9] John Wiley & Sons, "Wind Energy Explained - Theory, Design and Application." Baffins Lane, Chichester, 2002
- [10] D.C.wilcox. turbulence modeling for CFD.DCW industries, 1998
- [11] J.Tu, H. Yeoh and C. Liu. Computational fluid dynamics A practical Approach. Elsevier, 2008
- [12] J.Blazek. Computational fluid dynamics Principles and applications. En-gineering and technology Elsevier science Ltd, 2001
- [13] F.R. Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application. AIAA journal 32: 1598 -1605, 1994
- [14] O.Guerri, K.Bouhadef, and A.harhad. Turbulent flow simulation of the nrel S809 airfoil. WIND ENGINEERING, 30:278-302, 2006
- [15] P. Catalano and M.Amato.An evaluation of rans turbulence modelling for aerodynamic applications .aerospace science and technology, 7:493-509, 2003
- [16] L.D.Karl. Recent experience with different turbulence models applied to the calculation of flow over aircraft components, PEOGRESS IN AEROSPACE SCIENCE. 34:481-541, 1998

# Références bibliographiques

---

- [17] E.G. Tulpurkara. Turbulence models for computation of flow past airplanes progress in Aerospace sciences. 33:71-165, 1997
- [18] M. Jourieh. Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien. PhD thesis, école nationale supérieure d'arts ET métiers (Paris), 2007
- [19] Bhaskaran, *Tutorial Fluent*.
- [20] Nathan Logsdon. *A procedure for numerically analyzing airfoils and wing sections*. Thesis, University of Missouri, Columbia, December 2006.
- [21] D.M. Somers ET M.D. Maughmer *Airfoils, Inc. Port Matilda, Pennsylvania* Theoretical Aerodynamic Analyses of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines Period of Performance: July 11, 2002–October 31, 2002
- [22] Michael S. Selig and Bryan D. McGranahan *University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois* Wind Tunnel Aerodynamic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines, Period of Performance: October 31, 2002–January 31, 2003
- [23] Ansys Fluent CFD, Release 13.0, 2011
- [24] M. Chandrala, A. Choubey and B. Gupta, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 Vol. 2, Issue6, pp.1244-1248, 2012
- [25] Y. He and Ramesh K. Agarwal, Shape optimization of NREL S809 airfoil for wind turbine blades using a multiobjective genetic algorithm, International Journal of Aerospace Engineering, Volume 2014, Article ID 864210,
- [26] M. JOURIEH, Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien, Laboratoire de Simulation Numérique en Mécaniques des Fluides, N° : 2007 ENAM 0032, 2007
- [27] H. Locteau, R. Raveaux, S. Adam, Y. Lecourtier, P. Héroux, E. Trupin, Approximation de courbes par Algorithme Génétique Multi-Objectif (MOGA), Laboratoire LITIS, Université de Rouen, CIFED, SDN06, pp.151-156, 2006
- [28] A. A. Memon, H.U. Abbasi, Modeling and Simulation of flow around Wind Turbine Blade by using Actuator Surface Model, Sindh University research Journal, Vol.44 (4), pp. 695-698, 2012
- [29] Ahmed Bekhti et Ouahiba Guerri, Simulation de l'écoulement autour d'un profil de pale d'éolienne, Revue des Energies Renouvelables, SMEE'10, pp. 49-56, 2010.

# Références bibliographiques

---

[30] W. Geissler and L. Ruizcalavera, '*Transition and Turbulence Modelling for Dynamic Stall and Buffet*', Engineering Turbulence Modelling and Experiments Journal, Vol. 4, pp. 679 - 688, 1999.

[31] N. Ren and J. Ou, 'Numerical Simulation of Surface Roughness Effect on Wind Turbine Thick Airfoils', Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009, Asia-Pacific, pp.1 – 4, 2009.

[32] E. Ferrer and X. Munduate, 'CFD Predictions of Transition and Distributed Roughness over a Wind Turbine Airfoil', 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Florida, 2009.

[33] D. Li, R. Li, C. Yang and X. Wang, 'Effects of Surface Roughness on Aerodynamic Performance of a Wind Turbine Airfoil', Power and Energy Engineering Conference, 2010, APPEEC, Asia-Pacific, pp. 1 – 4, 2010.

## Annexe A

## Les profils

## A.1 Le profil S822 [21]

| Le profil S 822 |          |          |           |
|-----------------|----------|----------|-----------|
| extrados        |          | intrados |           |
| X               | Y        | X        | Y         |
| 1.000000        | 0.000000 | 0.000023 | -0.000542 |
| 0.996089        | 0.000642 | 0.000294 | -0.001935 |
| 0.985048        | 0.003157 | 0.000443 | -0.002413 |
| 0.968133        | 0.007602 | 0.001282 | -0.004385 |
| 0.946046        | 0.013324 | 0.005329 | -0.010118 |
| 0.918825        | 0.020084 | 0.015376 | -0.018680 |
| 0.887037        | 0.028045 | 0.030216 | -0.027173 |
| 0.851444        | 0.037037 | 0.049559 | -0.035201 |
| 0.812782        | 0.046731 | 0.073374 | -0.042563 |
| 0.771742        | 0.056677 | 0.101374 | -0.049059 |
| 0.728946        | 0.066315 | 0.133441 | -0.054581 |
| 0.684771        | 0.074819 | 0.169219 | -0.059031 |
| 0.638946        | 0.081988 | 0.208482 | -0.062361 |
| 0.591971        | 0.879230 | 0.250797 | -0.064545 |
| 0.544321        | 0.092477 | 0.295834 | -0.065585 |
| 0.496467        | 0.095295 | 0.343087 | -0.065504 |
| 0.448320        | 0.096342 | 0.392138 | -0.064340 |
| 0.400324        | 0.095949 | 0.442420 | -0.062144 |
| 0.353012        | 0.094259 | 0.493444 | -0.058965 |
| 0.306932        | 0.091363 | 0.544594 | -0.054833 |
| 0.262594        | 0.087322 | 0.595407 | -0.049596 |
| 0.220471        | 0.082211 | 0.645795 | -0.043462 |
| 0.181021        | 0.076101 | 0.695149 | -0.036874 |
| 0.144635        | 0.069084 | 0.742856 | -0.030066 |
| 0.111706        | 0.061261 | 0.788279 | -0.023032 |
| 0.082528        | 0.052754 | 0.831428 | -0.016082 |
| 0.057423        | 0.043713 | 0.871626 | -0.010003 |
| 0.036592        | 0.034302 | 0.907952 | -0.005223 |
| 0.020310        | 0.024706 | 0.939440 | -0.001945 |
| 0.008599        | 0.015142 | 0.965150 | -0.000135 |
| 0.001760        | 0.006074 | 0.984246 | 0.000448  |
| 0.000651        | 0.003396 | 0.996022 | 0.000259  |
| 0.000138        | 0.001358 | 1.000000 | 0.000000  |

## A.2 Le profil S834 [22]

| Le profil S 834 |          |          |           |
|-----------------|----------|----------|-----------|
| extrados        |          | intrados |           |
| X               | Y        | X        | Y         |
| 1.000000        | 0.000000 | 0.000250 | -0.001671 |
| 0.996064        | 0.000606 | 0.000632 | -0.002862 |
| 0.984816        | 0.003101 | 0.000915 | -0.003559 |
| 0.967539        | 0.007914 | 0.006099 | -0.010998 |
| 0.945483        | 0.014649 | 0.016371 | -0.019451 |
| 0.919407        | 0.022470 | 0.031347 | -0.027791 |
| 0.889501        | 0.030561 | 0.050767 | -0.035619 |
| 0.855652        | 0.038699 | 0.074629 | -0.042738 |
| 0.818293        | 0.046926 | 0.102659 | -0.048948 |
| 0.777966        | 0.055030 | 0.134765 | -0.054145 |
| 0.735169        | 0.062727 | 0.170598 | -0.058239 |
| 0.690338        | 0.069726 | 0.209956 | -0.061194 |
| 0.643856        | 0.075777 | 0.252411 | -0.062996 |
| 0.596064        | 0.080708 | 0.297656 | -0.063666 |
| 0.547330        | 0.084531 | 0.345187 | -0.063248 |
| 0.498288        | 0.087141 | 0.394605 | -0.061807 |
| 0.449272        | 0.088341 | 0.445343 | -0.059431 |
| 0.400592        | 0.088199 | 0.496925 | -0.056213 |
| 0.352742        | 0.086855 | 0.548737 | -0.052268 |
| 0.306248        | 0.084371 | 0.600249 | -0.047696 |
| 0.261604        | 0.080802 | 0.650829 | -0.042590 |
| 0.219296        | 0.076196 | 0.699974 | -0.037023 |
| 0.179743        | 0.070615 | 0.747128 | -0.031105 |
| 0.143372        | 0.064126 | 0.791833 | -0.024939 |
| 0.110502        | 0.056817 | 0.833594 | -0.018671 |
| 0.081485        | 0.048795 | 0.842594 | -0.018661 |
| 0.056518        | 0.040187 | 0.853594 | -0.018652 |
| 0.035873        | 0.031189 | 0.872254 | -0.012170 |
| 0.019660        | 0.022005 | 0.907866 | -0.006512 |
| 0.008118        | 0.012967 | 0.939211 | -0.002526 |
| 0.001394        | 0.004469 | 0.965020 | -0.000329 |
| 0.001039        | 0.003754 | 0.984215 | -0.000393 |
| 0.000308        | 0.001855 | 0.996021 | -0.000244 |
| 0.000001        | 0.000091 | 1.000000 | 0.000000  |

## Annexe B. Algorithme SIMPLE

L'algorithme SIMPLE a été développé par Patankar [85]. Soit  $u$  et  $v$  les composantes du vecteur vitesse et soit  $p$  la pression (figure B.1). L'équation aux volumes finis pour  $u$  et  $v$  est écrite sous la forme suivante :

$$a_{i,j}u_{i,j} = \sum a_{n,b}u_{n,b} + (p_{I-1,j} - p_{I,j})A_{i,j} + b_{i,j} \quad (\text{B.1})$$

$$a_{I,j}v_{I,j} = \sum a_{n,b}u_{n,b} + (p_{I,j-1} - p_{I,j})A_{I,j} + b_{i,j} \quad (\text{B.2})$$

Pour débiter les calculs selon l'algorithme SIMPLE on se donne un champ de pression initial  $p^*$ . Avec cette pression on calcule les deux composantes  $u^*$  et  $v^*$  à l'aide des formules suivantes :

$$a_{i,j}u_{i,j}^* = \sum a_{n,b}u_{nb}^* + (p_{I-1,j}^* - p_{I,j}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \quad (\text{B.3})$$

$$a_{I,j}v_{I,j}^* = \sum a_{n,b}v_{nb}^* + (p_{I,j-1}^* - p_{I,j}^*)A_{I,j} + b_{I,j} \quad (\text{B.4})$$

Soit  $p'$  la différence entre la valeur exacte de la pression  $p$  et la valeur initiale  $p^*$  :

$$p = p^* + p' \quad (\text{B.5})$$

Ainsi on définit les vitesses de correction  $u'$  et  $v'$  :

$$u = u^* + u' \quad (\text{B.6})$$



L'équation de continuité discrétisée donne :

$$[(\rho u A)_{i+1,J} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho v A)_{I,j+1} - (\rho v A)_{I,j}] = 0 \quad (\text{B.14})$$

En remplaçant les vitesses u et v par leurs formules obtenues B.12 et B.13 pour chaque point dans l'équation de continuité on aura :

$$\begin{aligned} & [(\rho dA)_{i+1,J} + (\rho dA)_{i,j} + (\rho dA)_{I,j+1} - (\rho dA)_{I,j}] p'_{i,j} = \\ & (\rho dA)_{i+1,J} p'_{i+1,J} + (\rho dA)_{i,j} p'_{i-1,J} + (\rho dA)_{i,j+1} p'_{i,j+1} + (\rho dA)_{I,j} p'_{I,j-1} \quad (\text{B.15}) \\ & + [(\rho u^* A)_{i,j} (\rho u^* A)_{i+1,J} + (\rho u^* A)_{i,j} (\rho u^* A)_{I,j+1}] \end{aligned}$$

Par cette équation on peut obtenir le p'. En remplaçant dans l'équation B.5 on obtient la pression  $p = p^{\text{nouv}}$  et aussi les vitesses u et v avec les équations B.12 et B.13.

Après cette étape, on réinitialise la pression  $p^* = p^{\text{nouv}}$  on reprend toutes les étapes précédentes jusqu'à la convergence [86].

## Annexe C. Schémas de discrétisation

Soit la variable  $\Phi$  qui satisfait l'équation de transport :

$$\frac{d}{dx} (\rho u \Phi) = \frac{d}{dx} \left( \Gamma \frac{d\Phi}{dx} \right) \quad (\text{C.1})$$

On définit les deux variables  $F$  et  $D$  qui correspondent au terme convectif et diffusif respectivement :

$$F = \rho u$$

Et

$$D = \frac{\Gamma}{\delta x}$$

L'intégration de l'équation de transport dans un volume de contrôle représente sur la figure C.1 donne :

$$F_e \Phi_e - F_w \Phi_w = D_e (\Phi_E - \Phi_P) - D_w (\Phi_P - \Phi_W) \quad (\text{C.2})$$

Avec

$$F_w = (\rho u)_w$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}}$$

Et

$$F_e = (\rho u)_e$$

$$D_e = \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}}$$

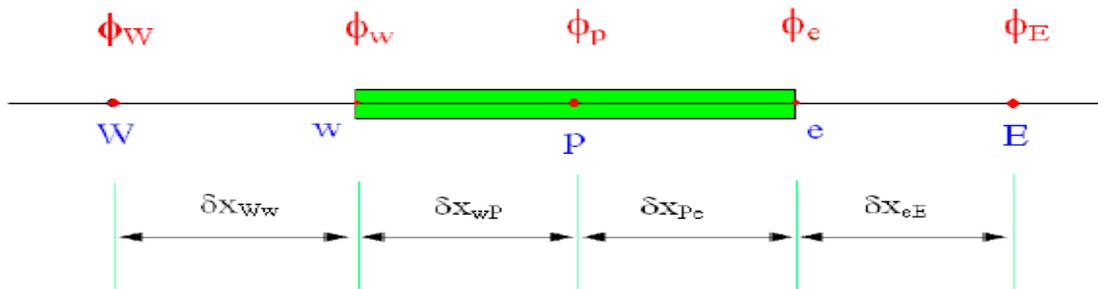


Figure C.1 Volume de contrôle autour du point P

### Schéma décentré (UPWIND)

Ce schème prend en considération la direction de la vitesse, pour le cas représenté dans la figure C.1 on a :

$$\Phi_w = \Phi_W$$

$$\Phi_e = \Phi_P$$

Ce qui donne :

$$(D_w + D_e + F_e)\Phi_P = (D_w + F_w)\Phi_W + D_e\Phi_E \quad (\text{C.3})$$

Pour le cas représenté dans la figure C.1, on a :

$$\Phi_w = \Phi_P$$

Et

$$\Phi_e = \Phi_E$$

Ce qui donne :

$$(D_w + D_e - F_w)\Phi_P + D_w\Phi_W + (D_e - F_e)\Phi_E \quad (\text{C.4})$$

## Annexe D. Construction du maillage

La première étape dans le processus de génération du maillage consiste à tracer le profil dont on souhaite évaluer les performances. On définira ensuite l'espace qui entoure le profil avant de mailler les différentes faces ainsi créées. Ces différentes étapes sont décrites dans ce qui suit.

### D1- Importer la géométrie :

Tout d'abord il faut créer la géométrie PROFIL. Pour cela on importe les coordonnées du profil données dans l'ANNEXE A mais en multipliant toutes les valeurs par la longueur de la corde  $c$  en reliant ensuite les points entre eux figure D-2

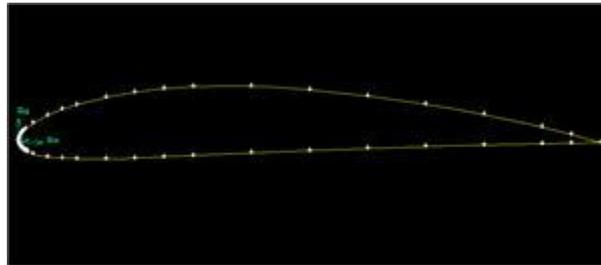


Figure D-2 création de la géométrie

### D2- Définir un domaine de calcul :

1. On crée le domaine en commençant par créer les points qui serviront à définir les différentes surfaces, ces points ainsi que leurs coordonnées sont présentés dans le tableau D-1. Puis on les relie avec des segments de droite et des arcs (voir figure D-2).

Tableau D-1 : Coordonnées du domaine

| Coordonnées du domaine |              |             |   |
|------------------------|--------------|-------------|---|
| Point                  | X            | Y           | Z |
| A                      | $c$          | $l_1 * c$   | 0 |
| B                      | $(l_2+1)*c$  | $l_1 * c$   | 0 |
| C                      | $(l_2+1)*c$  | 0           | 0 |
| D                      | $(l_2+1)*c$  | $- l_1 * c$ | 0 |
| E                      | $c$          | $- l_1 * c$ | 0 |
| F                      | $(1- l_1)*c$ | 0           | 0 |
| G                      | $c$          | 0           | 0 |
| H                      | 0            | 0           | 0 |

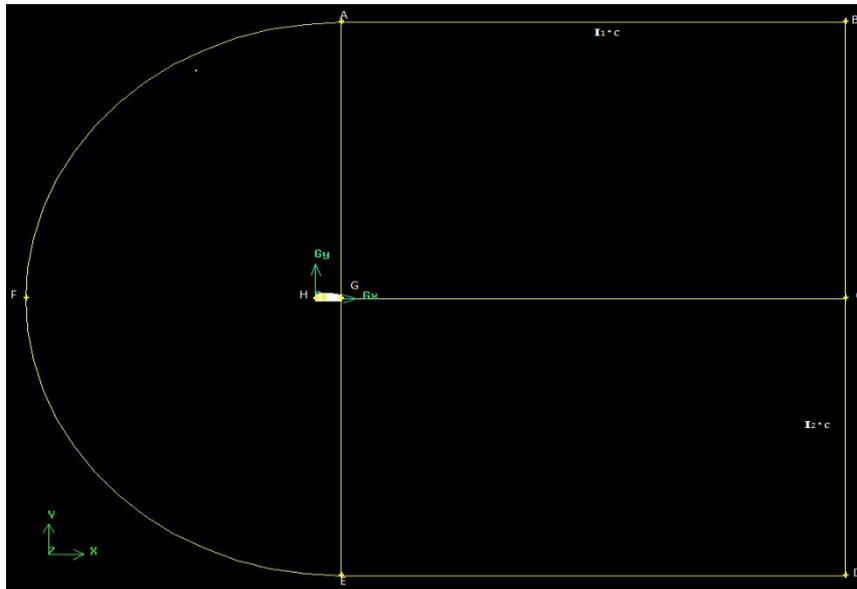


Figure D-3 : Définition du domaine

Enfin on crée des surfaces à partir des segments de droites : circ\_1 correspond au demi-disque AFE dont on a enlevé l'aire du profil, rect\_1 correspond au rectangle ABCG et rect\_2 correspond au rectangle GCDE.

### D3- Générer le maillage

2. Afin de pouvoir mieux gérer le maillage du profil on sépare les lignes de définition du maillage à  $0.3c$ , cela nous permettra de pouvoir réaliser un maillage uniforme sur l'arrière du profil, et un maillage évolutif sur l'avant. La courbe HG (extrados) est séparée par le point I et la courbe HG (intrados) est séparée par le point J (voir [figure D-4](#)).

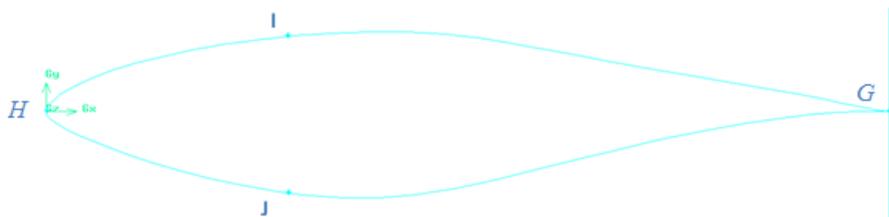


Figure D-4 : Création des points I et J

On choisit une taille de maille  $a_2$  pour la partie arrière du profil que l'on va mailler de manière uniforme. Puis on maillera uniformément les lignes IG et JG, ce qui crée un nombre  $N_{1I}$  et  $N_{2J}$  d'éléments. Ensuite on maillera la partie avant du profil de manière évolutive, en définissant la taille du premier élément égale à  $a_1$  et le nombre d'éléments ( $N_{2I}$  et  $N_{2J}$ ) environ égale à  $8/7$  de  $N_{1I}$  ou le facteur de grossissement des éléments  $f_1$ . Ce qui permet d'avoir un maillage plus fin près de H qu'il ne l'est près de I et J (Voir **Figure D-5**)

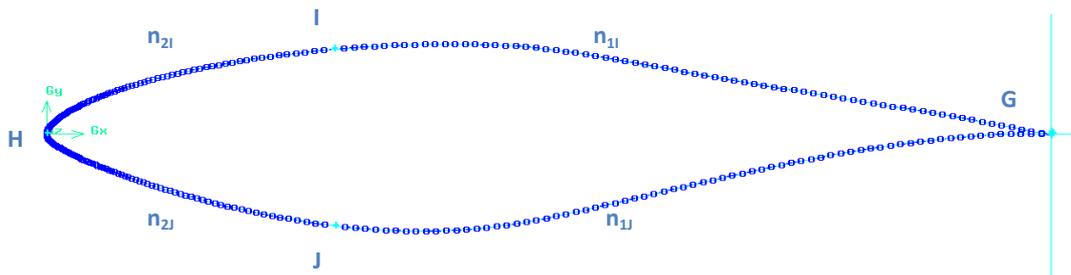


Figure D-5 : Maillage du profil

3. On maillera les lignes AF et EF avec un maillage évolutif comme précédemment avec le premier élément (proche de A et E) de taille  $a_1$ , et un nombre d'éléments égal  $N_{1I}+N_{2I}$  pour AF et  $N_{1J}+N_{2J}$  pour EF.
4. Il faut ensuite mailler les lignes définissant les rectangles : on maillera de la même manière AG, EG, BC, DC, avec un maillage évolutif dont on définit la taille du premier élément  $a_3$  (élément proche de G, C) et le nombre d'éléments  $n_1$  (ou le facteur de grossissement des éléments  $f_2$ ). Puis on maillera les lignes AB, GC, ED en définissant la taille du premier élément  $a_4$  (le plus proche de A, G ou E), et le nombre d'éléments  $n_2$  (ou le facteur de grossissement des éléments  $f_3$ ). (**Figure D-6**).

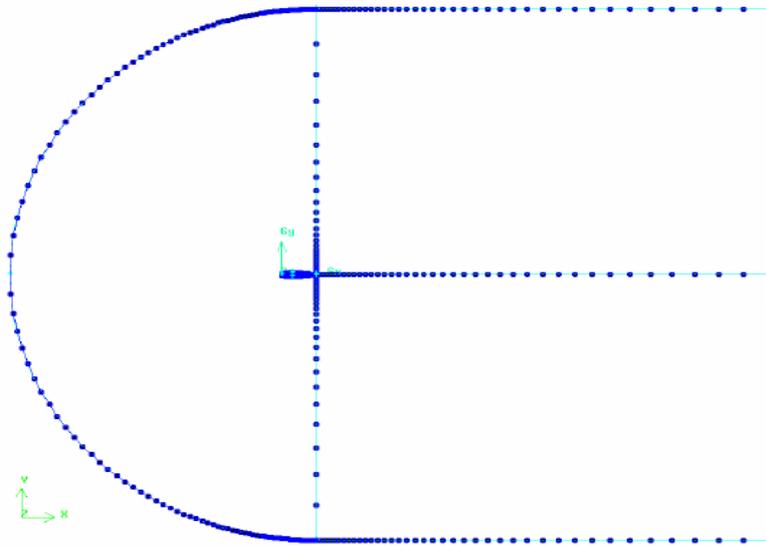


Figure D-6 Mailler les segments des faces

1. Enfin, il suffit de mailler les surfaces en se basant sur les maillages des lignes. (Figure D-7).

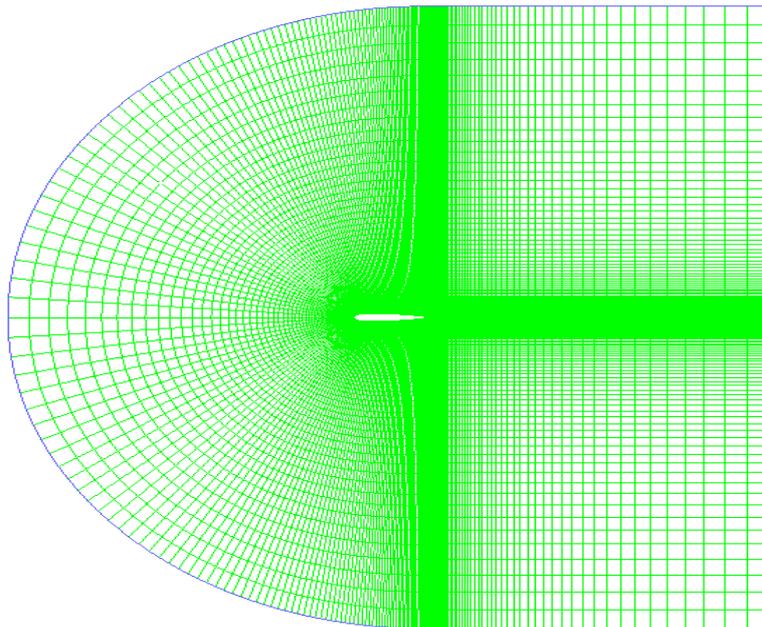


Figure D-7 Maillage "C" généré autour de profil S822

Lorsque le maillage est terminé et que les conditions aux limites sont correctement imposées, il ne reste qu'à exporter ce maillage dans un format lisible par le solveur, Fluent en l'occurrence. Ceci se fait par la commande *File/Export/Mesh* qui permet d'écrire un fichier de maillage avec l'extension .msh. Cochez l'option « Export 2-D mesh ».

**D4- domaine de maillage retenu**

| Description   | Symbole         | valeur        |
|---|-----------------|---------------|
| taille du premier élément en amont de profil                        | $a_1$           | <b>0.02*c</b> |
| taille des éléments le long du profil (entre I et G) (entre J et G) | $a_2$           | <b>0.02*c</b> |
| taille du premier élément proche de G et C entre (AG BC EG DC)      | $a_3$           | <b>0.02*c</b> |
| taille du premier élément proche A, G et E entre (AB GC DE)         | $a_4$           | <b>0.02*c</b> |
| nombre d'éléments le long du profil (entre I et G)                  | $N_{1i}$        | <b>80</b>     |
| nombre d'éléments le long du profil (entre J et G)                  | $N_{1j}$        | <b>70</b>     |
| nombre d'éléments le long du profil (entre H et I)                  | $N_{2i}$        | <b>80</b>     |
| nombre d'éléments le long du profil (entre H et J)                  | $N_{2j}$        | <b>70</b>     |
| nombre d'éléments le long du profil (extrados)                      | $N_{1i}+N_{2i}$ | <b>150</b>    |
| nombre d'éléments le long du profil (intrados)                      | $N_{1j}+N_{2j}$ | <b>150</b>    |
| facteur de grossissement en amont du profil                         | $f_1$           | <b>1.02</b>   |
| facteur de grossissement dans le sillage du profil                  | $f_2$ et $f_3$  | <b>1.02</b>   |