

MODELISATION DE L'ÉCOULEMENT D'AIR AUTOUR D'UN PROFIL DE PALE D'ÉOLIENNE

PHASE 1 : Domaine de calcul et Maillage

Rapport interne
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne
LREE-05 – Décembre 2008

Thierry TARDIF d'HAMONVILLE

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE), Université du Québec à Rimouski, 300, allée des Ursulines, Rimouski (Québec), Canada, G5L 3A1, Tél.: (418)-723-1986 # 1285,
thierry.tardifdhamonville@uqar.qc.ca

Adrian ILINCA

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE), Université du Québec à Rimouski, 300 allée des Ursulines, Rimouski (Québec), Canada, G5L 3A1, Tél. : (418)-723-1986 #1460, adrian_ilinca@uqar.qc.ca

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	I
LISTE DES FIGURES.....	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 CADRE DU PROJET.....	1
1.2 PROBLEMATIQUE DE LA PHASE 1	2
1.3 LE PROFIL UTILISE.....	3
1.4 LE MODELE AERODYNAMIQUE.....	3
1.5 LES DONNEES EXPERIMENTALES	4
1.6 LES RESULTATS RECHERCHES	4
CHAPITRE 2 : CONSTRUCTION D'UN MAILLAGE	5
2.1 INTRODUCTION.....	5
2.2 CONSTRUCTION DU MAILLAGE SOUS GAMBIT	6
2.3 CONSTRUCTION DU MAILLAGE AVEC CFX MESH.....	11
2.3.1 <i>Créer la géométrie</i>	11
2.3.2 <i>Réaliser le maillage</i>	11
2.3.3 <i>Créer une couche limite</i>	12
CHAPITRE 3 : LE DOMAINE DE CALCUL.....	13
3.1 LES PREROGATIVES	13
3.1.1 <i>La corde du profil</i>	13
3.1.2 <i>Les valeurs fixes pour les différents essais</i>	13
3.2 VARIATION PAR HOMOTHETIE	14
3.2.1 <i>Description des différents essais</i>	14
3.2.2 <i>Résultats</i>	15
3.2.3 <i>Analyse</i>	18
3.3 DOMAINE DE MAILLAGE CHOISI	19
CHAPITRE 4 : MAILLAGE AVEC GAMBIT	20
4.1 L'INFLUENCE DU NOMBRE DE MACH	20
4.1.1 <i>Les essais</i>	20
4.1.2 <i>Résultats</i>	21
4.1.3 <i>Analyse et conclusion</i>	24

4.2	EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE.....	25
4.2.1	Les essais.....	25
4.2.2	Résultats.....	26
4.2.3	Analyse.....	28
4.3	FINESSE DU PREMIER ELEMENT DE COUCHE LIMITE.....	28
4.3.1	Les essais.....	28
4.3.2	Résultats.....	29
4.3.3	Analyse.....	31
CHAPITRE 5 : MAILLAGE AVEC CFX-MESH.....		32
5.1	PREROGATIVES.....	32
5.1.1	La corde du profil.....	32
5.1.2	Domaine d'étude.....	32
5.1.3	Les valeurs fixes pour les différents essais.....	33
5.2	FACTEURS DE GROSSISSEMENT F_2 ET F_4	33
5.2.1	Les essais.....	33
5.2.2	Résultats.....	34
5.2.3	Analyse.....	36
5.2.4	Temps de calculs.....	37
5.2.5	Conclusion.....	38
5.3	TAILLE DES ELEMENTS LE LONG DU PROFIL A_1	39
5.3.1	Les essais.....	39
5.3.2	Résultats.....	39
5.3.3	Analyse.....	41
5.3.4	Temps de calculs.....	42
5.3.5	Conclusion.....	43
CHAPITRE 6 : CONCLUSION GENERALE.....		44
BIBLIOGRAPHIE.....		45
ANNEXE A	COORDONNEES ET SECTION DU PROFIL S809.....	46
ANNEXE B	DOMAINE D'ETUDE RETENU POUR GAMBIT.....	48
ANNEXE C	MAILLAGE RETENU POUR GAMBIT.....	49
ANNEXE D	ESSAI8.JOU.....	50
ANNEXE E	DOMAINE D'ETUDE POUR CFX-MESH.....	53
ANNEXE F	MAILLAGE RETENU POUR CFX-MESH.....	54

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1-1 : Section du profil S809</i>	<i>3</i>
<i>Figure 2-1 : Ouverture des profils</i>	<i>6</i>
<i>Figure 2-2 : Définition du domaine.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2-3 : Création des points I et J.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2-4 : Maillage du profil.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2-5 : Couche limite</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2-6 : Maillage des lignes formant le rectangle</i>	<i>9</i>
<i>Figure 2-7 : Définition des conditions aux frontières.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3-1 : Les différents domaines de maillage.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 3-2 : Coefficient de portance pour différents essais.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 3-3 : Coefficient de trainée et rapport d'homothétie.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 3-4 : Coefficient de portance et rapport d'homothétie.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 3-5 : Coefficient de moment et rapport d'homothétie.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 4-1 : Coefficient de portance pour différents essais.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 4-2 : Coefficient de trainée et nombre de Mach</i>	<i>22</i>
<i>Figure 4-3 : Coefficient de portance et nombre de Mach.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 4-4 : Coefficient de moment et nombre de Mach.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 4-5 : Coefficient de portance et maillage (1)</i>	<i>26</i>
<i>Figure 4-6 : Coefficient de trainée et maillage (1)</i>	<i>27</i>
<i>Figure 4-7 : Coefficient de moment et maillage (1)</i>	<i>27</i>
<i>Figure 4-8 : Coefficient de portance et maillage (2)</i>	<i>30</i>
<i>Figure 4-9 : Coefficient de trainée et maillage (2)</i>	<i>30</i>
<i>Figure 4-10 : Coefficient de moment et maillage (2).....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 5-1 : Coefficient de trainée et facteurs de grossissement</i>	<i>34</i>
<i>Figure 5-2 : Coefficient de portance et facteurs de grossissement</i>	<i>35</i>
<i>Figure 5-3 : Coefficient de moment et facteurs de grossissement</i>	<i>35</i>
<i>Figure 5-4 : Coefficient de trainée en fonction du nombre d'éléments le long du profil.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 5-5 : Coefficient de portance en fonction du nombre d'éléments le long du profil.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 5-6 : Coefficient de moment en fonction du nombre d'éléments le long du profil.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure A-1 : Section du profil S809.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure B-1 : Domaine d'étude pour GAMBIT</i>	<i>48</i>
<i>Figure E-1 : Domaine d'étude pour CFX-Mesh</i>	<i>53</i>
<i>Figure F-1 : Maillage non structuré retenu pour CFX-Mesh.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure F-2 : Premier zoom sur le maillage</i>	<i>55</i>
<i>Figure F-3 : Second zoom sur le maillage</i>	<i>55</i>

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Modification des ordonnées du profil S809.....	6
Tableau 2-2 : Coordonnées du domaine	6
Tableau 3-1 : Valeurs fixes pour le domaine de maillage.....	14
Tableau 3-2 : Description des essais par homothétie.....	14
Tableau 4-1 : Longueur de corde et nombre de Mach	20
Tableau 4-2 : Valeurs fixes pour l'affinement du maillage (1).....	25
Tableau 4-3 : Valeurs pour l'affinement du maillage (1).....	25
Tableau 4-4 : Valeurs pour l'affinement du maillage (2).....	29
Tableau 5-1 : Valeurs fixes pour l'étude des facteurs de grossissement f_2 et f_4	33
Tableau 5-2 : Valeurs variables pour l'étude des facteurs de grossissement f_2 et f_4	33
Tableau 5-3 : temps de calculs pour l'étude des facteurs de grossissement f_2 et f_4	37
Tableau 5-4 : temps de calculs par rapport à l'essai 1	37
Tableau 5-5 : Valeurs fixes pour l'étude des éléments le long du profil	39
Tableau 5-6 : Valeurs variables pour l'étude des éléments le long du profil.....	39
Tableau 5-7 : temps de calculs pour l'étude des éléments le long du profil	42
Tableau 5-8 : temps de calculs par rapport à l'essai 2	42
Tableau A-1 : Coordonnées relatives du profil S809.....	46
Tableau B-1 : Coordonnées du domaine d'étude retenu pour GAMBIT.....	48
Tableau C-1 : Définition du maillage retenu pour GAMBIT.....	49
Tableau E-1 : Coordonnées du domaine d'étude retenu pour CFX-Mesh	53
Tableau F-1 : Définition du maillage retenu pour CFX-Mesh.....	54

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 *Cadre du projet*

L'évolution des éoliennes dans leurs caractéristiques montre que la tendance est aux envergures frôlant le gigantisme, générant une production d'énergie plus importante, ou bien à l'amincissement des profils des pales des éoliennes permettant des coûts de production moindres. Cependant ces évolutions rendent les pales plus fragiles et de plus en plus sujettes à des déformations ou des vibrations en réponses aux forces que les vents génèrent sur elles. Des recherches ont montrées que ces déformations dues à une grande flexibilité, ont un impact par rapport à la production d'énergie [1]. Mais surtout ces déformations et vibrations génèrent une fatigue plus importante pour les pales, ce qui conduit irrémédiablement à rapprocher de manière considérable la fin de vie de celles-ci, voir directement générer leurs destruction. Pour ces raisons il est important d'étudier ces déformations et vibrations, résultats de l'interaction entre les forces aérodynamiques, les forces élastiques et d'amortissement. Ces contraintes auxquelles sont soumise les pales d'éoliennes à la suite des interactions entre le fluide et la structure sont appelés phénomènes aéroélastiques. L'étude des phénomènes aéroélastiques pour les éoliennes apparaît donc comme l'un des éléments clé dans l'évolution de la recherche en génie éolien.

Ainsi le projet : Modélisation de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne, représente une première étape pour le Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne dans la modélisation des phénomènes aéroélastiques. En effet ce projet a pour but de modéliser l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne de manière assez classique mais aussi en introduisant des phénomènes aéroélastiques sur la structure du profil.

Il est à noter que la modélisation de ces phénomènes demande le couplage entre fluide et structure. Il faut donc réaliser le couplage entre deux logiciels distincts l'un permettant de modéliser les écoulements d'air, un logiciel de mécanique des fluides (=CFD Computational Fluid Dynamics), et l'autre permettant de modéliser les structures. Nous avons opté pour le couplage des logiciel CFX et ANSYS. Pour bien modéliser le comportement de l'écoulement autour du profil, il nous faut d'abord réaliser plusieurs études sur les domaines et les maillages permettant de modéliser des écoulements et les modèles turbulents proposés par CFX, pour ensuite se concentrer sur le couplage.

Ce projet se fera donc en 3 phases :

- Phase 1 : étude sur le domaine de calcul et les maillages pour modéliser l'écoulement ;
- Phase 2 : étude sur les modèles turbulents proposés par CFX ;
- Phase 3 : étude des phénomènes aéroélastiques

1.2 *Problématique de la phase 1*

L'étude du domaine de calcul repose sur un compromis entre le fait que les frontières soient suffisamment éloignées afin que les conditions limites n'influencent pas les résultats obtenus, et d'un autre côté se prémunir d'un domaine trop grand qui demanderait un nombre d'éléments et de calculs trop important. Dans la littérature la présence de différents domaines de tailles diverses ne permet pas de déterminer a priori une dimension optimale. En effet, pour une étude similaire (maillage sous Gambit et étude d'un profil sous Fluent) les travaux [2] et [3] proposent deux domaines de tailles assez différentes.

Dans cette étude nous analysons quelles sont les dimensions optimales du domaine qui, pour un coût de calculs restreint, donnent des résultats suffisamment proches de ceux donnés par un domaine plus large.

L'étude du maillage repose sur des constats similaires. En effet après avoir choisi le domaine de calcul il faut choisir le maillage que l'on va utiliser. En effet on sait que plus un maillage est fin et plus il permet de mettre en avant les phénomènes à étudier, mais d'un autre côté plus le maillage est fin plus il y a d'éléments et donc plus la simulation demande des calculs. De la même manière que pour le domaine il existe dans la littérature un nombre important de maillages différents selon les études réalisées.

Ainsi dans cette étude nous analysons l'influence du nombre d'éléments du maillage sur la précision et le temps de calcul afin de choisir de manière optimale ce paramètre.

1.3 Le profil utilisé

Le profil que nous allons utiliser pour les études décrites ci-après est le profil S809 (Figure 1-1), utilisé par le NREL dans le développement de leur rotor à deux pales NREL Phase VI. L'ANNEXE A présente le profil avec ses coordonnées (intrados et extrados).

Section du profil S809

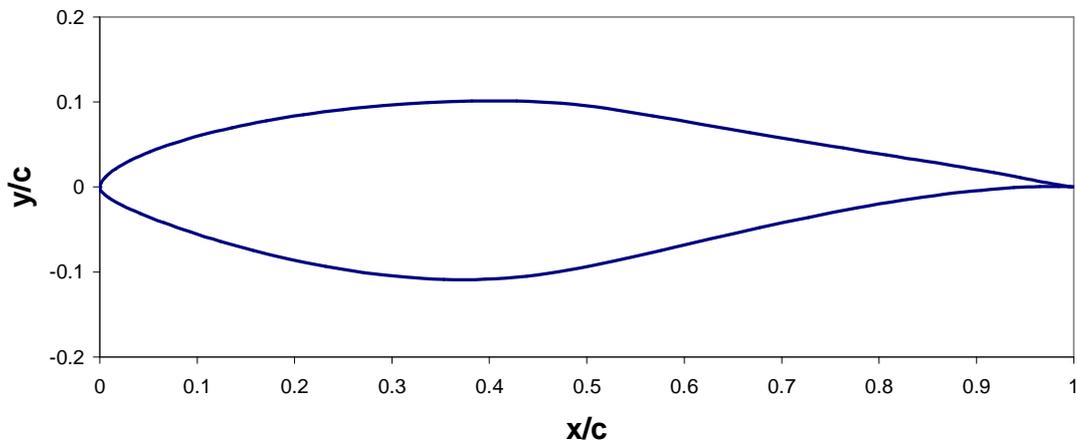


Figure 1-1 : Section du profil S809

Nous avons choisi ce profil car tout d'abord il existe un nombre important d'expérimentation dans la littérature le concernant (notamment [4] et [5]), ensuite il permettra une poursuite des études vers des modélisations de pale complète avec des comparaisons possibles avec le rotor NREL Phase VI dont les études expérimentales sont nombreuses ([6], [7]).

1.4 Le modèle aérodynamique

Les différents modèles aérodynamiques proposés par le logiciel ANSYS CFX ainsi que les options de transition laminaire-turbulent feront l'objet d'une autre étude (voir la Phase 2 du projet), leur théorie est présentée dans ANSYS CFX, Release 11.0 [8]. En nous basant sur le travail [9], nous choisissons de modéliser les écoulements à l'aide du modèle turbulent $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport). Pour ces études sur le domaine de calcul et le maillage nous utiliserons le modèle en mode purement turbulent, en laissant à l'étude suivante le soin de mettre en avant les autres modèles laminaires et turbulents ainsi que les modèles de transition proposés par le logiciel.

1.5 Les données expérimentales

Les données expérimentales sont celles extraites des travaux [4] et [5]. Le travail [4] est réalisé dans le laboratoire de recherche aéronautique et aérospatiale de l'université d'état de l'Ohio (OSU : Ohio State University Aeronautical and Astronautical Research Laboratory). Ce travail, réalisé par Ramsay, nous donne accès aux caractéristiques du profil S809, grâce à des expérimentations avec un modèle ayant une corde de 0.457 mètres pour des nombres de Reynolds de 0.75 à 1.5 millions. Le travail [5] a été réalisé dans le laboratoire de faible vitesse de l'université technologique de Delft (DUT : Delft University of Technology Low Speed Laboratory) au Pays Bas. Ce travail, réalisé par Somers, nous donne accès aux caractéristiques du profil S809, grâce à des expérimentations avec un modèle ayant une corde de 0.6 mètres pour des nombres de Reynolds de 1 à 3 millions.

Afin de pouvoir comparer avec les données expérimentales disponibles, nous avons choisi de réaliser l'étude des domaines et maillages pour un nombre de Reynolds de 1 million, cela permettra de croiser les données des deux travaux.

1.6 Les résultats recherchés

Nous cherchons à obtenir les caractéristiques du profil définis par les coefficients de portance, de trainée et de moment. Dans l'étude qui suit, lorsque l'on parlera du coefficient de moment, il s'agit du coefficient de moment pris à 25% de la corde. Ces différents coefficients seront la base des comparaisons, puisque c'est à travers eux que l'on caractérise un profil et sa réaction par rapport à un écoulement d'air.

En règles générales nous effectuerons les simulations pour des angles d'attaque de 8.2°, 10.1°, 12.2°, 14.2°, 16.2°, 18.1°, 20°, 22.1° et 24°, pour un nombre de Reynolds de 1 million. Bien entendu, dans le cas où nous trouverions cela pertinent, nous rajouterions des points.

Nous travaillons en mode stationnaire, et les résultats retenus seront ceux qui auront convergé avec des résidus inférieurs à 1.5×10^{-6} avant 500 itérations.

CHAPITRE 2 : CONSTRUCTION D'UN MAILLAGE

2.1 Introduction

Le solveur ANSYS CFX ne peut résoudre des problèmes 2D il va donc falloir créer un maillage et une géométrie en 3 dimensions. La construction du maillage reste similaire à celle en 2 dimensions, en effet nous allons construire le maillage en 2 dimensions puis nous l'extruderons dans la troisième dimension selon un vecteur perpendiculaire au maillage d'amplitude choisie.

Nous avons possibilité de créer le maillage avec deux différents mailleurs : CFX-Mesh et GAMBIT. Le premier est celui dédié à ANSYS CFX et le second est celui dédié à Fluent. Le mailleur CFX-Mesh ne propose pas la réalisation de maillages structurés, mais seulement des maillages non-structurés. La plupart des simulations réalisées dans la littérature étant basées sur des maillages structurés, nous avons choisi de réaliser des études avec le mailleur GAMBIT pour lequel les tutoriaux sont plus explicites que ceux de CFX-Mesh. De plus, cela permettra de plus facilement réaliser une comparaison entre le logiciel ANSYS CFX et Fluent. Il sera tout de même intéressant de réaliser un maillage non-structuré avec CFX-Mesh proche de celui réalisé avec GAMBIT. Nous chercherons donc un maillage structuré, à l'aide du mailleur GAMBIT, qui donne des résultats satisfaisants. Nous chercherons aussi un maillage non structuré, à l'aide du mailleur CFX-Mesh.

2.2 Construction du maillage sous GAMBIT

Dans l'étape d'extrusion dans la troisième direction nous avons alors rencontré un problème : le mailleur GAMBIT refuse d'extruder le maillage avec les profils d'origine. Comme expliqué dans le travail [3], nous avons été obligé d'ouvrir le profil afin de les mailler en 3 dimension (voir **Figure 2-1**).

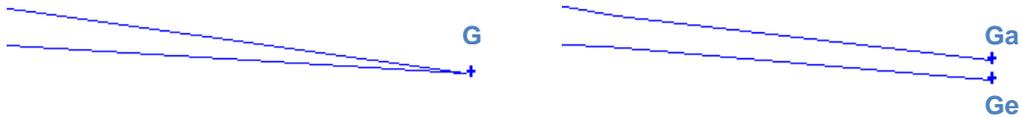


Figure 2-1 : Ouverture des profils

1. Tout d'abord il faut importer une version modifiée du profil : cette version est en fait basée sur les valeurs de coordonnées du profil données dans l'ANNEXE A mais en multipliant toutes les valeurs par la longueur de la corde c et en remplaçant les valeurs des ordonnées des points d'abscisses c (voir **Tableau 2-1**).

Tableau 2-1 : Modification des ordonnées du profil S809

$0.98528*c$	$0.00245*c$	$0.99612*c$	$0.00024*c$
$0.99623*c$	$0.00054*c$	$1*c$	-0.0001
$1*c$	0.0001		

2. 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 2-2**. Puis on les relie avec des segments de droite et des arcs (voir **Figure 2-2**).

Tableau 2-2 : 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
Ga	c	0.0001	0
Ge	c	-0.0001	0
Cb	$(l_2+1)*c$	0.0001	0
Cd	$(l_2+1)*c$	-0.0001	0

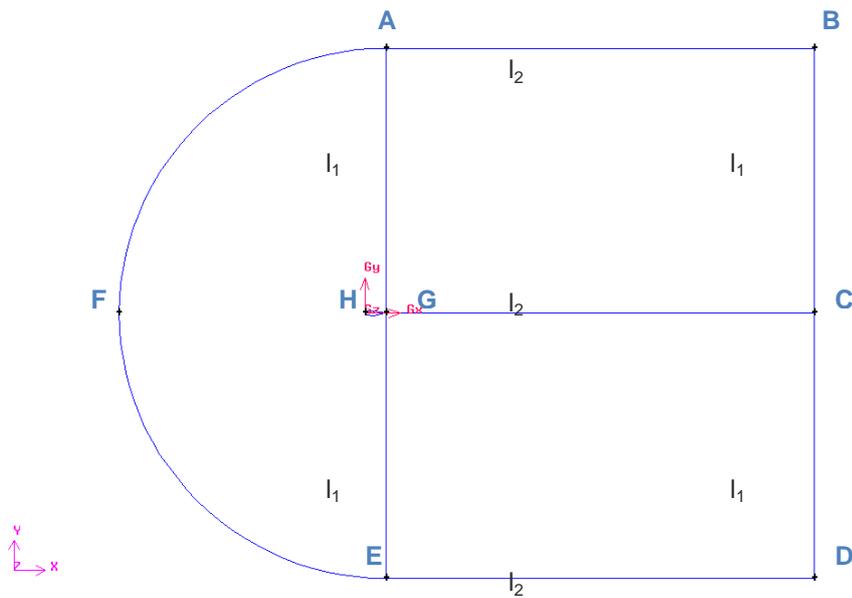


Figure 2-2 : Définition du domaine

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.

3. 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 HGa (extrados) est séparée par le point I et la courbe HGe (intrados) est séparée par le point J (voir Figure 2-3).

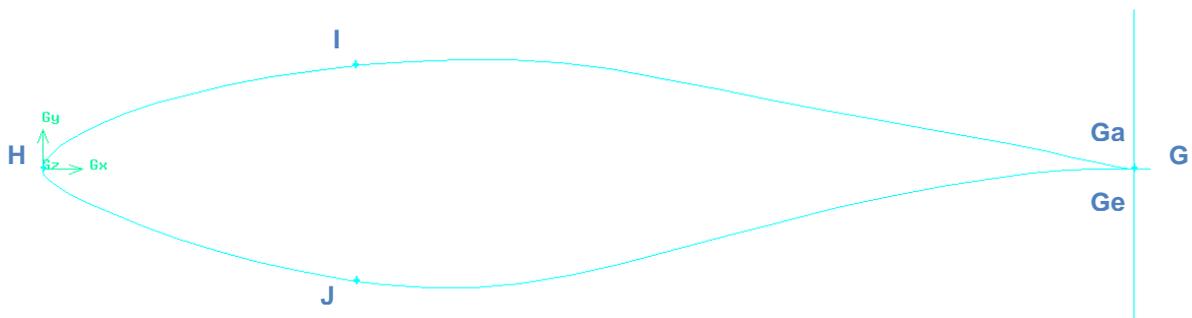


Figure 2-3 : Création des points I et J

On choisit une taille de maille a_1 pour la partie arrière du profil que l'on va mailler de manière uniforme. Puis on maillonne uniformément les lignes IGa et JGe, ce qui crée un nombre n_{1i} et n_{1j} d'éléments. Ensuite on maillonne 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} . Ce qui permet d'avoir un maillage plus fin près de H qu'il ne l'est près de I et J (Voir Figure 2-4).

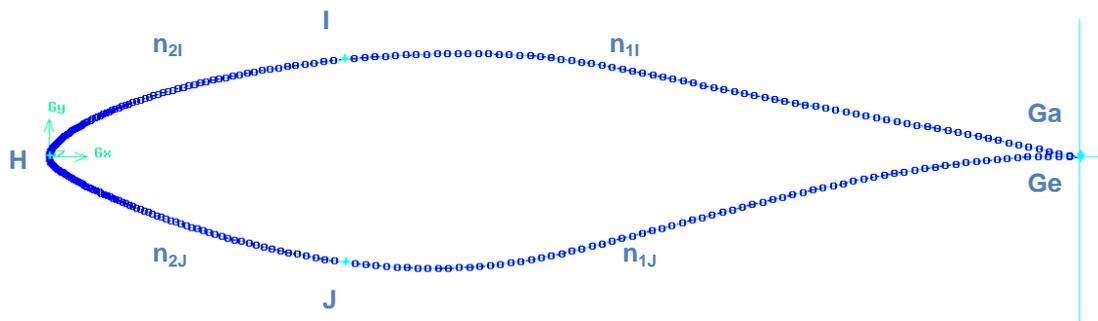


Figure 2-4 : Maillage du profil

4. On maille 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 à $n_{1I} + n_{2I}$ pour AF et $n_{1J} + n_{2J}$ pour EF.

5. On choisit une épaisseur de couche limite a_5 , puis on crée quatre points Ag, Eg, Bc, Dc respectivement distant des points Ga, Ge et Cb, Cd d'une distance égale à a_2 (ces points sont sur les droites : AG, EG, BC, DC). Ensuite il convient de choisir la taille a_3 du plus petit élément (celui qui sera collé contre la paroi) et le nombre d'éléments n_3 constituant la couche limite (ou le facteur de grossissement des éléments f_1).

Puis on maille les segments AgGa, EgGe, BcCb, DcCd, à l'aide d'un maillage évolutif en définissant la taille du plus petit élément (collé à la paroi) égal à a_3 et le nombre d'éléments égal à n_3 (ou le facteur de grossissement des éléments égal à f_1).

Enfin on trace la couche limite tout le long de la paroi du profil elle apparaît en noire sur la Figure 2-5.

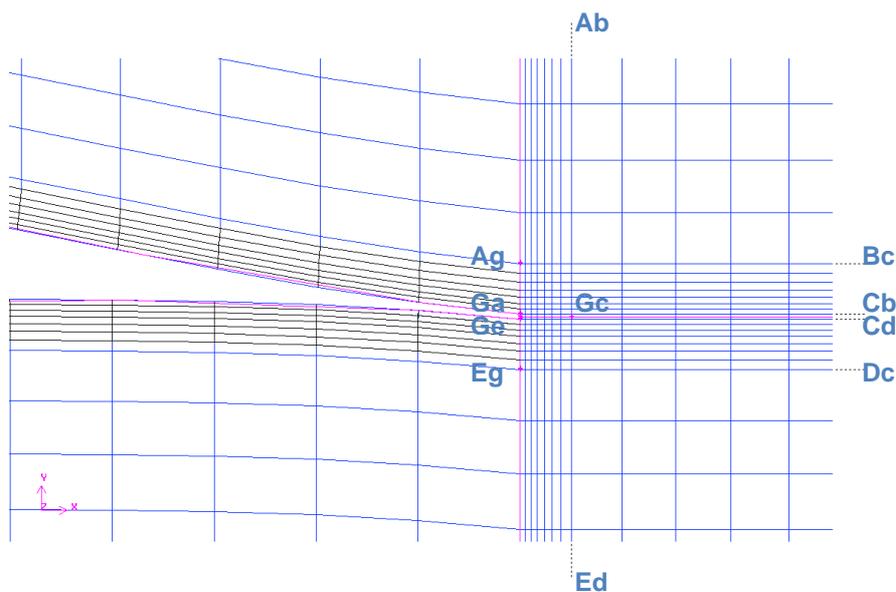


Figure 2-5 : Couche limite

On note que le segment GaGe est un mur et qu'il nécessite donc un traitement de paroi similaire à celui du reste du profil. On crée ainsi les points Ab, Gc, Ed respectivement distant des points A, G et E d'une distance égal à a_5 (ces points sont sur les droites : AB, GC, ED). Ensuite on maillie les segments AAb, GGc, EEd, à l'aide d'un maillage évolutif en définissant la taille du plus petit élément (collé à la paroi) égal à a_3 et le nombre d'éléments égal à n_3 (ou le facteur de grossissement des éléments égal à f_1).

6. Il faut ensuite mailler les lignes définissant les rectangles : on maillie de la même manière AAg, EEg, BBc, DDc, avec un maillage évolutif dont on définit la taille du premier élément a_4 (élément proche de Ag, Eg, Bc ou Dc), et le nombre d'éléments n_4 (ou le facteur de grossissement des éléments f_2). Puis on maillie les lignes AbB, GcC, EdD en définissant la taille du premier élément a_5 (le plus proche de Ab, Gc ou Ed), et le nombre d'éléments n_5 (ou le facteur de grossissement des éléments f_3). Il ne faut pas oublier de mailler les petits éléments GGa, GGe, CCb, CCd, on les maillie de manière uniforme avec un seul élément car la taille de ces éléments est la taille minimale des éléments que nous avons l'intention de créer (Figure 2-6).

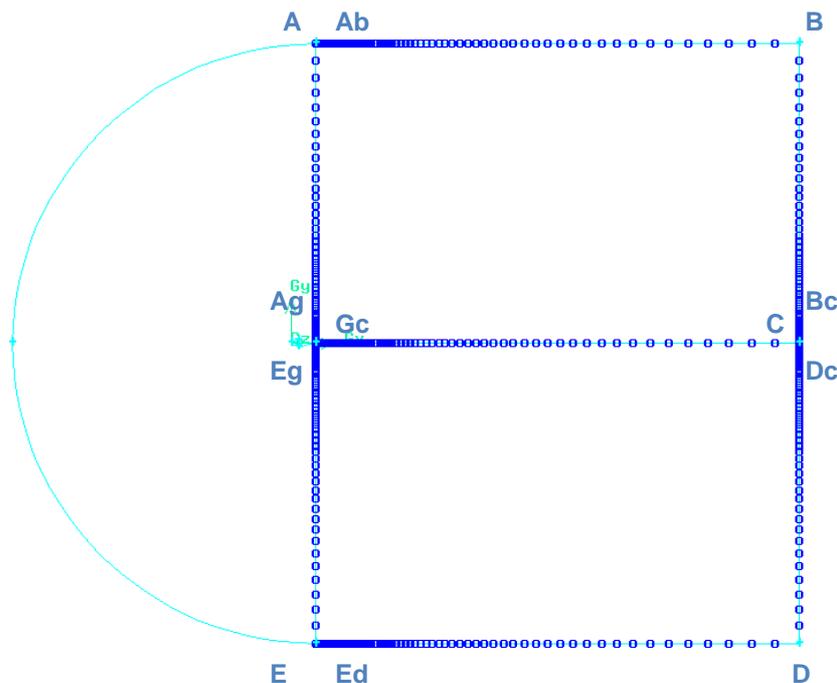


Figure 2-6 : Maillage des lignes formant le rectangle

7. Enfin, il suffit de mailler les surfaces en se basant sur les maillages des lignes. Puis il faut extruder les surfaces sur une amplitude a_6 en conservant le maillage. Ainsi on crée des volumes d'épaisseur a_6 qui ne possèdent qu'une maille en épaisseur.

8. Après avoir dessiné le maillage et l'avoir extrudé il faut définir les différents éléments comme les conditions limites : les surfaces servant d'entrée (Inlet), celles de sortie (Outlet), les surfaces définissant le Profil (Wall), les surfaces définies comme des symétries. Pour finir on sélectionne tous les volumes pour définir le Fluide. Nous avons définis les Inlet, Outlet et Wall de la manière indiquée à la **Figure 2-7**:

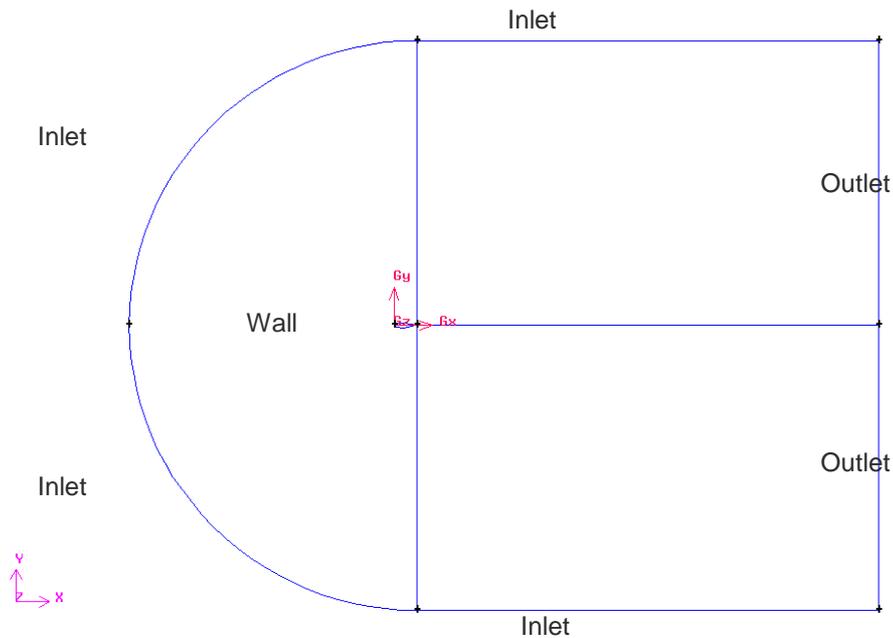


Figure 2-7 : Définition des conditions aux frontières

Il est à noter qu'il est plus simple de travailler à partir de fichiers *.jou et de les faire lire par GAMBIT, plutôt que de faire étape par étape. En ANNEXE D sera mit le fichier *.jou du maillage retenu à la fin des études sur le domaine et le maillage. Cela permettra d'avoir une idée de la forme de ces fichiers.

2.3 Construction du maillage avec CFX Mesh

Contrairement à GAMBIT, CFX Mesh peut tout à fait extruder les maillages avec des géométries fermées par un angle aigu. Ainsi on peut donc utiliser directement les données du profil d'origine.

2.3.1 Créer la géométrie

1. Tout d'abord il faut créer la géométrie du maillage, pour cela on importe la géométrie du profil au format *.sat (géométrie avec la corde c et la profondeur a_6 que l'on a choisi) que l'on renomme Profil. Ensuite on la génère puis on la bloque.
2. Après cela on trace une esquisse du fluide sur l'une des faces planes du profil. On trace cette esquisse à l'aide d'un arc de cercle dont le centre est le bord d'attaque du profil et le rayon est égal à l_1*c , et de trois lignes formant la partie arrière du fluide. Une fois cette esquisse construite avec les dimensions définies (l_1*c , l_2*c) on l'extrude de la dimension choisie a_6 et on appelle ce volume Fluide.
3. Enfin on réalise un booléen, une soustraction : on retire le Profil du Fluide. Puis on enregistre la géométrie finale en *.agdb

2.3.2 Réaliser le maillage

4. On édite la géométrie dans CFX Mesh
5. On commence par insérer dans **Regions** des régions composites : en sélectionnant les surfaces on crée une région Inlet, une région Outlet, une région Profil, une région Symétrie 1, et enfin une autre région Symétrie 2.
6. Ensuite dans **Mesh, Option** on choisit une **Meshing Strategy : Extruded 2D Mesh**, afin de réaliser comme pour le maillage avec GAMBIT l'extrusion d'un maillage 2D. On voit alors apparaître l'élément **Extruded Periodic Pair**, qui permet de choisir entre quelles faces va être extrudé le maillage. Il faut sélectionner tout d'abord la face Symétrie 1, puis la face Symétrie 2.

7. Ensuite dans **Mesh, Spacing** :

- a. On définit dans **Default Body Spacing** l'espace maximum entre les éléments (la distance entre les éléments définissant l'Inlet et l'Outlet qui sont à priori les plus gros éléments puisque les plus éloignés du profil).
- b. On définit dans **Default Face Spacing** les longueurs minimales et maximales des lignes composant les faces des éléments que l'on souhaite construire (Le maximum étant à priori la longueur des éléments composant l'Inlet et l'Outlet, et le minimum celle des éléments du Profil).
- c. On insert un **Edge Spacing**, pour lequel on sélectionne les lignes du profil (seulement sur une face car on extrude un maillage 2D) et on définit la constante de longueur choisie ($\approx a_1$) et le facteur d'expansion ($\approx f_2$).
- d. De même on peut insérer un **Edge Spacing**, pour lequel on sélectionne les lignes d'Inlet et Outlet d'une face et on définit la constante de longueur choisie (a_7) et le facteur d'expansion (f_4).

2.3.3 *Créer une couche limite*

8. Dans **Mesh, Inflation**

- a. On choisit le nombre de couches pour la couche limite ($\approx n_3$), le facteur d'expansion ($\approx f_1$), en utilisant l'option **First Layer Thickness**, et en choisissant de définir la première couche par la hauteur du premier prisme, on a plus qu'à entrer la hauteur du premier prisme ($\approx a_3$)
- b. On insert une **Inflated Boundary** et on sélectionne les surface du profil.

CHAPITRE 3 : LE DOMAINE DE CALCUL

L'étude sur le domaine de maillage est réalisée avec le mailleur GAMBIT

3.1 *Les prérogatives*

3.1.1 *La corde du profil*

Afin de définir le domaine de maillage il faut définir la dimension de la corde du profil. Comme les expérimentations sont faites à l'aide de modèles ayant des cordes de 0.6m et 0.457m, nous avons choisi de réaliser nos simulations avec une corde de 0.5m.

Cela implique donc puisque le fluide est de l'air à 25°C, avec une viscosité dynamique de $1.831 \cdot 10^{-5}$ Pa.s et une masse volumique de 1.185 kg.m^{-3} , que nous devons réaliser les simulations avec une vitesse relative de 30.90 m.s^{-1} si nous tenons à obtenir un nombre de Reynolds de 1 million.

3.1.2 *Les valeurs fixes pour les différents essais*

Puisque l'objectif de cette étude est de voir comment la distance entre les frontières (portant les conditions limites) et le profil influence les résultats, nous allons donc seulement faire évoluer les distances l_1 et l_2 et garder fixe les tailles des premiers éléments, la taille de la couche limite, et les facteurs de grossissements. Comme les longueurs l_1 et l_2 vont croître et décroître le nombre d'éléments lui aussi va évoluer.

Dans le **Tableau 3-1** sont répertoriées les valeurs fixes pour toutes les simulations de l'étude du domaine de maillage.

Tableau 3-1 : Valeurs fixes pour le domaine de maillage

Valeurs fixes pour le domaine de maillage	
symbole	valeur
a_1	0.004*c
a_2	0.004*c
a_3	0.0002*c
a_4	0.002*c
a_5	0.002*c
a_6	0.02*c
n_{1I}	181
n_{1J}	181
n_{2I}	200
n_{2J}	200
$n_{1I} + n_{2I}$	381
$n_{1J} + n_{2J}$	381
n_3	10
f_1	1.19
f_2	1.06131494
f_3	1.05381214

3.2 Variation par homothétie

3.2.1 Description des différents essais

En se basant sur le domaine proposé dans [2], on remarque que le domaine proposé dans [3] est le même que le premier mais en ayant subi une homothétie de centre G et de rapport d'environ 0.75. On se propose donc de créer différents domaines qui seront liés au premier par une homothétie de centre G et de rapport b. Un résumé de ces essais est présenté dans le **Tableau 3-2**.

Tableau 3-2 : Description des essais par homothétie

Description des essais par homothétie						
Essai	essai 1	essai 2	essai 3	essai 4	essai 5	essai 6
b	1	0.75	0.5	0.25	2	4
l_1	12.5	9	6.25	3.125	25	50
l_2	20	15	10	5	40	80
Nombre d'éléments	112680	106510	97842	84598	128142	143422

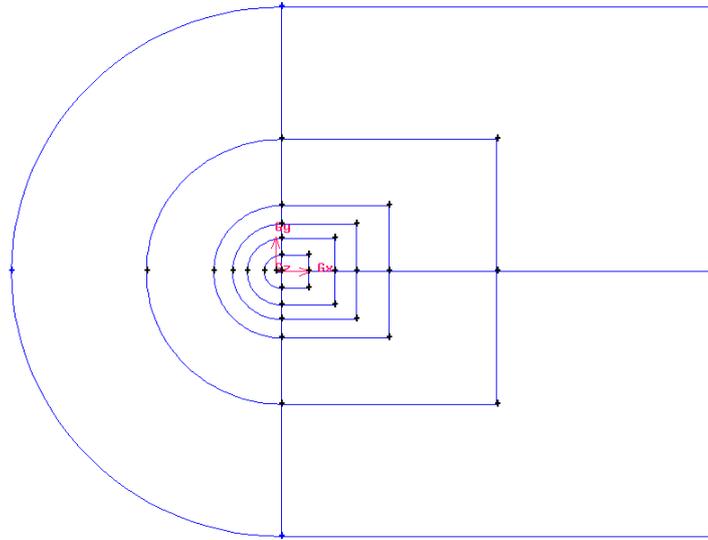


Figure 3-1 : Les différents domaines de maillage

La Figure 3-1 présente les différents domaines de maillage les uns par rapport aux autres.

3.2.2 Résultats

Coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

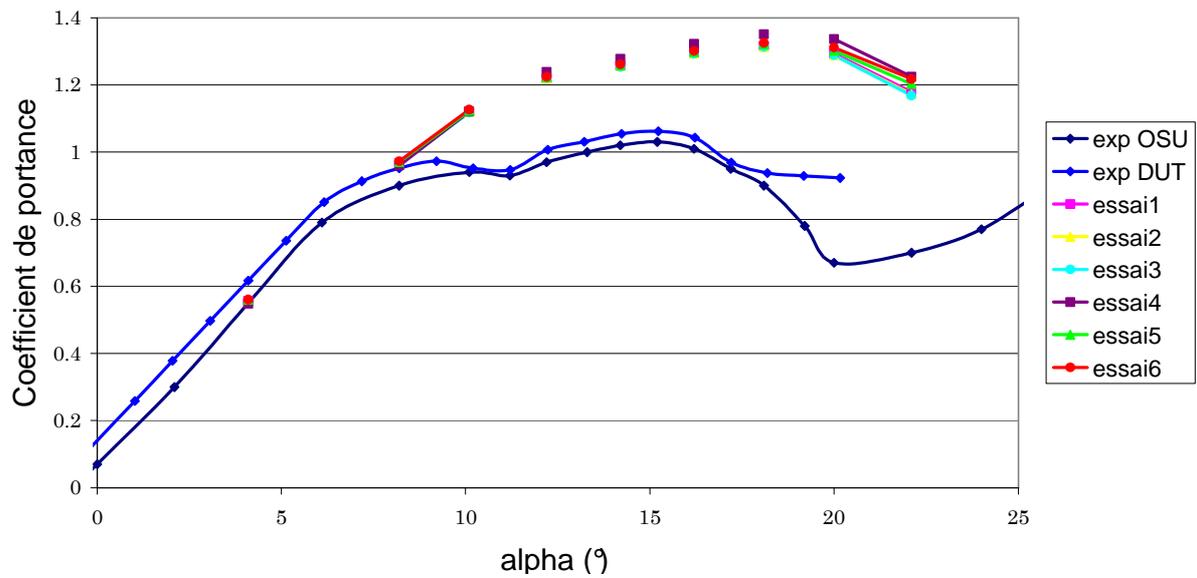


Figure 3-2 : Coefficient de portance pour différents essais

La comparaison des valeurs expérimentales et celles trouvées à l'aide des simulations présentée sur la **Figure 3-2** montre qu'il semble difficile de comparer réellement les valeurs des différents essais 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 du rapport d'homothétie et donc les **Figure 3-3, 3-4 et 3-5** donnent respectivement les coefficients de trainée, de portance et de moment en fonction du rapport d'homothétie b pour des angles d'attaque différents.

Evolution du coefficient de trainée en fonction du rapport d'homothétie pour des angles différents et $Re=10^6$

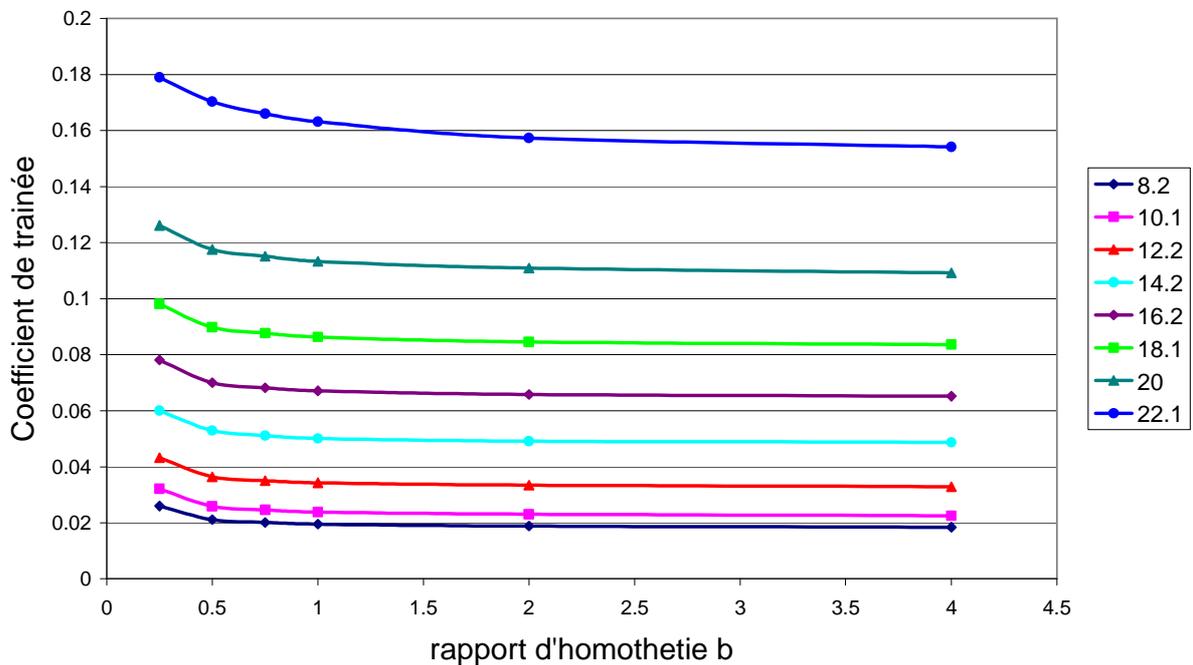


Figure 3-3 : Coefficient de trainée et rapport d'homothétie

Les évolutions du coefficient de trainée en fonction du rapport d'homothétie sont assez similaires suivant les angles d'attaques. On note que le coefficient de trainée décroît à mesure que le rapport d'homothétie augmente, 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 des rapports d'homothétie de plus en plus grands) à mesure que l'angle d'attaque augmente.

Evolution du coefficient de portance en fonction du rapport d'homothétie pour des angles différents et $Re=10^6$

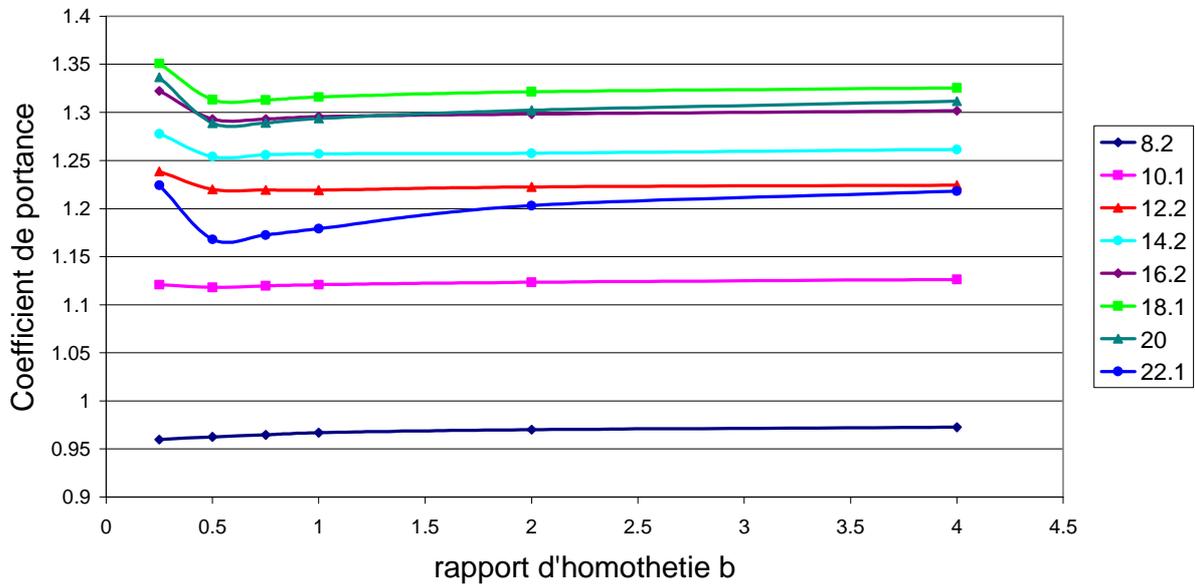


Figure 3-4 : Coefficient de portance et rapport d'homothétie

Evolution du coefficient de moment en fonction du rapport d'homothétie pour des angles différents et $Re=10^6$

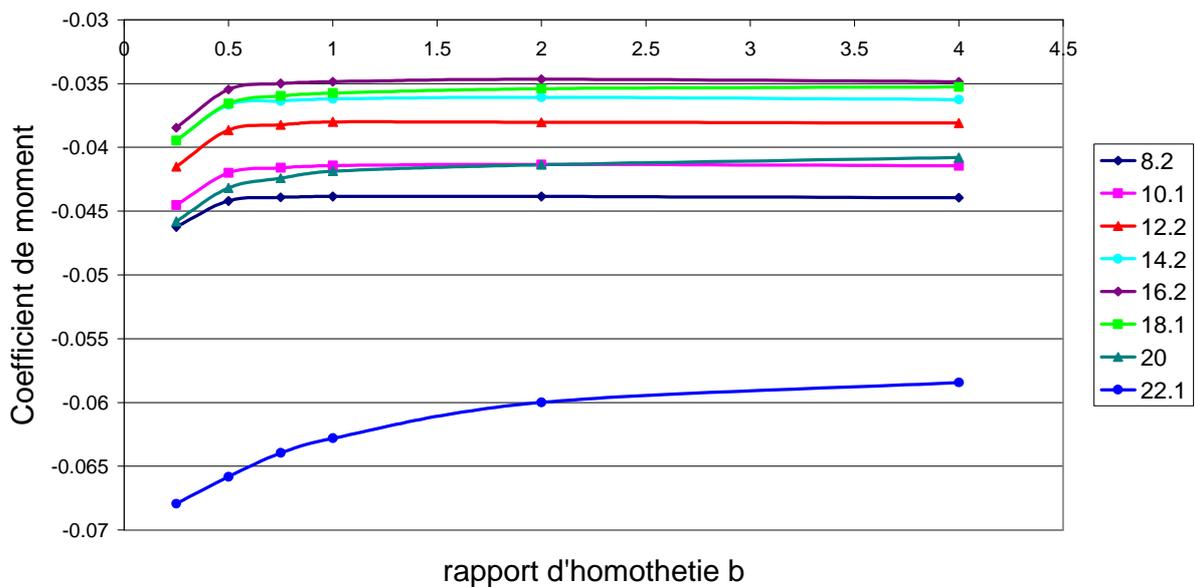


Figure 3-5 : Coefficient de moment et rapport d'homothétie

Les évolutions du coefficient de portance en fonction du rapport d'homothétie sont assez similaires pour les différents angles d'attaques, excepté l'angle de 8.2° . On note que le coefficient de trainée décroît de manière plus ou moins importante (en fonction des angles d'attaque) entre les rapports d'homothétie 0.25 et 0.5. Puis il croît à mesure que le rapport d'homothétie augmente, 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.

Les évolutions du coefficient de moment en fonction du rapport d'homothétie sont assez similaires suivant les angles d'attaques. On note que le coefficient de moment croît à mesure que le rapport d'homothétie augmente, mais qu'il tend à se stabiliser. Cette stabilisation est plus rapide pour des angles d'incidence faible et semble se faire de plus en plus tard à mesure que l'angle d'attaque augmente.

3.2.3 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 un rapport d'homothétie important pour atteindre la stabilisation. Cela confirme ce que nous disions précédemment 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 un même temps de calculs. Ainsi ici les résultats nous permettent de dire que pour l'essai 4 les frontières sont trop proches et elles ne permettent pas de bien modéliser le flux pour des angles d'attaques supérieurs ou égaux à 8.2° . Pour des incidences inférieures à 10° un domaine de maillage aux dimensions de l'essai 3 (rapport d'homothétie 0.5) est suffisant et donnerait des résultats suffisamment proche de ceux données par l'essai 6 pour un temps de calculs bien inférieur (l'essai 6 comporte 143422 éléments alors que l'essai 3 n'en comporte que 97842, c'est-à-dire environ 1/3 de moins). Pour des incidences inférieures à 14° l'essai 2 semblerait plus adapté. De la même manière l'essai 1 lui serait davantage intéressant pour les angles d'attaque inférieurs à 18° . Pour des angles supérieurs à 20° il semble que l'essai 6 serait le plus indiqué, mais il reste à noter la différence du nombre d'éléments pour ce maillage. Il est à imaginer que pour un maillage plus fin le nombre d'éléments croît encore davantage ce qui pourrait demander trop de temps de calculs pour les moyens à notre disposition.

3.3 *Domaine de maillage choisi*

Le décrochage aérodynamique du profil S809 est selon les expérimentations prévu pour des angles inférieurs à 20°. Comme les études suivantes sur la recherche d'un maillage adapté, et le travail sur les modèles aérodynamiques vont se dérouler sur les mêmes angles d'incidence que ceux choisi pour l'étude du domaine de calcul, nous avons choisi de travailler avec le domaine défini par l'essai 1. Bien que nous ayons comme objectif final d'étudier la prédiction du profil aérodynamique pour des angles d'attaque importants, il sera toujours temps de changer de taille de domaine si cela nous semble judicieux. L'ANNEXE B présente le domaine de maillage choisi à travers les coordonnées données dans le **Tableau B-1** et la **Figure B-1**.

CHAPITRE 4 : MAILLAGE AVEC GAMBIT

Afin d'affiner le maillage, on a essayé de diviser la taille du premier élément de la couche limite par deux et il semble que le mailleur ait créé des éléments problématiques tel les « highly skewed elements » (éléments possédant des rapports de dimensions trop importants), et les « inverted elements » (éléments ayant une aire négative). Or on note que pour une corde plus importante ces problèmes n'apparaissent plus. Il paraîtrait donc intéressant pour cette étape de travailler avec une corde plus importante. Le changement de taille de la corde afin de respecter le nombre de Reynolds va imposer un changement de la vitesse et donc du nombre de Mach. Cependant il est dit que lorsque l'on travaille avec un nombre de Mach inférieur à 0.3 (ici nous avons travaillé avec un nombre de Mach de 0.089) l'influence de ce dernier est négligeable. Nous allons quand même réaliser une première étude sur l'influence du nombre de Mach, avant de travailler sur le maillage lui-même.

4.1 L'influence du nombre de Mach

4.1.1 Les essais

Nous allons faire l'étude de trois longueurs de cordes différentes. Nous travaillons avec le domaine de maillage défini dans l'ANNEXE B et les valeurs fixes proposées dans le [Tableau 3-1](#). Afin de pouvoir travailler avec un nombre de Reynolds de 1 million nous allons faire varier la vitesse du fluide pour les différents essais. Les longueurs de corde, vitesse relative, et nombre de Mach sont présentés pour les différents essais dans le [Tableau 4-1](#).

Tableau 4-1 : Longueur de corde et nombre de Mach

Essai	essai 1	essai 2	essai 3
Corde : c (m)	0.5	1	2
Vitesse : V (m/s)	30.90	15.45	7.725
Nombre de Mach	0.0892	0.0446	0.0223

4.1.2 Résultats

La comparaison des valeurs expérimentales et celles trouvées à l'aide des simulations présentée sur la **Figure 4-1** montre, comme prévu, que les valeurs pour les différents nombre de Mach étudiés sont très proches.

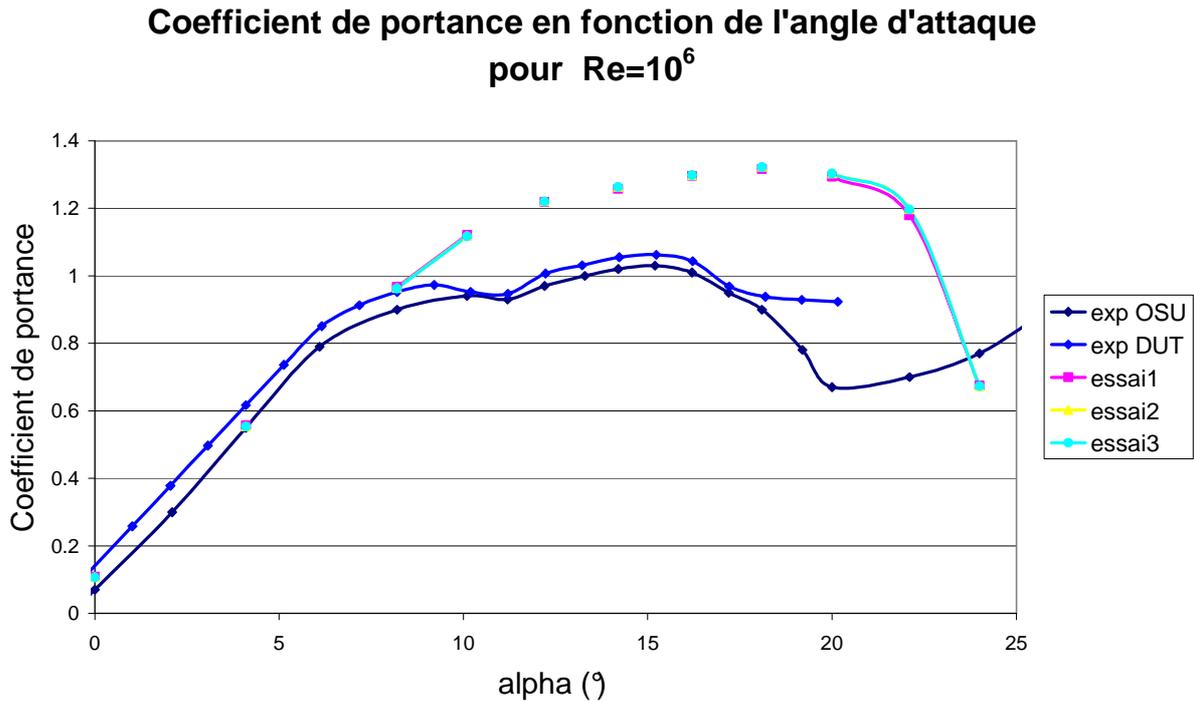


Figure 4-1 : Coefficient de portance pour différents essais

Afin de mieux voir l'influence du nombre de Mach on a préféré présenter les résultats des simulations en fonction du nombre de Mach et donc les **Figure 4-2, 4-3 et 4-4** donnent respectivement les coefficients de traînée, de portance et de moment en fonction du nombre de Mach pour des angles d'attaque différents.

Evolution du coefficient de trainée en fonction du nombre de Mach pour des angles différents et $Re=10^6$

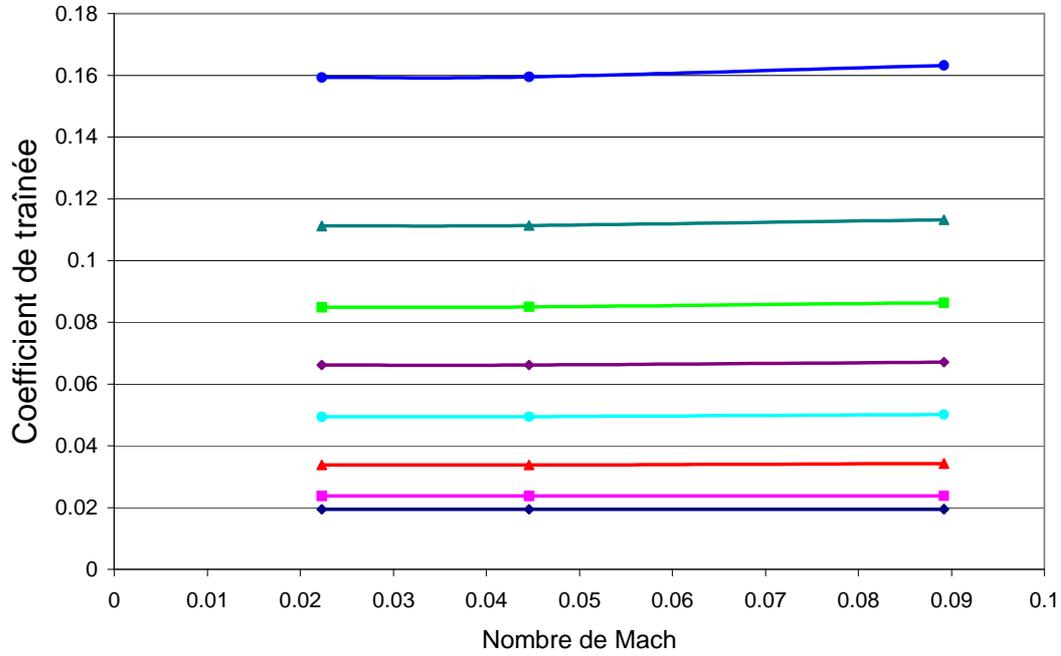


Figure 4-2 : Coefficient de trainée et nombre de Mach

Evolution du coefficient de portance en fonction du nombre de Mach pour des angles différents et $Re=10^6$

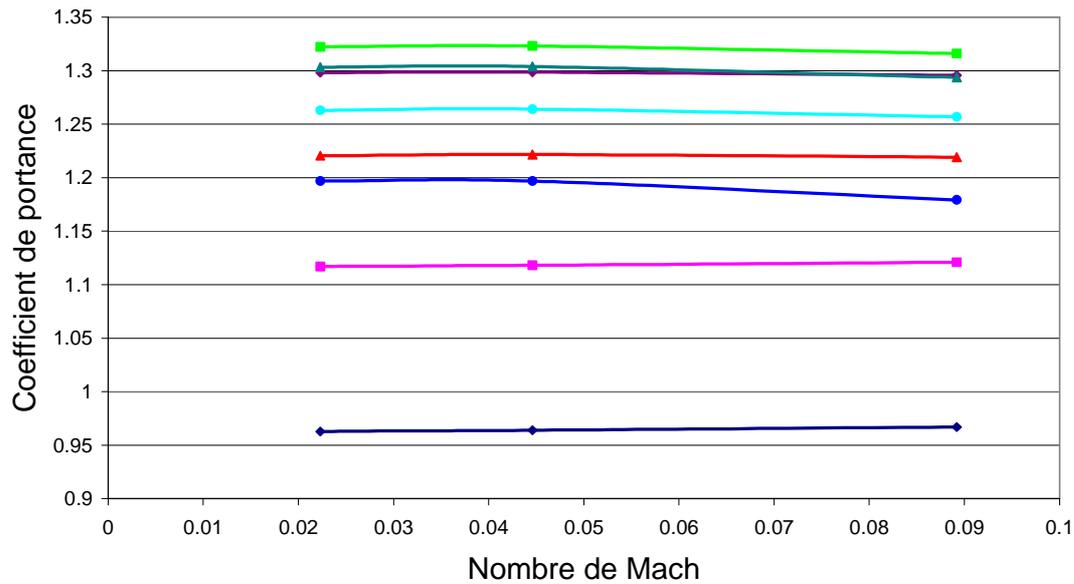


Figure 4-3 : Coefficient de portance et nombre de Mach

On note que l'évolution du coefficient de trainée est assez similaire quelques soient les angles d'incidence. Le coefficient de trainée a tendance à augmenter avec le nombre de Mach. On remarque que l'influence du nombre de Mach se fait davantage sentir pour des angles d'incidence importants.

De même l'évolution du coefficient de portance en fonction du nombre de Mach est assez similaire pour les différents angles d'attaques, excepté pour les angles de 8.2° et 10.1°. On note que le coefficient de trainée a tendance à décroître de manière plus ou moins importante (en fonction des angles d'attaque) au fur et à mesure que le nombre de Mach augmente. Pour les angles 8.2° et 10.1° c'est l'inverse le coefficient de trainée a tendance à croître.

On note que l'évolution du coefficient de moment est assez similaire quelque soit les angles d'incidence. Le coefficient de moment a tendance à décroître avec l'augmentation du nombre de Mach. On remarque que l'influence du nombre de Mach se fait davantage sentir pour des angles d'incidence importants.

Evolution du coefficient de moment en fonction du nombre de Mach pour des angles différents et $Re=10^6$

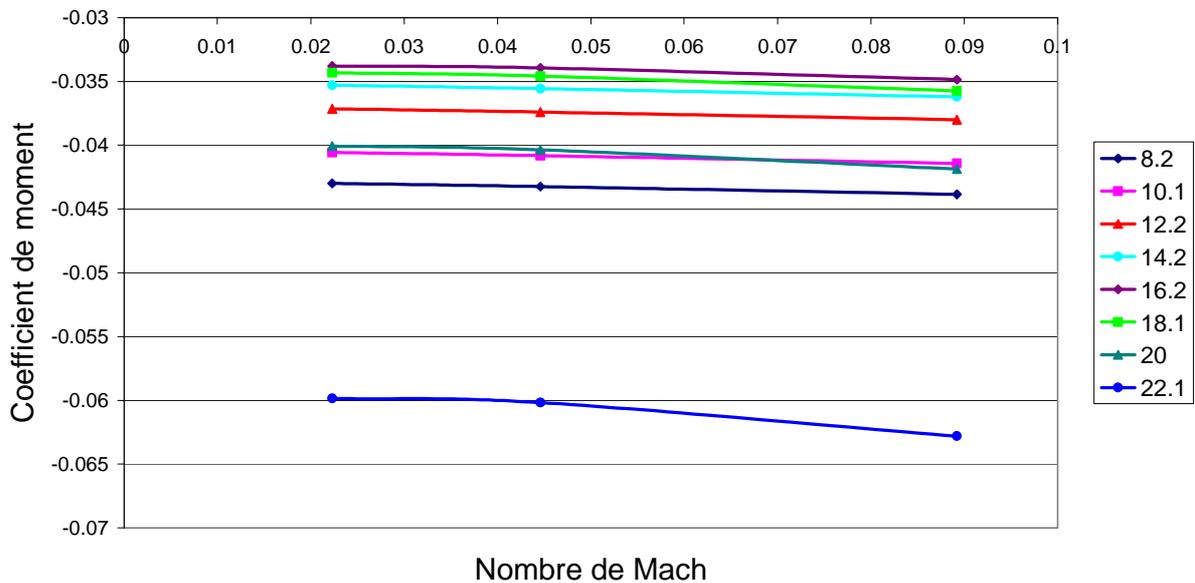


Figure 4-4 : Coefficient de moment et nombre de Mach

4.1.3 Analyse et conclusion

. Les résultats précédents montrent qu'il n'y a que peu de différences entre les valeurs des coefficients pour des nombres de Mach de 0.0223 et 0.0446 (la différence entre les deux est inférieure à 2%). Mais pour un nombre de Reynolds de 0.0892, et un angle d'attaques de 22.1° la différence de valeurs des coefficients peut atteindre 4.8%.

Comme pour l'étude précédente on remarque que la valeur de l'angle d'incidence joue un rôle sur l'influence du nombre de Mach. Ceci peut s'expliquer par le fait que les phénomènes de turbulence vont être influencés par la vitesse du fluide, et que plus le nombre de Mach est élevé plus celle-ci est importante.

Cependant, malgré les quelques différences de valeurs entre les différents nombre de Mach que nous avons soulevées, on peut tout de même considérer que l'influence du nombre de Mach est négligeable si elle nous permet d'affiner le maillage qui va nous permettre d'améliorer les résultats de la simulation de manière plus significative. Ainsi on choisit donc pour l'étude sur le maillage de prendre une longueur de corde de 2m.

4.2 Epaisseur de la couche limite

4.2.1 Les essais

Tout d'abord nous avons essayé de voir l'influence de l'épaisseur du premier élément proche de la couche limite (a_4 et a_5). Ceci est représenté par les essais 1, 2 et 3. Puis, nous avons réalisé des maillages où l'épaisseur de la couche limite (a_2) et la taille des éléments les plus proches de la couche limite (a_4 et a_5) sont égales. Nous avons alors fait varier la taille de ces éléments de manière progressive. Ces maillages se retrouvent dans les essais 3, 4 et 5.

Les nombre d'éléments ne change pas, de même le maillage le long du profil ne change pas selon les essais (le **Tableau 4-2** donne les valeurs fixes), seuls vont changer l'épaisseur de la couche limite (a_2) et la taille des éléments les plus proches de la couche limite (a_4 et a_5).

Tableau 4-2 : Valeurs fixes pour l'affinement du maillage (1)

Valeurs fixes pour l'affinement du maillage (1)	
n_{1J}	181
n_{2I}	200
n_{2J}	200
$n_{1I} + n_{2I}$	381
$n_{1J} + n_{2J}$	381
n_3	10
n_4	100
n_5	120
f_1	1.19

Les valeurs choisies pour les maillages des différents essais sont résumées dans le **Tableau 4-3** :

Tableau 4-3 : Valeurs pour l'affinement du maillage (1)

Définition des essais pour l'affinement du maillage (1)					
Essai	essai 1	essai 2	essai 3	essai 4	essai 5
a_1	0.004^*c	0.004^*c	0.004^*c	0.004^*c	0.004^*c
a_2	0.004^*c	0.004^*c	0.004^*c	0.002^*c	0.001^*c
a_3	0.0002^*c	0.0002^*c	0.0002^*c	0.0001^*c	0.00005^*c
a_4	0.002^*c	0.001^*c	0.004^*c	0.002^*c	0.001^*c
a_5	0.002^*c	0.001^*c	0.004^*c	0.002^*c	0.001^*c
a_6	0.02^*c	0.02^*c	0.02^*c	0.02^*c	0.02^*c

4.2.2 Résultats

Les **Figures 4-5, 4-6** et **4-7** présentent les résultats obtenus, c'est-à-dire respectivement le coefficient de portance, de trainée et de moment en fonction de l'angle d'attaque pour les différents essais :

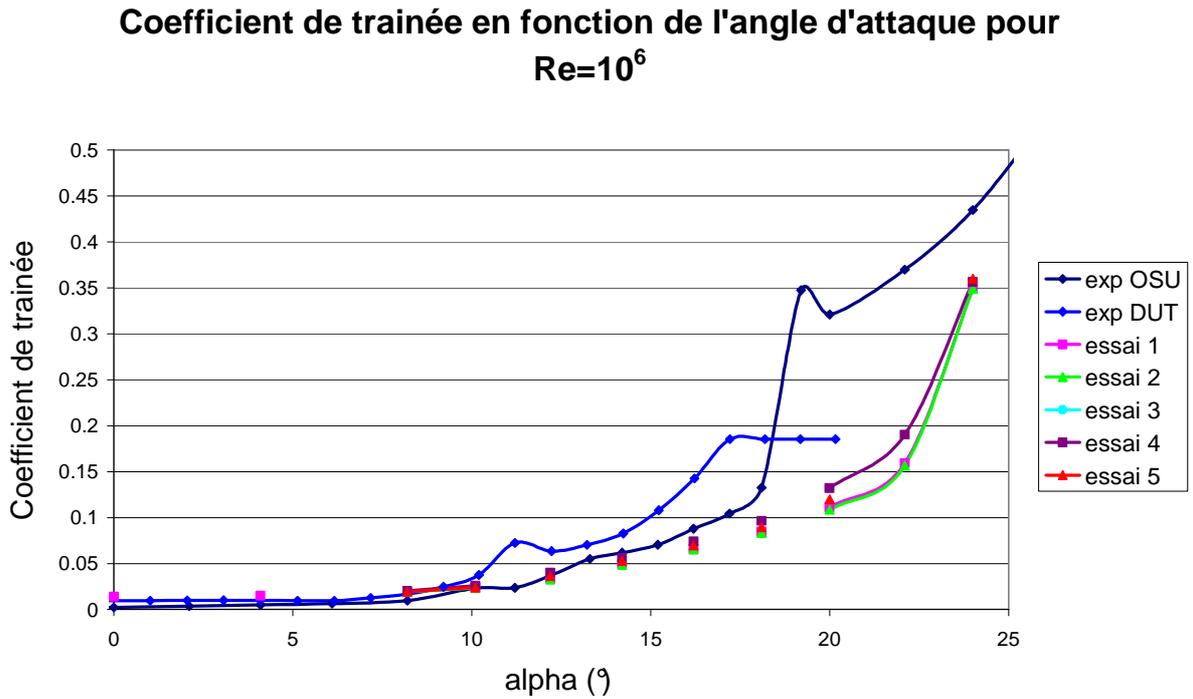


Figure 4-5 : Coefficient de portance et maillage (1)

Tout d'abord, on note que l'essai 3 n'a pas convergé quelque soit l'angle d'attaque. De plus l'essai 5 n'a pas convergé pour un angle de 22.1°.

Les résultats possèdent des courbures très semblables quelques soit le coefficient étudié. Cependant on remarque qu'à partir de 16.2° l'essai 4 est le plus proche des valeurs expérimentales et que l'essai 5 qui lui-même est plus proche que l'essai 1 qui est plus proche que l'essai 2. Les essais se rejoignent pour l'angle 24°.

Coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

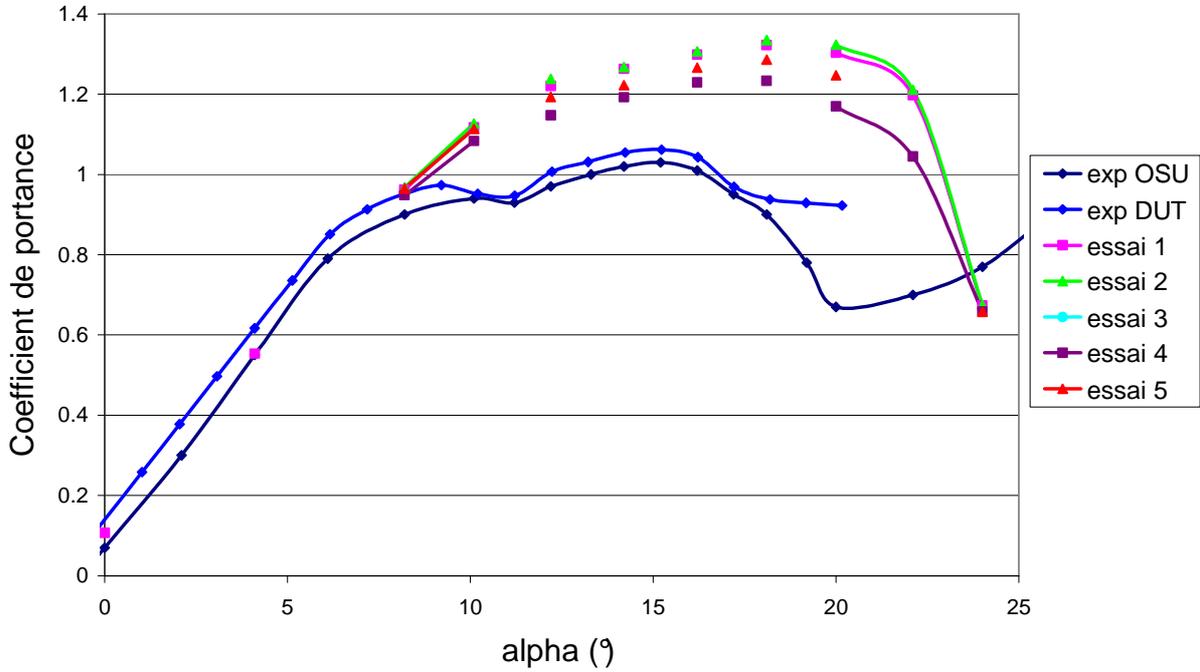


Figure 4-6 : Coefficient de trainée et maillage (1)

Coefficient de moment en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

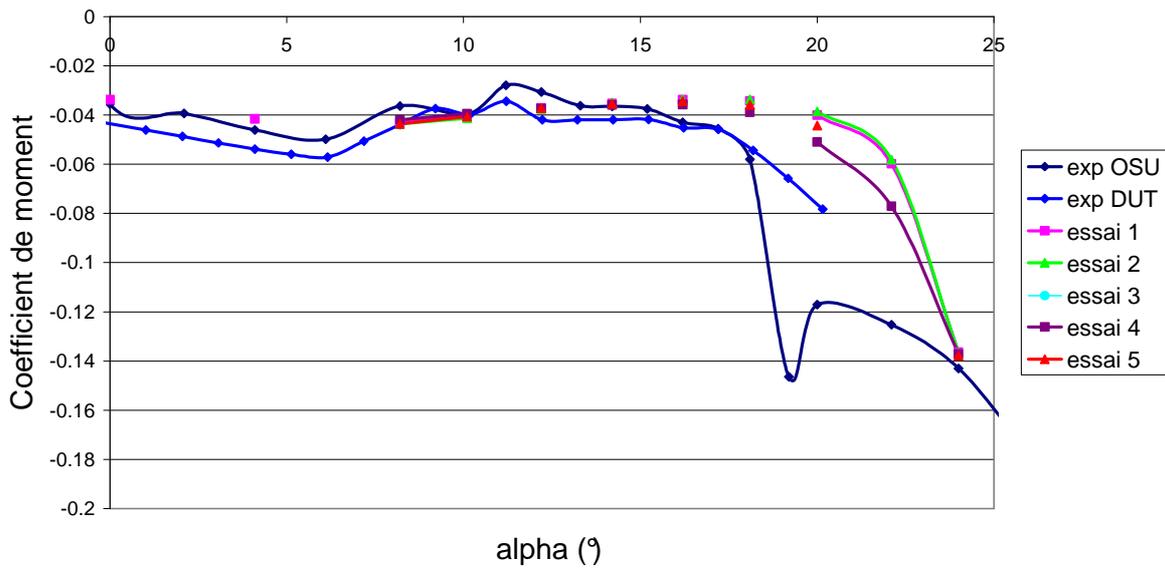


Figure 4-7 : Coefficient de moment et maillage (1)

4.2.3 Analyse

Pour l'essai 3 on peut penser que s'il n'a pas convergé quelque soit l'angle, c'est sans doute que les éléments les plus proches de la couche limite étaient trop gros pour permettre la convergence.

Le fait que les résultats de l'essai 2 soient moins proches que ceux de l'essai 1 montre que la finesse des éléments les plus proches de la couche limite est trop grande par rapport à l'épaisseur de la couche limite. Donc il faudrait un rapport a_2/a_4 inférieur à 4. Ensuite les résultats des essais 4 et 5 montrent puisqu'ils sont plus proches des valeurs expérimentales que ceux des essais 1 et 2 que l'affinement de la couche limite combiné à un rapport a_2/a_4 égale à 1 permet de mieux représenter la réalité aérodynamique. De plus le fait que les résultats de l'essai 5 soient moins proches que ceux de l'essai 4 montre qu'il ne faut pas trop affiner l'épaisseur de la couche limite. Ainsi on peut conclure des résultats précédents qu'un rapport a_2/a_4 égale à 1 combiné à une épaisseur de couche limite égale à $0.002c$ donne les résultats les plus probants.

Pour la suite de l'étude sur le maillage nous garderons donc l'égalité entre l'épaisseur de la couche limite et la taille des éléments les plus proches de celle-ci, ainsi qu'une épaisseur de couche limite égale à $0.002c$.

4.3 Finesse du premier élément de couche limite

4.3.1 Les essais

Les résultats précédents nous ont amené à choisir une couche limite de taille $0.002c$. Maintenant nous allons, à travers quelques essais, rechercher la taille du premier élément donnant les meilleurs résultats. Nous avons choisi de garder un rapport de grossissement dans la couche limite égale à 1.19. Les essais 4, 6 et 7 ont été réalisés dans les mêmes conditions de maillage, seule la taille du premier élément et le nombre d'éléments de la couche limite changent de l'un à l'autre. Les essais de maillage avec un premier élément plus fin que dans l'essai 7 ont amené à la création de géométries problématiques (highly skewed elements). Nous avons alors essayé d'augmenter le nombre d'éléments le long du profil, cela a permis de réaliser encore une étape dans l'affinement du premier élément (essai 8). Cependant nous avons atteint le maximum que nous puissions faire d'un point de vue finesse, car même une nouvelle augmentation du nombre d'éléments le long du profil afin d'affiner la taille du premier élément a amené à des éléments problématiques.

Le **Tableau 4-4** résume les différentes valeurs importantes utilisées pour les essais :

Tableau 4-4 : Valeurs pour l'affinement du maillage (2)

Définition des essais pour l'affinement du maillage (2)				
Essai	essai 4	essai 6	essai 7	essai 8
a ₁	0.004*c	0.004*c	0.004*c	0.003*c
a ₂	0.002*c	0.002*c	0.002*c	0.002*c
a ₃	0.0001*c	0.00005*c	0.000025*c	0.00001*c
a ₄	0.002*c	0.002*c	0.002*c	0.002*c
a ₅	0.002*c	0.002*c	0.002*c	0.002*c
a ₆	0.02*c	0.02*c	0.02*c	0.02*c
n ₁₁	181	181	181	241
n _{1J}	181	181	181	242
n ₂₁	200	200	200	280
n _{2J}	200	200	200	280
n ₁₁ + n ₂₁	381	381	381	521
n _{1J} + n _{2J}	381	381	381	522
n ₃	10	13	17	22
n ₄	100	100	100	100
n ₅	120	120	120	120
f ₁	1.19	1.19	1.19	1.19

4.3.2 Résultats

Les **Figures 4-8, 4-9** et **4-10** présentent les résultats obtenus, c'est-à-dire respectivement le coefficient de portance, de traînée et de moment en fonction de l'angle d'attaque pour les différents essais.

Les résultats semblent identiques pour des angles inférieurs à 14.2°. La première différence visible apparaît pour cet angle au niveau du coefficient de portance. Bien que les trois essais 4, 6 et 7 sont assez proches et similaires d'un point de vue courbure on note qu'à partir de 16.2° l'essai 7 est le plus proche des valeurs expérimentales et que l'essai 6 qui lui-même est plus proche que l'essai 4.

L'essai 8 est celui qui est le plus proche des valeurs expérimentales, il possède la même courbure que les autres (il est à noter qu'il n'a pas convergé pour l'angle 20°). On remarque qu'il est assez détaché des autres essais et que la valeur atteinte pour un angle de 24° par les essais 4, 6 et 7 est atteinte par l'essai 8 pour un angle de 22.1°.

Coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

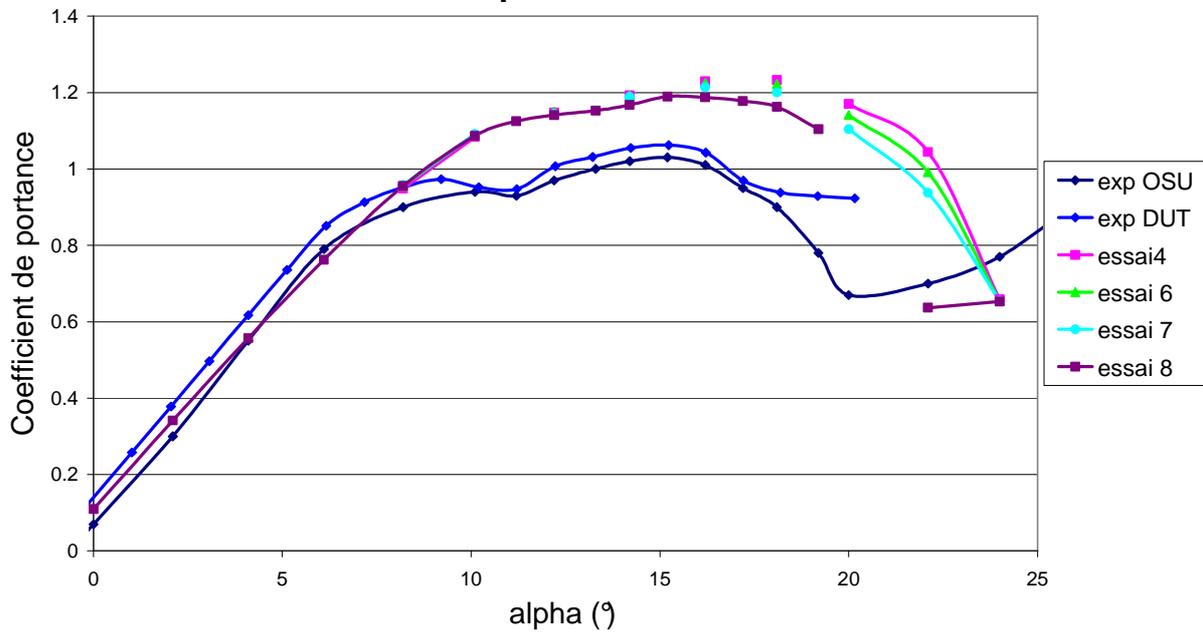


Figure 4-8 : Coefficient de portance et maillage (2)

Coefficient de trainee en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

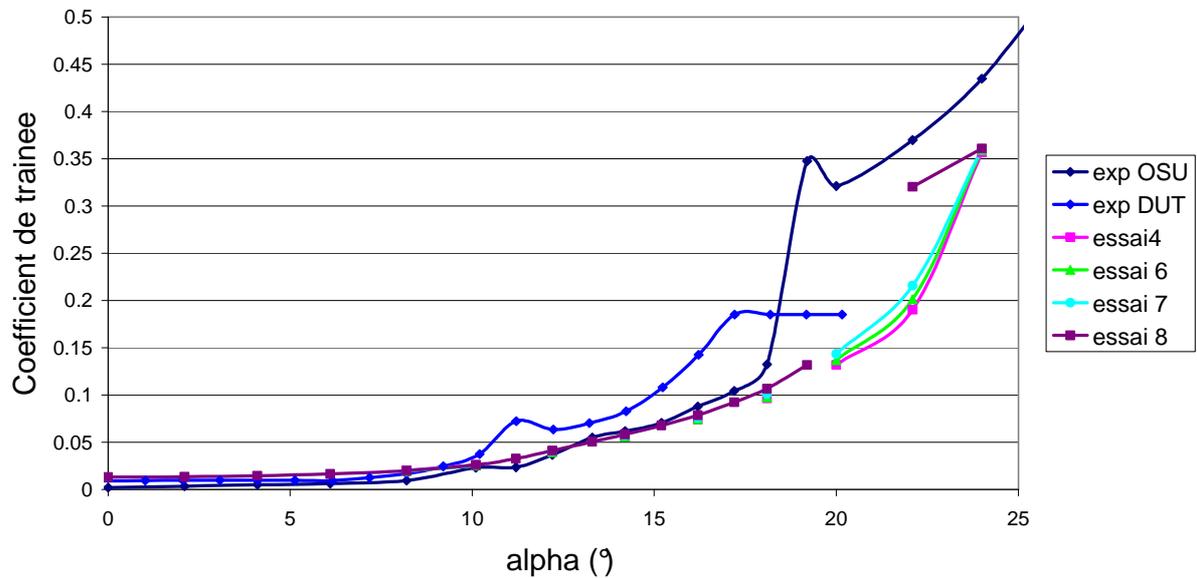


Figure 4-9 : Coefficient de trainee et maillage (2)

Coefficient de moment en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

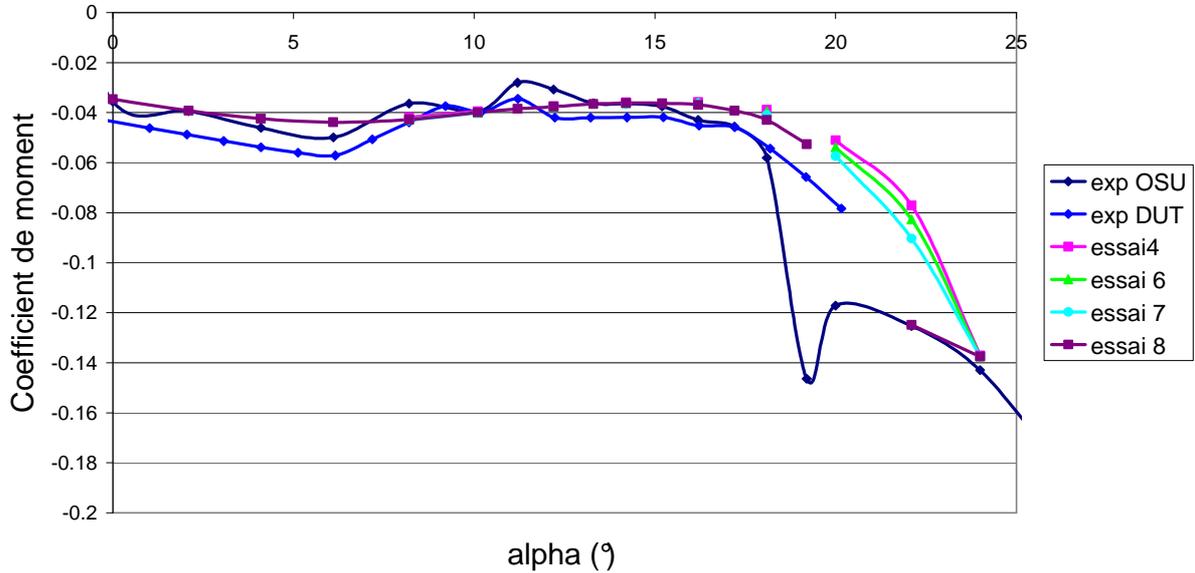


Figure 4-10 : Coefficient de moment et maillage (2)

4.3.3 Analyse

La finesse du premier élément de la couche limite (et de tous les éléments de la couche limite puisque nous avons gardé un facteur de grossissement de 1.19), semble jouer un rôle important dans la description du décrochage aérodynamique. En effet, si pour des angles inférieurs à 14.2° la différence ne se fait pas sentir, pour des angles supérieurs 16.2° on remarque bien que plus le maillage est fin plus la simulation donne des résultats proches des expérimentations.

Ainsi le maillage de l'essai 8 semble être le plus adapté. Les valeurs définissant ce maillage sont rappelées dans l'ANNEXE C par le **Tableau C-1**. De plus le fichier *.jou de l'essai 8 est présenté dans l'ANNEXE D.

CHAPITRE 5 : MAILLAGE AVEC CFX-MESH

Voulant commencer l'étude des maillages CFX avec un maillage ressemblant à celui de l'essai 8 (du point de vue des valeurs de taille d'élément et de facteur de grossissement), mais tout en gardant une corde de 0.457m (comme dans [4]), nous avons donc essayé d'avoir un plus petit élément (a_3) égale à $0.00001 \cdot 0.457\text{m}$. Le mailleur CFX-Mesh nous a alors indiqué un problème. Il ne pouvait pas créer d'éléments aussi fins.

Si dans le chapitre précédent nous avons choisi d'augmenter la corde pour palier à ce problème, ce qui nous était permis car les maillages de GAMBIT ne serviront qu'à la comparaison de modèles, dans ce chapitre nous n'augmenterons pas la corde car les maillages CFX serviront à l'étude des phénomènes aéroélastiques où la corde joue un rôle important (voir Phase 3 du projet).

5.1 Prérogatives

5.1.1 La corde du profil

Comme expliqué précédemment nous avons choisi de réaliser des essais avec une corde de 0.457 m. Cela implique donc, puisque le fluide est de l'air à 25°C, avec une viscosité dynamique de $1.831 \cdot 10^{-5}$ Pa.s et une masse volumique de $1.185 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, que nous devons réaliser les simulations avec une vitesse relative de $33.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ si nous tenons à obtenir un nombre de Reynolds de 1 million.

5.1.2 Domaine d'étude

Nous nous basons sur l'étude faite au chapitre 3, et nous choisissons donc le domaine tel qu'il est défini dans l'ANNEXE C. Cependant nous réaliserons le domaine de maillage comme si la corde choisie est de 0.5m et non de 0.457m. Cela donne un domaine un peu plus important. Ainsi, dans l'ANNEXE E est présenté le domaine d'étude tel qu'il est choisi pour cette étude.

5.1.3 Les valeurs fixes pour les différents essais

Afin de ne pas entraîner trop de calculs nous avons choisi de réaliser des essais seulement sur les facteurs de grossissement f_2 et f_4 et sur la taille des éléments le long du profil. Ainsi les valeurs définissant la couche limite et la taille des éléments aux extrémités du domaine seront fixes.

5.2 Facteurs de grossissement f_2 et f_4

5.2.1 Les essais

Tout d'abord nous avons essayé de voir l'influence des facteurs de grossissement f_2 et f_4 (que nous choisirons égaux) qui définissent l'évolution de la taille des éléments entre le profil et les extrémités du domaine d'étude.

Ainsi nous avons réalisé trois maillages différents où ont été gardées constantes les valeurs définissant la taille des éléments le long du profil (a_1), celle définissant la couche limite (a_3 , n_3 et f_1) et celle définissant la taille des éléments aux extrémités (a_7). Ces valeurs sont résumées dans le **Tableau 5-1**.

Tableau 5-1 : Valeurs fixes pour l'étude des facteurs de grossissement f_2 et f_4

Dénomination	Valeur
a_1 (m)	0.001
a_3 (m)	0.00001
n_3	17
f_1	1.19
a_7 (m)	0.2

Les valeurs choisies pour les maillages des différents essais sont résumées dans le **Tableau 5-2** :

Tableau 5-2 : Valeurs variables pour l'étude des facteurs de grossissement f_2 et f_4

Dénomination	Valeurs		
	essai 1	essai 2	essai 3
f_2	1.19	1.02	1.015
f_4	1.19	1.02	1.015
Nombre d'éléments	41172	99042	138546

5.2.2 Résultats

Les **Figures 5-1**, **5-2** et **5-3** présentent les résultats obtenus, c'est-à-dire respectivement le coefficient de trainée, de portance et de moment en fonction de l'angle d'attaque pour les différents essais. Nous avons ajouté à ces différents essais les résultats obtenus pour l'essai 8 avec le meilleur GAMBIT sous la dénomination GAMBIT.

Coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

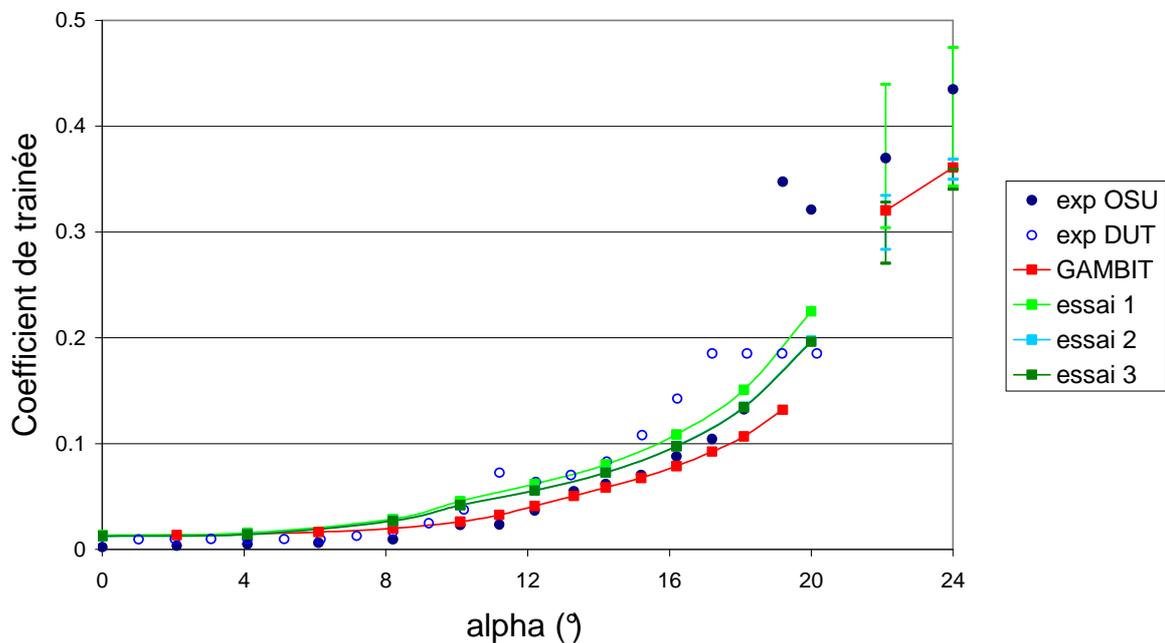


Figure 5-1 : Coefficient de trainée et facteurs de grossissement

Tout d'abord, on remarque que les résultats des maillages avec le meilleur CFX-Mesh sont bien plus proches des résultats expérimentaux que ceux du maillage avec GAMBIT.

De plus, on note que quelque soit l'essai, il n'a pas convergé pour les angles de 22.1° et 24°. Chacun d'eux à oscillé, et les barres d'erreur représentent entre quelles valeurs les résultats ont oscillé.

Coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

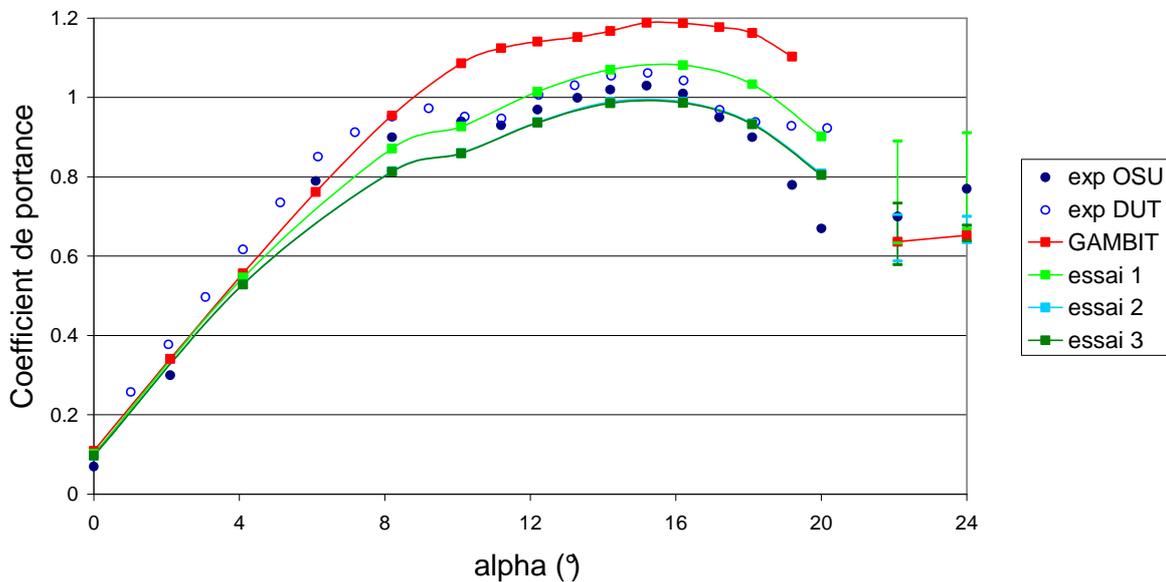


Figure 5-2 : Coefficient de portance et facteurs de grossissement

Coefficient de moment en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

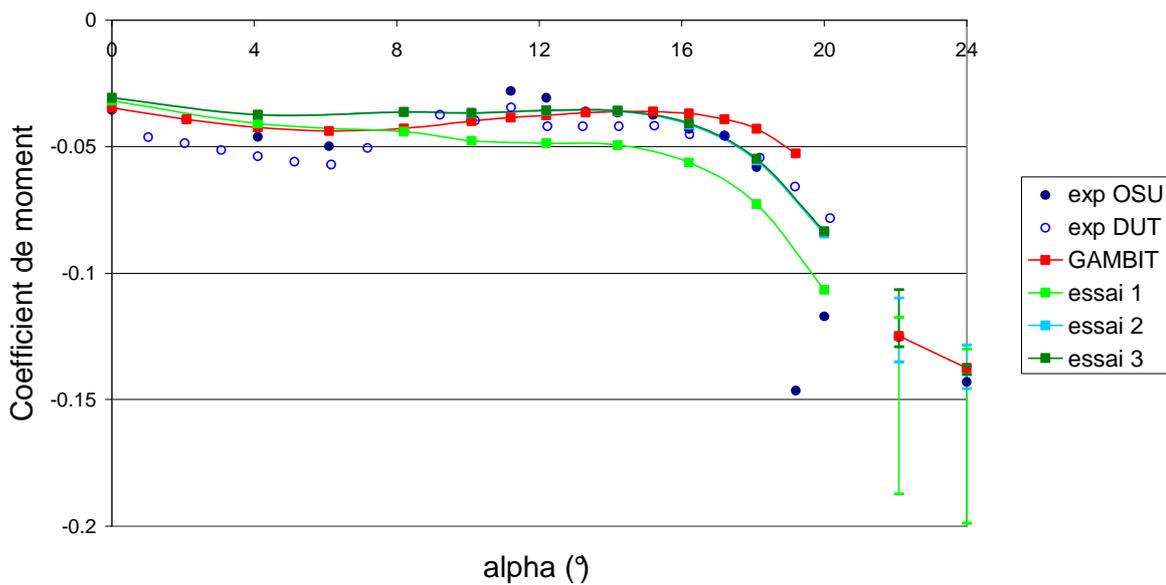


Figure 5-3 : Coefficient de moment et facteurs de grossissement

Ensuite on note que les essais 2 et 3 donnent des résultats quasi identiques sauf pour les angles 22.1° et 24° où les oscillations sont un peu différentes. On note aussi que les résultats de l'essai 1 oscillent davantage que ceux des essais 2 et 3.

Pour le coefficient de traînée, les différences entre les résultats prédits par les essais 1, 2 et 3 ne semblent pas être très importantes hormis les oscillations soulevées précédemment.

Pour le coefficient de portance, si les résultats de l'essai 1 semblent être plus proche des valeurs expérimentales que ceux des essais 2 et 3 pour des angles inférieurs à 12.2°, ils s'éloignent peu à peu des valeurs expérimentales et sont plus éloignés que les résultats des essais 2 et 3 pour des angles supérieurs à 16.2°.

Pour le coefficient de moment les résultats de l'essai 1 sont supérieurs aux valeurs expérimentales alors que les résultats des essais 2 et 3 semblent prédire des valeurs quasi identiques aux valeurs expérimentales.

5.2.3 Analyse

Le fait que les résultats prédits avec les essais du meilleur CFX-Mesh soient plus proches des valeurs expérimentales porte à croire que le logiciel CFX est plus performant pour résoudre les problèmes avec des maillages non-structurés qu'avec des maillages structurés et que CFX travaille plus aisément avec les maillages issus de son maillleur.

L'oscillation des résultats pour 22.1° et 24° soulève le fait que le décrochage aérodynamique demande un calcul en régime non stationnaire pour obtenir un bon résultat.

Le fait que les essais 2 et 3 donnent des résultats quasi identiques montre que l'on a atteint la limite de finesse du raffinement.

Le fait que l'essai 1 donne des résultats plus satisfaisants que les essais 2 et 3 au début et moins satisfaisants pour des incidences importantes montre que pour des incidences faibles où le décrochage n'est pas très important un maillage trop fin (essais 2 et 3) va mettre en avant de manière importante ces phénomènes décrits par le modèle $k-\omega$ SST, alors qu'un maillage moins fin (essai 1) estompe ces phénomènes. On peut alors se demander si le mode purement turbulent n'est pas à remettre en question dans cette zone de faibles incidences (<12.2°) et s'il ne faudrait pas appliquer un modèle de transition.

Le fait que les résultats prédits par l'essai 1 soit moins satisfaisants pour des grands angles d'incidence (>16.2°) que ceux proposés par les essais 2 et 3, confirme l'idée que les essais 2 et 3 permettent de

mieux percevoir les phénomènes de turbulence que l'essai 1. Le maillage de l'essai 1 semble trop grossier pour bien décrire ces phénomènes.

5.2.4 Temps de calculs

Le **Tableau 5-3** présente le temps de calculs en secondes CPU et le nombre d'étape intermédiaires (step) pour les différents essais.

On note en premier lieu que l'essai 1 est celui qui demande le moins de temps de calcul, par contre c'est celui qui demande en général le plus d'étapes. On note aussi que les essais 2 et 3 nécessitent en moyenne le même nombre d'étapes, mais un temps de calcul très différent. En effet le temps de calculs pour l'essai 3 est très supérieur à celui pour l'essai 2.

Tableau 5-3 : temps de calculs pour l'étude des facteurs de grossissement f_2 et f_4

angle	essai 1		essai 2		essai 3	
	temps (sec CPU)	nombre de step	temps (sec CPU)	nombre de step	temps (sec CPU)	nombre de step
8.2°	680.4	143	2055	166	2744	144
10.1°	1311	280	3295	259	4959	257
12.2°	1094	235	2239	197	3389	193
14.2°	822.7	196	1745	156	2740	145
16.2°	830.3	187	1708	133	2367	128
18.1°	982.2	224	1598	129	2290	119
20°	1095	258	2320	173	3620	195

Afin de mieux se rendre compte des différences de temps de calculs, le **Tableau 5-4** présente une comparaison des temps de calculs divisés par le temps mis pour l'essai 1.

Tableau 5-4 : temps de calculs par rapport à l'essai 1

angle	essai 1	essai 2	essai 3
8.2°	1	3.02	4.03
10.1°	1	2.51	3.78
12.2°	1	2.05	3.10
14.2°	1	2.12	3.33
16.2°	1	2.06	2.85
18.1°	1	1.63	2.33
20°	1	2.12	3.31

Ainsi, on remarque que pour parvenir aux résultats de l'essai 2 on a du multiplier en moyenne le temps de calculs de l'essai 1 par 2.22 alors que pour l'essai 3 on du multiplier ce même temps de calculs de l'essai 1 par une moyenne de 3.25.

La différence entre le nombre d'étapes et le fait que ce soit l'essai 1 qui demande le plus d'étape de calcul, montre que le maillage de cet essai est moins adapté au modèle $k-\omega$ SST que le sont les deux autres essais. En effet, il nécessite plus d'étapes afin de résoudre les équations du modèle.

Le fait que les essais 2 et 3 demandent beaucoup plus de temps de calculs est du aux nombre d'éléments constituant les maillages de ces essais. En effet le maillage de l'essai 2 comporte 2.41 fois le nombre d'éléments de l'essai 1 et l'essai 3 comporte 3.37 fois le nombre d'éléments de l'essai 1.

5.2.5 Conclusion

L'étude de ces maillages a permis tout d'abord de constater que les maillages réalisés à l'aide de CFX-Mesh semblent plus adaptés que ceux de GAMBIT aux études à l'aide de CFX.

Ensuite, nous avons vu que pour bien modéliser ce qui se passait lors des décrochages aérodynamiques, le facteur de grossissement était important. Cependant on a vu qu'il n'est pas forcément nécessaire de diminuer les facteurs de grossissement (donc d'augmenter le nombre d'éléments) à partir d'un certain niveau de finesse. En effet pour l'essai 3 le facteur de grossissement est plus fin que celui de l'essai 2, le nombre d'éléments est multiplié par 1.40, le temps de calculs par 1.46 et pourtant les résultats ne sont guère plus intéressants. Ainsi on choisira plutôt un maillage comme celui de l'essai 2 moins lourd en calcul que celui de l'essai 3 et donnant des résultats très similaires.

5.3 Taille des éléments le long du profil A_1

5.3.1 Les essais

Nous avons essayé dans cette partie de voir l'influence de la taille des éléments le long du profil, en variant le paramètre a_1 .

Ainsi nous avons réalisé trois maillages différents où ont été gardées constantes les valeurs définissant la couche limite (a_3 , n_3 et f_1), celles définissant la taille des éléments aux extrémités (a_7) et les facteurs de grossissement (f_2 et f_4) définissant l'évolution de la taille des éléments entre le profil et les extrémités du domaine d'étude. Ces valeurs sont résumées dans le **Tableau 5-5**.

Tableau 5-5 : Valeurs fixes pour l'étude des éléments le long du profil

Dénomination	Valeur
a_3 (m)	0.00001
n_3	17
f_1	1.19
a_7 (m)	0.2
$f_2=f_4$	1.02

Les valeurs choisies pour les maillages des différents essais sont résumées dans le **Tableau 5-6** :

Tableau 5-6 : Valeurs variables pour l'étude des éléments le long du profil

Dénomination	Valeurs		
	essai 2	essai 4	essai 5
a_1 (m)	0.001	0.0005	0.0015
Nombre d'éléments	99042	139784	75074

5.3.2 Résultats

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

Tout d'abord, on note que l'essai 5 a convergé à chaque angle d'attaque, et que l'essai 4 n'a pas convergé à partir de l'angle de 20° .

Ensuite, on note que les essais 2 et 4 donnent des résultats assez proches sauf pour les angles 20° , 22.1° et 24° où les oscillations sont très différentes. De plus, on note que l'essai 5 se détache des autres essais notamment pour le coefficient de portance.

Coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

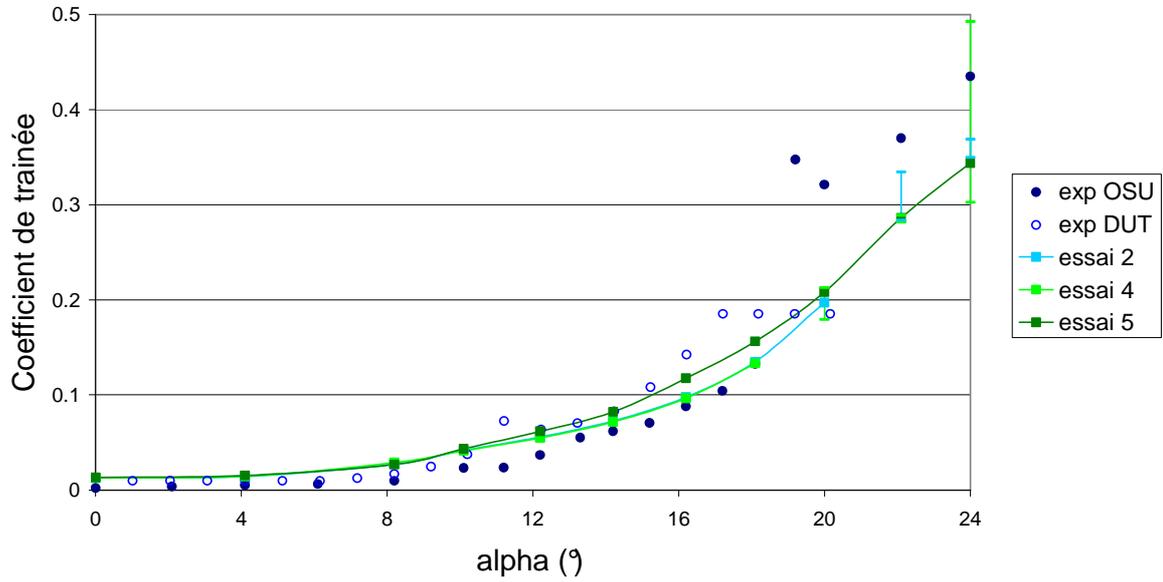


Figure 5-4 : Coefficient de trainée en fonction du nombre d'éléments le long du profil

Coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

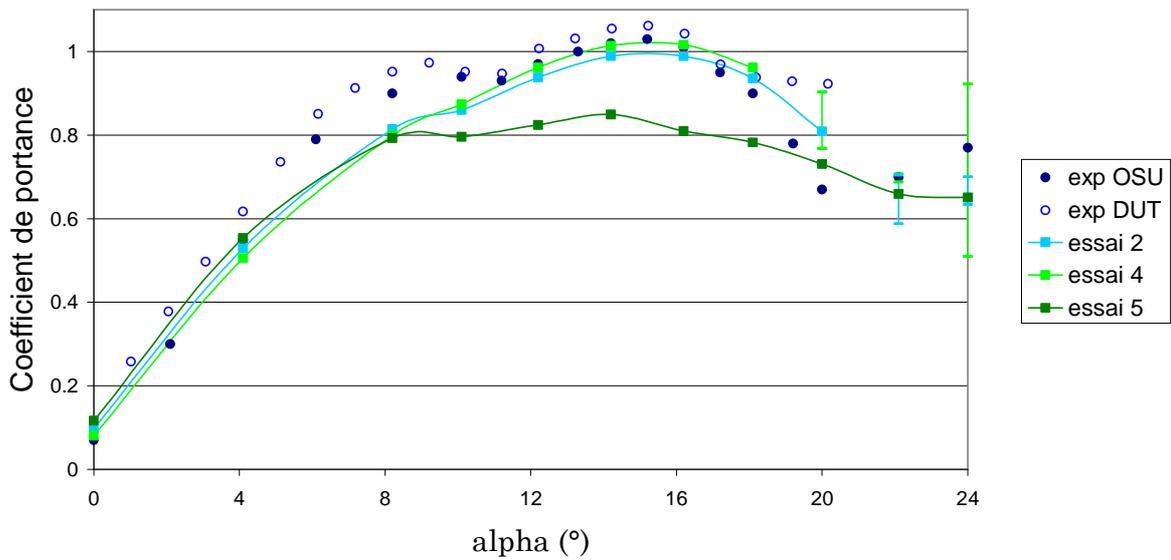


Figure 5-5 : Coefficient de portance en fonction du nombre d'éléments le long du profil

Coefficient de moment en fonction de l'angle d'attaque pour $Re=10^6$

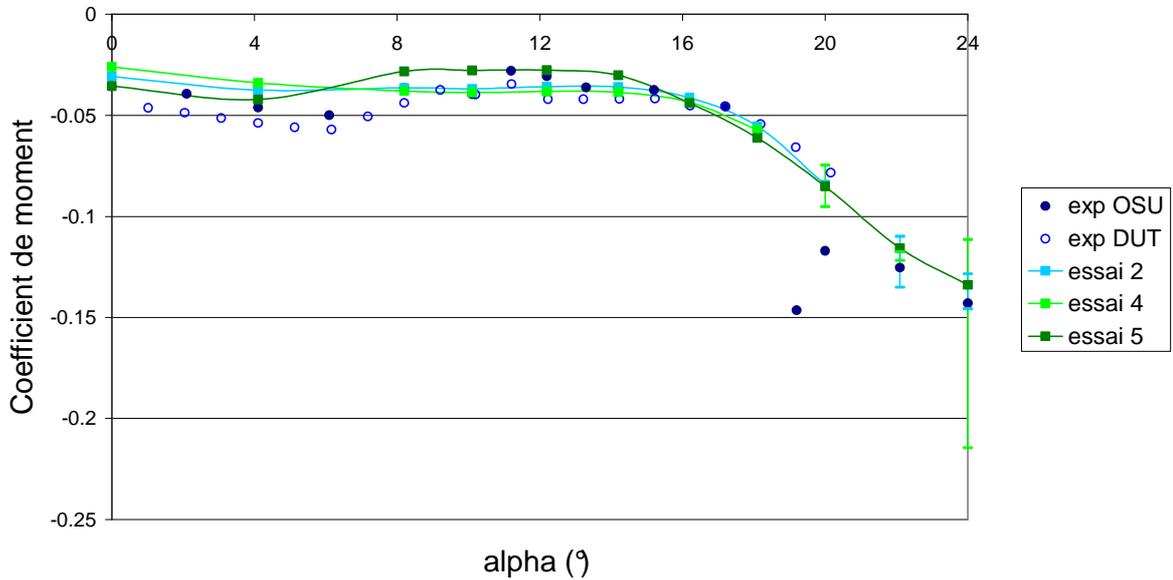


Figure 5-6 : Coefficient de moment en fonction du nombre d'éléments le long du profil

Pour le coefficient de traînée, les différences entre les résultats prédits par les essais 2, 4 et 5 ne semblent pas être très importantes hormis les oscillations soulevées précédemment.

Pour le coefficient de portance, les résultats de l'essai 5 semblent être très en dessous des valeurs expérimentales alors que ceux des essais 2 et 4 semblent bien plus proches.

Pour le coefficient de moment les résultats de l'essai 5 sont inférieurs (en valeurs absolue) aux valeurs expérimentales alors que les résultats des essais 2 et 4 semblent prédire des valeurs quasi identiques aux valeurs expérimentales.

5.3.3 Analyse

Le fait que l'essai 5 ait convergé peut être expliqué par le fait que le nombre d'éléments le long du profil ne soit pas assez important pour pouvoir déceler les phénomènes turbulents et le décrochage ce qui permet de converger même pour des angles importants.

La différence entre les essais 2 et 4 est que ce dernier est plus fin ce qui lui permet sans doute de déceler plus tôt que l'essai 2 les phénomènes turbulents et décrochages aérodynamiques, ce qui explique les oscillations dès l'angle de 20°.

5.3.4 Temps de calculs

Le **Tableau 5-7** présente le temps de calcul en secondes CPU et le nombre d'étapes intermédiaires (step) pour les différents essais.

On note en premier lieu que l'essai 5 est celui qui demande le moins de temps de calcul, et c'est aussi celui qui demande en général le moins d'étapes. On note aussi que l'essai 4 nécessite un temps de calcul plus important et un nombre d'étapes lui aussi plus important que les autres essais.

Tableau 5-7 : temps de calculs pour l'étude des éléments le long du profil

angle	essai 2		essai 4		essai 5	
	temps (sec CPU)	nombre de step	temps (sec CPU)	nombre de step	temps (sec CPU)	nombre de step
10.1°	3295	259	9415	485	1470	148
12.2°	2239	197	5398	278	1435	145
14.2°	1745	156	3232	170	1321	151
16.2°	1708	133	3121	166	1253	131
18.1°	1598	129	3673	200	1335	137

Afin de mieux se rendre compte des différences de temps de calcul, le **Tableau 5-8** présente une comparaison des temps de calcul divisés par le temps mis pour l'essai 2.

Tableau 5-8 : temps de calculs par rapport à l'essai 2

angle	essai 2	essai 4	essai 5
10.1°	1	2.86	0.45
12.2°	1	2.41	0.64
14.2°	1	1.85	0.76
16.2°	1	1.83	0.73
18.1°	1	2.30	0.84

Ainsi, on remarque que pour parvenir aux résultats de l'essai 4 on a du multiplier en moyenne le temps de calcul de l'essai 2 par 2.25 alors que pour l'essai 5 on du multiplier ce même temps de calcul de l'essai 2 par 0.68 en moyenne.

La différence entre le nombre d'étapes et le fait que ce soit l'essai 4 qui demande le plus d'étapes de calculs, montre qu'un affinement plus important le long du profil permet au modèle $k-\omega$ SST de mettre en évidence davantage de phénomènes complexes (tel que les décrochages aérodynamiques). En effet l'essai 4 nécessite plus d'étapes afin de résoudre ces phénomènes. Le fait que l'essai 5 demande moins d'étape de calculs, confirme cette hypothèse. En effet, puisque le maillage de cet essai est plus grossier le long du profil, cet essai met moins en évidence les phénomènes complexes et nécessite donc moins d'étapes.

La différence des temps de calcul est en partie expliqué par le nombre d'étapes mais surtout par le nombre d'éléments composant les maillages des différents essais. En effet le maillage de l'essai 4 comporte 1.41 fois le nombre d'éléments de l'essai 2 et celui de l'essai 5 comporte 0.76 fois le nombre d'éléments de l'essai 2.

5.3.5 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 5). Cependant on a pu remarquer qu'une trop grande finesse mène à des temps de calculs beaucoup plus importants et n'apporte pas forcément de grandes différences de résultats. Les résultats proposés par l'essai 4 sont un peu différents de ceux proposés par l'essai 2, mais on peut se demander, même en supposant que l'on soit plus proche des valeurs expérimentales (ce que l'on n'a pas pu vérifier puisque nous étions en mode stationnaire et qu'il aurait fallu être en mode transitoire), si ces différences sont suffisamment importantes pour que l'on multiplie par 2.25 le temps de calculs.

Nous avons choisi de mettre en avant pour les travaux futurs le maillage de l'essai 2 qui nous paraît plus économique en temps de calculs pour des résultats tout à fait satisfaisants. Ce maillage est présenté dans l'ANNEXE F.

CHAPITRE 6 : CONCLUSION GENERALE

Cette étude sur le domaine de calcul et sur le maillage d'un écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne nous a permis de mettre en évidence certains phénomènes typiques à la modélisation d'écoulements de fluides :

- L'importance du choix du domaine d'étude : l'impact des conditions limites sur les résultats d'une simulation sont très importants. De plus nous avons vu que cet impact est plus ou moins grand selon les angles d'incidences étudiés, il paraît alors essentiel de bien choisir son domaine de calcul en fonction des valeurs de l'angle d'incidence étudiés.
- L'influence du nombre de Mach : l'impact du nombre de Mach (et donc ici de la longueur de la corde) sur les résultats peut engendrer des différences de prédiction notamment pour des angles élevés. Bien que certains considèrent qu'en dessous de $M=0.1$ il n'y ait aucune différence pour les modélisations, nous avons remarqué que pour de grands angles d'incidence (supérieurs à 20°) la différence entre les résultats pouvait devenir non négligeable.
- La présence d'une couche limite et la finesse des éléments la composant permet d'obtenir de bon résultats. Cependant nous avons remarqué que la couche limite ne doit pas être trop fine sinon elle ne permet pas d'obtenir des résultats intéressants.
- La finesse d'un maillage notamment proche du profil et le long de celui-ci permet d'accroître la qualité des résultats. Mais nous avons aussi remarqué qu'un maillage trop fin augmentait de manière très importante le temps de calculs, et n'augmentait pas forcément la qualité des résultats. Ainsi il faut choisir son maillage dépendamment du temps que l'on souhaite accorder aux différentes simulations.

Ainsi le chercheur, afin de choisir son domaine d'étude et le maillage approprié aux recherches qu'il compte faire, doit se poser la question du domaine d'incidence qu'il compte étudier, et du temps qu'il souhaite accorder au logiciel pour réaliser les calculs ou bien de la qualité des résultats dont il a besoin.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ahlström A. *Aeroelastic simulation of wind turbine dynamics*. Doctoral thesis in Structural Mechanics, KTH, Sweden, 2005.
- [2] Bhaskaran, *Tutorial Fluent*.
- [3] Nathan Logsdon. *A procedure for numerically analyzing airfoils and wing sections*. thesis, University of Missouri, Columbia, December 2006.
- [4] Reuss Ramsay R., Hoffman M. J., Gregorek G. M. *Effects of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the S809 Airfoil*. Master thesis, NREL Ohio State University, Ohio, NREL/TP-442-7817, December 1995.
- [5] Somers, D.M. *Design and Experimental Results for the S809 Airfoil*. NREL/SR-440-6918, 1997
- [6] M. M. Hand, D. A. Simms, L. J. Fingersh, D. W. Jager, J. R. Cotrell, S. Schreck, and S. M. Larwood, *Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns*, NREL TP-500-29955, December 2001 2001.
- [7] D. Simms, S. Schreck, M. Hand, and L. J. Fingersh, *NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements*, NREL TP-500-29494, June 2001 2001.
- [8] ANSYS CFX, Release 11.0
- [9] F. Villalpando, *Simulation numérique pour la prédiction des coefficients de trainée et de portance d'un profil NACA 63-415 givré*. Master thesis 2007.

ANNEXE A COORDONNEES ET SECTION DU PROFIL S809

Tableau A-1 : Coordonnées relatives du profil S809

Coordonnées relatives du profil S809			
abscisse	ordonnée supérieure		abscisse
			Ordonnée inférieure
0	0	0	-0.0001
0.00037	0.00275	0.0014	-0.00498
0.00575	0.01166	0.00933	-0.01272
0.01626	0.02133	0.02321	-0.02162
0.03158	0.03136	0.04223	-0.03144
0.05147	0.04143	0.06579	-0.04199
0.07568	0.05132	0.09325	-0.05301
0.1039	0.06082	0.12397	-0.06408
0.1358	0.06972	0.15752	-0.07467
0.17103	0.07786	0.19362	-0.08447
0.2092	0.08505	0.23175	-0.09326
0.24987	0.09113	0.27129	-0.1006
0.29259	0.09594	0.31188	-0.10589
0.33689	0.09933	0.35328	-0.10866
0.38223	0.10109	0.39541	-0.10842
0.42809	0.10101	0.43832	-0.10484
0.47384	0.09843	0.48234	-0.09756
0.52005	0.09237	0.52837	-0.08697
0.56801	0.08356	0.57663	-0.07442
0.61747	0.07379	0.62649	-0.06112
0.66718	0.06403	0.6771	-0.04792
0.71606	0.05462	0.72752	-0.03558
0.76314	0.04578	0.77668	-0.02466
0.80756	0.03761	0.82348	-0.01559
0.84854	0.03017	0.86677	-0.00859
0.88537	0.02335	0.90545	-0.0037
0.91763	0.01694	0.93852	-0.00075
0.94523	0.01101	0.96509	0.00054
0.96799	0.006	0.98446	0.00065
0.98528	0.00245	0.99612	0.00024
0.99623	0.00054	1	0
1	0		

Section du profil S809

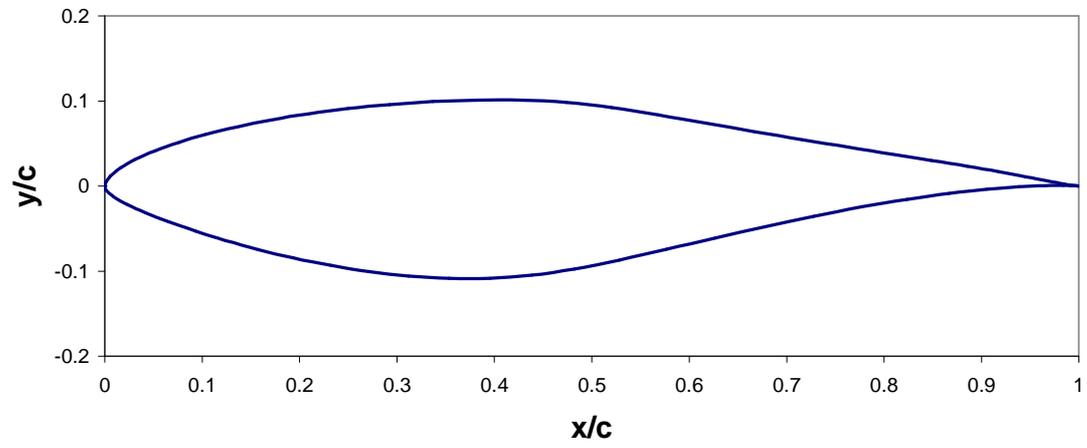


Figure A-1 : Section du profil S809

ANNEXE B DOMAINE D'ETUDE RETENU POUR GAMBIT

Tableau B-1 : Coordonnées du domaine d'étude retenu pour GAMBIT

Point	X	Y	Z
A	c	12.5c	0
B	21c	12.5c	0
C	21c	0	0
D	21c	- 12.5c	0
E	c	- 12.5c	0
F	-11.5c	0	0
G	c	0	0
H	0	0	0
Ga	c	0.0001	0
Ge	c	-0.0001	0
Cb	21c	0.0001	0
Cd	21c	-0.0001	0

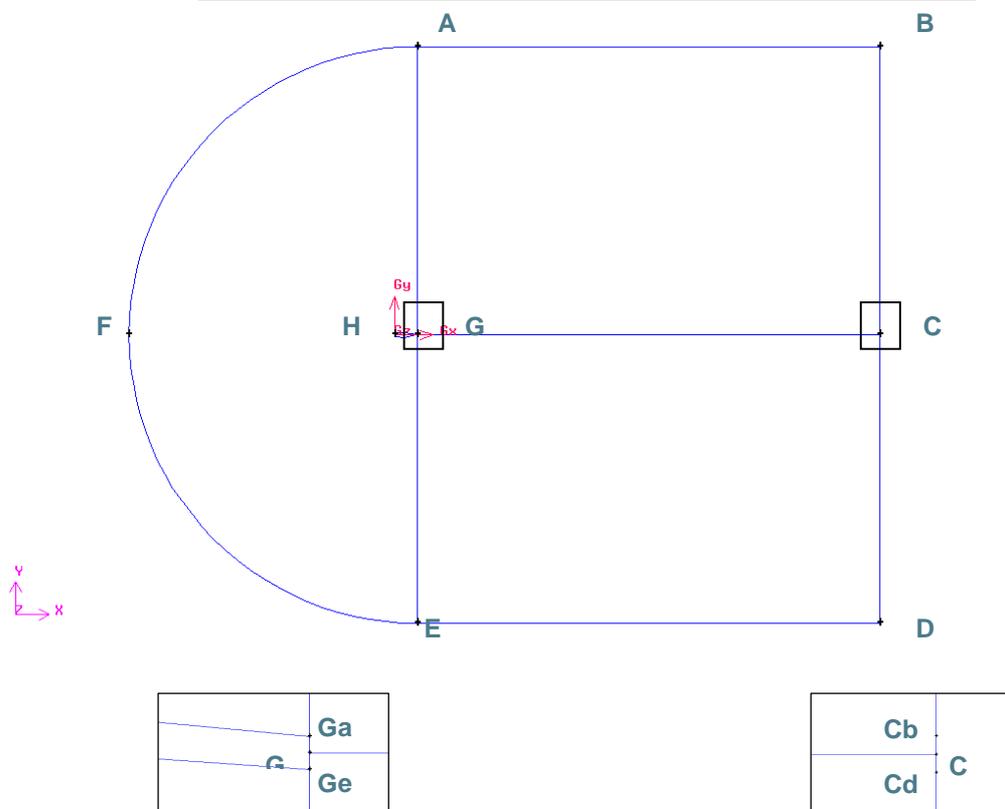


Figure B-1 : Domaine d'étude pour GAMBIT

ANNEXE C MAILLAGE RETENU POUR GAMBIT

Tableau C-1 : Définition du maillage retenu pour GAMBIT

symbole	valeur
a_1	0.003*c
a_2	0.002*c
a_3	0.00001*c
a_4	0.002*c
a_5	0.002*c
a_6	0.02*c
n_{1i}	241
n_{1j}	242
n_{2i}	280
n_{2j}	280
$n_{1i} + n_{2i}$	521
$n_{1j} + n_{2j}$	522
n_3	22
n_4	100
n_5	120
f_1	1.19

ANNEXE D **ESSAI8.JOU**

```
import iceminput "S:\\Travaux_ANSYS\\Corde\\S809_edge_c2.dat" edge
vertex create "A" coordinates 2 25 0
vertex create "B" coordinates 42 25 0
vertex create "C" coordinates 42 0 0
vertex create "D" coordinates 42 -25 0
vertex create "E" coordinates 2 -25 0
vertex create "F" coordinates -23 0 0
vertex create "G" coordinates 2 0 0
vertex create "H" coordinates 0 0 0
vertex create "Ga" coordinates 2 0.0001 0
vertex create "Ge" coordinates 2 -0.0001 0
vertex create "Cb" coordinates 42 0.0001 0
vertex create "Cd" coordinates 42 -0.0001 0
edge create "AB" straight "A" "B"
edge create "GC" straight "G" "C"
edge create "ED" straight "E" "D"
edge create "AGa" straight "A" "Ga"
edge create "GaG" straight "Ga" "G"
edge create "BCb" straight "B" "Cb"
edge create "EGe" straight "E" "Ge"
edge create "GeG" straight "Ge" "G"
edge create "DCd" straight "D" "Cd"
edge create "CdC" straight "Cd" "C"
edge create "AF" center2points "G" "A" "F" minarc arc
edge create "EF" center2points "G" "E" "F" minarc arc
face create "airfoil" wireframe "edge.1" "edge.2" "GaG" "GeG" real
face create "circ_1" wireframe "AGa" "GaG" "EGe" "GeG" "AF" "EF" real
edge create "CbC" straight "Cb" "C"
face create "rect_1" wireframe "AB" "GC" "AGa" "GaG" "BCb" "CbC" real
face create "rect_2" wireframe "GC" "ED" "EGe" "GeG" "DCd" "CdC" real
face subtract "circ_1" faces "airfoil"
edge modify "edge.18" label "lower"
edge modify "edge.19" label "upper"
edge split "lower" percentarclength 0.3 connected
edge split "upper" percentarclength 0.7 connected
edge modify "lower" label "HJ"
vertex modify "vertex.81" label "J"
vertex modify "vertex.82" label "I"
edge modify "upper" label "Gal"
edge modify "edge.20" label "JGe"
edge modify "edge.21" label "IH"
```

```

edge split "AGa" percentarclength 0.99984 connected
edge split "EGe" percentarclength 0.99984 connected
edge split "BCb" percentarclength 0.99984 connected
edge split "DCd" percentarclength 0.99984 connected
edge modify "edge.22" label "AgGa"
edge modify "edge.23" label "EgGe"
edge modify "edge.24" label "BcCb"
edge modify "edge.25" label "DcCd"
vertex modify "vertex.83" label "Ag"
vertex modify "vertex.84" label "Eg"
vertex modify "vertex.85" label "Bc"
vertex modify "vertex.86" label "Dc"
vertex modify "vertex.32" label "Ga"
vertex modify "vertex.64" label "Ge"
edge split "AB" percentarclength 0.0001 connected
edge split "GC" percentarclength 0.0001 connected
edge split "ED" percentarclength 0.0001 connected
edge modify "AB" label "AAb"
edge modify "GC" label "GGc"
edge modify "ED" label "EEd"
edge modify "edge.26" label "AbB"
edge modify "edge.27" label "GcC"
edge modify "edge.28" label "EdD"
vertex modify "vertex.87" label "Ab"
vertex modify "vertex.88" label "Gc"
vertex modify "vertex.89" label "Ed"
edge mesh "AgGa" "EgGe" "BcCb" "DcCd" lastlength ratio1 0.00002 intervals 22
edge mesh "AGa" "BCb" "EGe" "DCd" lastlength ratio1 0.002 intervals 100
edge mesh "Gal" "JGe" successive ratio1 1 size 0.006
edge modify "IH" backward
edge mesh "IH" "HJ" lastlength ratio1 0.006 intervals 280
edge mesh "AF" firstlength ratio1 0.006 intervals 521
edge mesh "EF" firstlength ratio1 0.006 intervals 522
blayer create first 0.00002 growth 1.19 total 0.00395695 rows 21 transition 1 \
trows 0
blayer attach "b_layer.1" face "circ_1" "circ_1" "circ_1" "circ_1" edge "HJ" \
"Gal" "JGe" "IH" add
face mesh "circ_1" map size 1
edge mesh "GaG" "GeG" "CbC" "CdC" successive ratio1 1 size 0.00002
edge mesh "AAb" "GGc" "EEd" firstlength ratio1 0.00002 intervals 22
edge mesh "AbB" "GcC" "EdD" firstlength ratio1 0.002 intervals 120
face mesh "rect_1" "rect_2" map size 1
volume create translate "circ_1" "rect_1" "rect_2" vector 0 0 0.04 withmesh
face modify "face.5" label "EF"
face modify "face.7" label "HJ"
face modify "face.8" label "JG"
face modify "face.11" label "GI"
face modify "face.12" label "IH"
face modify "face.14" label "EF"
face modify "face.15" label "circ_2"
face modify "face.14" label "AF"

```

```
face modify "face.18" label "G1"  
face modify "face.26" label "rect_12"  
face modify "face.33" label "G2"  
face modify "face.23" label "BC"  
face modify "face.25" label "AB"  
face modify "face.24" label "Ab"  
face modify "face.21" label "Cb"  
face modify "face.19" label "C1"  
face modify "face.30" label "DC"  
face modify "face.32" label "Dc"  
face modify "face.34" label "C2"  
face modify "face.37" label "rect_22"  
face modify "face.28" label "ED"  
face modify "face.27" label "Ed"  
solver select "ANSYS"  
physics create "inlet" btype "NODE" face "EF" "AF" "Ab" "AB" "Ed" "ED"  
physics create "outlet" btype "NODE" face "C1" "Cb" "BC" "DC" "Dc" "C2"  
physics create "airfoil" btype "NODE" face "HJ" "JG" "GI" "IH" "G1" "G2"  
physics create "symmetry1" btype "NODE" face "circ_1" "rect_1" "rect_2"  
physics create "symmetry2" btype "NODE" face "circ_2" "rect_12" "rect_22"  
physics create "fluid" ctype "FLUID" volume "volume.1" "volume.2" "volume.3"  
save name "S:\\Travaux_ANSYS\\Maillage\\maillage\\S809_essai8.dbs"  
export ansys "S:\\Travaux_ANSYS\\Maillage\\maillage\\S809_essai8.cdb"
```

ANNEXE E DOMAINE D'ETUDE POUR CFX-MESH

Tableau E-1 : Coordonnées du domaine d'étude retenu pour CFX-Mesh

Point	X (m)	Y (m)	Z (m)
A	0.457	6.25	0
B	10.457	6.25	0
D	10.457	- 6.25	0
E	0.457	- 6.25	0
G	0.457	0	0
H	0	0	0

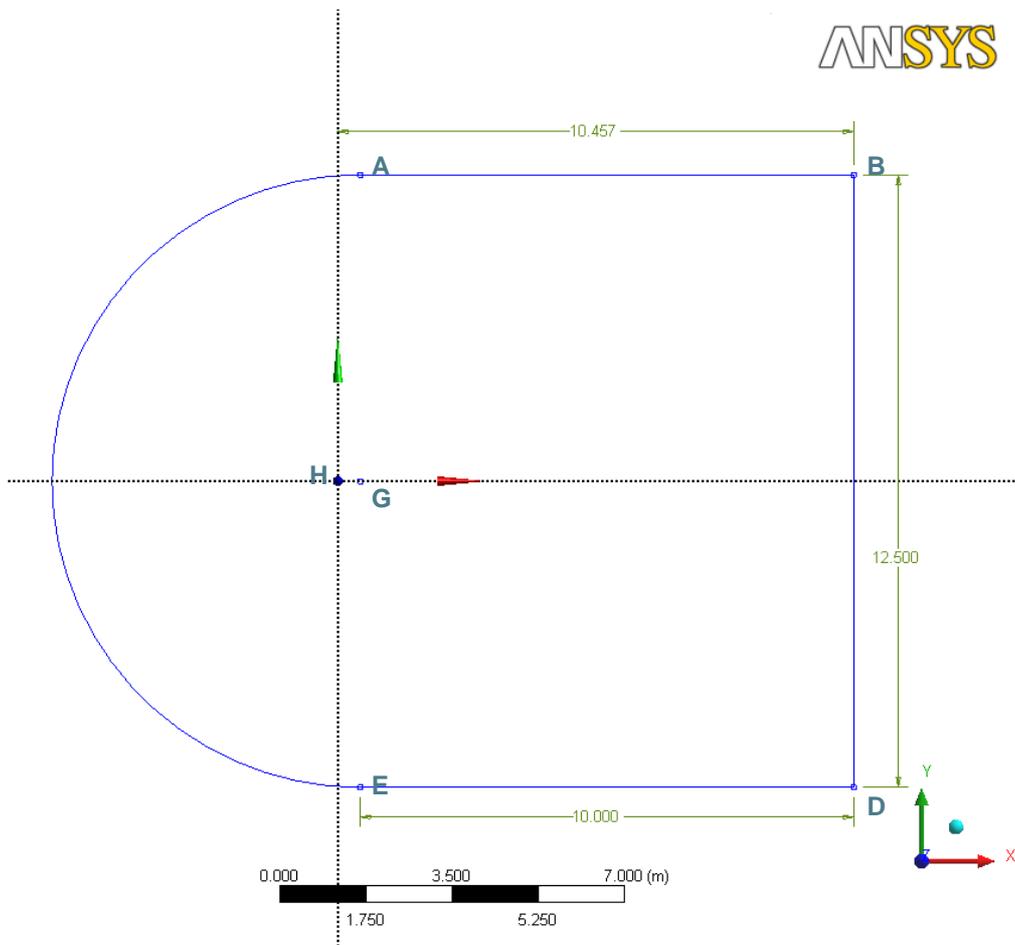


Figure E-1 : Domaine d'étude pour CFX-Mesh

ANNEXE F MAILLAGE RETENU POUR CFX-MESH

Tableau F-1 : Définition du maillage retenu pour CFX-Mesh

Dénomination	Valeur
a_1 (m)	0.001
f_2	1.02
a_7 (m)	0.2
f_4	1.02
a_3 (m)	0.00001
n_3	17
f_1	1.19

ANSYS

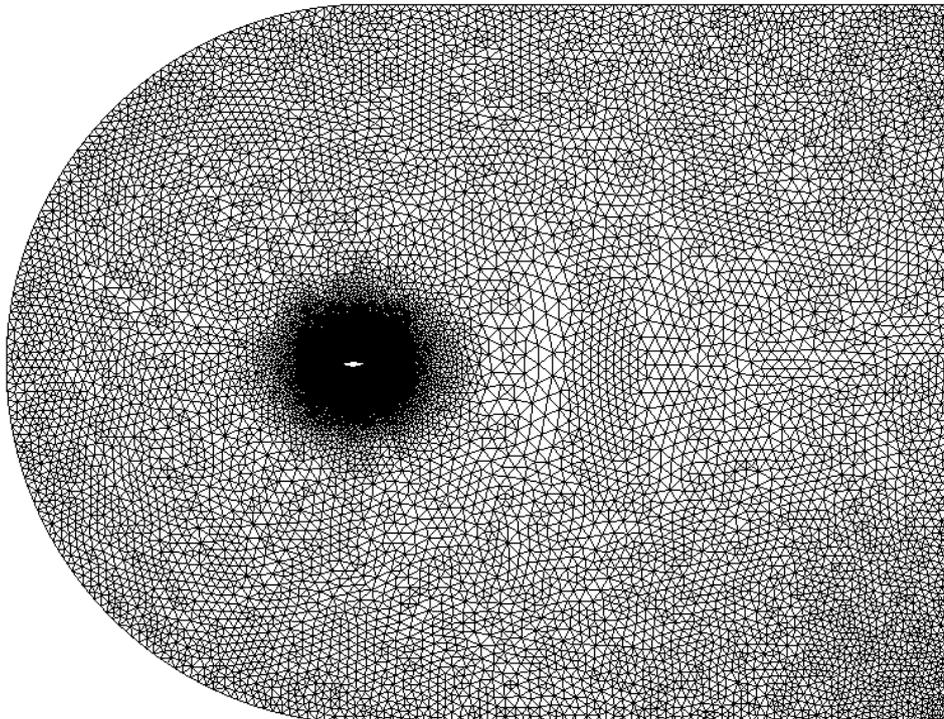


Figure F-1 : Maillage non structuré retenu pour CFX-Mesh

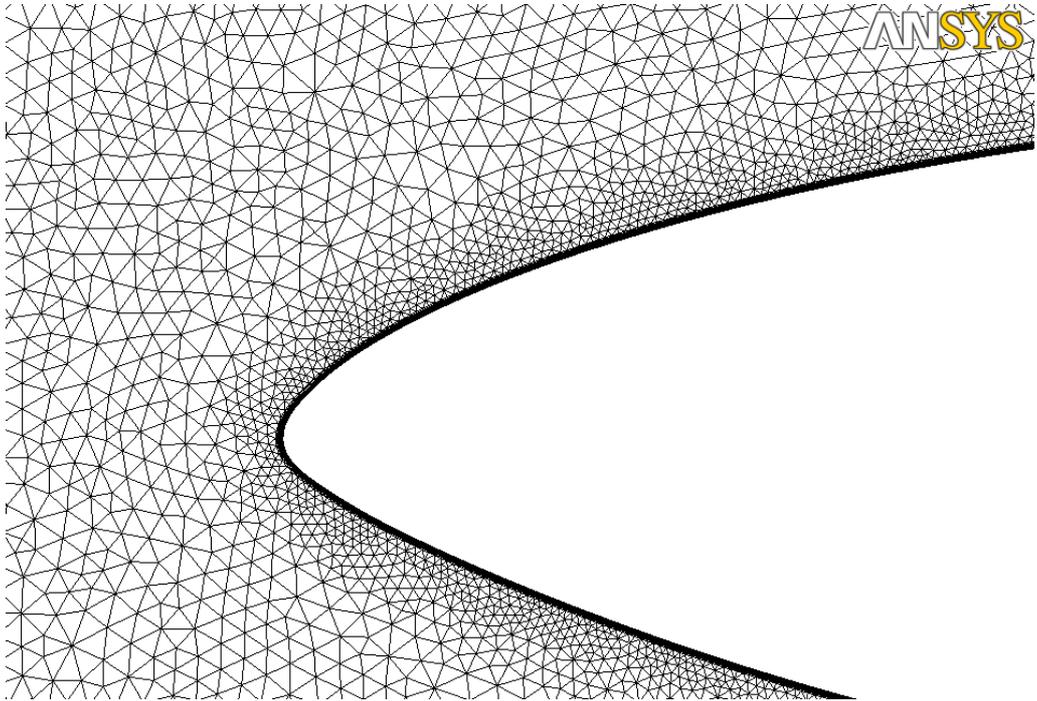


Figure F-2 : Premier zoom sur le maillage

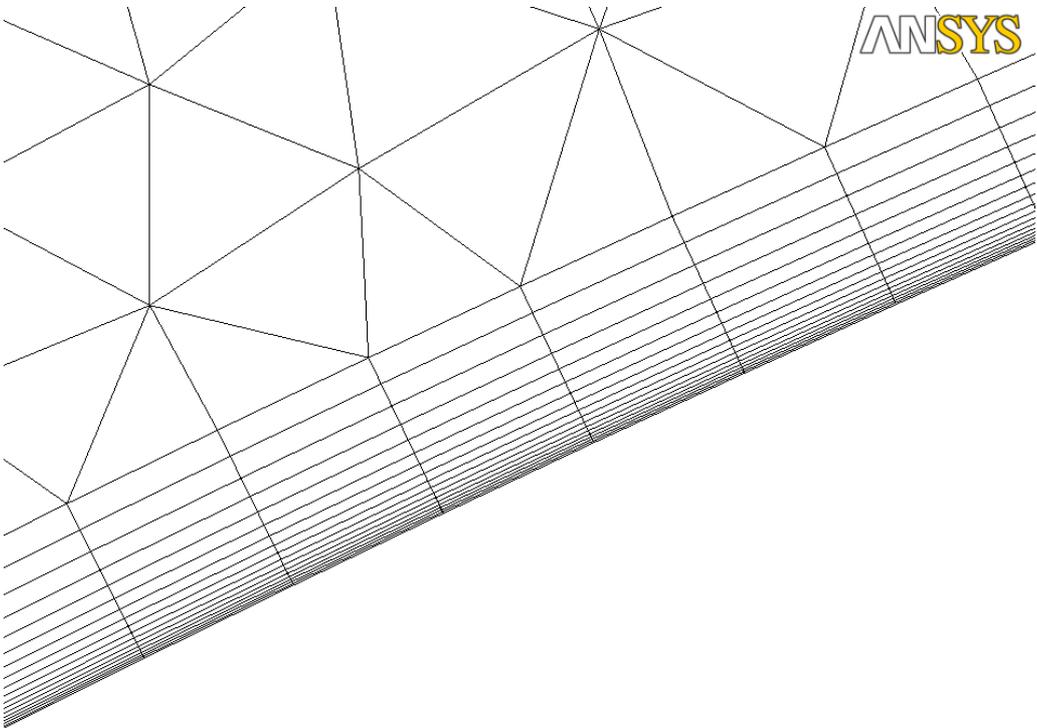


Figure F-3 : Second zoom sur le maillage