

Résumé :

Dans cet projet, on a étudié l'écoulement à travers une grille d'aubes d'une turbine (stator plus rotor) en utilisant des codes de calcul commerciaux. Pour cela, on a construit en premier lieu la géométrie à partir d'une série des coordonnées des points constituant les profils d'aubes du stator et du rotor en utilisant le code SOLIDWORKS, et puis on a généré le maillage en utilisant le code ICEMCFD, et finalement on a étudié l'écoulement à travers les géométries construites en utilisant le code FLUENT.

Abstract:

In this project, we studied the flow through a cascade of turbine blades (stator plus rotor) by using commercial computer codes. We first built the blades geometry in SOLIDWORKS using coordinates points then we generated meshes using ICEMCFD, and finally we studied the flow through these geometries using the FLUENT code.



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail
A ceux qui m'ont soutenu le moral durant toutes
les phases de ma vie, et qui m'ont appris toutes les
bonne valeurs ;*

Mes chers parents

A mes sœurs et mes frères

A mes amies

A tous mes collègues

CHERIET Belkhir



Dédicace

*Je souhaite dédier ce modeste travail, synonyme de
concrétisation de tous mes efforts fournis ces cinq
dernières années :*

*A mes très chers parents, ma raison de vivre, symbole de courage,
et de sacrifice, que Dieu les garde.*

A mes très chères soeurs.

A mes oncles et mes tantes.

A mes cousins et mes cousines.

A mon binôme Chriet Belkhir

A toutes les familles Salhi et Hamel

A tous mes Amis de la promotion propulsion 2007.

A tous mes amis de Beni Tamou et Blida

Salhi Merouane

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, il nous est agréable d'exprimer notre profonde gratitude ainsi que le plus grand respect à tous ceux qui nous ont aidés ou soutenus de près ou de loin.

Nous tenons à remercier le bon dieu, le tout puissant de nous avoir attribué la faveur de réussir nos études.

Nous exprimons nos vifs remerciements à nos promoteurs Monsieur TAHI Ali et le Dr GHENAIET Adel de nous avoir guidé à fin de réussir à réaliser notre PFE, ainsi qu'à Monsieur Hachmi madjid pour ces conseils et son aide fructueuse.

CHERIET Belkhir, SALHI Merouane

SOMMAIRE

	Page
Sommaire.....	01
Liste des figures.....	04
Liste des tableaux.....	06
<u>Introduction</u>	07
<u>CHAPITRE I : Introduction à la CFD :</u>	09
I.1. Présentation de la mécanique des fluides numérique (CFD).....	09
I.1.1. Utilité et attentes de la CFD en ingénierie	09
I.1.2. Outils de la mise en œuvre.....	09
I.1.3. Étapes d'une simulation	10
I.1.3.1. Représentation d'une géométrie.....	10
I.1.3.2. Maillage	10
I.1.3.3. Nécessité des modèles.....	11
I.1.3.4. Conditions aux frontières	11
I.1.3.5. Solveur	11
I.1.3.6. Traitement des résultats.....	12
I.1.3.7. Validation expérimentale	12
I.2. Aspects numériques	12
I.2.1. Maillage structuré ou non structuré.....	13
I.2.2. Schémas de discrétisation.....	15
I.2.2.1. Terme instationnaire.....	16
I.2.2.2. Terme convectif.....	16
I.2.2.3. Terme diffusif.....	16
I.2.2.4. Terme source.....	17
I.2.2.5. Résolution et convergence.....	17

I.3. Modèles de turbulence	17
I.3.1 Modèles de « longueur de mélange » ou modèles à zéro équation	17
I.3.2 Modèle $k-\epsilon$	18
I.3.3 Modèle $k-\omega$	18
I.3.4 Modèle SST	18
I.3.5. Modèle à contrainte de Reynolds (Reynolds Stress Model: RSM)	18
I.3.6. Large Eddy Simulation (LES)	19
I.3.7. Simulation directe ou Direct Numerical Simulation (DNS).....	19
I.4. Évolutions de la CFD	19
I.5. Exemple de validation d'un modèle CFD pour l'étude	
de l'aérodynamique d'une eco-mobile	21
<u>CHAPITRE II : Description des outils CFD utilisés</u>	24
II.1. Introduction	24
II.2. SolidWorks	24
II.3. Ansys ICEM CFD.....	25
II.4. Fluent	26
<u>CHAPITRE III : Cas test de vérification</u>	28
III.1. Conditions aux limites	28
III.2. Résultats.....	31
III.3. Conclusions	37
<u>CHAPITRE IV : Cas étudié</u>	38
IV.1. Construction de la géométrie	38
IV.1.1. L'aube du stator	38
IV.1.2. L'aube du rotor.....	39

IV.1.3. Domaine de calcul stator.....	40
IV.1.4. Domaine de calcul rotor.....	42
IV.2. Génération des maillages par ICEMCFD.....	44
IV.2.1. L'aube du stator.....	44
IV.2.2. L'aube du rotor	46
IV.3. Résultats par FLUENT	50
IV.3.1. Définition des cas test	50
IV.3.2. Conditions aux limites	51
IV.3.3. Résultats	53
IV.4. Analyse des résultats	69
<u>Conclusion</u> :.....	71
<u>Annexe A: Démarche de construction des pièces par SOLIDWORKS...</u>	72
A1- Stator.....	73
A2- Rotor.....	74
A3- Domaine de calcul stator.....	75
A4- Domaine de calcul rotor.....	76
<u>Annexe B : Géométrie des aubes</u>	77
B1- Stator.....	78
B2- Rotor.....	79
<u>Annexe C : Démarche de génération du maillage</u>	80
C1- Stator.....	81
C2- Rotor.....	83
<u>Annexe D : Fichiers 'summary' de FLUENT</u>	85
D1- Cas test de vérification (N.S)	86
D2- Cas test stat_invl.....	87
<u>Bibliographie</u>	88

Liste des figures

- Figure (0.1) : étapes d'une simulation CFD
- Figure (I.1) : Exemples de maillages structurés
- Figure (I.2) : Exemple d'un maillage non structuré avec un maillage prismatique près des parois
- Figure (I.3) : Eco-mobile à l'échelle 1:1 en cours d'essais dans la grande soufflerie du CMEFE : Visualisation de l'écoulement pariétal.
- Figure (I.4) : Maillage du volume à l'aide d'un schéma de type PAVE
- Figure (I.5) : Distribution du coefficient de pression sur la surface du corps et champ de vitesses dans le plan médian
- Figure (II.1) : Interface de Solidworks
- Figure (II.2) : Les splines
- Figure (II.3) : Interface de ICEMCFD
- Figure (II.4) : Interface de Fluent
- Figure (III.1) : Géométrie de l'aube stator de Goldman
- Figure (III.2) : Maillage utilisé par FLUENT
- Figure (III.3) : Résiduels (Euler)
- Figure (III.4) : Résiduels (Navier-Stokes)
- Figure (III.5) : Contours de la pression statique (Eqns: Euler)
- Figure (III.6) : Contours de la pression statique (Eqns : Navier-Stokes)
- Figure (III.7) : Contours du nombre de Mach (Euler)
- Figure (III.8) : contours du nombre de Mach (Navier-stokes)
- Figure (III.9) : Estimations du rapport de pression (Euler)
- Figure (III.10) : Estimations du rapport de pression (Navier-Stokes)
- Figure (IV.1) : points formant le profil d'aube stator
- Figure (IV.2) : profil d'aube stator
- Figure (IV.3) : profil d'aube stator avec incidence
- Figure (IV.4) : profil d'aube stator en 3D
- Figure (IV.5) : profil rotor avec incidence
- Figure (IV.6) : profil d'aube rotor en 3D
- Figure (IV.7) : construction du domaine de calcul du stator
- Figure (IV.8) : Domaine de calcul de l'aube du stator
- Figure (IV.9) : Construction du domaine de calcul du rotor
- Figure (IV.10) : Domaine de calcul rotor
- Figure (IV.11) : Domaine de calcul stator et rotor
- Figure (IV.12) : Aube stator importe sous le format IGES
- Figure (IV.13) : Domaine de calcul stator en 3D
- Figure (IV.14) : Maillage du stator en 3D
- Figure (IV.15) : Maillage de surface de l'aube du stator en 3D
- Figure (IV.16) : profil d'aube rotor importé sous format IGES
- Figure (IV.17) : domaine de calcul rotor en 3D
- Figure (IV.18) : maillage rotor en 3D

Figure (IV.19) : maillage rotor sur les surfaces
Figure (IV.20) : maillage stator 2D
Figure (IV.21) : maillage rotor 2D
Figure (IV.22) : conditions aux limites du stator
Figure (IV.23) : conditions aux limites du rotor
Figure (IV.24) : résidus du cas test stat_Inv1
Figure (IV.25) : contours de la pression statique du cas test stat_Inv1
Figure (IV.26) : contours du nombre de Mach du cas test stat_Inv1
Figure (IV.27) : Cp du cas test stat_Inv1
Figure (IV.28) : résidus du cas test stat_Inv2
Figure (IV.29) : contours de la pression statique du cas test stat_Inv2
Figure (IV.30) : contours du nombre de Mach du cas test stat_Inv2
Figure (IV.31) : Cp du cas test stat_Inv2
Figure (IV.32): résidus du cas test stat_K-e1
Figure (IV.33): contours de la pression statique du cas test stat_K-e1
Figure (IV.34): contours du nombre de Mach du cas test stat_K-e1
Figure (IV.35): Cp du cas test stat_K-e1
Figure (IV.36): résidus du cas test stat_K-e2
Figure (IV.37): contours de la pression statique du cas test stat_K-e2
Figure (IV.38): contours du nombre de Mach du cas test stat_K-e2
Figure (IV.39): Cp du cas test stat_K-e2
Figure (IV.40): résidus du cas test stat_K-w1
Figure (IV.41): contours de la pression statique du cas test stat_K-w1
Figure (IV.42): contours du nombre de Mach du cas test stat_K-w1
Figure (IV.43): contours de la viscosité turbulente du cas test stat_K-w1
Figure (IV.44): Cp du cas test stat_K-w1
Figure (IV.45): résidus du cas test stat_K-w2
Figure (IV.46) : résidus du cas test rot_Inv1
Figure (IV.47) : contours de la pression statique du cas test rot_Inv1
Figure (IV.48) : contours du nombre de Mach du cas test rot_Inv1
Figure (IV.49) : contours de Cp du cas test rot_Inv1
Figure (IV.50): résidus du cas test rot_K-e1
Figure (IV.51): contours de la pression statique du cas test rot_K-e1
Figure (IV.52): contours du nombre de Mach du cas test rot_K-e1
Figure (IV.53): contours de la viscosité turbulente du cas test rot_K-e1
Figure (IV.54): Cp du cas test rot_K-e1

Liste des tableaux :

Tableau (III.1): CAL à l'entrée

Tableau (III.2): CAL à la sortie

Tableau (III.3): Propriétés du fluide

Tableau (IV.1): Paramètres de maillage du stator

Tableau (IV.2): Paramètres de maillage du rotor

Tableau (IV.3) : Définition des cas test stator

Tableau (IV.4) : Définition des cas test rotor

Tableau (IV.5) : définition des CAL du stator

Tableau (IV.6) : définition des CAL du rotor

Introduction

Introduction :

- L'outil CFD (Computational Fluid Dynamics) devient de plus en plus intéressant surtout après le saut énorme dans le domaine informatique en terme de vitesse des processeurs et d'espace mémoire disponible. Ce qui rend la CAO (conception assistée par ordinateur) et la simulation numérique des phénomènes physiques plus économiques et plus rapides que les méthodes classiques.

La question qui se pose est : peut-on utiliser l'outil CFD dans les projets de conception et de construction ?

Pour répondre à cette question, on cite à titre d'exemple le projet de la marine américaine qui consiste en la construction du plus grand et du plus sophistiqué sous marin USS VERGINIA à moindre coût et dans quelques mois seulement. Le directeur du projet a alors décidé d'utiliser le code de construction des pièces et des géométries complexes et assemblage CATIA pour éviter la longue préparation des dessins classiques sur planches et pour éviter surtout les erreurs humaines lors de l'assemblage qui retardent les projets énormément, et ils ont réussi à réaliser leur sous marin stratégique dans les délais souhaités.

- La méthodologie générale d'un calcul CFD est indiquée dans la figure I.1 qui consiste en la création des pièces et assemblages, générateur du maillage et définition des conditions aux limites, et en fin la résolution avec un solveur.

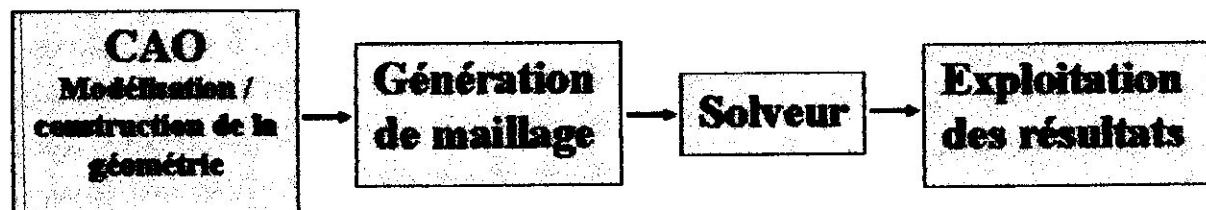


Figure (I.1) : étapes d'une simulation CFD

- Concernant notre travail, les objectifs fixés sont :

- ✓ Apprendre à utiliser les outils CFD, en premier lieu.
- ✓ Vérifier le potentiel CFD sur PC pour une application turbomachine.
- ✓ Validation de l'outil CFD.

On a suivi la même stratégie que celle dans la figure I.1; on a construit les aube en trois dimensions et on a fixé la forme du domaine de calcul à l'aide de SOLIDWORKS en enregistrant les géométries construites sous format IGES. Puis on a généré le maillage tétraédrique non structuré avec ICEMCFD et qu'on a exporté vers le solveur FLUENT pour étudier l'écoulement à travers ces grilles d'aubes en commençant par un calcul non visqueux en passant par le calcul laminaire jusqu'au calcul turbulent avec les modèles K- ϵ et K-w.

Chapitre I

Introduction

à la CFD

I. Introduction à la CFD :

L'accent sera mis sur la méthodologie à adopter pour mener à bien une simulation, et sur les questions qu'il convient de se poser aux différentes étapes de sa mise en oeuvre. Les modèles physiques classiquement proposés par les codes de calcul seront décrits, ainsi que la façon de s'assurer de la pertinence des résultats d'une simulation. Au moment de se lancer dans la pratique de la CFD, l'utilisateur devra avoir recours à des descriptions beaucoup plus avancées des modèles et, éventuellement, des méthodes utilisées, qu'il pourra trouver dans des références plus spécialisées [HIRSCH , ANDERSON].

I.1. Présentation de la mécanique des fluides numérique (CFD) :

I.1.1. Utilité et attentes de la CFD en ingénierie :

La CFD (Computation Fluid Dynamics) est simplement le calcul numérique appliqué à la mécanique de fluides. Cela consiste à résoudre sur une géométrie donnée les équations fondamentales de la mécanique des fluides, que l'on peut éventuellement coupler aux équations de transfert thermique ou de réaction chimique.

I.1.2. Outils de la mise en œuvre :

La CFD requiert de bons outils, et un utilisateur possédant une bonne expérience et compétence scientifique.

■ Ressources humaines

La convivialité toujours plus grande des logiciels proposés sur le marché ne doit jamais faire oublier que la personne qui mène une simulation doit posséder avant tout une excellente connaissance de la physique et de la chimie du système étudié.

■ Logiciels commerciaux

Un grand choix de logiciels pour la CFD est désormais proposé à l'utilisateur. Les sociétés qui les commercialisent annoncent en général qu'ils peuvent traiter tous les problèmes de mécanique des fluides. Il est donc toujours prudent de demander avant l'achat un essai du logiciel sur un problème de même type que celui qui devra être traité.

Parmi les logiciels de CFD, PHOENICS de CHAM, UK, a été le premier logiciel CFD commercial, dans les années 1970. Les grandes marques aujourd'hui sont ANSYS CFX, FLUENT et STAR-CD. Bien que fondés sur les mêmes principes et

proposant globalement les mêmes services, ils ont chacun leurs points forts (par exemple les modèles physiques proposés).

■ Ordinateurs

Les codes précités offrent des versions implantables sur PC. Un ordinateur de bureau de 2 GHz et 2 GB de mémoire suffit pour répondre à des besoins classiques.

I.1.3. Étapes d'une simulation :

Nous nous intéressons ici à la méthode des volumes finis, qui consiste à discrétiser le volume étudié sous la forme de petits blocs (volumes) ou on cherche à satisfaire les équations de conservation. C'est la méthode la plus utilisée par les codes commerciaux.

I.1.3.1. Représentation d'une géométrie :

La première tâche est de borner le domaine de la simulation. Lorsque le système est fermé, cela ne pose pas de problème. Sur les systèmes ouverts, cela peut être plus difficile (dispersion d'un gaz dans l'atmosphère par exemple). Il faut s'assurer soit que l'on est capable d'imposer correctement les conditions de frontière aux bornes du système, soit que les frontières sont suffisamment éloignées pour que le système soit peu sensible aux conditions imposées. Plusieurs essais sont parfois nécessaires. Si les outils numériques permettent aujourd'hui de prendre en compte toute la complexité géométrique du système, il faut enlever les détails mineurs pour éviter la complexité et la grosseur des maillages dans l'étape suivante.

I.1.3.2. Maillage :

L'étape de la génération du maillage est une étape clef pour s'assurer de la validité des simulations. C'est l'étape de découpage du volume étudié en petits volumes élémentaires. Le maillage en général n'est pas régulier : les éléments du maillage doivent être plus petits (maillage fin) dans les zones où les gradients (de vitesse, de température ou de concentration) vont être les plus importants. Si ces zones ne peuvent pas être prédites, il convient de faire quelques essais itératifs avec ajustement du maillage. Dans le cas d'une étude des frottements ou du transfert thermique en paroi, il faut résoudre les équations dans la couche limite près de la paroi ; en général, les codes de calculs proposent des moyens spécifiques pour mailler cette zone. Une étude de sensibilité au maillage doit toujours être faite. Cela consiste à faire des simulations avec un maillage différent (par exemple 30 % de plus) : si les résultats de la simulation dépendent du maillage, il convient de resserrer celui-ci jusqu'à obtenir une indépendance entre maillage et solution. Si le

maillage n'est pas assez dense, certains phénomènes locaux ne seront pas capturés (recirculations, décrochage de l'écoulement, points chauds, etc.).

I.1.3.3. Nécessité des modèles :

Il est rare que les simulations concernent l'écoulement laminaire d'un fluide newtonien, seul cas qui ne nécessite pas l'utilisation de modèles physiques en supplément des équations de physique fondamentales. Dans tous les autres cas, il faudra faire appel à un ou plusieurs modèles pour représenter la turbulence, le caractère non newtonien du fluide, la coexistence de plusieurs phases et les interactions entre elles, les réactions chimiques, la porosité du milieu, etc. Il faut donc avoir une bonne connaissance de la physique et de la chimie de l'opération pour faire le bon choix.

I.1.3.4. Conditions aux frontières :

Au niveau des frontières du domaine simulé, certaines variables doivent être fixées. Par exemple s'il y a une entrée de fluide, on fixera sur le plan d'entrée le profil des vitesses, le niveau de turbulence, éventuellement la concentration en espèces et la température. Sur le plan de sortie, on pourra se contenter de fixer la valeur de la pression. Au niveau des parois, on spécifie les conditions de glissement ou d'adhérence du fluide et, éventuellement, la température de paroi ou le flux de chaleur.

La plupart des codes de calcul proposent également deux types de conditions de frontière particulières : le plan de symétrie et le plan de conditions cycliques. Le premier permet de réduire la taille du système simulé s'il existe un plan de symétrie dans la géométrie, mais il existe un risque qui est de ne pas mettre en évidence l'existence de phénomènes instationnaires. Le second permet, par exemple, de ne modéliser qu'une aube dans une grille ou dans une machine tournante ou de définir un domaine qui comporte une entrée et une sortie, et d'imposer que les conditions de frontière sur l'entrée soient systématiquement égales aux conditions calculées sur le plan de sortie.

I.1.3.5. Solveur :

Le solveur est le domaine du numéricien. C'est la partie du code de calcul consacrée à la résolution proprement dite du système d'équations discrétisées couplées aux modèles choisis. Plus le solveur est puissant, moins l'utilisateur a besoin d'intervenir. Mais il est encore souvent utile d'agir sur le solveur manuellement pour modifier le facteur de sous relaxation ou le pas de temps afin d'assurer la convergence de la simulation. Cette convergence est censée mener l'utilisateur vers la solution physique (accord avec les résultats expérimentaux).

Le suivi de la convergence est assuré par le calcul des résidus (une mesure, souvent normalisée, des erreurs locales). Lorsque les résidus passent au-dessous du seuil choisi, il convient de vérifier, à partir des résultats proposés, que les bilans globaux sont corrects (matière, enthalpie...). Si les résidus n'arrivent pas à diminuer suffisamment, il faut revenir aux étapes précédentes (choix des modèles, conditions de frontière, maillage). Si tout semble correct, il faut reprendre le problème en le simplifiant. Il faut également envisager que l'écoulement puisse être instationnaire alors que l'on cherche à atteindre une solution stationnaire.

I.1.3.6. Traitement des résultats :

Les codes de calcul proposent en général un logiciel de post-traitement, qui permet de visualiser facilement les champs de vecteurs, de température, les surfaces d'isovaleur, etc. L'information est abondante, et l'ingénieur doit alors souvent exploiter les valeurs obtenues localement pour revenir à des valeurs globales qui vont caractériser l'opération (bilans, calculs de débits, de pertes de charge, de dissipation énergétique, de forces, etc.). Il peut s'appuyer sur des menus prédéfinis dans le code pour des calculs simples, ou développer lui-même des sous-programmes de traitement des résultats.

I.1.3.7. Validation expérimentale :

L'étape ultime consiste à valider les résultats de simulation. Cette étape demeure d'autant plus indispensable qu'un certain nombre de choix ont dû être faits par l'utilisateur, particulièrement concernant les modèles. La validation ne peut pas concerner l'ensemble des résultats, la somme d'informations résultant d'une simulation étant toujours extrêmement importante. Elle ne peut donc être que partielle. Dans la majorité des cas, l'ingénieur ne peut se permettre qu'une validation par des valeurs globales, de type perte de charge ou consommation énergétique ou une force par exemple. La concordance ne garantit pas l'exactitude des résultats locaux, mais rassure l'utilisateur. Il est préférable de pouvoir accéder à des valeurs expérimentales locales (champs de vitesse ou de pression par exemple) pour valider la simulation. Dans certains cas complexes, il peut être utile de s'appuyer sur un laboratoire de recherche disposant de ces facilités expérimentales.

I.2. Aspects numériques :

Les méthodes et les schémas qui sont utilisés par les codes de simulation numérique des écoulements de fluides (CFD) sont très variés et dépendent de beaucoup de paramètres dont certains sont décrits dans les sections qui suivent.

I.2.1. Maillage structuré ou non structuré :

Historiquement, les premiers codes de CFD fonctionnaient avec des maillages structurés, c'est-à-dire formés de volumes hexaédriques agencés dans une matrice 3D selon un système cartésien. Puis est apparue la possibilité de traiter la combinaison de plusieurs zones structurées, c'est ce que l'on appelle le « multiblocs », qui permettait de traiter les géométries plus compliquées, mais l'étape de maillage restait fastidieuse.

La figure (I.1) montre un exemple de maillages structurés en deux dimensions. Dans tous les cas, l'angle entre les mailles est proche de 90° , ce qui est idéal.

Il faut également éviter des gradients de taille des mailles trop importants, car cela peut conduire à des erreurs de troncature dans le schéma numérique.

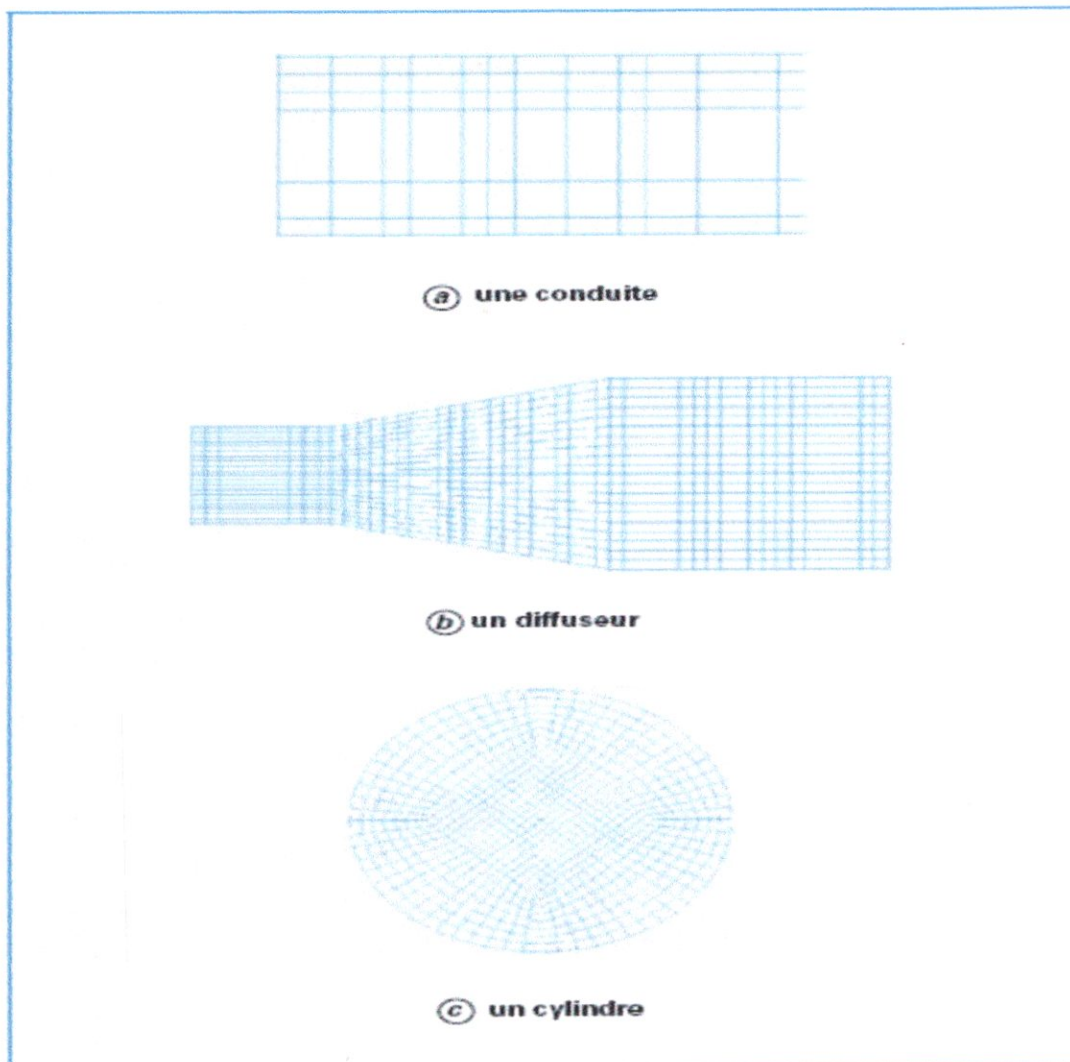


Figure (I.1) – Exemples de maillages structurés

Les maillages structurés présentent certains avantages :

—lorsque le maillage est aligné avec la direction principale de l'écoulement, on obtient un bon niveau de précision car les vecteurs de vitesse sont normaux aux faces des volumes ; c'est pour cette raison que ce type de maillage est adapté à la résolution des problèmes physiques dans les zones proches des parois (frottements, transfert thermique...);

—dans un système allongé (canalisation par exemple), le maillage peut être étiré dans la direction de l'écoulement, en permettant une réduction de la taille de maillage.

Leur inconvénient majeur réside dans la complexité, et donc la lenteur, de leur construction pour les systèmes de géométrie un tant soit peu compliqués, qui demandent à être prédécoupés et traités par blocs.

Les maillages structurés étaient liés à des solveurs eux aussi conçus pour travailler dans des systèmes de coordonnées structurées. L'apparition d'une nouvelle génération de solveurs non structurés a permis de faire évoluer les maillages. Les maillages non structurés peuvent combiner des tétraèdres, des prismes, des hexaèdres. Tous les logiciels modernes proposent de réaliser des maillages structurés et non structurés.

Dans le cas d'un maillage non structuré, les surfaces sont souvent maillées avec des triangles. La deuxième étape consiste à remplir le volume d'éléments généralement tétraédriques qui se génèrent automatiquement à partir des triangles définis sur les surfaces.

Près des parois, le maillage est parfois construit avec des prismes pour être bien aligné avec l'écoulement. Un exemple de maillage non structuré et de maillage près des parois est schématisé sur la figure (I.2). Pour ce type de maillage également, il faut éviter les mailles qui présentent des angles trop aigus.

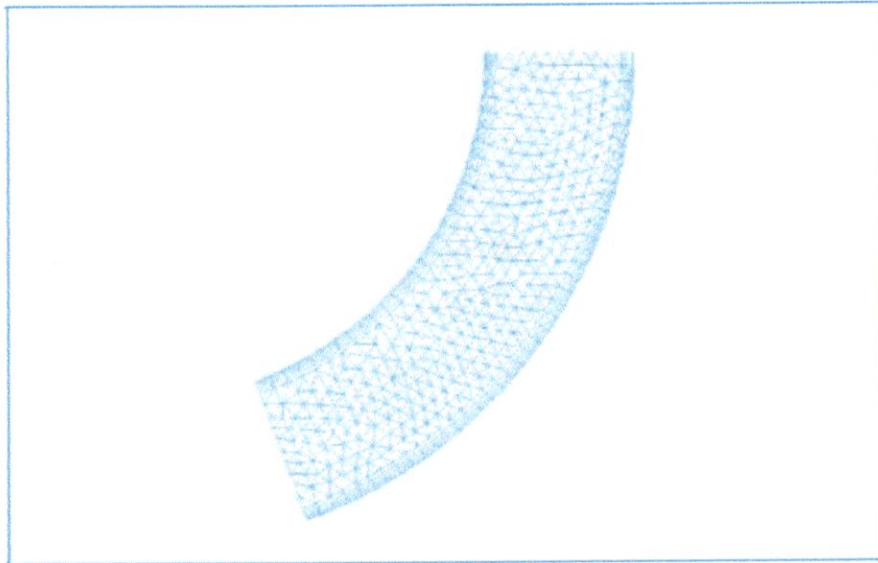


Figure (I.2) : Exemple d'un maillage non structuré avec un maillage prismatique près des parois

I.2.2. Schémas de discrétisation

Toutes les équations qui doivent être résolues peuvent être écrites sous la forme d'équation de transport :

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \nabla(\rho \varphi \cdot U) - \nabla((\mu / \sigma_{\varphi} + \mu_t / \sigma_{\varphi t}) \nabla \varphi) = s_{\varphi} \dots \dots \dots (I.1)$$

Où les quatre termes représentent physiquement dans l'ordre :

- le taux d'accumulation ;
- le transport convectif ;
- le transport diffusif ;
- les termes « sources ».

Si la variable φ est 1, l'équation (I.1) représente la conservation de la masse. Pour des valeurs de φ de u, v ou w, l'équation représente la conservation de quantité de mouvement et pour φ égal à h ou c, l'équation (I.1) représente la conservation de l'enthalpie ou de la concentration. La quantité $(\mu / \sigma_{\varphi} + \mu_t / \sigma_{\varphi t})$ représente le coefficient de transport diffusif, qui comprend une partie laminaire et une partie turbulente.

La modélisation des termes de l'équation (I.1) est très importante pour la stabilité et la précision des résultats. Malheureusement, plus la précision d'un schéma est importante, moins la procédure de résolution est stable.

I.2.2.1. Terme instationnaire

Le terme instationnaire n'est vraiment important que dans les simulations qui traitent de cas instationnaires. Mais ce terme est souvent maintenu pour résoudre des problèmes stationnaires, utilisé en quelque sorte comme un moteur de convergence. Dans ce cas, la façon dont ce terme est traité n'est pas très importante, car il finit par être nul lorsque la convergence est obtenue.

Dans les cas d'un écoulement physiquement instationnaire, on a souvent le choix entre des schémas d'ordre un, deux ou trois (ce qui signifie que l'erreur d'approximation tombe avec le pas de temps à la puissance un, deux ou trois). Le schéma de premier ordre est très dissipatif, et les instabilités dans l'écoulement ont tendance à disparaître. Les schémas d'ordre deux ou trois évitent ce problème mais coûtent plus chers en temps de calcul. Un schéma au minimum du deuxième ordre est donc nécessaire pour simuler un écoulement instationnaire.

I.2.2.2. Terme convectif

Le terme convectif est celui qui a le plus de poids sur la précision du schéma. Ce schéma peut être à différences centrées, (ou central differencing). Avec une précision du deuxième ordre, mais conditionnellement stable. Une autre solution très simple consiste à prendre la valeur de la variable du côté d'où vient l'écoulement, une pratique intitulée schéma amont ou upwind ou upstream differencing. Ce schéma est toujours stable, mais n'a une précision que du premier ordre, et a donc tendance à produire des solutions trop diffusives. Si on combine les schémas à différences centrées et amont, on arrive au schéma dit hybride, qui est souvent proposé par défaut dans les logiciels.

Il faut souligner néanmoins que les solutions avec les schémas hybrides convergent plus facilement, car ils génèrent des matrices à inverser qui ont une large dominance diagonale. Mais souvent ils sont si diffusifs que des caractéristiques de l'écoulement sont perdues. Donc, on peut les utiliser pour la mise en place d'une simulation, mais il faut rester prudent quant à la validité des résultats.

I.2.2.3. Terme diffusif

En général, ce terme est traité par défaut dans les codes par un schéma du deuxième ordre.

I.2.2.4. Terme source

Ce terme est utilisé si des modèles supplémentaires doivent être ajoutés à un modèle existant. Il faut vérifier que ce nouveau terme ne change pas la stabilité du schéma.

I.2.2.5. Résolution et convergence

La méthode de résolution la plus utilisée s'appuie sur l'algorithme SIMPLE ou sur une de ses variantes (SIMPLER, SIMPLEC, SIMPLEX, PISO). Les équations de conservation de la matière et de la quantité de mouvement sont résolues de façon itérative. L'algorithme démarre de valeurs supposées des vitesses et de la pression, puis les utilise dans les équations de conservation de la quantité de mouvement pour arriver à une nouvelle estimation des vitesses. Mais les vitesses calculées ne vérifient pas forcément l'équation de conservation de la matière. L'erreur obtenue permet de réévaluer les valeurs de la pression, avant de démarrer une nouvelle itération.

Une autre approche est le solveur couplé. Dans ce cas, les équations qui permettent d'estimer les vitesses et la pression sont résolues simultanément. Cette méthode évite de devoir sous-relaxer les équations aussi fortement que dans le cas des méthodes non couplées, car les vitesses satisfont automatiquement l'équation de conservation de la matière. Cet algorithme présente une très grande stabilité et permet de converger en un nombre d'itérations limité. Il est par contre légèrement plus coûteux en terme d'utilisation de mémoire. Une bonne stratégie est de commencer avec un modèle facile. Par exemple la simulation peut être faite en supposant un régime laminaire. C'est une approche très efficace pour détecter les zones de mauvais maillage ou les erreurs de construction du modèle.

À la fin de la simulation, il faut s'assurer que les résidus locaux sont très faibles et que les bilans globaux de masse, d'enthalpie, de quantité de mouvement, etc., sont corrects.

I.3. Modèles de turbulence :

Nous présenterons les modèles les plus souvent utilisés et les limites de leur application.

I.3.1 Modèles de « longueur de mélange » ou modèles à zéro équation :

Dans cette catégorie de modèles, on utilise une analogie entre le transport diffusif et le transport turbulent.

Par analogie avec la théorie cinétique des gaz, on peut alors faire l'hypothèse que la viscosité turbulente est proportionnelle au produit d'une vitesse turbulente et d'une échelle spatiale de turbulence. Cette viscosité est une propriété de l'écoulement et non pas du fluide. Souvent on utilise le modèle de Prandtl.

Le modèle le plus connu de cette catégorie est probablement le modèle de BALDWIN-LOMAX.

Les modèles de ce type ont l'avantage d'être très simples à utiliser et peu coûteux numériquement mais leur utilité est très limitée en particulier dans le cas de géométrie complexe. De plus ils ne prennent pas en compte le transport de la turbulence.

1.3.2. Modèle $k-\epsilon$:

Pour éviter les problèmes du modèle de « longueur de mélange », on peut retenir l'idée d'une viscosité turbulente, mais utiliser un moyen plus sophistiqué pour obtenir l'expression des échelles de vitesse et de longueur. Ce modèle est basé sur les deux équations de conservation de l'énergie cinétique turbulente k et du taux de dissipation de l'énergie cinétique ϵ .

1.3.3. Modèle $k-\omega$:

Ce modèle résout les équations relatives à k et à la fréquence de turbulence ω . Il fonctionne jusqu'à la paroi et il est meilleur que le modèle $k-\epsilon$ dans cette zone. Mais, dans les zones loin des parois, sa sensibilité extrême à la valeur de la turbulence dans l'écoulement n'est pas physique. Le plus souvent, on utilise une combinaison des modèles $k-\epsilon$ et $k-\omega$, avec une fonction qui permute entre le modèle $k-\epsilon$ proche des parois et le modèle $k-\omega$ loin des parois. Ce modèle, est appelé le modèle $k-\omega$ baseline.

1.3.4. Modèle SST :

Le modèle $k-\epsilon$ a tendance à surestimer la viscosité turbulente, ce qui induit une difficulté à prédire des phénomènes de séparation ou de ségrégation. Si on ajoute une fonction qui limite les valeurs de la viscosité turbulente au modèle $k-\omega$ baseline, on obtient le modèle de transport de contrainte de cisaillement (Shear Stress Transport: SST) qui est maintenant bien validé et de plus en plus utilisé

1.3.5. Modèle à contrainte de Reynolds (Reynolds Stress Model: RSM) :

Ce modèle est encore plus sophistiqué. Il évite de faire l'hypothèse d'isotropie de la viscosité turbulente, car il résout les équations pour les six composantes des

contraintes de Reynolds et pour ε . Ce modèle est donc très lourd numériquement et la convergence est souvent difficile. Il existe de nombreuses variantes de ce modèle, qui concernent en particulier la façon de modéliser la corrélation de la fluctuation de la pression et la déformation. Ce modèle est préconisé dans le cas des écoulements fortement tourbillonnaires, comme par exemple dans le cas d'un cyclone ou d'un injecteur dans une chaudière à combustion.

I.3.6. Large Eddy Simulation (LES) :

Dans l'approche LES, toutes les échelles de la turbulence sont résolues sauf celle relative à la dissipation, qui est modélisée. Il faut donc utiliser un maillage très fin et opter pour une solution instationnaire dans la résolution des équations. Après un temps de calcul assez long, la solution peut reproduire toutes les échelles de la turbulence. Ce modèle est très puissant dans le cas où les écoulements ne sont pas dominés par la présence des parois parce qu'il faut alors un maillage très fin ou l'utilisation d'une fonction de parois dans cette région. Ce modèle permet d'accéder à un niveau tel de détails qu'il peut être utilisé pour la prédiction du bruit. Avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs, ce modèle est devenu plus intéressant. Mais il faut éviter de l'utiliser avec un maillage trop grossier, ou pour des simulations en deux dimensions parce que le modèle s'appuie sur des phénomènes tridimensionnels.

I.3.7. Simulation directe ou Direct Numerical Simulation (DNS) :

DNS est théoriquement l'approche la plus puissante car elle fait appel à un maillage très fin et à un pas de temps très petit pour résoudre les équations de Navier-Stokes sans aucun modèle. Mais avec les plus puissants ordinateurs, on ne peut aujourd'hui étudier que les écoulements simples (par exemple un écoulement dans un tuyau avec un nombre de Reynolds d'environ 10 000 a demandé 250 heures sur un Cray XMP). Donc, cette approche n'a encore aucune utilité industrielle. Elle reste réservée aux chercheurs qui travaillent sur la construction de modèles.

I.4. Évolutions de la CFD :

Voici quelques points particuliers sur lesquels des développements importants peuvent être attendus :

—les liens entre les logiciels de CAO et la CFD vont s'accroître. Dans un sens, cela rendra plus rapide l'étape de génération de maillage et, dans l'autre sens, il y aura certainement une plus forte intégration de la CFD dans le processus de conception;

—la génération du maillage est devenue beaucoup plus facile avec les maillages non structurés et c'est un domaine propice à de nombreuses avancées prévisibles ;

—il existe déjà des logiciels qui utilisent l'adaptation du maillage pendant la simulation pour le raffiner dans les régions de forts gradients. Beaucoup de travaux portent actuellement sur l'automatisation accrue de ce mécanisme.

—les logiciels ont tendance à devenir plus faciles à utiliser ; ils proposent de plus en plus souvent la vérification du choix des modèles et des conditions frontières avant que la simulation ne soit lancée. Même si cette tendance s'accroîtra certainement, l'opérateur devra demeurer expert pour le traitement des cas où la physique ou la chimie restent complexes ;

—la modélisation de la turbulence restera une des plus grandes difficultés dans les simulations. En ce moment, les modèles Detached Eddy Simulation (DES), qui sont hybrides entre les modèles RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) et LES, se font une place. Ils permettent de rendre l'approche LES plus utile parce que le modèle LES est alors utilisé uniquement dans les zones où le maillage est suffisamment fin pour capter les tourbillons tandis qu'un modèle conventionnel est utilisé ailleurs ;

—les simulations des écoulements multiphasiques ont récemment bénéficié de nombreux progrès. Les solveurs couplés ont réduit énormément les difficultés pour résoudre les équations. L'augmentation de la puissance des ordinateurs a autorisé la prise en compte de plusieurs phases dans des conditions plus complexes. Cette tendance continuera certainement, et les modèles proposés dans les codes de calcul seront de plus en plus complets et de mieux en mieux validés.

En conclusion, il y a fort à parier que cet outil fera de plus en plus souvent partie de la panoplie des outils offerts aux ingénieurs et conduira à une meilleure optimisation des technologies ainsi qu'à leur développement plus rapide [2].

I.5. Exemple de validation d'un modèle CFD pour l'étude de l'aérodynamique d'une eco-mobile :

L'eco-mobile (mobile écologique) est une voiture à faible consommation et à faible émission de polluants.

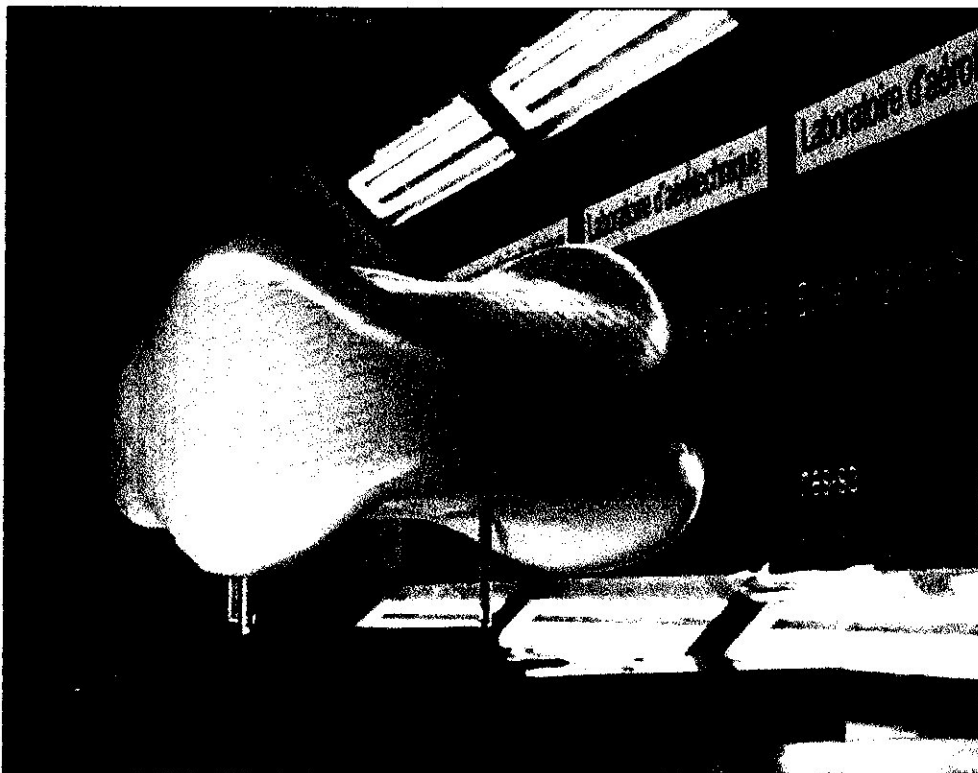


Figure (I.3) : Eco-mobile à l'échelle 1:1 en cours d'essais dans la grande soufflerie du CMEFE : Visualisation de l'écoulement pariétal.

Le CMEFE (Groupe de compétences en mécanique des fluides et procédés énergétiques) a réalisé un modèle de simulation pour l'étude du comportement aérodynamique des éco-mobiles de la HESSO (Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale). Il s'agit de valider des choix, notamment concernant la modélisation de la turbulence, à partir de mesures réalisées en soufflerie [4].

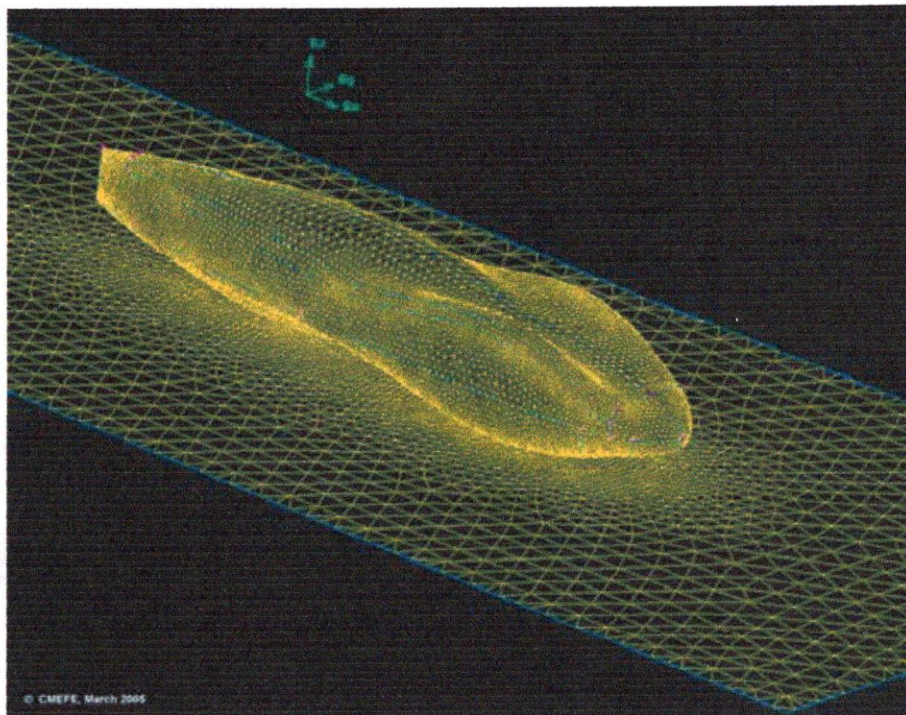


Figure (I.4) : Maillage du volume à l'aide d'un schéma de type PAVE

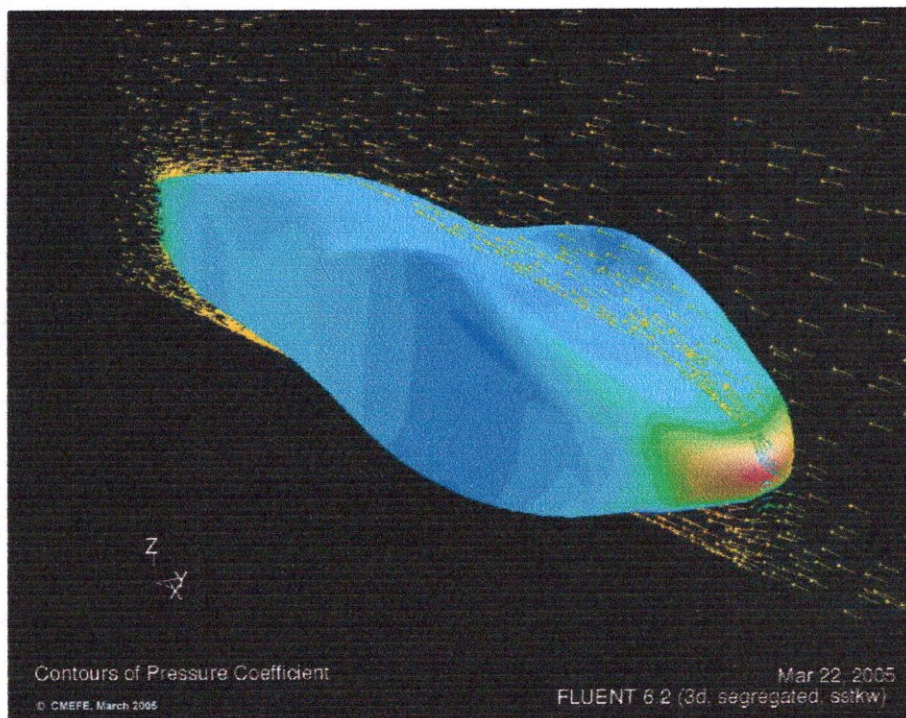


Figure (I.5) : Distribution du coefficient de pression sur la surface du corps et champ de vitesses dans le plan médian

Les figures (I.3) à (I.5) montrent respectivement le modèle en soufflerie, le maillage ainsi que la distribution de coefficient de pression.

Les caractéristiques de la simulation et du maillage sont :

- Vitesse de translation du corps : 25 - 35 km/h
- Nombre de Reynolds : env. 1'400'000
- Types d'éléments : Tétraèdres et prismes
- Nombre d'éléments : 580'000
- Modèle de turbulence : RANS k-e, k-w (2 équ., 2 var.)
- Temps de calcul pour une solution : 12h (PC 2 proc.Xeon 3 Ghz) [4]

HESSO : Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale

EIG : Ecole d'ingénieurs de Genève

Chapitre II

Description des outils

CFD utilisés

II.1.Introduction :

Choisir un logiciel de calcul en mécanique des fluides reste une tâche ardue et spécifique aux applications que l'on souhaite modéliser.

Les logiciels de mécanique des fluides peuvent être classés en deux catégories : d'un côté, les codes mono-dimensionnel traitant essentiellement des phénomènes d'écoulement dans des tubulures et utilisés pour traiter les problèmes hydrauliques comme l'injection ou de remplissage moteur.

De l'autre, les codes tridimensionnels, plus généralistes, et pouvant bénéficier de sous modèles physiques spécifiques comme la modélisation de parois mobiles, de milieux poreux, la résolution de l'équation de la chaleur ou encore le traitement de problèmes chimiques et le transport de gouttes ou particules.

Dans ce chapitre, on présentera une description des codes utilisés pour la réalisation de ce travail, soient SOLIDWORKS pour la construction et la modélisation de la géométrie, le code ICEMCFD pour la génération du maillage, et enfin le code FLUENT pour l'obtention de la solution [4].

II.2.SolidWorks :

SOLIDWORKS est un outil de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) qui permet de construire des géométries de pièces et assemblage en 3D.

Il permet de construire des surfaces et des volumes à partir d'une série de points définissant la géométrie de base. On peut également utiliser des fonctions prédéfinies qui construisent quelques géométries élémentaires telle que des cylindres, des sphères et des cubes ...

Une fois la géométrie construite, elle peut être exportée en différents formats, comme le format IGES et peut donc être importée dans le générateur de maillage ICEMCFD.

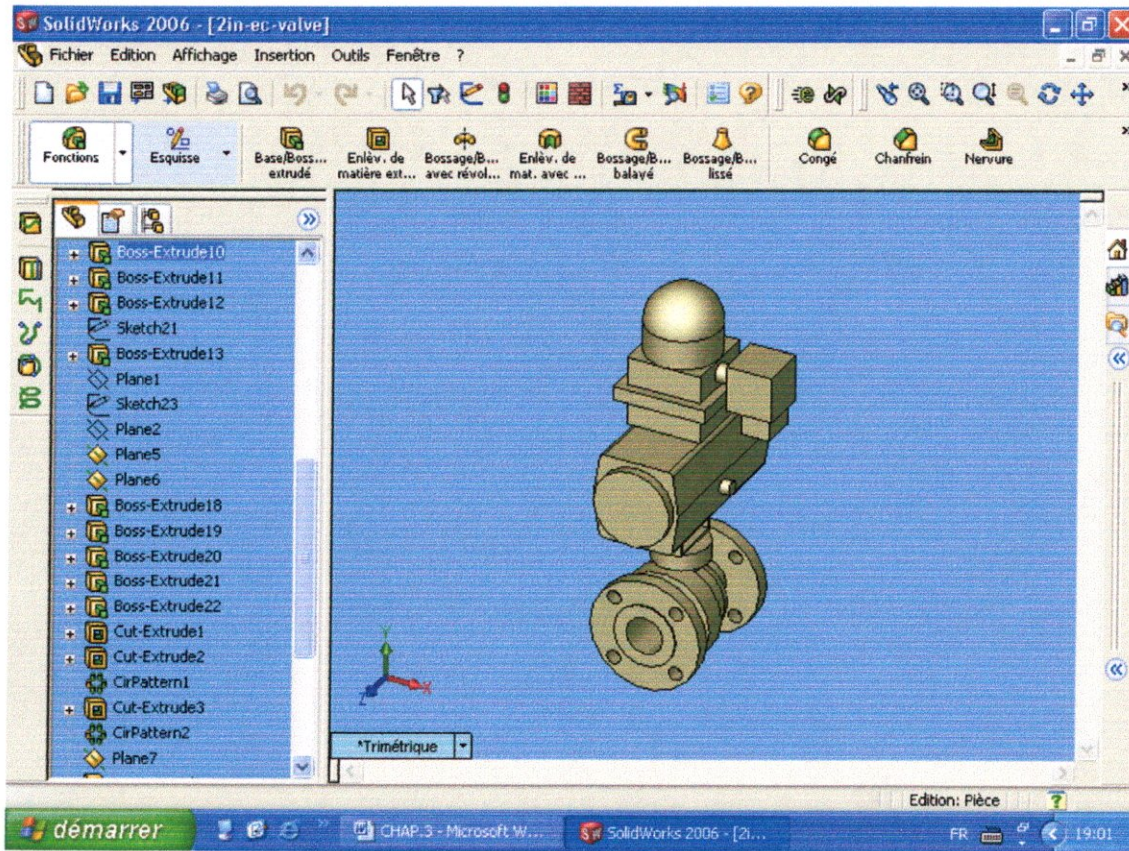
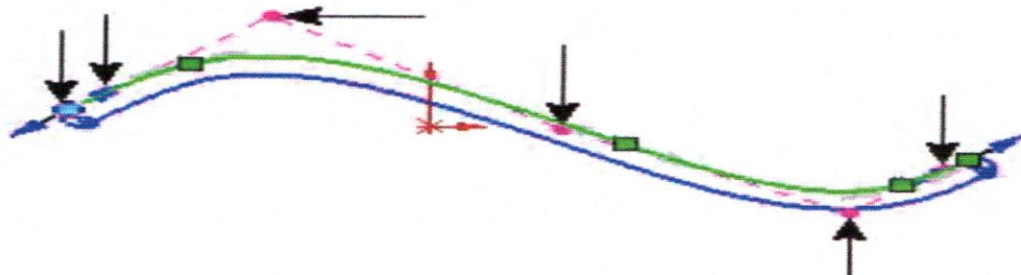


Figure (II.1) : Interface de Solidworks

Ce module permet de créer une courbe à partir d'une série de points de degré égale au nombre de points :



Les points de contrôle sur le polygone de contrôle de la spline sont indiqués par des flèches

Figure (II.2) : Les splines

II.3. Ansys ICEM CFD :

Lien puissant entre la CAO et l'analyse numérique, Ansys ICEM CFD offre des interfaces CAO, des outils géométriques, un générateur de maillages et des outils de post-traitement et d'optimisation. Destiné à la mécanique des fluides ou au calcul de structures, ce logiciel permet de créer des maillages hexaédriques

(structurés ou non-structurés), tétraédriques, hybrides (combinaison de tous types de cellules), des maillages cartésiens, et de spécifier des conditions aux limites.

Ansys ICEM CFD offre des interfaces directes CAO (notamment Catia, Cadds5, ICEM surf, Pro/ E, Ideas, SolidWorks, Solid Edge...) permettant un transfert de la géométrie de l'un à l'autre des systèmes CAO.

Elle comprend plus de 100 interfaces exportation du maillage vers les principaux codes CFD et FEA (Ansys, Abaqus, Fluent, Star-CD, CFX, Flotran...) ou d'autres codes CAE (codes d'électromagnétisme...), ainsi que des formats de sorties standard dont CGNS[4].

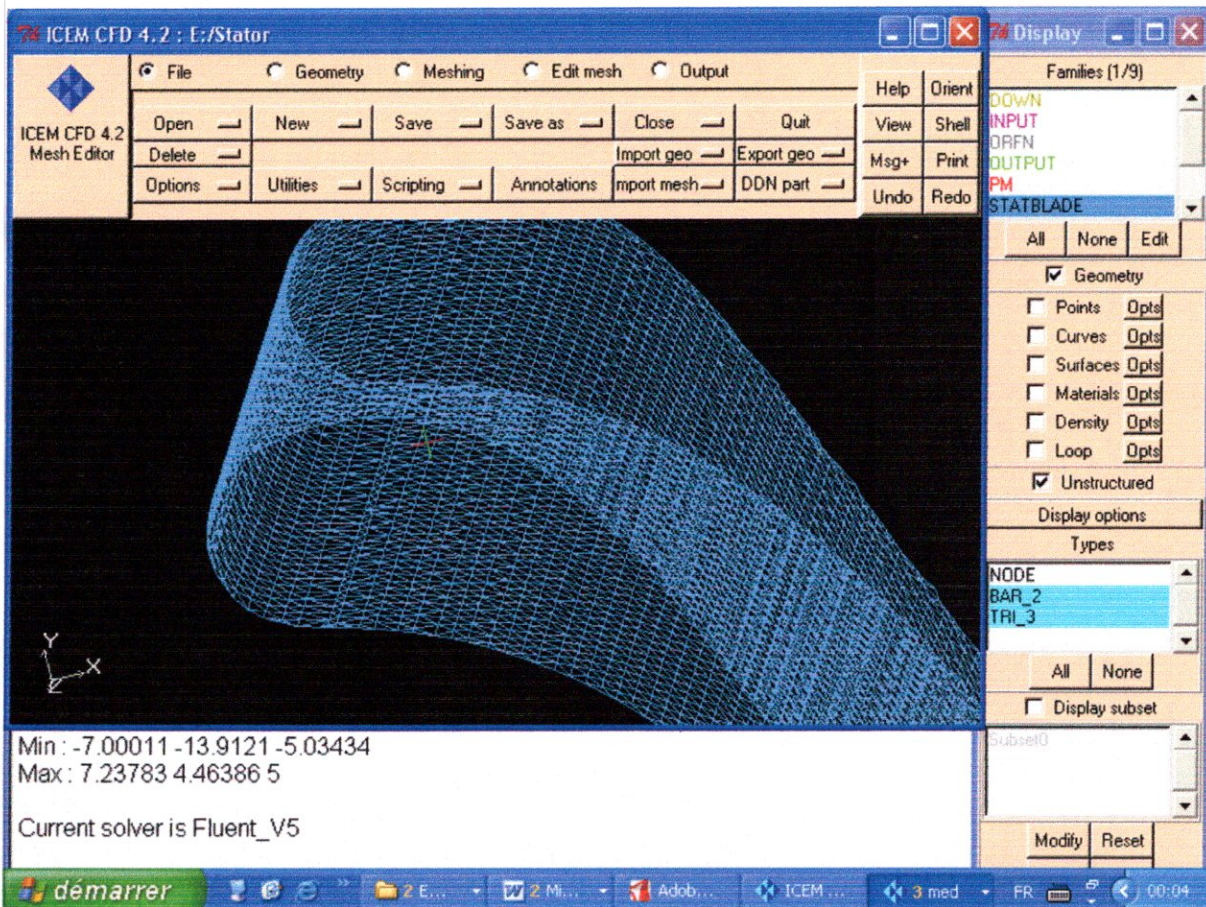


Figure (II.3) : Interface de ICEMCFD

II.4. Fluent :

Fluent dispose d'une large palette de solutions de CFD. Fluent est un solveur par volumes finis non structuré ; logiciel de CFD généraliste pour la simulation de tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques... et ce sur les géométries complexes industrielles. Ce produit inclut également un véritable

environnement CAO et un mailleur paramétrique de dernière génération, permettant de mettre en place rapidement les modèles numériques ou de s'intégrer aux outils de conception déjà existants (Catia, I-deas, Pro/E...). [4]

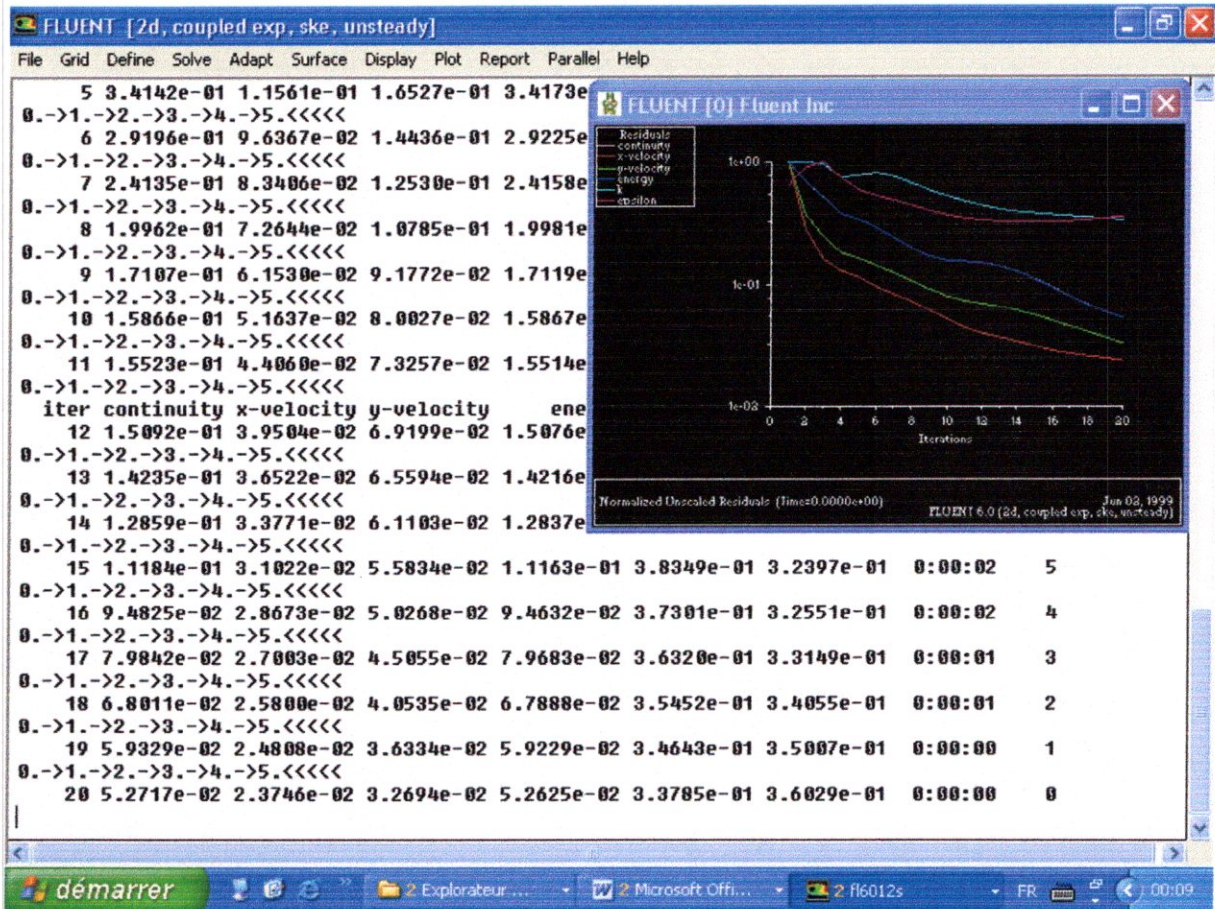


Figure (II.4) : Interface de Fluent

Chapitre III

Cas test de vérification

III. Cas test de vérification (Goldman stator blade) :

Dans ce cas test, l'écoulement autour d'une aube stator Goldman à la mi-envergure est considéré. Cette analyse 2D montre la capacité de FLUENT à simuler les caractéristiques de l'écoulement typique des applications en turbomachines. Ce problème est résolu, en utilisant les équations d'Euler et de Navier-Stokes. Ce qui permet de fournir une estimation de l'effet de la viscosité sur les pertes de pression à la mi envergure.

Le but de cet essai est de comparer les prédictions de FLUENT avec les données expérimentales de Goldman. Une comparaison est également faite entre les prédictions obtenues en utilisant les équations d'Euler et celles de Navier-Stokes.

- La géométrie du domaine de calcul est donnée à la figure (III.1). L'entrée et la sortie sont localisées approximativement à 0.03 m du bord d'attaque et du bord de fuite, respectivement. Elles sont localisées telles que leur présence ne perturbe pas l'écoulement autour de l'aube [5].

III.1. Conditions aux limites :

Cette section présente les conditions aux limites du cas test FLUENT.

Zones	
name	type
Fluide	fluid
interieur	interior
sortie	pressure-outlet
aube	wall
entrée	pressure-inlet
périodique	periodic

- Les tableaux (III.1) et (III.2) donne les conditions aux limites à l'entrée et à la sortie. L'écoulement au-dessus et en dessous de l'aube est soumis à la condition de périodicité. La pression statique à l'entrée est de 101 320 Pa et à la sortie de 71 583 Pa, alors que la température à l'entrée est de 287.91 K et à la sortie 187 K telles qu'indiqué aux tableaux.

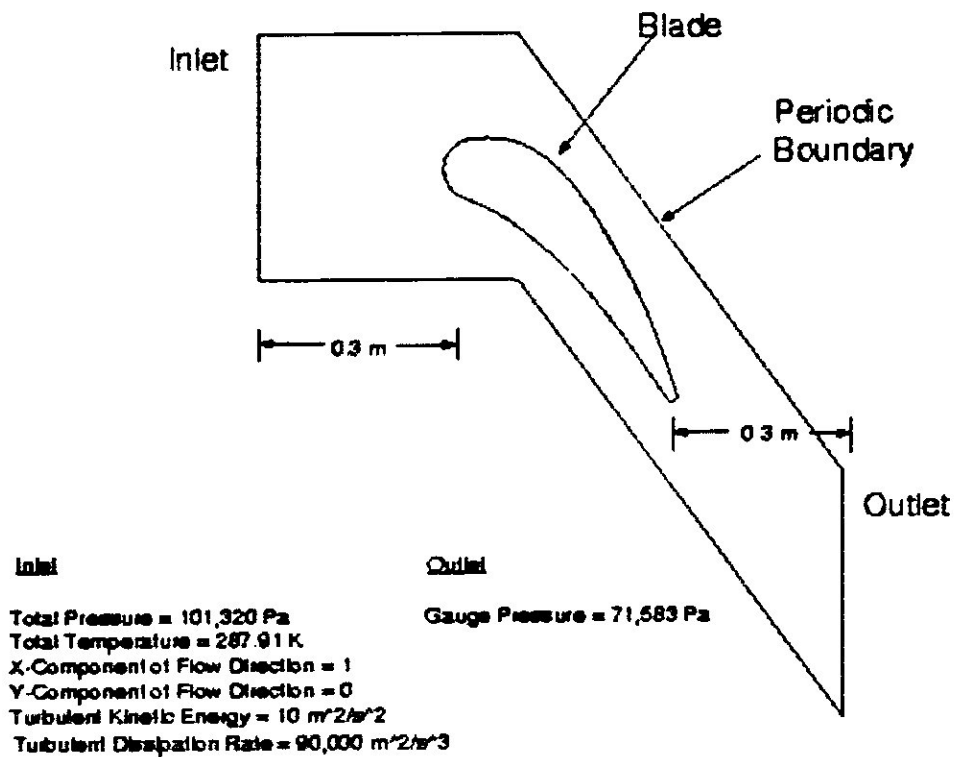


Figure (III.1): Géométrie de l'aube stator de Goldman

Tableau (III.1): CAL à l'entrée

Pression totale	101320 Pa
Température totale	287.91 K
Composante de la direction de L'écoulement selon x	1
Composante de la direction de L'écoulement selon y	0
Energie cinétique turbulente K	10 m ² /s ²
Taux de dissipation turbulente	90000 m ² /s ³

Tableau (III.2): CAL à la sortie

Pression relative	71582 Pa
Température totale	187K
Intensité de la turbulence	0.1
Energie cinétique turbulente K	10 m ² /s ²
Taux de dissipation turbulente	90000 m ² /s ³

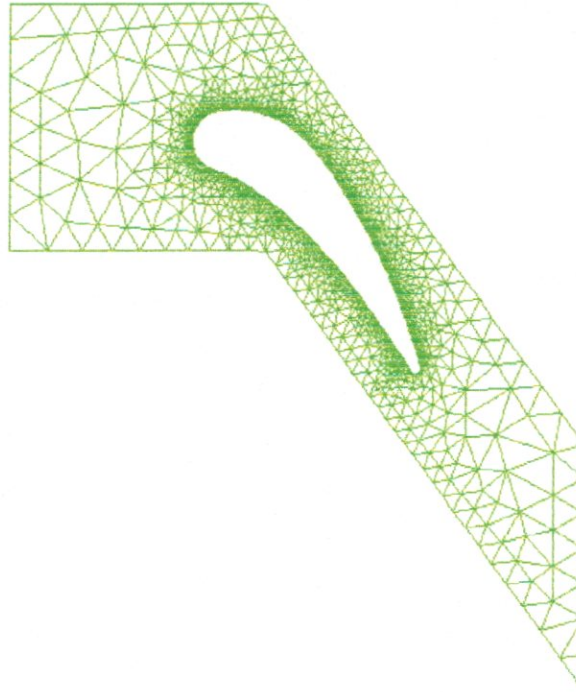
Le tableau (III.3) donne les propriétés du fluide utilisé pour la simulation :

Tableau (III.3): Propriétés du fluide

Densité, ρ	Loi des gaz idéales
Viscosité, μ	1.78 .10 ⁻⁵ Pa-s
Conductivité, k	0.0242 W/m-K
Chaleur spécifique, c_p	1004 J/kg-K

Le nombre de Reynolds est $Re = \rho u c / \mu$ basé sur la corde de l'aube et de la vitesse qui est de l'ordre de 5×10^5 . Par conséquent l'écoulement est turbulent. Le nombre de mach à l'entrée est approximativement 0.2, ce qui implique l'écoulement subsonique.

- Le maillage utilisé dans simulation FLUENT se compose de 3000 cellules triangulaires et est montrée sur la figure (III.2).



Grid

FLUENT 6.0 (2d, coupled exp, ske)

Figure (III.2): Maillage utilisé par FLUENT

Des paramètres de résolution par défaut ont été employés dans les calculs. L'écoulement a été initialisé avec les conditions à l'entrée. Les équations d'Euler et de Navier-Stokes ont été employées pour résoudre ce problème [5].

III.2. Résultats :

Il s'agit de présenter : l'histoire de convergence, les contours de la pression statique et du nombre de Mach, et le coefficient de pression :

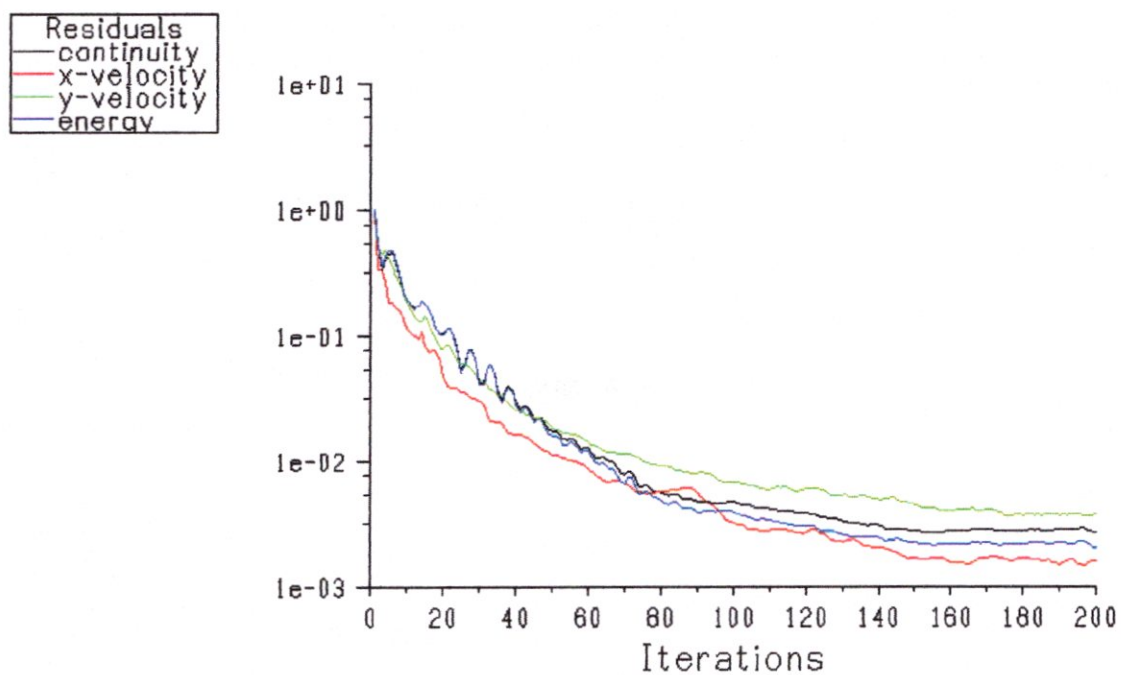


Figure (III.3): Résiduels (Euler)

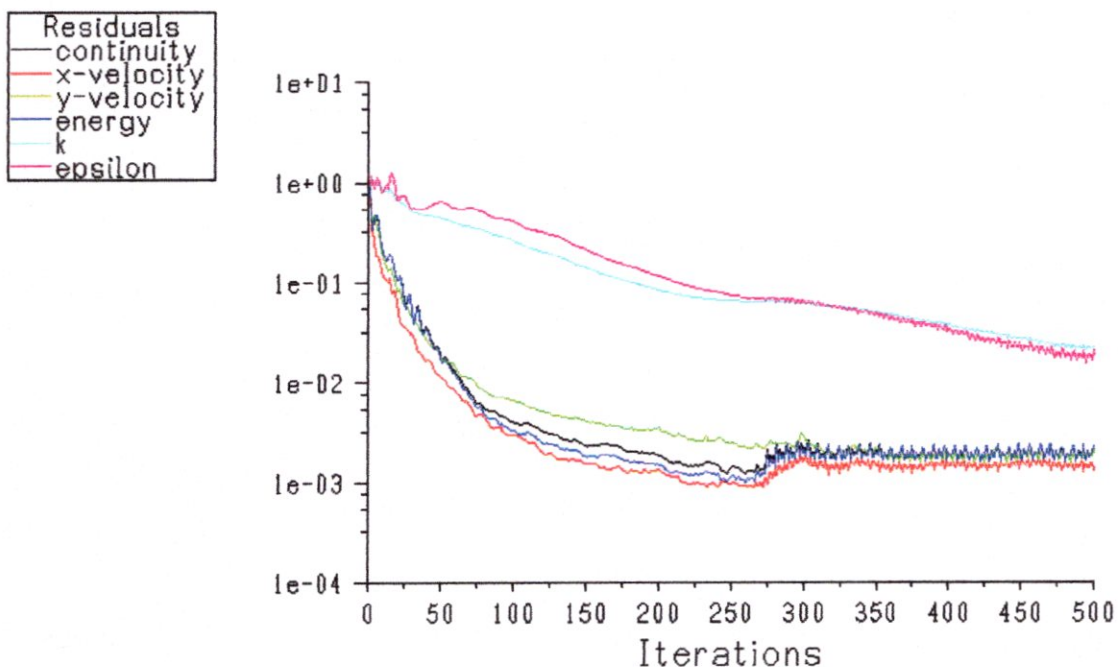


Figure (III.4): Résiduels (Navier-Stokes)

Pour le cas visqueux la convergence est de deux ordres de grandeurs en 500 itérations pour les équations moyennes et de 1.5 ordre pour les équations de turbulence.

Les contours de pression statique calculés en utilisant les équations d'Euler et de Navier-Stokes sont montrées sur les figures (III.5) et (III.6) et semblent similaires.

Les contours du nombre de Mach sont donnés aux figures (III.7) et (III.8). et montrent une légère différence dans les deux cas.

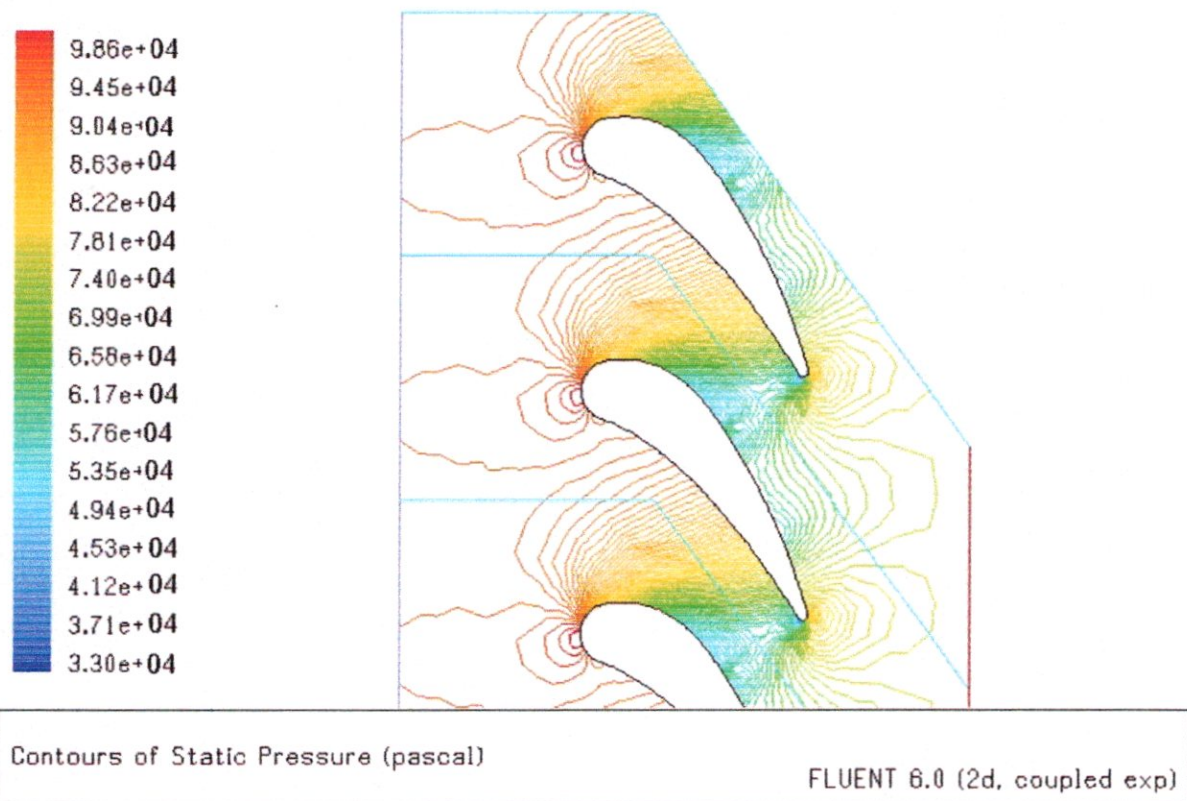
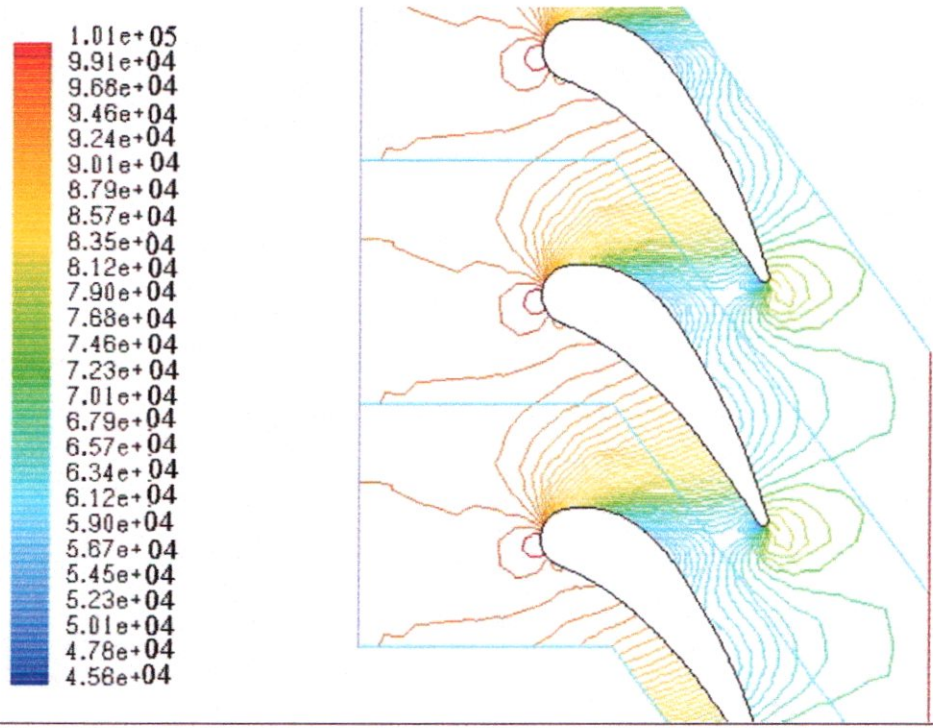


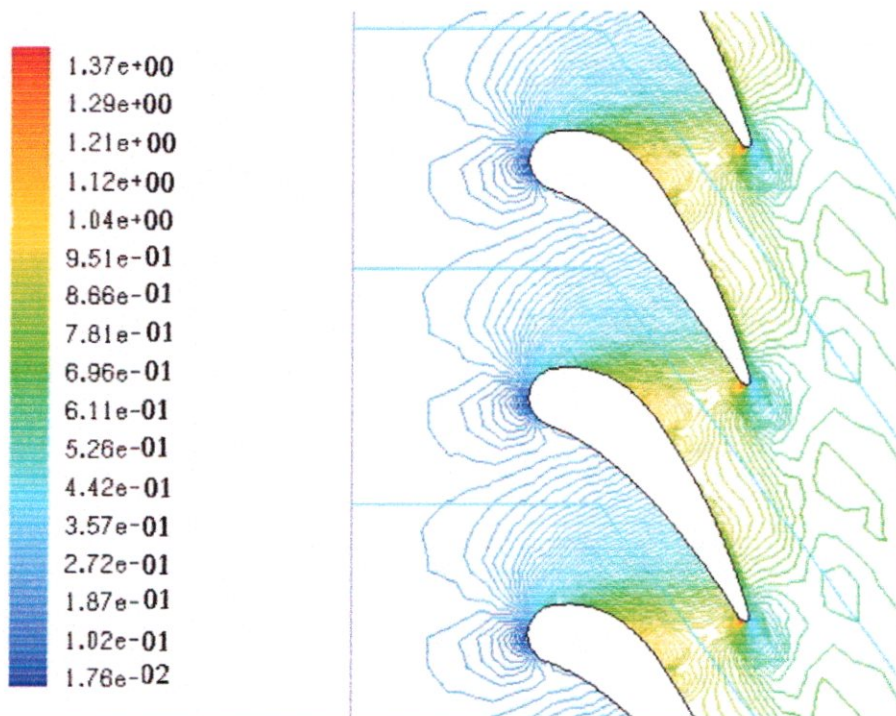
Figure (III.5): Contours de la pression statique (Eqns: Euler)



Contours of Static Pressure (pascal)

FLUENT 6.0 (2d. coupled exp. ske)

Figure (III.6): Contours de la pression statique (Eqns : Navier-Stokes)



Contours of Mach Number

FLUENT 6.0 (2d. coupled exp)

Figure (III.7): Contours du nombre de Mach (Euler)

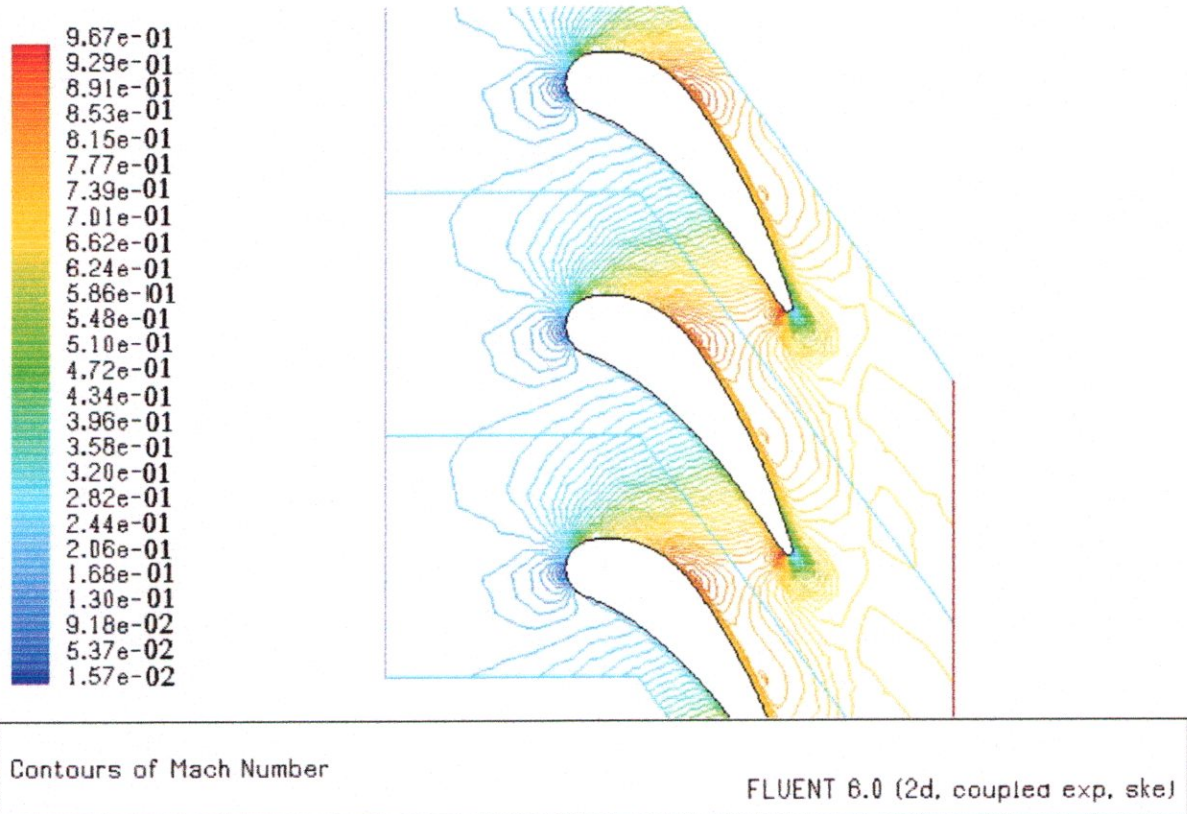


Figure (III.8): contours du nombre de Mach (Navier-stokes)

Une comparaison des prédictions du coefficient de pression sur l'aube avec les données expérimentales est donnée aux figures (III.9) et (III.10). Il y a une bonne concordance entre les résultats de FLUENT et les données expérimentales. Il indique que l'effet de l'extrémité du mur sur les caractéristiques de l'écoulement à la mi-envergure est négligeable. Une comparaison des prédictions obtenues en utilisant les équations d'Euler et les celles de Navier-Stokes indique que la perte de pression due à la viscosité du fluide est négligeable à la mi-envergure.

Les pertes de pression à la mi-envergure due à la présence du bord d'attaque et de la viscosité du fluide peuvent être négligeables.

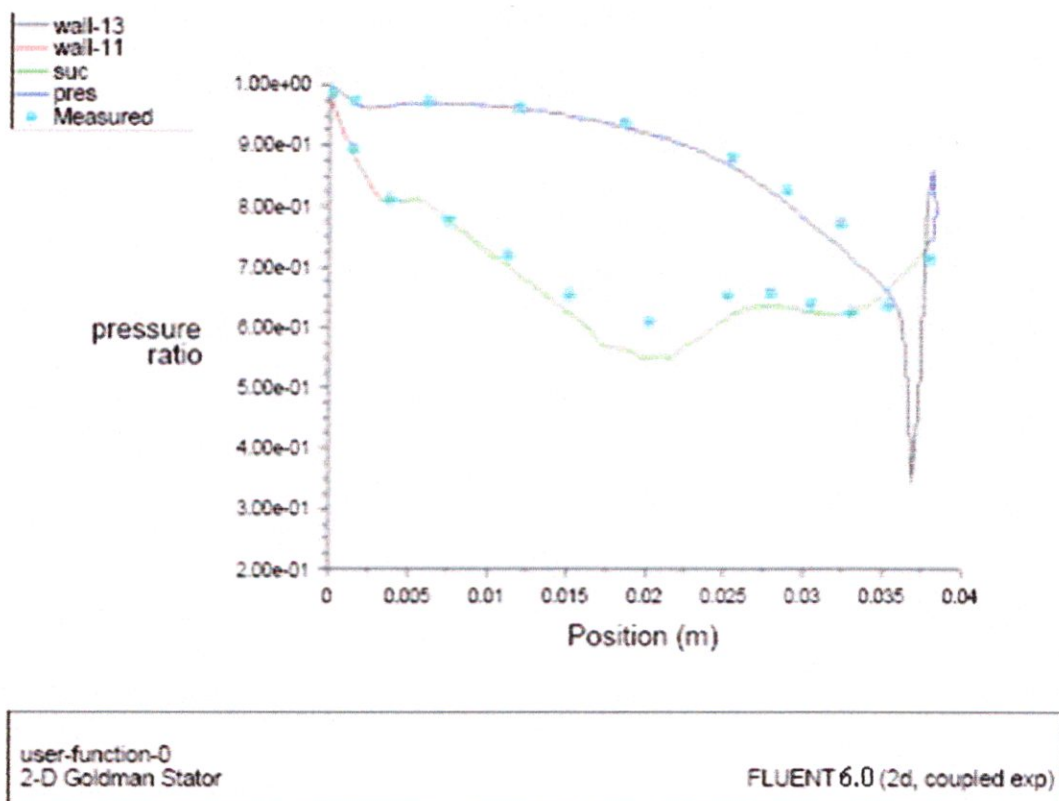


Figure (III.9): Estimations du rapport de pression (Euler)

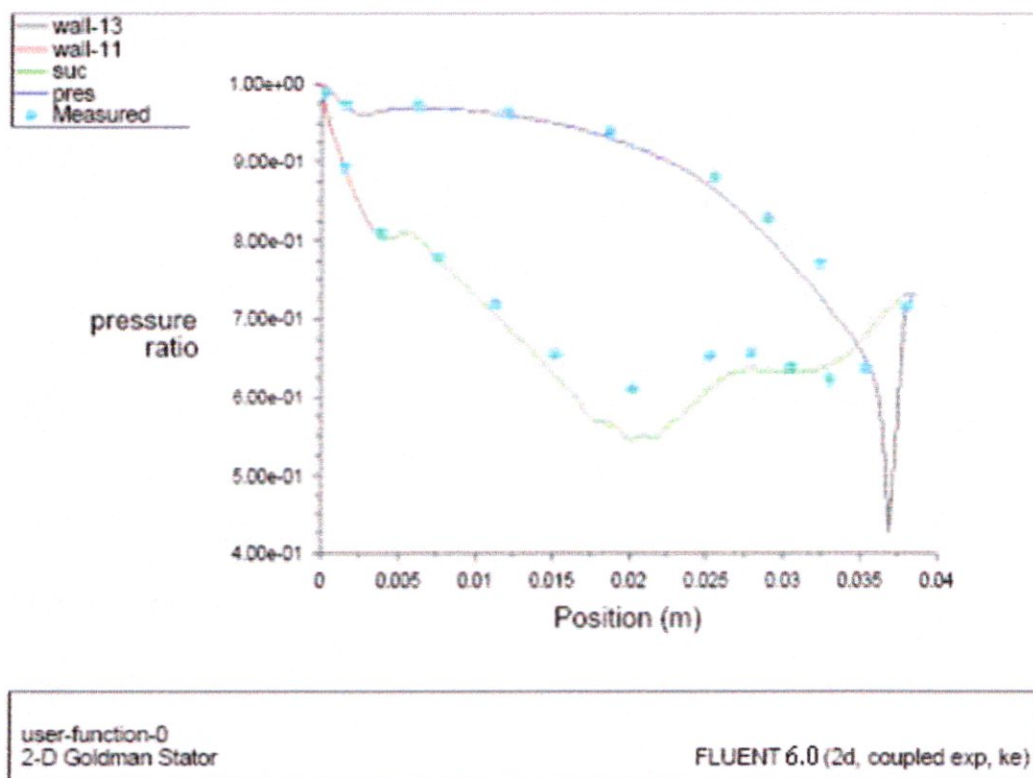


Figure (III.10): Estimations du rapport de pression (Navier-Stokes)

III.3. Conclusions :

Des résultats présentés ci-dessus, on peut conclure que les prédictions de FLUENT de la distribution de pression à la mi-envergure de l'aube sont proches des résultats expérimentaux de GOLDMAN.

Chapitre IV

Cas étudié

IV. Cas étudié :

IV.1. Construction de la géométrie :

IV.1.1. L'aube du stator :

- On saisit les coordonnées des points formant le profil de l'aube stator (annexe B.1) dans un fichier Solidworks pour avoir l'esquisse suivante :

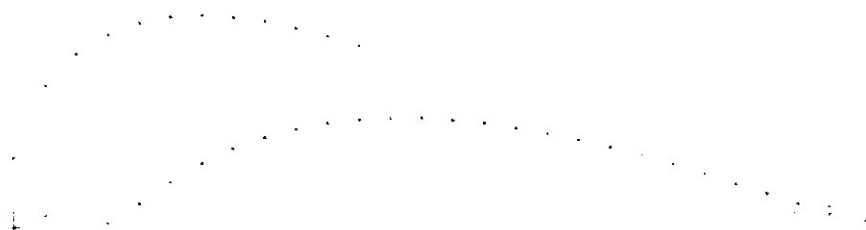


Figure (IV.1) : points formant le profil d'aube stator

- Puis en utilisant la fonction Spline, qui donne une courbe de degré égal au nombre de points sélectionnés et en sélectionnant les points de l'esquisse ci-dessus pour avoir la forme du profil suivante :



Figure (IV.2) : profil d'aube stator

- On déplace le profil pour pouvoir le faire pivoter autour de l'origine tel que montrée à la figure (IV.3) pour assurer les conditions aux limites d'entrée :

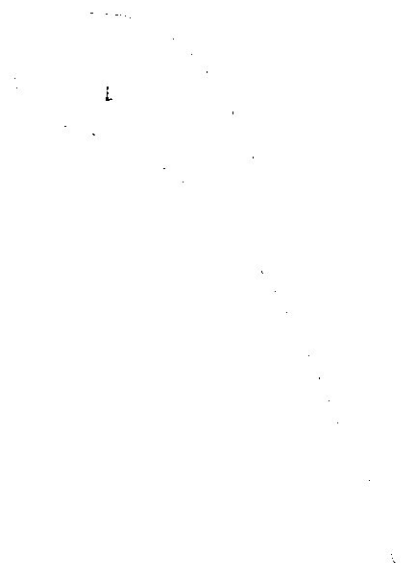


Figure (IV.3) : profil d'aube stator avec incidence

- On utilise ensuite de la fonction Extrusion de 20mm, pour donner à l'aube sa forme finale en trois dimensions :

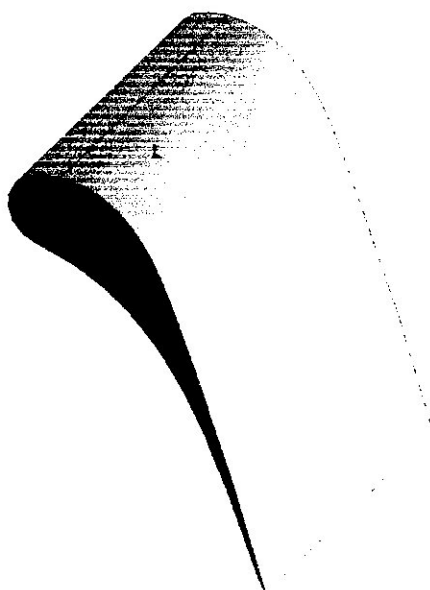


Figure (IV.4) : profil d'aube stator en 3D

IV.1.2. L'aube du rotor :

La même procédure est utilisée pour construire la forme de l'aube du rotor dans SOLIDWORKS. Les figures (IV.5) et (IV.6) montrent respectivement la forme du profil de l'aube et la forme tridimensionnelle de l'aube. Dans les annexes A.1 A.2 il y a toute la démarche pour reproduire les aubes dans SOLIDWORKS.

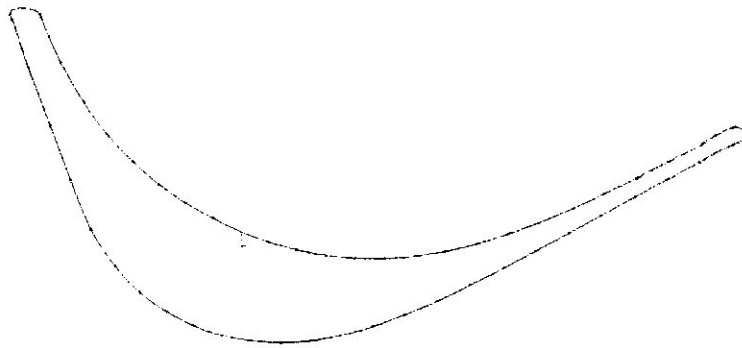


Figure (IV.5) : profil rotor avec incidence



Figure (IV.6) : profil d'aube rotor en 3D

IV.1.3. Domaine de calcul stator :

Le but de cette étape est de faire sortir les coordonnées des points limitants le domaine de calcul d'une aube, pour éviter le chevauchement de deux domaines adjacents.

Les figures (IV.7) et (IV.8) montrent la construction du domaine de calcul :

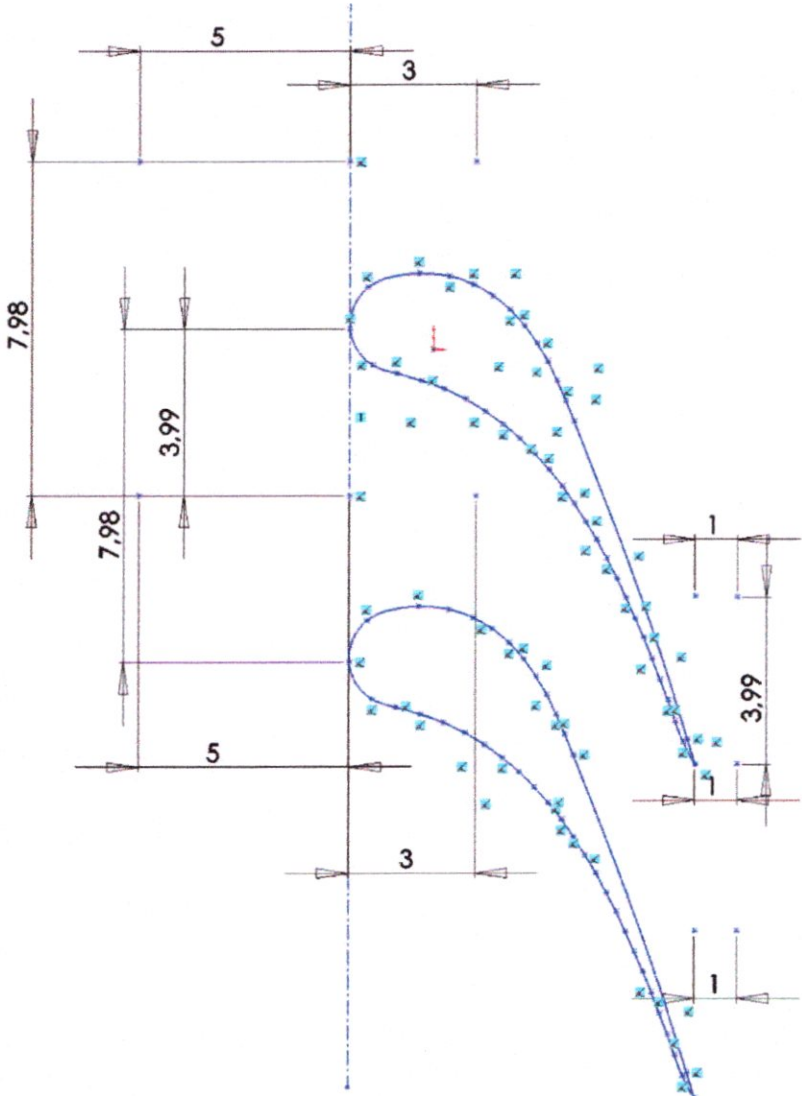


Figure (IV.7) : construction du domaine de calcul du stator

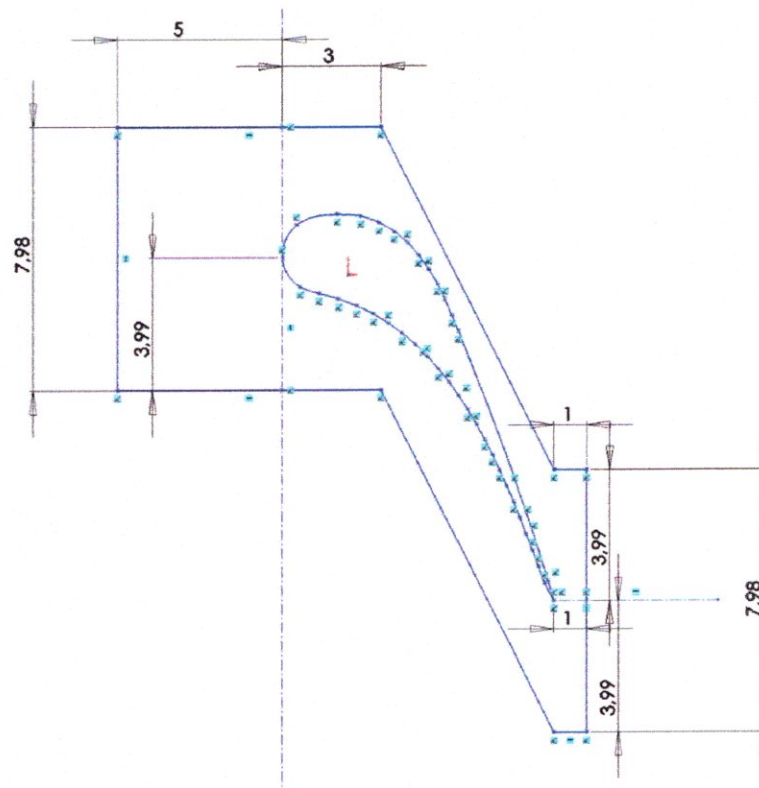


Figure (IV.8) : Domaine de calcul de l'aube du stator

IV.1.4. Domaine de calcul rotor :

En suivant les mêmes étapes que pour le stator (section précédente), on obtient les dimensions suivantes montrées aux figures (IV.9) et (IV.10):

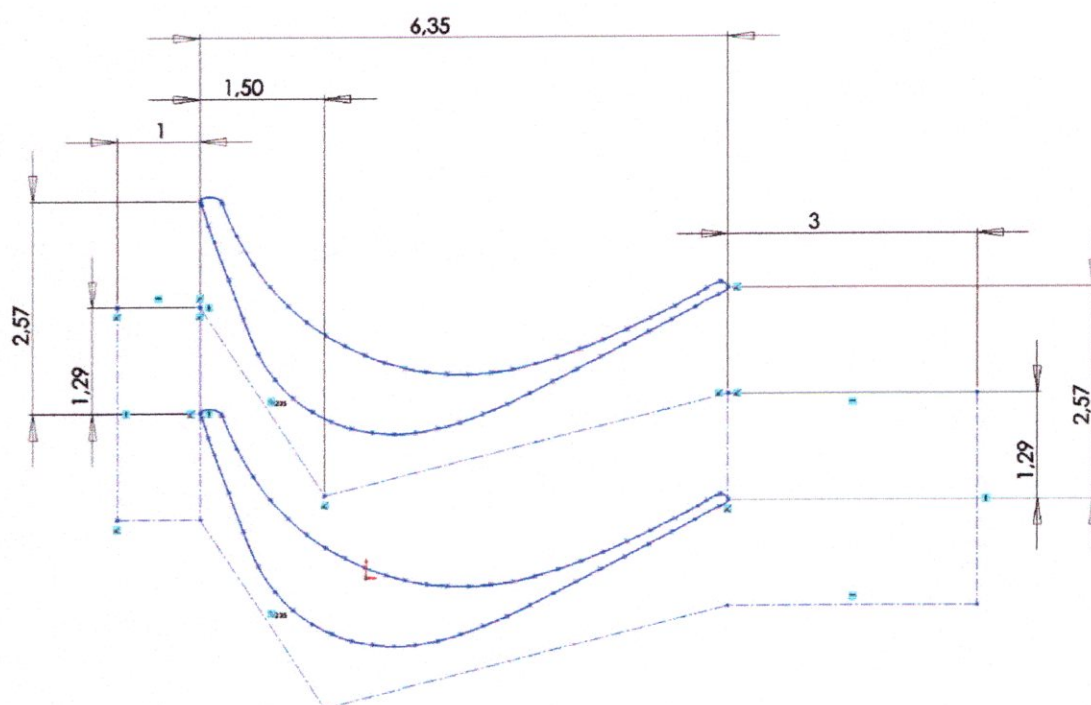


Figure (IV.9) : Construction du domaine de calcul du rotor

Le domaine final est :

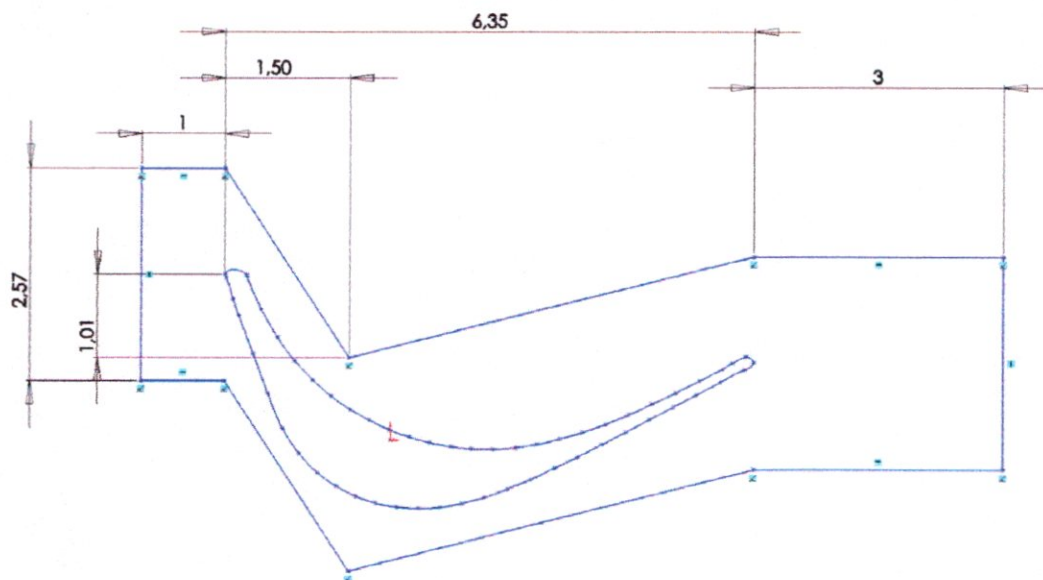


Figure (IV.10) : Domaine de calcul rotor

Dans les annexes A.3 A.4 toute la démarche pour reproduire les domaines de calcul dans Solidworks est présentée.

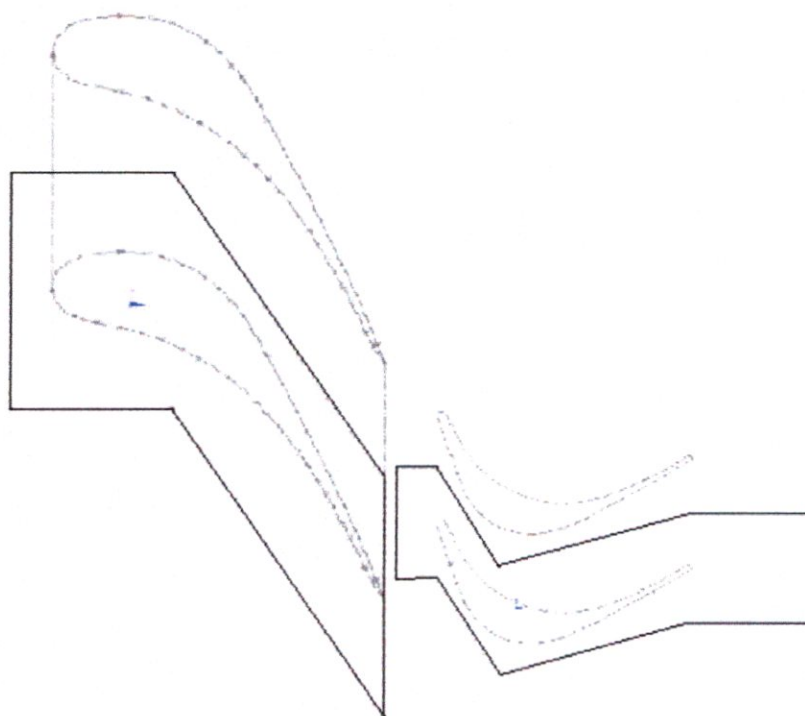


Figure (IV.11) : Domaine de calcul stator et rotor

IV.2. Génération des maillages par ICEMCFD :

IV.2.1. L'aube du stator :

La géométrie construite dans SOLIDWORKS est exportée sous format IGES pour être importée dans ICEMCFD telle que montre la figure (IV.12) :

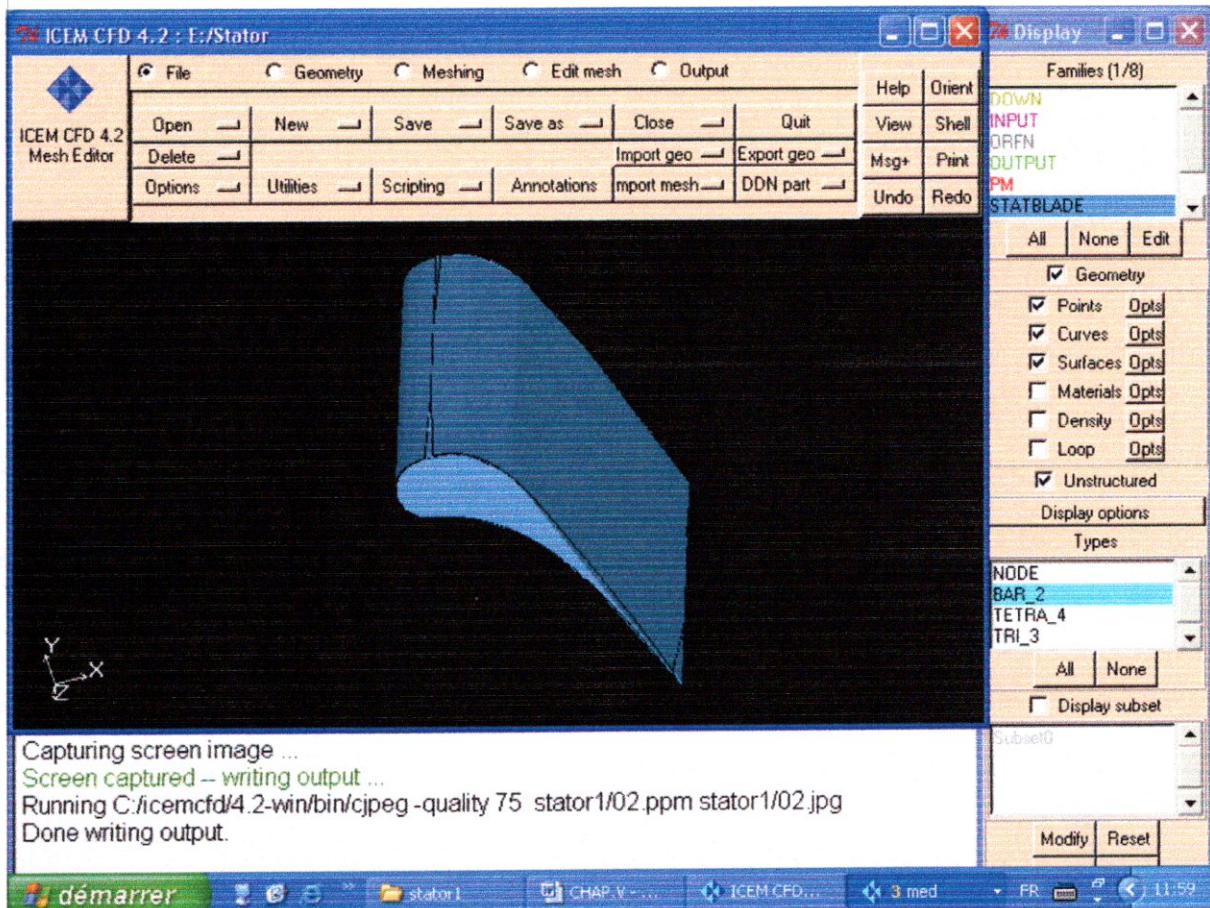


Figure (IV.12) : Aube stator importée sous le format IGES

On construit ensuite le domaine extérieur de calcul en utilisant les données de la section précédente (voir figure IV.13).

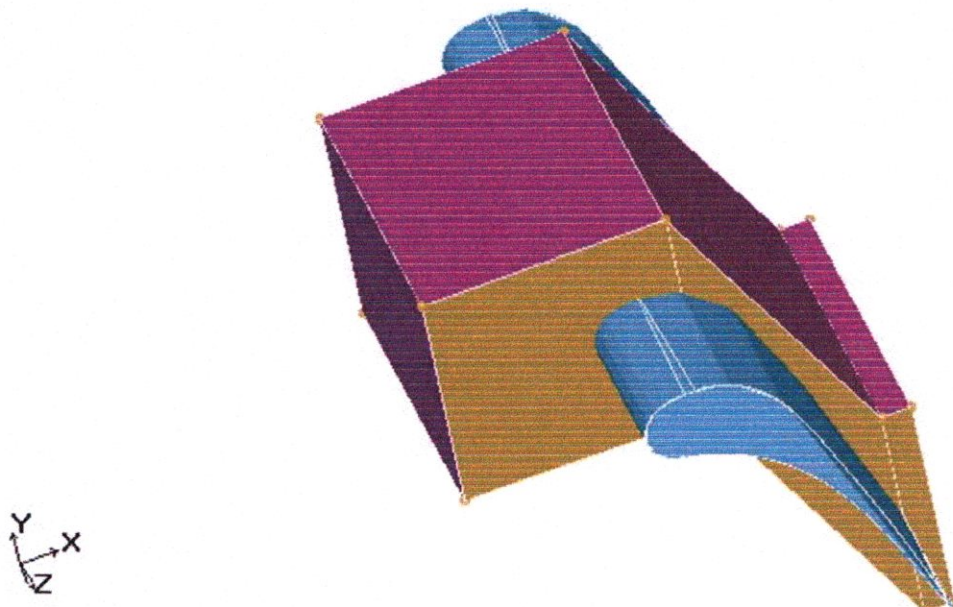


Figure (IV.13) : Domaine de calcul stator en 3D

Le maillage non structuré composé d'éléments tétraédriques est montré aux figures (IV.14) et (IV.15).

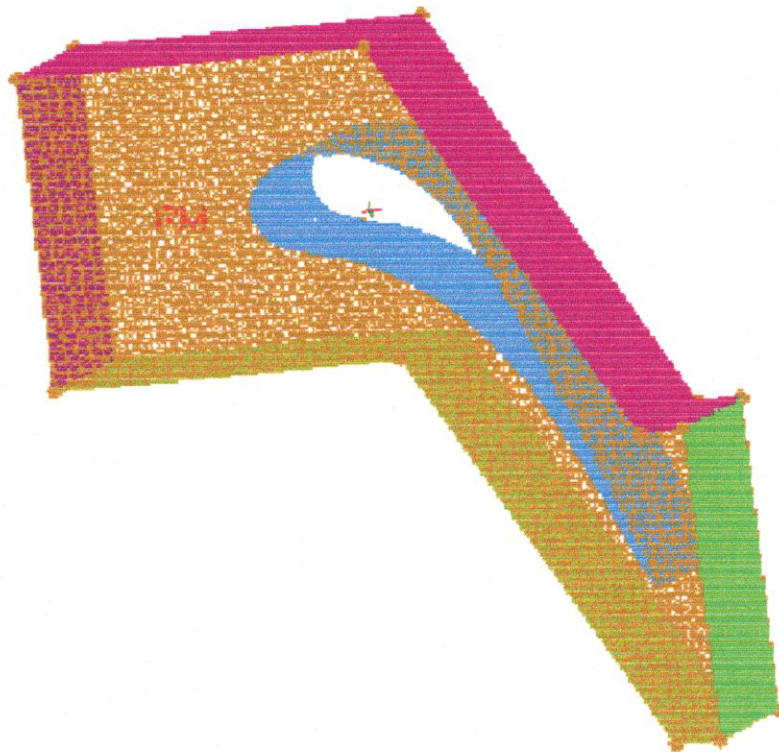


Figure (IV.14) : Maillage du stator en 3D

La figure (IV.14) montre le maillage de surface du domaine de calcul alors que la figure (IV.15) montre le maillage de surface de l'aube.

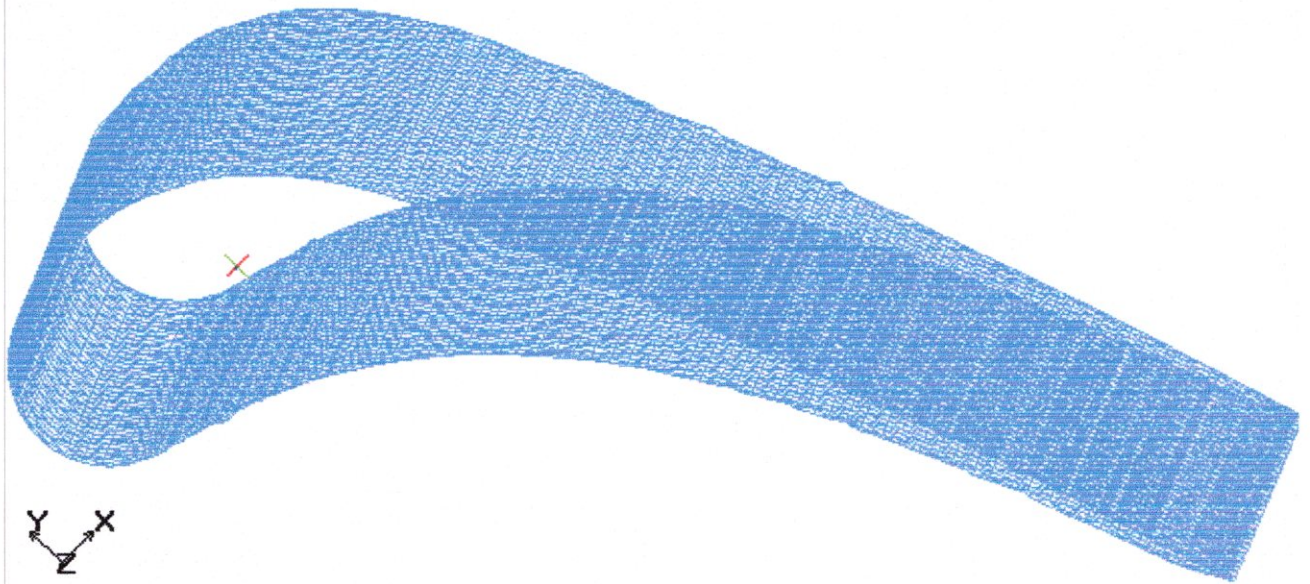


Figure (IV.15) : Maillage de surface de l'aube du stator en 3D

IV.2.2. L'aube du rotor :

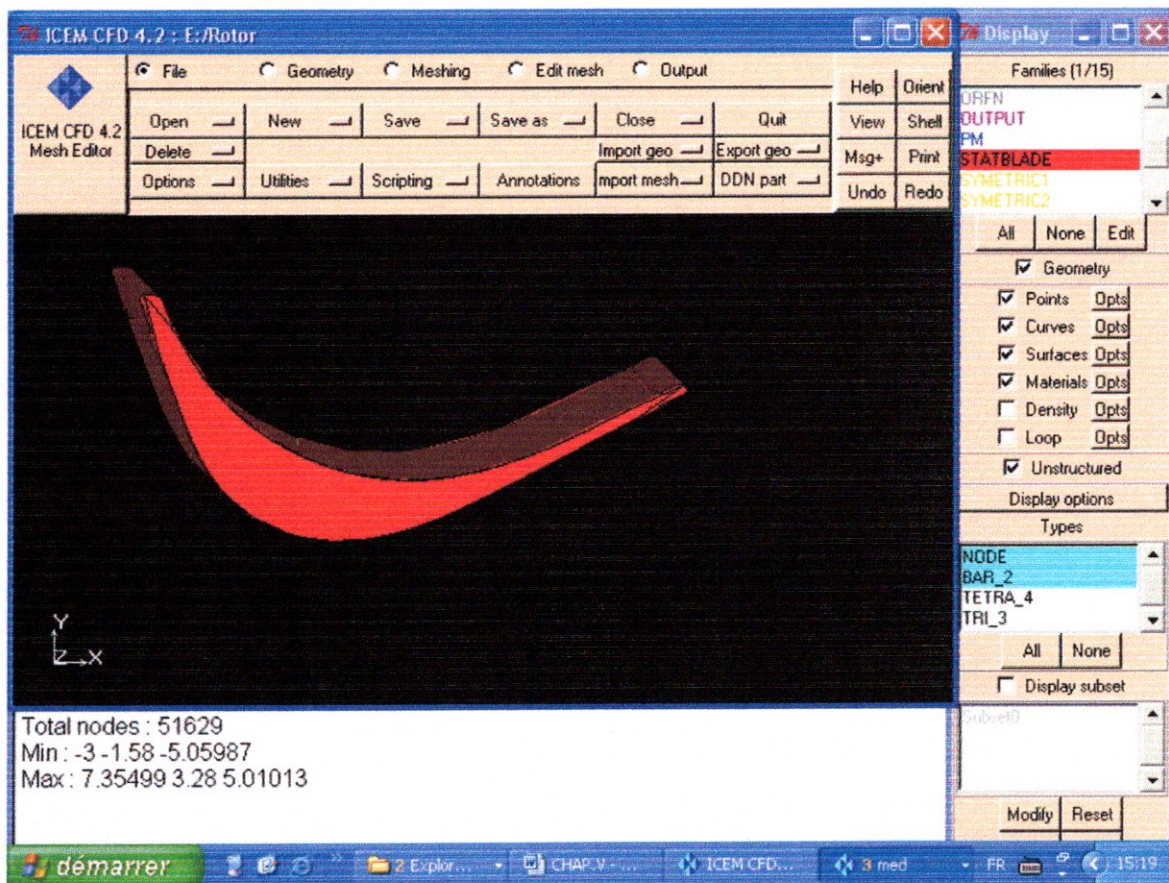


Figure (IV.16) : profil d'aube rotor importé sous format IGES

Les mêmes procédures sont refaites pour le rotor. Les figures suivantes (IV.16-17-18-19) montrent les différentes étapes des processus utilisés.

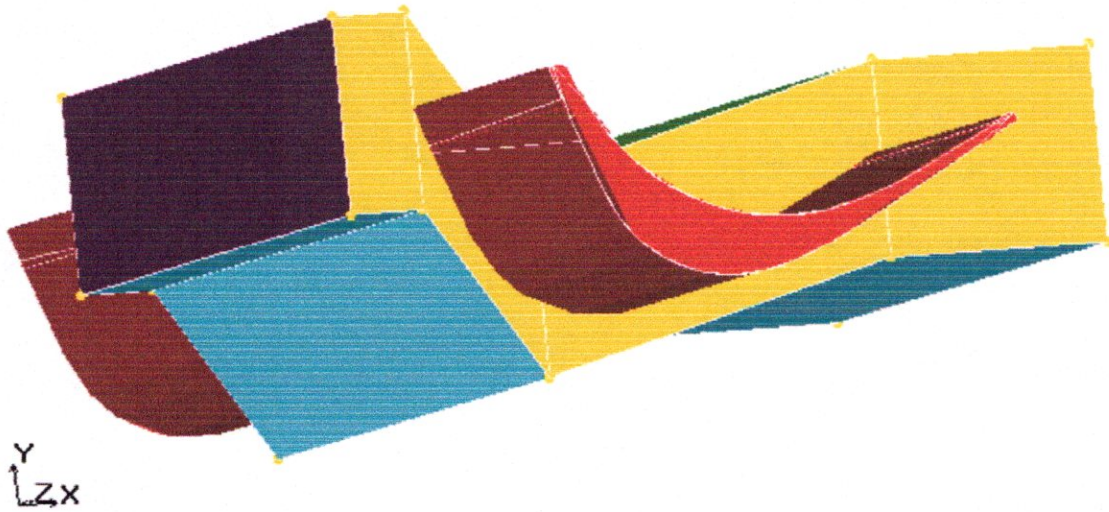


Figure (IV.17) : domaine de calcul rotor en 3D

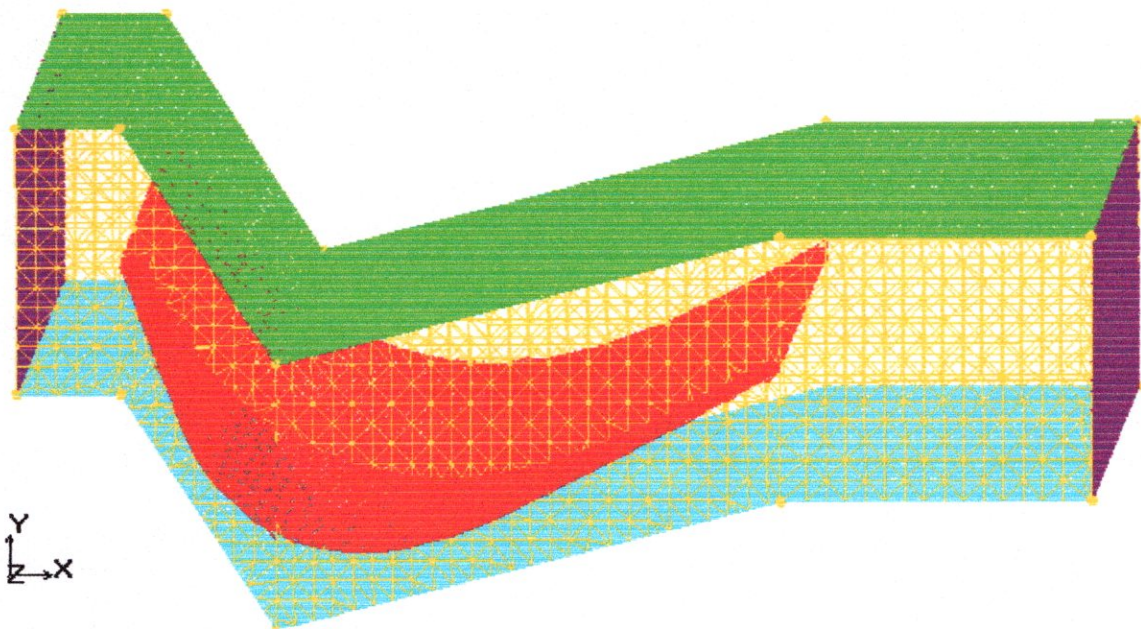


Figure (IV.18) : maillage rotor en 3D

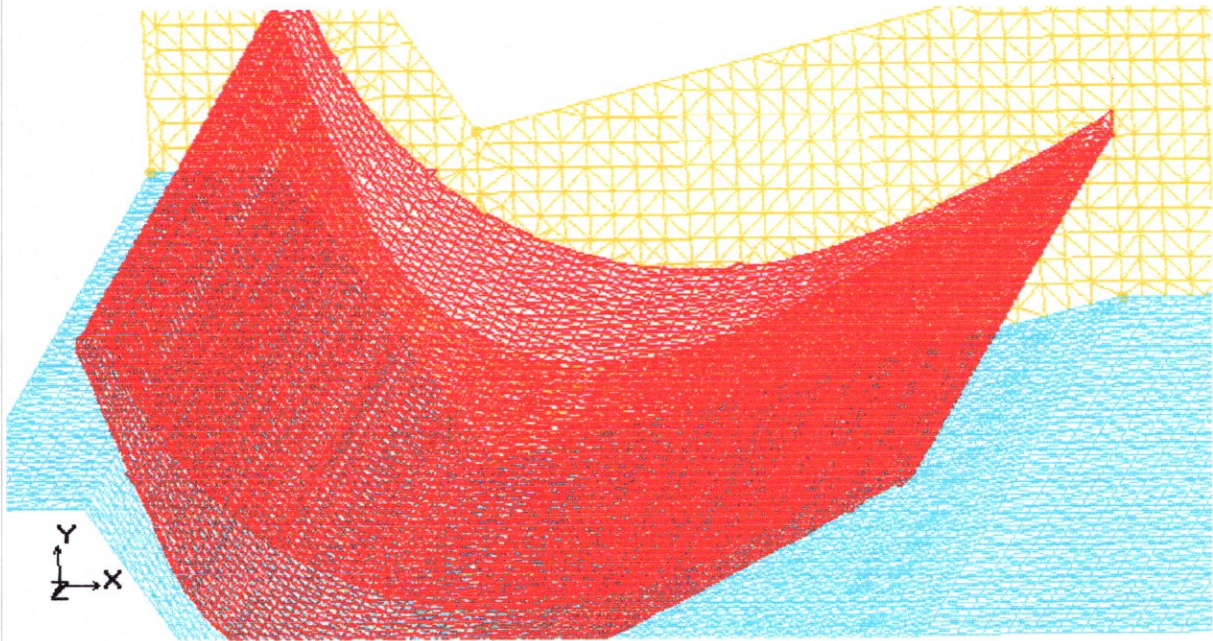


Figure (IV.19) : maillage rotor sur les surfaces

Pour que des défaut sur la qualité du maillage généré, les figures (IV.20-21) montre l'allure de celui-ci sur le plan de symétrie en 2D.

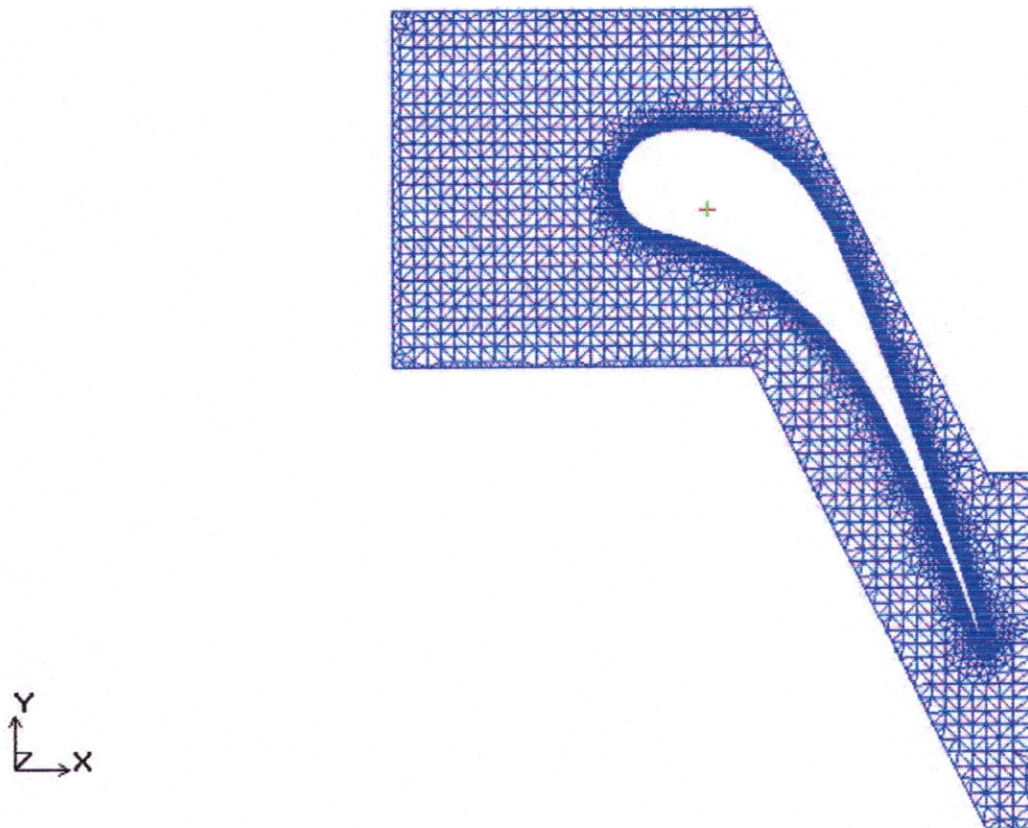


Figure (IV.20) : maillage stator 2D

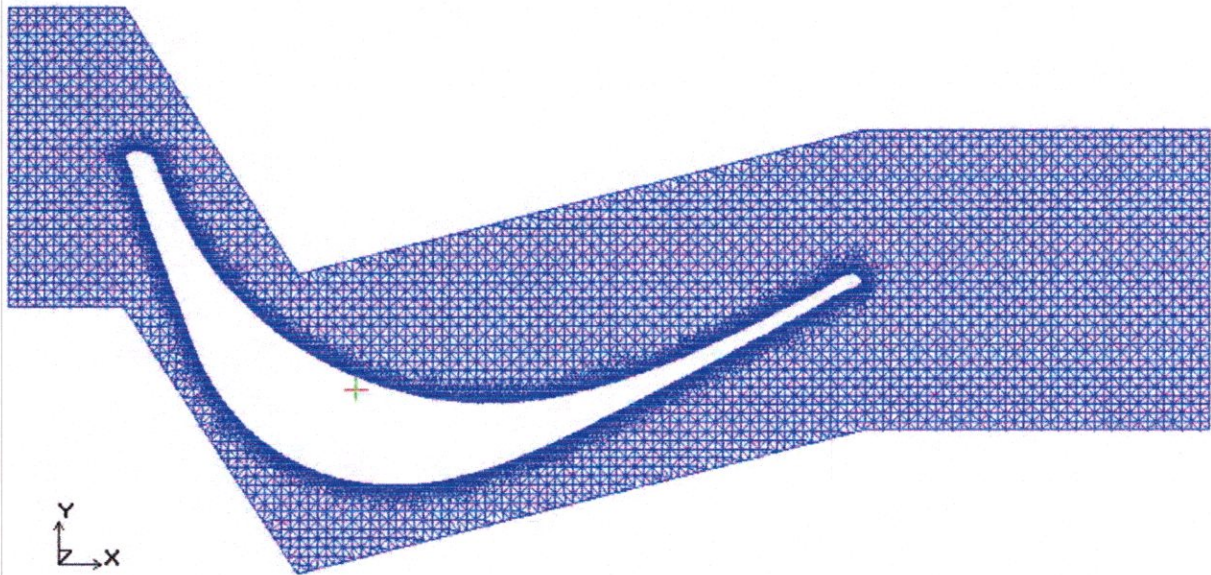


Figure (IV.21) : maillage rotor 2D

Tableau (IV.1): Paramètres de maillage du stator

Nombre d'éléments tetra	705407
Nombre de nœuds	144001
Nombre de triangles sur l'aube	66658

Tableau (IV.2): Paramètres de maillage du rotor

Nombre d'éléments tetra	886583
Nombre de nœuds	187672
Nombre de triangles sur l'aube	67467

IV.3. Résultats par FLUENT :

On a commencé par un calcul non visqueux 3D, pour passer ensuite au calcul visqueux en utilisant deux modèles de turbulence K- ϵ et K- Ω .

IV.3.1. Définition des cas test :

Les cas tests étudiés sont représentés dans les tableaux (IV.3) et (IV.4), pour plus de détail voir (annexe D) :

Tableau (IV.3) : Définition des cas test stator

Cas test	Itérations temps total d'ex.	coupled	segregated	implicit	explicit	1 ^{er} ordre	2 ^{ème} ordre
Stat_inv 1	200 60'		✓	✓		✓	
Stat_inv 2	50 10'	✓			✓		✓
Stat_K- e1	150 40'		✓	✓		✓	
Stat_K- e-2	400 90'	✓			✓		✓
Stat_K- w1	150 60'		✓	✓		✓	
Stat_K- w2	200 50'	✓			✓		✓

Tableau (IV.4) : Définition des cas test rotor

Cas test	Itérations temps exé	coupled	segregated	implicit	explicit	1 ^{er} ordre	2 ^{ème} ordre
rot_inv1	100 40'		✓	✓		✓	
rot_inv2	200 60'	✓			✓		✓
rot_K-e1	80 60'		✓		✓		✓
Stat_K- w1	80 40'	✓			✓		✓

IV.3.2. Conditions aux limites :

Cette phase est la plus importante, par ce qu'on doit savoir le type de condition qui convient à chaque zone.

Il existe plusieurs types de conditions aux limites dans fluent ; parmi lesquels, on cite :

- Condition 'pressure inlet' : la pression totale et la température totale et la pression relative sont données à l'entrée du domaine.
- Condition 'pressure outlet' :
- Condition 'symmetry' : les gradients normaux et la vitesse normale au plan de symétrie sont nuls.
- Condition 'wall' : condition de paroi solide.
- Condition 'periodic'.

Les conditions aux limites sont spécifiées en général dans le solveur cependant l'utilisation de la condition de type 'periodic' doit nécessairement être définie à l'étape de génération du maillage dans ICEMCFD.

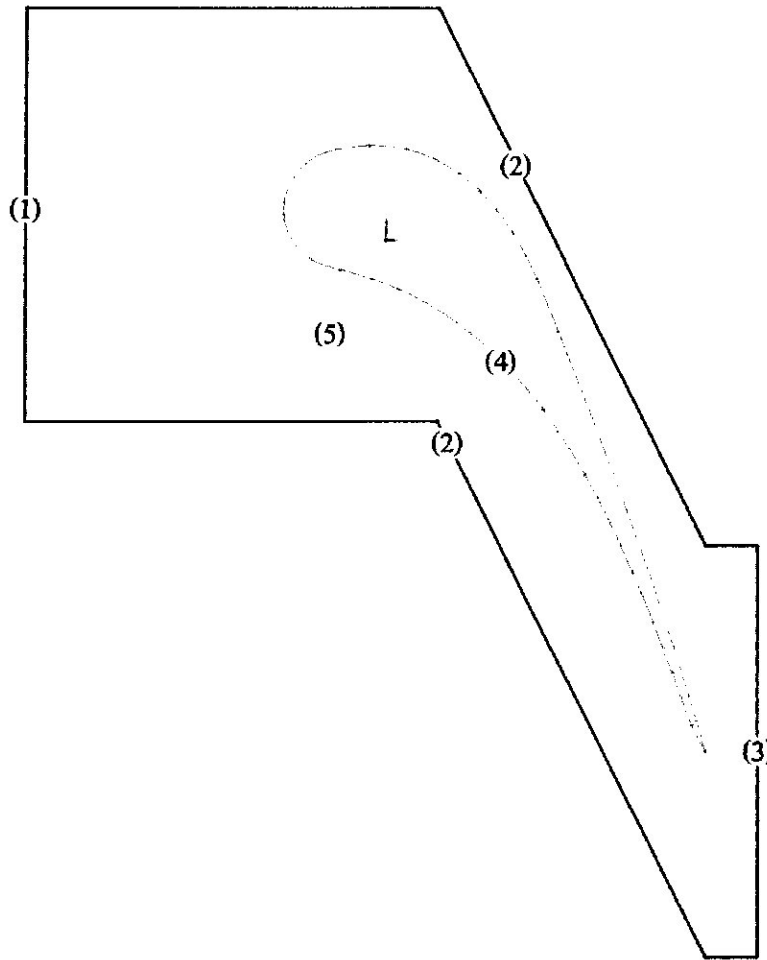


Figure (IV.22) : conditions aux limites du stator

Tableau (IV.5) : définition des CAL du stator

Numéro de la zone	Nom	Type
(1)	Input	Pressure inlet
(2)	Up-Down	periodic
(3)	Output	Pressure outlet
(4)	Blade	Wall
(5)	Interior	Interior

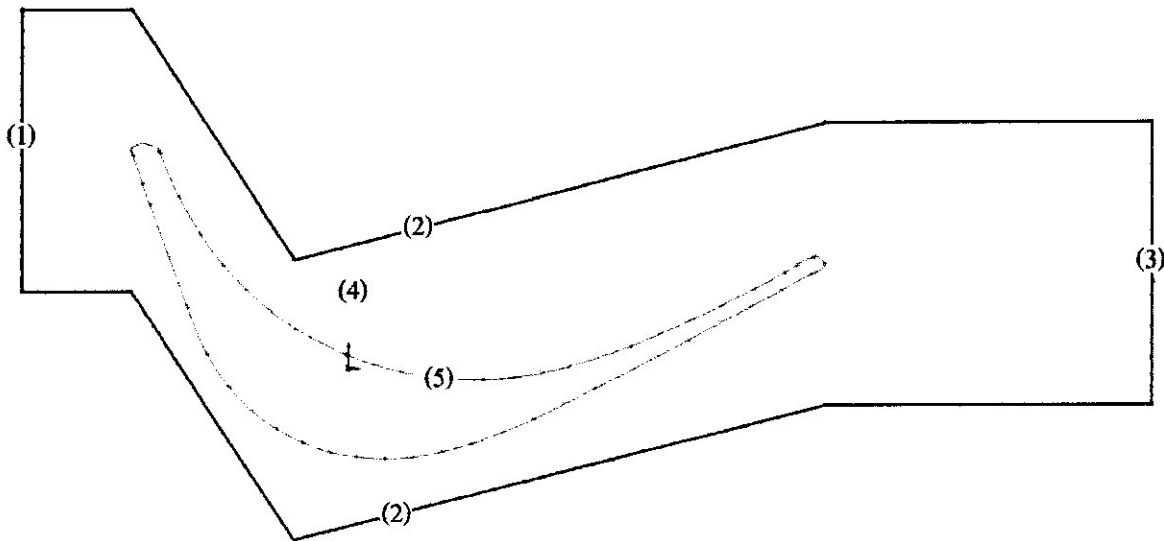


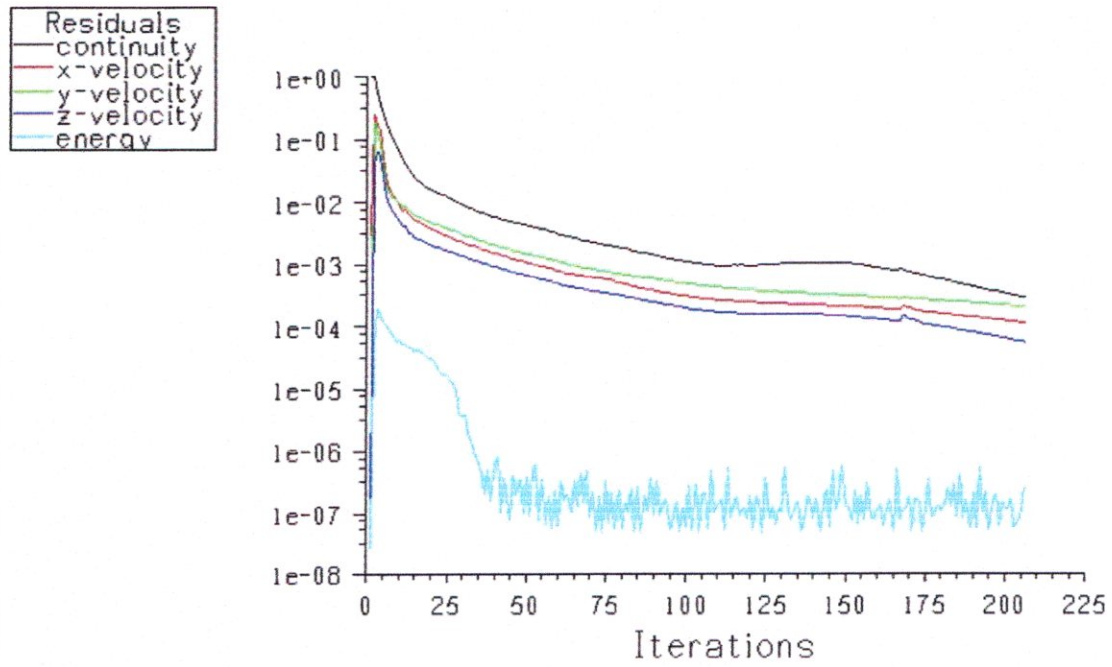
Figure (IV.23) : conditions aux limites du rotor

Tableau (IV.6) : définition des CAL du rotor

Numéro de la zone	Nom	Type
(1)	Input	Pressure inlet
(2)	Up-Down	periodic
(3)	Output	Pressure Outlet
(4)	Interior	Fluid
(5)	Blade	Wall

IV.3.3. Résultats :

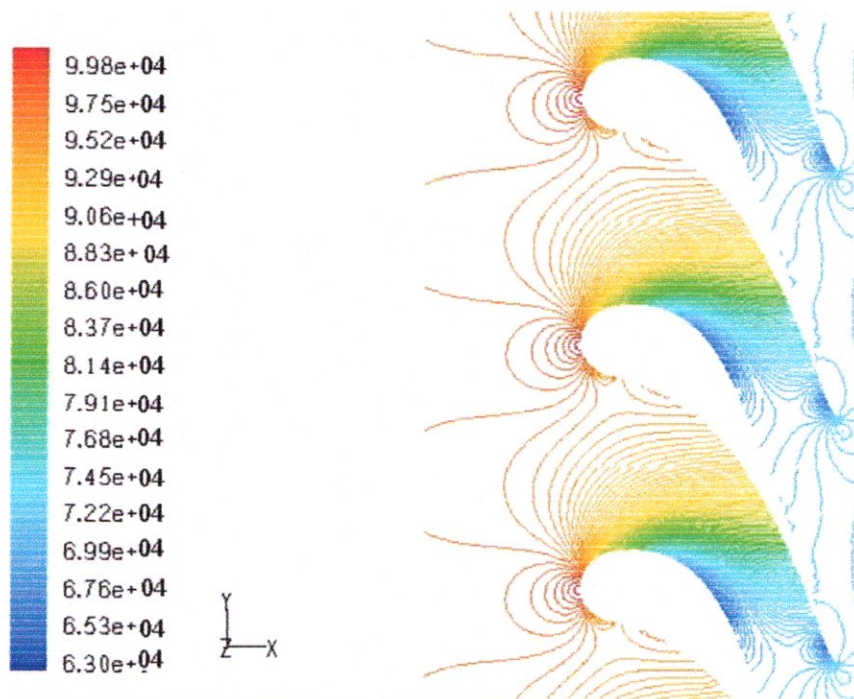
Les résultats de toutes les simulations sont présentés dans cette section.



Scaled Residuals

FLUENT 6.0 (3d, segregated)

Figure (IV.24) : résidus du cas test stat_Inv1



Contours of Static Pressure (pascal)

FLUENT 6.0 (3d, segregated)

Figure (IV.25) : contours de la pression statique du cas test stat_Inv1

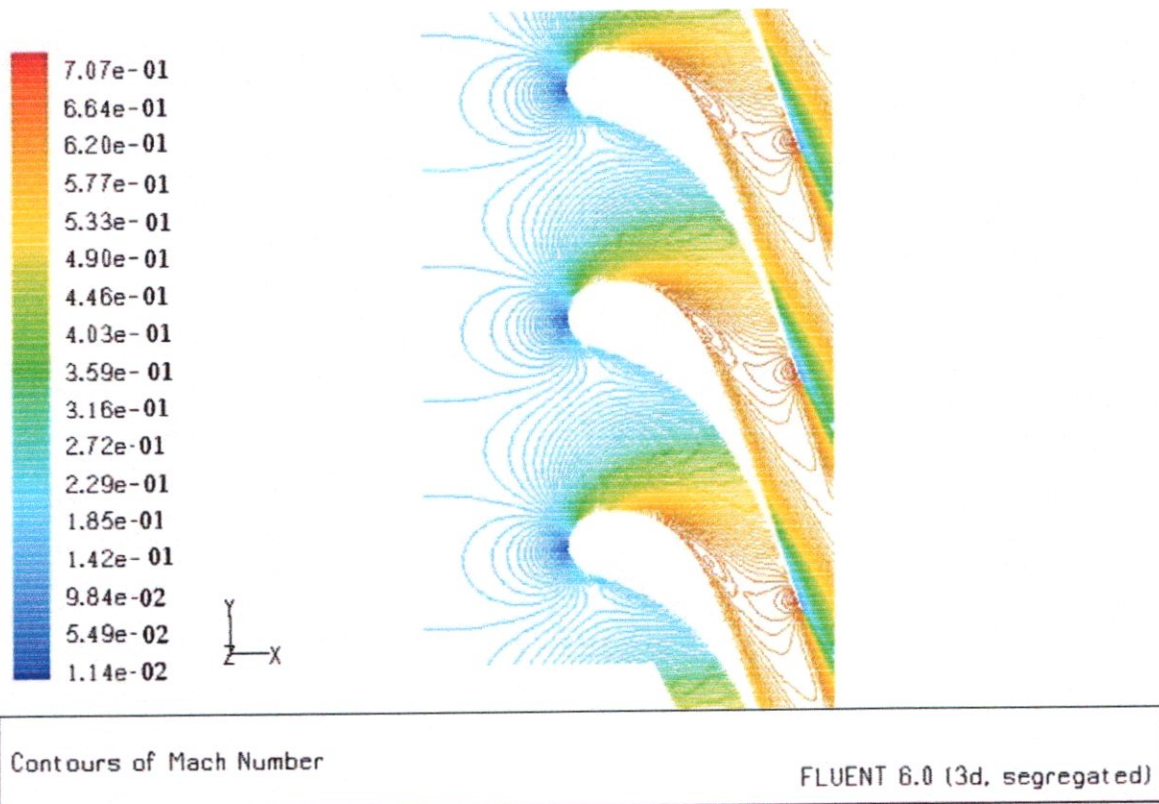


Figure (IV.26) : contours du nombre de Mach du cas test stat_Invl

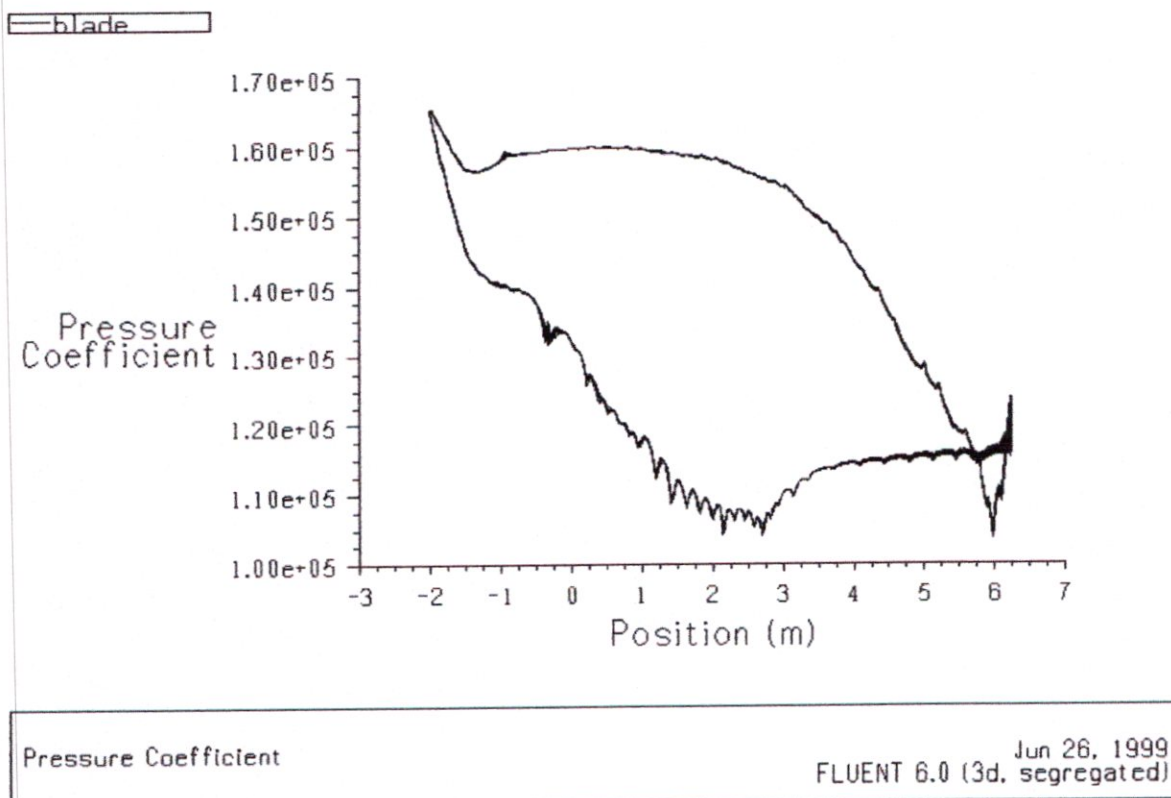
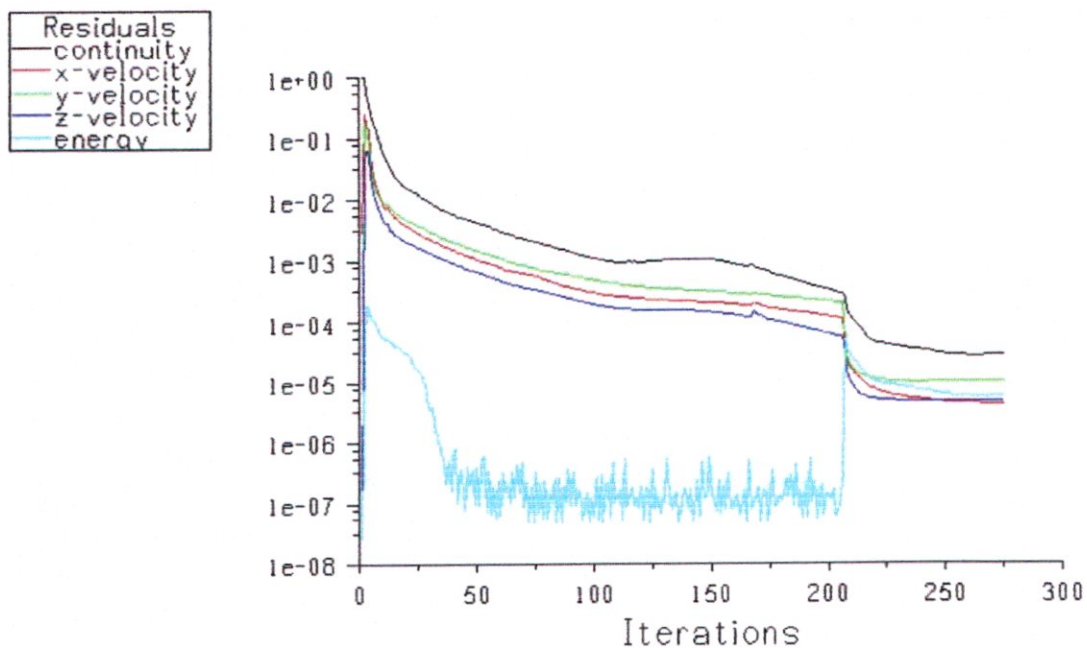
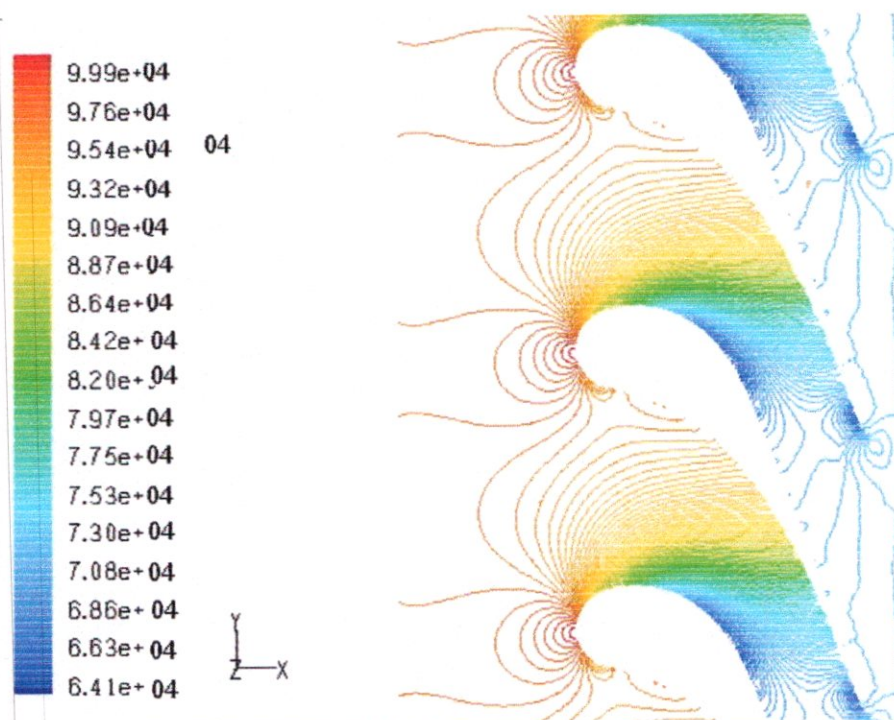


Figure (IV.27) : Cp du cas test stat_Invl



Scaled Residuals FLUENT 6.0 (3d, coupled exp)

Figure (IV.28) : résidus du cas test stat_Inv2



Contours of Static Pressure (pascal) FLUENT 6.0 (3d, coupled exp)

Figure (IV.29) : contours de la pression statique du cas test stat_Inv2

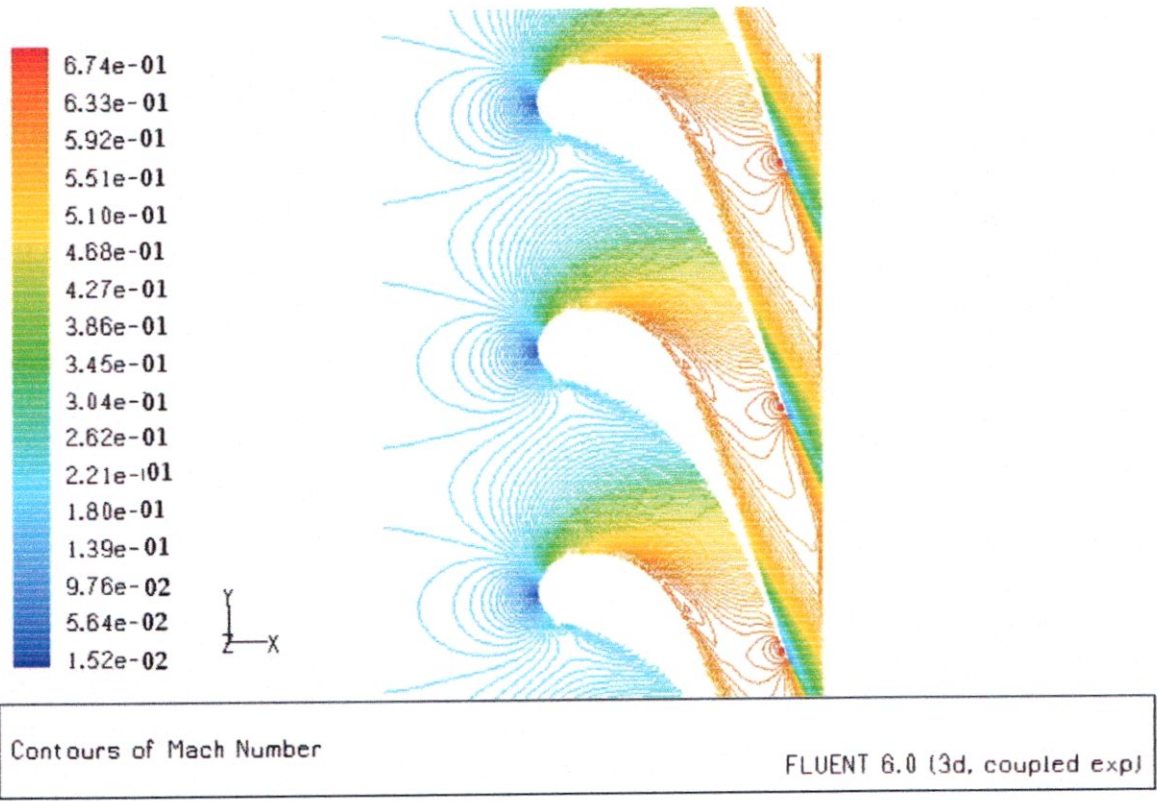


Figure (IV.30) : contours du nombre de Mach du cas test stat_Inv2

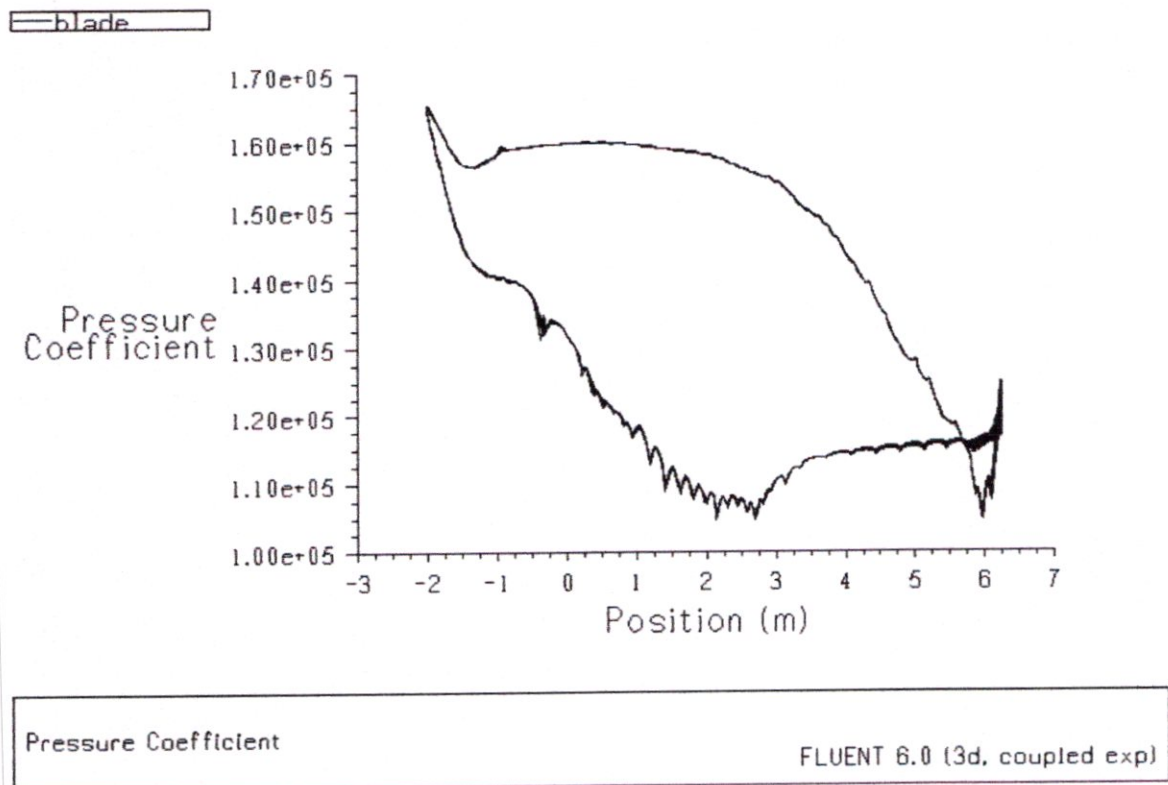
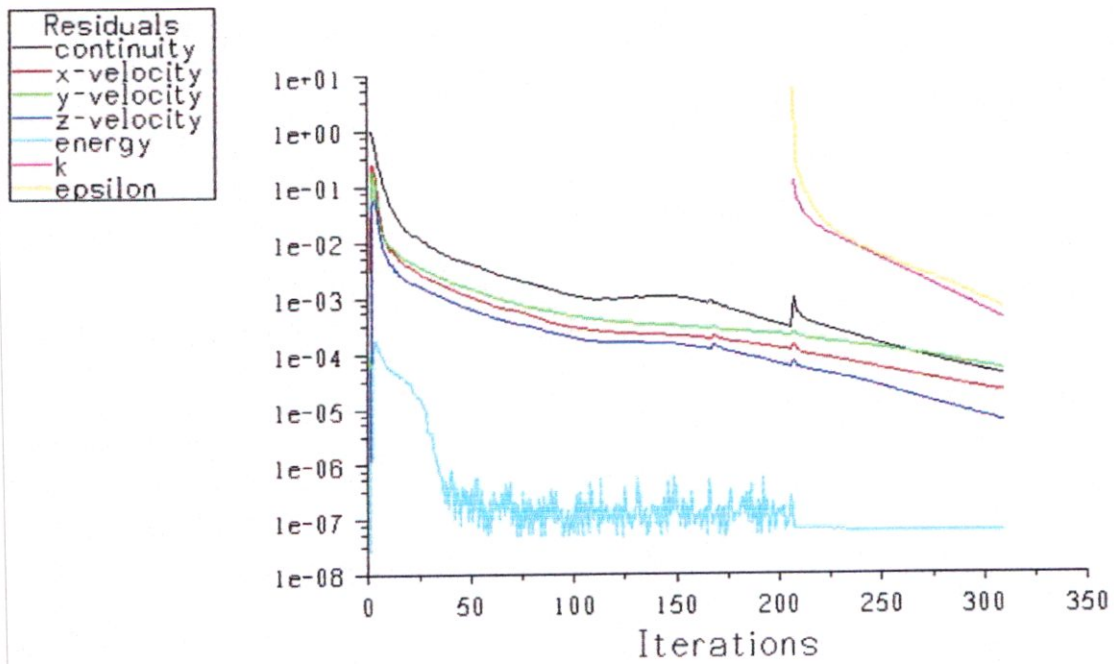


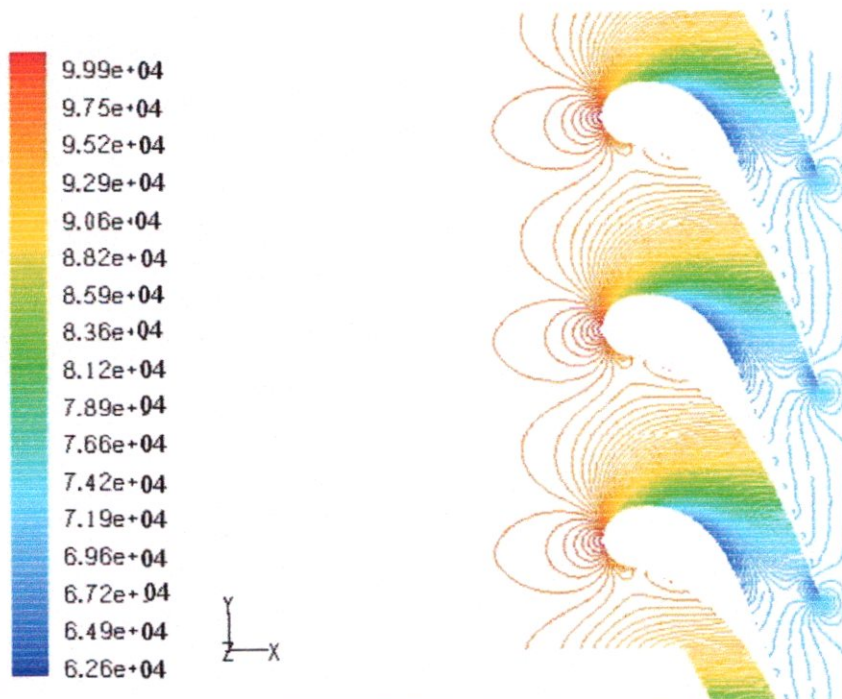
Figure (IV.31) : Cp du cas test stat_Inv2



Scaled Residuals

FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

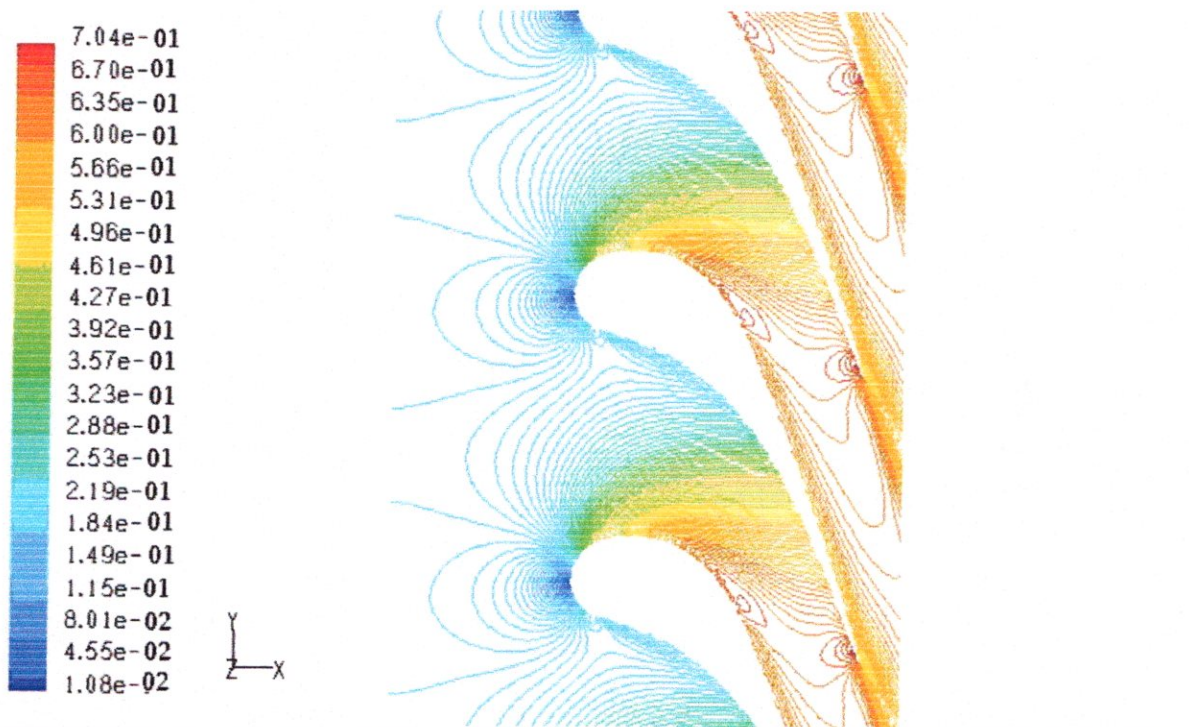
Figure (IV.32): résidus du cas test stat_K-e1



Contours of Static Pressure (pascal)

FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

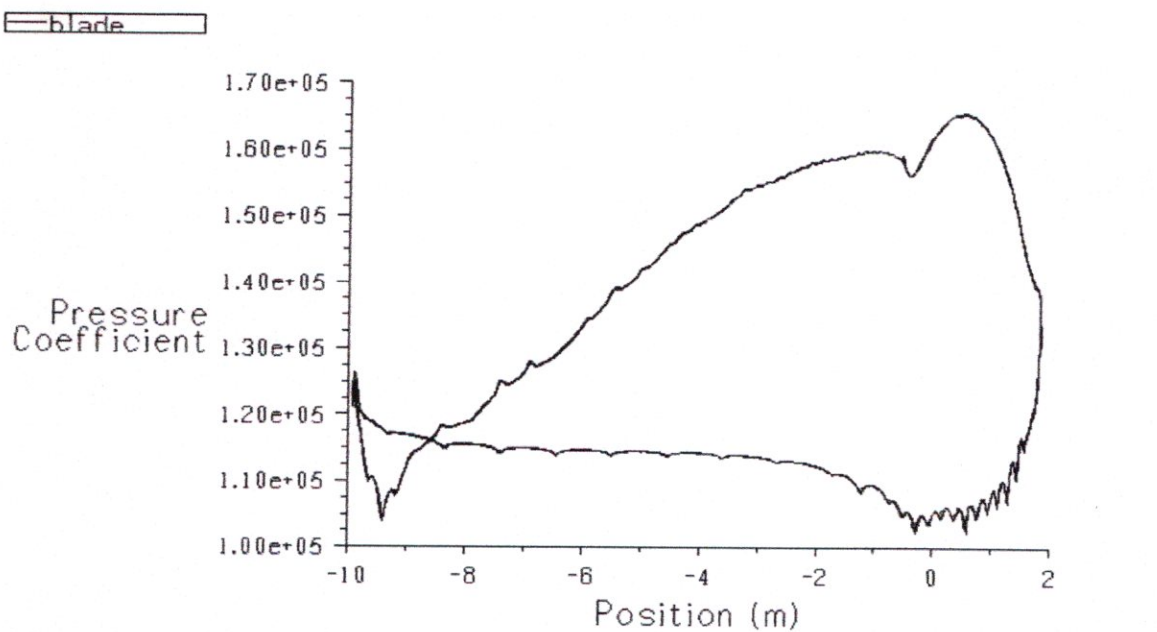
Figure (IV.33): contours de la pression statique du cas test stat_K-e1



Contours of Mach Number

FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

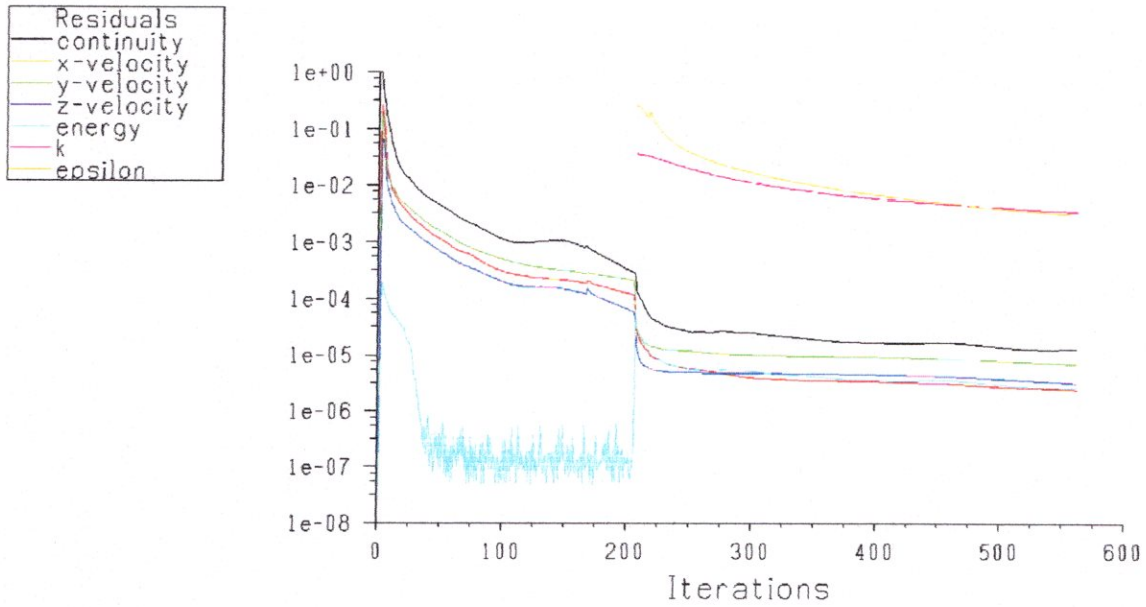
Figure (IV.34): contours du nombre de Mach du cas test stat K-e1



Pressure Coefficient

FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske)

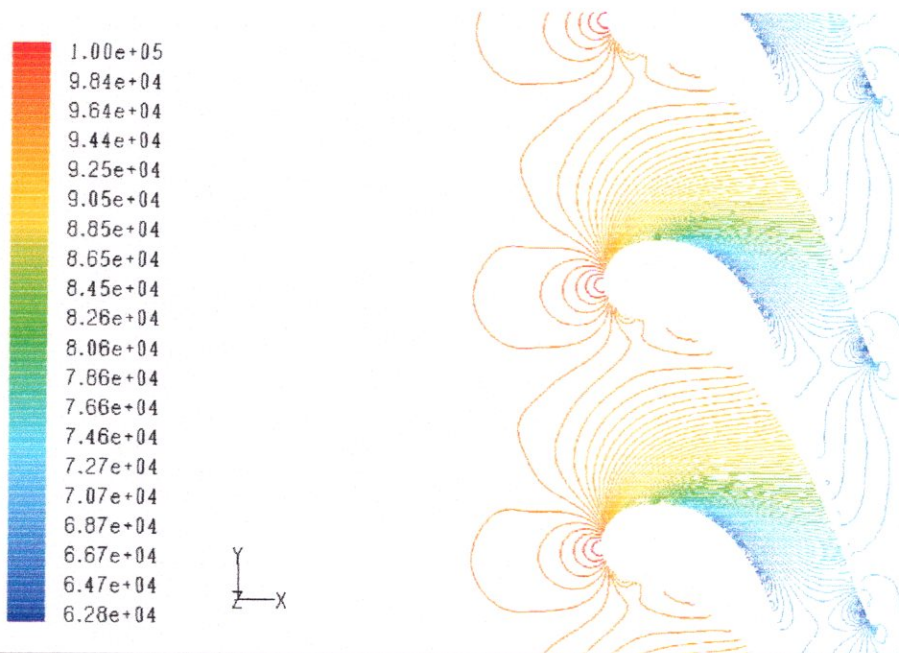
Figure (IV.35): Cp du cas test stat K-e1



Scaled Residuals

Jun 27, 2006
FLUENT 6.0 (3d, coupled exp, ske)

Figure (IV.36): résidus du cas test stat_K-e2



Contours of Static Pressure (pascal)

Jun 27, 2006
FLUENT 6.0 (3d, coupled exp, ske)

Figure (IV.37): contours de la pression statique du cas test stat_K-e2

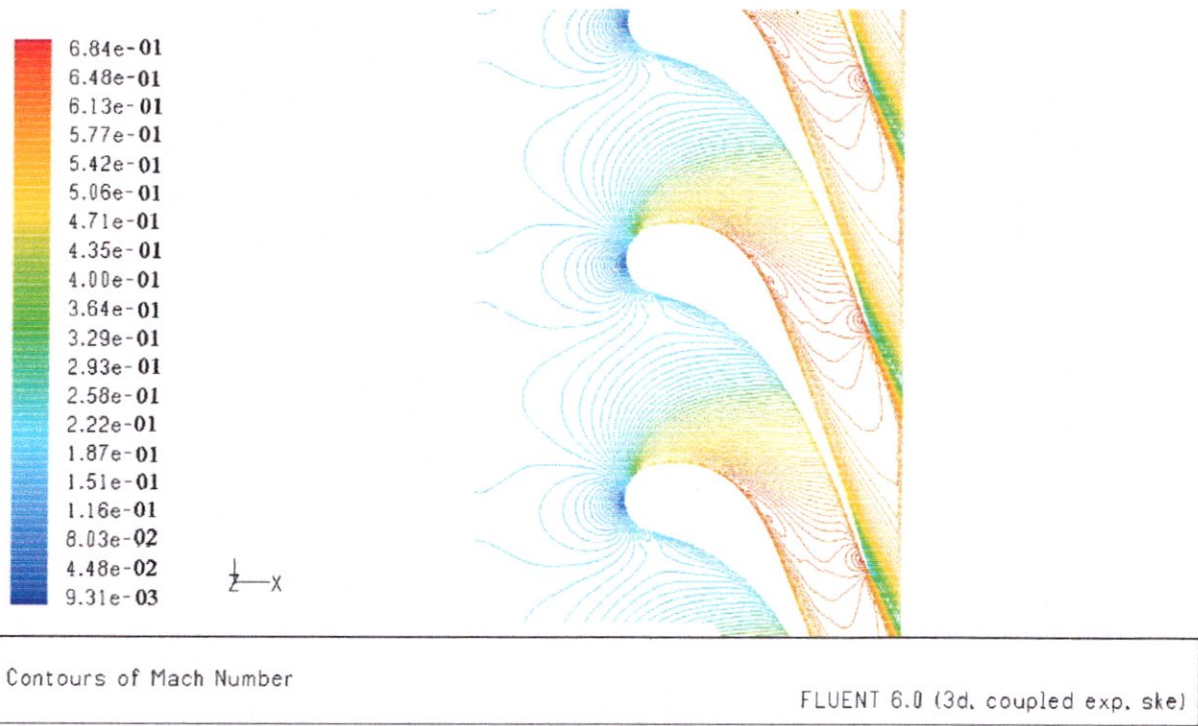


Figure (IV.38): contours du nombre de Mach du cas test stat K-e2

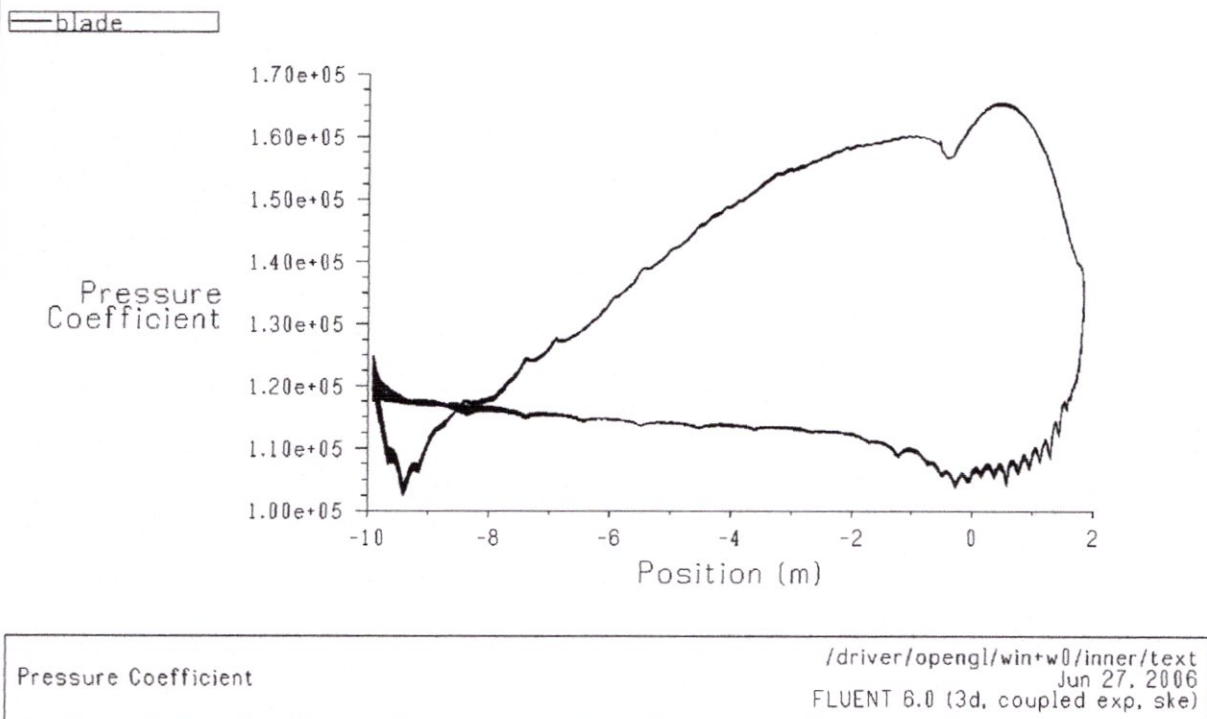
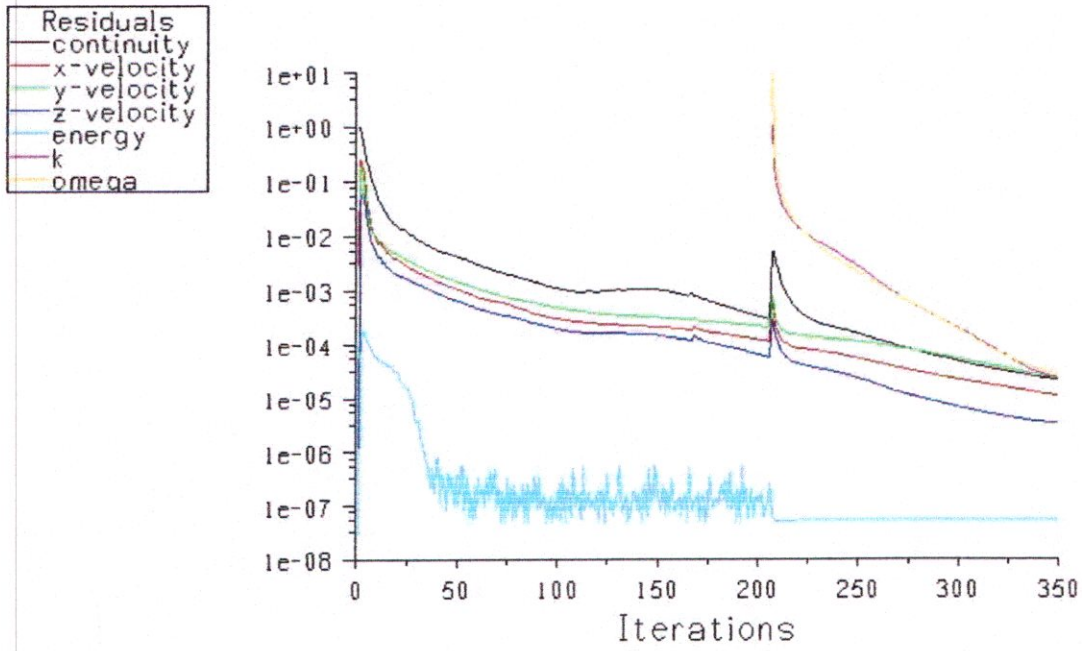


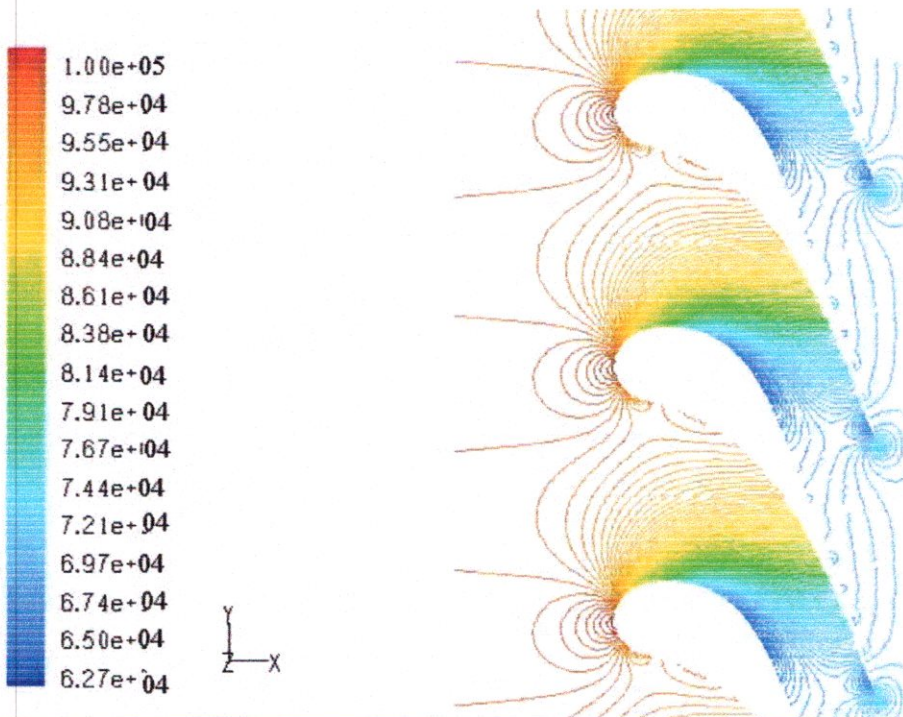
Figure (IV.39): Cp du cas test stat K-e2



Scaled Residuals

FLUENT 6.0 (3d, segregated, skw)

Figure (IV.40): résidus du cas test stat_K-w1



Contours of Static Pressure (pascal)

FLUENT 6.0 (3d, segregated, skw)

Figure (IV.41): contours de la pression statique du cas test stat_K-w1

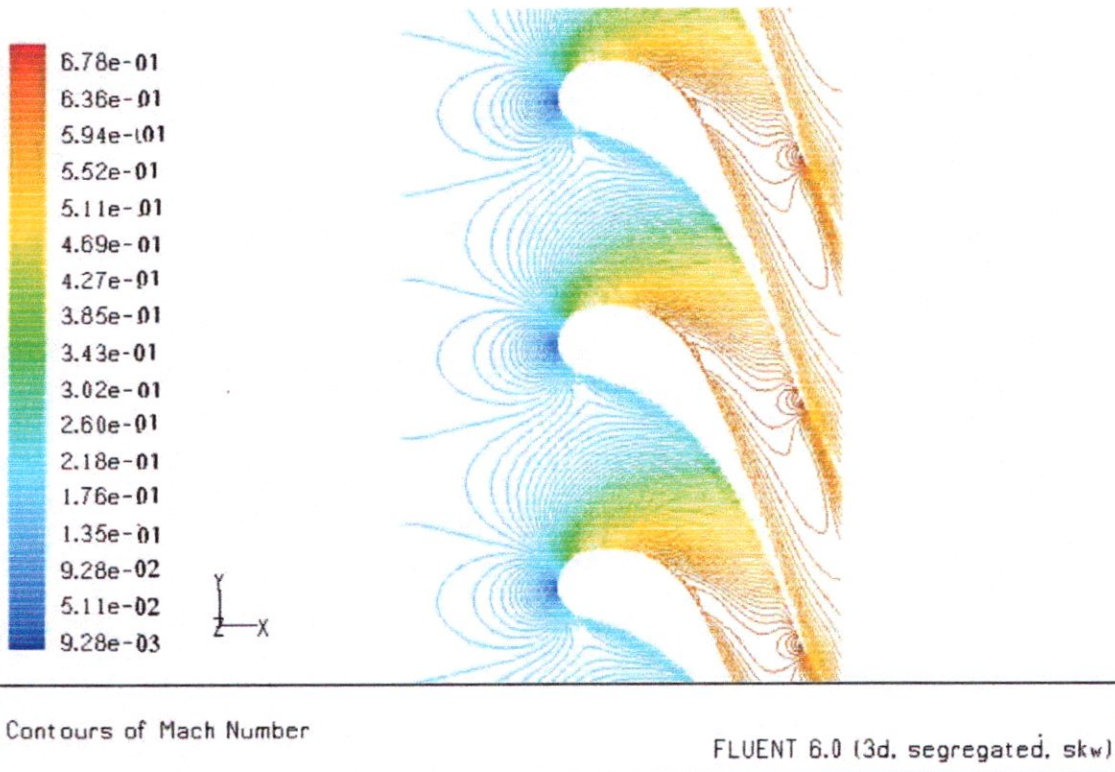


Figure (IV.42): contours du nombre de Mach du cas test stat_K-w1

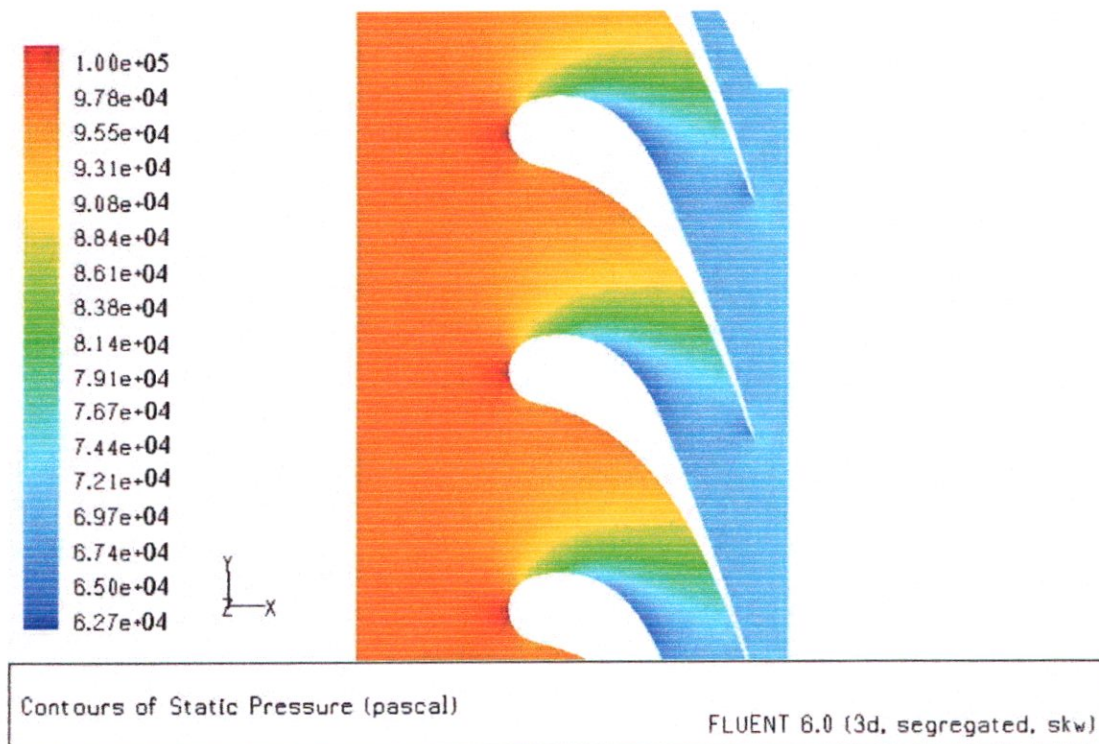
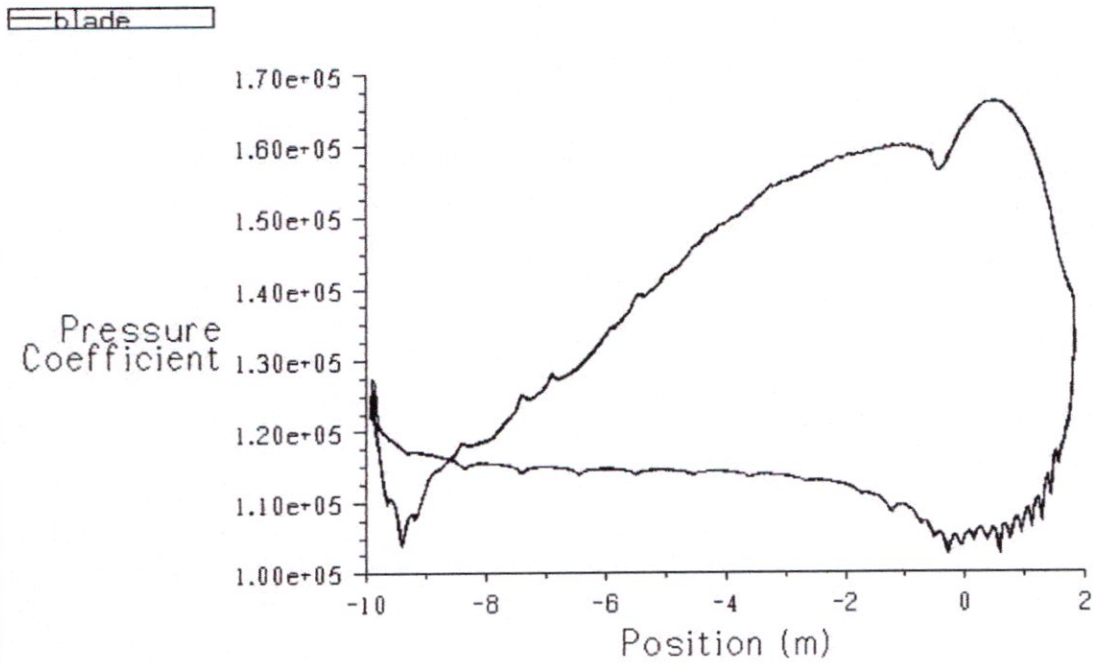


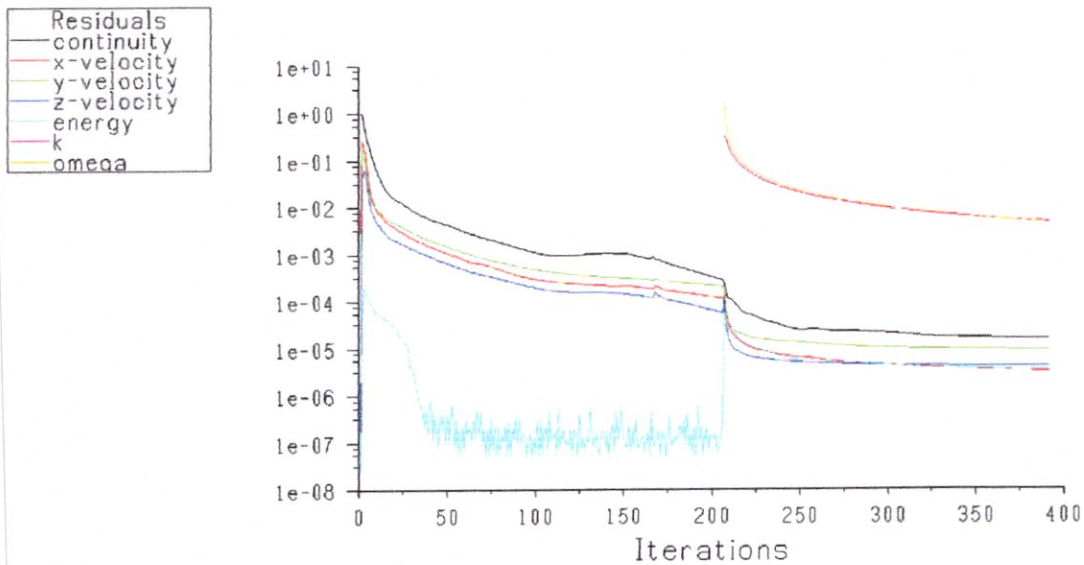
Figure (IV.43): contours de la viscosité turbulente du cas test stat_K-w1



Pressure Coefficient

FLUENT 6.0 (3d, segregated, skw)

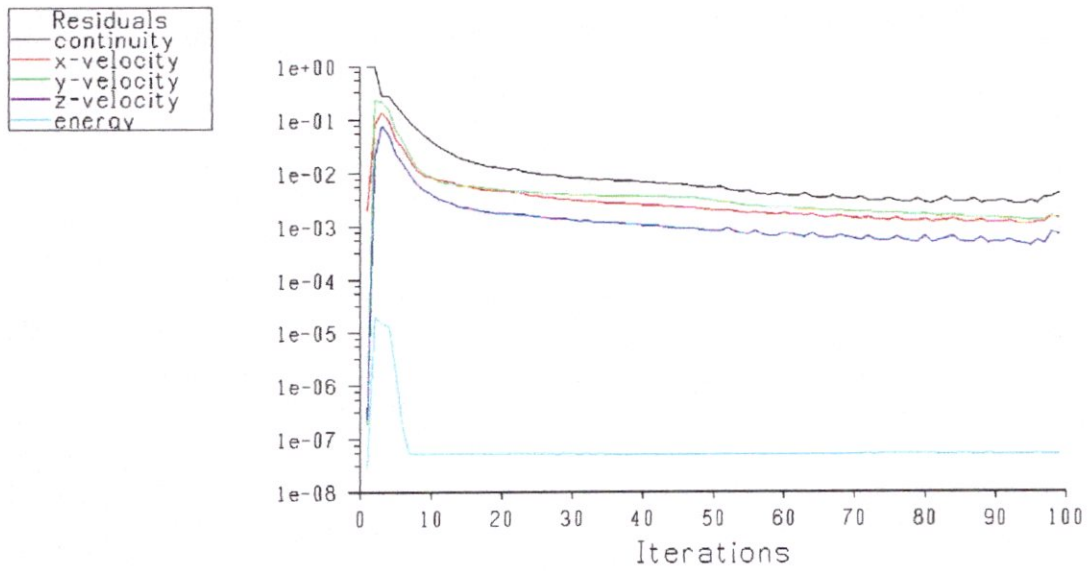
Figure (IV.44): Cp du cas test stat_K-w1



Scaled Residuals

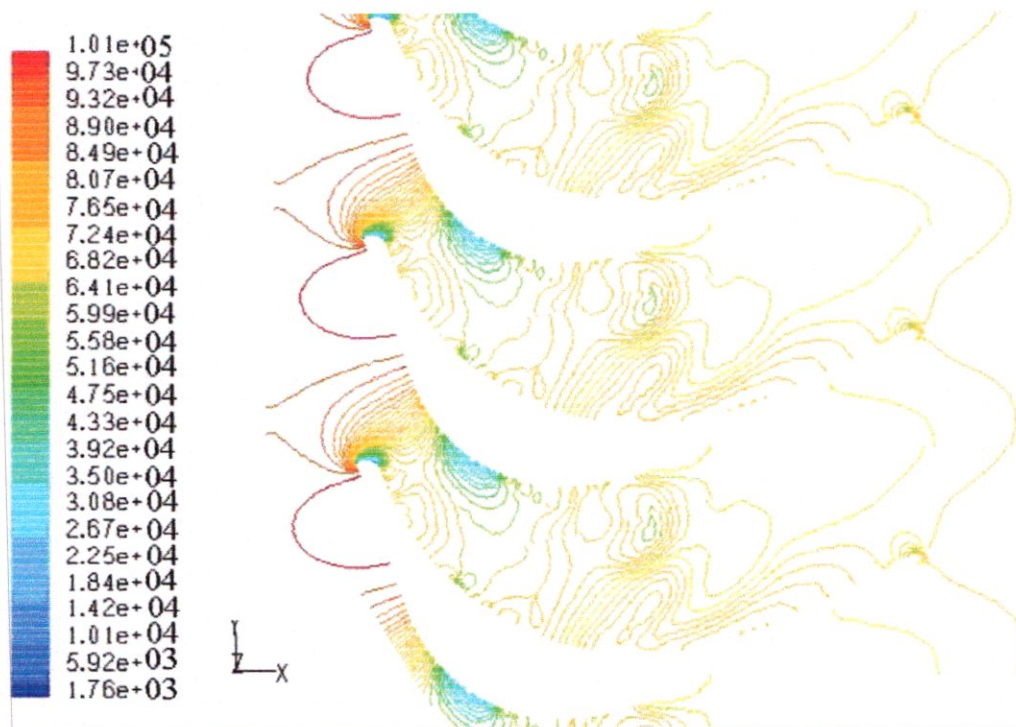
Jun 27, 2006
FLUENT 6.0 (3d, coupled exp. skw)

Figure (IV.45): résidus du cas test stat_K-w2



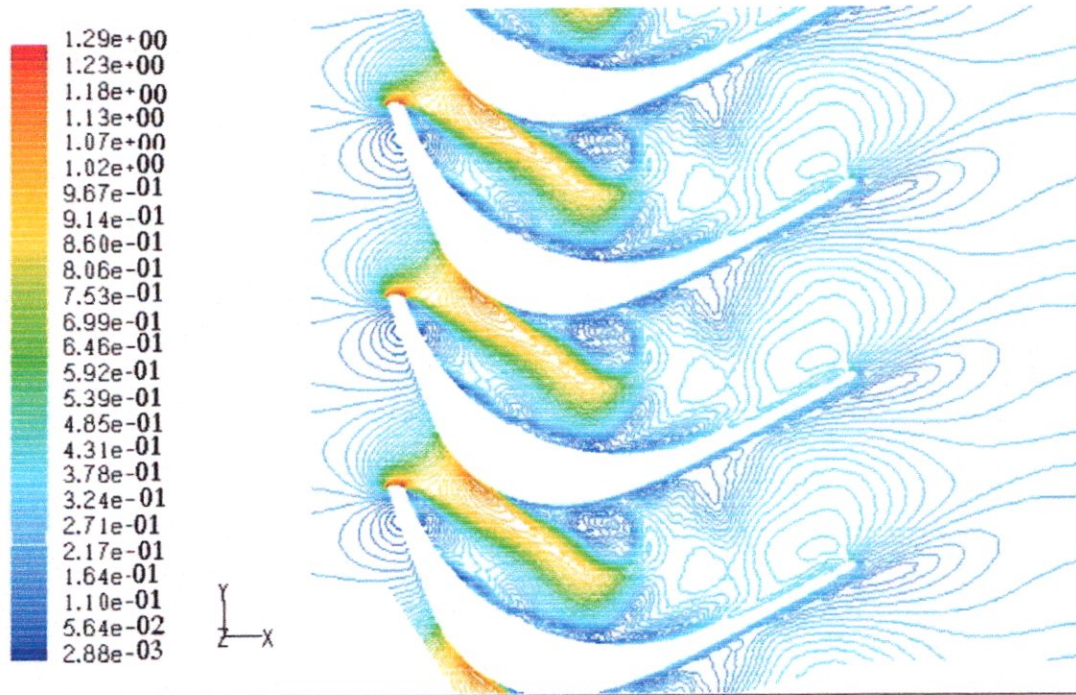
Scaled Residuals FLUENT 6.0 (3d, segregated)

Figure (IV.46) : résidus du cas test rot_Invl



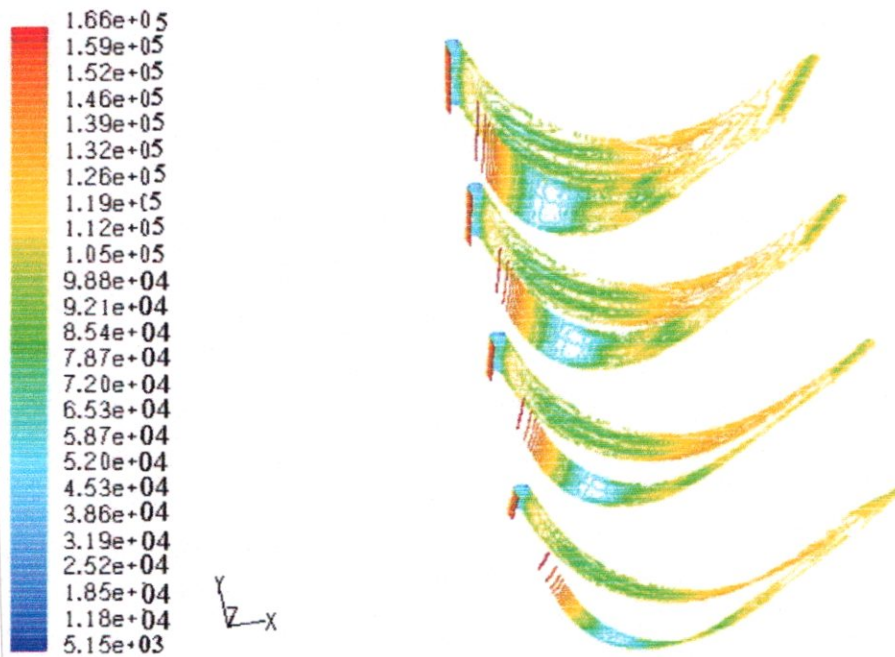
Contours of Static Pressure (pascal) FLUENT 6.0 (3d, segregated)

Figure (IV.47) : contours de la pression statique du cas test rot_Invl



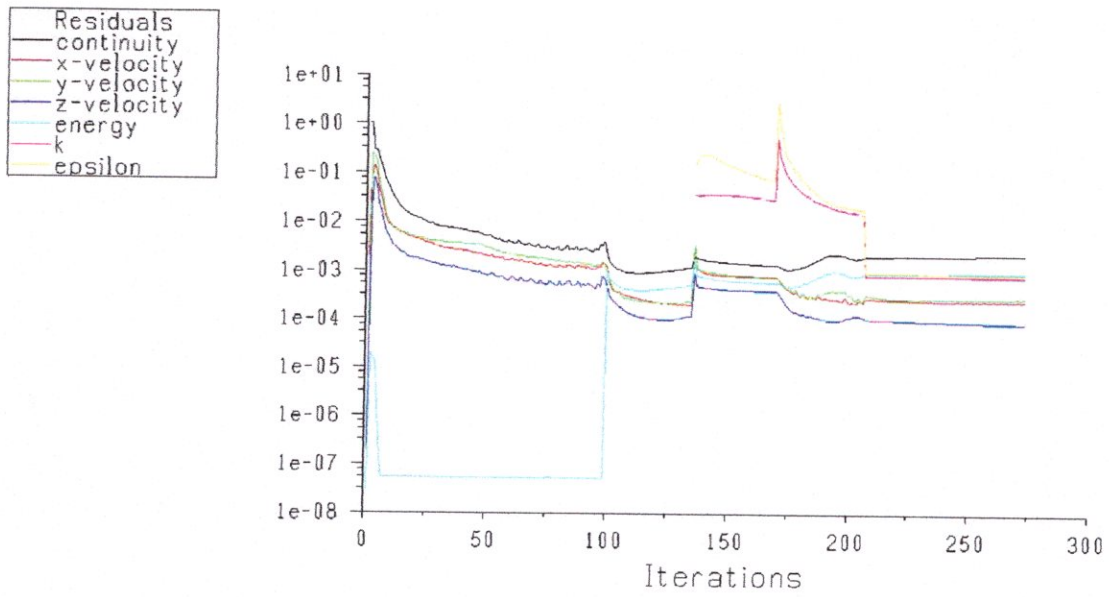
Contours of Mach Number FLUENT 6.0 (3d, segregated)

Figure (IV.48) : contours du nombre de Mach du cas test rot_Invl



Contours of Pressure Coefficient FLUENT 6.0 (3d, segregated)

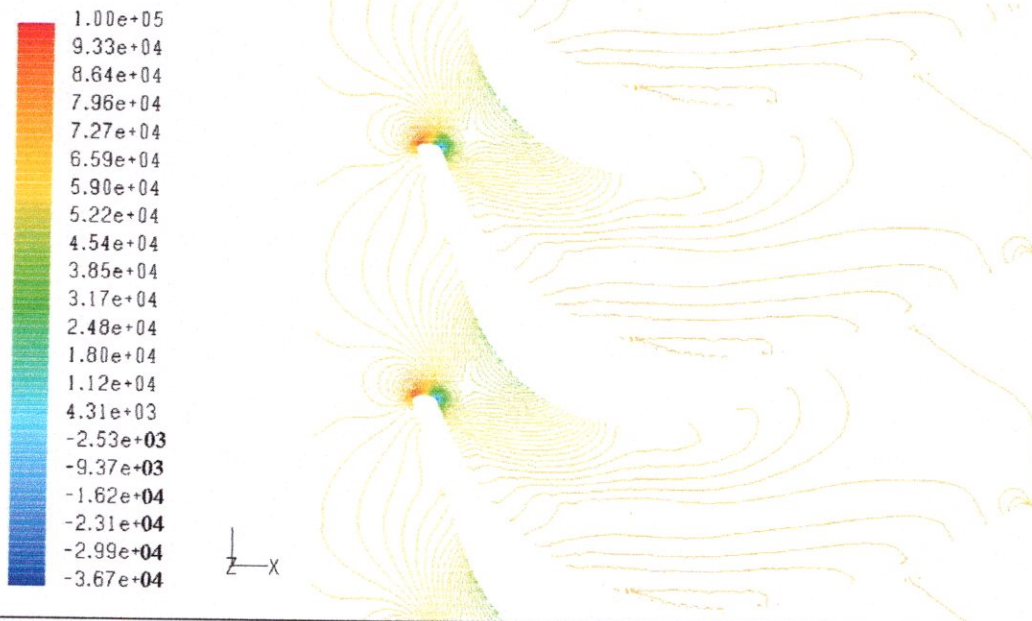
Figure (IV.49) : contours de Cp du cas test rot_Invl



Scaled Residuals

FLUENT 6.0 (3d, coupled exp, ske)

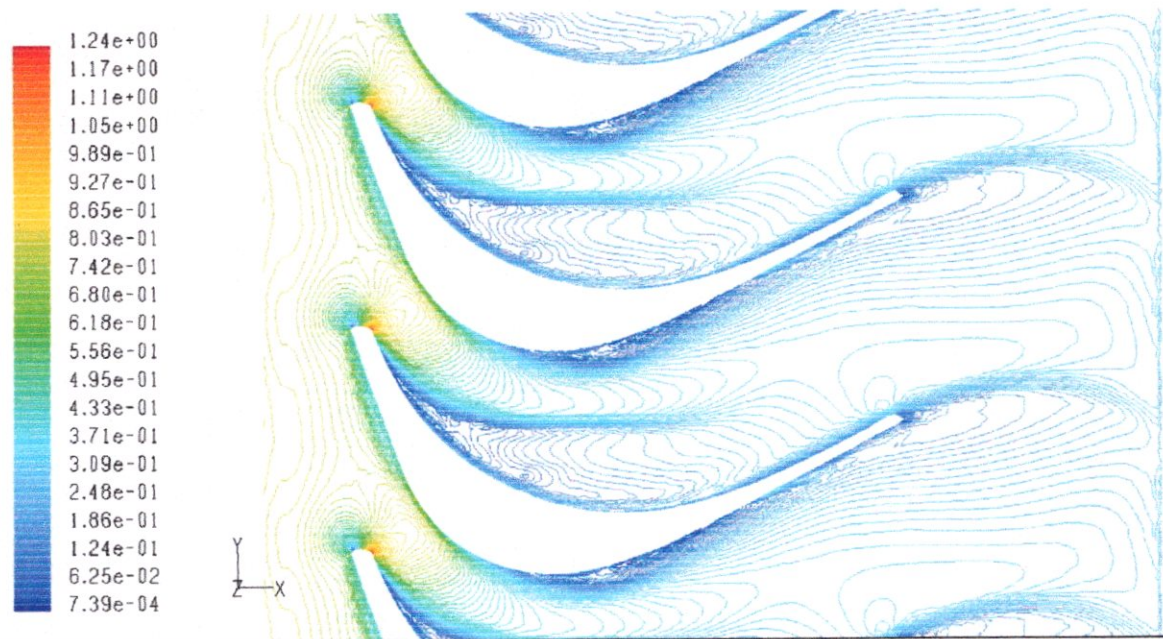
Figure (IV.50): résidus du cas test rot_K-e1



Contours of Static Pressure (pascal)

FLUENT 6.0 (3d, coupled exp, ske)

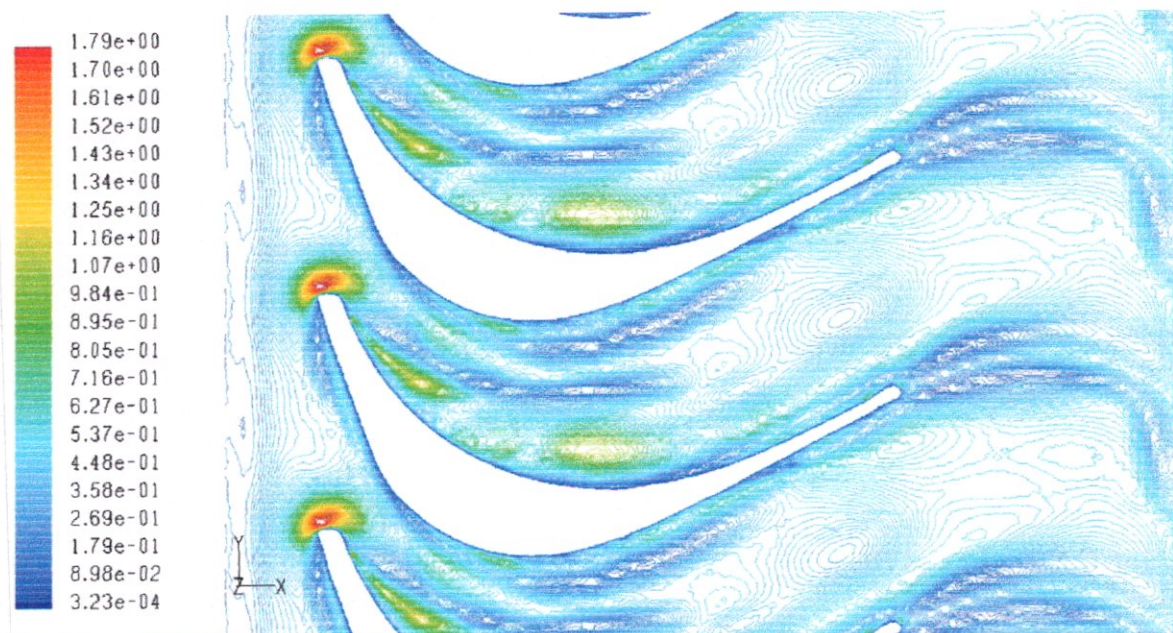
Figure (IV.51): contours de la pression statique du cas test rot_K-e1



Contours of Mach Number

FLUENT 6.0 (3d, coupled exp. ske)

Figure (IV.52): contours du nombre de Mach du cas test rot_K-e1



Contours of Turbulent Viscosity (kg/m-s)

FLUENT 6.0 (3d, coupled exp. ske)

Figure (IV.53): contours de la viscosité turbulente du cas test rot_K-e1

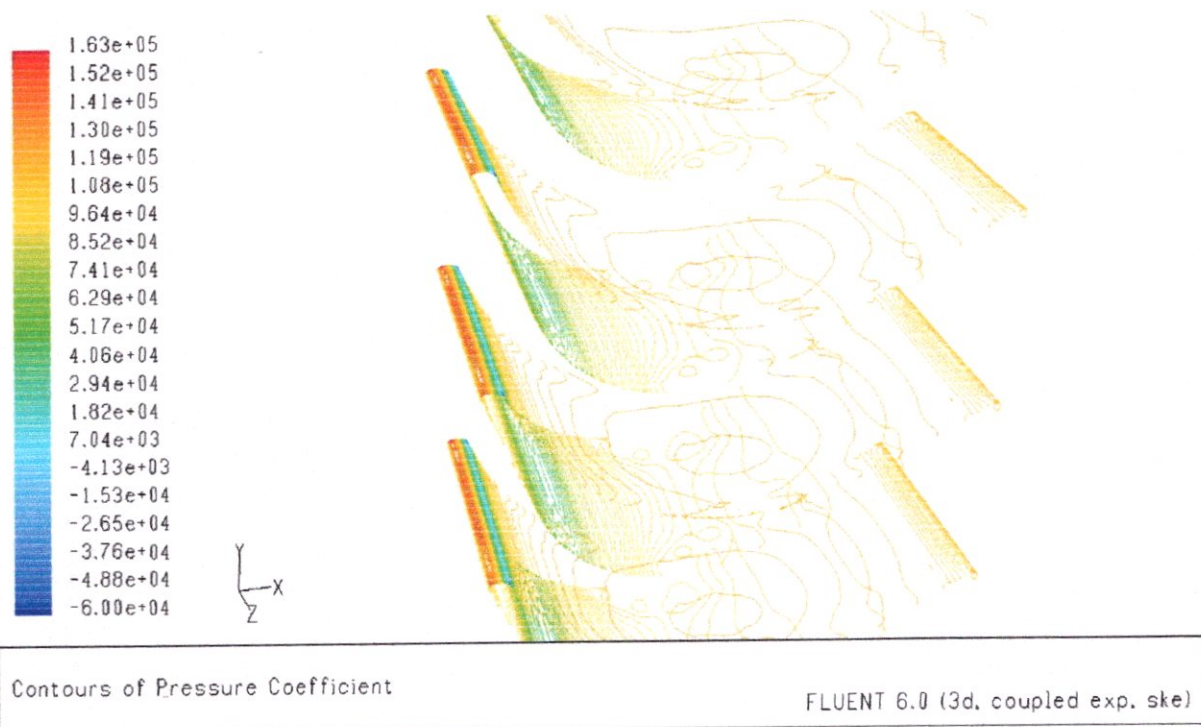


Figure (IV.54): C_p du cas test rot_K-e1

IV.4. Analyse des résultats :

Les figures (24-28-32-36-40-45-46-50) montrent les histoires de convergence de tous les cas tests traités. Ces figures montrent que tous les résidus sont baissé d'au moins trois ordres de grandeurs et indiquent donc que toutes les solutions sont convergées. On y voit également les histoires de convergence des équations de turbulence.

Les figures (25-26-29-30-33-34-37-38-41-42) présentent les contours de pression et les contours du nombre de Mach respectivement pour les différents cas tests du stator. Pour ces figures, on a utilisé l'option de périodicité pour reproduire les résultats sur une cascade de quatre aubes. Ces résultats sont similaires à ceux obtenues pour le cas test de FLUENT. On y voit une détente de l'écoulement exprimant l'accélération dans le passage entre aubes (convergent). Le même phénomène est présenté dans les figures (47-48-51-52) pour le rotor.

On a présenté également les distributions de C_p sur le profil des aubes pour les cas tests effectués et les résultats sont montrés aux figures (27-31-35-39-44-49-54).

Enfin, à titre indicatif on présente les valeurs de la viscosité turbulente obtenues pour les modèles de turbulence K- ϵ et K- ω qui indiquent que ces valeurs sont les plus grandes à l'entrée du domaine de calcul pour le cas test stator figure (43) et au voisinage de la paroi (sur la paroi la viscosité turbulente est nulle). Pour le rotor (figure 53) la viscosité turbulente prend la plus grande valeur au bord d'attaque au voisinage des points d'arrêt à cause de la séparation du flux.

La viscosité dynamique de l'air étant de l'ordre de 10^{-5} Kg/ms , les résultats indiquent que la viscosité turbulente est de l'ordre de 10^2 à 10^5 fois la viscosité du fluide ce qui est prouvé par la turbulence en aérodynamique.

Conclusion

V. Conclusion :

Cette étude nous a permis en premier lieu de connaître les différentes étapes d'une simulation CFD. Elle nous a aussi permis une assez bonne familiarisation avec les logiciels utilisés (SOLIDWORKS, ICEMCFD, et FLUENT), ainsi qu'une connaissance plus approfondie des problèmes des écoulements dans les turbine, ce qui est un plus dans notre formation en aéronautique.

Des difficultés et des blocages ont été rencontrés durant notre travail surtout en ce qui concerne les valeurs expérimentales et les géométries d'une turbine vraie. On a également eu des difficultés à implémenter les conditions aux limites de périodicité. Mais cette partie n'a pas influencée notre premier objectif qui est de maîtriser l'outil CFD et faire tourner un modèle.

Malgré ces blocages, on a pu finalement concrétiser notre projet, et nous avons pu offrir aux étudiants de l'établissement un outil didactique qui pourra servir de tutorial de la démarche suivie dans les annexes afin d'apprendre à utiliser ces codes de calcul.

Enfin nous souhaitons que le travail effectué permettra d'encourager beaucoup plus nos étudiants et leur donner la volonté de bien vouloir s'investir sans aucune crainte dans cette voie de simulation en utilisant les codes de calcul commerciaux.

Annexes

Annexe A : Démarche de construction des géométries
par SOLIDWORKS

Annexe A.1 : Stator

Ouvrir un nouveau document Solidworks (pièce)

Esquisse – plane de face

Point (les coordonnées : annexe B.1)

Spline (joindre les points)

Point (-2,0.5)

Outils / outils d'esquisse / déplacer

Entités à déplacer : points + spline

Point de départ : bord d'attaque

Jusqu'au point (-2,0.5)

Outils / outils d'esquisse / faire pivoter

Entités à déplacer : points + spline

Centre de rotation : bord d'attaque

Angle de rotation : -51.12°

Fonctions / extrusion

De : plan d'esquisse

Direction1 : plan milieu, 20 mm

Fichier / enregistrer sous

Nom du fichier : statorblade (sans espace entre mots)

Type : IGES (*.igs)

Annexe A.2 : Rotor

Ouvrir un nouveau document Solidworks (pièce)

Esquisse – plane de face

Point (les coordonnées : annexe B.2)

Spline (joindre les points)

Ligne de construction (horizontale $y > y_{\max}$ de l'aube)

Entités /

Entités à symétriser : points + spline

Décocher : copier

Symétrie par rapport à : ligne de construction

Point (-2,2)

Outils / outils d'esquisse / déplacer

Entités à déplacer : points + spline

Point de départ : bord d'attaque

Jusqu'au point (-2,2)

Outils / outils d'esquisse / faire pivoter

Entités à faire pivoter : points + spline

Centre de rotation : bord d'attaque

Angle de rotation : -10.12°

Fonctions / extrusion

De : plan d'esquisse

Direction 1 : plan milieu, 20 mm

Fichier / enregistrer sous

Nom du fichier : rotorblade (sans espace entre mots)

Type : IGES (*.igs)

Annexe A.3 (stator domaine)

Solidworks / ouvrir : Stator blade

Esquisse / ligne de construction (verticale + coïncidence avec le bord d'attaque)

Point (-2,-7.48)

Outils / outils d'esquisse / copier

Entités à copier : points + spline

Point de départ : bord d'attaque

Jusqu'au point (-2,-7.48)

Point (-7,4.49), (-7,-3.49), (1,4.49), (1,-3.49), (6.23783041, -5.90592857),
(6.23783041, -13.9120654), (7.23783041, -5.9320654),
(7.23783041, -9.9220654)

Fichier / enregistrer sous

Nom du fichier : stator domaine

Annexe A.4 (rotor domaine)

Solidworks / ouvrir : Rotor blade

Esquisse / ligne de construction (verticale + coïncidence avec le bord d'attaque)

Point (-2,4.47)

Outils / outils d'esquisse / copier

Entités à copier : points + spline

Point de départ : bord d'attaque

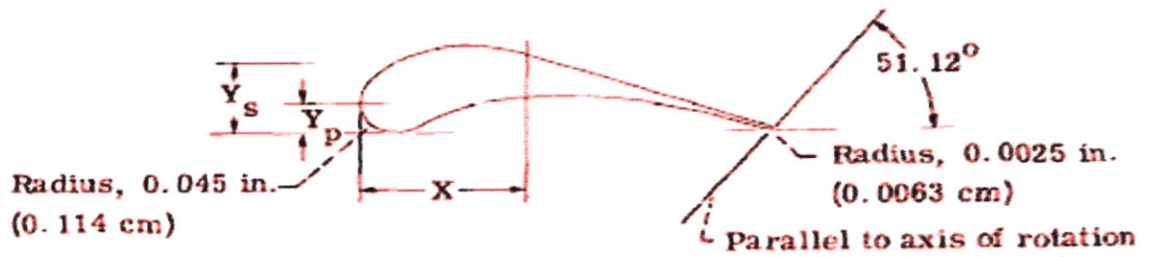
Jusqu'au point (-2,4.47)

Point (-3,3.285), (-3,0.715), (-2, 3.285), (-2, 0.715), (-0.5,1), (-0.5, -1.57),
(4.3549891, 2.21572665), (4.3549891, -0.35427335),
(5.3549891, 2.21572665), (5.3549891, -0.35427335)

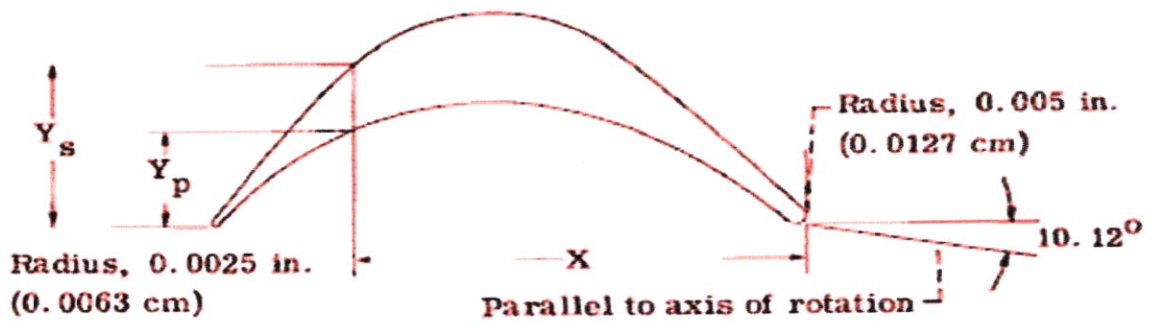
Fichier / enregistrer sous

Nom du fichier : stator domaine

Annexe B : Géométrie des aubes

Annexe B.1 : Stator [1]

X		Y _p		Y _s	
in.	cm	in.	cm	in.	cm
0	0	0.0450	0.1143	0.0450	0.1143
.0200	.0508	.0076	.0193	.0914	.2322
.0400	.1016	-----	-----	.1116	.2835
.0600	.1524	.0028	.0071	.1240	.3150
.0800	.2032	.0154	.0391	.1316	.3343
.1000	.2540	.0292	.0742	.1354	.3439
.1200	.3048	.0412	.1046	.1364	.3465
.1400	.3556	.0506	.1285	.1352	.3434
.1600	.4064	.0576	.1463	.1324	.3363
.1800	.4572	.0630	.1600	.1278	.3246
.2000	.5080	.0668	.1697	.1224	.3109
.2200	.5588	.0688	.1748	.1164	.2957
.2400	.6096	.0698	.1773		
.2600	.6604	.0698	.1773		
.2800	.7112	.0682	.1732		
.3000	.7620	.0662	.1681		
.3200	.8128	.0632	.1605		
.3400	.8636	.0594	.1509		
.3600	.9144	.0552	.1402		
.3800	.9652	.0502	.1275		
.4000	1.0160	.0448	.1138		
.4200	1.0668	.0394	.1001		
.4400	1.1176	.0334	.0849		
.4600	1.1684	.0268	.0681		
.4800	1.2192	.0204	.0518		
.5000	1.2700	.0136	.0345		
.5200	1.3208	.0070	.0178	.0120	.0305
.5430	1.3792	.0025	.0063	.0025	.0064

Annexe B.2: rotor [1]

X		Y _p		Y _s	
in.	cm	in.	cm	in.	cm
0	0	0.0050	0.0127	0.0050	0.0127
.0100	.0254	.0034	.0086	.0230	.0584
.0200	.0508	.0184	.0467	.0398	.1011
.0300	.0762	.0302	.0767	.0567	.1440
.0400	.1016	.0397	.1008	.0721	.1831
.0500	.1270	.0470	.1194	.0825	.2096
.0600	.1524	.0531	.1349	.0899	.2283
.0700	.1778	.0577	.1466	.0947	.2405
.0800	.2032	.0612	.1554	.0978	.2484
.0900	.2286	.0639	.1623	.0994	.2525
.1000	.2540	.0657	.1669	.0995	.2527
.1100	.2794	.0666	.1692	.0985	.2502
.1200	.3048	.0668	.1697	.0961	.2441
.1300	.3302	.0660	.1676	.0924	.2347
.1400	.3556	.0644	.1636	.0877	.2228
.1500	.3810	.0619	.1572	.0819	.2080
.1600	.4064	.0585	.1486	.0755	.1918
.1700	.4318	.0542	.1377	.0683	.1735
.1800	.4572	.0492	.1250	.0609	.1547
.1900	.4826	.0435	.1105	.0533	.1354
.2000	.5080	.0372	.0945	.0456	.1158
.2100	.5334	.0303	.0770	.0378	.0960
.2200	.5588	.0232	.0589	.0300	.0762
.2300	.5842	.0157	.0399	.0222	.0564
.2400	.6096	.0081	.0206	.0144	.0366
.2500	.6350	.0004	.0010	.0066	.0168
.2537	.6444	.0025	.0063	.0025	.0063

Annexe C.1 : Stator

Ouvrir ICEMCFD

New / project / stator

Import Geo / IGES--> / statorblade.igs / accept

Orient / negative Z

Geometry / point / create / explicit location

New family: point / accept

Input the coordinates separated by spaces: saisir les coordonnées
(Annexe A.3)

Geometry / Curve / create / Line through 2 points / select / pre point:
Selectionner les points / create

Copy/move / Selected entities: points + courbes

Move

Translate 0 0 -5

Apply

Copy/move / Selected entities: points + courbes

copy

Translate 0 0 10

Apply

Dismiss

Geometry / Curve / create / Line through 2 points / select / pre point:

Selectionner les points intérieurs des 2 surfaces latérales / create

Geometry / Surface / create / From 2-4 curves /

Créer l'enveloppe du calcul

Ceate

Dismiss

Geometry / Materal / create / explicit location

New family: PM / accept

Input the coordinates separated by spaces: (-5,0,0)

Done

File / save / Tetin (geometry) File

(1) Meshing / Tetra / old tetra GUI /

Selection: Statorblade.tin

Okay

Tetin file: Statorblade.tin

Cut domain: Cut_domain1

Log file: tetra_log1

Number of processors: 1

Remote ICEM_ACN: c:/ icemcfd/4.2-win

Write volume

Accept

Tetra monitor: tetra finished

Done

Quit / yes

Lode the new tetra mesh: no

Geometry / Mesh params / All families /

Down: 0.5

Input: 0.5

Output: 0.5

Statblade: 0.001

Symmetric1: 0.1

Symmetric2: 0.5

Up: 0.3

Apply

Dismiss

Refaire le bloque (1)

File / Quit / yes

N.b:

- Pour sélectionner: clique gauche.
- pour confirmer : clique par le milieu.
- pour sortir de la fonction : clique droit.
- pour maintenir la fonction en changeant l'orientation de la pièce : F9.

Annexe C.2: rotor

Ouvrir ICEMCFD

New / project / rotor

Import Geo / IGES--> / rotorblade.igs / accept

Orient / negative Z

Geometry / point / create / explicit location

New family: point / accept

Input the coordinates separated by spaces: saisir les coordonnées
(Annexe A.4)

Geometry / Curve / create / Line through 2 points / select / pre point:

Selectionner les points / create

Copy/move / Selected entities: points + courbes

Move

Translate 0 0 -5

Apply

Copy/move / Selected entities: points + courbes

copy

Translate 0 0 10

Apply

Dismiss

Geometry / Curve / create / Line through 2 points / select / pre point:

Selectionner les points intérieurs des 2 surfaces latérales / create

Geometry / Surface / create / From 2-4 curves /

Créer l'enveloppe du calcul

Crete

Dismiss

Geometry / Material / create / explicit location

New family: PM / accept

Input the coordinates separated by spaces: (-2.5,1,0)

Done

File / save / Tetin (geometry) File

(1) Meshing / Tetra / old tetra GUI /

Selection: rotorblade.tin

Okay

Tetin file: rotorblade.tin

Cut domain: Cut_domain1

Log file: tetra_log1

Number of processors: 1

Remote ICEM_ACN: c:/ icemcfd/4.2-win

Write volume

Accept

Tetra monitor: tetra finished

Done

Quit / yes

Lode the new tetra mesh: no

Geometry / Mesh params / All families /

Down: 0.5

Input: 0.5

Output: 0.5

Rotblade: 0.1

Symmetric1: 0.1

Symmetric2: 0.1

Up: 0.5

Apply

Dismiss

Refaire le bloque (1)

File / save / Quit / yes

Annexe D : Fichiers 'Summary'

De Fluent

Annexe D1

Cas visqueux (Navier-Stokes)

FLUENT

Version: 2d, coupled exp, ske (2d, coupled explicit, standard k-epsilon)

Release: 6.0.12

Title:

Models

Model	Settings
Space	2D
Time	Steady
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Heat Transfer	Enabled

Boundary Conditions

pressure-outlet-7

Condition	Value
Gauge Pressure	71582.6
Backflow Total Temperature	187.14389
Backflow Turb. Kinetic Energy	10
Backflow Turb. Dissipation Rate	90000
Backflow Turbulence Intensity	0.1
Backflow Turbulence Length Scale	1
Backflow Hydraulic Diameter	1
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10

pressure-inlet-14

Condition	Value
Gauge Total Pressure	101320
Supersonic/Initial Gauge Pressure	90000
Total Temperature	287.91367
X-Component of Flow Direction	1
X-Component of Axis Direction	1
Turb. Kinetic Energy	10
Turb. Dissipation Rate	90000
Turbulence Intensity	0.1
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	1
Turbulent Viscosity Ratio	10

Annexe D2
cas test stat inv1

FLUENT

Version: 3d, segregated (3d, segregated, inviscid)

Release: 6.0.12

Title:

Boundary Conditions

input

Condition	Value
Gauge Total Pressure	101320
Supersonic/Initial Gauge Pressure	90000
Total Temperature	287.91367
Direction Specification Method	1
X-Component of Flow Direction	1
X-Component of Axis Direction	1

output

Condition	Value
Gauge Pressure	71582.602
Backflow Total Temperature	187.14389

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6

BIBLIOGRAPHIE

[1] A.KLASSEN et ROBERT Y.WONG

‘Performance in air of 4-inch –(10.16-cm) mean –diameter single –stage axial-flow turbine for Reynolds number from 4900 to 188000’

NASA TN D-4383

[2] David Frederick FLETCHER

Chercheur à l’Université de Sydney, Australie

Chercheur invité au CNRS-LGC UMR 5503

Et **Chatherine XUEREB**

Direction de recherche CNRS-LGC UMR550

‘Mécanique des fluides numérique’

Techniques de l’ingénieur J1050

[3] CMEFE - Groupe de compétences en mécanique des fluides et procédés énergétiques

<http://www.cmefe.ch>

[4] Cad.magazine - N° 104 - février 2003

[5] Fluent tutorial trainer

Les sites web :

www.fluent.com

www.ansys.com

www.solidworks.fr