

**République algérienne démocratique et populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
Université Saad Dahleb de Blida  
**Faculté des sciences de l'ingénieur**  
**Département d'aéronautique**



**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN AERONAUTIQUE**

**Filière : Construction et Maintenance en Aéronautique**

**Spécialité : PROPULSION**

**THEME**

**Simulation de l'écoulement turbulent sur  
une plaque plane**

**Réalisé par :**

**Mr: Bouchikhi Amine**

**Mr: Chafa Mourad**

**Encadré par :**

**Mr. TAHI Ali**

**ANNEE UNIVERSITAIRE 2010 /2011**

# *Résumé*

Notre travail a été très délicat mais bien bénéfique notamment sur l'apprentissage des outils de CFD (GAMBIT et FLUENT) et l'application de plusieurs théories de la mécanique des fluides et l'aérodynamique rencontrées pendant notre cursus.

Une perspective intéressante serait de comparer les résultats entre ces modèles. Cette comparaison nous permettrait de voir plus attentivement les différences entre les types de fermeture et de recueillir des informations afin d'améliorer nos modèles.

# *Abstract*

Our work was very delicate but quite beneficial in particular on the training of the tools of CFD (GAMBIT and FLOWING) and the application of several theories of the mechanics of the fluids and aerodynamics met laying our course.

An interesting prospect would be to compare the results between these models. This comparison would enable us more attentively to see the differences between the types of closing and to collect information in order to improve our models.

## **ملخص**

يهدف هذا العمل الى دراسة محاكاة رقمية لتدفق مضطرب على طبقة مستوية وذلك باستعمال اربع طرق للمحاكاة الرقمية.

سمح لنا هذا العمل بوضع مقارنة بين مختلف انماط التدفق المضطرب وهذا يسمح لنا بمشاهدة الاختلاف بينها بكل وضوح و تحسين و تحسين هذه الانماط.

من خلال هذا العمل اكتسبنا عدة مهارات من بينها كيفية استعمال برامج المحاكاة الرقمية وبرامج التشبيك و معرفة نظرية لهندسة السوائل و ديناميكية الهواء.

## Sommaire

Introduction.....	1
<b>Chapitre I : introduction a la mécanique des fluides</b>	
I.1. Introduction .....	4
I.2. Les équations fondamentales de la dynamique des fluides .....	4
I.2.1. Principe de conservation de la masse.....	4
I.2.2. Principe de conservation de la quantité de mouvement.....	5
I.2.3. Les équations de Navier-Stokes.....	6
I. 3.Les différents types d'écoulements.....	7
I.3.1. Ecoulements incompressibles et compressibles.....	7
I.3.2. Ecoulement laminaire et écoulements turbulent.....	8
I.3.3. Ecoulement stationnaire et instationnaire.....	8
I.3.4. Ecoulement irrotationnel.....	9
I. 4. Couche Limite.....	9
I.4.1. Epaisseur de la Couche Limite.....	10
I.4.1.1. Epaisseur de déplacement $\delta^*$ .....	10
I.4.1.2. Epaisseur de quantité de mouvement $\theta$ .....	11
I.4.1.3. Facteur de forme $H$ .....	11
I.4.2. Décollement de la Couche Limite.....	11
I.4.3. Couche limite turbulente.....	13
I. 5. Turbulence.....	14
I.5.1. Modélisation de la turbulence.....	15
I.5.2. Nombre de Reynolds.....	15
I.5.3. Nombre de Mach " M ".....	16
I.5.4. Les modèles de turbulence .....	16
I.5.4.1. Le modèle Spalart-Allmaras.....	16
I.5.4.2. Le modèle $k-\epsilon$ .....	17
I.5.4.3. Le modèle $k-\omega$ standard et le modèle $k-\omega$ -SST.....	17
I.5.4.4. Modèle à contrainte de Reynolds RSM (Reynolds Stress Model).....	17
I.5.4.5. Large Eddy Simulation (LES).....	17
I.5.4.6. Simulation directe (DNS) ou Direct Numerical Simulation.....	18
I.5.5. Calcul en proche paroi.....	18

1.5.5.1. Modélisation de l'écoulement en proche paroi.....	19
I.6. Les conditions aux limites.....	20
I-6-1 Condition de pression à l'entrée.....	20
I.6.2. Condition de vitesse à l'entrée.....	20
I.6.3. Condition de débit massique à l'entrée.....	21
I.6.4. Condition de pression à la sortie.....	21
I.6.5. Condition de parois.....	21
I.7. Conclusion.....	21

## **Chapitre II : modélisation de la turbulence**

II.1 Introduction.....	22
II.2 Nature de la turbulence .....	22
II.3 Effets pratique de la turbulence .....	23
II.4 Approches de modélisation .....	23
II.5 Equations de transport .....	24
II.5.1. Principe de conservation de la masse í í í í í í í í í í í í í í í ...	24
II.5.2. Principe de conservation de la quantité de mouvementí í í í í í í í í ..	24
II.5.3. Conservation de l'énergie.....	25
II.5.4. Décomposition statiqueí .	26
A/ Règles de Reynolds.....	26
B/ Les tensions de Reynolds.....	26
II.5.5. Equation de transport de quantité de mouvement .....	27
II.6 Problème de la fermeture .....	27
II.7 Modèles de turbulence .....	27
II.7.1. Le modèle a une équation Spalart-Allmaras .....	28
II.7.2. Modèles de fermeture au premier ordre à deux équations de transport.....	29
II.7.2.1. Modèle de turbulence $k-\varepsilon$ .....	30
A/ Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente $k$ .....	30
B/ Equation de transport du taux de dissipation $\varepsilon$ de l'énergie cinétique turbulent .....	31
C/ Coefficient du modèle $k-\varepsilon$ .....	31
II.7.2.2. Les modèles $k-\omega$ Baseline et $k-\omega$ Baseline SST.....	31
II.8. Méthode numérique.....	34
II.8.1. Introduction.....	34



II.8.2. Définition de la méthode des volumes finis.....	35
II.9. Génération du maillage.....	35
II.10. Conclusion.....	35

### **Chapitre III : description des logiciels**

#### PARIE I

III.1. Introduction í í í .....	36
III.2. Construction de la géométrie.....	37
III.3. Maillage.....	38
III .3.1. Choix du type de maillage.....	39
a) Maillage structuré (quadra/hexa).....	39
b) Maillage non structuré (tri/tétra).....	40
c) Maillage hybride.....	40
III.3.2 Techniques générales de génération du maillage (QRLT).....	40
a) Qualité d'un maillage.....	40
b) Distorsion.....	41
c) Lissage.....	42
d) Nombre total d'éléments.....	42
e) Génération d'un maillage couche limite.....	42
f) Indépendance de la solution du maillage.....	43
III.4. Conditions aux limites et définition de domaines.....	

#### PARIE II

III .5. Introduction.....	48
III .6. Structure de programme.....	49
III.7. Capacités de programme.....	50
III. 8. Opérations pour l'analyse de CFD /FLUENT.....	51
III.9. Opérations en résolvant votre problème de CFD.....	51
III.10. Planification de votre analyse de CFD.....	52
III.10.1. Définition des buts de modélisation.....	52
III.10.2. Produire la votre géométrie et grille modèles.....	52
III .11 . L'interface utilisateur.....	53
III.11.1. Composants de GUI.....	53
III.11.2 Boîtes de dialogue.....	52

III.11.3	Panneaux.....	55
<b>PARIE III</b>		
III.12.	Importation de la géométrie (*.MSH).....	56
III.13.	Vérification du maillage.....	56
III.14.	Lissage du maillage (SMOOTH AND SWAP THE GRID).....	56
III.15.	Vérification de l'échelle.....	57
III.16.	Choix du solveur.....	57
III.17.	Affichage de la grille.....	57
III.18.	Choix du modèle de turbulence .....	58
III.19.	Définition des caractéristiques du fluide.....	59
III.20	Operating conditions.....	60
III.21.	Conditions aux limites usuelles.....	60
III.21.1.	Velocity Inlet.....	60
III.21.2.	Pressure Inlet.....	60
III.21.3.	Mass Flow Inlet.....	60
III.21.4.	Pressure Outlet.....	60
III.21.5.	Outflow.....	60
III.22.	Simulation.....	61
III.22.1.	Choix des critères de convergence.....	61
III.22.2.	Initialisation des calculs.....	61
III.22.3.	Sauvegarde du fichier *.CAS.....	62
III.22.4.	Lancement de la simulation.....	62
III.22.5.	Post-traitement numérique de la solution.....	62
<b>Chapitre IV : Simulation numérique</b>		
IV .1.	Initialisation .....	63
A)-	calcul de la masse volumique( $\rho$ ) .....	63
B)-	calcul de la vitesse (v) .....	62
C)-	calcul de la viscosité dynamique.....	64
IV.2.	les Résultats obtenus par FLUENT .....	64
IV.3.2.	Définition de simulation .....	66
a)	Model .....	66
b)	Les conditions aux limites .....	67
Modification	des propriétés de fluide .....	68
La condition	d'entrée .....	68

<i>IV.3.3.Reglage de monitors</i> .....	70
<i>IV.3.4.Simulation</i> .....	70
<i>1ere Simulation</i> .....	71
<i>L'histoire de convergence des résidus</i> .....	71
<i>Les contours de pression et vitesse</i> .....	71
<i>Contours des pressions statique et dynamique sur la plaque</i> .....	71
<i>Contours des vitesses sur la plaque</i> .....	72
<i>2eme Simulation</i> .....	73
<i>L'histoire de convergence des résidus</i> .....	73
<i>Contours des pressions statique et dynamique sur la plaque</i> .....	73
<i>Contours des vitesses sur la plaque</i> .....	74
<i>3eme Simulation</i> .....	75
<i>L'histoire de convergence des résidus</i> .....	75
<i>Contours des pressions statique et dynamique sur la plaque</i> .....	75
<i>Contours des vitesses sur la plaque</i> .....	76
<i>4eme Simulation</i> .....	77
<i>Contours des pressions statique et dynamique sur la plaque</i> .....	77
<i>Contours des vitesses sur la plaque</i> .....	78
<i>IV.4. Comparaisons entre les résultats (ghrafwin)</i> .....	79
<i>IV.4.1. Comparaisons entre les résultats de la Pression dynamique</i> .....	79
<i>IV.4.2. comparaisons entre les résultats de la pression statique</i> .....	79
<i>IV.4.3. comparaisons entre les résultats de nombre de Reynolds</i> .....	80
<i>IV.4.4. comparaisons entre les résultats de Y+wall</i> .....	80
<i>IV.4.5.comparaisons entre les résultats de coefficient de frottement Cf</i> .....	81
<i>IV.5.Interprétation</i> .....	81
<i>CONCLUSION</i> .....	85
ANNEXE A	
ANNEXE B	
ANNEXE C	



**Chapitre IV:**

Figure IV.1	Choisir le mode de simulation et Importation de fichier de maillag	65
Figure IV.2	vérification de maillage	66
Figure IV.3	sélectionné l'équation d'énergie	66
Figure IV.4	sélectionner le model d'écoulement	67
Figure IV.5	sélectionne du les conditions aux limites.	67
Figure IV.6	Modification des propriétés de fluide	68
Figure IV.7	valider la vitesse d'entrée (inlet)	69
Figure IV.8	valider la vitesse d'entrée (sup inlet)	69
Figure IV.9	réglage de monitors	70
Figure IV.10	Historique des résidus de l'écoulement laminaire	71
Figure IV.11	contour de pression statique à la plaque plan (laminaire)	71
Figure IV.12	contour de pression dynamique à la plaque plane (couche limite) (laminaire)	72
Figure IV.13	contour des vitesses approche à la plaque plane (couche limite)	72
Figure IV.14	contour des vitesses approche à la plaque plane (couche limite) (laminaire)	72
Figure IV.15	Historique des résidus de l'écoulement turbulent (Spalart-Allmaras)	73
Figure IV.16	contour de pression statique à la plaque plan (Spalart-Allmaras)	73
Figure IV.17	contour de pression dynamique à la plaque plan (Spalart-Allmaras)	74
Figure IV.18	contour des vitesses approche à la plaque plane (Spalart-Allmaras)	74
Figure IV.19	contour Y+ approche à la plaque plane (Spalart-Allmaras /zoom a couche limite)	74
Figure IV.20	Historique des résidus de l'écoulement turbulent (k-epsilon)	75
Figure IV.21	contour de pression statique à la plaque plan (k-epsilon)	75
Figure IV.22	contour de pression totale à la plaque plan (k-epsilon)	76
Figure IV.23	contour des vitesses approche à la plaque plane (k-epsilon)	76
Figure IV.24	contour Y+ approche à la plaque plane ((k-epsilon)/zoom a couche limite)	76
Figure IV.25	Historique des résidus de l'écoulement turbulent (k-OMEGA)....	77
Figure IV.26	contour de pression dynamique à la plaque plan (k-)	77



## Liste des tableaux

Tableau II-1	valeurs des constants du modèle k- í í í í í í í í í í í	31
Tableau III -1	commandes pour la construction de la géométrie í í í í í ..	44
Tableau III -2	commandes d'un point í í í í í í í í í í í í í í í ..	44
Tableau III-3	commandes d'un segment í í í í í .í í í í í í í í í í í ..	45
Tableau III-4	commandes relatives a une face í í í í í .í í í í í í í í í	45
Tableau III-5	commandes relatives a un volume í í í í í í í í í í .í ..	46
Tableau III-6	commandes de maillage í í í í í í í í ..í í í í í í í	46
Tableau III-7	spécification du schéma des éléments face í í í ..í í í í	47
Tableau III-8	spécification du type de maillage des éléments face í í ..í	47
Tableau III-9	les avantages et les inconvénients de chaque méthode í í í .	59
Tableau IV-1	Tableaux de l'évolution de coefficient de frottement au voisinage du point de décollement í í í í í í í í í í í í	82

# ABRÉVIATIONS

AGARD	Advisory Group for Aerospace Research and Development
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
SST	Shear Stress Tensor
RSM	Reynolds Stress Model
CFD	Computational Fluid Dynamics
B-REP	Boundary Représentation
CAO	Conception Assisté par Ordinateur
CSG	Constructive Solid Geometry
RNG	Reynolds Normalisation Group



# NOMENCLATURE

a	Vitesse du son	[m/s]
A	Surface	[m <sup>2</sup> ]
CL	Couche limite	
Cp	Coefficient de pression	
$\rho$	Masse volumique de en	[kg/m <sup>3</sup> ]
R	Constante du gaz	[J/kg K]
$\nu$	La viscosité cinématique en	[m <sup>2</sup> /s]
T	La température	[°K]
t	Temps	[s]
g	Gravité	[m/s <sup>2</sup> ]
U	Vitesse du fluide	[m/s]
L	Longueur caractéristique	[m]
P	Pression	[Pa]
Pt	Pression totale	[Pa]
Ps	Pression de statique	[Pa]
$\gamma$	Forces d'inertie	
Re	Nombre de Reynolds	
M	Nombre de mach	
$\delta^*$	Epaisseur de déplacement de la couche limite	[mm]
$\theta$	Epaisseur de quantité de mouvement	[mm]
H	Facteur de forme	
$\gamma$	Rapport des chaleurs spécifiques (Cp/Cv)	
Y+	Distance adimensionnée de la première maille à la paroi	
M $\infty$	Nombre de Mach à l'infini	
u	Composante horizontale de la vitesse	[m/s]
v	Composante verticale de la vitesse	[m/s]
$\tau_\omega$	Cisaillement pariétal	
h	Hauteur initiale (initial height)	[mm]
r	Facteur de progression (height ratio)	
n	Nombre des couches (layer number)	

### **Introduction :**

La turbulence est un phénomène qui se produit fréquemment en nature ; donc été le sujet de l'étude pendant plusieurs siècles. En 1510, Leonardo Da Vinci a accompagné un schéma des vortex jetés derrière un obstacle émoussé avec l'observation suivante :

Observer le mouvement de la surface de l'eau, qui ressemble à cela des cheveux, qui ont deux mouvements : un dû au poids de l'axe, l'autre à la forme des courbures ; ainsi, l'eau a des mouvements tourbillonnants, une part dont est dû au courant principal, l'autre au mouvement aléatoire et renversé.

Bien que basé entièrement sur la spéculation, et non accompagné d'une analyse mathématique, cette observation peut être vue comme précurseur à la décomposition de Reynolds de la vitesse, de la pression et d'autres variables dans le moyen et pièces de fluctuation.

Sur 100 ans après des expériences d'Osborne Reynolds, la turbulence est toujours l'un des problèmes en suspens en mécanique appliquées. Aucune solution analytique utile des écoulements turbulents dans les géométries d'intérêt de technologie n'est disponible, bien que les théories statistiques de turbulence aient fourni le bon arrangement des lois de graduation dans divers régimes d'écoulement. Les études expérimentales ont également donné la perspicacité dans l'arrangement de la structure des écoulements turbulents. La visualisation de l'écoulement a été particulièrement utile dans l'identification des remous logiques qui sont responsables de la majeure partie de la production énergétique, particulièrement dans les régions du cisaillement élevé.

Les techniques de mesure ont progressé sensiblement : il est maintenant possible d'obtenir mesures uniques de vitesse et de vitesse composants de gradient usine Laser-Doppler vélocimétrie ou anémomètres multiples de fil, ou distributions de vitesse dans un avion, par la Particule-Image ou le Vélocimétrie de Particule-Cheminement.

Solution analytique ou numérique d'écoulement turbulent les problèmes peuvent faire usine de divers niveaux d'approximation, rapportant des descriptions plus ou moins détaillées de l'état de l'écoulement. L'approche la plus simple est d'employer des corrélations semi-empiric. Le diagramme déprimé, qui donne le facteur de frottement superficiel pour les pipes cylindrique en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité relative, est un exemple de cette approche, qui est particulièrement utile pour global, des analyses de commande-volume, mais les rendements aucune information sur des quantités locales et se fonde fortement sur la disponibilité des données expérimentales dans les configurations semblables à celui à l'étude.

Si l'opération de établissement d'une moyenne est appliquée aux équations du mouvement, on obtient le Navier Reynolds-fait la moyenne bien connu charge les équations (RANS), qui décrivent l'évolution des quantités moyennes. L'effet des fluctuations turbulentes apparaît dans une limite d'effort de Reynolds qui doit être modélisée pour fermer le système. Un éventail très des modèles pour les efforts de Reynolds est disponible, s'étendant des modèles simples et algébriques, aux modèles de  $k\epsilon$ , à de pleines ou algébriques fermetures d'effort de Reynolds. La solution des équations de RANS est maintenant employée dans des applications de technologie pour prévoir l'écoulement dans des configurations assez complexes. Cette approche, cependant, souffre d'un point faible principal, le fait que le modèle doit représenter très une large gamme des balances. Tandis que les petites échelles tendent à dépendre seulement sur la viscosité, et peut être quelque peu universel, les grands affecté très fortement par la frontière condition (voir, par exemple, la différence entre les rouleaux dans le sens de l'envergure actuels dans des couches de mélange et les sillages et les vortex ovales de streamwise qui sont trouvés dans la région de proche-mur d'une couche limite turbulente). Ainsi, il ne semble pas possible de modéliser l'effet des larges échelles de la turbulence de la même manière dans les écoulements qui sont très différents.

La simulation numérique directe (DNS) de la turbulence est l'approche la plus franche à la solution des écoulements turbulents. Dans le DNS les équations de gouvernement sont discrétisées et résolues numériquement. Si la maille est assez bonne pour résoudre même les plus petites échelles du mouvement, et l'arrangement est conçu pour réduire au minimum les erreurs numériques de dispersion et de dissipation, on peut obtenir une précise solution tridimensionnelle et dépendant du temps des équations de gouvernement exempt complètement de modéliser des prétentions, et dans ce que les seules erreurs sont celles présentées par l'approximation numérique.

Le DNS la rend possible pour calculer et visualiser toute quantité d'intérêt, y compris une partie qui sont impossibles difficile ou à mesurer expérimentalement, et pour étudier les rapports spatiaux entre les quantités d'intérêt (par exemple, vorticité et production énergétique), d'obtenir la perspicacité sur le détail cinématique et dynamique des remous turbulents.

Le DNS a été un outil très utile, au cours des dix dernières années, pour l'étude de la physique d'écoulement transitoire et turbulent, mais lui a également quelques limitations. D'abord, l'utilisation des arrangements fortement précis et d'ordre élevé est souhaitable pour limiter la dispersion et erreurs de dissipation ; ces arrangements (méthodes spectrales, par exemple) tendent à avoir peu de flexibilité en manipulant les géométries complexes et des états de frontière généraux.

Deuxièmement, pour résoudre toutes les balances de mouvement, on exige un certain nombre de points de grille proportionnels à la puissance de  $9/4$  du nombre de Reynolds, du  $Re$ , et du coût des balances de calcul comme  $Re^3$ . Pour ces raisons, le DNS a en grande partie limité aux géométries simples (frontière de plat couches, écoulements homogènes) à de bas nombres de Reynolds, et son technologie-type problèmes d'application dans la décennie suivante semble peu probable.

La simulation de Grand-remous (LES) est une intermédiaire de technique entre la simulation directe des écoulements turbulents et la solution des équations Reynolds-faites la moyenne. Dans LES la contribution du grand, énergie-portant structure à l'élan et le transfert d'énergie est calculé exactement, et seulement l'effet des plus petites échelles de la turbulence est modélé. Puisque les petites échelles tendent à être plus homogènes et universelles, et moins affecté par la frontièreles conditions que les grandes, là est espoir que leurs modèles peuvent être plus simples et exiger peu d'ajustementsune fois appliqué aux écoulements différent que les modèles semblables pour les équations de RANS.



Croquis des cahiers de Leonardo Da Vinci

## I.1. Introduction

L'utilité pratique de la mécanique des fluides est évidente à partir de ces applications technologiques qui couvrent tout un ensemble de domaines ceci est appuyé par l'avancement spectaculaire des secteurs technologiques dans lesquels la qualité et l'originalité des solutions des problèmes d'écoulement ont joué un rôle primordial dans le développement des secteurs de transport (avion, bateaux, voitures) et le secteur de production d'énergie (turbines, compresseurs, réacteurs).

L'étude théorique dans ces domaines nécessite l'utilisation des équations non linéaire de base comme les équations de Navier Stokes. Cette dernière résout les problèmes de la dynamique des fluides qui sont généralement difficiles à résoudre. C'est pour cela que la résolution de ces équations nécessite les méthodes de calculs numériques.

## I.2. Les équations fondamentales de la dynamique des fluides

On peut définir le comportement d'un fluide à partir de la résolution des équations mathématiques fondamentales, mais il faut tenir compte des principes de conservation, tirés de la physique de ce fluide, ces principes sont :

- Principe de la conservation de la masse.
- Principe de la conservation de la quantité de mouvement.

### I.2.1. Principe de conservation de la masse

C'est un principe de physique, qui permet d'établir une relation entre certaines caractéristiques du fluide et ses mouvements, indépendamment des causes qui le provoquent. {Quel que soit le volume D du fluide que l'on suit dans son mouvement, sa masse m reste constante (Fluide Conservatif)}.

Il se traduit par l'équation de continuité, sous sa forme générale.

Dans le cas d'un fluide permanent (stationnaire), et incompressible, ou la masse volumique est invariable, l'équation de continuité se réduit à :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} = 0 \quad (I.1)$$

### I.2.2. Principe de conservation de la quantité de mouvement

C'est un principe de mécanique qui permet d'établir des relations entre les caractéristiques du fluide, celles de ces mouvements et les causes qui les produisent (Forces).

Ce principe se traduit par les équations de Navier- Stokes, qui ont été établies en 1822 par ces derniers. On les obtient en écrivant l'équilibre du système de forces s'exerçant sur un parallélépipède élémentaires dx, dy, dz :

Forces extérieures :  $\rho f$  (force de volume)

Forces de Pression :  $-\nabla p$  (forces de surface)

Forces d'inertie  $\rho \frac{dV}{dt}$

Forces de Viscosité  $\nabla \cdot \tau$

Pour un fluide incompressible, on a :

$$\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau = \frac{dV}{dt} - \nabla p + \rho f \tag{I.2}$$

Et sous forme cartésiennes, par projections sur les trois axes :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} = \frac{dV_x}{dt} - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x \tag{I.3}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} = \frac{dV_y}{dt} - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y \tag{I.4}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \frac{dV_z}{dt} - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z \tag{I.5}$$

Avec :

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \tag{I.6}$$

$$\Delta \frac{V}{\rho} = \frac{dV}{dt} + \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial t} \tag{I.7}$$

D'une manière générale, lorsque le fluide en écoulement est newtonien (c'est-à-dire lorsque la relation contrainte-taux de déformation est linéaire et isotrope), les équations de conservation de la quantité de mouvement prennent la forme particulièrement simple des équations de Navier Stokes.

### I.2.3. Les équations de Navier-Stokes

Nous allons maintenant établir ces équations en supposant, pour simplifier, que la viscosité dynamique  $\mu$  reste constante dans tout l'écoulement. Si cette viscosité n'est pas constante, des termes supplémentaires apparaissent dans les équations du mouvement. Nous parlons ici de l'équation de conservation de la quantité de mouvement projetée suivant l'axe  $i$ .

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (I.8)$$

Cette équation exprime l'égalité entre la quantité d'accélération par unité de volume et les forces extérieures qui s'appliquent l'unité de volume (pression, forces volumiques, contraintes visqueuses). Dans le cas d'un fluide newtonien, les contraintes visqueuses ont pour forme :

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (I.9)$$

Nous devons maintenant calculer  $\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$  comme  $\mu$  est constant, on a :

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \mu \left( \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i \partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (I.10)$$

Ou encore :

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \mu \left( \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i \partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (I.11)$$

On obtient finalement :

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \mu \left( \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i \partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (I.12)$$

Et l'équation (I.10) devient :

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i + \mu \left( \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i \partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (I.13)$$

Sous forme explicite, on peut écrire :

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \frac{\rho}{3} \frac{D\mathbf{u}}{Dt} \quad (\text{I. 14})$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \frac{\rho}{3} \frac{D\mathbf{u}}{Dt} \quad (\text{I. 15})$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \frac{\rho}{3} \frac{D\mathbf{u}}{Dt} \quad (\text{I. 16})$$

On peut aussi représenter ces trois équations sous forme vectorielle compacte.

Les expressions précédentes sont appelées équations de Navier-Stokes.

Lorsque le fluide est incompressible,  $\Delta \cdot \mathbf{u} = 0$  et le dernier terme disparaît on a alors :

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (\text{I. 17})$$

Les équations de Navier-Stokes sont très complexes, des solutions Analytiques ne peuvent être obtenues que par certaines configurations simples. On peut dire que si on sait les intégrer, on pourrait résoudre analytiquement les problèmes d'hydrodynamique.

### I.3. Les différents types d'écoulements

Nous allons maintenant donner une description qualitative rapide de quelques types d'écoulements.

#### I.3.1. Ecoulements incompressibles et compressibles

On dit qu'un fluide est incompressible si sa masse spécifique varie faiblement avec la pression ou la température. Ainsi la variation relative de masse spécifique pour l'eau est  $\Delta\rho/\rho = 5 \times 10^{-4}$  pour une variation de température  $\Delta T = 1^\circ\text{K}$  et  $\Delta\rho/\rho = 2 \times 10^{-4}$  pour une variation de pression  $\Delta p = 1\text{bar}$ . On peut donc souvent traiter l'eau comme un fluide incompressible et utiliser dans les équations du mouvement une densité  $\rho = \rho_0 = \text{constante}$ .

Dans le cas des gaz : très généralement, les gaz sont traités comme des fluides compressibles. Cependant nous verrons qu'aux faibles vitesses d'écoulement (aux nombres de Mach petits devant un  $M \ll 1$ , les variations de densité sont faibles grandeur du carré du nombre de Mach :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = M^2 \quad M \ll 1 \quad (\text{I. 18})$$

Dans ces conditions, on peut traiter l'écoulement à l'aide des équations qui régissent les écoulements incompressibles.



### I.3.2. Ecoulement laminaire et écoulements turbulent

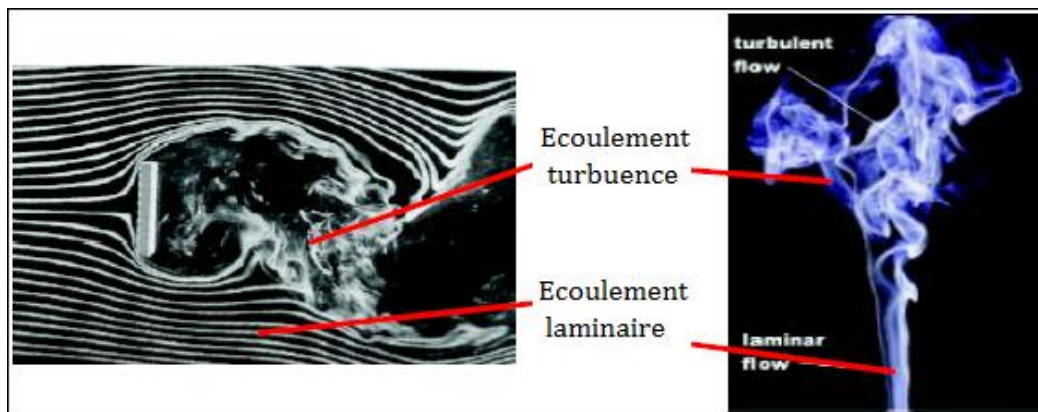
Un écoulement turbulent peut être caractérisé par une orientation aléatoire (ou fluctuation) des vecteurs vitesses en chaque point ; autrement dit chaque composante  $u(M, t)$ ,  $v(M, t)$ ,  $w(M, t)$ , de  $V(M, t)$  Obéissent à des lois de distributions (au sens probabiliste) en fonction de l'espace et du temps. On dit que le régime de l'écoulement est turbulent. Un écoulement turbulent peut posséder une composante moyenne  $\bar{v}$  (le mouvement global se fait d'ouest en est par exemple) pouvant dépendre du temps mais de manière plus « régulière » ; les fluctuations ont alors lieu autour de cette composante moyenne, de sorte que la vitesse s'écrit :

$$v = \bar{v} + v' \quad (I.19)$$

C'est alors sur  $v'$  que l'on fait apparaître des lois statistiques.

Dans un écoulement laminaire, le mouvement du fluide s'effectue en « couches » parallèles entre elles, chaque couche possédant sa propre vitesse ; le profil de vitesses dans le fluide en mouvement est bien ordonné. Les vecteurs vitesses conservent une orientation stable au cours du temps. On dit que le régime de l'écoulement est laminaire. Lorsque le mouvement laminaire du fluide dégénère en un écoulement turbulent, il perd son caractère ordonné et stable ; on dit qu'il y a transition du régime laminaire vers le régime turbulent, ou plus simplement transition laminaire turbulent.

La différence entre le régime turbulent et le régime laminaire peut être représentée par les courbes donnant la vitesse en fonction du temps en un point M fixe.



**Figure (I.1) :** Plaque plane mise à l'écoulement. [3] **Figure (I.2) :** Fumée d'une cigarette.

### I.3.3. Ecoulement stationnaire et instationnaire

On dit qu'un écoulement est stationnaire si en tout point M de  $\Omega$ , toutes les variables décrivant le mouvement sont *indépendantes du temps*. Ainsi la pression P, la vitesse  $v$ , la densité  $\rho$ , l'énergie  $e$  d'un écoulement stationnaire sont des quantités indépendantes du temps.

$$\vec{v}, \vec{\omega} = \vec{v} \quad \forall M \in \Omega \text{ (I.20)}$$

Tous les phénomènes de propagation d'onde dans les fluides appartiennent à cette catégorie (onde à surface d'un liquide, rayonnement d'ondes sonores à partir d'un jet libre turbulent...), les écoulements atmosphériques sont aussi essentiellement instationnaires. Les écoulements turbulents sont aussi par nature instationnaire, cependant on dit qu'un écoulement turbulent est instationnaire si les variables moyennes sont indépendantes du temps et si les corrélations d'ordre deux constituées à partir de ces variables sont invariantes par translation.

### I.3.4. Ecoulement irrotationnel

On dit qu'à un instant t donné, l'écoulement est irrotationnel dans le domaine D si le rotationnel de la vitesse  $\vec{v}, \vec{\omega}$  est nul en chacun des points M de D.

$$\vec{\omega} = 0 \text{ (I.21)}$$

Le rotationnel est un vecteur (défini en cinématique des fluides) qui caractérise en un point M, la rotation dans l'espace de la particule fluide.

Il s'écrit symboliquement :

$$\vec{\omega} = \nabla \wedge \vec{v} \text{ (I.22)}$$

Il s'écrit par exemple en coordonnées cartésiennes :

$$\vec{\omega} = \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \vec{e}_x + \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \vec{e}_y + \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \vec{e}_z \text{ (I.23)}$$

### I.4. Couche Limite

Si le fluide était parfait, la seule force créée par le positionnement d'un profil dans un écoulement est une force de portance perpendiculaire à la vitesse.

Mais l'air n'est pas un fluide parfait. Il est visqueux, ce qui engendre un frottement le long du profil de l'aile.

La partie du fluide qui est infiniment proche de la paroi d'un profil possède donc une vitesse nulle. Il en résulte un accroissement progressif de la vitesse au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la paroi. La zone dans laquelle l'écoulement est freiné de par sa proximité avec la paroi est appelée couche limite. Il s'agit de la zone dans laquelle la vitesse de l'écoulement est comprise entre 0 et 99% de la vitesse à l'infini sur la normale à la paroi.

Cette couche limite est également dépendante de l'état de surface du profil, donc on peut dire que :

La couche limite est la mince pellicule entourant un corps en mouvement dans un fluide (air). Dans cette mince pellicule les forces de viscosité sont importantes.

La couche limite conditionne directement la résistance de frottement du corps en mouvement dans le fluide.

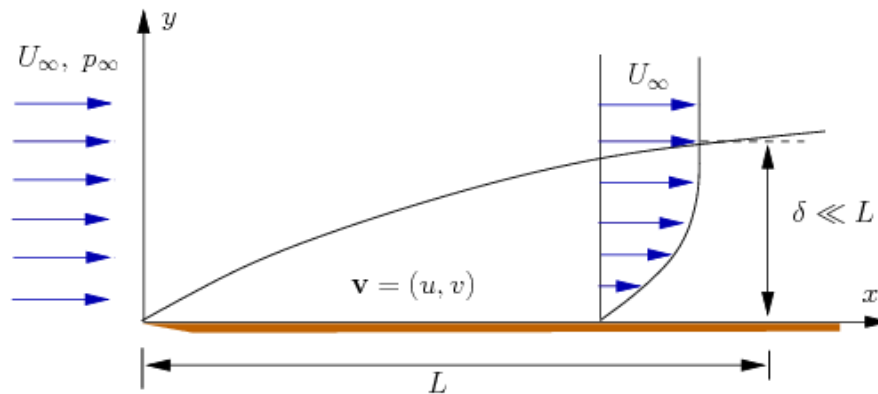


Figure (I.3) : Forme de la couche limite sur une plaque

### I.4.1. Epaisseur de la Couche Limite

L'épaisseur de la couche limite croît de l'amont (quelque mm) vers l'aval (quelque Cm). Conventionnellement l'épaisseur de la couche limite est la distance à la paroi à partir de laquelle  $U = 0,99 U_0$

#### I.4.1.1. Epaisseur de déplacement $\delta^*$

Les lignes de courants en écoulement visqueux sont déplacées par rapport à leurs positions en fluide non-visqueux.

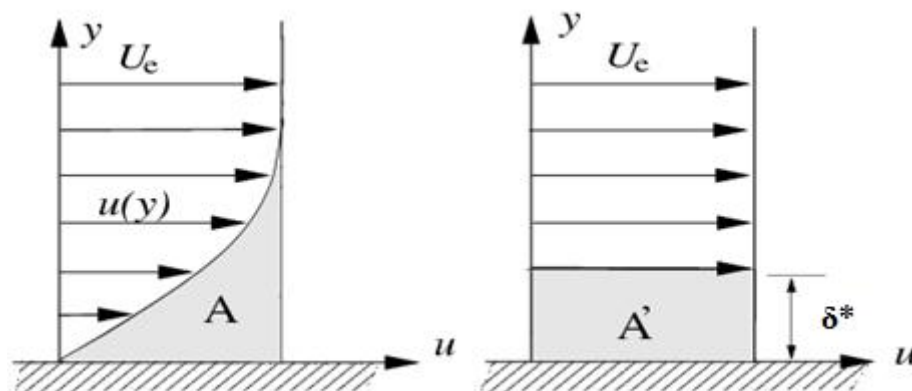


Figure (I.4) : Epaisseur de la Couche Limite

Ce déplacement est exploité pour définir une épaisseur tel que les aires A et A' soient égales :

$$\delta^* = \delta \left( 1 - \frac{\delta}{\delta^*} \right) \quad (I.24)$$

#### I.4.1.2. Epaisseur de quantité de mouvement $\delta^*$

Correspond à la perte de quantité de mouvement dans la CL par rapport à un écoulement de fluide parfait (à débit masse équivalent)

$$\delta^* = \delta \left( 1 - \frac{\delta}{\delta^*} \right) \quad (I.25)$$

#### I.4.1.3. Facteur de forme H

Rapport des deux épaisseurs précédemment définies :

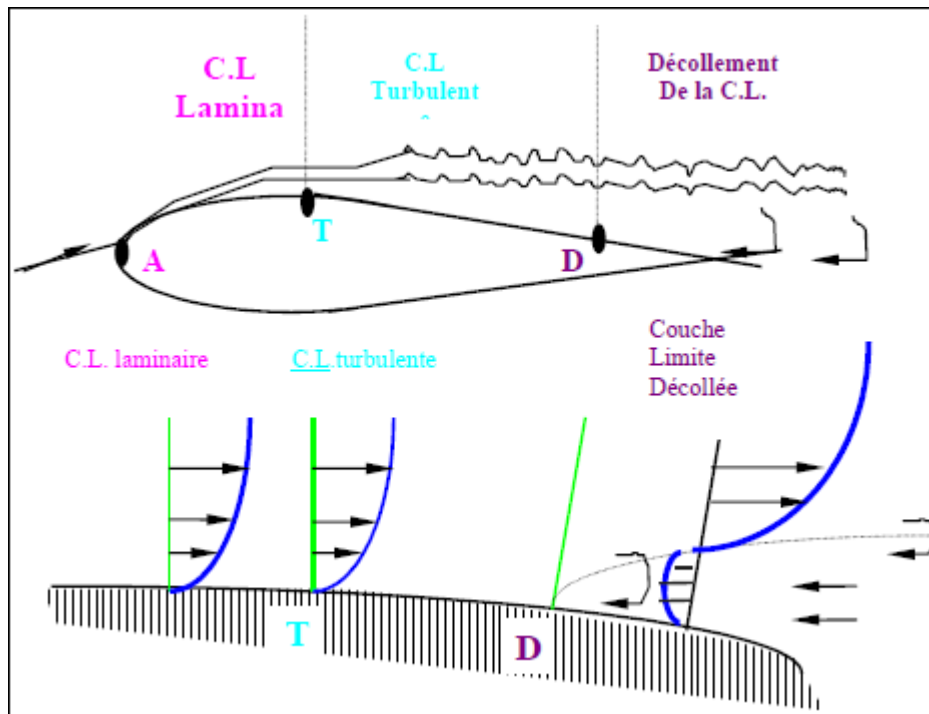
$$H = \frac{\delta^*}{\delta} \quad (I.26)$$

### I.4.2. Décollement de la Couche Limite

La théorie de la couche limite laminaire montre que le profil des vitesses se modifie sous l'effet d'un gradient longitudinal de pression positif.

La pente à l'origine peut devenir nulle, caractérisant le point de décollement. Il est en est de même pour une couche limite turbulente.

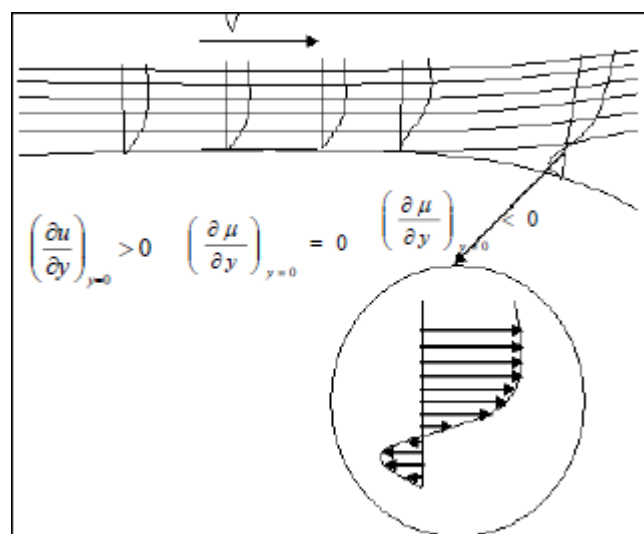
- De A à T les vecteurs vitesses restent parallèles entre eux sur une normale à la paroi : la couche limite est laminaire.
- A partir de T, les vecteurs vitesses ne sont plus parallèles entre eux, mais les vecteurs vitesse moyenne restent parallèles entre eux. La couche limite est turbulente. T est le point de transition, sa position dépend essentiellement du nombre de Reynolds, de l'état de surface et du nombre de Mach. La couche limite turbulente est d'autant plus importante que Re est grand.
- A partir de D, la couche limite se décolle, les particules près de la paroi voient leur mouvement s'inverser et entraînent la formation de tourbillons (d'où forte augmentation de la traînée). D est le point de décollement.



**Figure (I.5) :** Décollement de la Couche Limite

La figure (I.5) montre l'évolution progressive du profil des vitesses d'amont en aval: lorsque la vitesse s'annule dans les couches inférieures, le fluide sous l'effet de la pression plus grande en aval qu'en amont prend une vitesse de sens opposé à celui de la vitesse de l'écoulement extérieur, créant un courant de retour. [4]

L'expérience met en évidence le phénomène très important dit « décollement libre » dont la position peut être prévue lorsqu'on étudie le développement d'une couche limite et en particulier l'évolution du coefficient local de frottement puisque celui-ci s'annule au point de décollement.

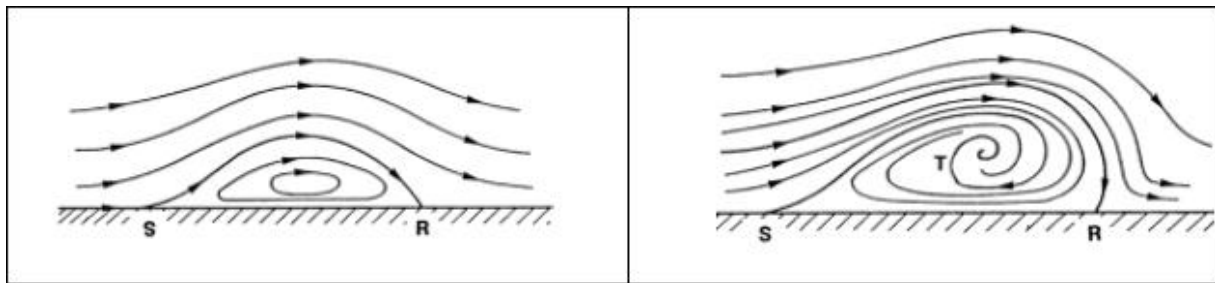


**Figure (I.6) :** Ecoulement avec gradient longitudinal de pression positif (D est le point de décollement de la couche limite).

Pour les applications, il est très important de noter qu'une couche limite turbulente décolle moins facilement qu'une couche limite laminaire, étant donné l'échange intense d'énergie à l'échelle macroscopique qui existe entre les couches inférieures dans une couche limite turbulente.

Les écoulements décollés tridimensionnels sont caractérisés par la présence de structures tourbillonnaires définies comme des concentrations spatiales de vorticité résultant du décollement de la couche limite figure (I.6).

Une fois que le décollement a eu lieu, la vorticité tend à se concentrer au voisinage de surfaces dont l'enroulement forme les tourbillons. Dans la réalité, de telles surfaces définies comme support de discontinuités (ou singularités) n'existent pas. Ces concepts appartiennent aux modèles de fluide parfait. Dans le monde réel, la vorticité est répartie dans l'espace et occupe un certain volume dans le voisinage de ce que l'on appelle une surface de décollement.



(a) écoulement bidimensionnel

(b) écoulement tridimensionnel

Figure (I.7) : Conceptions simples du décollement.

### I.4.3. Couche limite turbulente

Profil de vitesse dans la couche limite turbulente :

- Équation de quantité de mouvement :

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f} \quad (I.27)$$

- Proximité immédiate de la paroi : terme de frottement laminaire dominant (vitesses moyennes et fluctuations de vitesses  $\rightarrow 0$  quand  $y \rightarrow 0$ )

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \approx 0 \text{ Quand } y \rightarrow 0 \Rightarrow u = \frac{\tau_w}{\rho} y \quad (I.28)$$

Zone de très proche paroi = sous-couche visqueuse (viscoussub-layer)

- Echelle caractéristique de la vitesse = vitesse de frottement

$$\tau_w = \frac{\mu}{y} \quad (I.29)$$

- Variables sans dimension pertinentes dans la zone proche paroi :

$$y^+ = \frac{y}{\delta^+}, \quad \tau^+ = \frac{\tau}{\tau_w} \quad (I.30)$$

- Relation de très proche paroi valable jusqu'à  $y^+ \in [10, 5]$

$$y^+ = \tau^+ \quad (I.31)$$

- Lorsque l'on quitte la sous-couche visqueuse, le frottement turbulent devient peu à peu prépondérant par rapport au frottement laminaire (faibles vitesses  $\Rightarrow$  termes d'inertie négligeables) -dans cette zone, le frottement total reste à peu près constant et égal à -la vitesse moyenne reste de l'ordre de la vitesse de frottement-l'échelle caractéristique de longueur reste

$$\tau^+ = \tau_w^+ \quad (I.32)$$

- Lorsque l'on continue à s'éloigner de la paroi, frottement turbulent et inertie deviennent dominants devant le frottement laminaire -déficit de vitesse de l'ordre de la vitesse de frottement -échelle de longueur de l'ordre de l'épaisseur de CL

$$\frac{u^+ - 1}{y^+} = \frac{1}{y^+} \frac{u^+}{y^+} = \frac{1}{y^+} \tau^+ \quad (I.33)$$

- Lorsque l'on est à l'extérieur de la CL seul le terme d'inertie est dominant, les frottements laminaire et turbulent devenant négligeables

### I.5. Turbulence

Le phénomène de turbulence se manifeste par un champ de vitesse fluctuant. Ces fluctuations des variables de l'écoulement peuvent être d'un petit ordre de grandeur et atteindre des hautes fréquences. La résolution directe des équations régissant les écoulements turbulents est extrêmement onéreuse, compte tenu des temps de calcul et des moyens informatiques requis.

Cependant, la solution instantanée (exacte) des équations gouvernantes peut être moyennée en temps, tout en éliminant les grandeurs de faible échelle de turbulence, ce qui rend la résolution des équations résultantes moins coûteuse. Néanmoins, cette modélisation fait

apparaître des variables inconnues supplémentaires qui doivent être déterminées en utilisant des modèles dits de turbulence.

### I.5.1. Modélisation de la turbulence

Il n'y a pas de modèle de turbulence universel valable pour modéliser tous les cas d'écoulements. Le choix d'un modèle de turbulence dépend de certaines considérations telles que la physique du problème traité, le niveau de précision exigé, les ressources informatiques disponibles et le temps disponible pour effectuer la simulation.

Afin de choisir le modèle le plus approprié à chaque application donnée, il est nécessaire de comprendre les principes et les limites de chaque modèle de turbulence.

### I.5.2. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds ( $Re$ ) est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Il a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds. Il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime laminaire, transitoire, et turbulent. Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. On le définit par:

$$Re = \frac{U L}{\nu} \quad (I.34)$$

Avec :

$U$  : vitesse du fluide [m/s]

$L$  : longueur caractéristique [m]

$\nu$  : viscosité cinématique du fluide : [m<sup>2</sup>/s]

Le nombre de Reynolds s'interprète alors comme le rapport entre forces d'inertie et forces visqueuses. Donc on distingue trois principaux régimes :

- Aux faibles valeurs du Reynolds (inférieures à 2000) : les forces de viscosité sont prépondérantes, l'accélération convective étant négligée ; L'écoulement est laminaire. De plus, comme l'inertie est négligeable, l'écoulement du fluide est réversible. C'est-à-dire si les forces extérieures sont soudainement stoppées, le fluide s'arrête immédiatement, et si les forces extérieures sont inversées, le fluide repart en sens inverse.
- Aux valeurs intermédiaires du Reynolds (entre 2000 et 3000 environ) : les forces d'inertie sont prépondérantes, mais l'écoulement reste laminaire. Cependant, il n'est plus réversible: si l'on stoppe les forces extérieures, le fluide continu partiellement sur sa lancée.
- Aux fortes valeurs du Reynolds (au-delà d'environ 3000) : les forces d'inertie sont si importantes que l'écoulement devient turbulent. Entre les régimes laminaire et turbulent, on parle de régime transitoire.



### I.5.3. Nombre de Mach " M "

Pour comparer la vitesse « U » d'un écoulement et la vitesse « a » du son, il est intéressant d'introduire le rapport sans dimension « U/a » appelé Nombre de Mach.

$$M = \frac{U}{a} \quad (I.35)$$

\* Si  $U < a \rightarrow M < 1$  : l'écoulement est subsonique.

\* Si  $U > a \rightarrow M > 1$  : l'écoulement est supersonique.

\* Si  $U = a \rightarrow M = 1$  : l'écoulement est sonique.

En mécanique de vol on définit plusieurs nombres de Mach:

- Le nombre de Mach général : C'est le nombre de Mach correspondant à la vitesse de l'avion « U » et la vitesse du son « a » à l'altitude de Vol.
- Les nombres de Mach locaux: Qui correspondent par exemple à des survitesses locales sur l'extrados.

### I.5.4. Les modèles de turbulence

Les écoulements turbulents sont caractérisés par les champs de fluctuation de Vitesse. Ces fluctuations mélangent des quantités transportées telle que l'énergie, la concentration D'espèce,... Ces fluctuations peuvent être de petite échelle et de haute fréquence, elles sont d'un point de vue informatique trop ardu pour être simulé directement dans des calculs pratiques en technologie.

En alternative les équations régissant (exactes) instantanées peuvent être remplacées par des équations à variables moyennes temporelles ramenées à des structures à petites échelles, afin d'obtenir un ensemble d'équations modifiées qui sont plus simple à résoudre.

#### I.5.4.1. Le modèle Spalart-Allmaras

Le modèle Spalart-Allmaras est une formulation simple à une équation. Ce modèle est surtout destiné à des applications aérospatiales, et il a donné des résultats satisfaisants concernant les calculs des couches limites soumises à de très forts gradients de pressions. Il devient de plus en plus populaire dans d'autres applications telles que les turbomachines.

Sous sa formulation originale, le modèle Spalart-Allmaras est un modèle de turbulence à bas nombre de Reynolds nécessitant la résolution complète des équations de la couche limite.

Cependant, certains codes de CFD couplent ce modèle avec des fonctions de parois lorsque la résolution du maillage n'est pas suffisamment fine. En outre, ce modèle est moins sensible aux erreurs numériques que les modèles k-ε et k-ω.

Cependant, les équations modifiées contiennent des variables inconnues additionnelles, et des modèles de turbulence sont nécessaires pour déterminer ces variables en termes de quantités connues.

#### **I.5.4.2. Le modèle k- $\epsilon$**

Les modèles de turbulence les plus populaires sont les modèles dits à deux équations dont le modèle k- $\epsilon$ . Il est fréquemment utilisé dans de nombreux calculs d'ingénierie. Il est basé sur la formulation proposée par Launder et Spalding.[5]

La robustesse, l'économie, et la précision dans la prédiction d'une large gamme de problèmes d'écoulements turbulents, expliquent sa popularité dans la simulation des écoulements industriels et les problèmes de transfert de chaleur. Le modèle k- $\epsilon$  est un modèle semi empirique et les équations utilisées découlent des considérations phénoménologiques et empiriques.

Par rapport à sa formulation d'origine, le modèle a subi des améliorations pour l'adapter au mieux à certains cas d'écoulement. On retrouve ainsi la variante k- $\epsilon$  - RNG (Re Normalisation Group) [6] et k- $\epsilon$  modifié.[7]

#### **I.5.4.3. Le modèle k- $\omega$ standard et le modèle k- $\omega$ -SST**

Le modèle k- $\omega$  est basé sur la formulation de Wilcox[8], dans laquelle il a introduit des modifications qui tiennent compte des effets liés aux bas Reynolds et à la compressibilité. Les deux variantes du modèle k- $\omega$ , Standard et SST, sont des modèles semi empiriques et ils ont la même forme mathématique que les équations de transport de k et de  $\omega$ . Le modèle k- $\omega$  - SST est basé sur la formulation proposée par Menter.[9]

#### **I.5.4.4. Modèle à contrainte de Reynolds RSM (Reynolds Stress Model)**

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  $\epsilon$ . 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.[10.11.12]

#### **I.5.4.5. 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 tel niveau 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 lâche, ou pour des simulations en deux dimensions parce que le modèle s'appuie sur des phénomènes tridimensionnels.

#### **1.5.4.6. Simulation directe (DNS) ou Direct Numerical Simulation**

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. Donc, cette approche n'a encore aucune utilité industrielle. Elle reste réservée à la recherche et à la construction de modèles.

#### **1.5.5. Calcul en proche paroi**

Les écoulements turbulents sont sensiblement influencés par la présence des parois. Dans les zones très proches des parois, les effets de viscosité réduisent les fluctuations des vitesses tangentielles. En dehors de la zone de proche paroi, la turbulence apparaît plus rapidement par la production d'énergie cinétique turbulente due au gradient de vitesse moyenne.

La modélisation des zones de proche paroi a un impact significatif sur les résultats de la simulation numérique car la présence des parois constitue la principale source de vorticité et de turbulence et les variables de l'écoulement turbulent y présentent un fort gradient. Les modèles de turbulence définis précédemment ( $k$ - $\epsilon$ , RSM, LES), demeurent valables pour le calcul des écoulements turbulents loin des parois, cependant ces modèles doivent être développés initialement pour être appliqués dans toute l'étendue de la couche limite à condition que la résolution du maillage soit satisfaisante.

Beaucoup d'expériences ont montré que la région proche paroi peut être divisée en trois couches. Dans la première couche appelée sous-couche visqueuse, l'écoulement est presque laminaire, la viscosité joue un rôle dominant sur l'écoulement et les phénomènes physiques associés (transferts de chaleur, etc.). Dans la zone externe appelé zone logarithmique, c'est plutôt la turbulence qui joue un rôle prépondérant. Finalement une zone intermédiaire entre la sous couche visqueuse et la zone logarithmique associe les effets de la turbulence et les effets de la viscosité est définie.

Figure (I.8) illustre la subdivision de la zone de proche paroi.

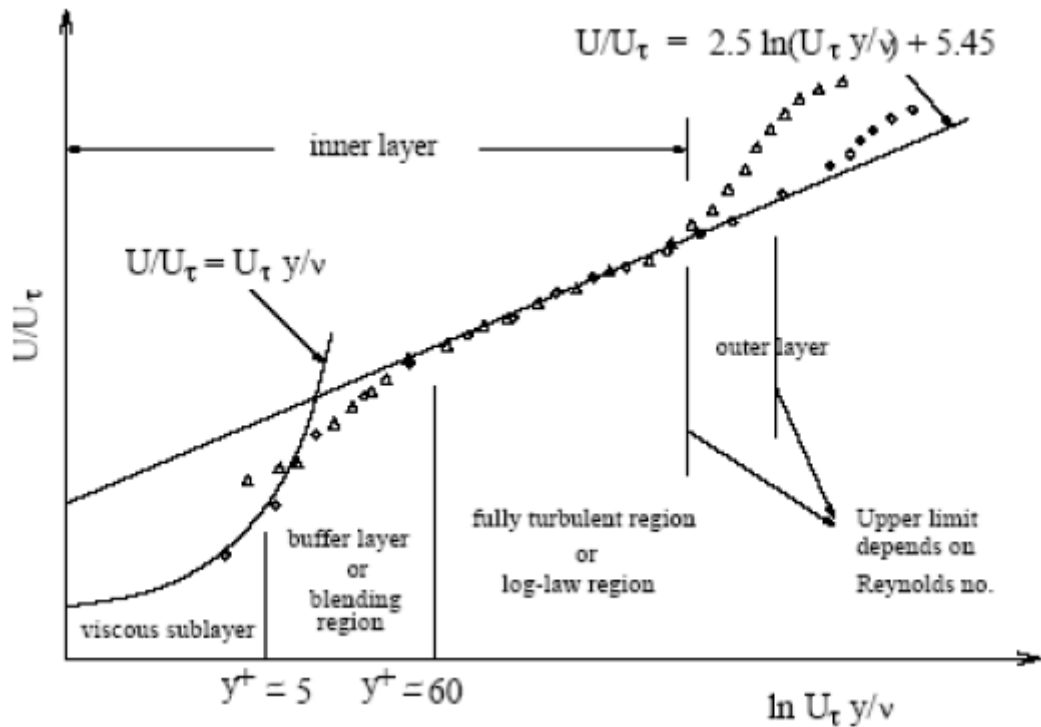
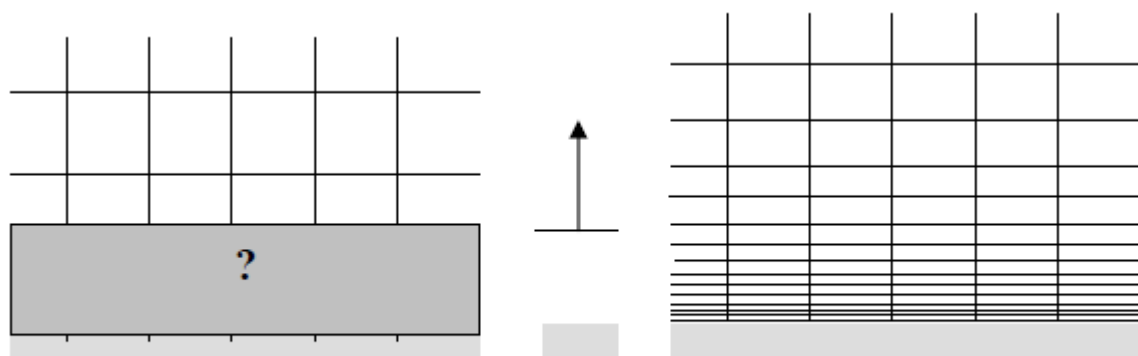


Figure (I.8) : Division de la région proche paroi

### I.5.5.1. Modélisation de l'écoulement en proche paroi

Il existe deux approches pour modéliser l'écoulement en proche paroi. La première approche consiste à ne pas résoudre l'écoulement dans la région de la sous couche visqueuse et d'appliquer des fonctions empiriques dites fonctions de paroi. Cependant, l'utilisation de ces fonctions exige la modification et l'adaptation des modèles de turbulence pour tenir compte de la présence des parois dans l'écoulement.

Dans la deuxième approche, les modèles de turbulence sont adaptés afin de résoudre toutes les sous-couches y compris la sous couche-visqueuse, cette approche appelée approche proche paroi nécessite un maillage très raffiné près des parois. Figure (I.9) résume la différence entre ces deux approches :



Approche avec fonctions de paroi

Approche « proche paroi »

Figure (I.9) : Modélisation de la couche limite.

Dans la plupart des écoulements turbulents à haut Reynolds, l'approche basée sur fonctions de paroi réduit considérablement les besoins en ressources informatiques. Cette approche demeure très populaire pour sa robustesse, son économie et sa précision, et elle est largement utilisée dans beaucoup d'applications industrielles.

Cependant, cette approche est inadéquate pour la modélisation des écoulements où les effets liés aux bas Reynolds sont prépondérants et les hypothèses concernant les fonctions de paroi ne sont plus valables.

## I.6. Les conditions aux limites

En fonction du problème physique traité, les conditions aux limites sont différentes et leur compatibilité avec les modèles numériques associés à un impact direct sur la convergence et le réalisme des résultats des simulations numériques. Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés en CFD.

### I.6.1. Condition de pression à l'entrée

Ce type de condition aux limites est employé lorsqu'on veut imposer une pression à l'entrée du volume de contrôle à étudier. Cette condition est valable aussi bien en écoulement compressible qu'en écoulement incompressible, elle est utilisable lorsqu'on connaît la pression à l'entrée et qu'on recherche la vitesse de l'écoulement correspondante. La pression totale imposée s'exprime, en écoulement incompressible, par la relation suivante:

$$P_t = P_s + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (I.36)$$

En écoulement compressible cette expression devient :

$$P_t = P_s + \rho V^2 \left[ 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right] \quad (I.37)$$

Avec :

$P_t$  : Pression totale

$P_s$  : Pression statique

$\gamma$  : Rapport des chaleurs spécifiques ( $C_p/C_v$ )

$M$  : Nombre de Mach

### I.6.2. Condition de vitesse à l'entrée

Cette condition aux limites sert à imposer une vitesse d'entrée au volume de contrôle. Une fois la vitesse fixée, on remonte aux autres grandeurs de l'écoulement. Cette condition aux limites est utilisable en général dans les écoulements supposés incompressibles. Pour des

raisons d'instabilités numériques il est déconseillé d'appliquer la condition de vitesse à l'entrée dans le cas des écoulements compressibles.

### I.6.3. Condition de débit massique à l'entrée

A l'inverse de la condition de pression à l'entrée, cette condition aux limites consiste à fixer le débit de l'écoulement à l'entrée pendant que la pression totale de l'écoulement varie. Dans plusieurs applications, la condition de pression à l'entrée rend la convergence des calculs plus lente, il est conseillé dans ces cas d'appliquer la condition de débit massique à l'entrée. Pour les calculs des écoulements incompressibles, il n'est pas nécessaire d'imposer le débit massique à l'entrée. La vitesse de l'écoulement impose la valeur du débit massique du fait que la masse volumique du fluide est constante.

### I.6.4. Condition de pression à la sortie

Permet d'imposer une valeur de la pression statique à la sortie du volume de contrôle. La valeur de la pression statique ne peut être imposée que lorsque l'écoulement est subsonique.

Le processus de convergence devient plus rapide lorsque la valeur de la pression à la sortie imposée est proche de la réalité.

### I.6.5. Condition de parois

Cette condition aux frontières permet de spécifier les parois du volume de contrôle. Les parois peuvent être déclarées fixes ou en mouvement relatif à l'exemple des rotors de machines rotodynamiques.

Pour des écoulements visqueux, la condition de non glissement est associée à cette condition aux limites. La contrainte de cisaillement associée à la présence des parois dans le domaine de calcul en régime d'écoulement laminaire est donnée par la relation suivante :

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (I.38)$$

## I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions de base en mécanique des Fluides, et un rappel sur les principes généraux de la couche limite, la dynamique des différentes structures de la couche limite laminaire et turbulente et la physique de décollement de la couche limite. En fin une modélisation de la turbulence et quelques définitions de ces modèles les plus utilisés dans la simulation numérique.

## II.1. INTRODUCTION

La plupart des écoulements des fluides rencontrés dans la nature et qui sont d'un intérêt pratique, en ingénierie sont turbulents, très complexes et instables à partir d'un certain nombre de Reynolds.

Au faibles nombre de Reynolds, l'écoulement est laminaire tandis qu'à des nombres de Reynolds élevés, devient turbulent. En régime laminaire, les écoulements sont complètement décrits par les équations de continuité, de Navier Stokes, d'énergie et d'état du fluide. Dans certains cas de configurations géométriques simples, ces équations peuvent être résolues analytiquement. Dans des cas plus complexes, ces écoulements sont traités numériquement à l'aide de techniques de **CFD** (Computational Fluid Dynamics) comme la méthode des volumes finis par exemple.

Cependant, la plupart si non la totalité des écoulements dans les applications pratiques sont turbulents et de ce fait l'étude de l'écoulement turbulent n'est pas uniquement d'ordre théorique.

En ingénierie, il est donc indispensable de disposer de méthodes et modèles permettant de tenir compte des effets de la turbulence.

## II.2. NATURE DE LA TURBULENCE

La turbulence est une propriété de l'écoulement et non du fluide lui-même. Il n'existe pas de définition de la turbulence en milieu fluide, ni d'ailleurs de théorie générale de la turbulence. La turbulence est alors caractérisée par un certain nombre de propriétés observables que nous allons préciser.

Paramètre le plus important qui caractérise la turbulence est le nombre adimensionnel de Reynolds, c'est le produit de la corde du profilé (dans notre cas  $L$  signifie la longueur de plaque), de la vitesse et de la masse volumique du fluide divisé par la viscosité du fluide.

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu}$$

$\rho$  : La masse volumique du fluide

$V$  : La vitesse du fluide

$L$  : La longueur caractéristique

$\mu$  : La viscosité dynamique du fluide

$R_{EL}$  : Le nombre de Reynolds

## II.3. EFFETS PRATIQUES DE LA TURBULENCE :

Elles à des effets qui, selon les applications peuvent se révéler soient favorables, soit défavorables.

- La turbulence réduit les inhomogénéités cinématiques, thermiques, massiques au sein de l'écoulement, tout en augmentant les transferts pariétaux.
- La turbulence augmente la traînée de frottement visqueux, mais peut diminuer sensiblement la traînée de forme, en retardant d'éventuel décollement.

Dans notre cas étudié, on prend en compte les équations fondamentales de la mécanique des fluides visqueux et compressibles.

#### II.4. APPROCHES DE MODELISATION :

L'approche numérique la plus communément dans l'industrie reste la résolution des équations de Navier-Stokes moyennées (ou RANS pour **Reynolds Averaged Navier-Stokes**). Le passage à la moyenne des équations de modéliser.

Il s'agit pour la dynamique, des tensions de Reynolds  $-\overline{\rho u_i u_j}$  et, pour la thermique, des flux de chaleur turbulents  $-\overline{\rho u_i \theta}$ . Le passage à la moyenne de ces équations occasionne, par conséquent, une perte d'informations et rend la méthode moins précise que la DNS ou la LES.

Cependant, son intérêt repose sur la possibilité de traiter de configurations industrielles d'une manière simple et rapide. Toute l'approche RANS réside dans la représentation de ces deux corrélations par le biais des modèles de turbulence qui diffèrent généralement par leur degré de complexité.

Selon la complexité nous pouvons citer cinq classes principales :

- Algébrique
- A une équation
- A multiples équations
- Fermeture du second ordre (**Reynolds Stress Models**)
- Simulation à grand échelles (**Large Eddy Simulation LES**)

Il faut noter qu'il n'y a pas un modèle capable de prédire d'une manière sûr tout genres d'écoulement. Chaque modèle à ses avantages et ses inconvénients donc chaque modèle est approprié à un type d'écoulement.

L'écoulement au voisinage des parois est composé de trois couches : une sous couche visqueuse où l'effet de viscosité est plus grand que l'effet de la turbulence, une couche tampon où les effets visqueux et turbulent sont du même ordre et une couche inertielle (turbulente). L'épaisseur des deux premières couches et les profils de vitesse au voisinage de la paroi sont des paramètres



importants pour les modèles de turbulence. On utilise souvent une distance  $y^+$  et une vitesse  $U^+$  adimensionné pour définir les couches au voisinage de la paroi

$$y^+ = \frac{yU}{\nu}$$

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau}$$

Où  $U_\tau$  est la vitesse de frottement.

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

## II.5. EQUATIONS DE TRANSPORT :

Donc trois principes généraux apparaissent, tirés de la mécanique et de la physique, qui conduisent à écrire ces équations :

### II.5.1. Principe de conservation de la masse :

C'est un principe de physique, qui permet d'établir une relation entre certaines caractéristiques du fluide et ses mouvements, indépendamment des causes qui le provoquent.

Quelque soit le volume  $V$  du fluide que l'on suit dans son mouvement, sa masse  $m$  reste constante (Fluide Conservatif)}.

Il se traduit par l'équation de continuité, sous sa forme générale :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad \text{[II-1]}$$

Dans le cas d'un fluide permanent (stationnaire), et incompressible, où la masse volumique est invariable, l'équation de continuité se réduit à :

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \Rightarrow \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \quad \text{[II-2]}$$

### II.5.2. Principe de conservation de la quantité de mouvement :

C'est un principe de mécanique qui permet d'établir des relations entre les caractéristiques du fluide, celles de ces mouvements et les causes qui les produisent (Forces).

Quelque soit le domaine  $D$  du fluide que l'on suit dans son mouvement, la dérivée par rapport au temps du tenseur  $\int_D \rho \vec{U} \otimes \vec{U} \, dV$  des quantités du mouvement est égale au tenseur des forces extérieures appliquées au domaine  $D$  (Forces de volume et Forces de Surface)}

Ce principe se traduit par les équations de NAVIER- STOKES, qui ont été établies en 1822 par ces derniers.

Les équations de Navier -Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides, et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. La paternité de ces équations est partagée par Claude Navier (1785-1836) et George Stokes (1819-1903). Alors pour un fluide newtonien sous l'effet de la pesanteur les équations peuvent être exprimées ainsi,

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad \text{[II.3]}$$

Avec  $\boldsymbol{\tau} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} + \lambda \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$

Pour un fluide incompressible l'équation de continuité se réduit en  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ , alors le terme  $\lambda \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$  n'aura pas lieu dans les équations de mouvements car c'est la viscosité de dilatation (d'après l'hypothèse de Stokes).

Les équations de NAVIER- STOKES sont très complexes, des solutions Analytiques ne peuvent être obtenues que par certaines configurations simples. On peut dire que si on sait les intégrer, on pourrait résoudre analytiquement tout les problèmes de la mécanique des fluides.

**II.5.3.Conservation de l'énergie :**

Quand notre élément de fluide reçoit de la chaleur et du travail, celle-ci s'exprime par l'accroissement de l'énergie interne et de l'énergie cinétique soit :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho e + \frac{d}{dt} \int_V \frac{\rho v^2}{2} = \int_V \rho \dot{q} + \int_V \rho \dot{w} + \int_V \rho \dot{e} \quad \text{[II.7]}$$

$\rho e$  : L'énergie interne par unité de masse (J/kg).

$\int_V \rho \dot{q}$  : Puissance calorifique reçue par le domaine (D) par rayonnement et par conduction.

$\int_V \rho \dot{w}$  : Energie cinétique.

$\rho \dot{e}$  : Mouvement d'agitation moléculaire.

Pour les écoulements compressibles, le transport et la génération d'énergie sont couplés à la dynamique du mouvement du fluide, et donc l'équation d'énergie doit être résolue en même temps que les équations de continuité et de quantité de mouvement. En outre, une équation complémentaire associant la densité à la pression et à la température est nécessaire. Pour un gaz idéal, l'équation d'état est donnée par:

$$\frac{p}{\rho} = R T \quad \text{[II.8]}$$

Les équations [II.7] et [II.7] fournissent six équations (dans l'écoulement tridimensionnel) pour six inconnus (u,v,w, ,P,T)

**II.5.4. Décomposition statique :**

Pour résoudre ce système une approche statique est utilisée. Les grandeurs caractéristiques instantanées de l'écoulement turbulent seront décomposées selon les règles de Reynolds comme suit le premier représente le mouvement d'ensemble et le second le mouvement fluctuant, soient :

$$u = \bar{u} + u', \quad \bar{u}' = 0$$

$$v = \bar{v} + v', \quad \bar{v}' = 0$$

En général : la quantité f(x, t) est décomposée en deux parties distinctes

$$f = f' + \bar{f}$$

*f'* Est la partie fluctuante

$\bar{f}$  Est la partie moyenne d'ensemble

**Remarque :** la partie fluctuante est centrée  $\bar{f}' = 0$

**A/ Règles de Reynolds :**

En utilisant les règles dites « règles de Reynolds Hinze (1975) » qui sont les suivants:

$$\bar{u}' = 0$$

$$\bar{v}' = 0$$

$$\overline{u'v'} = \bar{u} \cdot \bar{v}'$$

$$\overline{u'v'v'} = \bar{u} + \bar{v}'$$

$$\overline{u'v'v'} = \bar{u} \cdot \bar{v}' = 0$$

$$\overline{u'v'v'} = \bar{u} \cdot \bar{v}' + \overline{u'v'v'}$$

$$\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} = \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x}$$

**B/ Les tensions de Reynolds**

Le formalisme des règles de Reynolds conduit en prenant la moyenne de chaque équation aux équations de Reynolds.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'u} + \overline{u'v} + \overline{u'w}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'u} + \overline{v'v} + \overline{v'w}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'u} + \overline{w'v} + \overline{w'w}) = - \frac{\partial}{\partial x} \overline{p'} + \overline{u''} + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'u'u} + \overline{u'v'u}) \quad \text{[II.9]}$$

On moyenne ensuite ces équations et après calcul, on retrouve l'équation de continuité et celle de chaque celle de Navier-Stokes moyenné.

**II.5.5. Equation de transport de quantité de mouvement :**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'u'}) \tag{II.11}$$

Les équations de Reynolds moyennées obtenues font apparaître un nombre d'inconnues supplémentaire ( $\overline{u'u'}$ ) d'où la nécessité d'un modèle de turbulence afin de fermer le système d'équation à résoudre.

**II.6. PROBLEME DE LA FERMETURE :**

La différence entre les équations de NAVIER-STOKES et celles de Reynolds est en fait essentielle, parce que les contraintes  $\overline{u'u'}$  sont des inconnues supplémentaires et que l'on ne dispose à priori que du même nombre d'équations.

Dans un problème laminaire, on a 4 fonctions inconnues U1, U2, U3 et P et quatre équations, l'équation de continuité et les trois équations de NAVIER-STOKES. Pour un problème turbulent, on dispose du même nombre d'équations, les équations de Reynolds remplaçant celle de NAVIER STOKES, mais en plus des fonctions inconnues de l'écoulement moyen U2 U3 et P, on a les 6 fonctions inconnues du tenseur de Reynolds  $\overline{u'u'}$  donc dans le cas général, on a 10 fonctions inconnues, mais seulement 4 équations. On dit que le système n'est pas **fermé**.

Pour pouvoir résoudre ce système, il faut trouver des équations supplémentaires en nombre suffisant, c'est le problème central de la turbulence, problème de la **fermeture**.

Pour cela, beaucoup de chercheurs se sont investis dans le domaine et plusieurs contributions de modèles de résolution ont été proposées. Parmi ces modèles on peut citer les modèles suivants.

**II.7. MODELES DE TURBULENCE**

Par définition, un modèle de turbulence est un système additionnel d'équations algébriques ou aux dérivées partielles, régissant le mouvement moyen permettant le calcul des paramètres liés à la turbulence, ou une façon de progresser vers un schéma consistant à déduire des valeurs (par exemple la viscosité turbulente) d'une ou plusieurs fonctions transportables telles que :

- Les contraintes de turbulence.
- L'énergie cinétique de turbulence k.

- Le taux de dissipation de l'énergie cinétique  $\epsilon$ .

**Les Modèles de viscosité turbulente**

Qui sont constitués en plusieurs modèles :

- Modèle à zéro équation.
- Modèle à une équation.
- Modèle à deux équations :
  - Modèle k- $\epsilon$ .
  - Modèle de RNG k- $\epsilon$  Renormalisation Group.
  - Modèle k- $\omega$ .
  - Modèle de BSL k- $\omega$  Baseline model.
  - Formulation à bas nombre de Reynolds.

**II.7.1. Le modèle à une équation Spalart-Allmaras**

De même que les modèles à deux équations de transports, le modèle à une équation de Spalart-Allmaras qui sera décrit dans la suite de cette section, repose sur un concept de viscosité turbulente cependant, seule la viscosité turbulente est transportée.

Le modèle de Spalart-Allmaras est un modèle à une équation de transport pour la viscosité de turbulence. L'équation de transport est établie sous des hypothèses empiriques et des analyses dimensionnelles. Ce modèle ne requiert pas de raffinement supplémentaire du maillage si ce n'est la finesse requise pour capturer un champ de gradient de vitesse avec un modèle algébrique, l'équation de transport de la variable de travail est donnée par :

$$\frac{\partial \nu_t}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \nu_t = \nu_t \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + P_{\nu_t} - D_{\nu_t} - C_{\nu_2} \frac{\nu_t}{l} \tag{II.11}$$

Où, le premier membre de l'équation est le terme convectif,  $P_{\nu_t}$ ,  $D_{\nu_t}$  et  $C_{\nu_2}$  sont respectivement les termes de production, de dissipation et de destruction de  $\nu_t$  exprimés tels que :

$$P_{\nu_t} = \nu_t \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \tag{II.12}$$

$$D_{\nu_t} = \frac{\nu_t}{l} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{\nu_t}{l} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{\nu_t}{l} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \tag{II.13}$$

$$C_{\nu_2} \frac{\nu_t}{l} = \frac{\nu_t}{l} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{\nu_t}{l} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{\nu_t}{l} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \tag{II.14}$$

La viscosité de turbulence est alors définie comme suit :  $\nu_t = \nu_t^*$

De manière à s'assurer que  $\nu_t^*$  égale  $\nu_t$  dans la partie logarithmique de la couche limite ainsi que dans la zone tampon et dans la sous couche visqueuse la fonction d'amortissement  $f_{\nu_t}$  est définie telle que

$$\epsilon = \frac{u'^2}{\tau} \dots \dots \dots [II.15] \quad \tau = \frac{\nu}{u'} [II.16]$$

Par ailleurs  $s$  est modifié en  $\tau$  de manière à garder un comportement correct dans la partie logarithmique de la couche limite  $\tau = \frac{\nu}{u'}$

$$\tau = \tau \sqrt{2 \frac{\nu}{u'} \frac{u'}{\nu}} + \frac{\nu}{\tau u'} \tau \quad [II.17]$$

Avec :

$$= \frac{1}{2} \frac{\tau u'}{\nu} - \frac{\tau u'}{\nu} \tau, \quad \tau u' = 1 - \frac{\nu}{\nu + \tau u'} \tau u' = 1$$

Enfin, de façon à obtenir une décroissance du terme de destruction dans la partie extérieure de la couche limite, la fonction  $\tau$  est introduite telle que

$$\tau = \tau \frac{\nu}{\nu + \tau u'} \tau \quad [II.18.a]$$

Où  $\tau$  agit comme un limiteur empêchant  $\tau$  de prendre une très grande valeur est s'exprime par  $\tau = \tau + \frac{\nu}{\tau u'} (\tau^2 - \tau)$  avec  $\tau = \frac{\nu}{\tau u'}$ ,  $r$  ainsi  $\tau$  sont égales à 1 dans la partie logarithmique de la couche limite et décroissent dans la partie extérieure.

Les constantes du modèle sont :

$$\tau = 0.1355, \quad \tau = 0.622, \quad \tau = \frac{2}{3}, \quad \tau = 0.41$$

$$\tau = \frac{\tau}{\tau^2} + \frac{1 + \tau}{\tau}, \quad \tau = 0.3, \quad \tau = 2 \frac{\tau}{\tau} = 7.1$$

Le modèle de **Spalart-Allmaras** est considéré comme bon compromis entre les modèles algébriques et les modèles à deux équations tels que K- et K- , ce modèle est devenu très populaire en raison de la qualité raisonnable des résultats qu'il fournit dans un grand nombre d'applications.

**II.7.2. Modèles de fermeture au premier ordre à deux équations de transport**

Les modèles de fermeture du premier ordre sont basés sur l'hypothèse de Boussinesq reliant linéairement le tenseur de Reynolds au champ moyen des vitesses, hypothèse par la suite formulée par Prandtl sous la forme suivante :

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (II.18.b)$$

Où  $\nu_t$  représente la viscosité de turbulence.

Les modèles à deux équations reposent sur le transport de l'énergie cinétique de turbulence  $k$  et sur le transport de la dissipation de la turbulence  $\epsilon$  ou d'une grandeur contenant la dissipation de la turbulence. En ce qui concerne les écoulements pariétaux, il est très important de modéliser correctement l'atténuation de la turbulence (damping) lorsqu'on s'approche de la paroi solide. Les approches d'amortissement de la turbulence sont basées sur des développements asymptotiques des grandeurs turbulentes dans la région proche paroi. Une description détaillée d'un ensemble de modèles dits à bas Reynolds est fournie par [42].

Les modèles de fermeture présentés dans cette section sont ceux utilisés dans la présente étude : le modèle  $k$ -Chien [21], le modèle  $k$ -Chien modifié dans le contexte OES[25], les modèles  $k$ -Wilcox [11],  $k$ -Baseline et SST [15].

### II.7.2.1. Modèle de turbulence $k$ - $\epsilon$ :

Dans le code Fluent, il existe différents modèles de turbulence, qui se distinguent par un nombre d'équation de transport supplémentaires nécessaires pour fermer le système d'équations du problème à résoudre. On a utilisé le modèle  $k$ -standard qui est un modèle semi-empirique basé sur le concept de **Boussinesq** reliant les contraintes de **Reynolds** au taux de déformation moyen

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \epsilon \frac{k}{\epsilon} \delta_{ij} \quad \text{[II.19]}$$

Où  $\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$  : tenseur de déformation

$k = \frac{u'^2}{2}$  Représente l'énergie cinétique turbulente

Par analogie avec la viscosité laminaire caractérisée par une vitesse (des molécules) et une distance (le libre parcours moyen), la viscosité turbulente, caractérisée par une vitesse  $\sqrt{k}$  et une distance  $l = \frac{k}{\epsilon}$ , est donnée par :

$$\mu_t = \rho C_\mu \sqrt{k} \frac{k}{\epsilon} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{[II.20]}$$

Avec

$C_\mu = 0.09$ , et  $\epsilon$  le taux de dissipation.

Sont obtenus à partir de leur équation de transport présentée ci-dessous.

#### *A/ Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente $k$ :*

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \overline{u_j k} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho \overline{u_j u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad \text{[II.21]}$$

1                                      2    3    4

1: terme convectif 3 : taux de production

2 : terme diffusif 4 : taux de dissipation

**B/ Equation de transport du taux de dissipation ε de l'énergie cinétique turbulent :**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \rho \left( \frac{C_{\epsilon 1} k \epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \right) \quad \text{[II.22]}$$

$\sigma_\epsilon$  et  $C_{\epsilon 1}$ , sont respectivement les nombre de Prandtl turbulents relatifs aux taux de dissipation et à l'énergie cinétique turbulent, et l'ensemble des autres coefficients est déterminé de façon empirique.

**C/ Coefficient du modèle k-ε :**

L'adaptation des constants standards du modèle donné par **Lauderet Spalding**(1974) rend le système d'équation opérationnel. Elles sont réunies dans le tableau (2-1) :

$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\mu}$	$\sigma_\epsilon$	$\sigma_k$
0.09	1.44	1.92	1	1.3

Tableau (II-1) valeurs des constants du modèle k-ε

**II.7.2.2. Les modèles k-ω Baseline et k-ω Baseline SST**

Ces deux modèles dérivent du modèle k-ω de Wilcox ([18.b]) qui transporte et  $\omega = \frac{\epsilon}{\beta^* k}$  est homogène à la fréquence caractéristique de la turbulence, de manière à palier le manque de robustesse des modèles k-ε en présence d'une paroi solide.

$$\frac{Dk}{Dt} = v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_1^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (v + \sigma_{k1} v_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad \text{(II.23)}$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \gamma_1 \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (v + \sigma_{\omega 1} v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] \quad \text{(II.24)}$$

$$v_t = \frac{k}{\omega} \quad \text{(II.25)}$$

**Formulation Baseline :** Le principal défaut de ce modèle est une très grande sensibilité aux conditions de free-stream. De ce fait, [25] propose d'utiliser du modèle k-ε classique qui a prouvé



dans des nombreuses études, son indépendance à ces conditions *free-stream* dans les zones extérieures aux couches limites et d'utiliser le modèle *k-ε* Wilcox en zone proche à la paroi de manière à bénéficier de sa robustesse.

Le modèle *k-ε* est alors réécrit en formulation *k-ω* comme suit :

$$\frac{Dk}{Dt} = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_2^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\nu + \sigma_{k2} \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (\text{II.16})$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \gamma \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_2 \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\nu + \sigma_{\omega 2} \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (\text{II.17})$$

Il convient de noter que cette modification consiste essentiellement en un ajout d'un terme de diffusion croisée et une modification des constantes du modèle. Le modèle original est alors multiplié par une fonction  $F_1$  et le modèle transformé par une fonction  $(1-F_1)$  et les deux modèles sont additionnés l'un à l'autre donnant le modèle *k-ε* Baseline :

$$\frac{Dk}{Dt} = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (\text{II.28})$$

$$\begin{aligned} \frac{D\omega}{Dt} = \gamma \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] \\ + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (\text{II.29})$$

Chaque constante du modèle est calculée telle  $\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$  que : où  $\phi_1$  est une constante du modèle *k-ε* et  $\phi_2$  une constante du modèle *k-ε* modifié. Les constantes des deux modèles sont décrites ci dessous :

Set de constantes 1 (Wilcox) :

$$\sigma_{k1} = 0.5, \sigma_{\omega 2} = 0.5, \beta_{11} = 0.075, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41, \quad \gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

Set de constantes 2 (*k-ε* classique)

$$\sigma_{k2} = 0.1, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_{21} = 0.0828, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41, \\ \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

La fonction  $F_1$  est définie telle que :

$$F_1 = \tanh^2(\arg_1^4)$$

Où la fonction  $arg_1$  est définie telle que  $\left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega}, \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right] \right\}$  où  $CD_{k\omega}$  est un limiteur inférieur sur le terme de diffusion croisée introduit dans le modèle k- modifié.

Formulation Baseline-SST : Comme cela sera évoqué dans la section suivante sur l'approche O.E.S, en présence d'une couche limite avec gradient de pression adverse, l'hypothèse d'égalité entre la production et la dissipation de l'énergie cinétique turbulente n'est plus valide et cette hypothèse conduit à une surestimation de la viscosité de turbulence de la part des modèles classiques.

Menter se propose de remédier à ce problème en introduisant des limiteurs de viscosité de turbulence en présence d'un gradient de pression adverse. L'hypothèse de Bradshaw est que dans une couche limite, les tensions de Reynolds sont proportionnelles à k :

$$\overline{u_i u_j} = \rho a_1 k \quad (II.20)$$

Où  $a_1$  est une constante. Par ailleurs, dans les modèles de turbulence du premier ordre, l'hypothèse de BOUSSINESQ nous donne :

$$\overline{u_i u_j} = \nu_t S_{ij} \quad (II.21)$$

Cette hypothèse peut réécrit comme montrée par MENTER :

$$\overline{u_i u_j} = \sqrt{\frac{\text{Production } k}{\text{Dissipation } k}} a_1 k \quad (II.22)$$

En présence d'un gradient de pression adverse dans une couche limite, la production peut devenir bien supérieure à la dissipation comme montré par (Driver, [32]) et le tenseur de Reynolds est alors surestimé. Dans ce cas de figure, il conviendrait de redéfinir la viscosité de turbulence telle que :

$$\nu_t = \frac{a_1}{S_{ij}} \quad (II.23)$$

Bien entendu, cette formulation n'est pas désirable pour l'ensemble de l'écoulement modélisé et MENTER propose cette expression :

$$\nu_t = \frac{a_1}{\max(a_1 \omega, S_{ij})} \quad (II.24)$$

qui garantit la sélection de l'expression appropriée pour la viscosité de turbulence.

De manière à limiter les modifications SST aux écoulements proches paroi et garantir des résultats corrects sur une zone de mélange, une fonction de mélange  $F_2$  est introduite dans l'expression

(II.23) qui ainsi devient : (II.25) 
$$\nu_t = \frac{a_1}{\max(a_1 \omega, S_{ij} F_2)}$$

Où  $F_2$  est définie telle que :  $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$

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

Les constantes du modèles SST sont définies telles que :

✓ . Set de constantes 1 (SST -inner)

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_{11} = 0.075, \alpha_1 = 0.31, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41,$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

✓ Set de constantes 2 (k- classique) :

$$\sigma_{k2} = 0.1, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_{21} = 0.0828, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41,$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

On note enfin que par rapport à la version Baseline, le set de constants 2 restes inchangés, les modifications du SST ne s'effectuant qu'à la proche de la paroi.

## II.8. METHODE NUMERIQUE

### II.8.1. Introduction :

L'étude scientifique d'un phénomène physique passe par la formulation d'une ou plusieurs lois sous forme d'équations mathématiques reliant les différentes variables intervenant dans le déroulement du phénomène en question.

Une fois le problème bien formulé, il faut générer une grille de calcul enveloppant tout le domaine à étudier en espace et en temps. La nature de la grille de calcul dépend de la nature de la méthode numérique utilisée. Actuellement on a le choix entre trois méthodes numériques différentes: la méthode aux différences finies, la méthode aux éléments finis et la méthode aux volumes finis.

Dans ce mémoire on a opté pour la méthode aux volumes finis, cette dernière est utilisée depuis de nombreuses années (depuis 1960) par les ingénieurs pour résoudre numériquement sur des maillages structurés ou non structurés pour des problèmes de la mécanique des fluides formalisés par des équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

Un grand nombre de codes industriels dans le cadre de l'ingénierie assistée par ordinateur (IAO) utilisent actuellement la méthode des volumes finis : PHOENICS (Transofi International), PORFLOW, ANSWER (ACRI), FLUENT, CFX.

Dans notre cas on va utiliser le code FLUENT V 13.0.

### II.8.2. Définition de la méthode des volumes finis

Parmi les méthodes numériques qui existent, on se concentre dans notre étude à la méthode des volumes finis, qui est utilisée depuis environ cinq décennies (1960). Elle doit son nom à son principe même dont la première étape est d'intégrer les équations sur un volume élémentaire.

Le fondement de cette méthode repose sur les principes de l'analyse vectorielle, et à pour base l'intégration des équations de la mécanique des fluides pour un fluide donné. Il faut savoir que cette méthode est utilisée par un grand nombre de code industriel assisté par ordinateur

La méthode des volumes finis peut être trouvée dans la littérature sous différentes appellations tel que :

- Méthode de différences finies intègres.
- Nodal point integration (NPI).

C'est une méthode de formulation intégrale des équations au plan local sur chacun des volumes jointifs, appelés volumes de contrôle, entourant chaque nœud d'évaluation ; ces volumes de contrôle peuvent être construits de différentes manières.

### II.9. Génération du maillage

Le domaine de calcul de l'aile est subdivisée en un ensemble de volumes de contrôle en utilisant des formes de maillage (maillage structuré ou non structuré). Dans cette étude, le maillage utilisé est un maillage structuré).

### II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons eu l'occasion de comprendre la nécessité d'introduire la turbulence dans notre écoulement par le fait de son existence inévitable dans la nature et la modélisé par des équations mathématique qui son introduites avec les équations qui régisse notre mouvement.

De plus, on a fait un petit rappel sur la méthode des volumes finis qui est utilisé par notre code de calcul **FLUENT** pour résoudre les équations de mouvement.

La modélisation des écoulements turbulents est un art complexe. En effet, sur l'ensemble des méthodes abordées dans ce chapitre, aucune n'est réellement parfaite.

Les méthodes filtrées LES sont d'une précision remarquables mais restent cantonnées à des nombres de Reynolds plus faibles de un à deux ordres de grandeur par rapport à ceux pratiqués dans les études d'aérodynamique externe du fait du coût numérique prohibitif.

### III.1. INTRODUCTION

Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D; pré-processeur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers \*.msh pour Fluent.

Fluent est un logiciel qui résout par la méthode des volumes finis des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques.

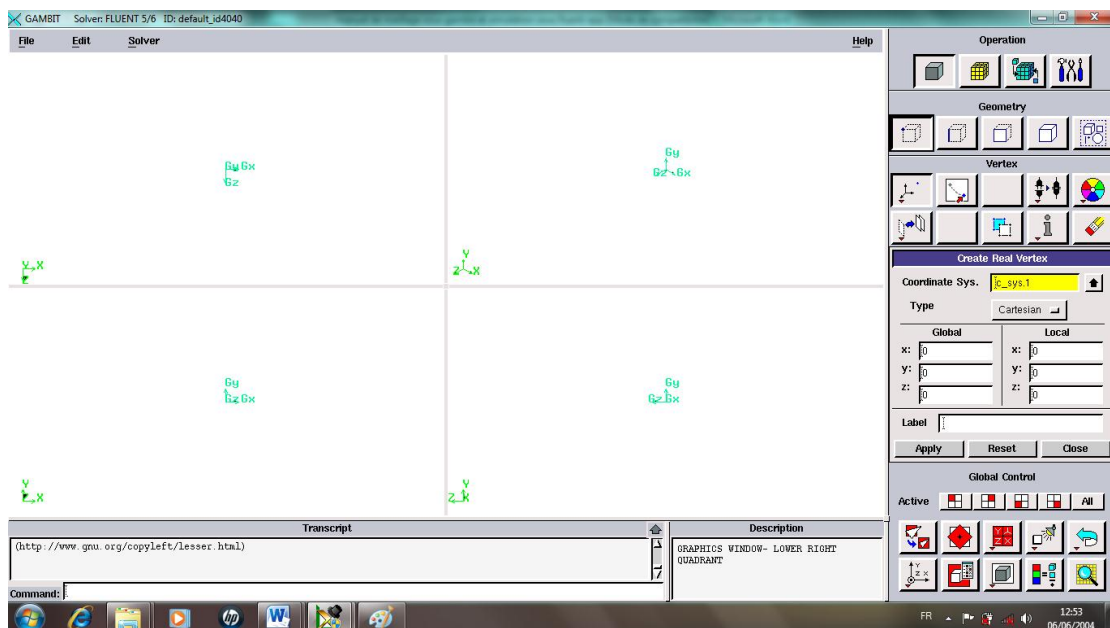
Gambit regroupe trois fonctions: définition de la géométrie du problème (constructions si la géométrie est simple ou bien import de la géométrie CAO), le maillage et sa vérification, la définition des frontières (Types de conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.

- **Démarrage de gambit**

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant:

**:/Fluent.Inc/ntbin/ntx86/Gambit.exe**

Vous pouvez créer un raccourci dans la barre des tâches. Si vous avez un problème d'exécution, supprimez tous les fichiers \*.lok dans le répertoire **:/Fluent.Inc/ntbin/ntx86** et relancez **Gambit.exe**.



**Figure (III.1) :Interface GABIT.**

### III.2.CONSTRUCTION DE LA GEOMETRIE

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

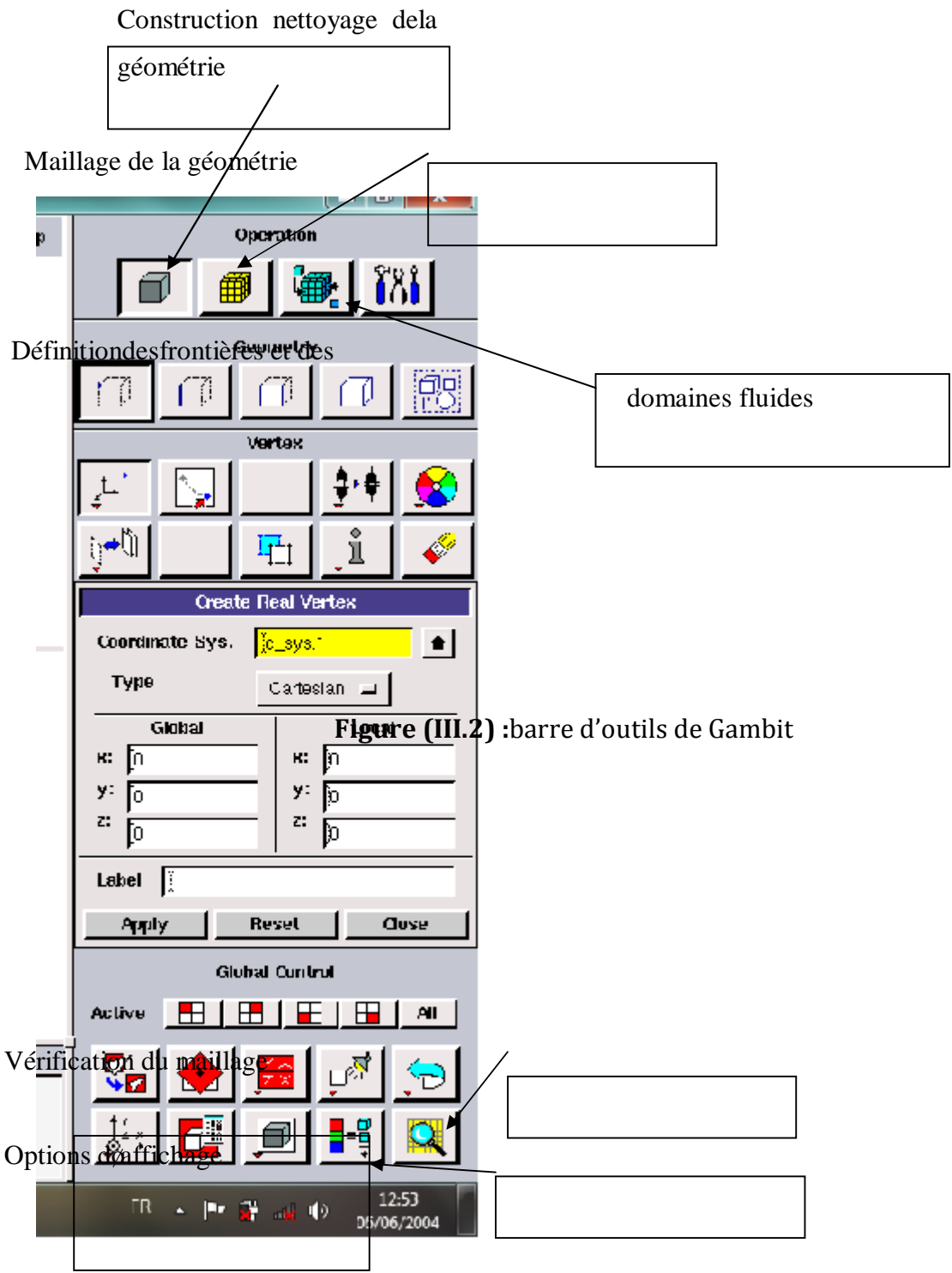
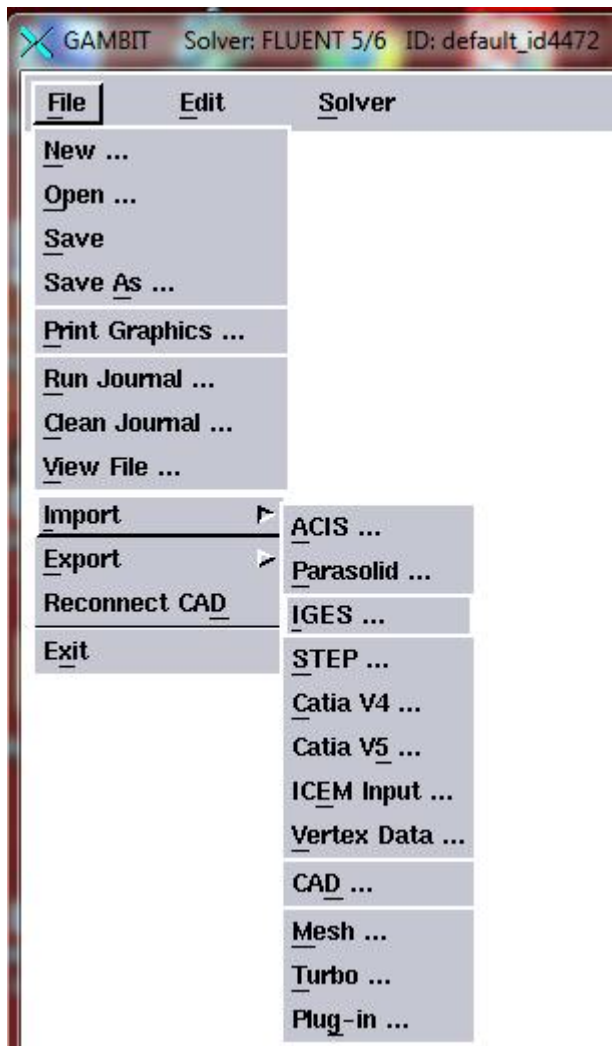


Figure (III.2) : barre d'outils de Gambit

- **Import de la géométrie et nettoyage de la CAO :**

Souvent la géométrie est conçue par des logiciels de CAO (SolidWorks, CATIA, etc.). Dans le cas des turbomachines, elle peut être aussi conçue par des logiciels de dimensionnement (Problème inverse) comme **BladeGen+** et **TurboGen**. Dans ce cas, on a recours à l'importation de la géométrie. Il est conseillé d'importer des fichiers sous format ACIS

(\*.**sat**).Souventilestindispensable de nettoyer la géométrie.



**Figure (III.3)** :Importation de la géométrie

### III.3.MAILLAGE

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée.

Pour les applications en turbomachines, la technique de génération de maillage peut être résumée sous la forme suivante:

- La géométrie doit être préparée à l'avance, avec la définition de tous les composants de la turbomachine, moyeu, volute, stator, rotor etc., sous forme de données numériques, fichier CAD ou plutôt sous forme de fichier maillage qu'on peut importer sous Gambit.
- La géométrie qui représente les différents domaines fluides est décomposée en sous domaines «maillables».
- Maillages des sous domaines fluides.

La réduction du temps nécessaire à la génération du maillage est un critère de bonne maîtrise de l'utilisation des outils CFD dans le design des turbomachines

### III .3.1. Choix du type de maillage

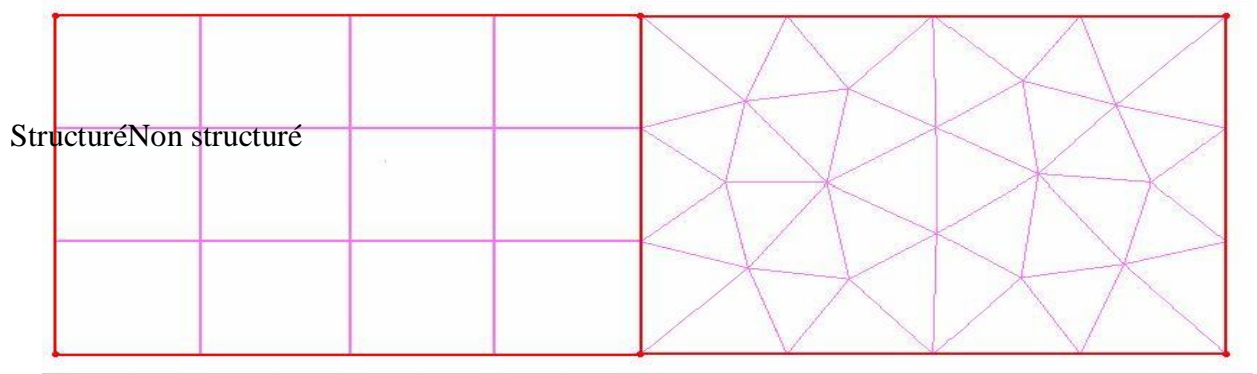
#### a) *Maillage structuré (quadra/hexa) :*

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multibloc, il présente les avantages suivants:

- É Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- É Réduit les risques d'erreurs numériques car le écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients:

- É Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe
- É Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes



**Figure (III.4) :** type de maillage.

#### b) *Maillage non structuré (tri/tétra.) :*

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

Ses avantages :

- É Peut être généré sur une géométrie complexe et tout en gardant une bonne qualité des éléments
- É Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés

Ses inconvénients:

- É Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré
- É Engendré des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importantes si l'on compare avec le maillage structuré

#### c) *Maillage hybride :*



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

Ses avantages :

É Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré!

### III.3.2 .Techniques générales de génération du maillage (QRLT)

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable.

Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne **Qualité** des éléments
- Assurer une bonne **Résolution** dans les régions à fort gradient
- Assurer un bon **Lissage** dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier
- Minimiser le nombre **Total** des éléments (temps de calcul raisonnable)

On peut se souvenir de ces règles en utilisant la formulation mnémotechnique **QRLT**.

#### a) *Qualité d'un maillage*

La génération d'un très bon qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et significatif.

Une bonne qualité de maillage repose sur les éléments suivants:

- Minimisation des éléments présentant des distorsions (skewness en anglais)
- Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc, etc.)

Enfin, la qualité de maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

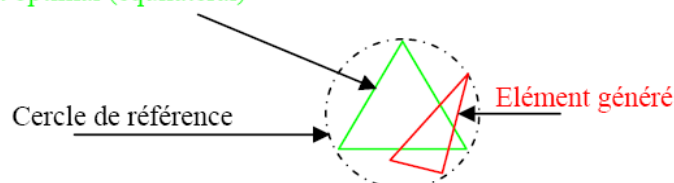
#### b) **Distorsion**

Une bonne qualité de maillage est synonyme d'absence de grandes distorsions d'éléments (bon skewness)

Le facteur de distorsion  $F_d$  (skewness) se calcule de deux façons différentes :

1°- Calcul basé sur le volume équilatéral:

Élément optimal (équilatéral)



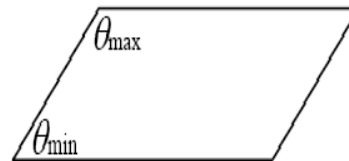
**Figure (III.5) : La distorsion.**

$$D_2 = \frac{|\cos(\theta_{max}) - \cos(\theta_{min})|}{\cos(\theta_{max}) + \cos(\theta_{min})} \quad (III. 1)$$

Applicable uniquement pour les éléments triangulaires ou tétraédriques

2° -Calcul basé sur la déviation angulaire

$$D_2 = \frac{|\theta_{max} - 90|}{90}, \frac{90 - \theta_{min}}{90} \quad (III. 2)$$



**Figure (III.6) : Déviation angulaire.**

Applicable pour tout type d'élément

É Notons que les grandes valeurs du facteur de distorsion induisent des erreurs de calcul et ralentissent considérablement le processus de convergence.

É Quelques distorsions peuvent être tolérées si elles sont situées dans des régions à faible gradient.

Ce tableau illustre la variation de la qualité des éléments de maillage en fonction de la valeur du coefficient de distorsion  $Fd$ :

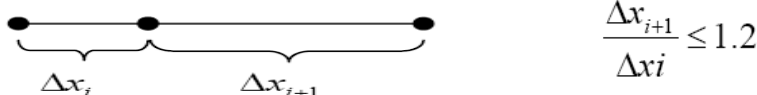
$Fd$	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.99	0.99-1.00
Qualité	excellent	Bon	Acceptable	Pauvre	Très pauvre	mauvais

É La valeur maximale de **skewness** tolérée pour un maillage volumique doit être inférieure à 0.90

É La valeur maximale de **skewness** tolérée pour un maillage surfacique structuré ou non, hexaédrique ou tétraédrique doit être inférieure à 0.75

**c) Lissage**

Le changement dans la taille des éléments de maillage d'une zone maillée à une autre doit être graduel, la variation de la taille des éléments de deux zones adjacentes ne doit pas dépasser 20%.



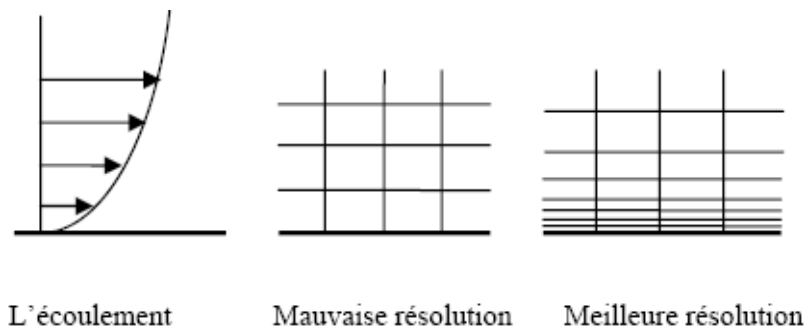
**d) Nombre total d'éléments**

Un nombre important d'éléments de maillage permet sans doute d'améliorer la précision des calculs, mais pénalise les ressources informatiques en terme de mémoire et alourdit le système. Par voie de conséquence, un compromis entre précision et temps de calculs s'impose. Des techniques existent pour économiser un certain nombre d'éléments :

- É Utilisation des maillages non uniformes, en concentrant la bonne qualité du maillage uniquement dans les zones où c'est nécessaire.
- É Utilisation de la fonction d'adaptation de maillage pour raffiner uniquement sur des zones bien précises
- É Utilisation des éléments de maillage hexaédriques dans les zones adéquates.

**e) Génération d'un maillage couche limite**

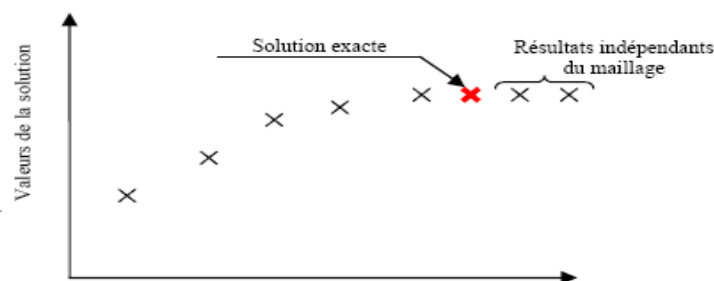
La notion de résolution concerne plus particulièrement les zones qui présentent un fort gradient, ainsi une bonne résolution permet de mieux décrire les phénomènes physiques qui existent dans ces zones telles que les ondes de choc, ou les phénomènes liés à la couche limite.



**Figure (III.7) : Maillage couche limite.**

**f) Indépendance de la solution du maillage**

Dans une modélisation CFD, la solution doit être indépendante de la densité du maillage pour être sûr du réalisme de la solution que donne le solveur après convergence.



### Figure (III.8) : Indépendance de la solution du maillage.

Le raffinement du maillage peut se faire aussi sous *Fluent* et ce en utilisant la fonction « *ADAPT* », cette fonction adapte la grille de maillage à l'écoulement en intervenant particulièrement sur :

- É Les zones à fort gradient
- É les zones définissant les frontières des volumes fluides
- É A l'intérieur de certaines zones

Le but du raffinement du maillage sous un codage mailleur (*Gambit*), et de l'adaptation de la grille à la solution sous le solveur (*Fluent*), est d'obtenir une solution indépendante de la résolution et de la qualité du maillage, ce qui revient à dire que les paramètres de la solution deviennent insensibles au bout d'un certain nombre d'éléments.

### III.4. CONDITIONS AUX LIMITES ET DEFINITION DE DOMAINES

Le mailleur *Gambit* peut générer des maillages que beaucoup de solveurs peuvent utiliser, ainsi nous devons spécifier le logiciel solveur avec lequel on veut traiter le fichier maillage. Comme conditions aux limites, on peut imposer un débit massique à l'entrée de la machine, en utilisant la condition *Mass flow Inlet* ou une *Velocity inlet*. La pression à la sortie en utilisant la condition *Pressure Outlet* ou *outflow*. La figure suivante résume les différentes conditions qu'on peut imposer pour un écoulement périodique. Ensuite, on procède à la définition des domaines de calcul.

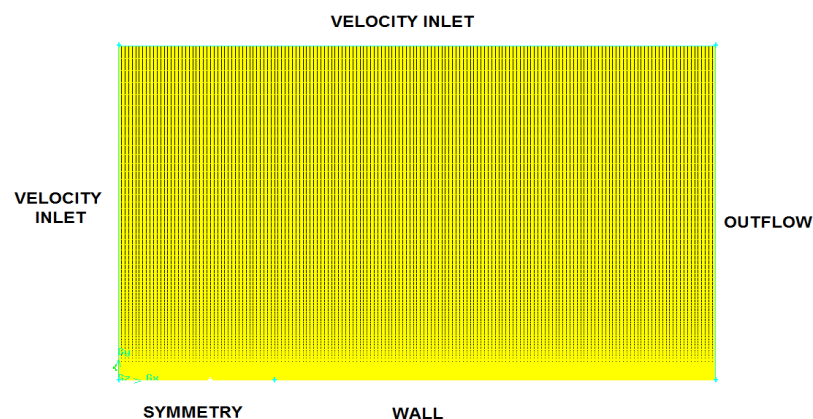























Figure (III.9) Définition des conditions aux limites.

symbole	Commande
	Point
	Segment
	Face
	Volume
	Group











**Tableau (III.1) COMMANDES POUR LA CONSTRUCTION DE LA GEOMETRIE**

symbole	Commande	description
	Créer point	Créer un point aux coordonnées spécifiées
	Glisser un point virtuel	Change la position d'un point virtuel au long d'un segment ou d'une face
	Connecter/séparer des points	Connecte des points réels ou virtuels/sépare des points qui sont communs à deux ou plus d'une entités
	Modifier la couleur d'un point	Changer la couleur d'un point
	Déplacer/copie un point	Déplacer et/ou copie des points
	Convertir des points	Convertir les points non réels en points réels
	Récapituler, contrôle des points, recherche de point	Affiche les informations d'un point
	Supprimer un point	Supprimer un point réel ou virtuel










**Tableau (III.2) COMMANDES D'UN POINT**

symbole	Commande	description
	Créer un segment	Créer un segment réel à partir de point existants
	Connecter/séparer des segments	Connecte des segments réels ou virtuels/sépare des segments qui sont communs à deux ou plus d'une entités
	Modifier la couleur d'un segment	Changer la couleur d'un segment
	Déplacer/copie un segment	Déplacer et/ou copie des segments
	Split edgesmergeEdges	Fractionner des segments ou merger des segments
	Convertir des segments	Convertir les segments non réels en segments réels
	Récapituler, contrôle des segments, recherche de segment	Affiche les informations d'un segment
	Supprimer un segment	Supprimer un segment réel ou virtuel






**Tableau (III.3)COMMANDES D'UN SEGMENT**

symbole	Commande	description
	Former une face	Crée une face à partir de segment existant
	créé une face	Crée une face à partir d'une forme primitive
	Opération booléennes	Union, soustraction et interaction de face
	Connecter/ séparer des faces	Connecte des faces réelles ou virtuelles/ sépare des faces qui sont communes à deux ou plus d'entités.
	Modifier la couleur d'une face	Changer la couleur d'une face
	Déplacer/ copier une face	Déplacer et/ou copier des faces
	Split faces merge faces	Fractionner ou merger des faces
	Convertir des faces	Convertir les faces non réelles en faces réelles
	Récapituler, contrôle des faces, recherche des faces	Affiche les informations d'une face
	Supprimer une face	Supprimer une face réelle ou virtuelle

**Tableau (III.4)COMMANDES RELATIVES A UNE FACE**

symbole	Commande	description
	Former un volume	Crée un volume à partir des faces existant
	crée un volume	Crée un volume à partir d'une forme primitive
	Opération booléennes	Union, soustraction et interaction de volume
	Modifier la couleur d'un volume	Changer la couleur d'un volume.
	Déplacer/ copier un volume	Déplacer et/ou copier des volumes
	Split volumes merge volumes	Fractionner ou merger des volumes
	Convertir des volumes	Convertir les volumes non réelles en volumes réelles
	Récapituler, contrôle des volumes, recherche des volumes	Affiche les informations d'un volume
	Supprimer un volume	Supprimer un volume réel ou virtuelle

**Tableau (III.5) COMMANDES RELATIVES A UN VOLUME**

symbole	Commande
	Couches limites
	Segment
	Faces
	Volume
	Groupe

**Tableau (III.6) COMMANDES DE MAILLAGE**

**SPECIFICATION DU SCHEMA DES ELEMENTS FACE**

GAMBIT vous de spécifier un type d'élément de maillage surfacique, Chaque élément est associé avec un type de maillage

<i>Option</i>	<i>Description</i>
Quad	Spécifie que le maillage contient seulement des éléments quadrilatéraux
Tri	Spécifie que le maillage contient seulement des éléments triangulaires
Quad/Tri	Spécifie que le maillage est composé d'éléments quadrilatéraux mais peut contenir des éléments triangulaires

**Tableau (III.7)**spécification du schéma des éléments face

SPECIFICATION DU TYPE DE MAILLAGE DES ELEMENTS FACE

GAMBIT vous donne les types de maillage suivant

<i>Option</i>	<i>Description</i>
Map	Crée un maillage régulier et structuré
Submap	Divise une face de géométrie complexe en régions plus régulières et crée un maillage structuré en chaque région
Pave	Crée un maillage non structuré
Tri Primitive	Divides a three-sided face into three quadrilateral regions and creates a mapped mesh in each region
Wedge Primitive	Creates triangular elements at the tip of a wedge-shaped face and creates a radial mesh outward from the tip

	Elements		
Type	Quad	Tri	Quad/Tri
Map	X		X
Submap	X		
Pave	X	X	X
Tri Primitive	X		
Wedge Primitive			X

**Tableau (III.8)**spécification du type de maillage des éléments face



### III.5. Introduction

Fluent est le plus grand fournisseur du monde de la dynamique numérique des fluides commerciale logiciel et services. Le logiciel d'usage universel de CFD d'offres fluides pour une large gamme d'applications industrielles, avec fortement automatisé, a particulièrement orienté des modules. Fluent offre également des services de consulting de CFD aux propriétaires dans le monde entier. Le personnel à fluent consiste la plupart du temps en personnes avec fortement - les formations techniques en tant qu'ingénieurs appliqués de CFD. En outre, fluent emploie des experts en matière de méthodes, de rétablissement de maille, et de développement de logiciel de calcul.

Les clients fluides sont les leaders de marché et les plus grandes compagnies dans les industries telles que le traitement automobile, aérospatial, de produit chimique et de matériaux, la production d'électricité, biomédical, la CAHT, et l'électronique.

Fluent est commis à promouvoir l'ensemble de connaissances sur le CFD, et à améliorer l'efficacité de l'ordinateur modelant comme outil de modèle et d'analyse en général. Nous investissons dans les deux la recherche et développement interne, et participons aux collaborations avec aboutir les établissements, les gouvernements, et les groupes industriels scolaires. Nous continuons à explorer et mettre en application des alliances stratégiques avec le matériel et les fournisseurs de logiciels pour réaliser une synergie et un rendement plus grands pour nos propriétaires.

La mission fluente a été claire du début : pour fonctionner attentivement avec des propriétaires pour comprendre le leur liquide-circulent les défis, pour fournir le logiciel et les services conçus en fonction leurs besoins, et pour mesurer soutenu notre réussite en fonction du leur. En raison de nos efforts de continuation d'accomplir notre mission, nous avons apprécié la fidélité exceptionnelle d'usager dans toute notre histoire.

FLUENT est un programme informatique de pointe pour modeler le flux de fluide et le transfert de chaleur dans les géométries complexes. FLUENT fournit la flexibilité complète de maille, y compris la capacité de résoudre vos problèmes de flux usine les mailles non structurées qui peuvent être produites au sujet des géométries complexes avec le confort relatif. Les types supportés de maille incluent 2D triangulaire/quadrilatère, 3D tétraédrique/hexaèdre/pyramide/clavette/mailles (hybrides) polyèdres et mélangées. FLUENT te permet également de raffiner votre grille basée sur la solution de flux.

FLUENT est sauvé dans le langage de programmation de C et utilise pleinement la flexibilité et le pouvoir offerts par le langage. En conséquence, l'allocation dynamique de la

mémoire vraie, les structures de caractéristiques efficaces, et le contrôle flexible sont tous de solutionneurs possibles. En outre, utilisations FLUENTES un client/architecture de serveur, qui lui permet de fonctionner en tant que procédés simultanés séparés sur les postes de travail de bureau de client et les serveurs puissants de calcul. Cette architecture tient compte de l'exécution efficace, du contrôle interactif, et de la flexibilité complète entre différents types de machines ou systèmes d'exploitation.

Toutes les fonctions exigées pour calculer une solution et pour manifester les résultats sont accessibles dans FLUENT par une surface adjacente interactive et pilotée par menu.

### III.6. Structure de programme

Votre module FLUENT inclut les produits suivants :

- “ FLUENT, le solutionneur.
- “ MANOEUVRE, le préprocesseur pour la modélisation de la géométrie et rétablissement de maille.
- “ Grid, un préprocesseur supplémentaire qui peut produire des mailles de volume de borne existante maille.
- “ Filtres (traducteurs) pour l'importation des mailles de surface et de volume des modules de CIAO tels qu'ANSYS, CGNS, idées, NASTRAN, PATRAN, et d'autres.

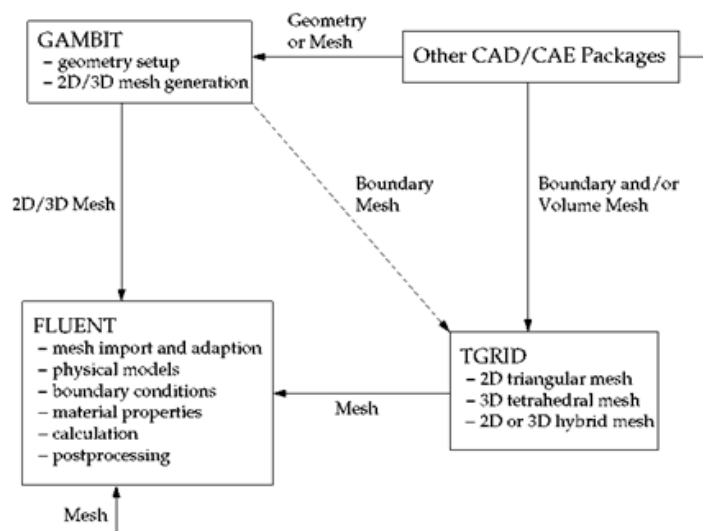


Figure (III.10) Structure de programme fondamental

### III.7. Capacités de programme

Le solveur FLUENT a les capacités de modélisation suivantes :

- ” le 2D axisymétrique avec le remous (de rotation symétrique), et le 3D axisymétriques et 2D planaires et 2D circule.
- ” Quadrilatère, triangulaire, hexaèdre (brique), tétraédrique, prisme (clavette), pyramide, polyèdres, et mailles mélangées d'élément.
- ” Écoulements équilibrés ou transitoires
- ” Flux incompressibles ou compressibles, y compris tous les flux de régimes de vitesse (subsonique inférieur, transsonique, supersonique, et hypersonique).
- ” Flux non visqueux, laminaires, et turbulents.
- ” Flux newtoniens ou non newtoniens.
- ” Transfert de chaleur, y compris la convection obligatoire, normale, et mélangée, (solide/liquide) transfert de chaleur conjugué, et rayonnement.
- ” Mélange et réaction chimiques d'espèce, y compris les modèles homogènes et hétérogènes de combustion et les modèles extérieurs de dépôt/réaction.
- ” Surface libre et modèles multi phases pour les flux gazeux liquides, gaz-solide, et liquide-solides.
- ” Calcul lagrangien de trajectoire pour la phase dispersée (particules/gouttelettes/bulles), y compris ajouter à la modélisation continue de phase et de jet.
- ” Modèle de cavitations.
- ” Modèle de modification de phase pour des applications de fusion/solidification.
  - ” Médias poreux avec la perméabilité non-isotrope, la résistance à inertie, la conduction de chaleur solide, et les états de saut de pression de poreux-face.
  - ” Le paramètre mis en bloc modèle pour des ventilateurs, des pompes, des radiateurs, et des échangeurs de chaleur.
  - ” Modèles acoustiques pour prévoir le bruit circuler-induit.
  - ” (Tournant ou accélérant) bâtis de référence à inertie (stationnaire) ou non-à inertie.
  - ” Bâti de référence multiple et glissement des options de maille pour modéliser les bâtis mobiles multiples.
  - ” modèle de Mélanger-avion pour modéliser des interactions de rotor-stator, des

convertisseurs de couple, et des applications assimilées de turbomachines avec des options pour l'économie de masse et l'économie de remous.

- ” Modèle dynamique de maille pour modéliser des domaines avec déformations et déformer la maille.
- ” Sources volumétriques de masse, élan, chaleur, et espèces chimiques.
- ” Base de données de propriétés matérielles.
- ” Capacité considérable de personnalisation par l'intermédiaire des fonctions définies pour l'utilisateur.
- ” Couplage (bi-directionnel) dynamique avec le GT-Pouvoir et IONDE.
- ” Module de magnétohydrodynamique (documenté séparément).
- ” Module continu de fibre (documenté séparément).
- ” Modules de pile à combustible (documentés séparément).
- ” Module d'équilibre de population (documenté séparément).

FLUENT est approprié idéalement à incompressible et compressible liquide-circulant les simulations dans les géométries complexes. Le solveur parallèle FLUENT vous permet de calculer des solutions pour des cas avec des mailles très grandes sur des processeurs multiples, sur le même ordinateur ou sur différents ordinateurs dans un réseau. Fluent Inc. offre également d'autres solveurs qui adressent différents régimes de flux et comportent les modèles physiques alternatifs. Les programmes supplémentaires de CFD de Fluent Inc. incluent **Airpak**, **FIDAP**, **FloWizard**, **Icepak**, **MixSim**, et **POLYFLOW**.

### III.8. Opérations pour l'analyse de CFD/FLUENT

Avant que vous commenciez votre analyse de CFD avec FLUENT, l'examen consciencieux des livrables suivants contribuera de manière significative à la réussite de votre effort de modélisation. Également, quand vous prévoyez un projet de CFD, être sûr de tirer profit du support technique fourni à tous les utilisateurs FLUENTS.

### III.9. Opérations en résolvant votre problème de CFD

Une fois que vous avez déterminé les caractéristiques importantes du problème que vous voulez résoudre, suivre les opérations procédurales fondamentales montrées ci-après.

1. Définir les buts de modélisation.
2. Produire la géométrie et la grille de modèles.
3. Installer le solveur et les modèles physiques.

4. Calculer et surveiller la solution.
5. Examiner et sauvegarder les résultats.
6. Considérer les révisions aux paramètres de modèle numérique ou physique, au besoin.

### III.10. Planification de votre analyse de CFD

Pour chacune des opérations de résolution des problèmes, il y a quelques questions que vous devez considérer :

#### III.10.1. Définition des buts de modélisation

- \* Est-ce que - quels résultats vous recherchez-vous, et comment ils seront utilisés ?
- \* Quelles sont vos options de modélisation ?
- \* Quels modèles physiques devront être inclus dans votre analyse ?
- \* Quelles suppositions de simplification devez-vous effectuer ?
- \* Quelles suppositions de simplification pouvez-vous effectuer ?
- \* Avez-vous besoin d'une seule capacité de modélisation ?
- \* Pourriez-vous utiliser des fonctions définies pour l'utilisateur (sauvées en C) ?
- \* Quel degré d'exactitude est exigé ?
- \* À quelle rapidité avez-vous besoin des résultats ?
- \* Comment isolerez-vous une partie du système physique complet ?
- \* Est-ce que - où le domaine de calcul commencera et terminera ?
- \* Avez-vous l'information d'état de borne à ces bornes ?
- \* Les types d'état de borne peuvent-ils faciliter cette information ?
- \* Pouvez-vous déployer le domaine à un point où la caractéristique raisonnable existe ?
- \* Peut-elle être simplifiée ou rapprochée comme 2D ou axisymétrique problème ?

#### III.10.2. Produire la votre géométrie et grille modèles

Les mailles non structurées d'utilisations FLUENTES afin de réduire le nombre de heures vous dépensez produire des mailles, pour simplifier le procédé de rétablissement de modélisation et de maille de la géométrie, pour permettre la modélisation des géométries plus complexes que vous pouvez traiter avec les mailles structurées conventionnelles et multi bloc, et vous laisser adapter la maille pour résoudre les caractéristiques de circuler-inducteur.

FLUENT peut également utiliser les mailles fuselage-ajustées et à structure en blocs (par exemple, ceux employés par 4 FLUENTS et beaucoup d'autres solutionneurs de CFD).

FLUENT est capable de traiter des éléments triangulaires et quadrilatéraux (ou une combinaison des deux) dans la 2D, et tétraédrique, hexaèdre, la pyramide, la clavette, et les éléments polyèdres (ou une combinaison de ces derniers) dans 3D.

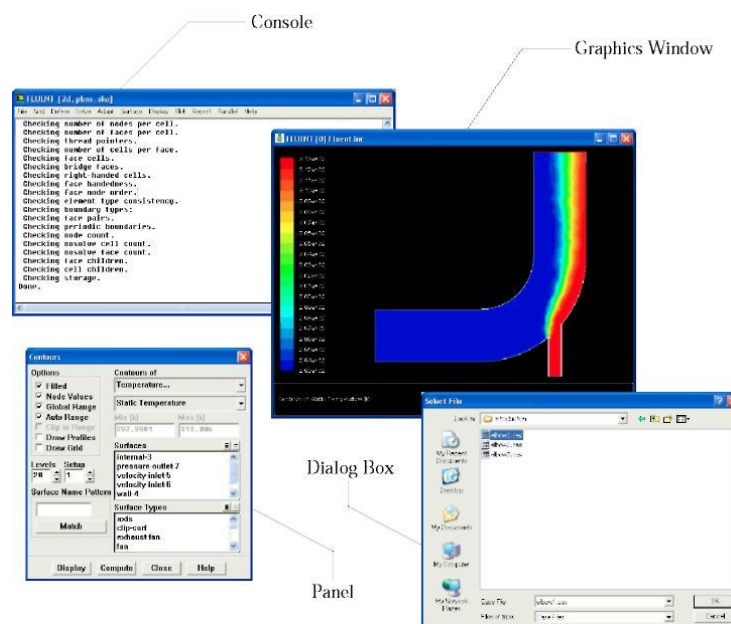
Cette flexibilité te permet de sélectionner les topologies de maille qui sont plus adaptées pour votre application particulière, comme décrit dans le guide de l'utilisateur.

### III.11. L'INTERFACE UTILISATEUR

L'interface utilisateur à FLUENT se compose d'une surface adjacente graphique avec les menus déroulants, les panneaux, et les boîtes de dialogue, ainsi qu'une ligne de commande textuelle surface adjacente (décrite dans le guide de l'utilisateur).

#### III.11.1. Composants de GUI

L'interface graphique utilisateur FLUENTE se compose de quatre composantes principales : un hublot de console, panneaux de contrôle, boîtes de dialogue, et hublots de dessins. Quand vous utilisez le GUI, vous agirez l'un sur l'autre avec un de ces composants à tout moment. **Figure (III.11)** est une copie d'écran témoin montrant tous les composants de GUI. Les quatre composants de GUI sont décrits ci-dessous.



**Figure (III.11)** Composants de GUI

### III.11.2 Boîtes de dialogue

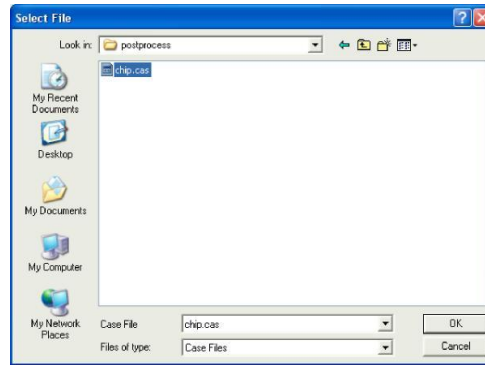
Des boîtes de dialogue sont utilisées pour effectuer des tâches simples d'entrée-sortie, telles qu'émettre l'avertissement et les messages d'erreur, ou poser une question exigeant oui ou non une réponse.

Ce qui suit décrit chaque type de boîte de dialogue :

- “ La boîte de dialogue de l'information est utilisée pour enregistrer que de l'information que FLUENT pense vous devriez savoir. Une fois que vous avez affiché l'information, vous pouvez cliquer le bouton EN BON ÉTAT pour fermer la boîte de dialogue.
- “ La boîte de dialogue d'avertissement est utilisée pour vous avertir d'un problème potentiel et pour te demander si vous voulez poursuivre l'opération en cours. Si vous cliquez le bouton EN BON ÉTAT, l'exécution effectuera. Si vous cliquez le bouton d'annulation, l'exécution sera annulée.
- “ La boîte de dialogue d'erreurs est utilisée pour vous alerter d'une erreur qui s'est produite. Une fois que vous avez affiché l'information d'erreur, vous pouvez cliquer le bouton EN BON ÉTAT pour fermer la boîte de dialogue.
- “ La boîte de dialogue fonctionnant est manifestée si FLUENTE est occupée à effectuer une tâche. C'est une boîte de dialogue spéciale, parce qu'il n'exige aucune action par vous. Elle est là pour vous faire savoir que vous devez attendre. Quand le programme est de finition, il fermera la boîte de dialogue automatiquement. Vous pouvez, cependant, interrompre la tâche qui est effectuée en cliquant le bouton d'annulation.
- “ La boîte de dialogue de question est utilisée pour te poser une question qui exige oui ou non une réponse. Vous pouvez cliquer le bouton approprié pour répondre à la question.
- “ La boîte de dialogue choisie de fichier te permet de choisir un fichier pour le relevé ou l'écriture. Vous pouvez l'employer pour regarder vos répertoires système et pour choisir un fichier. C'est un type particulier de boîte de dialogue qui est décrite en plus détail dans la section suivante.

Choisir la boîte de dialogue de fichier choisissant des fichiers dans Windows

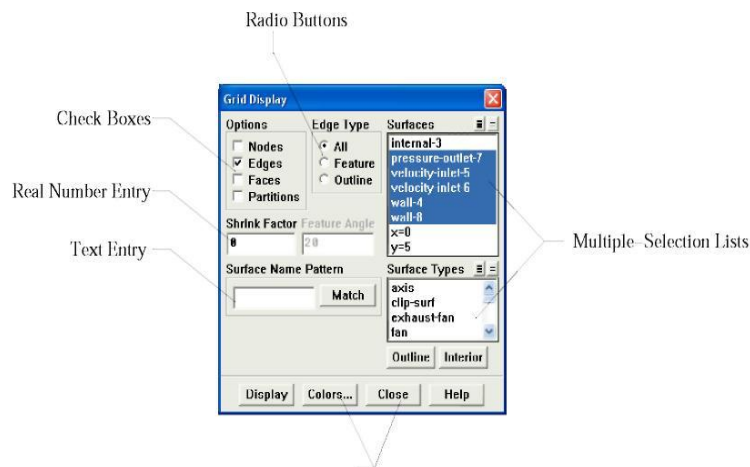
La sélection de fichier dans des systèmes Windows fait usine la boîte de dialogue choisie normale de fichier de Windows (voir la **Figure (III.12)**)



**Figure (III.12)** La boîte de dialogue choisie de fichier pour Windows

### III.11.3 Panneaux

Des panneaux sont employés pour effectuer des tâches plus compliquées d'entrée. Assimilé dans une boîte de dialogue, un panneau est manifesté dans une fenêtre indépendante, mais fonctionner avec un panneau est plus apparenté à compléter une forme. Chaque panneau est seul et utilise de divers types de contrôles d'entrée qui composent la forme (voir la **Figure (III.13)**).



**Figure (III.13)** Les composants d'un panneau FLUENT typique



### III.12 IMPORTATION DE LA GEOMETRIE (\*.MSH)

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (\*.msh) généré sous Gambit.

**File → Read → Case...**

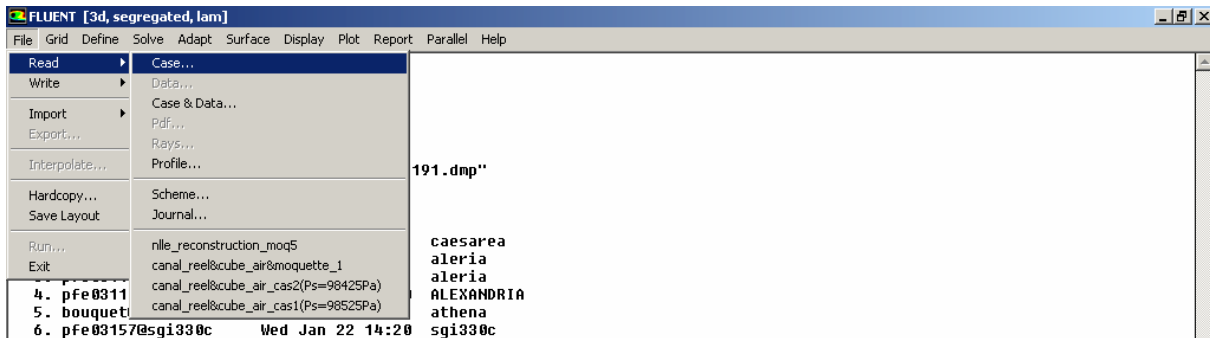


Figure (III.14): Importation de la géométrie

### III.13 VERIFICATION DU MAILLAGE

#### Grid Check

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.



Figure (III.15) : Vérification du maillage sous Fluent

### III.14 LISSAGE DU MAILLAGE (SMOOTH AND SWAP THE GRID)

**Grid → Smooth/Swap...**

Pour assurer la qualité du maillage, il est pratiqué de lisser le maillage, cliquez sur le bouton Smooth puis sur le bouton Swap. Répétez jusqu'à ce que FLUENT affiche que zéro faces sont swapped.

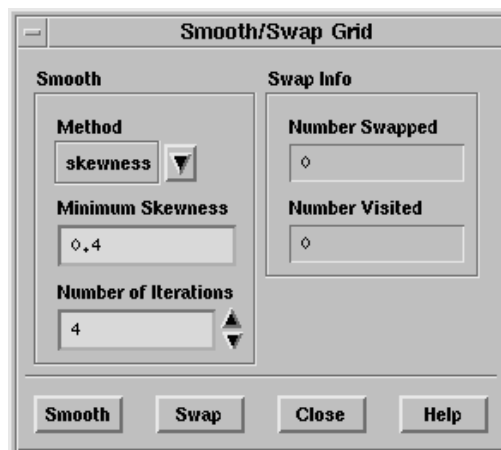


Figure (III.16): Lissage du maillage

### III.15 VERIFICATION DE L'ECHELLE

#### GridScale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

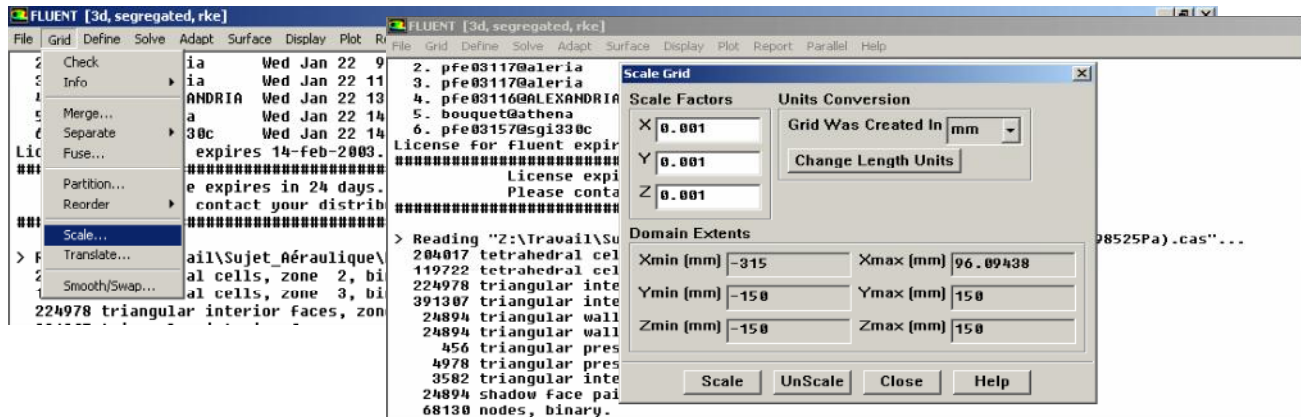


Figure (III.17): Vérification des unités

### III.16 CHOIX DU SOLVEUR

#### Define Models Solver. →

**Segregated Solver**: est le plus approprié pour les écoulements incompressibles (ventilateurs, pompes...)

**Coupled Solvers**, les solveurs «coupled implicit» et «coupled explicit», sont plutôt réservés aux écoulements compressibles à grande vitesse.

C'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire.

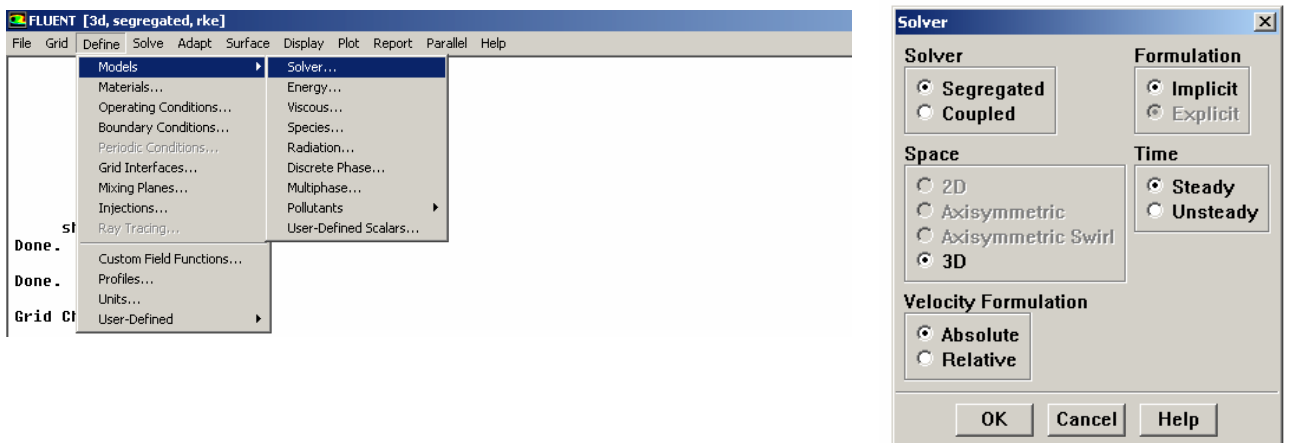


Figure (III.18) choix du solveur

### III.17 AFFICHAGE DE LA GRILLE : Display Grid →

Vous pouvez afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans Gambit.

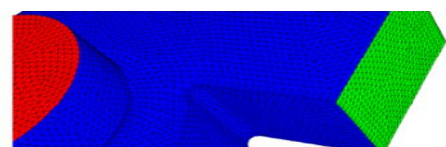
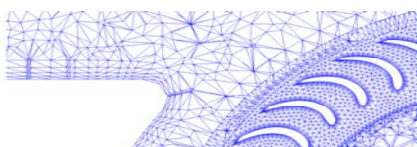


Figure (III.19): Affichage de la grille et vérification des conditions

### III.18 CHOIX DUMODELE DE TURBULENCE

#### Define Models Viscous →

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement turbulent. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents etc.

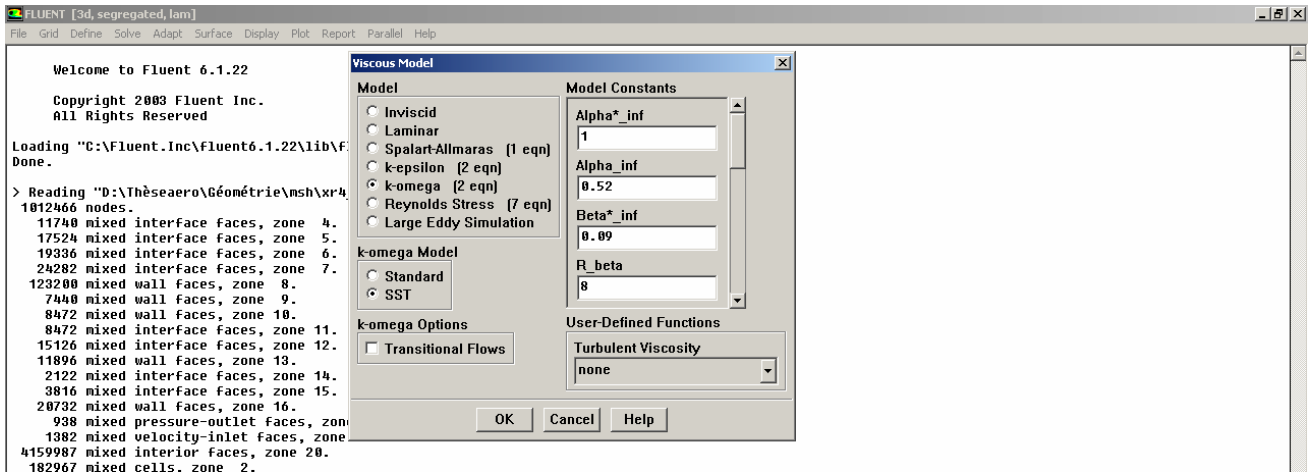


Figure (III.20): Choix du modèle de turbulence

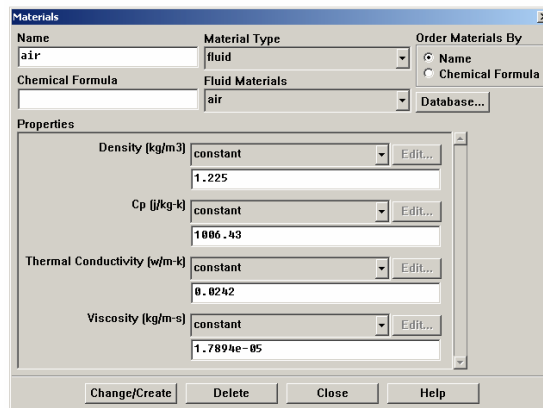
• **LES AVANTAGE ET LES INCONVENIENT DE CHAQUE METHODE tableau (III.9):**

Modèles	Avantages	Inconvénients
<b>Spalart-Allmaras</b>	Economique (1 equ). Bon pour les écoulements moyennement complexes.	Nøstpaslargementtesté.
<b>STD <math>k</math>-</b>	Robuste, économique et relativement précis.	Résultats médiocre pour des écoulements complexes (fort gradientdepression,rotationet swirl ).
<b>RNG <math>k</math>-</b>	Bon pour des écoulements moyennement complexes (impact de jet, séparation d'écoulements, écoulements secondairesí )	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulenteisotrope.
<b>Realizable <math>k</math>-</b>	Offre les mêmes avantages que le RNG. Recommandédanslecasdesturbomachines	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulenteisotrope.
<b>Reynolds Stress Model (RSM)</b>	Le modèle le plus complet Physiquement (transportetl'anisotropie de la turbulence sont tenu en compte)	Requiert plus de temps CPU. Les équationsdequantitédemouvement etturbulencesontétroitementliées.
<b>SSTet Standard <math>k</math>-</b>	Modèleleplusrecommandépourles problèmes liés aux turbomachines, meilleur que le Realizable $k$ - .	Nécessite une plus grande résolution du_ maillage aux frontières (pas de lois aux murs).

**III.19 DEFINITIONDESCARACTERISTIQUESDUFLUIDE**

**DefineMaterials**

Les caractéristiquesdufluidesontchargéesà partirdelabibliothèquedonnéesde Fluent.



**Figure (III.21):** Définition des caractéristiques du fluide

### III.20 OPERATING CONDITIONS

#### Define Operating Conditions

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence «operating conditions».

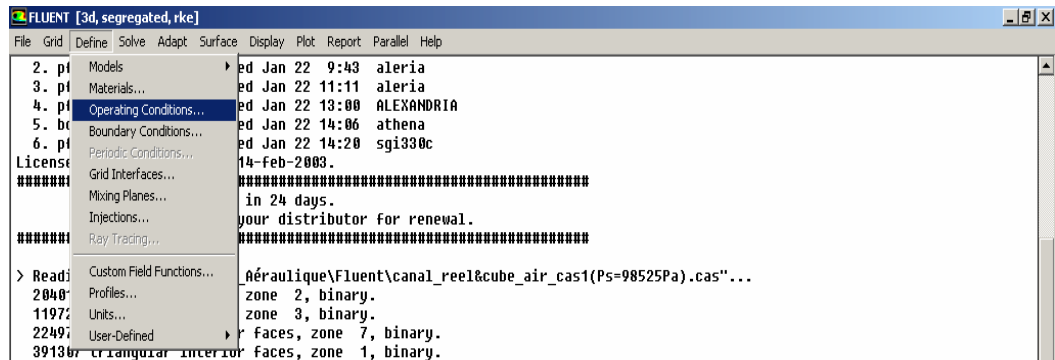


Figure (III.22): Choix de la pression de référence

En effet, Fluent effectue tous les calculs, avec une pression appelée «gauge pressure» et ce afin d'éviter les erreurs d'ordre numérique lors du calcul pour des écoulements à faible nombre de Mach. La relation liant la pression absolue à la «gauge pressure» est donnée par :  $P_{abs} = P_{op} + P_{gauge}$

Fluent prend par défaut la valeur de la pression atmosphérique comme operating pressure. Ensuite, il faut choisir les conditions aux limites.

### III.21. CONDITIONS AUX LIMITES USUELLES

**Define Boundary Conditions :** Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites :

#### III.21.1. Velocity Inlet

Utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la vitesse d'entrée est connue.

#### III.21.2. Pressure Inlet

Utilisée pour les écoulements compressibles et incompressibles.

#### III.21.3. Mass Flow Inlet

On impose un débit massique connu à l'entrée, il n'est pas nécessaire d'utiliser Mass Flow Inlet en écoulement incompressible.

#### III.21.4. Pressure Outlet

Spécifie la pression statique de sortie.

L'utilisation de Pressure Outlet sert à définir la pression statique à la sortie. L'utilisation de la condition Pressure Outlet au lieu de Outflow a souvent comme conséquence une meilleure convergence.

#### III.21.5. Outflow

L'Outflow est utilisé pour modéliser les sorties de fluide dont on ne connaît à priori les détails de la vitesse et de la pression à la sortie. Il n'est pas approprié pour les calculs suivants :

- Si le problème possède une condition de *pressure inlet*
- Si vous modélisez un écoulement compressible
- Si vous modélisez un écoulement instationnaire avec variation de la densité

### III.22. SIMULATION

#### III.22.1. CHOIX DES CRITÈRES DE CONVERGENCE

##### Solve Monitors Residuals

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.

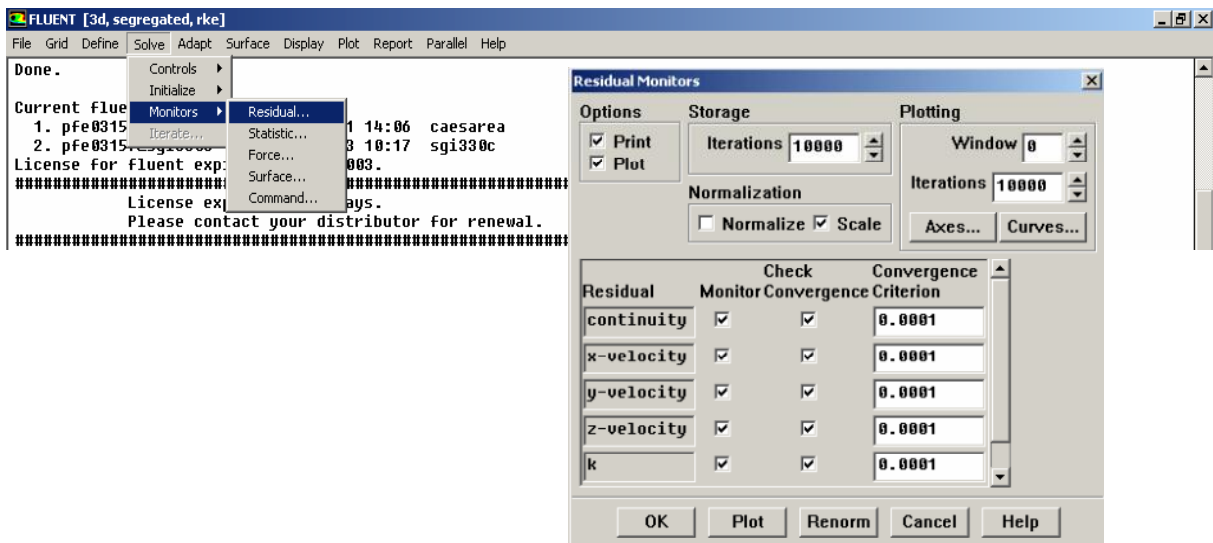


Figure (III.23): Choix et affichage pendant les calculs des critères de convergence

• **Remarque importante :**

Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables; pression, vitesse, température et du problème en relation avec l'itération et l'itération précédente.

Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans FLUENT (résiduel) est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent  $10^{-3}$ . Toutefois, dans certains cas il faut pousser les calculs à  $10^{-4}$  voir  $10^{-6}$ . Il n'y a pas de règle universelle!

**Dans les cas des écoulements diphasiques, il faut impérativement pousser la convergence à  $10^{-4}$ .**

#### III.22.2. INITIALISATION DES CALCULS

Il est conseillé dans nombreux cas d'initialiser les calculs aux conditions de l'entrée. Toutefois, s'il y a un calcul qui a déjà convergé et que vous désirez changer juste un paramètre (exp. Vitesse d'entrée), il est préférable d'initialiser au calcul précédent déjà convergé.

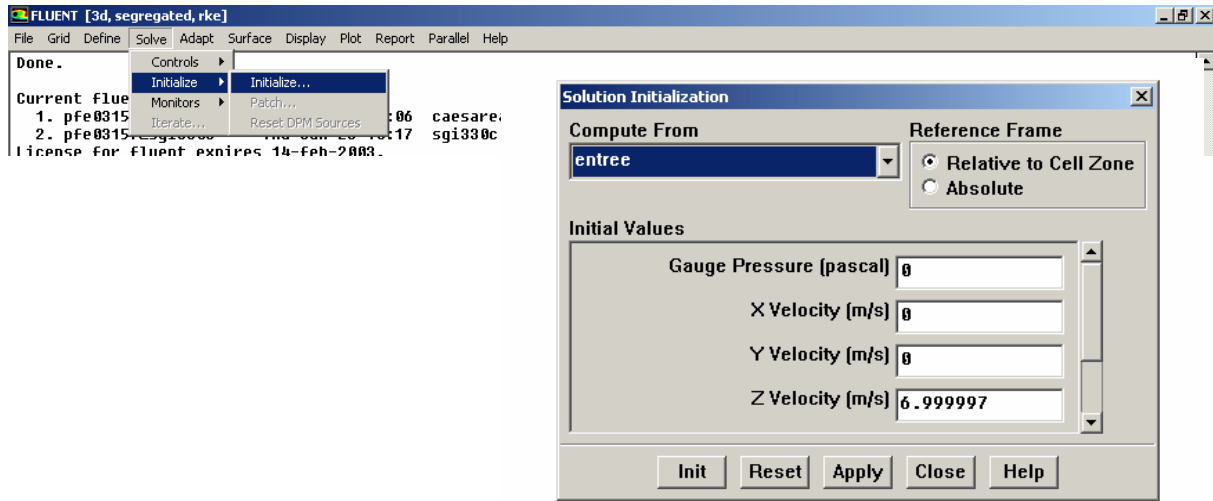


Figure (III.24): Initialisation des calculs

### III.22.3. SAUVEGARDEDUFICHIER\*.CAS

#### File → Write Case

Il est conseillé qu'une fois le paramétrage est effectué, de sauvegarder le fichier en format \*.cas. Si à un moment durant les calculs, il suffit de charger le fichier \*.msh, on n'a pas à refaire le paramétrage.

### III.22.4. LANCEMENT DE LA SIMULATION

#### Solve Iterate

Le paramétrage étant effectué, il ne reste plus qu'à choisir le nombre d'itérations que Fluent devra réaliser.

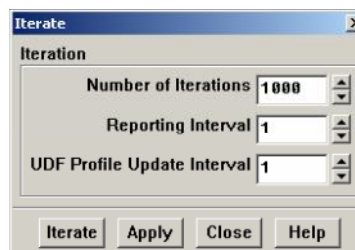


Figure (III.25): lancement de la simulation

### III.22.5. POST-TRAITEMENT NUMÉRIQUE DE LA SOLUTION

#### Report → ...

FLUENT fournit des outils pour calculer et rapporter des quantités intégrales sur des surfaces et des frontières. Ces outils vous permettent de trouver le débit massique, les forces et les moments sur des frontières, l'intégrale, le débit, la moyenne, et la moyenne de masse (entre autres des quantités) sur une surface ou un volume. En outre, vous pouvez imprimer des histogrammes des données géométriques et de la solution, pouvez placer des valeurs de référence pour le calcul des coefficients additionnels. Vous pouvez également imprimer ou sauvegarder un compte rendu succinct des modèles, des conditions aux limites.

## IV.1.INITIALISATION

L'initialisation d'une méthode itérative, nécessite une initialisation du champ de l'écoulement. Le principe de base pour la procédure est d'imposer un champ aérodynamique initial décrivant un écoulement simplifié et aussi physique.

Les données initiales imposées à l'infini amont, sont le nombre de Mach, la pression totale, la température totale et l'angle d'incidence

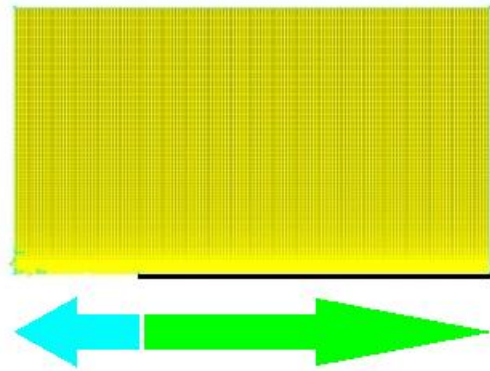
### Pour plaque :

Les données expérimentales sont :

Turbulent flat plate

(Plate from j=17-65, prior to 17 is symmetry)

- Mach= 0.2000E+00
- Alpha= 0.0000E+00
- Re= 0.6000E+07



Le nombre de mach  $M=0.2$ , le nombre de Reynolds  $R_e=0.6000E+07$

Pour qu'on puisse compare les résultats obtenus par FLUENT avec ceux de l'expérimentale, il faut que l'égalité de REYNOLDS ( $R_e$ ) soit réalisée.

Pour cela, il faut calculer la viscosité  $\mu$  qui donne le même nombre de Reynolds.  $R_e = \frac{\rho V L}{\mu}$

Avec :

$\rho$  : c'est la masse volumique

$V$  : la vitesse de l'écoulement

$L$  : la longueur caractéristique (m)

$\mu$  : la viscosité dynamique

### A)- calcul de la masse volumique( $\rho$ )

Pour un écoulement compressible la masse volumique n'est pas constante elle est donnée par la loi

suivante  $\rho = \frac{p}{R T} \rightarrow \rho = \frac{p}{R T}$

Où  $p$  : c'est la pression statique

$T$  : c'est la température statique

$R$  : c'est la constante des gaz vaut 287

Pour calculer la masse volumique, il faut calculer la pression et température statique :  $\rho = \frac{p}{R T}$



Pour cela il faut d'abord calculer la pression et la température statique :

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot \frac{v^2}{c_p T} \rightarrow T = \frac{T_0}{1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} \cdot \frac{v^2}{c_p T}} = \frac{300.24}{1 + \frac{(1.4 - 1)}{2} \cdot 0.04} = 300 \text{ K}$$

$$\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot \frac{v^2}{c_p T}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \rightarrow p = \frac{p_0}{\left(1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} \cdot \frac{v^2}{c_p T}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}}$$

$$p = \frac{114676.85}{\left(1 + \frac{0.2 \cdot 69.43^2}{2 \cdot 287 \cdot 300}\right)^{1.4}} = 101325 \text{ Pa}$$

$$\rho = \frac{p}{R T} = \frac{101325}{287 \times 300} = 1.176 \text{ kg/m}^3$$

**B)-calcul de la vitesse (v)**

$$v = 0.2 \sqrt{1.4 \times 287 \times 300} = 69.43 \text{ m/s}$$

**C)-calcul de la viscosité dynamique**

$$\mu = \frac{\rho v l}{R} = \frac{1.176 \times 69.43 \times 1}{6 \cdot 10^8} = 1.36 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m.s}$$

**IV.2. les Résultats obtenus par FLUENT**

Dans cette partie on va voir la variation de pression statique, pression dynamique et les vecteurs de vitesse à la plaque plane sous l'effet d'un écoulement laminaire et turbulent.

FLUENT

Version: 2d, (2d, pressure-based)  
Release: 6.3.26

- Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4

- Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.176
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05

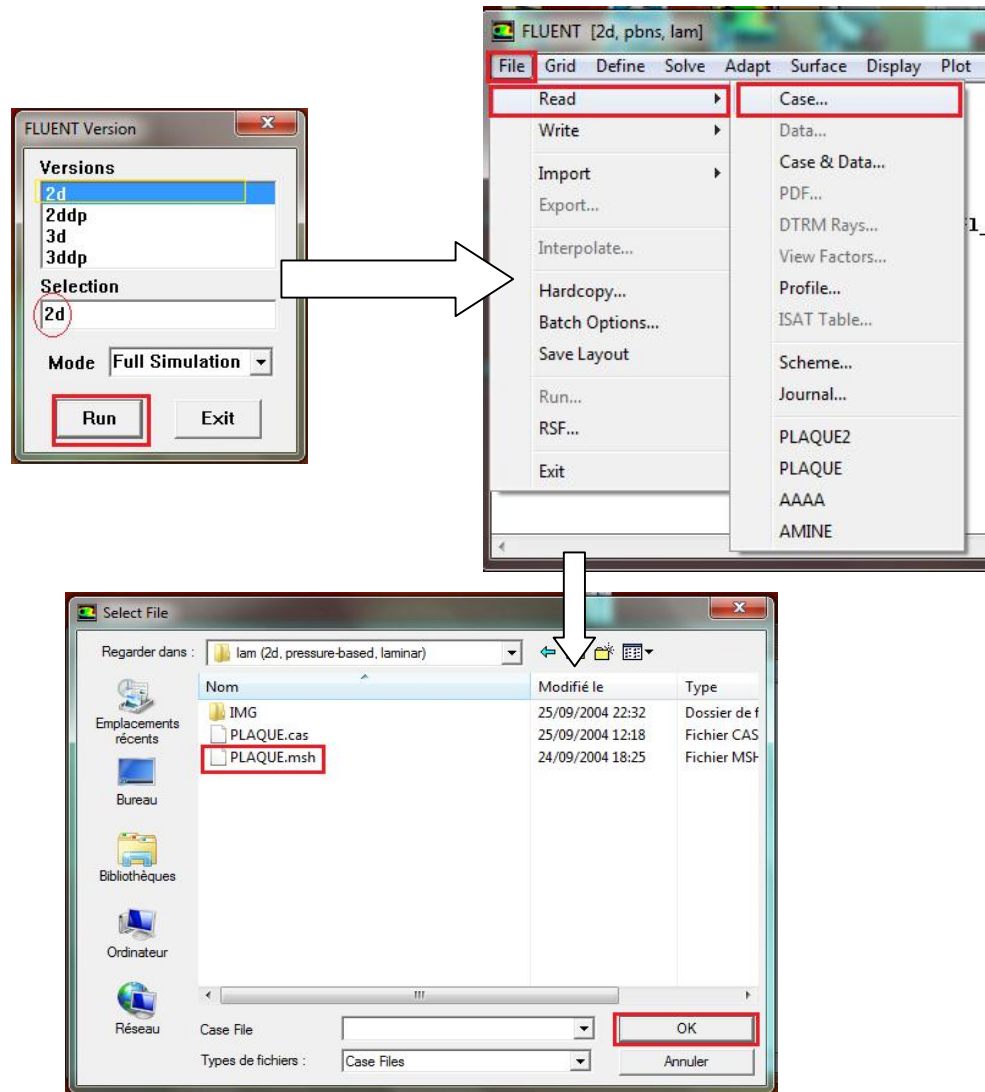
### IV.3. LES ETAPES DES SIMULATIONS

#### IV.3.1. IMPORTATION ET VERIFICATION DE MAILLAGE

On commence notre travail par la préparation de fichier de maillage de plaque plane d'extension (\*.msh) et ce dernier réalisée par GAMPIT.

Ensuite lancé fluent et choisir full simulation d'une version 2d et clique **Run**.

Pour importer le fichier on clique sur **FILE >READ>CAS**.



**Figure (IV.1)** – Choisir le mode de simulation et l'importation de fichier de maillage.

Pour vérifier le état du maillage en fait une vérification rapide sur fluent et pour sa clique sur **gride>chek>**

Aussi pour lisser le maillage on clique sur **gride>smooth swap >swap>smooth**  
Regarde la Figure (IV.2)

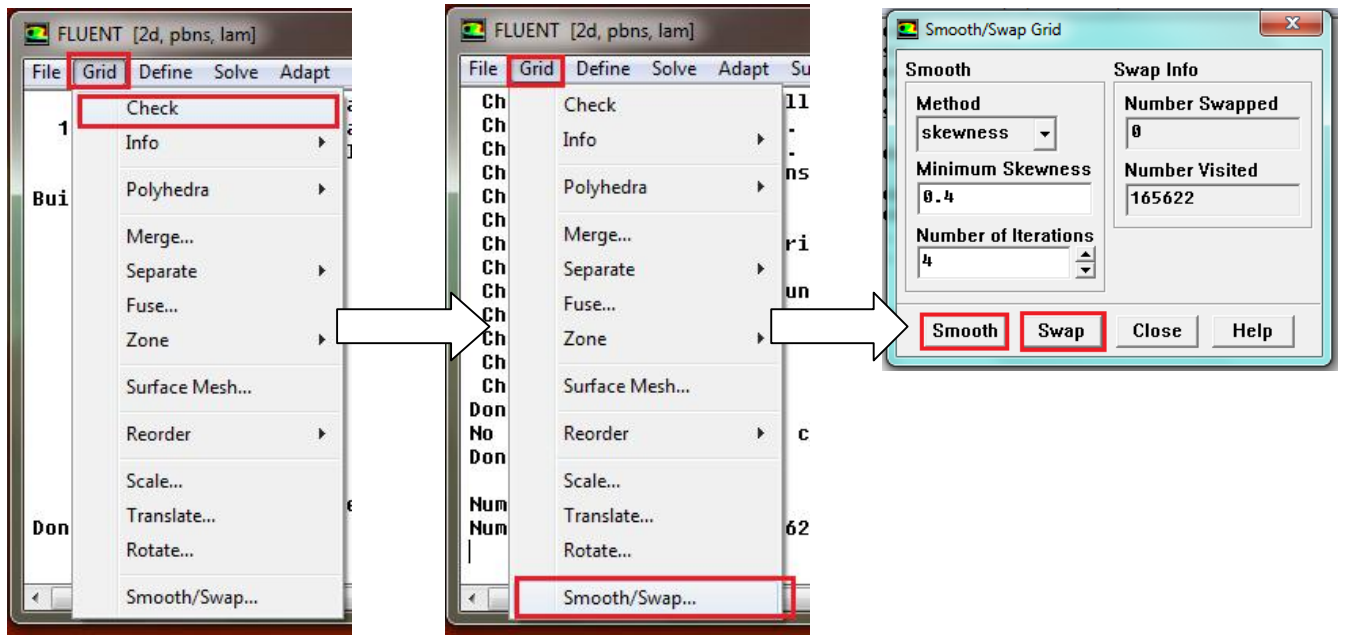


Figure (IV.2) vérification de maillage

**IV.3.2.DEFINITION DE SIMULATION**

A cette étape on fait une définition de simulation selon le fennomane étudiée :

**a)MODEL :**

**Solver:** les paramètres suivant dépendent à la méthode numérique de calcul.

(pressure based implicit, 2D,steady, absolute, green gauss cell based,and superficial velocity)

- **Energie:** introduire l'équation d'énergie a les calculs.

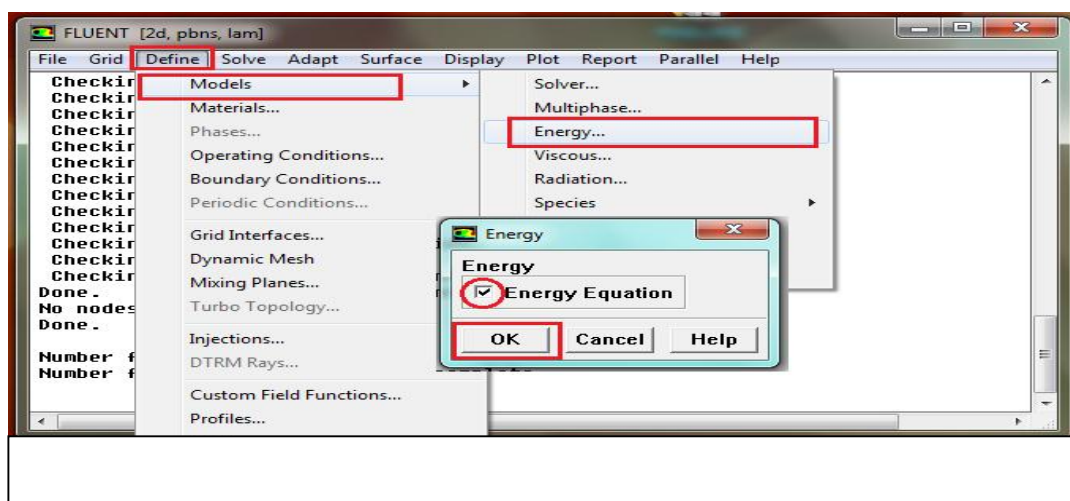
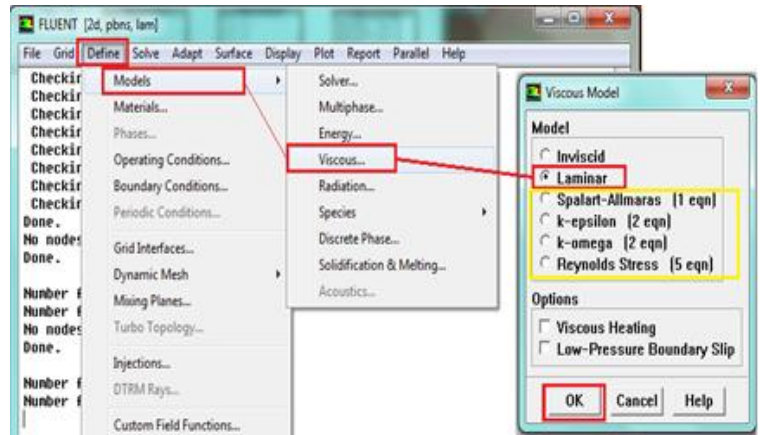


Figure (IV.3) sélectionné l'équation d'énergie

*Vescous* : on choisir le model d'écoulement **Define>models>viscous >**

- *Inviscid*
- *laminar*
- *Spalartallmaras(1equation)*
- *K-epsilon(2equation)*
- *k-omega (2 equation)*
- *Reynolds stress(5equation)*

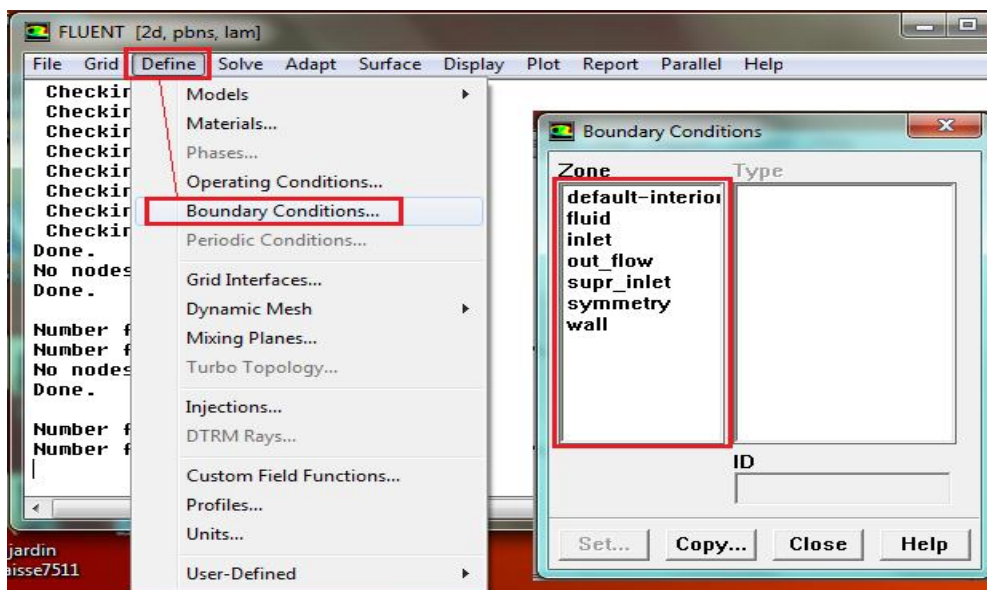


**Figure (IV.4)** sélectionner le model d'écoulement.

**b) LES CONDITIONS AUX LIMITES :**

On va choisirai maintenant les conditions aux limite de simulation.

Zone	type	material	set
fluid	fluid	air	
supr_inlet	velocity-inlet	velocity-inletComponents	V <sub>x</sub> =69.43
inlet	velocity-inlet	velocity-inletMagnitude, normal to boundary	V= 69.43
out_flow	outflow		
wall	wall	aluminum	
symmetry	symmetry	no slip	
default-interior	interior	fluid	



**Figure (IV.5)** sélectionne du les conditions aux limites.

- **Modification des propriétés de fluide :**

On clique sur *define* puis dans l'onglet *boundary conditions* on choisit *fluides* sous *type* et on clique sur *set* puis sur *edit* pour modifier les paramètres (*viscosité*= $2.22 \cdot 10^{-5}$   $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ , *Densité*= $1.225 \text{ kg/m}^3$ ) donnée que donne le nombre de Reynolds choisira. ( $\text{Re} = 0.6000\text{E}+07$ )

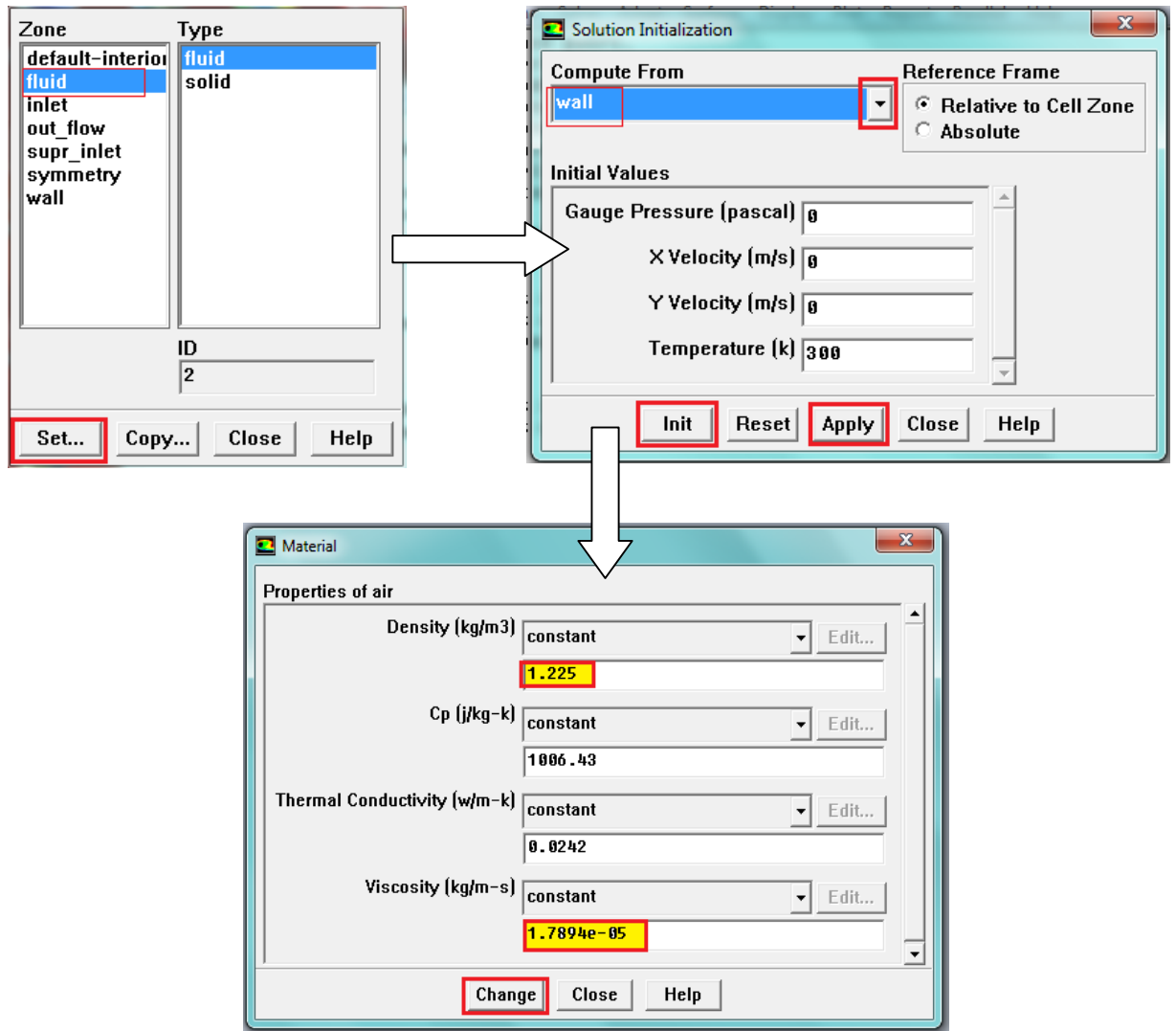


Figure (IV.6) Modification des propriétés de fluide

- **La condition d'entrée :**

On insère une nouvelle condition aux limites appelée (*velocityinlet*) en utilisant *defin*>*Boundarycondition*>*inlet* puis on sélectionne le nom (*velocityinlet*) et on clique *set*. Dans l'onglet *velocityspecificationmethode*, on spécifie le type de condition *Magnitude, Normale to Boundary*, puis on entre la valeur de vitesse donnée  $69,43 \text{ [m/s]}$ . On clique sur *ok* pour valider.

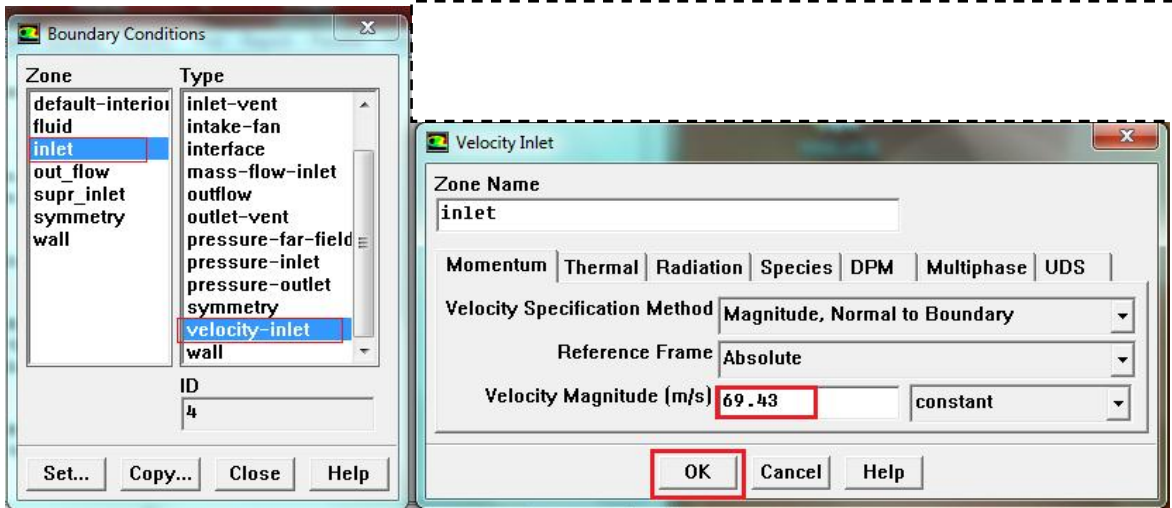


Figure (IV.7) valider la vitesse d'entrée (inlet)

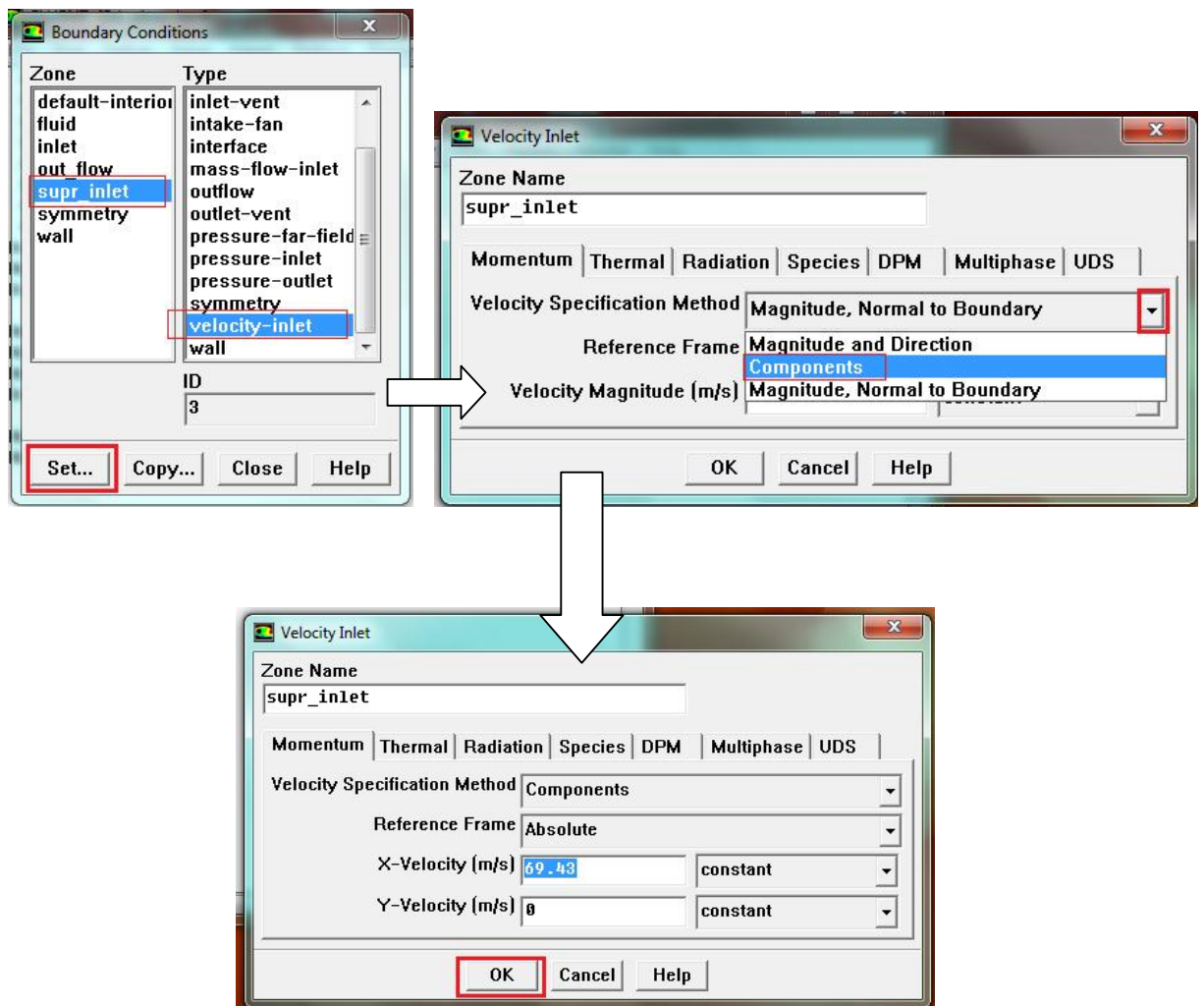


Figure (IV.8) valider la vitesse d'entrée (sup inlet)



### IV.3.3. REGLAGE DE MONITORS

On clique sur *Solve>Monitors>Residual ...>coucher plot>OK...*

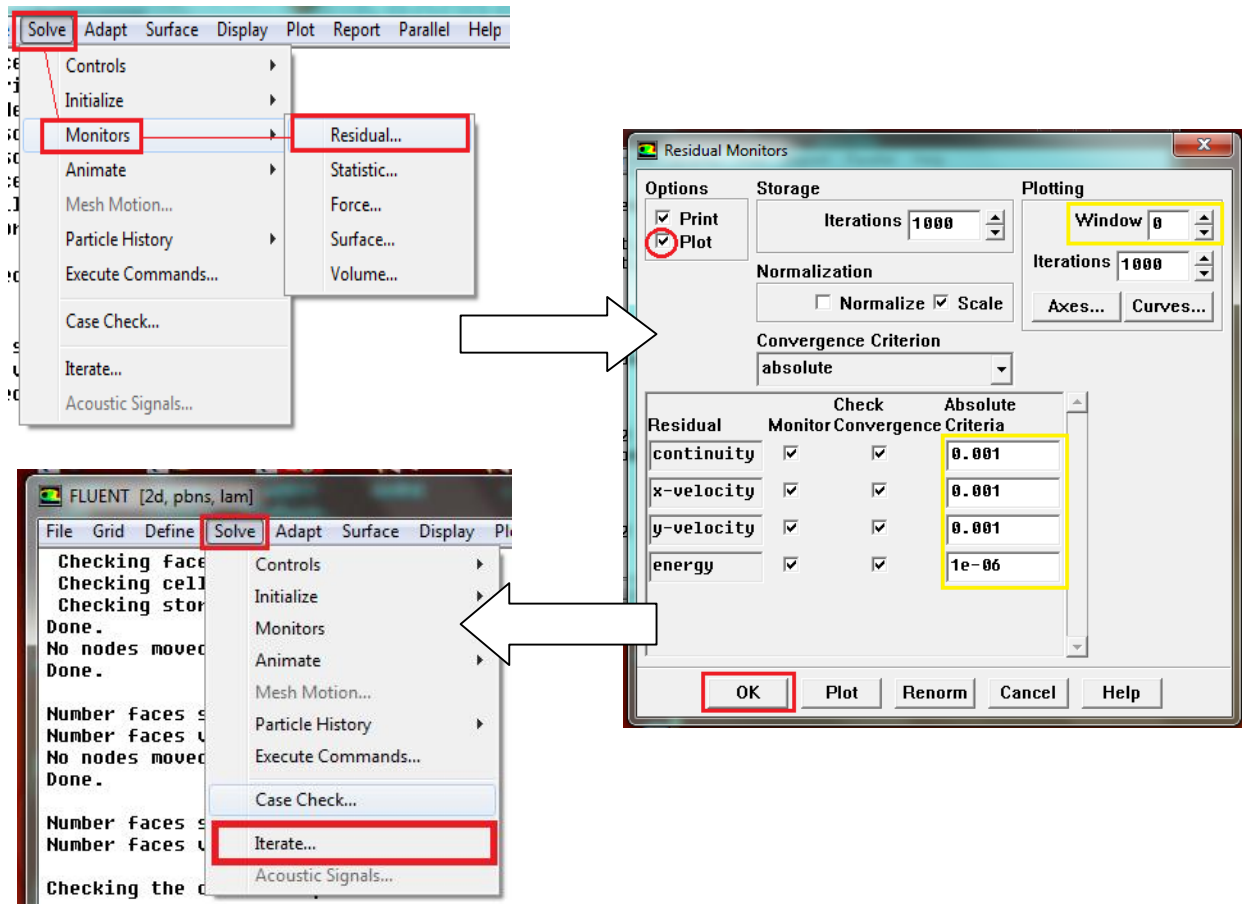


Figure (IV.9) réglage de monitors

### IV.3.4. SIMULATION

1. On sauvegarde le projet. (file >write> case &dat)
2. Maintenant on clique sur *Solve>Controls> solution >OK.*
3. Maintenant on clique sur *solve>initializ>initializ ...* et choisir *compute from>wallet* clique sur *Apply>Init> Close.*
4. On finale clique sur *solve>itirate> ...*
5. Quand la solution converge, on ferme le *Solver Manager* et on retourne à la fenêtre de projet.
6. On enregistre le projet.
7. obtenir les résultats.

**1ere SIMULATION :**

Écoulement laminaire :lam (2d, pressure-based, laminar)

- **L’histoire de convergence des résidus :**

La figure ci-dessous montre l’histoire de convergence exprimée en termes de résidus.

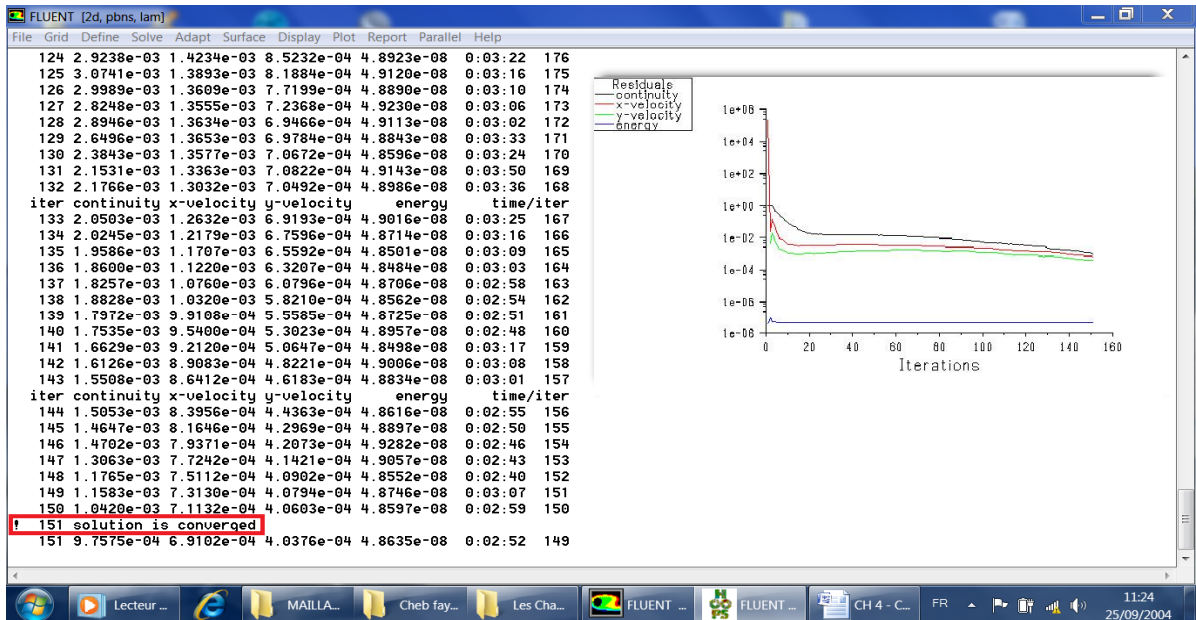


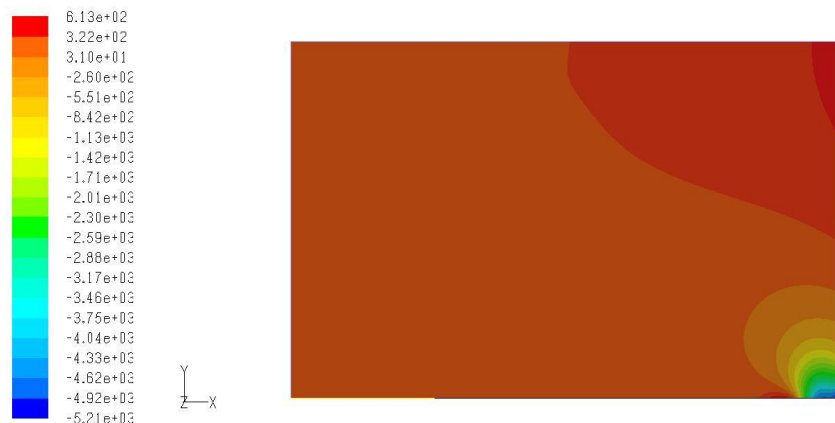
Figure (IV.10) Historique des résidus de l’écoulement laminaire.

- **Les contours de pression et vitesse :**

Dans l’étape de l’exploitation des résultats, tous les résultats de la simulation peuvent être exploités, tels que la vitesse, la pression et autres paramètres obtenus lors des calculs. Il est possible de visualiser les contours de pression, le champ des vecteurs de vitesse, etc. Voici ci-dessous quelques résultats obtenus :

**Contours des pressions statique et dynamique sur la plaque :**

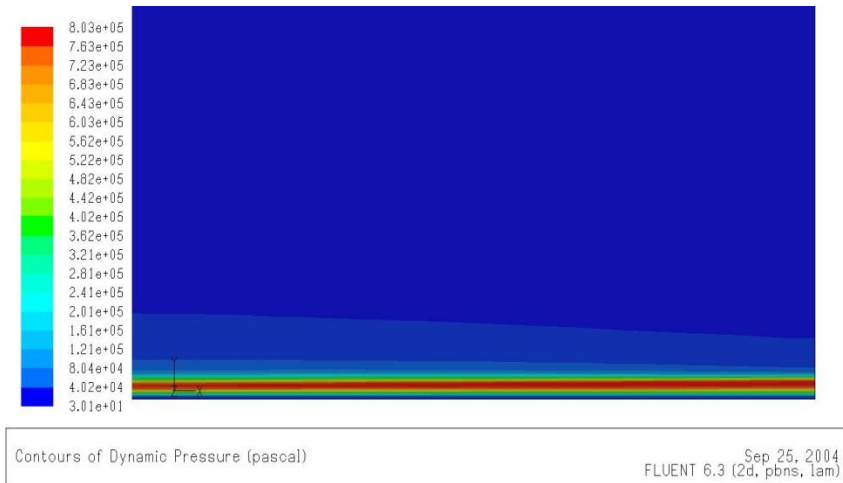
Figure (IV.11) contour de pression statique à la plaque plan(laminaire)



Contours of Static Pressure (pascal)

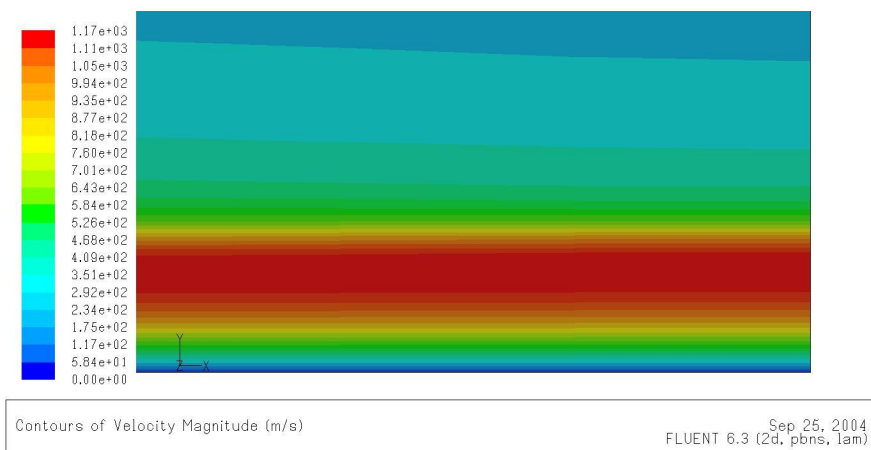
Sep 25, 2004  
FLUENT 6.3 (2d, pbns, lam)



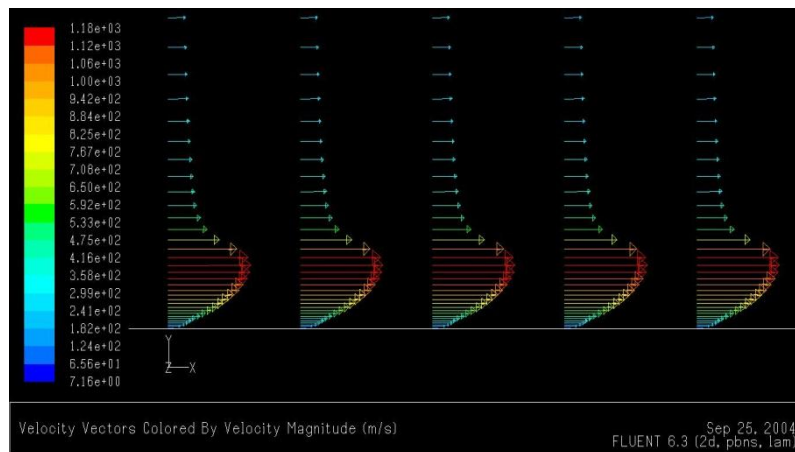


**Figure (IV.12)** *contour de pression dynamique à la plaque plane (couche limite) (laminaire)*

**Contours des vitesses sur la plaque :**



**Figure (IV.13)** *contour des vitesses approche à la plaque plane (couche limite)*



**Figure (IV.14)** *contour des vitesses approche à la plaque plane (couche limite)(laminaire)*

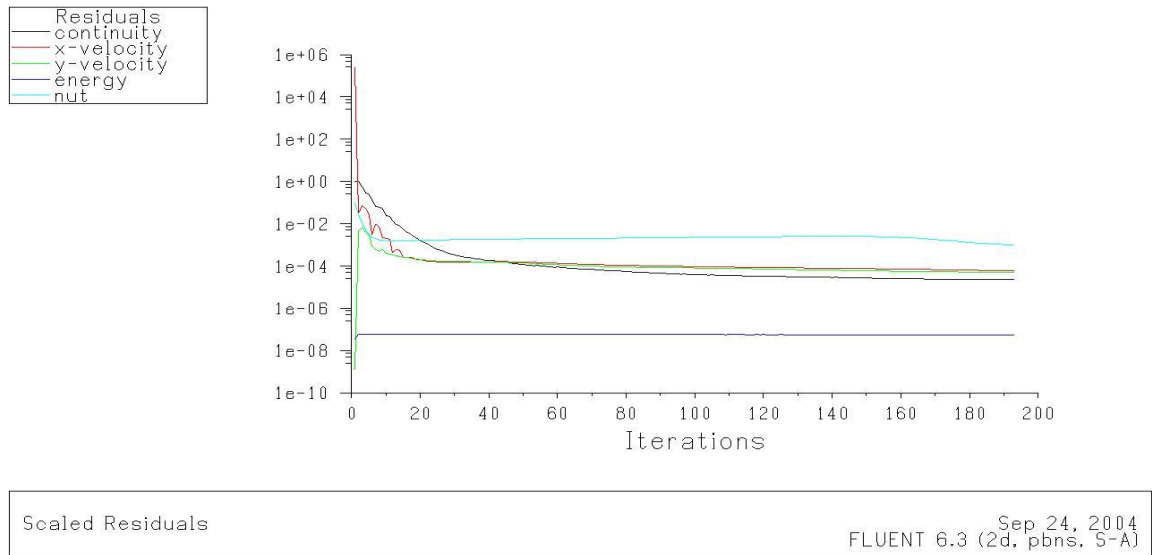
**2eme SIMULATION :**

Écoulement turbulent :(2d, pressure-based, Spalart-Allmaras)

• **L’histoire de convergence des résidus :**

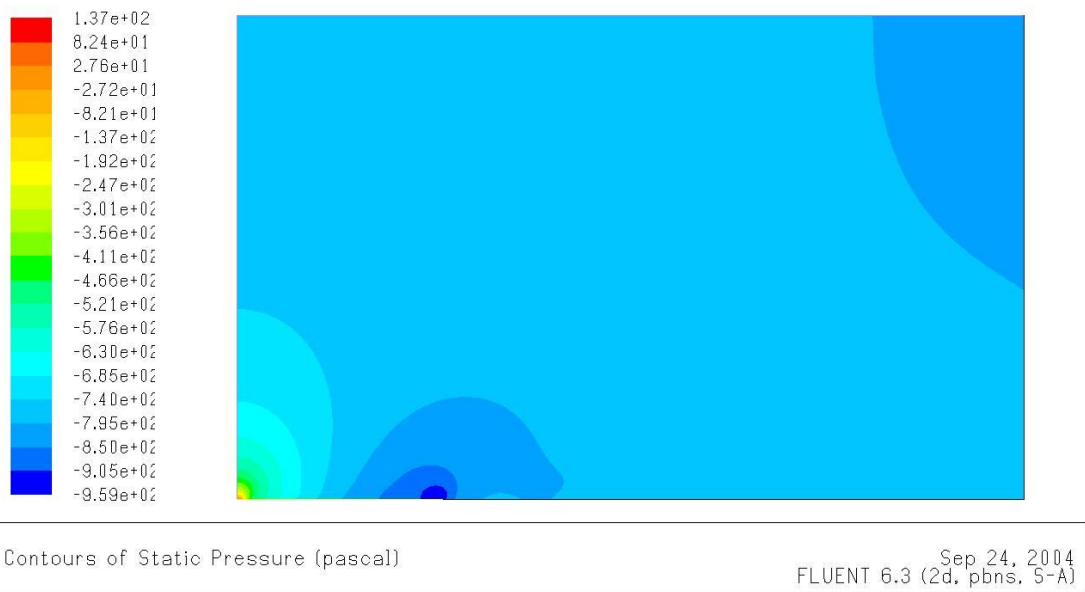
La figure ci-dessous montre l’histoire de convergence exprimée en termes de résidus.

On choisit le modèle d’écoulement : *Define>models>viscous >Spalartallmaras(1equation)*



**Figure (IV.15)** Historique des résidus de l’écoulement turbulent (Spalart-Allmaras)

**Contours des pressions statique et dynamique sur la plaque :**



**Figure (IV.16)** contour de pression statique à la plaque plan (Spalart-Allmaras)

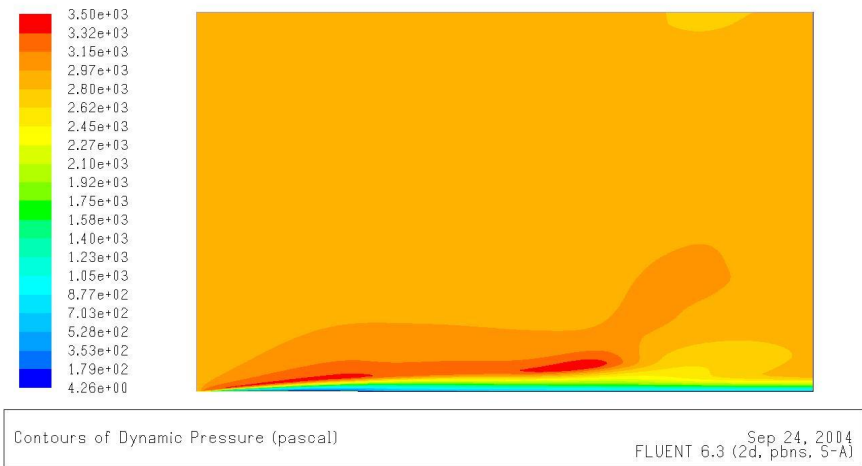


Figure (IV.17) *contour de pression dynamique à la plaque plan (Spalart-Allmaras)*

**Contours des vitesses sur la plaque :**

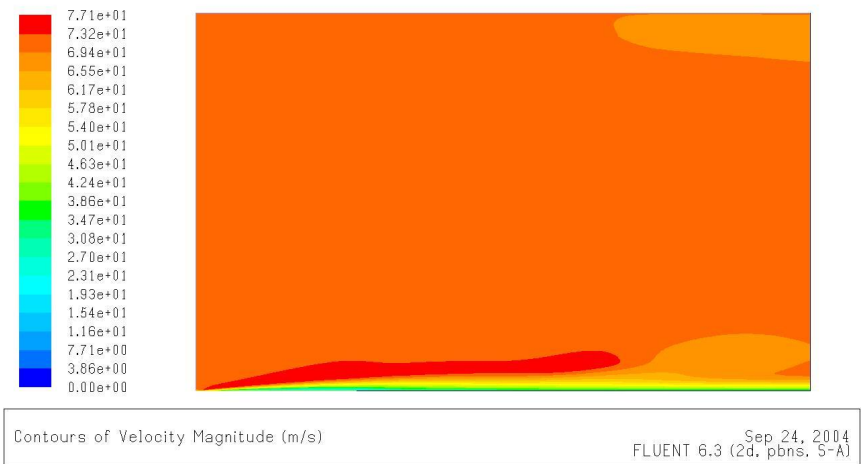


Figure (IV.18) *contour des vitesses approche à la plaque plane (Spalart-Allmaras)*

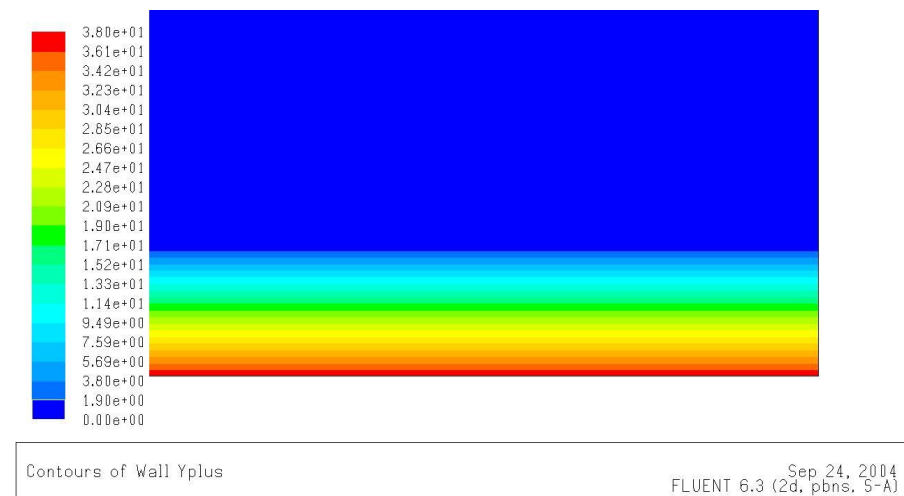


Figure (IV.19) *contour Y+ approche à la plaque plane (Spalart-Allmaras /zoom a couche limite)*

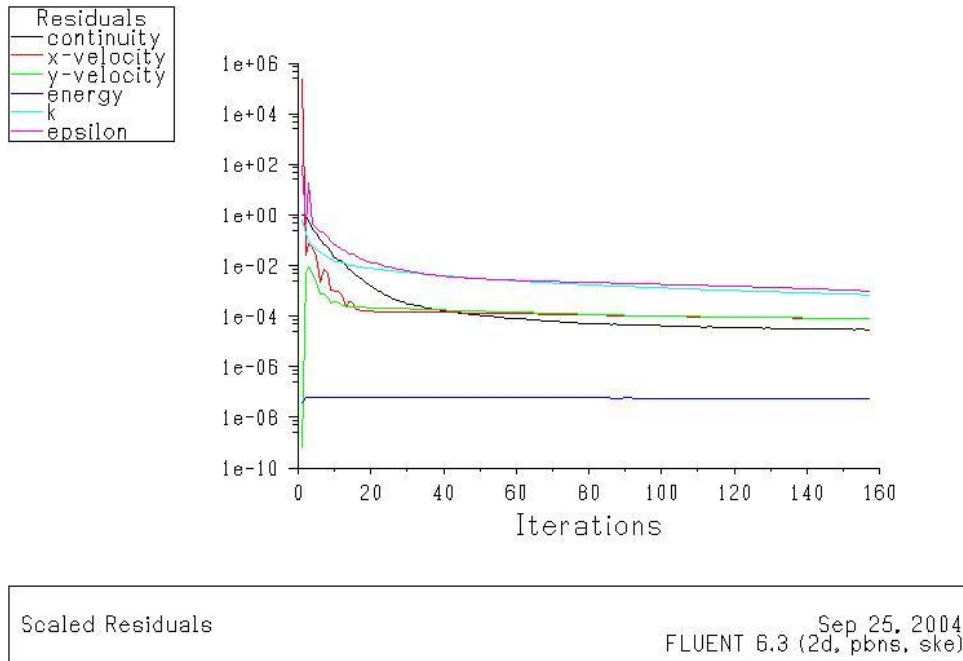
**3eme SIMULATION :**

Écoulement turbulent :(2d, pressure-based, standard k-epsilon)

**•L’histoire de convergence des résidus :**

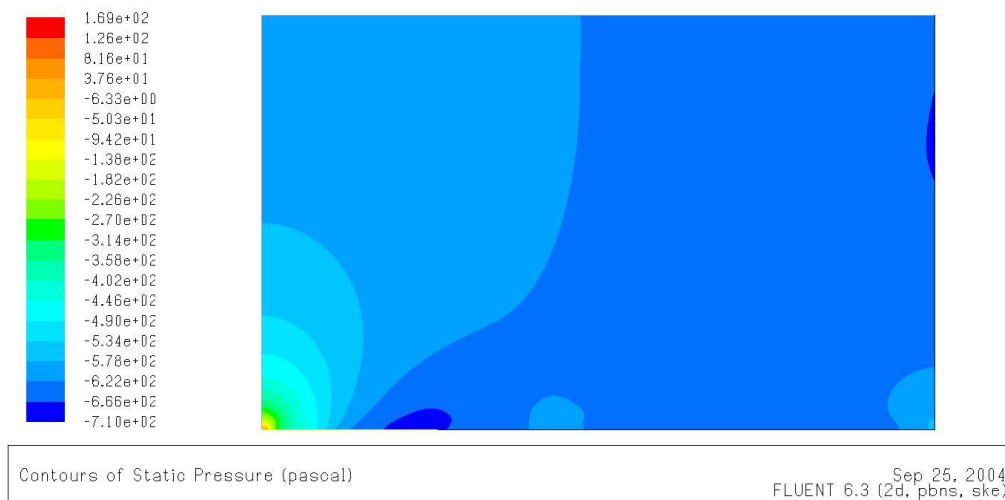
La figure ci-dessous montre l’histoire de convergence exprimée en termes de résidus.

On choisir le model d’écoulement : *Define>models>viscous> k-epsilon (1equation)*



**Figure (IV.20)** Historique des résidus de l’écoulement turbulent (k-epsilon)

**Contours des pressions statique et dynamique sur la plaque :**



**Figure (IV.21)** contour de pression statique à la plaque plan (k-epsilon)

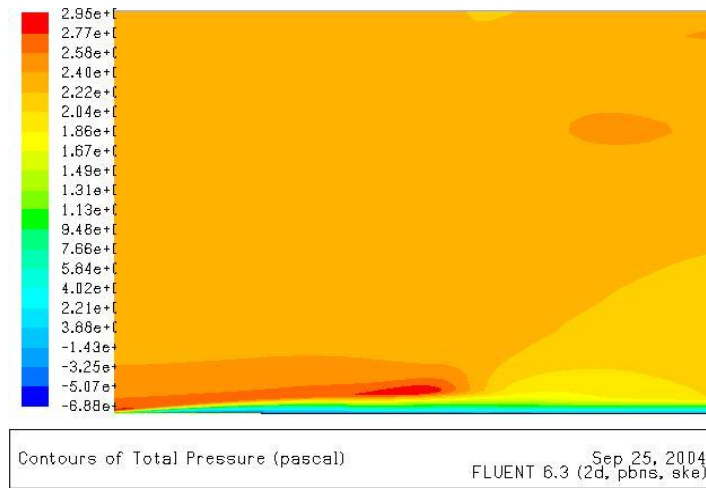


Figure (IV.22) contour de pression totale à la plaque plan (k-epsilon)

Contours des vitesses sur la plaque :

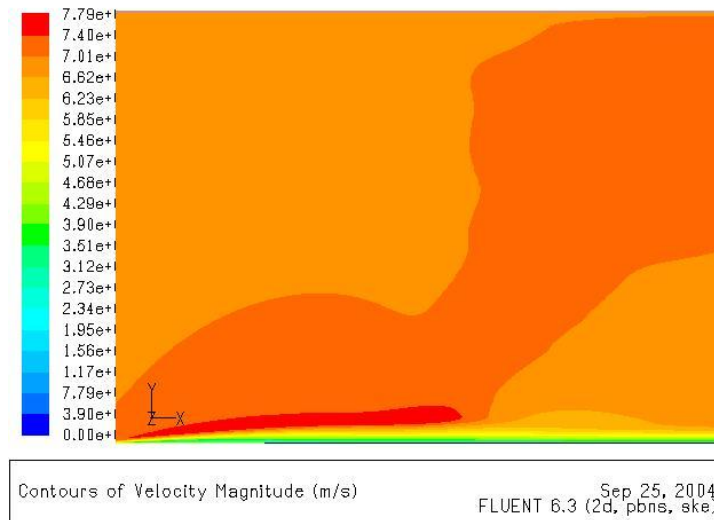


Figure (IV.23) contour des vitesses approche à la plaque plane (k-epsilon)

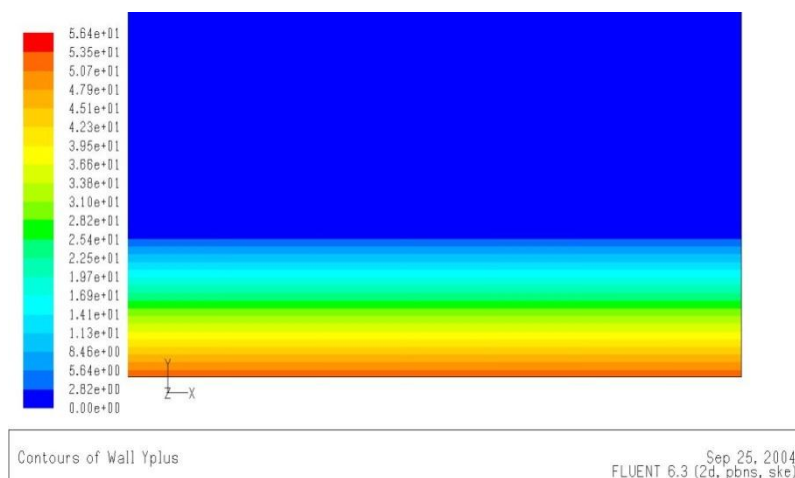


Figure (IV.24) contour Y+ approche à la plaque plane ((k-epsilon)/zoom a couche limite)

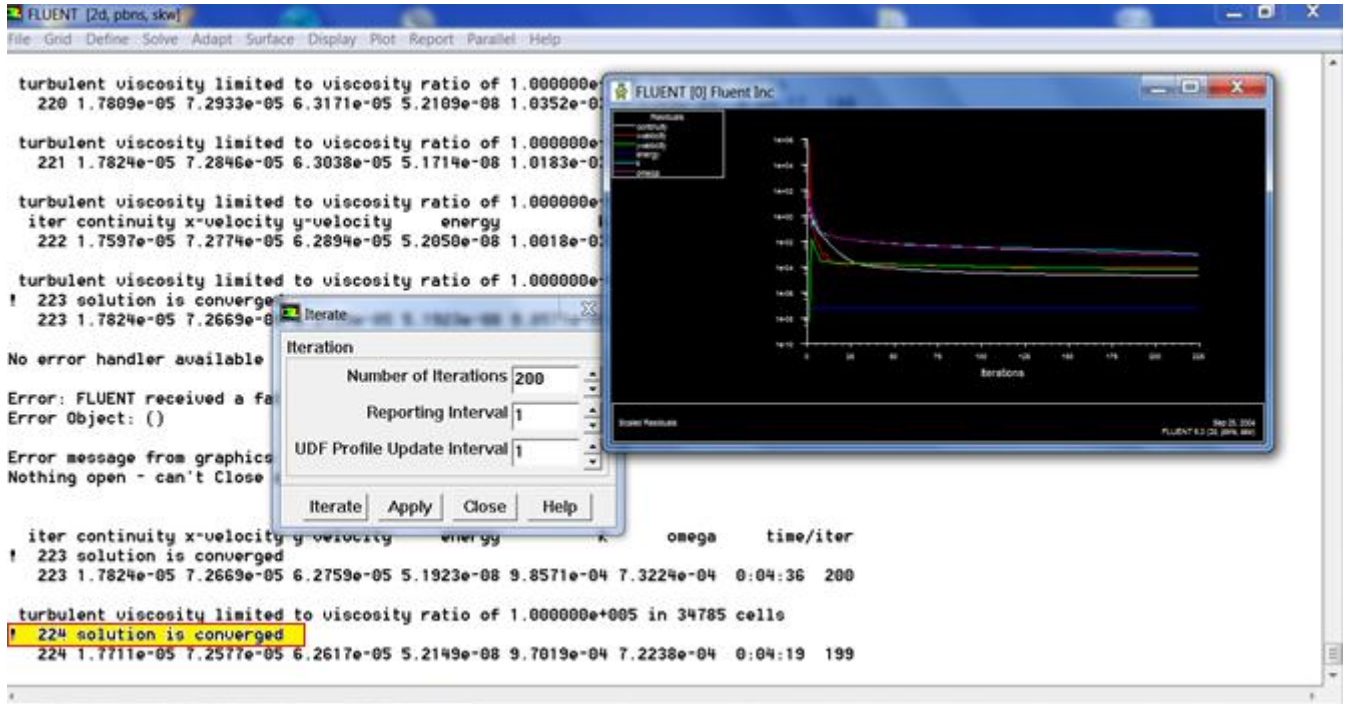
**4eme SIMULATION :**

Écoulement turbulent : *skw(2d, pressure-based, standard k-omega)*

Historique de convergence des résidus :

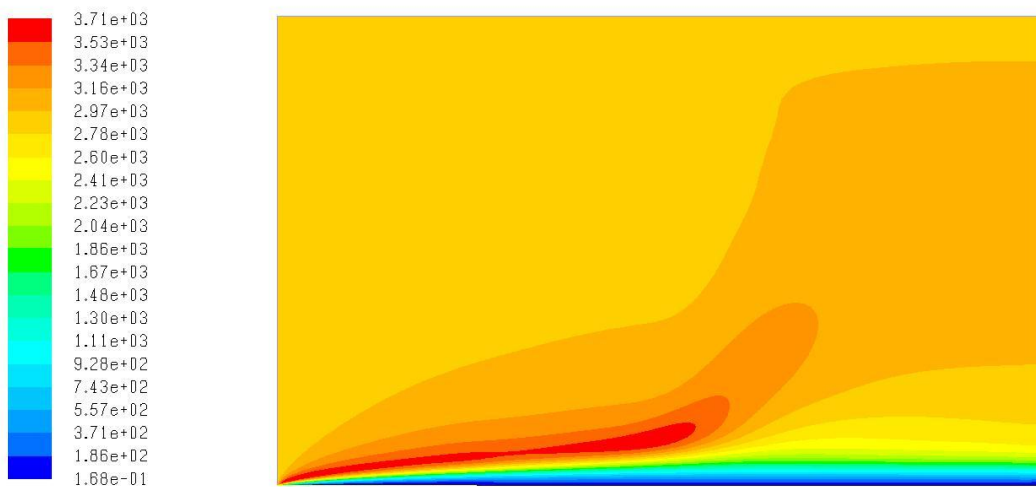
La figure ci-dessous montre l'histoire de convergence exprimée en termes de résidus.

On choisit le model d'écoulement : *Define>models>viscous>standard k-omega*



**Figure (IV.25)** Historique des résidus de l'écoulement turbulent (k-OMEGA)

Contours des pressions statique et dynamique sur la plaque :



Contours of Dynamic Pressure (pascal)

Sep 25, 2004  
FLUENT 6.3 (2d, pbns, skw)

**Figure (IV.26)** contour de pression dynamique à la plaque plan (k-)

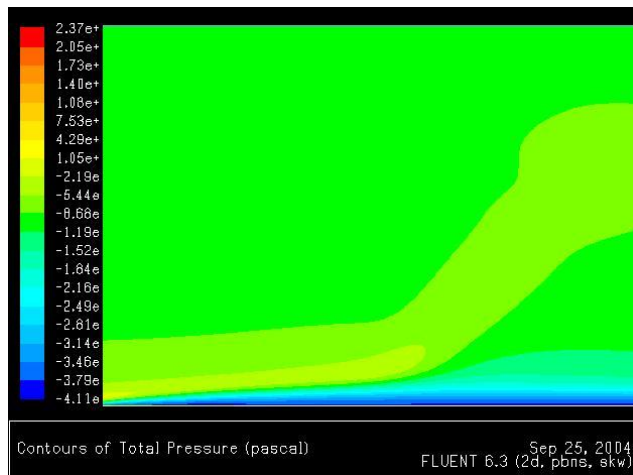


Figure (IV.27) contour de pression totale à la plaque plan (k-omega)

Contours des vitesses sur la plaque :

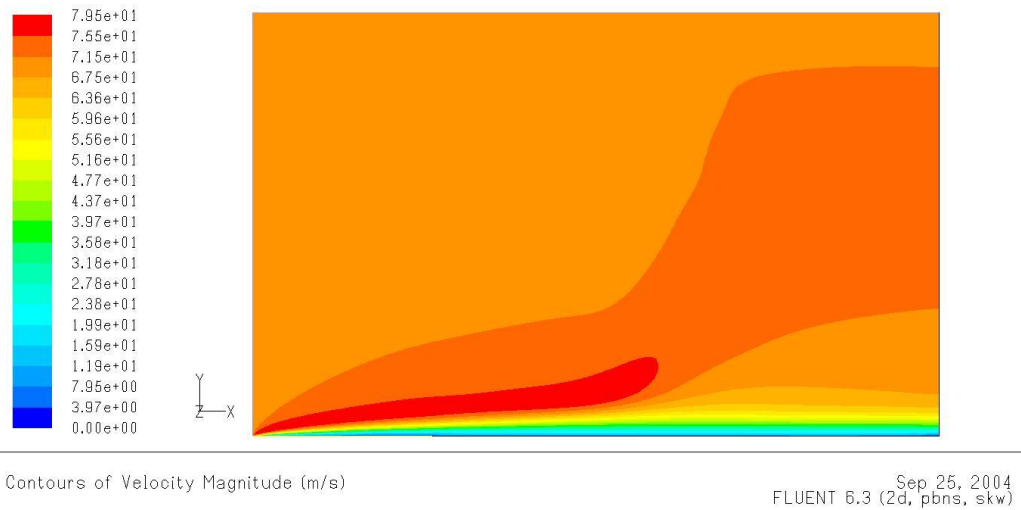


Figure (IV.28) contour des vitesses approche à la plaque plane (k-omega)

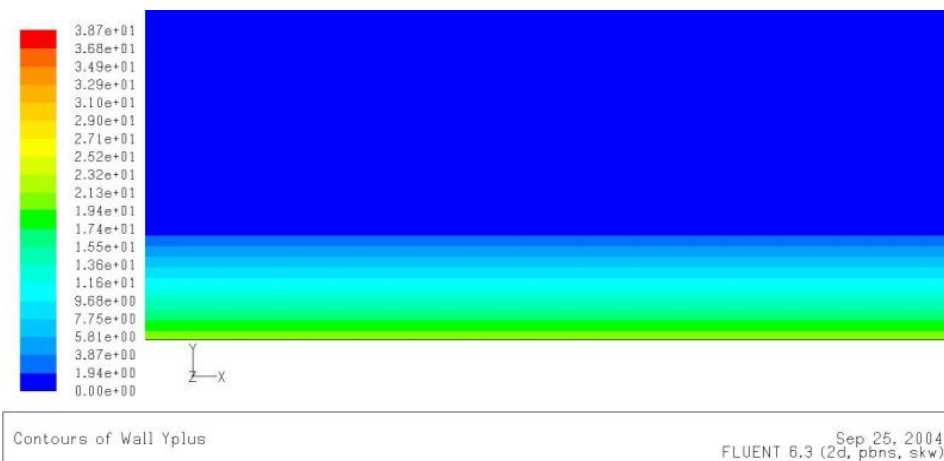
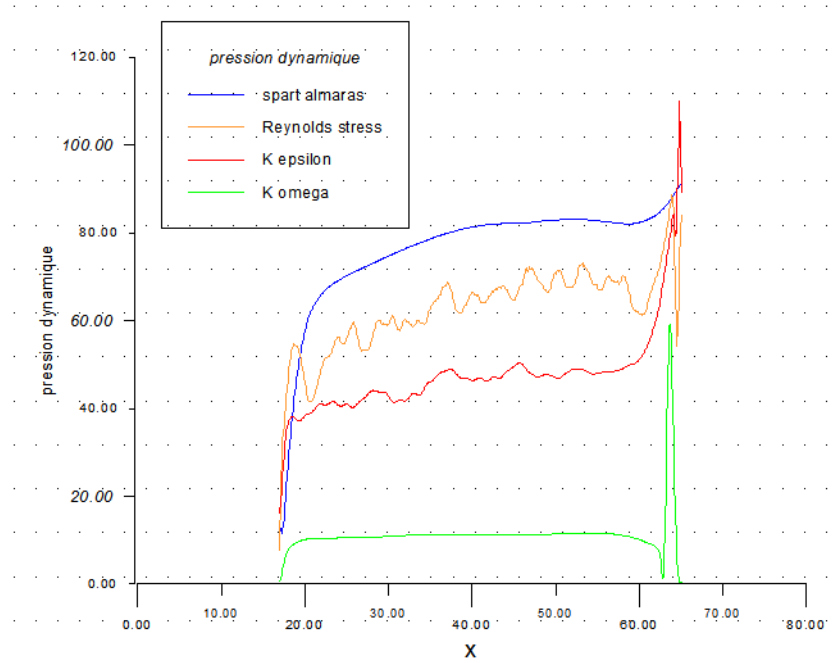


Figure (IV.29) contour Y+ approche à la plaque plane ((k-oméga)/zoom a couche limite)

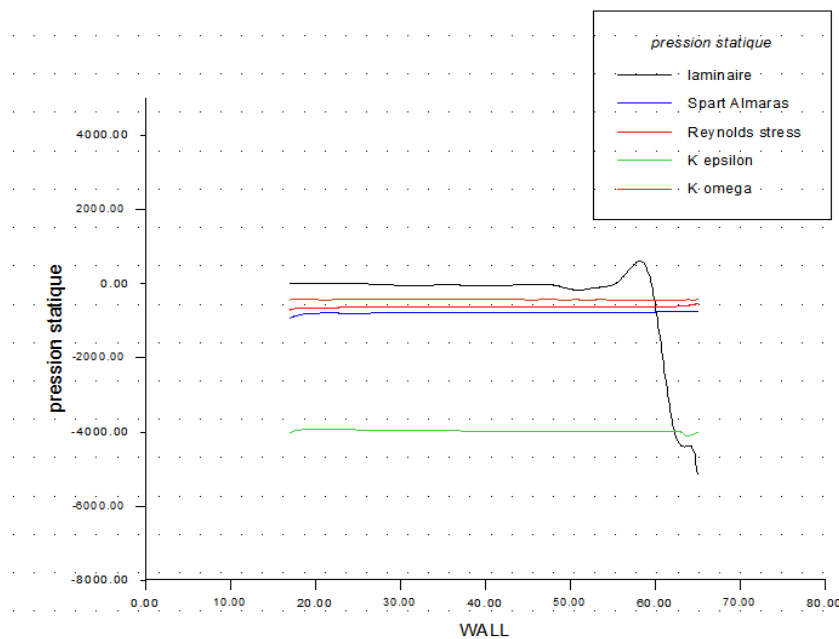
**IV.4) COMPARAISONS ENTRE LES RESULTATS (GHRAFWIN) :**

**IV.4.1) comparaisons entre les résultats de la *Pression dynamique*:**



**Figure(IV.30):** l'évolution de pression dynamique sur la plaque plane.  
(Chaque model de turbulence)

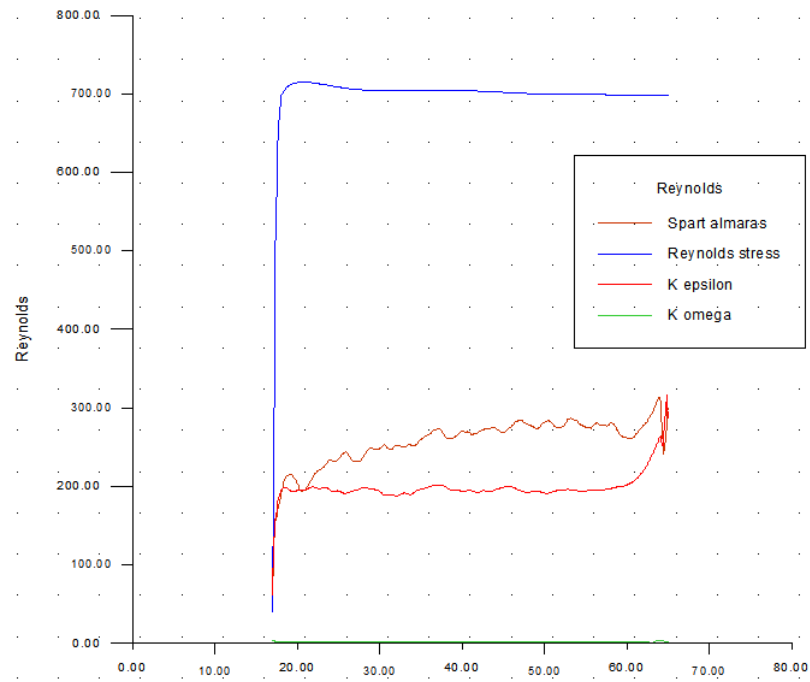
**IV.4.2) comparaisons entre les résultats de la *pression statique* :**



**Figure(IV.31):** l'évolution de pression statique sur la plaque plane  
(Chaque model de turbulence)

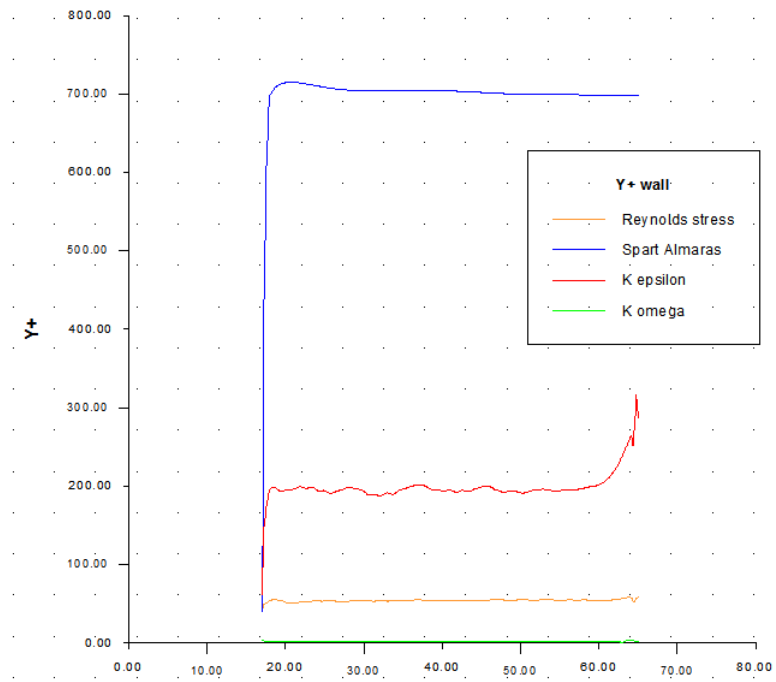


**IV.4.3) comparaisons entre les résultats de nombre de Reynolds :**



**Figure(IV.32):** l'évolution de nombre de Reynolds sur la plaque plane  
(Chaque model de turbulence)

**IV.4.4) comparaisons entre les résultats de  $Y^+$  :**



**Figure(IV.33):** l'évolution de  $Y^+$  sur la plaque plane  
(Chaque model de turbulence)

# *Conclusion*

La prédiction numérique de la performance d'un avion, est sans doute le but final de la recherche fondamentale dans le domaine de l'aérodynamique. Les méthodes numériques sont indispensables pour la définition et l'optimisation d'un avion moderne.

Actuellement, les entreprises cherchent à développer aussi rapidement que possible et avec le minimum de référence aux expériences, des configurations économiques et optimisées, qui auront une bonne performance dans certaines conditions de vol. Alors le besoin de la conception d'un outil numérique fiable et puissant est évident et indispensable.

Vu que nous aboutis des résultats concrets pour les différents cas tests alors l'objectif de départ qui est la mise en marche du Code a été atteint. Mais d'une autre part le code, sous sa forme actuelle, n'est pas finalisé. Nous souhaitons pouvoir réaliser une interface graphique qui est généralement facile pour l'utilisateur mieux qu'un code. Cette interface peut être aussi contient des programmes pour la génération du maillage et visualisation des résultats sans avoir recourt à un logiciel de visualisation tel que GRAFWIN.

Dans le cadre de ce mémoire, plusieurs modèles de turbulence ont été utilisés pour fait une comparaison entre eux.

Une perspective intéressante serait de comparer les résultats entre ces modèles. Cette comparaison nous permettrait de voir plus attentivement les différences entre les types de fermeture et de recueillir des informations afin d'améliorer nos modèles.

Il n'y a pas de modèle de turbulence universel valable pour modéliser tous les cas d'écoulements. Le choix d'un modèle de turbulence dépend de certaines considérations telles que la physique du problème traité, le niveau de précision exigé, les ressources informatiques disponibles et le temps disponible pour effectuer la simulation. Afin de choisir le modèle le plus approprié à chaque application donnée, il est nécessaire de comprendre les principes et les limites de chaque modèle de turbulence.

Notre travail a été très délicat mais bien bénéfique notamment sur l'apprentissage des outils de CFD (GAMBIT et FLUENT) et l'application de plusieurs théories de la mécanique des fluides et l'aérodynamique rencontrées pendant notre cursus.