

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : **Energétique**

Présenté par :

Benlachheb Abdelkader & Meghnia Abdelkader

Thème

**ETUDE ECOULEMENT LAMINAIRE ET TURBULENT AUTOUR
D'UN OBSTACLE**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Bakhti fatima zohra	Professeur	Président
Hebiche Noureddine	MAA	Encadreur
Berkache Ammar	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre : GM/...../2022

Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,L'amour, le respect, la reconnaissance...

*Aussi, c'est tout simplement que
Nous dédions ce travail ...*

À NOS CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer nos respects, notre amour éternel et nos considérations pour les sacrifices que vous avez consenti pour nous, nous vous remercions pour tout le soutien et l'amour que vous nous portez depuis notre enfance et nous espérons que votre bénédiction nous accompagnons toujours vous instruction et notre bien-être. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que nous ne vous en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais nous ne vous décevrons.

À tout le peuple palestinien qui nous a appris le sens du courage, la patience, et la résistance.

***À TOUTES LES PERSONNESQUI ONT PARTICIPÉ A
L'ÉLABORATION DE CE TRAVAIL À TOUS CEUX QUE
J'AIOMIS DE CITER***

Profond et notre affection la plus sincère

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur **Dr. HEBICHE N.**, mon directeur de mémoire, pour son soutien et son aide tout au long de ce projet. Je le remercie également pour sa disponibilité, ses conseils judicieux qui m'ont permis d'accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux membres du jury Madame **Dr. Bakhti F** et monsieur **Dr. Berkache A** qui m'ont fait l'honneur de participer à l'évaluation de ce mémoire.

En fin, j'espère que toutes personnes ayant aidé de près ou de loin dans la réussite de ce travail, trouver ici l'expression de ma reconnaissance

Sommaire

Introduction Générale	2
Chapitre I : Etude des écoulements autour d'un obstacle	4
I.1 Introduction	4
I.2. Notion de base en mécanique des fluides	8
I.3. Equation fondamentale.....	8
I.3.1. Equation de continuité	8
I.3.2. Equation de quantité de mouvement	9
I.3.3. Equation d'énergie.....	10
I.4. Régimes d'écoulement.....	10
I.4.1. Ecoulement laminaire et turbulent.....	10
I.4.2. Ecoulement permanent et transitoire.....	11
I.4.3. Ecoulement bidimensionnel et unidimensionnel.....	11
I.4.4. Ecoulement Rotationnel et irrationnelle.....	11
I.4.5. Ecoulement compressible et incompressible.....	11
I.5. Notions de base en aérodynamique.....	12
I.5.1. Définition.....	12
I.5. 2. Forces et moment aérodynamique	12
I.5.3. La portance et la traînée.....	12
I.6. Ecoulement autour des obstacles	14
I.6.1. Ecoulement parfait autour des obstacles	14
I.6.2. Ecoulement autour des obstacles de révolution simples	14
I.7. Conclusion	15
Chapitre II : Schéma d'étude autour obstacle et le maillage	17
II.1. Introduction	17
II.2. Intérêts de la CFD	17
II.3. Méthodologies	17
II.4. Méthode numérique	18
II.4.1. Méthode des différences finies	18
II.4.2. Méthode des éléments finis	18
II.4.3. Méthode des volumes finis	18
II.5. Mise en équations du problème.....	18
II.5.1. Equation de continuité	19
II.5.2. Equation de quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes)	19
II.5.3. Equation d'énergie	19
II.5.4. Modèle de turbulence k- ϵ	20
II.5.5. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k	20
II.5.6. Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulent.....	21
II.6. Gambit	21
II.7. Présentation la géométrie	22
II.7.1. Premier cas	22
II.7.2. Deuxième cas	24
II.7.3. Troisième cas	26
II.8. Conclusion	28

Chapitre III : Présentation de Logiciel Fluent	30
III.1. Introduction	30
III.2. Généralités de Fluent	30
III.3. Principales étapes de simulation sous FLUENT.....	30
III.4. Procédure du calcul numérique	31
III.4.1. Géométrie et maillage	31
III.4.2. Calcul itératif.....	31
III.5. Démarrage de FLUENT	33
III.6. Lissage du maillage	33
III.7. Vérification de l'échelle	33
III.8. Choix du solveur	34
III.9. Autorisation du transfert de chaleur	35
III.10. Affichage de la grille	35
III.11. Définition des caractéristiques du fluide	35
III.12. Operating conditions	36
III.13. Conditions aux limites usuelles	36
III.14. Choix des schémas de contrôle de la solution	37
III.14.1. Schémas d'interpolation pour les pressions	37
III.14.2. Schémas d'interpolation pour les Moments	38
III.14.3. Couplage pression vitesse	38
III.14.4. Modifier les facteurs de sous-Relaxation	38
III.14.5. L'initialisation	39
III.15. Lancement de la Simulation	39
III.16. Importation de la géométrie de deuxième cas	40
III.17. Affichage de la grille de deuxième cas	41
III.18. Vérification de l'échelle	41
III.19. Conclusion	41
Chapitre IV : Résultats et discussions	43
IV.1. Introduction	43
IV.2 Simulation numérique et étude expérimentale	43
IV.2.1. Première cas /Obstacle 2D carrée	43
IV.2.1.1. Différents régimes de l'écoulement autour d'un obstacle	43
IV.3. Régime laminaire	43
IV.3.1. Champ de pression	43
IV.3.2. Champ de Vitesse	44
IV.3.3. Champ de Température	44
IV.3.4. Champ de pression de deuxième cas	44
IV.3.5. Champ de Vitesse	45
IV.3.6. Champ de pression ($Re = 1480$)	46
IV.3.7. Champ de Vitesse	46

IV.4. Régime turbulent	47
IV.4.1. Champ de pression	47
IV.4.2. Contour de température	48
IV.4.3. Contour de vitesse	48
IV.4.4. Contour de pression de la deuxième géométrie	49
IV.4.5. Contour de Température de la deuxième géométrie	49
IV.4.6. Contour de vitesse de la deuxième géométrie	50
IV.4.7. Contour de pression de la troisième géométrie	51
IV.4.8. Contour de vitesse de la troisième géométrie	51
IV.4.9. Contour de température de la troisième géométrie	52
Conclusion générale	54
Bibliographie	55

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 :	Ecoulement laminaire et écoulement turbulent.....	10
Figure I.2 :	la portance et la trainée.....	13
Figure I.3 :	Coefficient de trainée utile (Cd), pour quelques obstacles aérodynamiques.....	13
Figure I.4 :	Ecoulement autour d'une sphère et Distribution de pression.....	14
Figure I.5 :	Ecoulement autour d'un Cylindre.....	15

Chapitre II

Figure II.1 :	Création des lignes de la géométrie (première cas).....	22
Figure II.2 :	Création de face de la géométrie (première cas).....	23
Figure II.3 :	Maillage de la géométrie (première cas).....	23
Figure II.4 :	Condition aux limites (première cas).....	24
Figure II.5 :	Création des lignes de la géométrie (deuxième cas).....	25
Figure II.6 :	Création de face de la géométrie (deuxième cas).....	25
Figure II.7 :	Maillage de la géométrie (deuxième cas).....	25
Figure II.8 :	. Condition aux limites (deuxième cas).....	26
Figure II.9 :	Création des lignes de la géométrie (troisième cas).....	26
Figure II.10 :	Création de face de la géométrie (troisième cas).....	27
Figure II.11 :	Maillage de la géométrie (troisième cas).....	27
Figure II.12 :	Condition aux limites (troisième cas).....	27

Chapitre III

Figure III.1 :	Organigramme de calcul	32
Figure III.2 :	Démarrage Fluent.	33
Figure III.3 :	Lissage du maillage.	33
Figure III.4 :	Vérifiez les dimensions	34
Figure III.5 :	Choix de solver	34
Figure III.6 :	Choix de solver	35
Figure III.7 :	La grille.	35
Figure III.8 :	Les caractéristiques du fluide.	35
Figure III.9 :	Operating conditions.	36
Figure III.10 :	Bondary conditions.	37
Figure III.11 :	Contrôle de solution.....	39
Figure III.12 :	. L'initialisation.....	39

Figure III.13 :	. Itération.	40
Figure III.14 :	Importation de la géométrie de deuxième cas.	40
Figure III.15 :	Vérifiez les dimensions deuxième cas.	40
Figure III.16 :	La grille de deuxième cas.....	41
Figure III.17 :	Vérifiez les dimensions troisième cas.	41
Figure III.18 :	La grille de troisième cas.	41

Chapitre IV

Figure IV.1 :	Contour de pression ($R_e = 156$).....	43
Figure IV.2 :	Contour de Vitesse ($R_e = 156$) et $v=0.038 \text{ m/s}$	44
Figure IV.3 :	Contour de Température ($R_e = 156$) et $T_e = 303 \text{ K}$	44
Figure IV.4 :	Contours de pression ($R_e = 49$).....	44
Figure IV.5 :	Contour de Vitesse ($R_e = 492$) et $v=0.12 \text{ m/s}$	45
Figure IV.6 :	Contour de Température ($R_e = 492$).....	45
Figure IV.7 :	Profils de pression expérimentale et numérique ($Re=492$).	45
Figure IV.8 :	Contours de pression ($R_e = 1480$).	46
Figure IV.9 :	Contour de Vitesse ($R_e = 1480$) et $v=0.36 \text{ m/s}$. .	46
Figure IV.10 :	Contour de Température ($R_e = 1480$)..	47
Figure IV.11:	Profils de pression expérimentale et numérique ($R_e=1480$).	47
Figure IV.12 :	Contours de pression ($R_e = 4590$).....	48
Figure IV.13 :	Contours de température ($R_e = 4590$)	48
Figure IV.14 :	Contour de Vitesse ($R_e = 4590$) et $v=0.90 \text{ m/s}$	48
Figure IV.15 :	Profils de pression expérimentale et numérique ($R_e=4590$).....	49
Figure IV.16 :	Contours de pression ($R_e = 6000$)	49
Figure IV.17 :	Contours de température ($R_e = 6000$)	49
Figure IV.18 :	Contour de Vitesse ($R_e = 6000$) et $v=1.46 \text{ m/s}$	50
Figure IV.19 :	Profils de pression expérimentale et numérique ($R_e=6000$).	50
Figure IV.20:	Contours de pression ($R_e = 10000$)	51
Figure IV.21 :	Contour de Vitesse ($R_e = 10000$) et $v=2.45 \text{ m/s}$	51
Figure IV.22 :	Contours de température ($R_e = 10000$)	52
Figure IV.23 :	Profils de pression expérimentale et numérique ($R_e=10000$	52

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 :	Equation des paramètres moyens.....	21
Tableau II.2 :	Equation des paramètres turbulents pour le modèle K- ϵ	21
Tableau II.3 :	Données géométriques du rectangulaire étudié	22
Tableau II.4 :	Données géométriques du rectangulaire étudié deuxième cas	24
Tableau II.5 :	Données géométriques du rectangulaire étudié deuxième cas	26

Nomenclature

L : longueur caractéristique de l'obstacle (m)

M : masse molaire (Kg/mol)

m : masse du fluide (Kg)

\vec{n} : Vecteur unitaire normal à un élément de surface

P : pression local du fluide (Kg/mS^2)

P : force de portance (Kg/mS^2)

P_{dy} : Pression dynamique (Kg/mS^2)

P_{∞} : pression initiale de l'écoulement (Kg/mS^2)

\bar{P} : Tenseur des contraintes totales (Kg/mS^2)

\vec{q} : Vecteur de vitesse (m/s)

R : constante des gaz parfaits ($J/mol.k$)

S : surface élémentaire (m^2)

T : température du fluide (K)

T : force de trainée (Kg/mS^2)

U_{∞} : vitesse parallèle à l'infini (m/s)

V : composante verticale de la vectrice vitesse (m/s)

x, y : les coordonnées cartésiennes

X, Y : les coordonnées adimensionnelles

Symbole Grecque

Φ : la dissipation visqueuse ($\frac{N}{s.m^2}$)

ρ : Masse volumique ($\frac{Kg}{s^2}$)

μ : viscosité dynamique ($\frac{N}{s.m^2}$)

ϕ : Potentiel total vitesse (m^2/s)

ν : Viscosité cinématique (m^2/s)

Nombres sans dimensions

R_e : Nombre de Reynolds

C_m : Coefficient de couple

C_p : Coefficient de pression

C_x : Coefficient de trainé

C_{xp} : Coefficient de trainé et de pression

C_z : Coefficient de portance

M : Nombre de Mach

Introduction générale

Introduction générale

L'étude des écoulements autour d'obstacles trouve son intérêt dans de nombreuses applications. Pour cela, une telle étude est largement investiguée par les chercheurs. Chacun d'entre eux vise un objectif différent de l'autre et trouve de nouveaux résultats pour de nouvelles applications.

Les écoulements de fluides en présence d'obstacles sont largement utilisés dans l'industrie, et leurs applications sont extrêmement variées. On peut les rencontrer dans le cas des problèmes d'environnement liés à la dispersion des polluants à travers les agglomérations ainsi que les effets du vent sur les bâtiments, la ventilation des tunnels routiers, les ailettes de refroidissement des engins thermiques [36]. Les chicanes des échangeurs de chaleur ou des capteurs solaires, les canalisations urbaines, etc.

L'étude de l'écoulement autour d'obstacle peut se faire suivant deux approches : l'approche numérique où on simule l'écoulement en s'appuyant sur un modèle mathématique ; et l'approche expérimentale où on doit acquérir des mesures sur banc d'essai.

Les structures d'écoulement autour des obstacles profilés occupent une place importante dans la physique des fluides dues à leur importance pratique dans les applications aérodynamiques et hydrodynamiques tels que les ailes d'avion, les sous-marins et les missiles...etc [37].

Les structures de l'écoulement incompressible autour des obstacles occupent une place importante dans la physique des fluides dues à leur importance pratique dans les Applications aérodynamiques et hydrodynamiques tel que les hélices des navires, les Aubages des turbines et des pompes...etc.

En mécanique des fluides, l'écoulement laminaire est le mode d'écoulement d'un fluide où l'ensemble du fluide s'écoule plus ou moins dans la même direction, sans que les différences locales se contrarient (par opposition au régime turbulent, fait de tourbillons qui se contrarient mutuellement).

L'écoulement laminaire est généralement celui qui est recherché lorsqu'on veut faire circuler un fluide dans un tuyau (car il crée moins de pertes de charge), ou faire voler un avion (car il est plus stable, et prévisible par les équations).

En dynamique des fluides, l'écoulement turbulent est caractérisé par le mouvement irrégulier des particules (on peut dire chaotique) du fluide. Contrairement au flux laminaire, le fluide ne coule pas en couches parallèles, le mélange latéral est très élevé et il y a une rupture entre les couches. La turbulence est également caractérisée par la recirculation, les tourbillons et le caractère aléatoire apparent. Dans un écoulement turbulent, la vitesse du fluide en un point subit continuellement des changements d'amplitude et de direction.

Quand un corps est placé dans un écoulement uniforme, dont la vitesse est tout à fait petite entraînant un nombre de Reynolds de l'ordre de quelques unités, il se produit un décollement dans la couche limite qui se développe sur sa paroi. Alors, les effets dissipatifs dus à la viscosité du

fluide tendent à envahir l'écoulement. Les filets fluides sont alors animés d'une rotation très rapide dont une des manifestations les plus dramatiques est la tornade. Pour une valeur critique du nombre de Reynolds l'écoulement cesse d'être stationnaire et la vitesse du fluide est dépendante du temps : les tourbillons se détachent périodiquement en aval de l'écoulement. Ils forment alors une rangée double de tourbillons, appelée allée de Bénard-Von Karman.

Le principal outil disponible pour leur analyse est l'analyse CFD. Elle est une branche de la mécanique des fluides qui utilise l'analyse numérique et des algorithmes pour résoudre et analyser les problèmes impliquant des écoulements de fluide turbulents. Il est largement admis que les équations de Navier-Stokes (ou de quantité de mouvement) sont capables de présenter des solutions turbulentes, et ces équations sont la base de pratiquement tous les codes CFD.

Beaucoup de travaux de recherches ont été réalisés pour modeler l'écoulement autour des obstacles. Pour cela, plusieurs expériences dans le domaine ont été réalisées et confrontées aux méthodes numériques. Pour cette dernière une large gamme de méthodes mathématiques ont été développées afin de s'approcher de la réalité de l'écoulement et de fournir le maximum d'information qui peuvent se produire. Utilise le code Fluent, qui représente un outil de simulation numérique fort de grande qualité afin de simuler un écoulement autour de deux obstacles différents. Ce code de calcul trouve de plus en plus de place dans différents domaines d'industrie surtout dans l'option des écoulements de fluide et transfert de chaleur.

Notre travail est une étude théorique et pratique, pour les l'écoulement laminaire et turbulent autour d'un obstacle.

Ce mémoire s'article au tour de quatre chapitre :

- Le premier chapitre est étude des écoulements autour d'un obstacle.
- Le deuxième chapitre présente le schéma d'étude autour obstacle en plus le maillage.
- Le troisième chapitre présent une description des étapes de notre simulation par Fluent.
- Dans le dernier et quatrième chapitre qui donne les courbes et discussion
- Une conclusion générale est donnée à la fin de ce mémoire.

Chapitre I

Etude des écoulements autour d'un obstacle

I.1. Introduction

Les écoulements turbulents autour les obstacles carrés sont considérés comme une branche fondamentale dans la mécanique des fluides et sont largement utilisés dans les applications, industrielles, on peut citer : l'écoulement du vent autour les bâtiments, les écoulements dans les turbomachines...ext.

Pour cette raison, on a présenté dans ce chapitre une synthèse bibliographique comporte des plusieurs travaux effectués dans ce domaine. Il est bien apparu que les recherches sont nombreuses et riches, et en plus, ils sont dominants :

1- Alexander Yakhot, Heping Liu, Nikolay Nikitin 2006 [1] Ont étudié avec la simulation numérique directe (DNS) l'écoulement turbulent autour d'un cube disposé sur le fond d'un canal. Le nombre de Reynolds à environ de 5610. Les résultats trouvés confirment l'in stationnarité de l'écoulement provoqué par l'interaction instable d'un vortex en fer à cheval en amont de cube et sur ces cotés latéraux. Ils ont montré dans ce travail que la production négative de la turbulence est prévue dans la région amont de l'obstacle ou le vortex en fer à cheval commence principalement à former.

2 - Ye Gao, Wan-Ki Chow 2009 [2] donnent une simple méthode pour obtenir le coefficient de pression au coin frontal au vent d'un obstacle carré. La simulation est effectuée par RANS (Reynolds averaged Navier Stocks). Des travaux précédents dans ce domaine sont discutés.

Des investigations détaillées sur ce problème sont effectuées et une méthode simple pour les améliorations est proposée en changeant les filets près du coin frontal au vent. Ils ont constaté que les modifications des filets devraient être apportées pour limiter l'augmentation de la contrainte de cisaillement sur la surface proche de la paroi du canal. On outre, l'énergie cinétique turbulente ne sera pas élevée à cet endroit, et la séparation de l'écoulement près du coin sera produite au-dessus du cube.

3- Jong-Yeon Hwang, Kyung-Soo Yang 2004 [3] ont effectué une étude numérique des structures tourbillonnaires autour d'un cube dans un canal. L'objectif de ce travail et d'étudier les caractéristiques des structures Tourbillonnaires cohérents produites par la présence de l'obstacle, y compris les Systems de vortex en fer à cheval en amont de l'obstacle, ainsi que les tourbillons latéraux au voisinage des deux faces latérales du cube. Ils ont constaté dans ce projet que l'approchement de l'écoulement vers l'obstacle empêche le gradient de pression adverse qui produit une séparation tridimensionnelle de la couche limite, ce qui entraîne la formation des tourbillons en fer à cheval. Ils ont trouvé aussi qu'avec l'augmentation du nombre de Reynolds, la structure de vortex en fer à cheval devient complexe et le nombre de tourbillons augmente par paires.

4 - Marcin Huptas, Witold Elsner 2008 [4] ont travaillé sur un écoulement stationnaire et in stationnaire autour deux obstacles carrés. Ils ont présenté avec l'utilisation du FLUENT des résultats numériques concernant l'écoulement autour d'un obstacle carré en premier cas, et autour deux obstacles carré sur même ligne en deuxième cas. Pour la première résolution, ils ont montré que l'épaisseur de la couche limite peut influencer sur la couche de cisaillement près de la paroi. Et pour la deuxième résolution, ils ont constaté que l'union des deux zones tourbillonnaires en aval du premier cube et en amont du deuxième rend l'écoulement plus turbulent.

5 - Charles-henri Bruneau, Iraj Mortazavi 2004 [5] ont effectué une étude numérique consiste au control passif de l'écoulement autour d'un cylindre carré dans les milieux poreux

. Ils ont utilisé la méthode de pénalisation procédée. Cette méthode est employée pour créer des milieux poreux intermédiaires entre les solides et les fluides afin de modifier le comportement de la couche limite. Cette étude a pour but d'éliminer l'inconvénient concernant la faible transition à la turbulence établie par la simulation numérique directe

(DNS). Cette étude est réalisée pour illustrer la perméabilité de la couche poreuse. Les résultats numériques révèlent la capacité des milieux poreux à la fois de régulariser l'écoulement et de réduire les forces de trainée jusqu'au 30%.

6- German Fillippini et al 2005 [6] ont étudié à l'aide de LES (large Eddy simulation) l'écoulement autour des cubes placés sur un canal. Le modèle de la structure sélective a été utilisé pour la détermination de la viscosité turbulente. L'écoulement autour de ces géométries à des phénomènes très complexes tels que des tourbillons en fer à cheval et les régions de recirculations. L'objectif principal de cette étude est d'identifier l'écoulement autour des cubes dans un canal pour un nombre de Reynolds égal à 22000. Les résultats obtenus sont en accord avec l'expérience à la fois qualitativement et quantitativement. Parmi les résultats trouvés, ils ont montré qu'avec l'augmentation du rapport S/H , tel que S est la distance entre les cubes, et H c'est le coté de cube ; le coefficient de trainée moyenne augmente au cours du second cube tandis qu'il est à peu près constante pour la première

Cube.

7- S.Krajnovic , L.Davidson 2000 [7] ont effectué une étude numérique sur un écoulement tridimensionnel autour d'un cube. Large Eddy Simulation (LES) a été utilisée pour visualiser l'écoulement. Dans ce travail, il a été montré que les expériences peuvent être simulés à partir des données obtenues en Large Eddy Simulation. On outre, avec l'augmentation des ressources de stockage et puissance de calcul, cette technique sera utilisée plus fréquemment dans le futur.

8-J-D.Kim , B.Havel, H.Hangan [8] sont intéressés à la recherche numérique et expérimentale sur le dynamique de sillage pour un prisme carré. La formation de la couche de cisaillement et les régions proche de sillage sont étudiées numériquement par Large Eddy

Simulation (LES) et expérimentalement par Laser Doppler Vélocimétrie (LDV). Ils ont constaté que la dynamique de vortex dans le sillage est semblable aux modèles proposés par Perry et ses collègues. Enfin, les résultats par simulation (LES) et d'autres par expérimentation (LDV) sont comparés pour la région de la paroi latérale du prisme qui indique la formation de couche de cisaillement et l'accord satisfaisant a été trouvé.

9- Gera. B et al 2010[9] Ont étudié avec CFD (Computational Fluid Dynamics)

L'écoulement in stationnaire 2D autour d'un obstacle carré. La simulation a été réalisée pour un écoulement autour d'un cylindre carré afin d'analyser le comportement de sillage. Le

Nombre de Reynolds a été pris de l'ordre de 50 à 250. La méthode des volumes finis a été

Utilisée avec une grille décalée. L'algorithme SIMPLE a été utilisé pour le couplage vitesse pression.

Le coefficient de portance et la vitesse dans la région de sillage ont été surveillés

Pour le calcul du nombre de Strouhal. Et enfin la variation du nombre de Strouhal avec le Nombre de Reynolds a été trouvée à partir de cette analyse.

10- Norberto Nigro et al 2005 [10] ont présenté une étude numérique sur l'écoulement autour d'un cube. Ils ont utilisé la simulation LES (Large Eddy Simulation). Les conditions

aux limites choisis sont pris de ceux suggérées par Rodi 2. Le nombre de Reynolds à environ de 40000. Les conditions de frontière incluent un écoulement en pleine maturité à l'admission, périodique sur les côtés Latéraux. Une pression atmosphérique à la sortie. Une condition de non-glissement est imposée sur la paroi du canal. La visualisation est employée pour clarifier le comportement de l'écoulement. Les résultats trouvés montrent un accord avec d'autres travaux. Leur présent travail consiste pratiquement à comment améliorer le modèle de LES, particulièrement pour remplacer le coefficient de (Smagorinsky) par une autre expression pour un réalisme plus physique, ou faire appel à la formulation mathématique (multiscale) pour obtenir plus informations sur la modélisation de la turbulence et les termes numériques de stabilisation.

11- Marcin Huptas, Witold Elsner 2008 [11] ont réalisé une simulation stationnaire et in stationnaire de l'écoulement autour deux obstacles carré. Les résultats numériques sont obtenus à l'aide du code commercial FLUENT pour analyser la structure de l'écoulement autour d'un cube simple d'une part, et autour deux cubes d'autre part. Ils ont constaté dans le premier cas que les effets clairs de l'épaisseur de la couche limite sur la couche de cisaillement dans le sillage sont décrits. Dans le deuxième cas, ils ont examiné d'une façon claire le décollement de tourbillon périodique en aval du premier cube et en amont du deuxième. Enfin, ils ont montré que la longueur de séparation est considérablement réduite avec l'augmentation du rapport $\frac{\delta}{H}$ tel que (δ) est l'épaisseur de la couche limite, et H est le côté du cube.

12- Jirapom Yojina et al 2010 [12] ont présenté une investigation aux configurations de l'écoulement dans un canal avec l'existence des obstacles carré. la modélisation est réalisé Par la méthode de Boltzmann (LBM) avec un rapport de blocage de 1/4. Le nombre de Reynolds est compris entre 1 et 300. Les lignes de courant et les profils de vitesse sont présentés pour indiquer le décollement de tourbillon. Le nombre de Strouhal est calculé pour caractériser le dynamique fréquentiel de l'écoulement. Les résultats obtenus prouvent que l'écoulement est laminaire à l'entrée, ensuite, ils ont constaté une transition périodique et instable sur l'écoulement. Cette transition est obtenue au fur et à mesure avec l'augmentation du nombre de Reynolds. On outre, avec un nombre suffisant d'itérations, ils ont montré que la périodicité de l'écoulement dans le sillage produit le décollement du tourbillon de van Karman.

13- Mohamed Omidyeganeh, Jalal Abedi 2008 [13] a mené une étude numérique d'un écoulement d'air autour d'un cube disposé dans un canal. Un code c++ a été employé pour résoudre les équations de continuité et de Navier Stocks en utilisant la simulation des grandes échelles (SGE) pour l'écoulement turbulent. la sous grille Smagorinsky -Lilly d'échelle (SGS) a été utilisé, qui peut être substitué par d'autres modèles facilement. L'algorithme PISO a été employé pour sa rapidité par rapport l'algorithme SIMPLE dans tous les cas. L'écoulement laminaire approche d'un cube dans le canal a été calculée et comparée avec les expériences de l'écoulement turbulent. Ils ont constaté un bon accord entre les simulations et les expériences. Un courant de retour est observé en amont de l'obstacle, ainsi qu'une vitesse longitudinale est amortie dans la partie inférieure du canal. Les vitesses négatives proches de la paroi ne sont pas prédit, ils ont trouvé qu'un raffinement autour du carré est nécessaire pour surmonter cette insuffisance.

14- Brahim Ben Baya, Taieb Lili 2008 [14] ont mené une étude comportant un écoulement tridimensionnel d'un fluide incompressible dans une cavité cubique doublement

entraînée par les faces adjacentes. Les calculs ont été menés à plusieurs valeurs de nombre de Reynolds, depuis des valeurs faibles jusqu'à 700. Ils ont constaté qu'avec un nombre de Reynolds faible, l'écoulement est stationnaire. Les caractéristiques de l'écoulement tridimensionnel ont été analysées à un nombre de Reynolds $Re=500$. L'analyse de l'évolution de l'écoulement montre qu'avec l'augmentation de Re au-delà d'une certaine valeur critique, l'écoulement devient instable et subit une bifurcation. Le nombre de Reynolds critique au-delà duquel l'écoulement devient instable a été déterminé.

15- Ankur Bajoria 2008 [15] ont réalisé un travail sur l'écoulement de vent autour d'une plaque carrée. Le logiciel informatique ADINA qui utilise la méthode des éléments finis a été employé pour la simulation. Le modèle de turbulence K- ϵ a été utilisé. Dans ce projet, il a augmenté le nombre de Reynolds afin de diminuer la viscosité de $0,01$ à $0,0001 \frac{N \cdot s}{m^2}$ dans trois modèles différents. Ceci aide à étudier l'effet de la non-linéarité et les diverses mesures qui sont exigées pour que la solution converge. Il a constaté que cette technique utilisée par le logiciel ADINA permet d'évaluer l'écoulement en aval de la plaque. Cette analyse peut être appliquée pendant la phase de conception pour améliorer la structure aérodynamique et pour réduire les forces. Parmi les résultats obtenus, il a trouvé qu'avec l'augmentation du nombre de Reynolds, les vortex en aval de la plaque sont parallèlement augmentés.

16- M.Farhadi , M.Rahnama 2006 [16] Ont effectué une simulation numérique avec LES (Large Eddy Simulation) d'un écoulement séparé au-dessus d'un cube fixé sur un canal. Le nombre de Reynolds utilisé est de 40000 . Ils ont montré que l'exécution de la fonction de paroi n'améliore pas considérablement les résultats. Mais généralement, avec une résolution brute de grille, il est possible d'obtenir quelques résultats raisonnables par rapport à l'expérience. Dans ce projet, ils ont utilisé trois modèles : SSF1, SSF2, MSSF, et ils ont trouvé qu'uniquement le modèle SSF2 qui peut reproduire l'accord avec l'expérience.

17- k.Hallek et al 2007 [17] ont effectué une simulation numérique bidimensionnelle d'un écoulement turbulent autour de deux cavités avec l'existence d'un obstacle carré sur la deuxième cavité. Ils ont montré pour le cas d'une seule cavité large que la structure assure la présence d'une grosse recirculation ou il y'a la naissance de deux tourbillons ; une petite au pied de la première marche et l'autre plus grande qui couvre toute la cavité avant de s'échapper après le recollement. Tandis que pour le deuxième cas, ils ont trouvé que ce phénomène a été bloqué sous l'effet de l'obstacle carré. L'étude des profils de vitesse, dans les différentes sections du domaine leur montre que le profil d'admission n'est plus laminaire.

18-W. Rodi, D.Lakehal 1997 [18] ont effectué un calcul de l'écoulement passant autour d'un cube en utilisant le modèle de turbulence de deux-couches. Pour le calcul proche de paroi, les fonctions standard de paroi ont été utilisées, comme l'approche de deux-couches dans laquelle la couche inférieure visqueuse est résolue avec un modèle d'une équation. Deux versions du modèle d'une équation ont été examinées. En outre, des calculs ont été effectués avec les modifications de Kato-laundar (1993) qui tend à éliminer la production excessive de la turbulence dans les régions de stagnations. Ils ont trouvé dans ce projet, que les modèles qui utilisent les fonctions de paroi ne peuvent pas reproduire les détails de la structure complexe de l'écoulement près du fond du canal, par exemple, le comportement du vortex en fer à cheval produit également en retard la séparation de la couche limite en amont de l'obstacle.

19- Hafida. N, Mohamed .S 2010 [19] a mené une étude numérique des effets des

obstacles carré sur le profil du vent. Cette étude leur permis d'évaluer les perturbations aérodynamiques engendrées par la présence d'un obstacle carré dans un champ de vitesse caractérisé par un profil incident parallèle et logarithmique. Les équations régissant l'écoulement du fluide supposé incompressible ont été résolues via des modèles numériques CFD (Computational Fluid Dynamics). Toutefois, les zones de recirculations, les longueurs de rattachement et les points de séparations ont été évalués en utilisant les modèles K- ϵ standard et K- ϵ réalisable pour des nombres de Reynolds de l'ordre de 10^4 et 10^5 . Dans ce travail, ils ont constaté que l'influence de l'obstacle sur l'écoulement du vent est clairement apparue. Ils ont montré l'évolution des forts gradients de vitesse qui se forment autour du bâtiment et près du sol.

20- F.S.Lien et al 2003 [20] ont mené une comparaison entre la simulation (RANS) et la simulation (LES) pour la prévision d'un écoulement turbulent autour d'une matrice des cubes.

Dans ce projet, ils ont illustré un vortex en fer à cheval en amont du cube qui enroule autour des parois latérales, et un vortex arqué dans le sillage. Des bulles minces de séparation au-dessus de cube et sur les parois latérales provenant du bord principal (de coté au vent) ont été raisonnablement bien capturés par tous les modèles. Ils ont constaté que parmi ces modèles ; localise Dynamics Model (LDM) utilisé par LES s'est avéré pour donner la meilleure conformité avec les mesures expérimentales détaillées et est le seul modèle, examiné ici, qui était capable de prévoir les procédés de séparation / rattachement sur toutes les surfaces des cubes.

I.2. Notion de basse en mécanique des fluides

La mécanique des fluides est un domaine de la physique consacré à l'étude du comportement des fluides (liquides, gaz et plasmas) et des forces internes associées. C'est une branche de la mécanique des milieux continus qui modélise la matière à l'aide de particules assez petites pour relever de l'analyse mathématique, mais assez grandes par rapport aux molécules pour être décrites par des fonctions continues.

Elle comprend deux sous-domaines : la statique des fluides, qui est l'étude des fluides au repos, et la dynamique des fluides, qui est l'étude des fluides en mouvement.

La mécanique des fluides a de nombreuses applications dans divers domaines comme l'ingénierie navale, la biomédecine, la météorologie, l'hydraulique, la géophysique, la turbomachine et l'aérodynamique [21].

I.3. Equation fondamentale

Les lois fondamentales de la mécanique et de la thermodynamique, c'est-à-dire les lois de conservation de la masse (équation de la continuité), de la quantité de mouvement (équation de la quantité de mouvement) et d'énergie (l'équation de l'énergie).

I.3.1. Equation de continuité

En mécanique des fluides, le principe de conservation de la masse peut être décrit par l'équation de continuité sous plusieurs formes différentes : locale conservative (dérivée en temps normale), locale non conservative (la dérivée en temps suit la particule dans son mouvement), ou intégrale. Suivant les problèmes posés, c'est l'une ou l'autre de ces équations qui pourra être retenue, toutes étant équivalentes.

On note ici :

$$\rho = \rho(\vec{x}, t) \quad (I.5)$$

Cette l'équation représente la masse volumique du fluide au point repéré par le vecteur \vec{x} à l' instant t

$$U = U(\vec{x}, t) \quad (I.6)$$

Cette l'équation représente la vitesse d'une particule de fluide se trouvant au point repéré \vec{x} par le vecteur \vec{x} à l' instant t

On considère alors un élément de volume parallélépipédique $dv = dx dy dz$ dont la masse est proportionnelle à la masse volumique du fluide et vaut donc $m = \rho dv$. De manière générale, la variation de masse pendant le temps dt peut se formuler :

$$dm = \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} dv dt \quad (I.7)$$

I.3.2. Equation de quantité de mouvement

En mécanique des fluides, l'équation de bilan de la quantité de mouvement découle du principe fondamental de la dynamique appliqué à un fluide. Avec l'équation de conservation de la masse et l'équation de la chaleur elle fait partie des équations de Navier-Stokes.

De façon générale, le bilan de la quantité de mouvement s'exprime sous la forme :

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \bar{\bar{T}} + \rho \vec{f} \quad (I.8)$$

On a t : représente le temps (unité SI : s).

ρ : désigne la masse volumique du fluide (unité SI : kgm^{-3}).

\vec{v} : $(V_1 \ V_2 \ V_3)$ Désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI : ms^{-1}).

P : désigne la pression (pascal).

$\bar{\bar{T}}$: $(T_{ij})_{ij}$ est le tenseur des contraintes visqueuses (unité SI : Pa).

\vec{f} : désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI : ms^{-2}).

L'opérateur \otimes désigne le produit dyadique : $\vec{u} \otimes \vec{v} = \vec{u} \vec{v}^t$

I.3.3. Equation d'énergie

L'équation d'énergie est basée sur l'équation thermodynamique, elle est utilisée sous la forme suivante :

$$\rho \cdot C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + q + \mu \Phi \quad (\text{I.9})$$

Où :

K : la conductivité thermique

C_p : La chaleur spécifique à pression constante.

ρ : La masse volumique

q : la génération de chaleur par unité de volume (densité de chaleur volumique)

μ : viscosité dynamique du fluide.

I.4. Régimes d'écoulement

I.4.1. Ecoulement laminaire et turbulent

Lorsqu'un fluide s'écoule dans un tuyau comme s'il glissait parallèlement aux parois qui le guident, on dit que l'écoulement est laminaire. La répartition des vitesses est bien régulière, de tels écoulements génèrent très peu de bruit à cause de leur structure de vitesse bien ordonnée. Lorsqu'un fluide s'écoule avec des variations de vitesse brusques et aléatoires en chaque point, on dit que l'écoulement est turbulent. De tels écoulements génèrent du bruit à cause de leur structure chaotique, ce qui se produit communément dans les forts remous d'un torrent de montagne que l'on peut entendre à plusieurs centaines de mètres [25].



Figure I.1 : Ecoulement laminaire et écoulement turbulent

✚ Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est une grandeur sans unité que l'on calcule pour déterminer la nature laminaire ou turbulente d'un écoulement [25].

$$R_e = \frac{\rho d v}{\eta} \quad (\text{I.10})$$

R_e : Nombre de Reynolds.

ρ : Masse volumique du fluide (en kg m^{-3})

d : Dimension caractéristique de l'écoulement (en m).

\mathbf{v} : vitesse moyenne d'écoulement (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

η : viscosité dynamique du fluide (en $\text{Pa}\cdot\text{s}$).

Dans le cas des canalisations :

- si $R_e < 2000$, l'écoulement est laminaire

-si $R_e > 2000$, l'écoulement est turbulent.

I.4.2. Ecoulement permanent et transitoire

Un écoulement est dit permanent, stationnaire ou établi lorsque les champs scalaires et vectoriels de masse volumique, de vitesse, de température, etc. sont constants dans le temps.

Dans le cadre de la description eulérienne utilisée dans ce qui suit, la dérivée partielle par rapport au temps des variables eulériennes est nulle : $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

On montrera que dans un écoulement permanent, il y a conservation du débit massique dans un tube de courant $q_m = 0$

Par opposition l'écoulement transitoire désigne un écoulement dont les propriétés varient dans le temps. Par exemple, quand on ouvre un robinet, l'écoulement n'est pas instantanément stable [26].

I.4.3. Ecoulement bidimensionnel et unidimensionnel

Un écoulement est dit bidimensionnel s'il admet un plan de symétrie. Pour pouvoir l'assimiler à un écoulement plan, il faut que les dérivées des grandeurs caractéristiques soient nulles dans les directions perpendiculaires au plan de symétrie

Un écoulement est dit unidimensionnel s'il peut être rapporté à une abscisse curviligne le long de laquelle s'effectue l'écoulement, Les composantes de la vitesse dans un plan orthogonal à l'abscisse curviligne doivent être nulles [26].

I.4.4. Ecoulement Rotationnel et irrotationnel

Un écoulement est dit irrotationnel lorsque :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{v} = \vec{\nabla} \wedge \vec{v} = \vec{0} \quad (\text{I.11})$$

L'écriture de l'accélération d'Euler est donc simplifiée :

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla(\vec{v} \cdot \vec{v}) + (\vec{\nabla} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{v} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla(\vec{v} \cdot \vec{v}) \quad (\text{I.12})$$

La conséquence de la condition $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{v} = \vec{0}$ est qu'il existe un potentiel (\vec{r}, t) car selon les propriétés de opérateurs vectoriels, $\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{grad}}) = 0$ Un écoulement irrotationnel est donc un écoulement à potentiel des vitesses et inversement.

Par opposition, un écoulement est dit rotationnel lorsque le rotationnel de la vitesse est différent du vecteur nul [26].

I.4.5. Ecoulement compressible et incompressible

Ce qui différencie un écoulement compressible d'un écoulement incompressible, c'est le

fait que des petites variations de masse volumique, de pression et de vitesse se propagent à l'intérieur du fluide à une vitesse qui est la célérité du son dans le milieu considéré [27].

Un écoulement incompressible est un déplacement d'une quantité de fluide dont la masse volumique est considérée comme constante au cours du processus, soit une dérivée particulière du champ scalaire de masse volumique négligeable (description eulérienne). Dans la pratique, on considère généralement que les écoulements liquides sont approximativement incompressibles et, pour les gaz, l'écoulement est considéré incompressible quand il a lieu à un nombre de Mach suffisamment faible (inférieur à 0,3, en première approximation) [28].

I.5. Notions de base en aérodynamique

I.5.1. Définition

Est une branche de la dynamique des fluides qui étudie les écoulements d'air, et leurs effets sur des éléments solides. Dans des domaines d'application tel que le design, des éléments d'aérodynamique sont repris du point de vue humain et subjectif, sous le nom d'aérodynamisme, avec des considérations, par exemple, sur les formes pouvant apparaître comme favorables à l'avancement.

L'aérodynamique s'applique aux déplacements des véhicules (aérodynes, automobiles, trains), aux systèmes de propulsion (hélices, rotors, turbines, turboréacteurs), aux installations fixes dans un air en mouvement subissant les effets du vent (bâtiments, tours, ponts) ou destinés à la production d'énergie (éoliennes), aux systèmes transformant une énergie aérodynamique en énergie mécanique et vice-versa (turbines, compresseurs) [29].

I.5.2. Forces et moment aérodynamique

Un aéronef en mouvement (un aérodyne) subit et développe des forces :

- force de gravité,
- force de propulsion,
- forces aérodynamiques (qui sont décomposées en portance et traînée).

Ces forces agissent à une certaine distance (bras de levier) par rapport à un point fixé arbitrairement (le centre de gravité, ou le foyer aérodynamique, ou un point situé au quart de la corde moyenne aérodynamique (CMA)).

Le produit d'une force par la distance donne un moment.

Selon les trois axes d'étude des mouvements : roulis (x), tangage (y), lacet (z), on aura trois moments :

- moment de roulis, avec son coefficient C_l (ne pas confondre avec le CL anglais avec L pour lift = portance)
- moment de tangage, avec son coefficient C_m
- moment de lacet, avec son coefficient C_n [30].

I.5.3. La portance et la traînée

❖ La portance

La portance aérodynamique est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement (au vent relatif). Cela concerne les aérodynes (engins plus denses que l'air) [31].

❖ La traînée

En mécanique des fluides, la traînée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide ou un gaz. Mathématiquement c'est la composante des efforts exercés sur le corps, dans le sens opposé à la vitesse relative du corps par rapport au fluide.

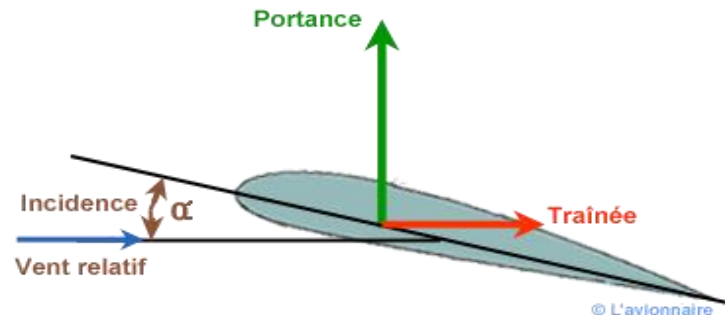


Figure I.2: la portance et la traînée

La traînée \vec{R}_x est l'une des composantes de la force aérodynamique \vec{R}_a . Cette force est parallèle au secteur du vent relatif.

La traînée sera donnée par l'équation :

$$R_x = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_x \quad (\text{I.13})$$

En réalité il y a plusieurs traînées :

- La traînée induite est une force de résistance à l'avancement induite par la portance.
- La traînée parasite composée de :
 - La traînée de frottement liée aux différences de vitesses entre les filets fluides (viscosité).
 - La traînée de forme apparaît dès qu'un objet a une certaine épaisseur.
- La traînée d'interférence est due à la jonction entre les différents composants [32].

La figure suivante présente le coefficient de traînée pour quelques obstacles.

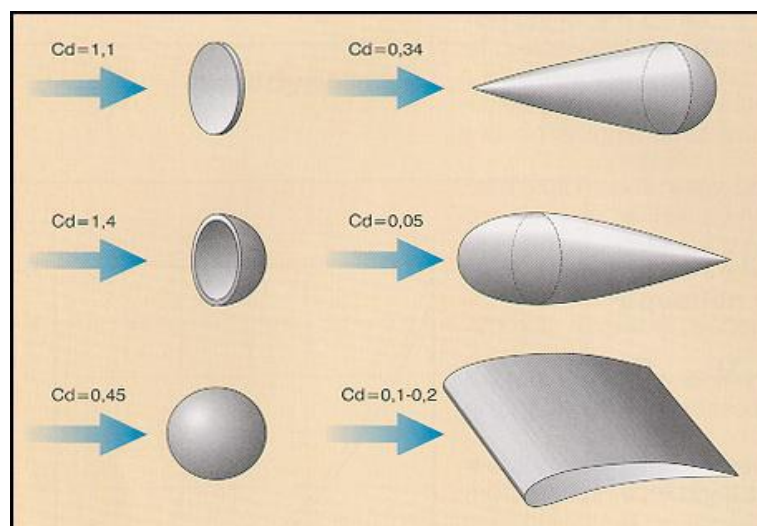


Figure I.3. Coefficient de traînée utile (C_d), pour quelques obstacles aérodynamiques [33].

I.6. Ecoulement autour des obstacles

L'écoulement autour des obstacles est un phénomène qui se produit fréquemment dans la pratique et nécessaire pour la conception mécanique et thermique de nombreux systèmes en engineering comme : avions, automobiles, bâtiments, composantes électroniques, les aubes de turbine...etc. L'indentification et étude des phénomènes hydro et aérodynamiques qui surgissent dans le sillage d'un obstacle restent un sujet d'intérêt dans divers domaines [22].

I.6.1. Ecoulement parfait autour des obstacles

La simplification du modèle de l'écoulement parfait consiste à négliger tous les phénomènes de transports diffusifs (notamment la viscosité, et aussi les diffusions de thermiques). Cela va donc nous simplifier un terme de l'équation de NS.

Un fluide parfait est rigoureusement sans viscosité : seul hélium supercritique est sans viscosité (effets quantiques). On ne va donc jamais pouvoir considérer nos fluides comme est très importante dans le développement de la propagation des ondes acoustiques. Enfin, le fait que l'on considère qu'il n'y a pas de viscosité change les conditions limites au niveau d'un obstacle pour notre fluide : si la vitesse normale à la surface doit être nulle, la vitesse tangentielle elle n'est plus soumise à aucune condition : $v \cdot n=0$,
Pas de condition v et t [35].

I.6.2. Ecoulement autour des obstacles de révolution simples

Des scientifiques ont obtenu des résultats expérimentaux intéressants avec les corps à géométrie simple (plan, cylindre, sphère), qui ont conduit à des conclusions fondamentales sur la distribution de la pression et le calcul de la traînée de pression. Ainsi, de 1910 à 1912, Eiffel a effectué de nombreux essais sur les corps à géométrie simple, pour différentes valeurs de nombre de Reynolds. Sans aborder les écoulements réels (visqueux) [22].

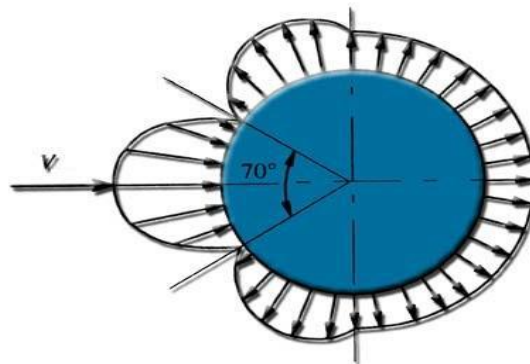


Figure. I.4. Ecoulement autour d'une sphère et Distribution de pression [22].

- **Écoulement autour d'un obstacle cylindre**

Les études traitant le problème de l'écoulement autour d'un cylindre ont suscité un intérêt considérable ces dernières années. Cet intérêt découle de la variété d'applications dans le domaine de l'ingénierie faisant appel à des formes cylindriques.

Malgré la simplicité de l'obstacle à sections circulaires ou à section carrées, l'écoulement fait intervenir des mécanismes complexes. Ceci a suscité beaucoup d'intérêt pour la communauté scientifique. L'écoulement autour d'un cylindre placé dans un écoulement uniforme établi peut prendre plusieurs formes. La forme du sillage peut être déterminée en premier lieu par le nombre de Reynolds, défini par :

$$R_e = \frac{U_{\infty} D}{\nu} \quad (\text{I.14})$$

Où U_{∞} représente la vitesse à l'infini amont, le diamètre du cylindre à section circulaire et 'A' Le coté du cylindre à section carrée avec :

$$A = \sqrt{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{I.15})$$

Et ' ν ' la viscosité cinématique du fluide considéré. Les changements structuraux dans le sillage sont dus à la transition des paramètres de l'écoulement tel que la couche limite ou l'écoulement cisailé. Ces transitions s'amorcent à des valeurs particulières du nombre de Reynolds R_e [34].

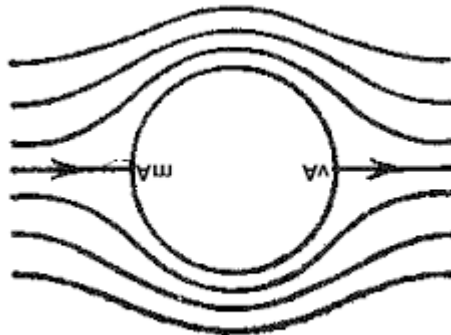


Figure. I.5. Ecoulement autour d'un Cylindre.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé des généralités sur les écoulements des turbulents autour les obstacles l'écoulement du vent autour les bâtiments, les écoulements dans les turbomachines... ect.

Chapitre II

Schéma d'étude autour obstacle et le maillage

II.1. Introduction

La mécanique des fluides numérique (MFN), plus souvent désignée par le terme anglais Computational Fluid Dynamics (CFD), consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont en général le résultat d'un compromis en termes de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisation disponibles, les équations résolues peuvent être les équations d'Euler, les équations de Navier-Stokes, etc.

La MFN a grandi d'une curiosité mathématique pour devenir un outil essentiel dans pratiquement toutes les branches de la dynamique des fluides, de la propulsion aérospatiale aux prédictions météorologiques en passant par le dessin des coques de bateaux. Dans le domaine de la recherche, cette approche est l'objet d'un effort important, car elle permet l'accès à toutes les informations instantanées (vitesse, pression, concentration) pour chaque point du domaine de calcul, pour un coût global généralement modique par rapport aux expériences correspondantes [36].

II.2. Intérêts de la CFD

Pour traiter un problème de mécanique des fluides, on peut le résoudre soit par une approche :

- Analytique : le grand avantage de cette approche est qu'elle permet d'avoir des solutions exactes. Cependant, elle est limitée pour des cas très simples en formulant un certain nombre d'hypothèses.

- Expérimentale : c'est sûrement l'approche qui représente le mieux la réalité. En contrepartie, elle est souvent difficile à mettre en œuvre et nécessite un certain temps pour résoudre tous les problèmes qu'on peut rencontrer. Sans oublier qu'elle peut devenir très vite très coûteuse.

- Numérique : elle permet de faire moins d'hypothèses qu'une approche analytique et permet de traiter des problèmes relativement complexes. De plus, elle peut être moins coûteuse qu'une approche expérimentale. Par contre, elle est limitée par l'ordre des méthodes numériques utilisées, la précision du modèle et les moyens de calcul mis en œuvre.

II.3. Méthodologies

De manière générale, la résolution d'un problème de MFN passe par trois grandes phases :

- la préparation du problème : ceci passe par la définition d'une géométrie, d'un maillage discrétisant le domaine de calcul, du choix des modèles et méthodes numériques employés.

- la résolution numérique du problème qui passe par l'exécution d'un programme informatique. Bien des problèmes suscitant un minimum d'intérêt nécessitent des ordinateurs aux très grandes capacités.

- l'exploitation des résultats : on vérifie d'abord leur cohérence, puis ils sont examinés afin d'apporter des réponses aux questions posées par le problème de MFN de départ.

L'exploitation des résultats passe le plus souvent par des logiciels de post-traitement

scientifique utilisés dans de nombreuses branches de la physique, ou bien par les modules de post-traitement disponibles dans certains logiciels de MFN commerciaux [36].

II.4. Méthode numérique

Une solution à ces équations aux dérivées partielles peut être calculée numériquement sur un domaine discrétisé par application de différentes méthodes : Méthode des différences finies Méthode des éléments finis et Méthode des volumes finis.

II.4.1. Méthode des différences finies

La méthode des différences finies a une importance historique et est simple à programmer. Elle n'est actuellement utilisée que dans quelques codes spécialisés.

II.4.2. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est utilisée dans l'analyse structurale des solides, mais est également applicable aux fluides. Cependant, la formulation à éléments finis nécessite des soins particuliers pour assurer une solution conservative.

II.4.3. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une approche commune utilisée dans les codes MFN. Les équations qui régissent le fluide sont résolues sur des volumes de contrôle discret [36].

II.5. Mise en équations du problème

La méthode consiste à résoudre des équations aux dérivées partielles (ÉDP) dites équations de transport et de conservation, et dont la forme générale est, pour une quantité scalaire ϕ donnée :

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_V \rho \phi dV + \oint_S \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint_S D_\phi \vec{\nabla} \phi \cdot d\vec{A} + \oint_V S_\phi dV \quad (\text{II.1})$$

Où : ϕ peut désigner :

- (le nombre un) dans le cas de l'équation de continuité.
- les composantes de la vectrice vitesse u , v et w .
- l'enthalpie h .
- V est le volume concerné et S est la surface délimitant ce volume.
- dV est le volume d'un élément infinitésimal de V et $d\vec{A}$ le vecteur aire d'un élément infinitésimal de S .
- $\vec{\nabla}$ est l'opérateur nabla.
- ρ est la masse volumique .
- \vec{v} est le vecteur vitesse eulérienne d'une particule fluide.
- D_ϕ est un coefficient de diffusion.

$-S_\varphi$ est un terme source, ou puits [36].

II.5.1. Equation de continuité

En prenant $\varphi = 1$, on trouve :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{II.2})$$

Pour un fluide Newtonien incompressible ($\rho = \text{cte}$), l'équation se réduit à :

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{II.3})$$

II.5.2. Equation de quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes)

En prenant $\varphi = u$ (composante de la vectrice vitesse sur l'axe x de vecteur directeur unitaire \vec{i}) on trouve :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial (\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (\text{II.4})$$

Où :

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i)$: Représente le taux de variation de la quantité de mouvement.

$\frac{\partial (\rho U_j U_i)}{\partial x_j}$: représente le taux net de transport de quantité de mouvement suivant la direction i, par mouvement du fluide.

$\frac{\partial P}{\partial x_i}$: représente les forces dues à la pression.

$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right]$: Représente les forces nettes de viscosité.

F_i : Représente les forces volumiques suivant la direction i.

L'exemple le plus courant des forces volumiques est celui de la pesanteur, pour laquelle

$$\vec{F} = \vec{\rho} \cdot \vec{g} \quad (\text{II.5})$$

II.5.3. Equation d'énergie

L'équation d'énergie est basée sur l'équation thermodynamique, elle est utilisée sous la forme suivante :

$$\rho \cdot C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + q + \mu \Phi \quad (\text{II.6})$$

Où :

K : la conductivité thermique

C_p : La chaleur spécifique à pression constante.

ρ : La masse volumique

Q : la génération de chaleur par unité de volume (densité de chaleur volumique)

μ : viscosité dynamique du fluide.

Φ : la dissipation visqueuse.

II.5.4. Modèle de turbulence k- ϵ

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 définit par équation suivants [38] :

$$\overline{-\rho U_i' U_j'} = U_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] : \text{est le tenseur de déformation.}$$

$$\text{Ou } K = \frac{\overline{U_i'^2}}{2} \text{ représente l'énergie cinétique turbulente.}$$

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 $(L = \frac{K^{\frac{3}{2}}}{\epsilon})$, et donnée par [38] :

$$V_t = C_\mu \sqrt{K} \frac{K^{\frac{3}{2}}}{\epsilon} = C_\mu \frac{K^2}{\epsilon} \quad (\text{II.8})$$

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

K et ϵ sont obtenus à partir de leur équation de transport présentée ci-dessous.

II.5.5. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho K U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\mu_T}{\sigma_K} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_K - \rho \epsilon \quad (\text{II.9})$$

II.5.6. Equation de transport du taux de dissipation ϵ de l'énergie cinétique turbulent

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{K} G_K - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{K} \tag{II.10}$$

σ_k Et σ_ϵ , 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.

$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_\epsilon = 1.3, \sigma_K = 1.0$ Ces valeurs sont prises par défaut par Fluent.

Le terme de production G_K et donnée par :

$$G_K = -\overline{\rho U'_i U'_j} \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} = \rho V_t \left[\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \tag{II.11}$$

Les équations des paramètres du champ moyen et turbulent sont résumées dans les tableaux suivant :

Equation	Φ	T_Φ	S_Φ
Continuité	1	0	0
Quantité de Mouvement	U_i	$\mu + \mu_t$	$\left(-\frac{\partial p}{\partial x_i} \right)$

Tableau II.1. Equation des paramètres moyens [38].

Equation	Φ	T_Φ	S_Φ
Energie Cinétique turbulente	K	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K}$	$G_K + \rho \epsilon$
Taux de Dissipation	ϵ	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{K} G_K - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{K}$

Tableau II.2. Equation des paramètres turbulents pour le modèle K- ϵ [38].

II.6. Gambit

Le logiciel Gambit est un mailer 2D / 3D pré- processeur qui permet de mailler des domaines de géométries d'un problème de CFD. Il génère des fichiers. msh pour fluent.

Gambit regroupe trois fonctions : définition de la géométrie du problème (construction 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.

Les options de génération de maillage de GAMBIT offrent une flexibilité de choix. La géométrie peut être décomposé en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon

GAMBIT génère automatique un maillage non structure adapté au type de géométrie construite. Les défauts sont détectés à l'aide de son interface comportant plusieurs fenêtres d'outils de création, génération, vérification du maillage du modèle étudié et l'incorporation des conditions aux limites.

II.7. Présentation la géométrie

II.7.1. Premier cas:

La géométrie du problème étudié, Dans ce cas, nous dessinons un rectangle avec trois obstacles carrés à l'intérieur, la même distance entre les obstacles. La hauteur du rectangle est de 6 cm et la largeur est de 35 cm. Quant à les obstacles la hauteur est de 1/6 et la largeur est de 1cm, Comme représenté sur le tableau II.1.

portion	Dimension (cm)
Longueur (L)	35
Hauteur de rectangulaire	6
Longueur d'obstacle	1
Distance entre obstacle	8
Nombre d'obstacle	3

Tableau II.3. Données géométriques du rectangulaire étudié.

Nous relierons les points pour former des lignes, Comme représenté sur la figure (II.2)

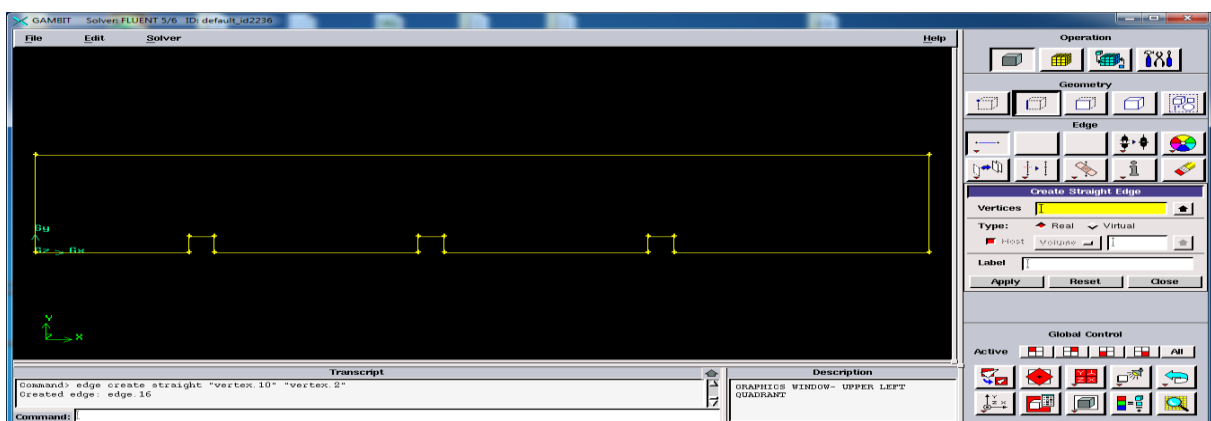


Figure II.1. Création des lignes de la géométrie (première cas).

Nous transformons toutes les lignes en une face, Comme représenté sur la figure II.3.

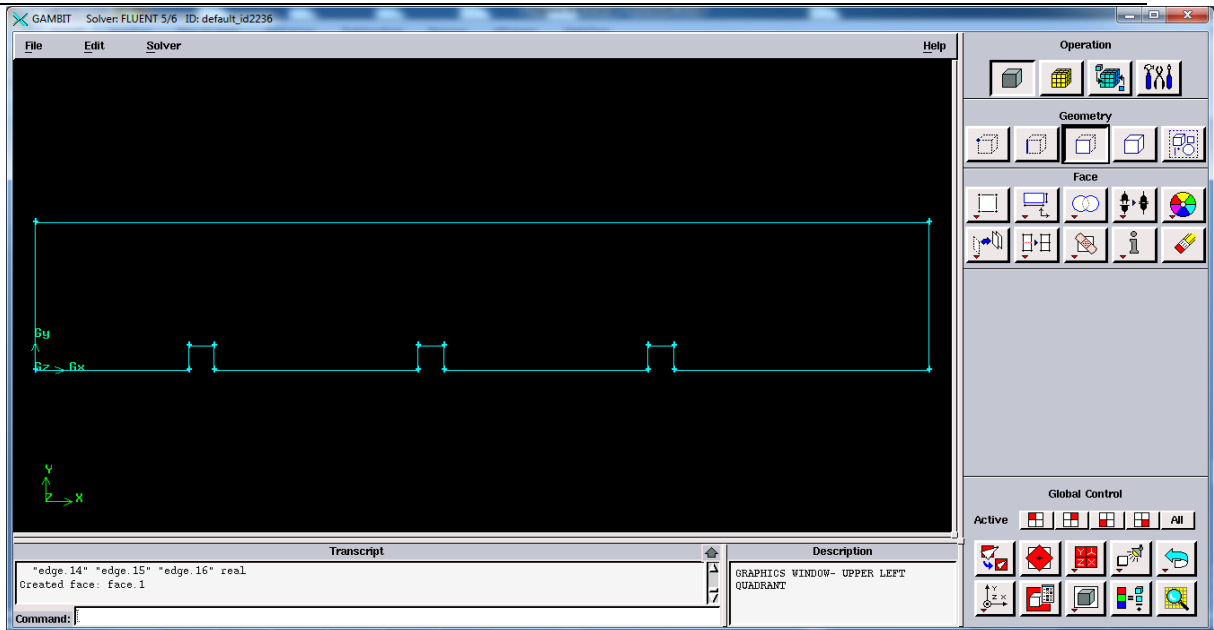


Figure II.2. Création de face de la géométrie (première cas).

Ensuite, nous faisons maillés la géométrie Comme représenté sur la figure II.4.

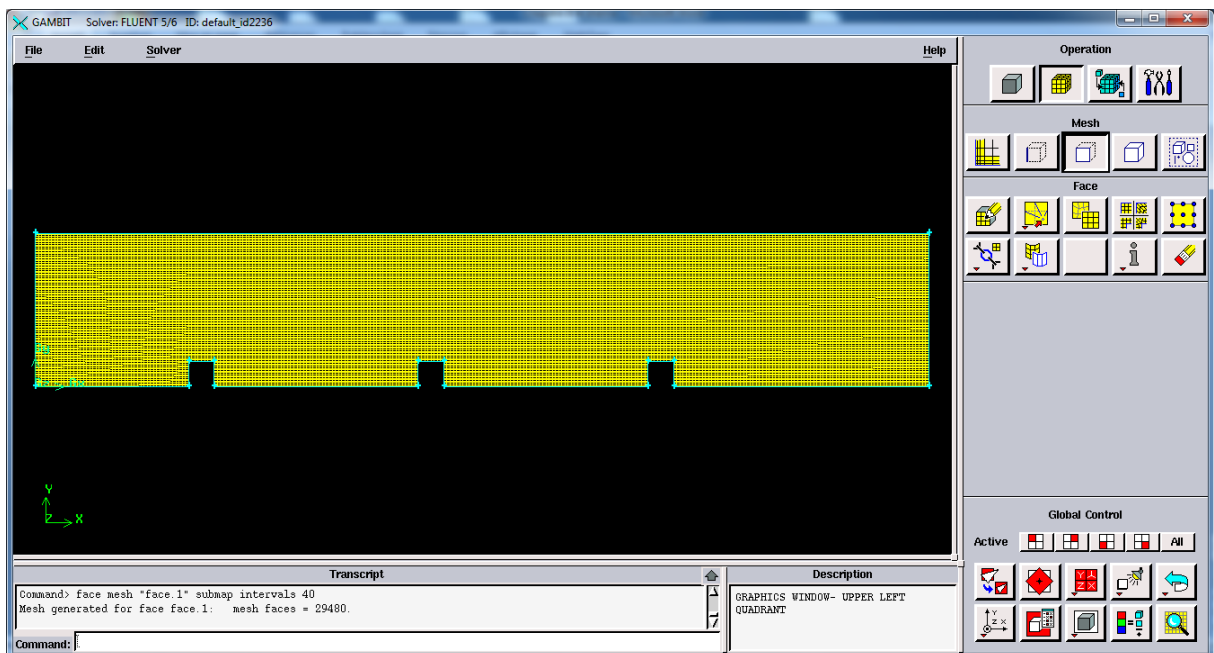


Figure II.3. Maillage de la géométrie (première cas).

- **Condition aux limites et définition des domaines**

Ce menu permet de définir les conditions physiques aux limites du domaine, à savoir si les lignes (en 2D) ou les faces (en 3D) sont des entrées, des sorties de fluide, des surfaces libres, des axes de symétries, des murs...

Ici on ne définit que la nature, les valeurs de ces conditions (vitesses, températures...) seront à définir sous Fluent.

Dans cette géométrie, nous avons choisi comme le montre la figure II.4.

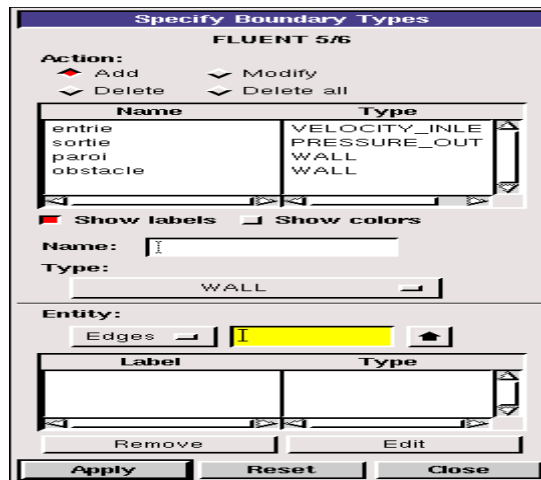


Figure II.4. Condition aux limites (première cas).

• **Exportation du maillage de Gambit**

Une fois que la géométrie a été créée, que les conditions aux limites ont été définies, il faut exporter le maillage, en point .m sh pour que Fluent soit capable de le lire et de l'utiliser.

On peut ensuite fermer Gambit en sauvegardant la session (si on souhaite la rouvrir) et lancer Fluent.

II.7.2. Deuxième cas

Dans ce cas, nous dessinons un rectangle avec trois obstacles carrés à l'intérieur, Pas la même distance entre les obstacles. La hauteur du rectangle est de 6 cm et la largeur est de 40 cm. Quant aux obstacles la hauteur est de 2/6 et la largeur est de 2 cm, Comme représenté sur la tableau II.2.

Portion	Dimension (cm)
Longueur (L)	40
Hauteur de rectangular	6
Longueur d'obstacle	2
Distance entre obstacle	10 et 15
Nombre d'obstacle	3

Tableau II.4. Données géométriques du rectangulaire étudié deuxième cas.

Nous relient les points pour former des lignes, Comme représenté sur la Figure II.8.

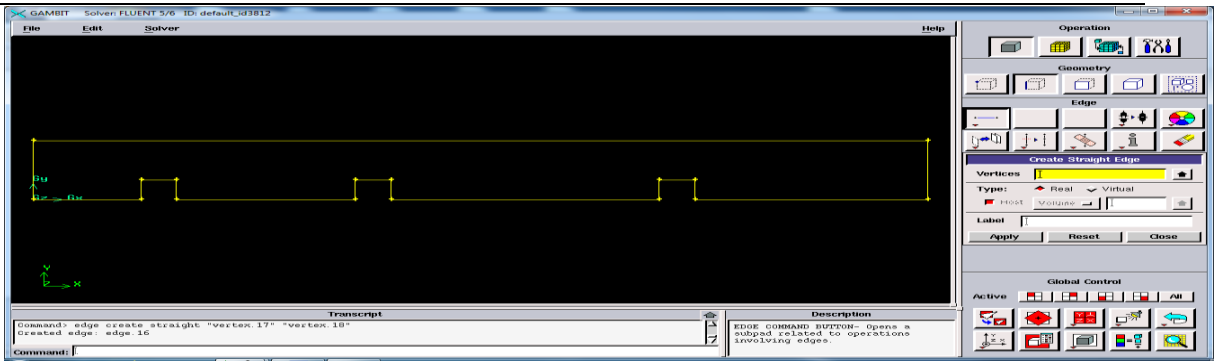


Figure II.5. Création des lignes de la géométrie (deuxième cas).

Nous transformons toutes les lignes en une face, Comme représenté sur la Figure II.9.

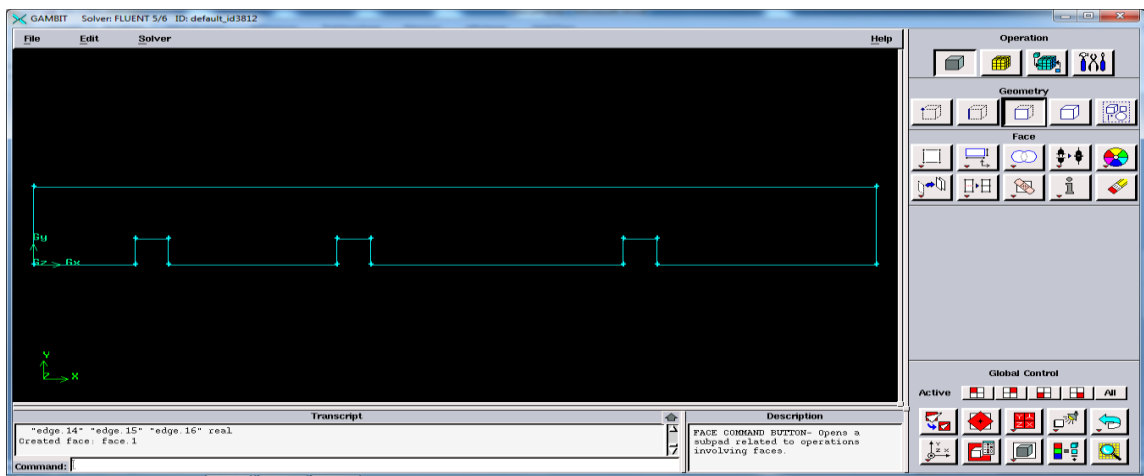


Figure II.6. Création de face de la géométrie (deuxième cas).

Ensuite, nous faisons maillés la géométrie Comme représenté sur la Figure II.10.

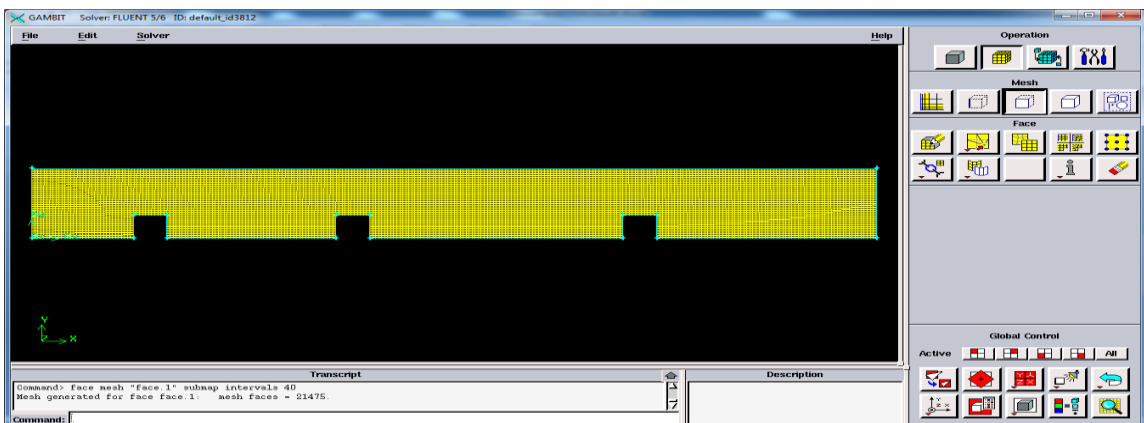


Figure II.7. Maillage de la géométrie (deuxième cas).

Dans la condition aux limites dans le deuxième cas le même premier cas.

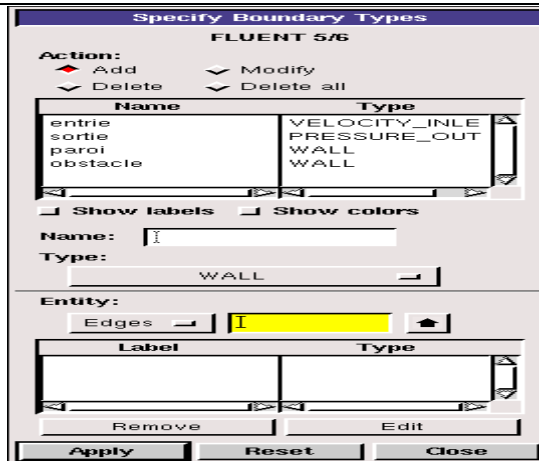


Figure II.8. Condition aux limites (deuxième cas).

II.7.3. Troisième cas

Dans ce cas, nous dessinons un rectangle avec quatre obstacles carrés à l'intérieur, Pas la même distance entre les obstacles. La hauteur du rectangle est de 6 cm et la largeur est de 80cm. Quant à les obstacles la hauteur est de 2/6 et la largeur est de 3 cm, Comme représenté sur le tableau II.3.

Portion	Dimension (cm)
Longueur (L)	80
Hauteur de rectangulaire	6
Longueur d'obstacle	3
Distance entre obstacle	9 et 17
Nombre d'obstacle	4

Tableau II.5. Données géométriques du rectangulaire étudié deuxième cas.

Nous relient les points pour former des lignes, Comme représenté sur la Figure II.14.

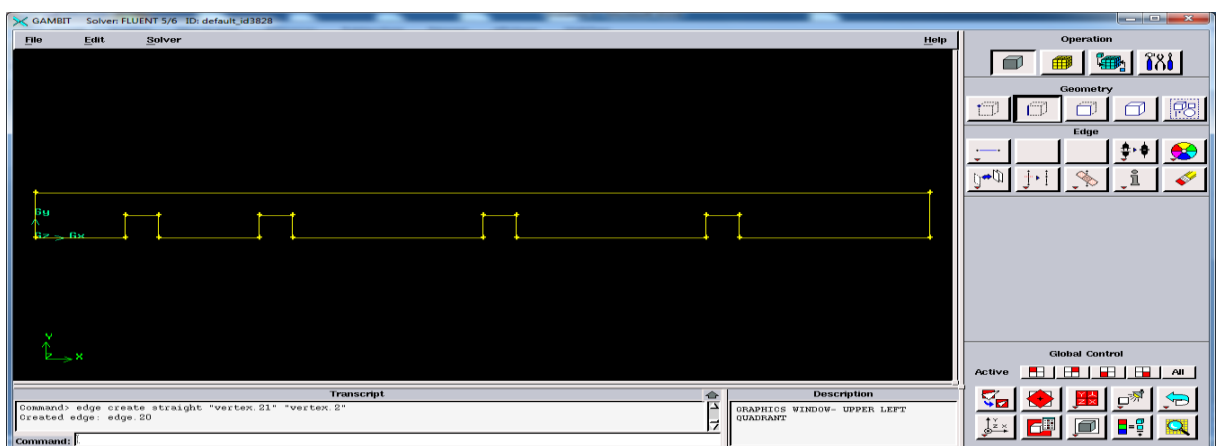


Figure II.9. Création des lignes de la géométrie (troisième cas).

Même chose dans le premier cas comme représenté sur la figure II.15.

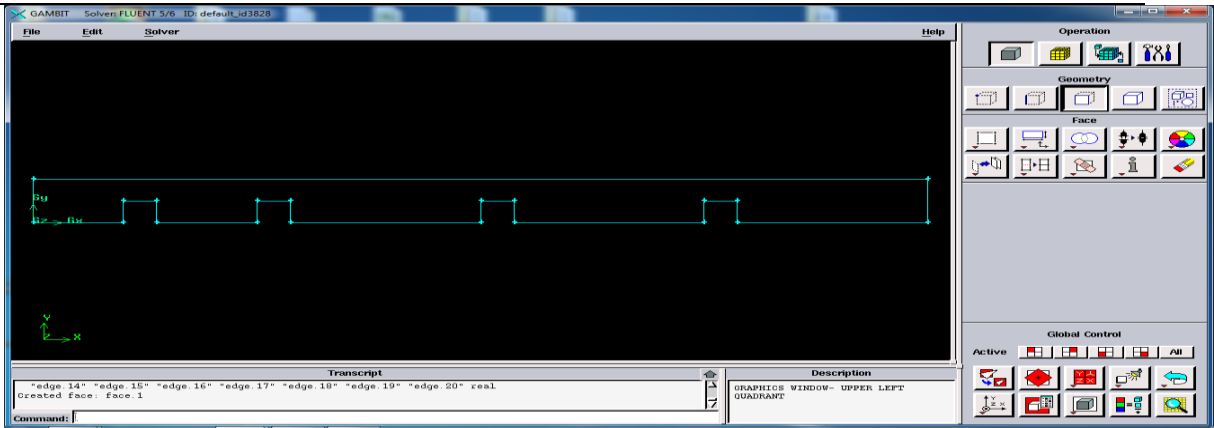


Figure II.10. Création de face de la géométrie (troisième cas).

Pour le maillage être comme sur la figure II.16.

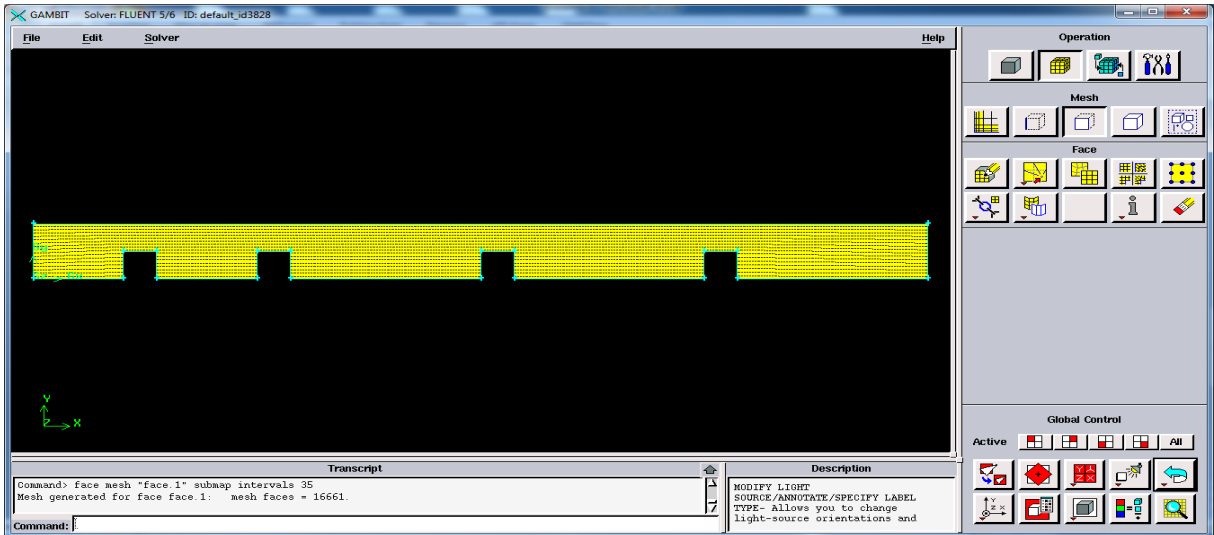


Figure II.11. Maillage de la géométrie (troisième cas).

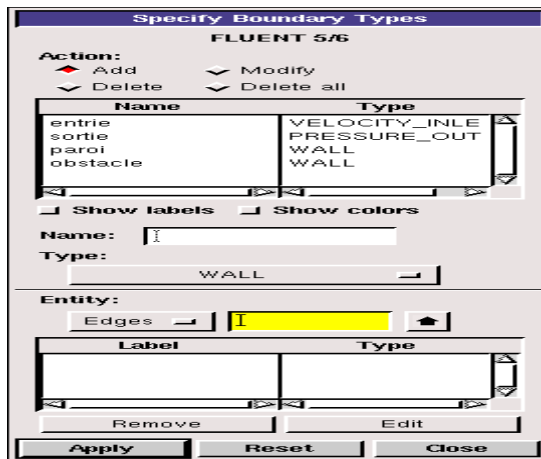


Figure II.12. Condition aux limites (troisième cas).

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté Gambit, ainsi que les étapes de simulation en utilisant les préprocesseurs Gambit pour créer la Géométrie et maillage, nous avons dessiné trois Géométrie, différentes dans la longueur et la largeur du rectangle et à l'intérieur des obstacles carrée, et cela varie d'un cas à l'autre avec une différence dans la longueur et la largeur et le nombre des obstacles. Les Géométries dans Gambit seront étude sur le code Fluent dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Présentation de Logiciel Fluent

III.1. Introduction

Fluent est un logiciel de modélisation en mécanique des fluides. Ce logiciel est le solveur. Le maillage doit être réalisé avec un meilleur, Gambit par exemple, qui est réalisé par le même éditeur. Le paramétrage se fait par une interface graphique.

III.2. Généralités de Fluent

Fluent est sans doute le logiciel de simulation numérique de mécanique des fluides le plus abouti du marché. Il est même depuis peu intégré dans la suite de logiciel de simulation ANSYS. Sa force vient du très grand nombre de modèles disponibles, pouvant faire face à de très nombreux aspects de la mécanique des fluides Ecoulement diphasique (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, K- ϵ , K- ω , Reynolds stress...), combustion (pré mélangé et non pré mélangé), transport de particules, écoulement en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage... Les schémas temporels et spatiaux peuvent de plus être modifiés pour améliorer la convergence. Il est de plus parallélisé et permet donc de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dual coré, plateforme multi CPU).

FLUENT peut modéliser les phénomènes suivants :

- Écoulement dans des géométries 2D ou 3D en utilisant des maillages adaptatifs non structurés
- Analyse stationnaire ou in stationnaire
- Écoulement incompressible ou compressible
- Écoulement non-visqueux, laminaire ou turbulent
- Écoulement Newtonien ou non-Newtonien
- Transferts de chaleur par convection, naturelle ou forcée ...etc.

III.3. Principales étapes de simulation sous FLUENT

- Importation de la géométrie (le nom de fichier. msh).
- Vérification du maillage importé.
- Lissage du maillage (Smooth and swap the grid)
- Vérification de l'échelle.
- Choix du solveur.
- Affichage de la grille.
- Autorisation du transfert de chaleur.
- Choix du modèle de turbulence (dans le cas d'un écoulement turbulent)
- Définition des caractéristiques du fluide.
- Operating conditions.
- Conditions aux limites usuelles : Velocity inlet, pressure inlets, Mass flow inlets, pressure outlet, outflow, Wall ...
- Choix des critères de convergence.
- Initialisation des calculs.
- Sauvegarde du fichier le nom de fichier. Cas

III.4. Procédure du calcul numérique

La procédure numérique se conçoit en deux étapes, le maillage et le calcul itératif.

III.4.1. Géométrie et maillage

Dans ce travail, la géométrie du capteur étudié a été conçue en se basant sur ses dimensions réelles en utilisant le logiciel GAMBIT. La procédure de création de maillage a été réalisée conformément au protocole suivant :

- Création du domaine physique 2D qui représente un rectangle avec obstacle selon les dimensions choisies.
- Diviser la surface (rectangle) en quatre parties afin de considérer les conditions aux limites appropriées dans chaque section (zone d'entrée, zone utile (paroi et obstacle) et zone de sortie).
- Faire une étude de l'indépendance de maillage afin de sélectionner un maillage convenable en utilisant un type de maillage structuré.
- Affectation des conditions aux limites en toutes les zones.

III.4.2. Calcul itératif

Une fois le maillage du domaine d'étude réalisé, nous avons procédé aux calculs selon les étapes suivantes :

- Sélection l'équation de l'énergie afin choisir la température.
- Choix le régime de l'écoulement : régime laminaire ou régime turbulent.
- Choix le modèle de turbulence $k - \epsilon$ Standard pour le cas de l'écoulement turbulent.
- Choix la nature de l'écoulement, écoulement compressible (*Density based*) ou écoulement incompressible (*Pressure based*). Dans notre cas, l'écoulement est incompressible puisque la vitesse du fluide ne dépassera jamais la vitesse du son.
- Choix des caractéristiques des conditions aux limites appropriées à l'entrée et obstacle et paroi et à la sortie du domaine de calcul.
- Choix le fluide caloporteur (l'air) et ses propriétés physico-chimiques.
- Choix le schéma implicite dans la résolution des équations de transport, car cette formulation résout les équations de continuité de quantité de mouvement et de l'énergie, séquentiellement, c'est-à-dire isolées les unes des autres.

- Choix le solveur de couplage vitesse-pression (algorithme de résolution). Dans notre cas, l'algorithme *SIMPLE* a été utilisé.
- Choix un schéma d'interpolation de la pression, car la pression n'est pas connue sur les interfaces des mailles (elle est stockée sur les nœuds). Plusieurs schémas existent. Dans notre cas, le schéma standard a été utilisé.
- Choix un critère de convergence, dans notre cas, nous avons choisi une valeur de l'ordre 10^{-6} pour toutes les variables du problème. En utilisant cette valeur, le calcul sera long, mais plus précise.
- Lancer le calcul itératif jusqu'à la convergence.

On peut résumer les étapes de la résolution du calcul numérique dans l'organigramme illustré sur la Figure III.1.

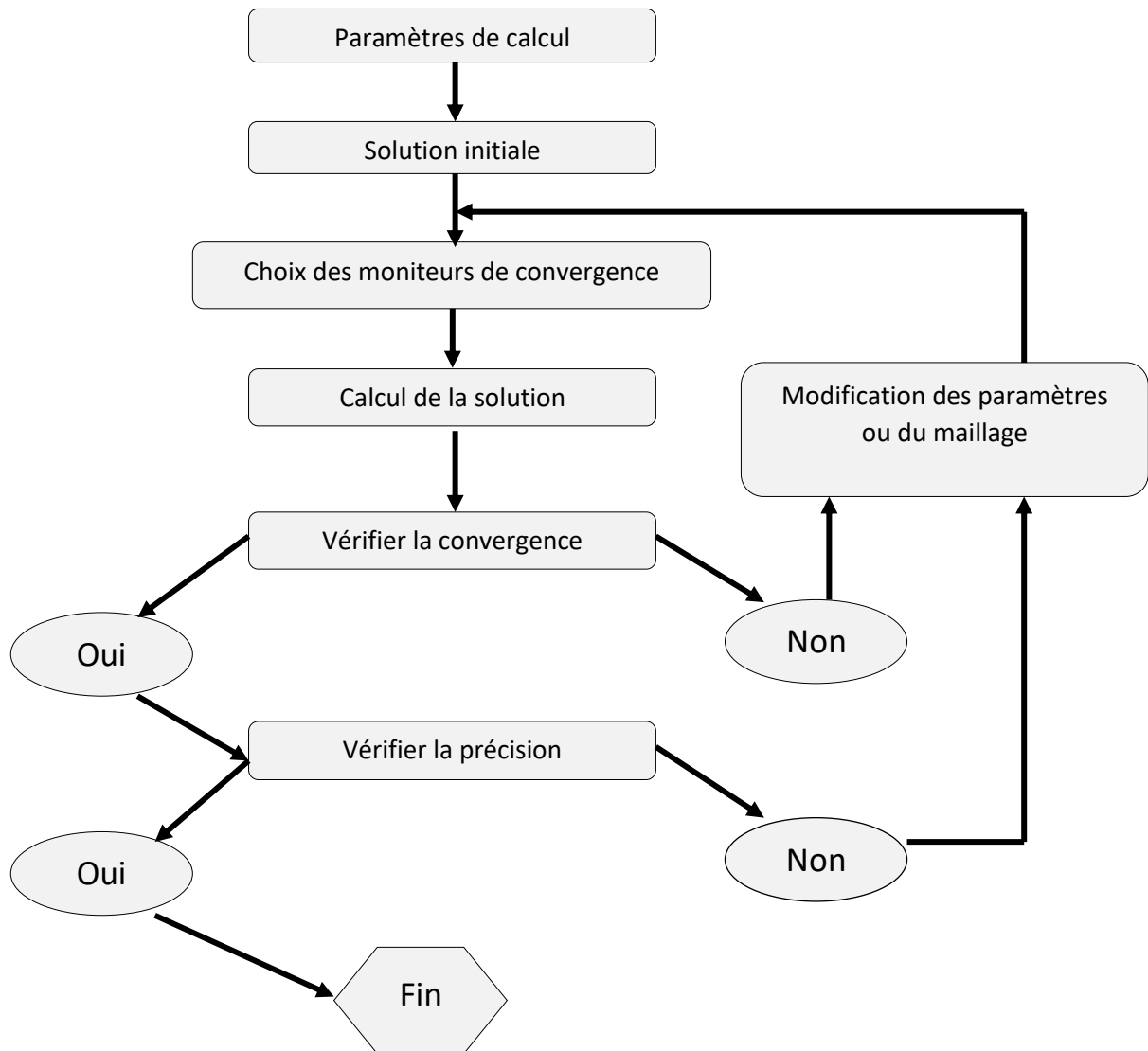


Figure III.1. Organigramme de calcul

III.5. Démarrage de FLUENT

La première chose à faire en entrant fluent est de choisir le type de résolution que vous devez faire couramment : résolution 2D et 3D. Dans les cas que nous étudions nous choisirons 2d Voici.

Les étapes de simulation dans Fluent :

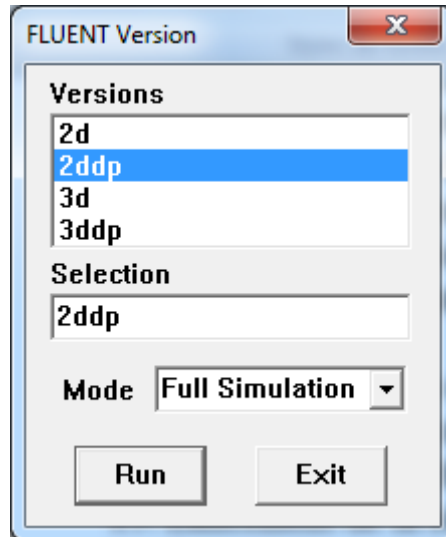


Figure III.2. Démarrage Fluent.

III.6. Lissage du maillage

Pour s'assurer de la qualité du maillage.

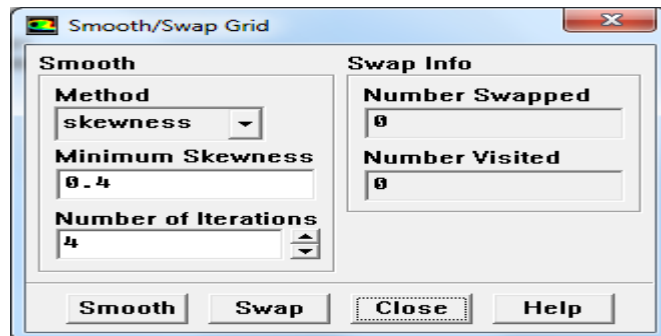


Figure III.3. Lissage du maillage.

III.7. Vérification de l'échelle

Pour vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

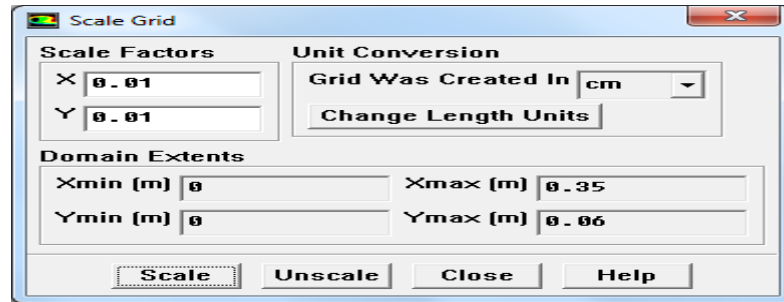


Figure III.4. Vérifiez les dimensions.

III.8. Choix du solveur

Define→Models→Solver

Les choix sont : Coupled-Implicit, Coupled-Explicit, ou Segregated (Implicite)

-Les Coupled solvers sont recommandés si une forte inter-dépendance existe entre la densité, l'énergie, les moments, et/ou les espèces. ex. : écoulement compressible à haute vitesse ou les écoulements réactifs.

En général, le solveur Coupled-Implicit est recommandé par rapport au solveur coupled-explicit.

Temps nécessaire : Le solveur implicite est 2 fois plus rapide (en gros).

Mémoire nécessaire : Le solveur implicite nécessite deux fois plus de mémoire que les solveurs coupled-explicit ou segregated-implicite!

-Le solveur Coupled-Explicit doit être utilisé uniquement pour les écoulements in stationnaires quand le temps caractéristique du problème est du même ordre que les phénomènes acoustiques. e.g. suivi d'onde de choc.

-Le solveur Segregated (implicite) est préférable dans tous les autres cas. Nécessite moins de mémoire que le solveur coupled-implicite. L'approche Segregated offre de la flexibilité dans le traitement de la solution.

Dans un cas nous avons choisi comme indiqué sur la figure III.5.

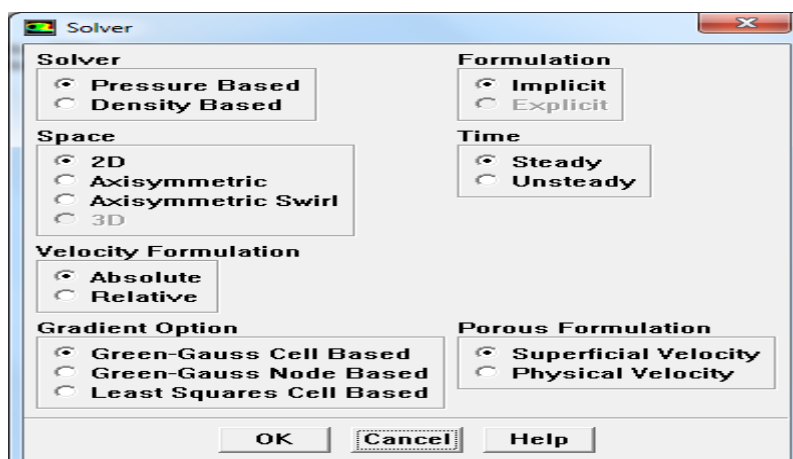


Figure III.5. Choix de solveur.

III.9. Autorisation du transfert de chaleur

Cette fenêtre permet d'autoriser les transferts de chaleur pour trouver les distributions de température en découplant l'équation d'énergie de celle de continuité.

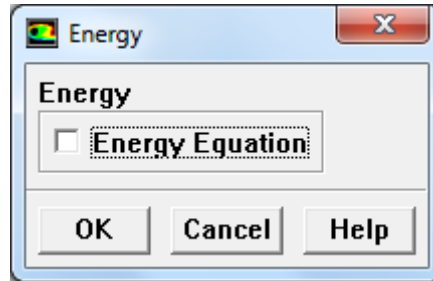


Figure III.6. Choix de solver.

III.10. Affichage de la grille

Pour afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies aux préalables dans Gambit.



Figure III.7. la grille.

III.11. Définition des caractéristiques du fluide

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.

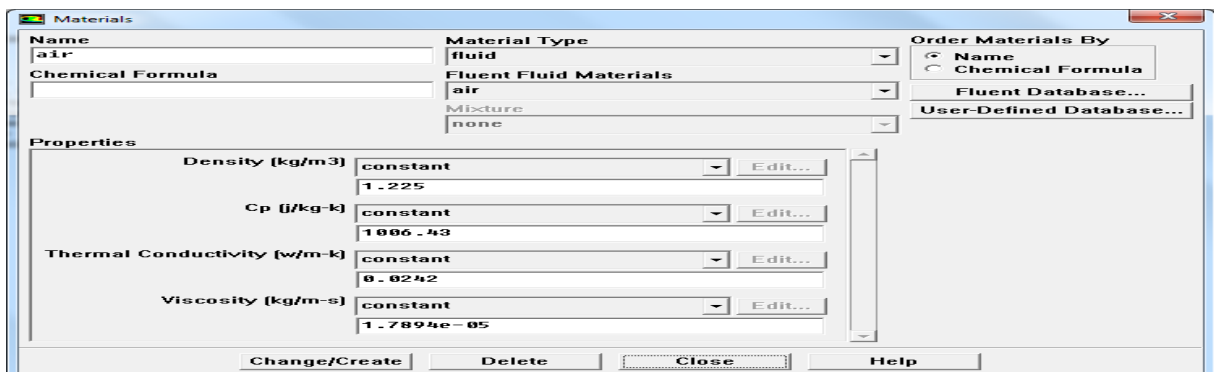


Figure III.8. Les caractéristiques du fluide.

III.12. Operating conditions

Define→operating conditions

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence 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 les écoulements à faible nombre de mach. La relation liant la pression absolue à la gauge pressure est donnée par :

$$P_{abs} = P_{op} + P_{gauge} \quad (III.1)$$

Tout ce qui doit être travaillé est sélectionné comme indiqué dans la figure III.9.

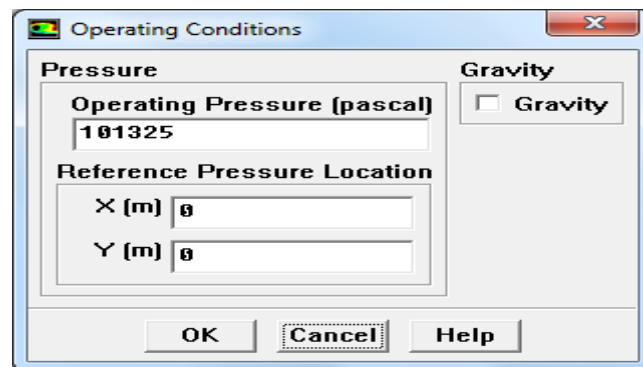


Figure III.9. Operating conditions.

III.13. Conditions aux limites usuelles

Define→Boundary conditions

Il faut fixer les conditions aux limites :

-Velocity inlet :

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

-Pressure Inlet :

Utilisée pour les écoulements compressibles incompressibles.

-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.

-Pressure Outlet :

Spécifié 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 d'Outflow a souvent comme conséquence une meilleure convergence.

-Outflow :

L'Outflow est utilisée 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 in stationnaire avec variation de la densité.

-Wall :

Est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides. En général on utilise les propriétés d'une paroi lisse

Roughness Height =0 et Roughness Constant =0.5

Dans un cas nous avons choisi quatre zones si entrée, sortie, obstacle et paroi correspondent à chacun à un type.

Nous le remarquons sur la figure III.10.

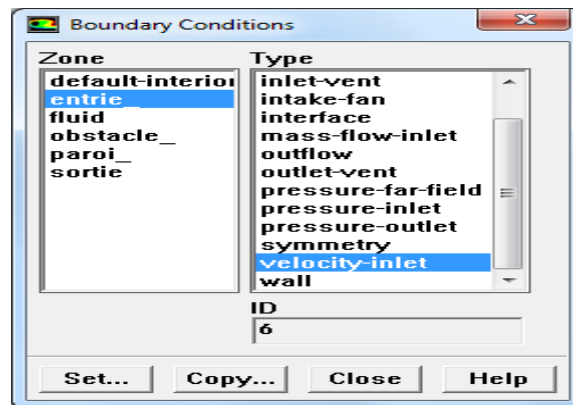


Figure III.10. Bondary conditions.

III.14. Choix des schémas de contrôle de la solution

Controls → Solution

Les schémas de discrétisation influent la qualité de la solution, le choix adéquat est conditionné par les schémas de pression, de moment et de couplage pression vitesse.

III.14.1. Schémas d'interpolation pour les pressions

Des options supplémentaires sont disponibles pour calculer la pression aux faces en utilisant le solveur "segregated".

-Standard : Schéma par défaut ; précision réduite pour les écoulements avec de forts gradients de pression normaux à la surface près des frontières.

-Linear : À utiliser quand les autres options ont des difficultés de convergence ou des comportements non-physiques.

-Second-Order : À utiliser pour les écoulements compressibles ; ne pas utiliser dans le matériau poreux, discontinuités, turbines

-Body Force Weighted : À utiliser quand les forces de gravité sont importantes, e.g. convection naturelle à Ra élevé ou écoulements fortement swirlés.

-PRESTO : À utiliser avec les écoulements swirlés, les milieux poreux ou les domaines fortement courbés.

III.14.2. Schémas d'interpolation pour les Moments

FLUENT propose de nombreux schéma d'interpolation :

- First-Order Upwind Schème : Facile à converger mais seulement au premier ordre.

-Power Law Schème : Plus précis que le premier ordre quand $Re_{cell} < 5$
(Type. Eclat. Bas Reynolds).

-Second-Order Upwind Scheme : Utilise des plus grands 'stencil' pour une précision au 2ème ordre, essentiel avec tri/tet maillage ou quand l'écoulement n'est pas aligné avec le maillage -----Quadratic Upwind Interpolation (QUICK) : Appliquer avec maillage quad/hex et hybrides (pas au tri), utile pour les écoulements rotating/swirling, précis à l'ordre 3 sur un maillage régulier.

III.14.3. Couplage pression vitesse

Le couplage pression-vitesse se réfère à la manière dont la conservation de la masse est prise en compte quand on utilise le « segregated solver ». Trois méthodes possibles :

-SIMPLE : Schéma par défaut, robuste

-SIMPLEC : Convergence plus rapide pour les problèmes simples (par exemple des écoulements laminaires sans modèles physiques).

-PISO : Utile pour les écoulements instationnaires ou pour les schémas contenant des cellules avec des skews plus élevé que la moyenne.

III.14.4. Modifier les facteurs de sous-Relaxation

Le facteur de sous-relaxation α est utilisé pour stabiliser le processus itératif et éviter la divergence dû à la forte variation de valeurs entre deux itération successives, définit en générale par :

$$\phi_p^1 = \alpha \phi_p^0 + (1 - \alpha) \phi_p^0$$

(III.2)

On a ϕ_p^1 : La solution postérieure.

ϕ_p^0 : La solution antérieure.

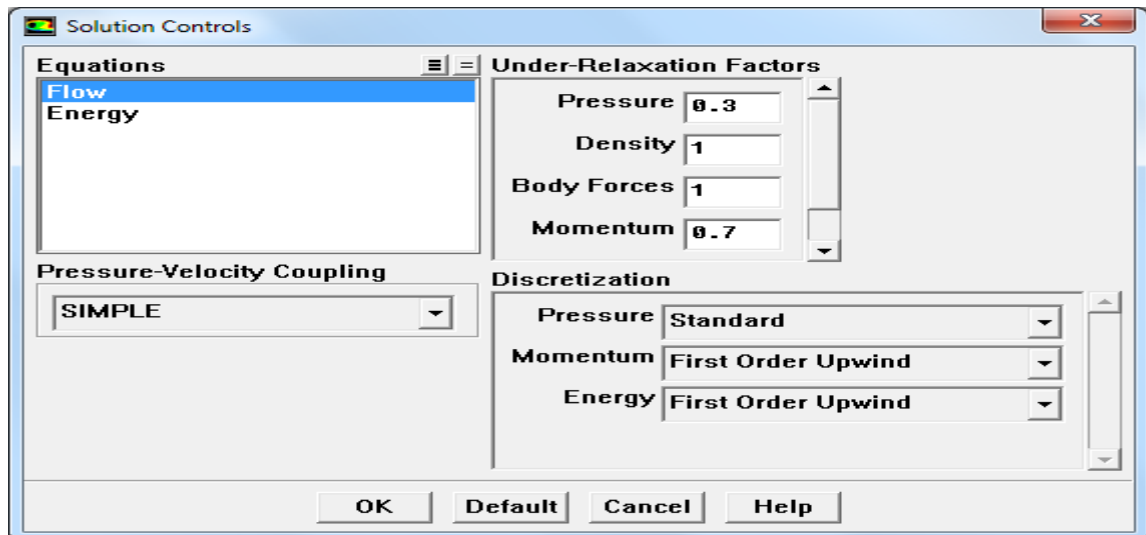


Figure III.11. Contrôle de solution.

III.14.5. L'initialisation

La procédure d'itération nécessite que tous les variables soient initialisés avant le démarrage du calcul, elle améliore la stabilité et la vitesse de la convergence.

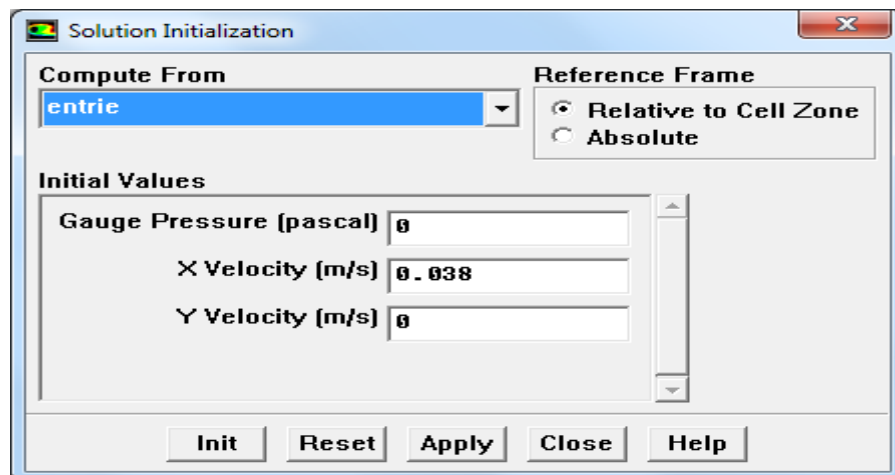


Figure III.12. L'initialisation.

III.15. Lancement de la Simulation

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

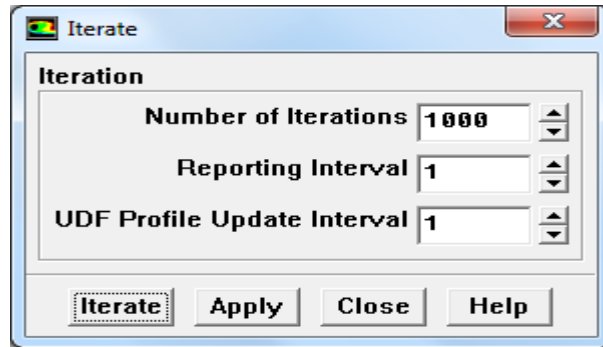


Figure III.13. Itération.

III.16. Importation de la géométrie de deuxième cas

Ouvrir le fichier nommé default_id3812.msh décrit en Gambit.

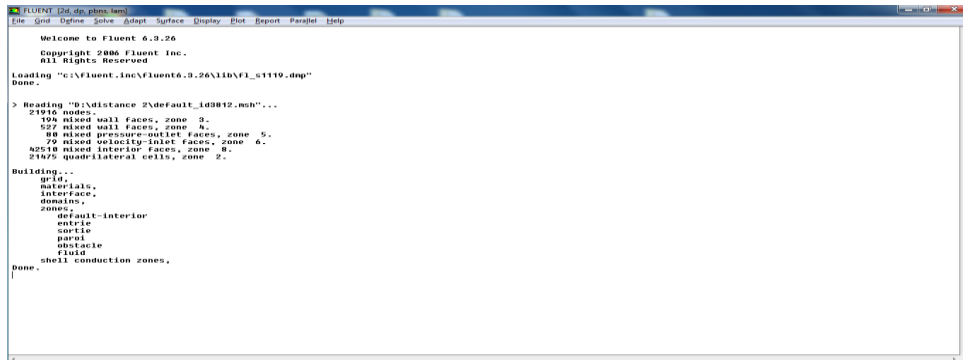


Figure III.14. Importation de la géométrie de deuxième cas.

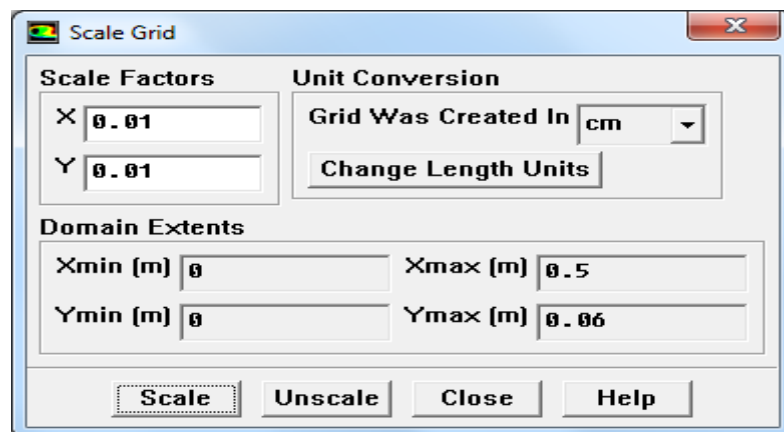


Figure III.15. Vérifiez les dimensions deuxième cas.

III.17. Affichage de la grille de deuxième cas

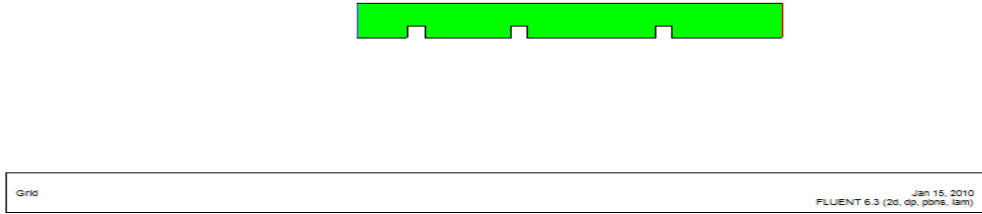


Figure III.16. La grille de deuxième cas.

III.18. Vérification de l'échelle

Dans ces cas on vérifie que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème, comme représenté la figure III.17.

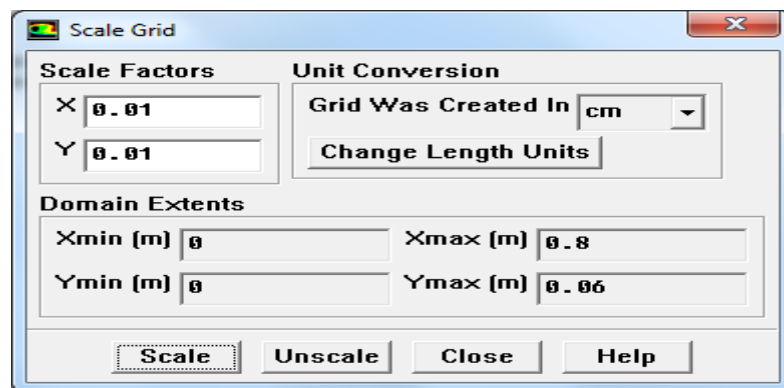


Figure III.17. Vérifiez les dimensions troisième cas.

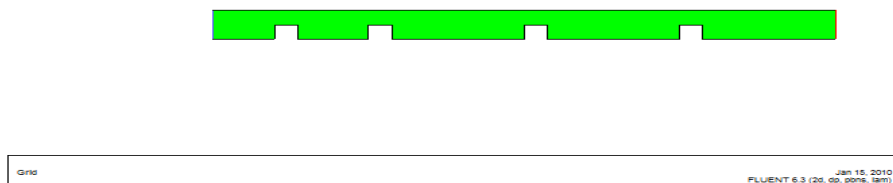


Figure III.18. La grille de troisième cas.

III.19. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présenté le code calcul Fluent ainsi que les étapes de simulation en utilisant le code Fluent pour la résolution des équations gouvernent, Les Résultats de ces simulations seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de simulation obtenus à l'aide du code CFD (Ansys Fluent). On va étudier l'influence de plusieurs paramètres sur l'écoulement tels que :

L'influence de la vitesse ou le nombre de Reynolds (laminaire $R_e = 156$ et 492 et 1480 turbulent $R_e = 4590, 6000$ et 10000).

L'influence de la température ambiante d'entrée ($T_e = 300 \sim 303$ K).

L'influence des obstacles placés sur la rectangulaire.

L'objectif est d'étudier résultats de simulation numérique obtenus sont présentés sous forme de :

Contours de la température, Contours de la pression et de la vitesse.

IV.2 Simulation numérique et étude expérimentale

IV.2.1. Première cas /Obstacle 2D carrée

Les trois obstacles utilisés sont de carrée de section rectangulaire Malgré la Simplicité de la géométrie rectangulaire l'écoulement fait intervenir des mécanismes complexes.

IV.2.1.1. Différents régimes de l'écoulement autour d'un obstacle

L'écoulement d'un fluide est considéré incompressible et obéit aux équations de Navier-Stokes, l'écoulement autour d'un obstacle dépend uniquement du nombre Reynolds défini comme :

$$R_e = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (\text{IV.1})$$

IV.3. Régime laminaire

L'écoulement devient in stationnaire dans la première géométrie On a travaillé le nombre de Reynolds 156 et la deuxième géométrie $R_e = 492$ et troisième géométrie $R_e = 1480$

IV.3.1. Champ de pression

La figure IV.1 montre le contour de la pression statique dans le domaine d'étude.

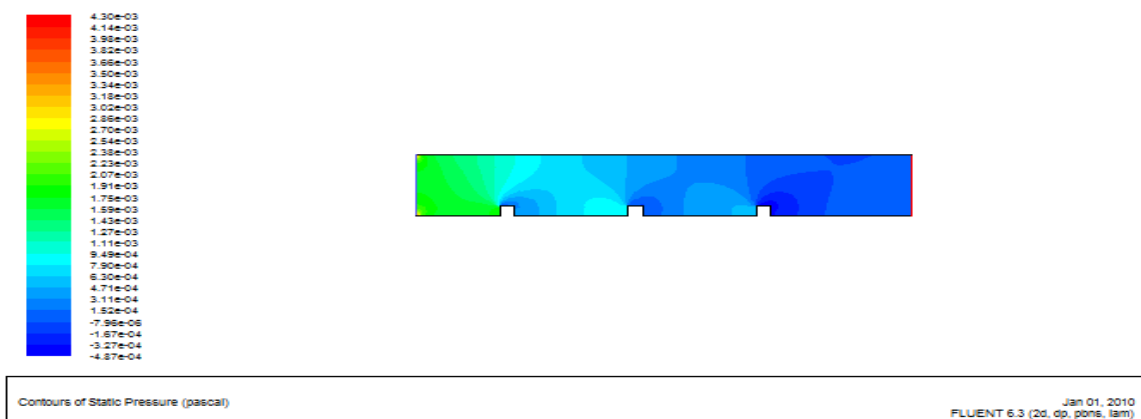


Figure IV.1. Contour de pression ($R_e = 156$)

IV.3.2. Champ de Vitesse

La figure IV.2 montre le contour ainsi que le champ de la grandeur de la vitesse et les lignes de courant autour de l'obstacle. A l'entrée, la vitesse est uniforme et égale à 0.038m/s, comme condition aux limites.

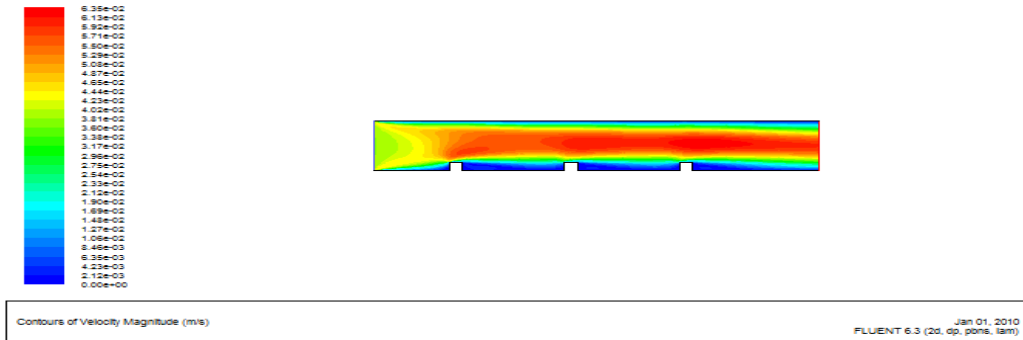


Figure IV.2. Contour de Vitesse ($R_e = 156$) et $v=0.038 \text{ m/s}$

IV.3.3. Champ de Température

La figure IV.3. Montre que de la température statique, la température de l'entrée égale 303 K.

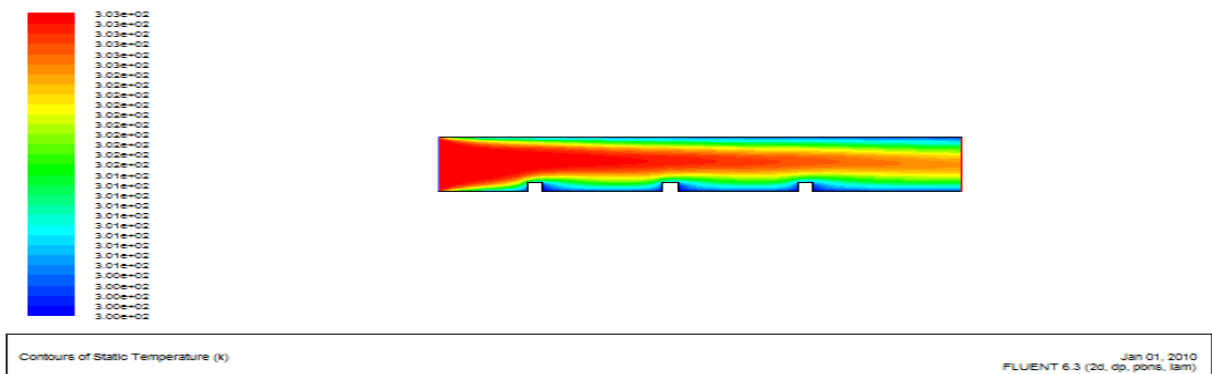


Figure IV.3. Contour de Température ($R_e = 156$) et $T_e = 303 \text{ K}$

IV.3.4. Champ de pression de deuxième cas

La figure montre le contour de la pression statique dans le domaine d'étude.

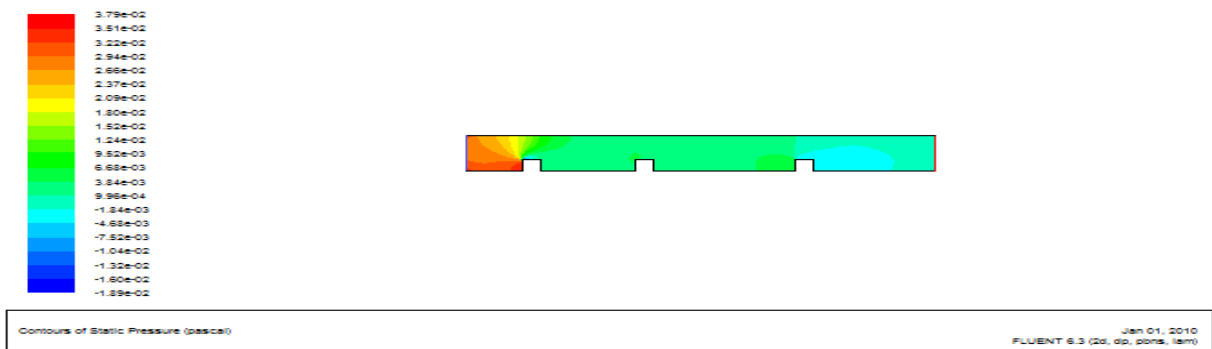


Figure IV.4. Contours de pression ($R_e = 492$).

IV.3.5. Champ de Vitesse

La figure IV.5 montre le contour ainsi que le champ de la grandeur de la vitesse et les lignes de courant autour de l'obstacle. A l'entrée, la vitesse est uniforme et égale à 0.12m/s, comme condition aux limites

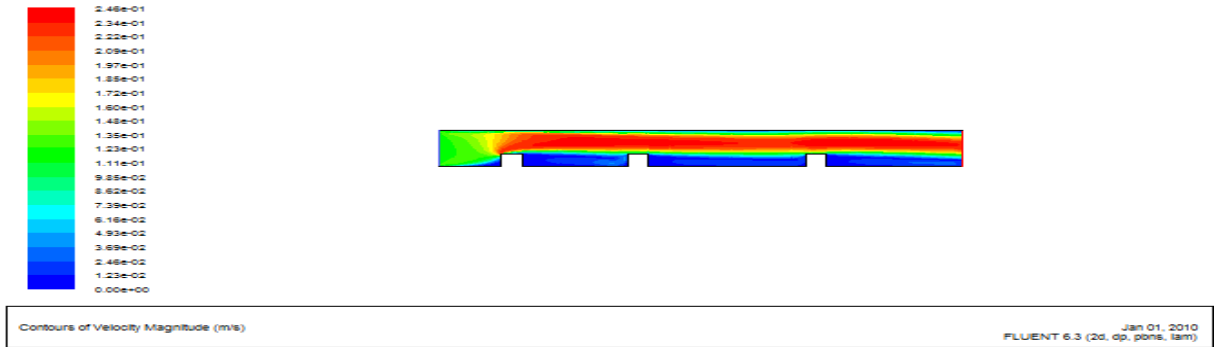


Figure IV.5. Contour de Vitesse ($R_e = 492$) et $v=0.12 \text{ m/s}$

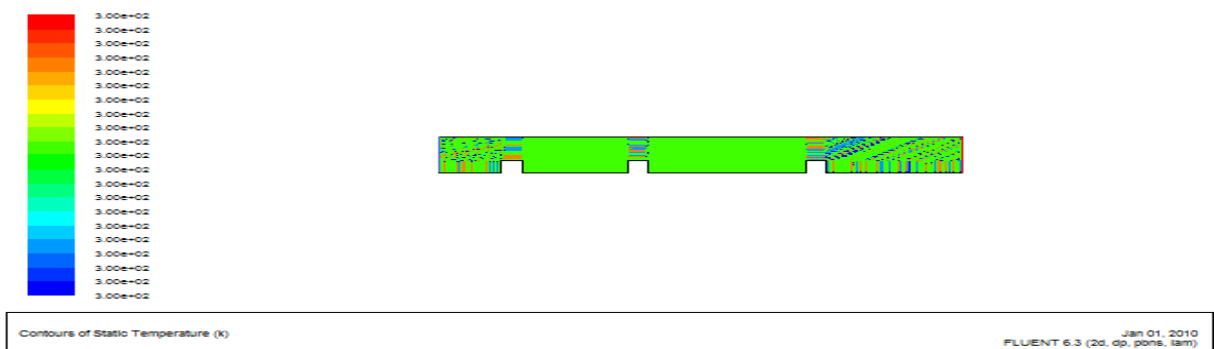


Figure IV.6. Contour de Température ($R_e = 492$).

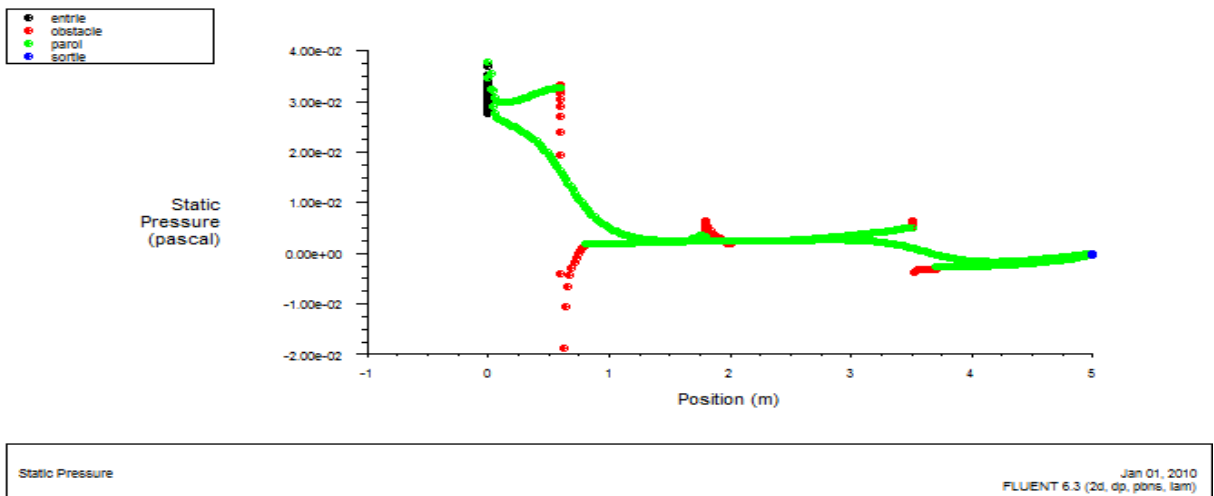


Figure IV.7. Profils de pression expérimentale et numérique ($Re=492$).

IV.3.6. Champ de pression ($R_e = 1480$)

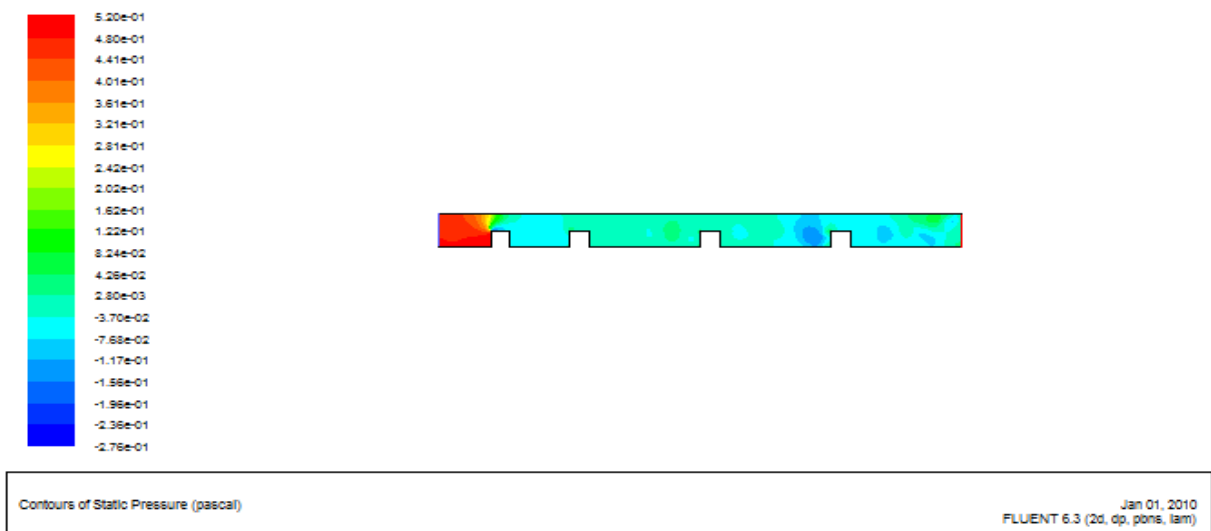


Figure IV.8. Contours de pression ($R_e = 1480$).

IV.3.7. Champ de Vitesse

La figure IV.9 montre le contour ainsi que le champ de la grandeur de la vitesse et les lignes de courant autour de l'obstacle. A l'entrée, la vitesse est uniforme et égale à 0.36m/s, comme condition aux limites.

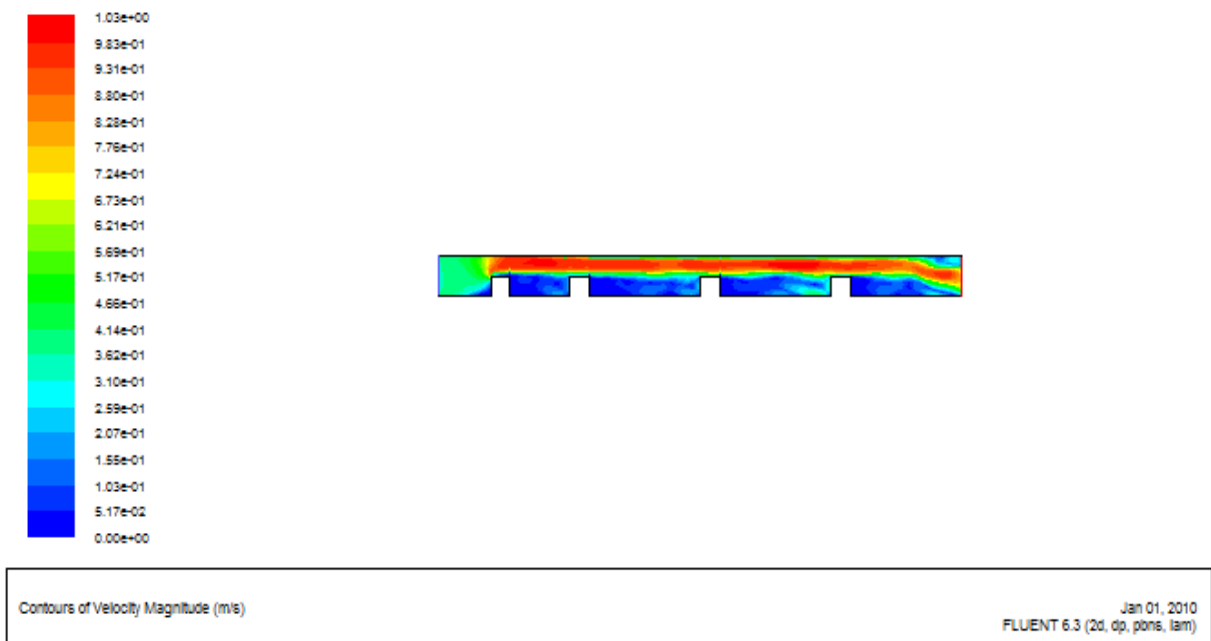


Figure IV.9. Contour de Vitesse ($R_e = 1480$) et $v=0.36 \text{ m/s}$

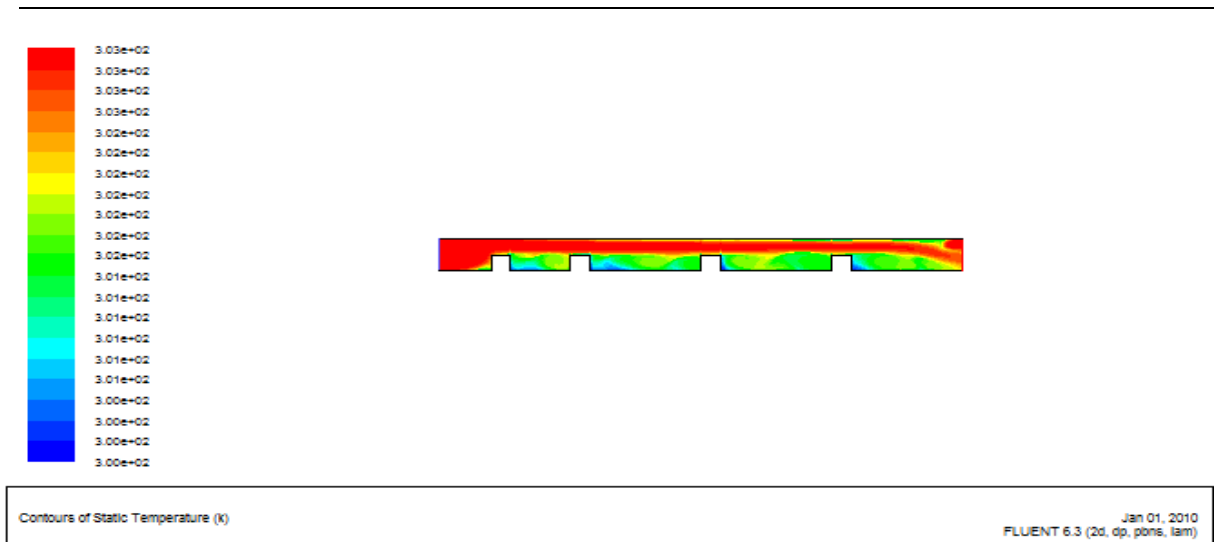


Figure IV.10. Contour de Température ($R_e = 1480$).

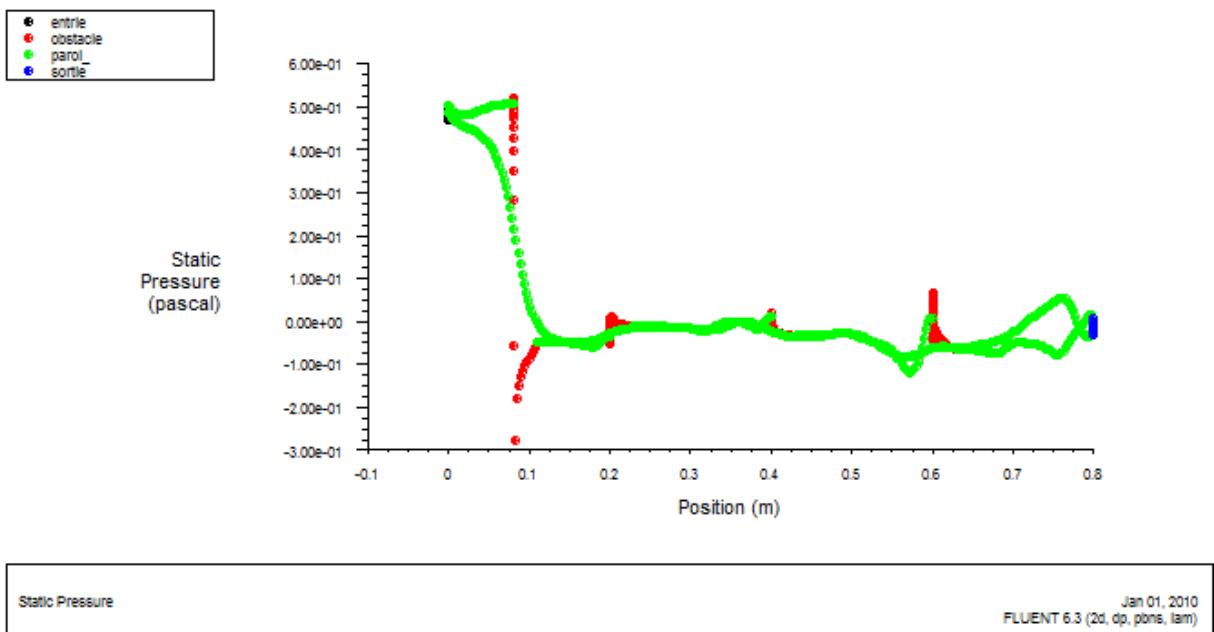


Figure IV.11. Profils de pression expérimentale et numérique ($R_e=1480$).

IV.4. Régime turbulent

On a travaillé le nombre de Reynolds 4590 et la deuxième géométrie $R_e = 6000$ et troisième géométrie $R_e = 10000$.

IV.4.1. Champ de pression

La figure IV.12 montre le contour de la pression statique dans le domaine d'étude dans un régime turbulent dans la première géométrie.

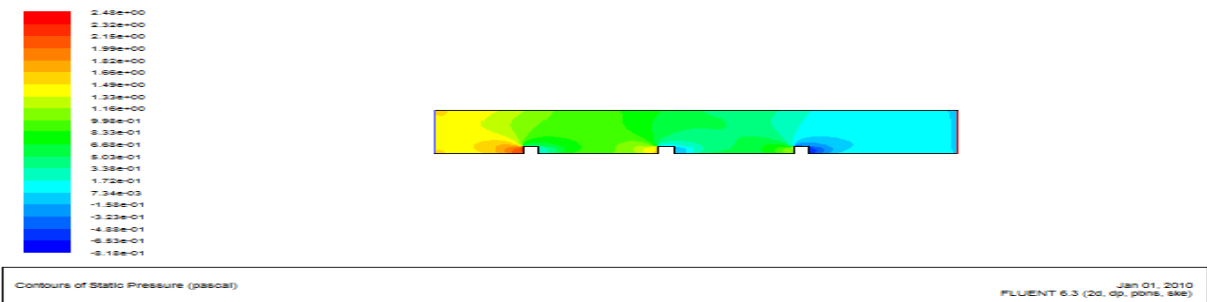


Figure IV.12. Contours de pression ($R_e = 4590$)

IV.4.2. Contour de température

La figure IV.13 représente contour de température dans un régime turbulent.

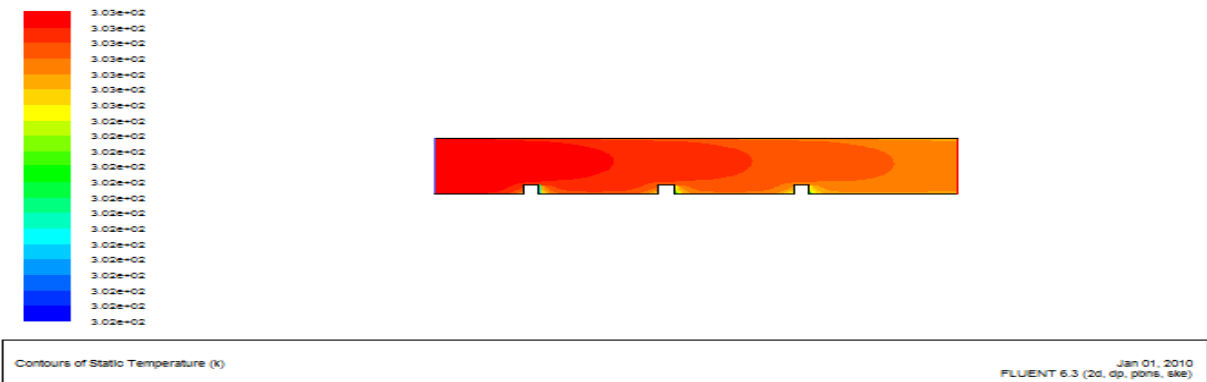


Figure IV.13. Contours de température ($R_e = 4590$)

IV.4.3. Contour de vitesse

La figure IV.14 montre le contour ainsi que le champ de la grandeur de la vitesse et les lignes de courant autour de l'obstacle. A l'entrée, la vitesse est uniforme et égale à 0.90m/s, comme condition aux limites.

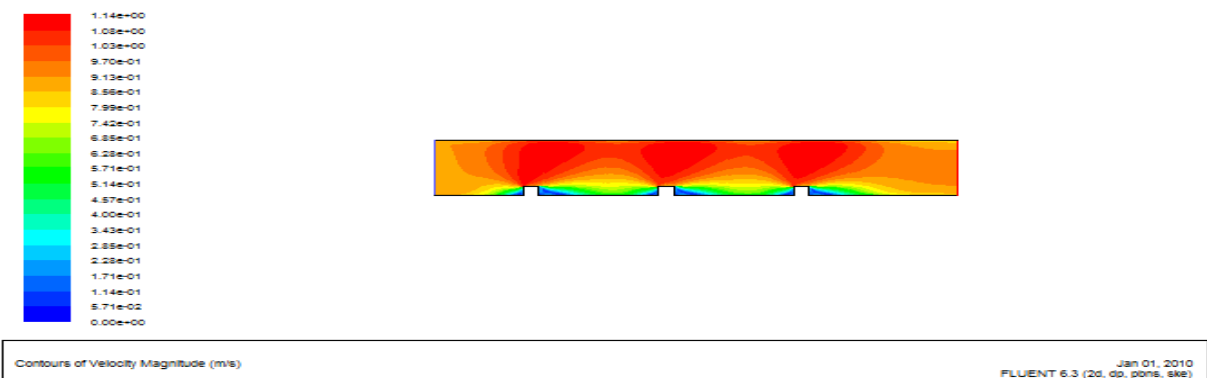


Figure IV.14. Contour de Vitesse ($R_e = 4590$) et $v=0.90\text{m/s}$

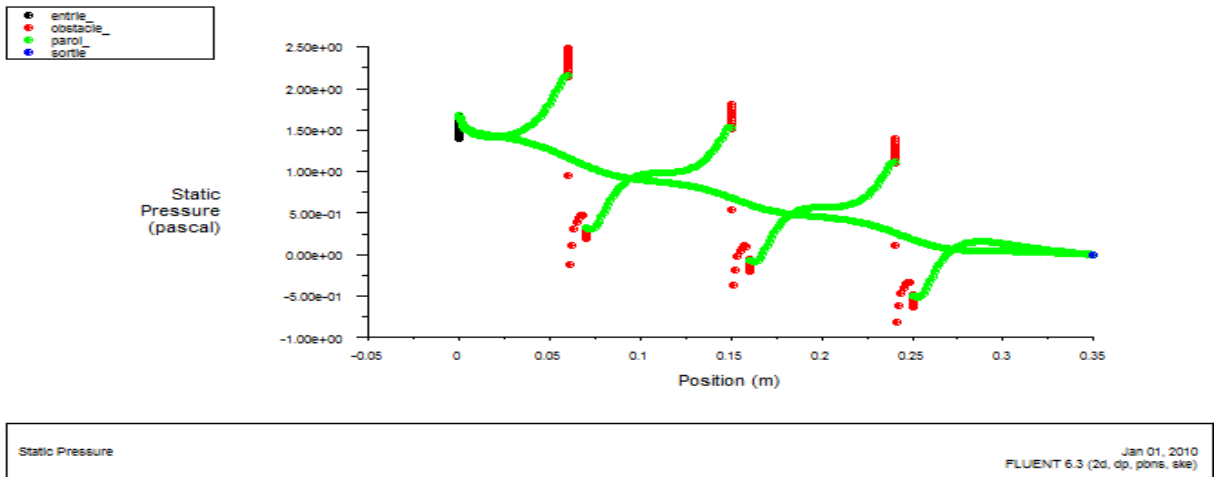


Figure IV.15. Profils de pression expérimentale et numérique ($R_e=4590$).

IV.4.4. Contour de pression de la deuxième géométrie

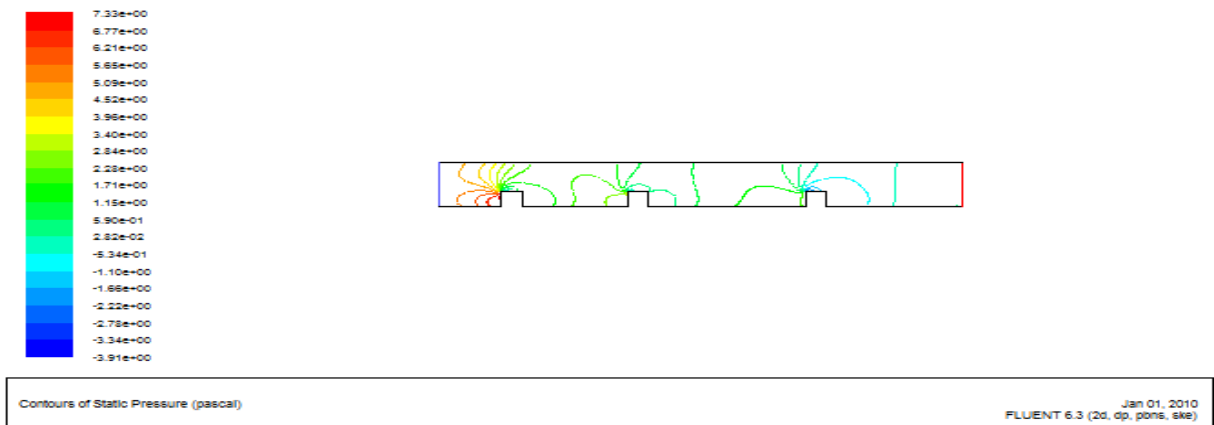


Figure IV.16. Contours de pression ($R_e = 6000$)

IV.4.5. Contour de Température de la deuxième géométrie

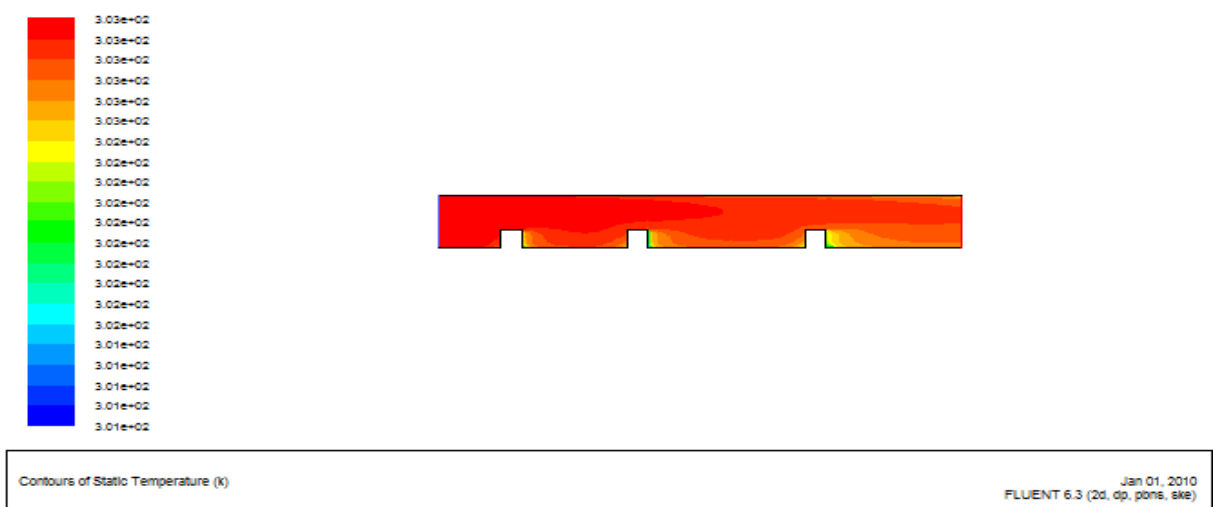


Figure IV.17. Contours de température ($R_e = 6000$)

IV.4.6. Contour de vitesse de la deuxième géométrie

La figure IV.18 montre le contour ainsi que le champ de la grandeur de la vitesse et les lignes de courant autour de l'obstacle. A l'entrée, la vitesse est uniforme et égale à 1.46m/s, comme condition aux limites.

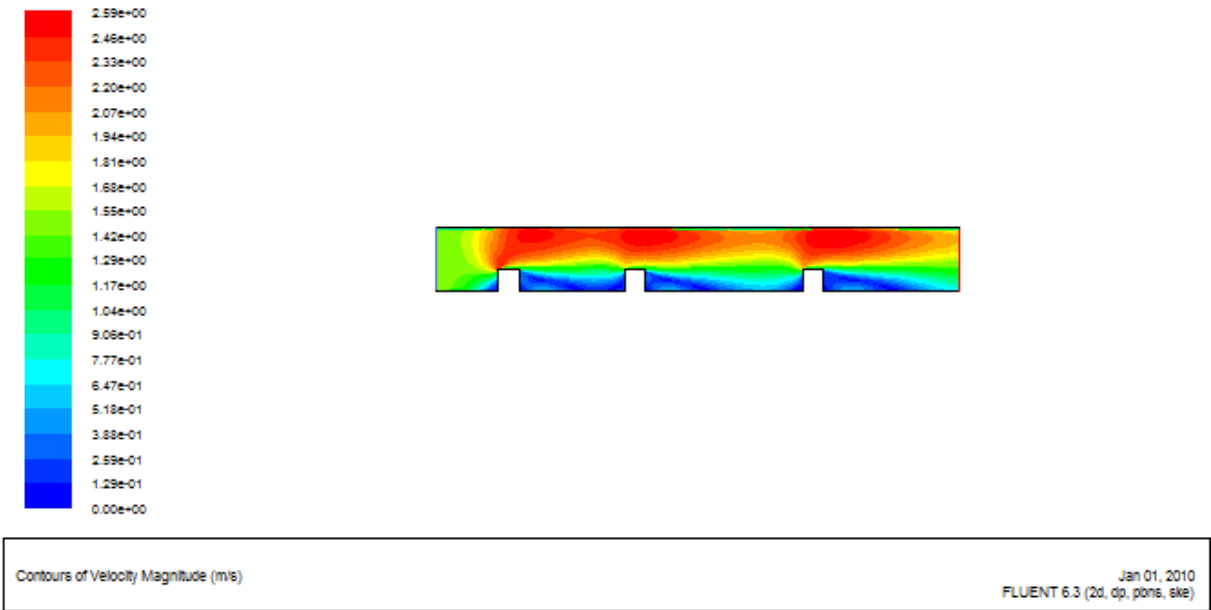


Figure IV.18. Contour de Vitesse ($R_e = 6000$) et $v=1.46\text{m/s}$

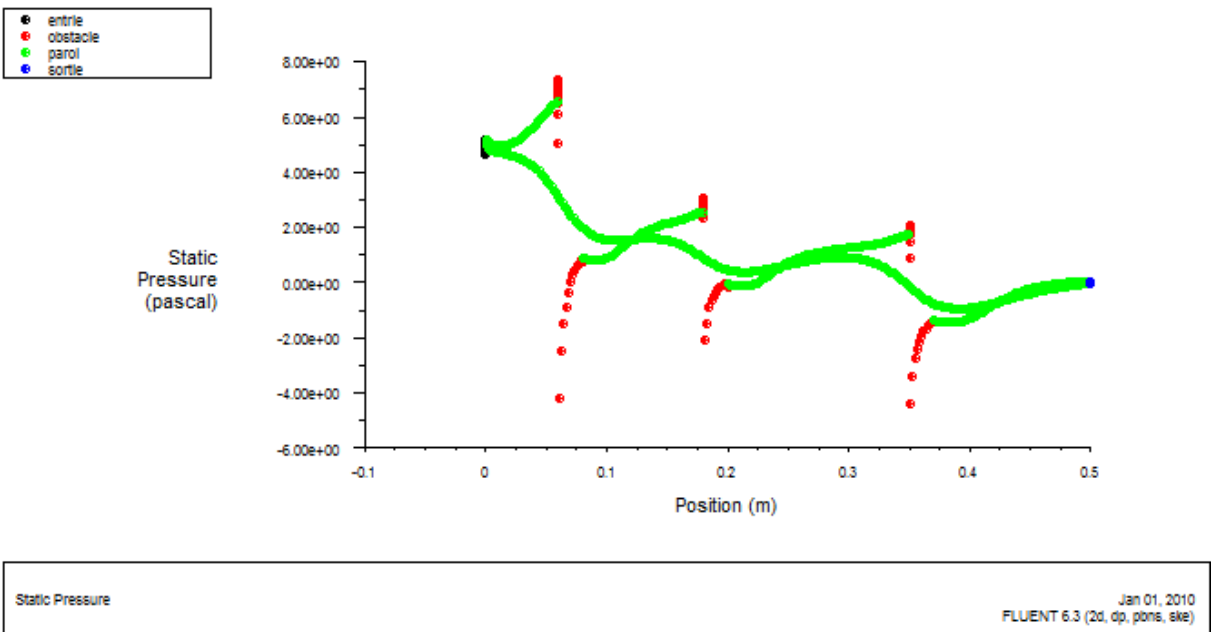


Figure IV.19. Profils de pression expérimentale et numérique ($R_e=6000$).

IV.4.7. Contour de pression de la troisième géométrie

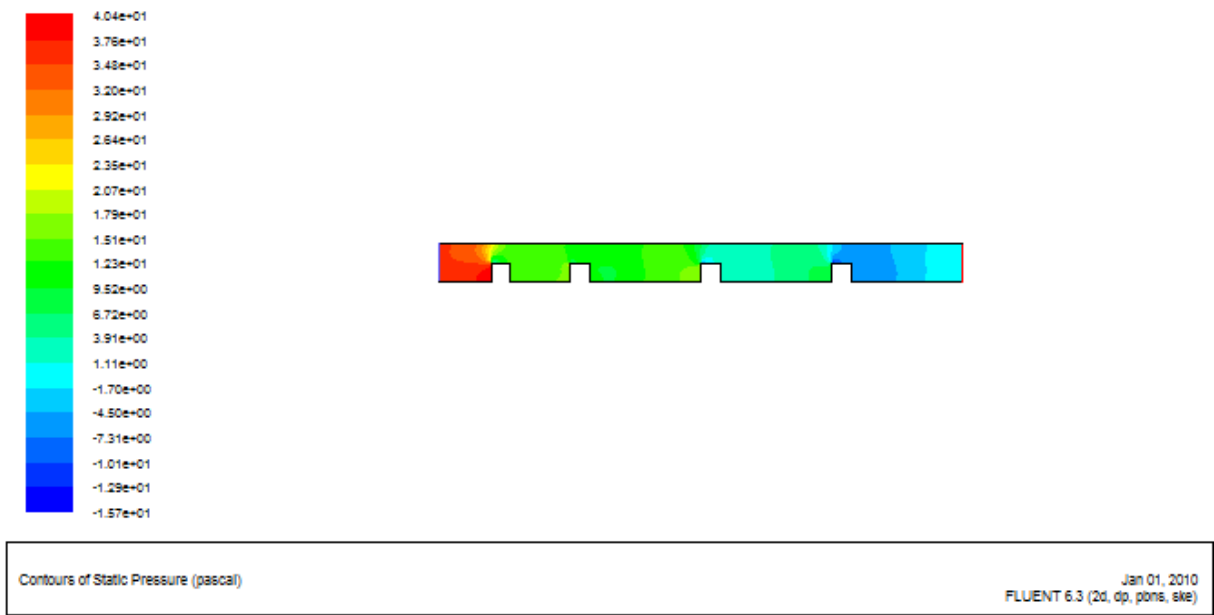


Figure IV.20. Contours de pression ($R_e = 10000$)

IV.4.8. Contour de vitesse de la troisième géométrie

La figure IV.21 montre le contour ainsi que le champ de la grandeur de la vitesse et les lignes de courant autour de l'obstacle. A l'entrée, la vitesse est uniforme et égale à 2.45m/s, comme condition aux limites

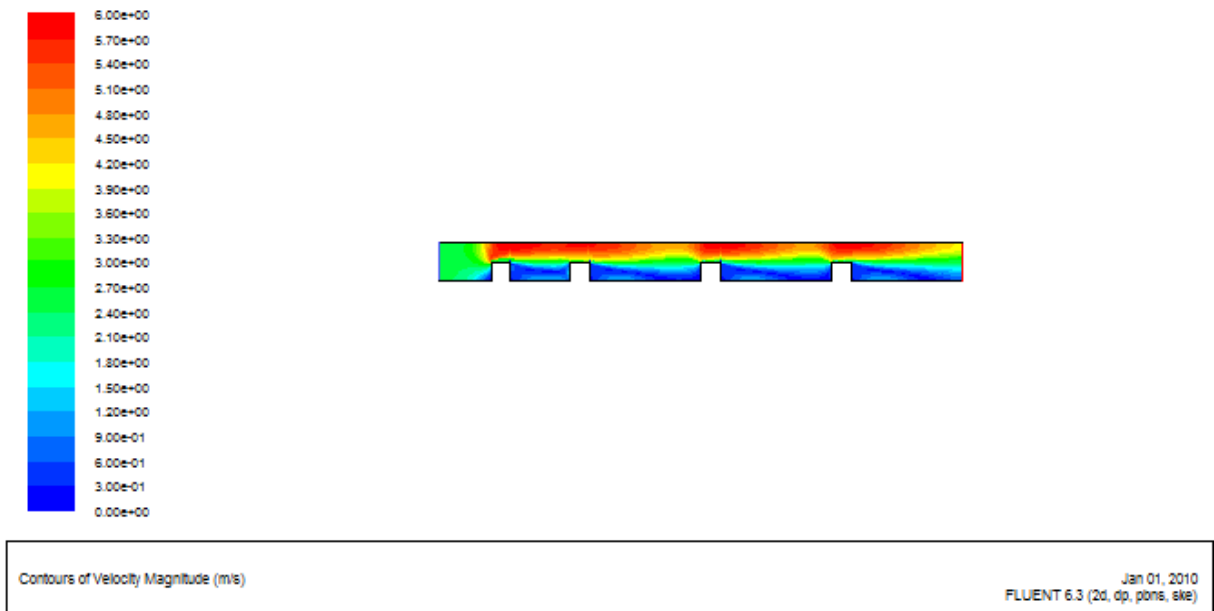


Figure IV.21. Contour de Vitesse ($R_e = 10000$) et $v=2.45\text{m/s}$

IV.4.9. Contour de température de la troisième géométrie

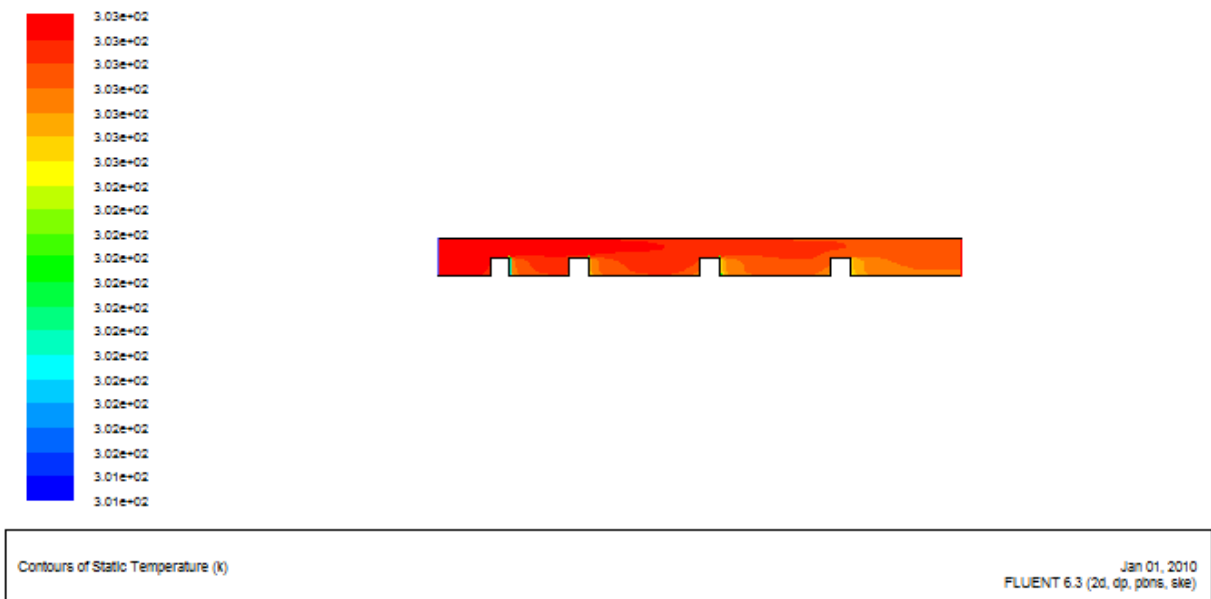


Figure IV.22. Contours de température ($R_e = 10000$)

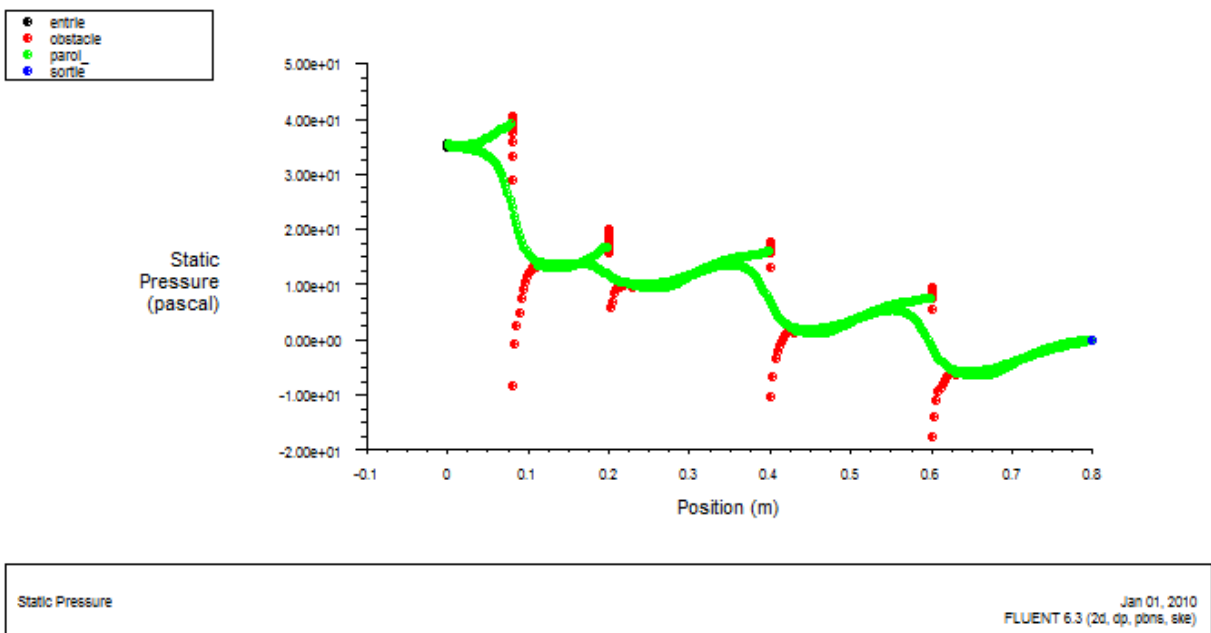


Figure IV.23. Profils de pression expérimentale et numérique ($R_e=10000$).

conclusion générale

Conclusion générale

La mécanique des fluides est la science de l'écoulement, qui permet d'étudier les différents écoulements avec différents fluides, c'est-à-dire liquide et gaz, elle a commencé comme science totalement empirique ou expérimentale, appelée l'hydraulique, exploitée dans la sédentarisation des humains par rapport à l'eau et les déplacements navales..., puis elle s'est développée comme une science théorique, appelée l'hydrodynamique, dotée de la précision mathématique et qui a contribué à la formation de la mécanique des fluides.

L'étude des écoulements laminaires et turbulents autour des obstacles a été l'objectif du présent travail. La simulation numérique par Fluent a été adoptée pour un écoulement stationnaire et instationnaire d'un fluide newtonien et incompressible en régime laminaire et turbulent. En régime turbulent, nous avons appliqué le modèle $k-\epsilon$.

Les différentes formes géométriques des obstacles retenues sont l'obstacle à section rectangulaire, l'étude est faite en 2D dans les trois cas de la configuration obstacles dans un rectangle, Le raffinement de maillage a été appliqué.

References Bibliographiques

- [1]-**Alexander Yakhot , Heping Liu, Nikolay Nikitin .**”Turbulent flow around a wall mounted cube: A direct numerical simulation”. International journal of fluid flow 27(2006) 994-1009.
- [2]-**Ye Gao, Wan-Ki Chow.** “A simple method for obtaining the correct pressure Coefficient at the windward frontal corner of the body”. The Seventh asia- pacific Conference on Wind Engineering, November 8-12- 2009-Taiwan
- [3]- **Jong-Yeon Hwang , Kyung-Soo Yang** “ Numerical study of vertical structures around a wall-mounted cubic obstacle in channel flo”. Volume 16, numéro 7, July 2010
- [4]-**Marcin Huptas, Witold Elsner**” Steady and unsteady simulation of flow structure of two surface-mounted square obstacles”Task quarterly 12 N 3,197-207
- [5]-**Charles-Henri Bruneau, Iraj Mortazavi** “Passive control of flow around a square cylinder using porous media” International journal for numerical methods in fluids Int.j.Numer.Meth.Fluids 2004
- [6]-**German Filippini ,Gerado Franck, Norberto Nigro** “Large Eddy Simulations of the flow around a square cylinder” Mecanica Computacional Vol.XXIV A.Larreteguy(Editor) Buenos Aires, Argentina, Noviembre 2005.
- [7]-**S.Krajnovic, L.Davidson** “Flow around a three- dimensional bluff body”. 9 TH International Symposium On Flow Visualisation , 2000.
- [8]-**J-D.Kim, B.Havel, H.Hangen** “ Numerical and experimental investigation of the near wake dynamics for a square prism” Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory
- [9]-**Gera.B, Pavan K.Sharma, Singh R.K** “ CFD analysis of 2D unsteady flow around a square cylinder”. Intrenanational Journal of Applied Engineering Research , DINDIGUL, Volume1, N 3, 2010.
- [10]-**Norberto Nigro, German Filippini , Gerardo Franc, Mario Storti, Jorge D’Elia.** “Flow around a sharp-edged surface-mounted cube by Large Eddy Simulation “ . Mecanica Computacional Vol. XXIV, Argentina, November 2005.
- [11]-**Marcin Huptas , Witold Elsner.** “Steady and unsteady simulation of flow structure of two surface-mounted square obstacles.” TASK QUARTERLY 12 No 3, 197-207.
- [12]-**Jiraporn Yojina, Waipot Ngamsaad , Narin Nuttavut , Darapond Triampo, Yongwimon Lenbury, Paison Kanthang, Somchai Sriyab, wannapong Triampo.** “Investigating flow patterns in a channel with complex obstacles using the lattice Boltzmann method” . Journal of Mechanical Science and Technology 24(10)-2010

[13]-**Mohammad Omidganeh, Jalal Abedi** “ Numerical simulation of the wind flow around cube in channel”.BBA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics-Applications Milano, Italy,juillet 20-24-2008

[14]-**Brahim Ben Beya , Taieb Lili.** “ Three-dimensional incompressible flow in a twosided non-facing lid-driven cubical cavity “ . C.R.Mecanique 336-2008-Tunisia

[15]-**Ankur Bajoria .** “ Analysing wind flow around the square plate using ADINA”. Massachusetts Institute of Technology-May 2008.

[16]-**M.Farhadi, M.Rahnama.** “ Large Eddy Simulation of Separated flow over a wallmounted cube”. Scientia Iranica, Vol.13,No2 , pp124-133.April 2006.

[17]- **K.Hallek, M.Bouterra, A.El Cafci, A. Belghith, P.Le Quere .** « Simulation numérique bidimensionnelle d'un écoulement turbulent autour de deux cavités ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 No 4 -2007.

[18]- **D. Lakehal, W.Rodi.** « Calculation of the flow past a surface-mounted cube with two-layer turbulence models » . journal of wind engineering and industrial aerodynamics - 1997.

[19]- **Hafida Daaou Nedjari, Mohamed Saighi.** “ Etude numérique des effets d'obstacles sur le profil du vent » . Revue des énergies renouvelable SMEE'10 Bou Ismail –Tipaza 2010.

[20]- **Y.Cheng, F.S.Lien, E.Yee, R.Sinclair.** “ A comparaison of the large eddy simulation with a standard k- δ Reynolds-averaged Navier- Stokes modul for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes.” Journal of wind engineering and industrial aerodynamics-2003

[21]- **RIADH Ben Hamouda,** « Notions de mécanique des fluides», Centre de publication universitaire, Tunis, 2008.

[22]- **ION Paraschivoiu,** « Aérodynamique subsonique », Editions de l'école Polytechnique de Montréal (Québec), Canada, 1998.

[23]- **HUA Shan, LI Jiang and CHAOQUN Luis,** « Direct numerical solution of flow separation around a NACA 0012 airfoil », Journal of Computers & Fluids, vol.34, pp 1096-1114, 2004.

[24]- **RIADH Ben Hamouda,** « Notions de mécanique des fluides», Centre de publication universitaire, Tunis, 2008.

[25]. <http://emmanuelhourdequin.free.fr/IMG/pdf/M4-cours-2.pdf>

[26]. https://fr.wikiversity.org/wiki/Cin%C3%A9matique_des_fluides/Classification_des_%C3%A9coulements#:~:text=Un%20%C3%A9coulement%20est%20dit%20permanent,sont%20constants%20dans%20le%20temps.&text=Par%20opposition%20l'%C3%A9coulement%20transitoire,propri%C3%A9t%C3%A9s%20varient%20dans%20le%20temps.

[27]. https://lmfteus.files.wordpress.com/2018/12/cours_compressible.pdf

[28]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89coulement_incompressible#:~:text=Un%20%C3%A9coulement%20incompressible%20est%20un,volumique%20n%C3%A9gligeable%20\(desc%20ription%20eul%C3%A9rienne\).](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89coulement_incompressible#:~:text=Un%20%C3%A9coulement%20incompressible%20est%20un,volumique%20n%C3%A9gligeable%20(desc%20ription%20eul%C3%A9rienne).)

[29]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rodynamique>

[30]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moments_a%C3%A9rodynamiques#:~:text=forces%20a%C3%A9rodynamiques%20\(qui%20sont%20d%C3%A9compos%C3%A9es,corde%20moyenne%20a%C3%A9rodynamique%20\(CMA\).](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moments_a%C3%A9rodynamiques#:~:text=forces%20a%C3%A9rodynamiques%20(qui%20sont%20d%C3%A9compos%C3%A9es,corde%20moyenne%20a%C3%A9rodynamique%20(CMA).)

[31]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Portance_\(a%C3%A9rodynamique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Portance_(a%C3%A9rodynamique))

[32]. <https://www.lavionnaire.fr/AerodynTrainee.php>

[33]. **Cengel / Cimbala**, « Mécanique des fluides : Ecoulements Externes », Université de Québec, 2009

[34]. BEDJEGHIT, EL-Houas. Etude expérimentale et numérique d'un écoulement autour d'obstacles carré et cylindrique. 2010.

[35]. <http://agreg-remigereau.e-monsite.com/medias/files/lp09-modele-de-l-ecoulement-parfait-d-un-fluide-1.pdf>

[36]. K. Aliane , O. Sebbane , A. Hadjoui , “Etude dynamique des modèles de refroidissement des aubes des turbomachines”, Proceedings du 11èmes journées I

[37]. **BOUBEKRI Mahmoud**, « Ecoulement incompressible sur un objet solide sous la forme d'une ellipse », Thèse université de Constantine. Internationales de Thermique, Alger (Algérie), 21-23 Juin 2003, (2003) 315-320.

[38]. BEDJEGHIT, EL-Houas. Etude expérimentale et numérique d'un écoulement autour d'obstacles carré et cylindrique. 2010.

[39]. **B.E Launder, D.B Spalding**. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, (1972).

Résumé :

Ce travail de mémoire, a pour but d'étudier l'écoulement laminaire et turbulent autour d'un obstacle carré à forme rectangulaire.

Pour avoir plus d'information sur le phénomène de l'écoulement bidimensionnel en régime laminaire et turbulent pour un fluide incompressible, une étude a été entamé par simulation numérique. Pour gérer l'écoulement turbulent, on a employé le modèle de turbulence k-ε en utilisant le code de calcul Fluent.

Cette étude, nous a conduit à s'intéresser en premier lieu, au champ dynamique des contours des vitesses, aux contours de pression et pour avoir les contours des températures et ceci pour les deux régimes employés.

Mots clés : Fluent, carrée, Gambit, obstacle, turbulence.

Abstract:

The thesis work aims to study the laminar and turbulent flow around a square rectangular obstacle.

To have more information on the phenomenon of two-dimensional flow in laminar and turbulent regime for an incompressible fluid, a study was started by numerical simulation. To manage the turbulent flow, we employed the k-ε turbulence model using the fluent computer code.

This study, led us to be interested in the first place, in the dynamic field of the contours of the speeds, the contours of pressure and to have the contours of the temperatures and this for the two modes employed.

Key words: Fluent, square, Gambit, obstacle, turbulence

الملخص :

تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة التدفق الصفحي والمضطرب حول عقبة مربعة على شكل مستطيل. للحصول على مزيد من المعلومات حول ظاهرة التدفق ثنائي الأبعاد في النظام الصفحي والاضطراب لسائل غير قابل للضغط، بدأت دراسة عن طريق المحاكاة العددية. لإدارة التدفق المضطرب، استخدمنا نموذج $k-\epsilon$ المضطرب باستخدام كود الكمبيوتر Fluent. قادتنا هذه الدراسة إلى الاهتمام في المقام الأول بالمجال الديناميكي لخطوط السرعات وخطوط الضغط والحصول على ملامح درجات الحرارة وهذا بالنسبة للنمذجة المستخدمة.

كلمات السر: مربع الاضطراب عائق Fluent, Gambit