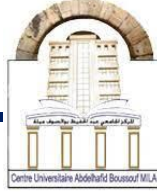


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Centre Universitaire Abdelhafid boussouf- Mila

**Institut des sciences et de la technologie
Département de Génie Mécanique et Électromécanique**

N°Réf :.....

Mémoire préparé En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

En: Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

**Simulation numérique d'un jet turbulent
impactant une paroi corruguée de type
triangulaire**

Préparé par : Hala FEDGHOUCHE

Soutenu devant le jury :

Debah Djoubir	C. U. AbdelhafidBoussouf,	Mila	Président
Abdedaim imane	C. U. AbdelhafidBoussouf,	Mila	Examineur
Derdouri Amina	C. U. AbdelhafidBoussouf,	Mila	Encadreur

Année universitaire : 2024/2025

Dédicace

À Ma Mère

Affable, honorable, amiable, tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement.

Tu n'as jamais cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour ses enfants, en me guidant sur le bon chemin dans ma vie et mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

À Mon Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eus pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

À Ma Sœur Lina

Ton soutien moral et tes paroles encourageantes ont eu un impact profond dans chaque étape de ce travail.

Tu as cru en moi lorsque je doutais de moi-même, et tu as été un pilier irremplaçable.

C'est pourquoi je t'adresse cette dédicace, en témoignage de ma profonde gratitude et de mes remerciements sincères.

À Mes frères

Kamel Eddine, Iyad, Siradj m'ont toujours soutenu et cru en moi.

À Mes Camarades

Ainsi qu'à tous mes camarades avec qui j'ai partagé une partie de mon parcours, et avec qui j'ai vécu des moments inoubliables de joie et de folie au cours de ces années universitaires.

Votre complicité et votre amabilité ont été précieuses. Merci du fond du cœur.

Hala Fedghouche

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH, tout puissant, de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Nous remercions le Docteur **DERDOURI Amina** notre encadreur d'abord, d'avoir accepté de nous encadrer, et puis pour son aide, ses conseils et ses orientations.

Nous remercierons sincèrement **Dr. Debah Djoubir** Pour m'avoir l'honneur d'accepter d'être le président du jury.

Un grand merci à **Dr. Abdedaim Imane** d'avoir accepté d'examiner et juger ce modeste travail.

Nous adressons également nos remerciements tous nos enseignants qui nous ont donné la base de la science.

Résumé

Le présent travail est une simulation numérique par le code ANSYS Fluent d'un jet impactant une paroi triangulaire. L'effet de nombre de Reynolds, distance buse-paroi sur la dynamique de l'écoulement est simulé numériquement utilisant le modèle de turbulence SST $k-\omega$. La configuration de jet impactant considère avec une distance buse-paroi varie de 1 jusqu'à 8, le nombre de Reynolds varie entre $Re = 5000$ à 30000 . Les résultats montre que concernant l'effet du nombre de Reynolds, la valeur la plus élevée de vitesse est obtenue pour la valeur de $Re = 30000$ et pour l'effet de H/D la valeur la plus élevée vitesse est obtenue pour la valeur de H/D = 1.

Mots clés : jet impactant axisymétrique, surface corruguée, modèle de turbulence SST $k-\omega$.

Abstract

The present work is a numerical simulation using the ANSYS Fluent code of an impinging jet a triangular wall. The effect of Reynolds number, nozzle to wall distance on flow dynamics is simulated numerically using the SST $k-\omega$ turbulence model. The configuration of the impinging jet considers that with a nozzle-wall distance ranging from 1 to 8, the Reynolds number varies between $Re = 5000$ to 30000 . The results show that regarding the effect of the Reynolds number, the highest speed value is obtained for the value of $Re = 30000$ and for the effect of H/D the highest speed value is obtained for the value of H/D = 1.

Keywords: axisymmetric impacting jet, corrugated surface, SST $k-\omega$ turbulence model.

ملخص

العمل الحالي عبارة عن محاكاة عددية باستخدام كود انسيس فلونت لطائرة نفاثة تصطدم بجدار مثلث. تم محاكاة تأثير رقم رينولدز ومسافة جدار الفوهة على ديناميكيات التدفق عددياً باستخدام نموذج اضطراب اسست ك او مفا . يأخذ تكوين الطائرة المصطدمة في الاعتبار أنه مع مسافة جدار الفوهة التي تتراوح من 1 إلى 8، يتراوح رقم رينولدز بين 5000 إلى 30000. وتبين النتائج أنه فيما يتعلق بتأثير رقم رينولدز، يتم الحصول على أعلى قيمة للسرعة لقيمة هي 30000 وبالنسبة لتأثير المسافة بين النفاث المصطدم و السطح يتم الحصول على أعلى قيمة للسرعة لقيمة ح/ض = 1.

الكلمات المفتاحية : نفاثة التأثير المحورية المتماثلة، السطح المموج، نموذج اضطراب اسست ك او مفا.

Table des matières

Remerciements.....	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	IV
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	X
Nomenclature.....	X
Chapitre 1 Recherche bibliographique	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Structure d'un jet impactant	1
1.2.1 Région du jet libre.....	2
1.2.2 Région d'impact	2
1.2.3 Région du jet pariétal.....	2
1.3 Travaux précédents	2
1.4 Objectif de travail	6
1.5 Organisation du mémoire	6
Chapitre 2 Equations mathématiques et méthode de résolution	7
2.1 Introduction	7
2.2 Hypothèses simplificatrices	7
2.3 Equations instantanées.....	7
2.4 Equations moyennes	8
2.4.1 Modèle SST k- ω (Shear Stress Transport).....	8
2.5 Géométries et condition aux limites	9
2.6 Méthodes numériques.....	11
Chapitre 3 Simulation sur le logiciel ANSYS.....	12
3.1 Création de géométrie.....	12
3.2 Génération de maillage	14
3.3 Lancement de simulation sur Fluent.....	14
Chapitre 4 Discussion des résultats	22

4.1 Effet de maillage.....	22
4.2 Validation	24
4.3 Effet de nombre de Reynolds	24
4.4 Effet de H/D.....	30
Conclusion et perspectives	37
Référence.....	38

Liste des figures

Figure 1.1 : Dégivrage au sol.....	1
Figure 1.2 : Structure d'un jet impactant sur une paroi plane.....	2
Figure 1.3 : Jet impactant des parois corruguée	3
Figure 2.1 : Géométrie et frontières du domaine.	10
Figure 3.1 : Interface d'AnsysFluent.....	12
Figure 3.2 : Les opérations pour construire une géométrie.....	13
Figure 3.3 : Création de géométrie.	13
Figure 3.4 : Maillage des faces	14
Figure 3.5 : Lancement de configuration du Fluent.....	15
Figure 3.6 : Vérification du maillage dans Fluent.....	15
Figure 3.7: Etablir l'équation d'énergie et le modèle de turbulence.....	16
Figure3.8 : Définition des caractéristiques du fluide.	17
Figure 3.9 : Définition des conditions aux limites.	17
Figure 3.10 : Choix de solution.....	18
Figure 3.11 : Initialisation par vitesse et la température à l'entrée.	18
Figure 3.12 : Résiduel monitors et Lancement les itérations.....	19
Figure 3.13: Fenêtre des itérations.....	20
Figure 3.14 : Extraire les résultats	20
Figure 3.15 : Insert un contour et un légende	21
Figure 4.1 : Les profils des vitesses, de l'énergie turbulente et température dans les trois maillages-géométrie triangle.....	23

Figure 4.2 : Maillage utilisé $M3=58201$	23
Figure 4.3 : comparaison de valeurs numériques et expérimentales (sagot 2010) du nombre de nuesselt moyen de la géométrie triangulaire	24
Figure 4.4: Les contours de vitesse –effet du Reynolds.....	25
Figure4.5: Les profils de la vitesse à la position radiale et la position axiale-effet de Reynolds	26
Figure4.6 : les contours de Pression –effet de Reynolds	27
Figure 4.7: les contours de l'énergie cinétique turbulente –effet de Reynolds.....	28
Figure 4.8:les profils de l'énergie cinétique turbulente à la position radiale et à la position axiale-effet de Reynolds.....	29
Figure 4.9: Les contours de vitesse –effet de H/D	31
Figure 4.10:les profils de la vitesse radiale à la position $r=4.5, 8.5, 12.5$ et 16.5 (mm)-effet de H/D	32
Figure 4.11 : Les contours de Pression –effet de H/D	33
Figure 4.12: Les contours de l'énergie cinétique turbulente –effet de H/D	34
Figure 4.13 : Les profils de l'énergie cinétique turbulente à la position $r=4.5, 8.5, 12.5$ et 16.5 (mm).....	35

Liste tableaux

Tableau 2.1: Conditions aux limites	10
---	----

Nomenclature

C	Longueur de cavité	(m)
C_μ	Constante liée à la viscosité turbulente	(-)
D	Diamètre de jet	(m)
D_H	Diamètre hydraulique	(m)
G	Terme de production de l'énergie cinétique turbulente	(kg/ms ³)
H	Distance buse-paroi	(m)
I	Intensité de turbulence	(%)
K	Energie cinétique turbulente	(m ² /s ²)
\hat{P}	Pression instantanée	(Pa)
P	Pression moyenne	(Pa)
P	Fluctuation de pression	(Pa)
R	Rayon de la plaque d'impact	(m)
\hat{U}_i	Composante de vitesse instantanée suivant x_i	(m/s)
U_i	Composante de vitesse moyenne suivant x_i	(m/s)
u_i	Fluctuation de vitesse suivant x_i	(m/s)

Lettres grecques:

δ_{ij}	Delta de Kronecker	(-)
$\delta/2$	Distance entre le point de stagnation et la première cavité	(m)
M	Viscosité dynamique	(kg/m.s)
μ_t	Viscosité dynamique turbulente	(kg/m.s)
ν	Viscosité cinématique	(m ² /s)
P	Masse volumique	(kg/m ³)
Ω	Taux de dissipation spécifique	(1/s)

Indice inférieur :

i, j	Indices utilisés dans la notation tensorielle
Jet	Relatif au jet
In	Entrée
Max	Maximum

Moy Moyenne

W Paroi

Grandeur adimensionnelle :

$Re = \frac{V D_H}{\nu}$ Nombre de Reynolds

Abréviations :

RANS Reynolds Averaged Navier-Stokes

SST $k-\omega$ Shear Stress Transport $k-\omega$

Chapitre 1 Recherche bibliographique

1.1 Introduction

Le jet d'air impactant une partie localise d'une surface solide est largement utilisé dans divers secteur industriels comme le processus de refroidissement, chauffage et séchage. Comme exemple:

- Le refroidissement des processeurs d'ordinateurs et les composants électroniques.
- Le refroidissent des chambres de combustion.
- Le refroidissement localisé des bords d'attaque des aubes de turbine à gaz.
- La découpe et le refroidissement de nappe de verre en fusion.
- Le séchage de papier, le séchage du textile, le refroidissement et le séchage de denrées alimentaires.
- Le dégivrage des ailes d'avion au sol, une opération essentielle pour assurer la sécurité des vols en conditions hivernales. Cette procédure vise à éliminer la glace et le givre accumulés sur les surfaces critiques de l'aéronef, telles que les ailes, les stabilisateurs et le pare-brise, avant le décollage voir figure 1.1.



Figure 1. 1. Dégivrage au sol [1].

1.2 Structure d'un jet impactant

Le structure d'un jet impactant une paroi plane peut être divisé en différentes zones voir Figure 1.1.

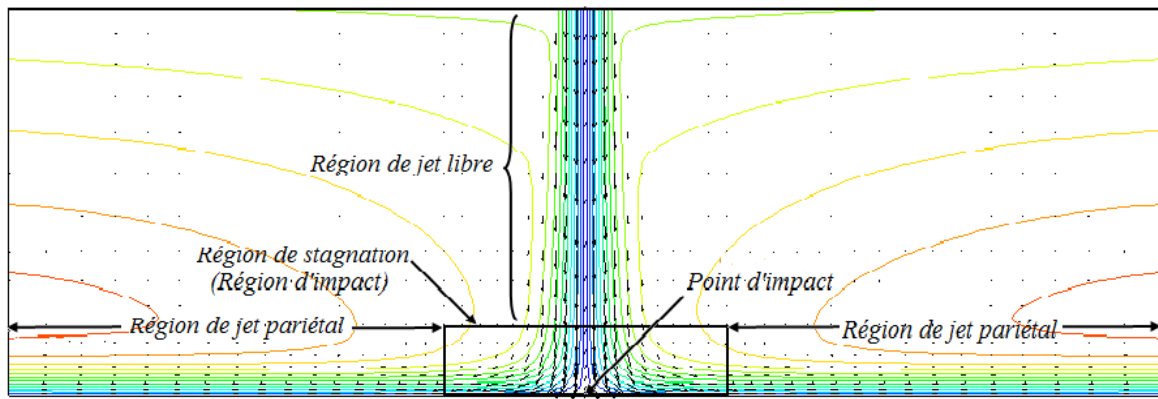


Figure 1.2 : Structure d'un jet impactant sur une paroi plane [2].

1.2.1 Région du jet libre

Dans cette zone il n'y a pas des effets de la paroi d'impact, le fluide s'écoule librement sans être influencé par la paroi d'impact lorsque la distance entre la buse et la paroi est suffisamment grande.

1.2.2 Région d'impact

Cette zone est caractérisée par un point de stagnation du fluide où la pression est élevée et la vitesse nulle, une décélération perpendiculaire à la paroi, et une déviation du fluide dans une direction parallèle à la paroi d'impact.

1.2.3 Région du jet pariétal

C'est la zone où l'écoulement se développe sur la surface d'impact en aval de la région de stagnation. Elle est marquée par une vitesse radiale élevée et un écoulement principalement influencé par l'effet de la paroi.

1.3 Travaux précédents

L'étude des écoulements de jet impactant sur une paroi a attiré des nombreux chercheurs en raison de leurs vastes domaines d'application. Voici quelques travaux précédents que nous allons exposer :

COOPER et al. (1993) [3] ont étudié expérimentalement par anémomètre à fil chaud, un jet axisymétrique impactant sur une plaque plane. Ils ont examiné les effets d' hauteur du jet par rapport à la plaque (H/D), le nombre de Reynolds (Re) et le diamètre de jet (D). La configuration utilisée est la même de **BAUGHN et SHIMIZU (1989) [4]** puisque ils ont

présenté des données sur le transfert de chaleurs (nombre de Nusselt). Ils ont développé un écoulement dans une conduite en cuivre avec une longueur $L=2.1$ [m] et deux diamètres $D=26$ [mm] et $D=101.6$ [mm], et deux nombres de Reynolds $Re=23000$ et $Re=70000$ l'air sortant de cette conduite sera impacté une plaque plane. Tous les résultats expérimentaux obtenus par **COOPER et al.** et ceux de transfert de chaleur obtenus par **BAUGHN et SHIMIZU** ont été regroupés sous forme d'une base de données est publiée dans **ERCOFTAC [5]** pour aider les chercheurs de simuler les jets impactant axisymétrique turbulent.

Sagot et al. [6] ont présenté des études expérimentales sur le transfert de chaleur d'un jet impactant une paroi avec des corrugation axisymétriques, deux type de corrugation sont examinés carrée et triangulaire a été étudiée sous des conditions de température de paroi constante voir figure 1.3 Ils ont varié plusieurs paramètres, tel que le nombre de Reynolds Re de 15 000 à 30 000, le rapport entre le rayon de la plaque et le diamètre du jet (R/D) de 2 à 10, et la distance normalisée entre la buse et la paroi (H/D) de 2 à 6. Des améliorations significatives du transfert de chaleur allant jusqu'à 81% ont été réalisées par rapport à une plaque lisse pour une valeur donnée du rapport $R/D=2$ pour une corrugation de type carrée.

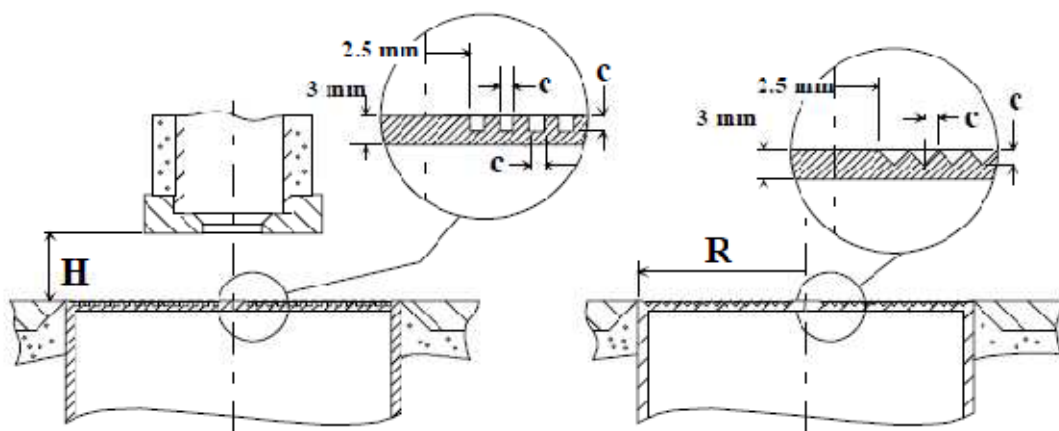


Figure 1.3 : Jet impactant des parois corruguée, **Sagot et al. [6]**.

Une simulation numérique d'un jet axisymétrique impactant sur une surface plane a été réalisée par **DAIRAY et al (2011) [7]** à l'aide du code « Incompact3d ». Cette étude se concentre sur l'examen de conditions de sortie et met en évidence trois scénarios distincts:

1. Dans le premier cas, un écoulement bidimensionnel stable avec nombre de Reynolds de $Re = 500$ a été observé. Les résultats ont montré que la dynamique de l'écoulement n'était pas influencée par le choix des conditions de sortie.

2. Le second cas a examiné un écoulement bidimensionnel instable avec un nombre de Reynolds $Re = 5300$. Suite à une augmentation du nombre de Reynolds, il a été noté des défis pour établir une condition de sortie sans affecter la dynamique globale de l'écoulement.
3. Un troisième cas portait sur un écoulement tridimensionnel stable avec un nombre de Reynolds de $Re = 50000$. Cette simulation a été effectuée principalement pour observer le comportement dans des conditions turbulentes.

Cette étude a donc révélé diverses interactions entre les conditions de sortie et la dynamique des écoulements en fonction du nombre de Reynolds.

Jambunthan et al. [8] ont présenté une synthèse des travaux expérimentaux d'un jet circulaire turbulent impactant une plaque plane. Ils ont cité plusieurs travaux sur les effets de forme du jet, la distance buse-paroi, l'intensité de turbulence, le confinement, le jet pariétal et le nombre de Reynolds sur le transfert de chaleur. **Viskanta [9]** a passé en revue des études caractérisant des jets turbulents uniques ou multiples d'air isotherme ou de flammes impactant une surface. Plusieurs types de configurations ont été présentés tels que : un seul jet rond ou plan, une rangée de jets ronds ou plans, un jet rond sur une surface inclinée et des jets impactant des surfaces planes ou courbes. L'effet de l'écoulement transversal sur le transfert de chaleur a été inclus. Une attention particulière a été accordée aux phénomènes physiques plutôt qu'aux comparaisons de relations empiriques ou entre théorie et mesures expérimentales.

NASSEM UDDIN et al. [10] ont fait une simulation numérique d'un jet froid impactant une plaque plane chauffée. La simulation est faite avec le code FASTEST et le modèle-LES. Ils ont utilisé deux nombres de Reynolds $Re = 23000$ et $Re = 13000$ avec une distance $H = 2D$. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre les caractéristiques de l'écoulement comme le comportement thermique. Ils ont trouvés que l'accélération de l'écoulement dans la région de développement de la couche limite est liée au deuxième pic.

Hsieh et al. [11] ont conduit une étude expérimentale sur le transfert de chaleur par un jet impactant sur la paroi nervurée supérieure d'un canal à section carrée en rotation. L'axe de rotation est parallèle à, mais ne coïncide pas avec l'axe du jet. Les effets de la position de l'axe du jet (entre deux nervures ou aligné avec une nervure), la forme des nervures (rectangulaire et semi-circulaire), la vitesse de rotation et le nombre de Reynolds ont été examinés. Ils ont trouvé que les performances de transfert de chaleur dans le cas avec rotation

étaient plus faibles que celles sans rotation. Il y a une augmentation de transfert de chaleur de 20 à 30% en cas de présence des rugosités. Les nervures carrées amélioraient plus le transfert de chaleur que les nervures semi-circulaires.

ANWARALLAH et al. [12] Ont fait une étude expérimentale d'un jet d'air impactant circulaire sur des composantes électroniques fixées sur une surface plate chauffée par une résistance. Pour étudier les caractéristiques de transfert de chaleur, ils ont mesuré la température de la surface d'impact et la distribution de flux de chaleur en utilisant un nombre de Reynolds variant de 6000 jusqu'à 23000 et une distance H/D ayant une valeur entre 2 et 10. Ils ont conclu que, pour différents nombres de Reynolds, la température de surface peut être significativement diminuée tout en réduisant le diamètre de jet. Ils sont arrivés à trouver une corrélation liant le nombre de Nusselt avec le nombre de Reynolds, le nombre de Prandtl et la distance H/D sur le point de stagnation dont la formule est : $Nu_{Cor} = 0.8(Re_d)^{0.5}(Pr)^{0.36}(H/d)^{-0.06}$.

Aneeq Raheem et al.[13] ont exploré une méthode innovante pour améliorer l'efficacité thermique des capteurs solaires à air (SAH), en combinant des jets d'air perpendiculaires à une plaque absorbante corruguée. À travers une approche expérimentale et numérique (CFD), les auteurs ont évalué plusieurs configurations, notamment différentes formes de plaques (lisse, sinusoïdale, trapézoïdale) et diverses matrices de jets (1x1, 2x2, 3x3), sur une plage de nombres de Reynolds allant de 1740 à 2700. Les résultats montrent que l'usage d'une plaque trapézoïdale associée à une matrice de jets 3x3 avec un faible espacement (5,1 diamètres) permet d'obtenir une intensification significative des transferts thermiques. Cette configuration optimale affiche un facteur de performance thermique jusqu'à 11 fois supérieur à celui d'un SAH conventionnel. L'étude conclut que l'ajout de jets d'air impactant sur une surface corruguée constitue une solution efficace pour augmenter le rendement thermique tout en maîtrisant les pertes de charge.

PANCET et al (2013) [14] sont intéressés à un écoulement d'un jet d'air impactant axisymétrique turbulent dans une cavité Rotor-Stator avec transfert de chaleur. Ce système est rencontré dans les alternateurs d'éoliennes de dernière génération. Ce travail a été réalisé expérimentalement par PIV et comparé numériquement au modèle RSM. Ils ont utilisé différents nombres de Reynolds de jet et de rotation tout en localisant trois régions :

- zone de recirculation avec un fort transfert de chaleurs au point d'impact (cette zone dominée par le jet).
- zone domaine par la rotation (périphérique) avec un faible transfert de chaleur et un transfert de chaleur important dans le cas sans rotation.
- zone mixte entre les deux cas.

1.4 Objectif de travail

L'objectif de présent travail est la simulation numérique par le code commercial ANSYS Fluent d'un jet axisymétrique turbulent permanent d'un fluide impactant une surface corruguée avec des corrugation de type triangulaire. Les effets du nombre de Reynolds et de la distance buse-paroi d'impact sur les comportements dynamiques ont été étudiés. L'effet de la turbulence étudié avec le modelé de turbulence SST $k-\omega$.

1.5 Organisation du mémoire

Le reste de mémoire est organisé comme suite :

- Le deuxième chapitre présente les équations mathématiques et le modèle de turbulence SST $k-\omega$ et quelque détaille de méthode numérique.
- Le troisième chapitre expose les différent étapes à suivre dans la simulation par le logiciel ANSYS Fluent.
- Le quatrième chapitre discuter les résultats de l'effet de nombre de Reynolds (Re) et la distance de buse-paroi (H/D) d'un jet turbulent axisymétrique impactant une paroi corruguée obtenues avec le modèle de turbulence SST $k-\omega$.

Ce mémoire se termine par une conclusion et quelque perspective.

Chapitre 2 Equations mathématiques et méthode de résolution

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va exposer la formulation mathématique et quelque méthode numérique qui décrivent le phénomène physique d'un jet impactant une paroi corruguée.

2.2 Hypothèses simplificatrices

Dans le but de simplifier le problème étudié on suppose :

- Ecoulement axisymétrique en moyenne.
- Ecoulement permanent en moyenne.
- Ecoulement turbulent.
- Fluide incompressible $\rho = \text{cte}$.
- Fluide Newtonien, viscosité indépendante du taux de déformation du fluide. En fait dans le présent travail, il est supposé que $\mu = \text{cte}$.

2.3 Equations instantanées

Les équations instantanées qui régissent un écoulement turbulent d'un fluide incompressible et newtonien sont présentées ci-dessous.

- Equation de continuité

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-1)$$

- Equation de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) \quad (2-2)$$

2.4 Equations moyennes

Les équations (2-1) et (2-2) permettent de résoudre le problème en régime laminaire. Dans notre cas on va étudier un jet turbulent axisymétrique en moyenne. Pour cela on présente l'approche statistique de Reynolds qui décompose les variables en deux valeurs : une valeur moyenne dans le temps et une valeur fluctuante

$$\bar{U}_i(x, t) = U_i(x) + u_i(x, t) \quad (2-3)$$

$$\bar{P}(x, t) = P(x) + p(x, t) \quad (2-4)$$

En introduisant la décomposition de Reynolds sur le système d'équations (2-1) et (2-2) on obtient ce qui suit:

– Equation de continuité moyenne :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-5)$$

– Equations de quantité de mouvement moyenne :

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2-6)$$

Dans le système (2-5) et (2-6) apparaissent des termes inconnus qui sont les contraintes de Reynolds $\overline{u_i u_j}$. Ces termes posent un problème de fermeture des équations. Le modèle de turbulence SST $k-\omega$ assure la fermeture des équations. Ce modèle se base sur le concept de Boussinesq qui permet d'exprimer les contraintes de Reynolds comme suit :

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2-7)$$

Il est à noter que le problème de fermeture du système d'équations est résolu si on arrive à déterminer μ_t et k qui apparaissent dans l'équation (2-7).

2.4.1 Modèle SST $k-\omega$ (Shear Stress Transport)

Le modèle de turbulence SST $k-\omega$ a été proposé par **Menter [15]**. C'est un modèle à deux équations de transport : la première pour l'énergie cinétique turbulente k et la deuxième pour le taux de dissipation spécifique ω . Ce modèle utilise les avantages du modèle $k-\omega$ standard de

Wilcox [16] près de la paroi et du modèle k - ε standard de **Launder et Spalding [17]** loin de la paroi. Les équations de transport k et ω s'écrivent comme suit.

– Equation de l'énergie cinétique turbulente k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + Gk - Yk \quad (2-8)$$

Equation du taux de dissipation de l'énergie ω :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma \omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G\omega - Y\omega + D\omega \quad (2-9)$$

Gk : Taux de production de l'énergie cinétique turbulente k .

$G\omega$: Taux de production du taux de dissipation spécifique ω .

$\Gamma k, \Gamma \omega$: Coefficients de diffusion effective de k et ω .

$Yk, Y\omega$: Taux de dissipation de k et ω .

$D\omega$: Terme de diffusion croisée provenant de la transformation de la formulation k - ε en une formulation k - ω

Les valeurs de k et ω ainsi obtenues sont utilisées pour déterminer la viscosité turbulente μ_t , voir documentation **ANSYS-Fluent [18]**.

2.5 Géométries et condition aux limites

La figure 2.1 illustre la configuration et les limites du domaine d'étude d'un jet rond axisymétrique impactant une paroi corruguée avec des corrugation triangulaire. Le diamètre du jet D égale 3 (mm), la distance buse-paroi normalisée par le diamètre $H/D = 2, 4, 6$ et 8 , le rayon de la plaque d'impact $R = 24$ (mm), la distance entre le point de stagnation et la première cavité $\delta/2 = 2.5$ (mm) et la longueur de la cavité $C = 1$ (mm). Les limites du domaine numérique sont un axe de symétrie à gauche, une paroi corruguée en bas, une frontière d'entraînement libre à droite et en haut.

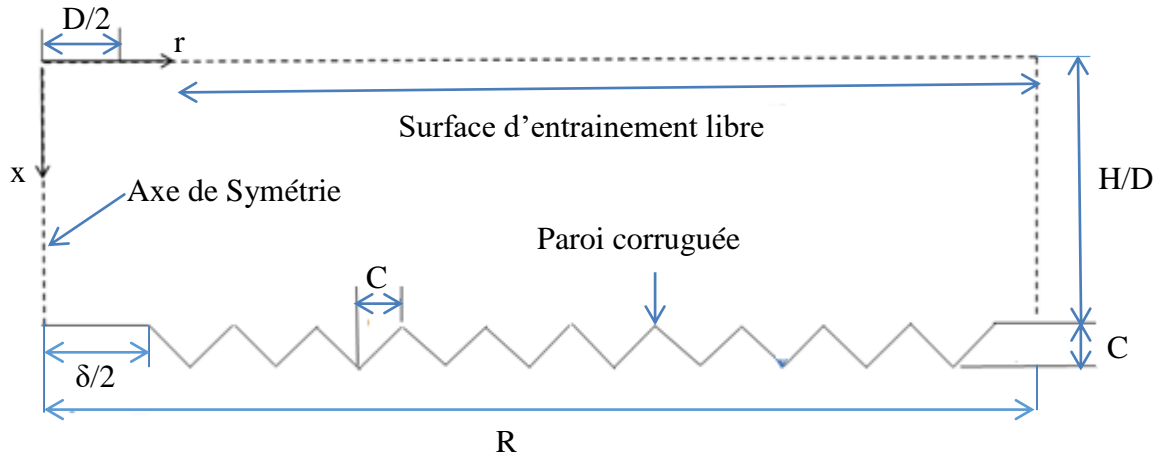


Figure 2.1: Géométrie et frontières du domaine.

Le tableau 1 résume les conditions aux limites imposées au niveau des différentes frontières du domaine:

Tableau 2.1: Conditions aux limites.

Variable / Condition	V_x	V_r	k	ω	T
Entrée	$V_{in} = \frac{\mu Re}{\rho D}$	$V_r = 0$	$I = 5\%$ $k = \frac{3}{2} (V_{in} I)^2$	$\omega = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{C \mu^{\frac{1}{4}} l}$ avec $l = 0.07 D_H$	325.5
Axe de symétrie	$\frac{\partial v_x}{\partial r} = 0$	$V_r = 0$	$\frac{\partial k}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \omega}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$
Paroi	$V_x = 0$	$V_r = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$	$\omega = \frac{\rho (u^*)^2}{\mu} \omega^+$	277

- Dans les frontières d'entraînement libre la pression est égale à la pression atmosphérique. La vitesse est obtenue en appliquant l'équation de continuité locale à chaque volume fini adjacent à cette frontière.
- Aussi, dans le cas où le fluide est aspiré vers l'intérieur du domaine, la température $T = 298$ (K)

2.6 Méthodes numériques

La simulation des écoulements a été faite par le code commercial ANSYS 2023. Ce code utilise la méthode des volumes finis. Dans cette étude d'un jet axisymétrique impactant une paroi corruguée nous avons :

- Choisi le modèle de turbulence SST $k-\omega$,
- Traité le couplage de pression-vitesse par l'algorithme SIMPLE,
- Utilisé le schéma numérique UPWIND second ordre pour discrétiser le terme convectif dans les équations des composantes de la vitesse, de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation spécifique,
- Considéré que la solution a convergé quand les résidus de toutes les équations sont inférieurs à 10^{-5} .

Chapitre 3 Simulation sur le logiciel ANSYS

Dans ce chapitre, nous détaillons les différentes étapes suivies dans le logiciel ANSYS pour simuler un jet turbulent axisymétrique sur une surface corruguée de type triangulaire. Le processus se divise en trois phases : d'abord la création de la géométrie, ensuite la génération du maillage, et enfin le lancement de la simulation avec Fluent.

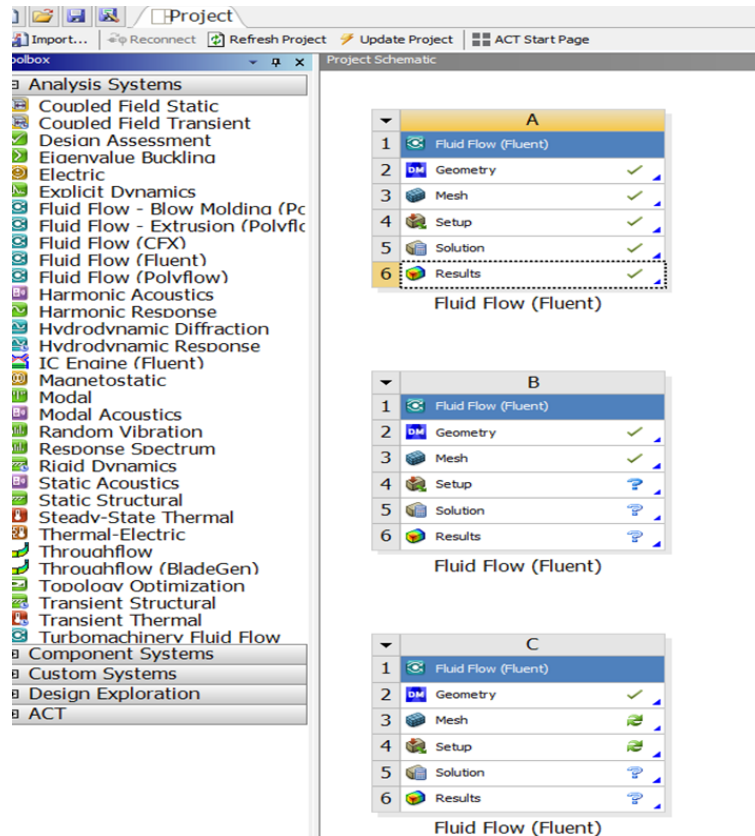


Figure 3.1 : Interface d'Ansys Fluent.

3.1 Création de géométrie

La première étape consiste à élaborer le modèle géométrique du système, opération qui peut être réalisée directement dans ANSYS Fluent (voir figures 3.2 et 3.3).

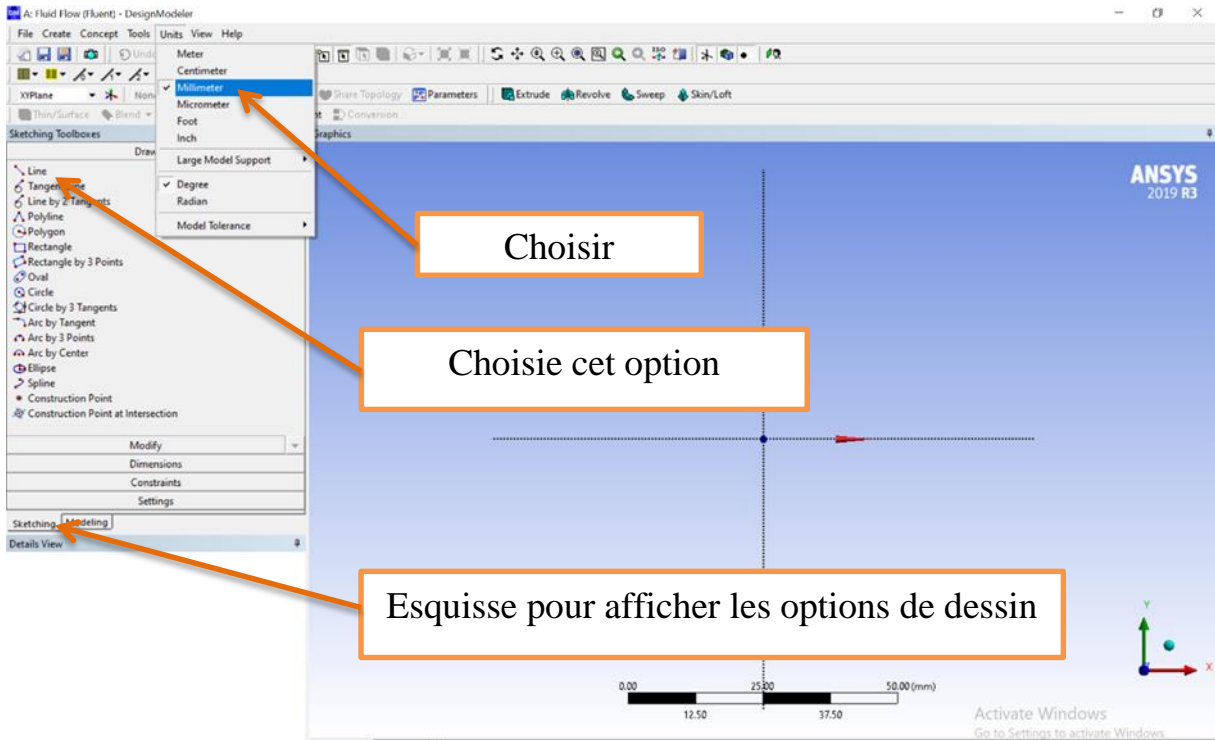


Figure 3.2 : Les opérations pour construire une géométrie.

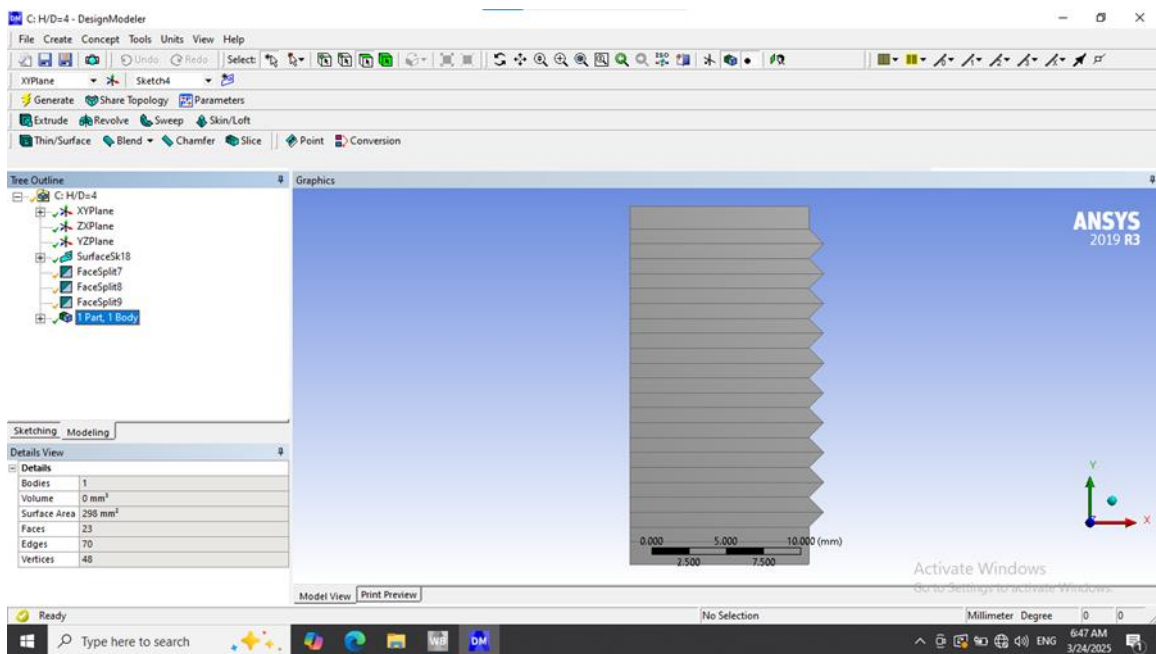


Figure 3.3 : Création de géométrie

3.2 Génération de maillage

Une fois la géométrie est prête, l'étape suivante consiste à créer un maillage adapté au domaine d'écoulement. Dans notre cas, nous avons opté pour un maillage structuré.

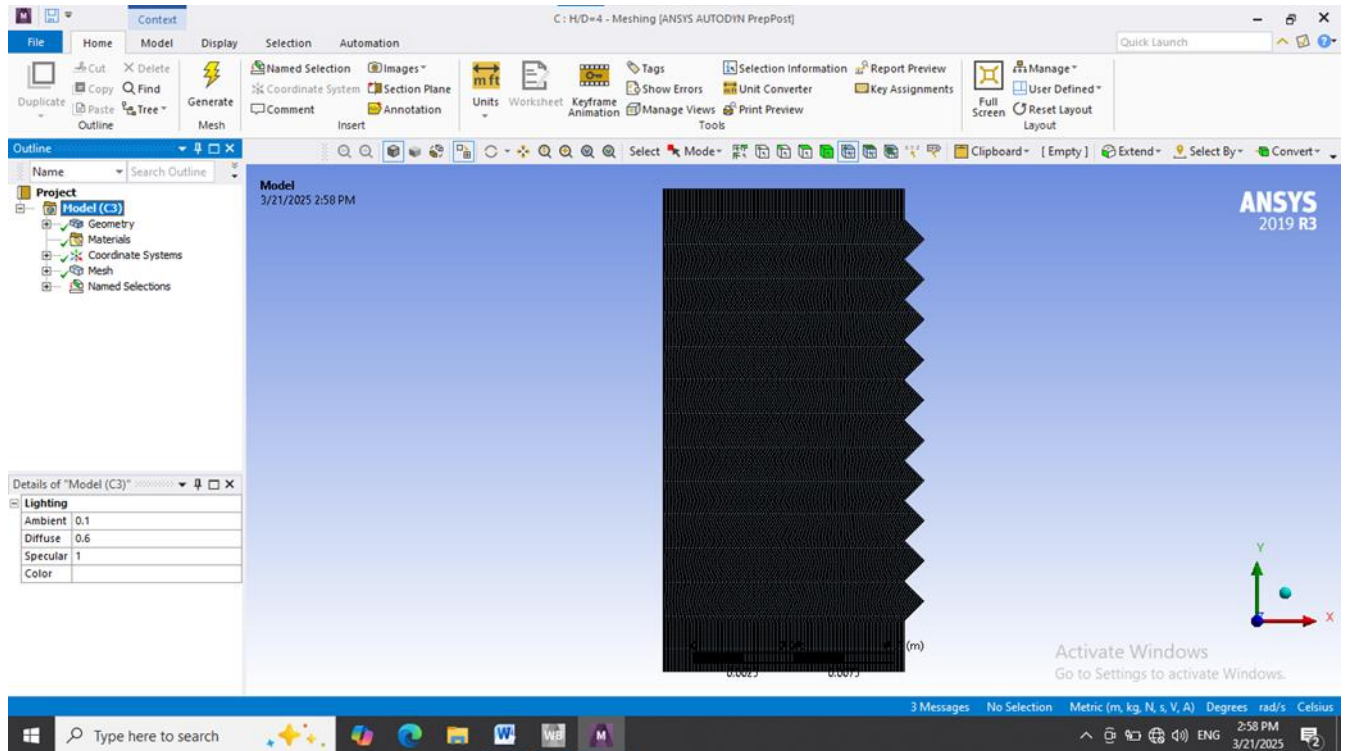


Figure 3.4 : Maillage des faces

3.3 Lancement de simulation sur Fluent

Cette section présente une explication ainsi que les étapes essentielles pour mener à bien la simulation d'un jet axisymétrique turbulent entrant en contact avec une paroi ondulée.

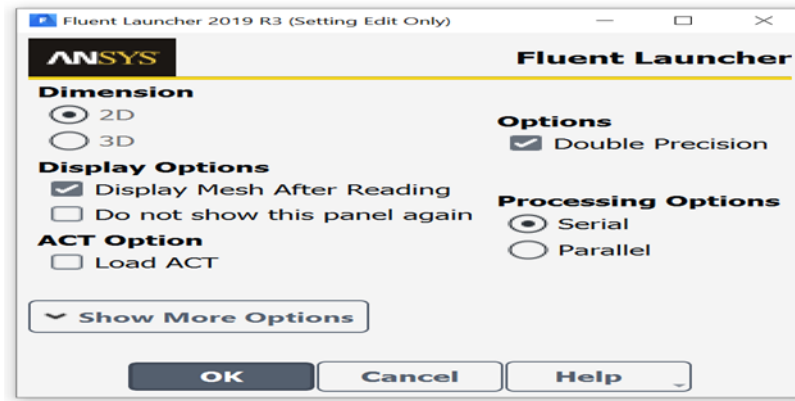


Figure 3.5 : Lancement de configuration du Fluent.

- Vérification du maillage : Setup → General (Mesh) → Check...

Cette étape permet de s'assurer que le maillage importé ne comporte pas de volumes négatifs.

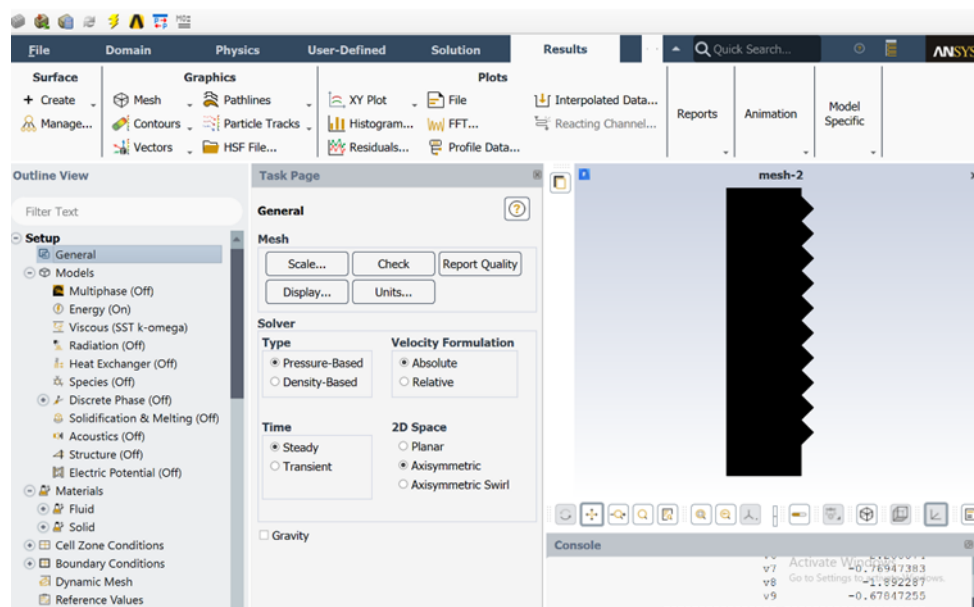


Figure 3.6 : Vérification du maillage dans Fluent

- Vérification de l'échelle (unité) : Setup → General (Mesh) → Scale...

Cette étape permet de s'assurer que les unités du maillage sont correctement définies.

- Choix du solveur : Setup → General (Mesh) → Solver → Type...

Sélection du type de solveur approprié à la simulation.

- Sélection du modèle de turbulence : Setup → Models → Viscous

Permet de définir le modèle de turbulence adapté au régime d'écoulement. Dans notre cas, nous avons opté pour le modèle SST k- ω .

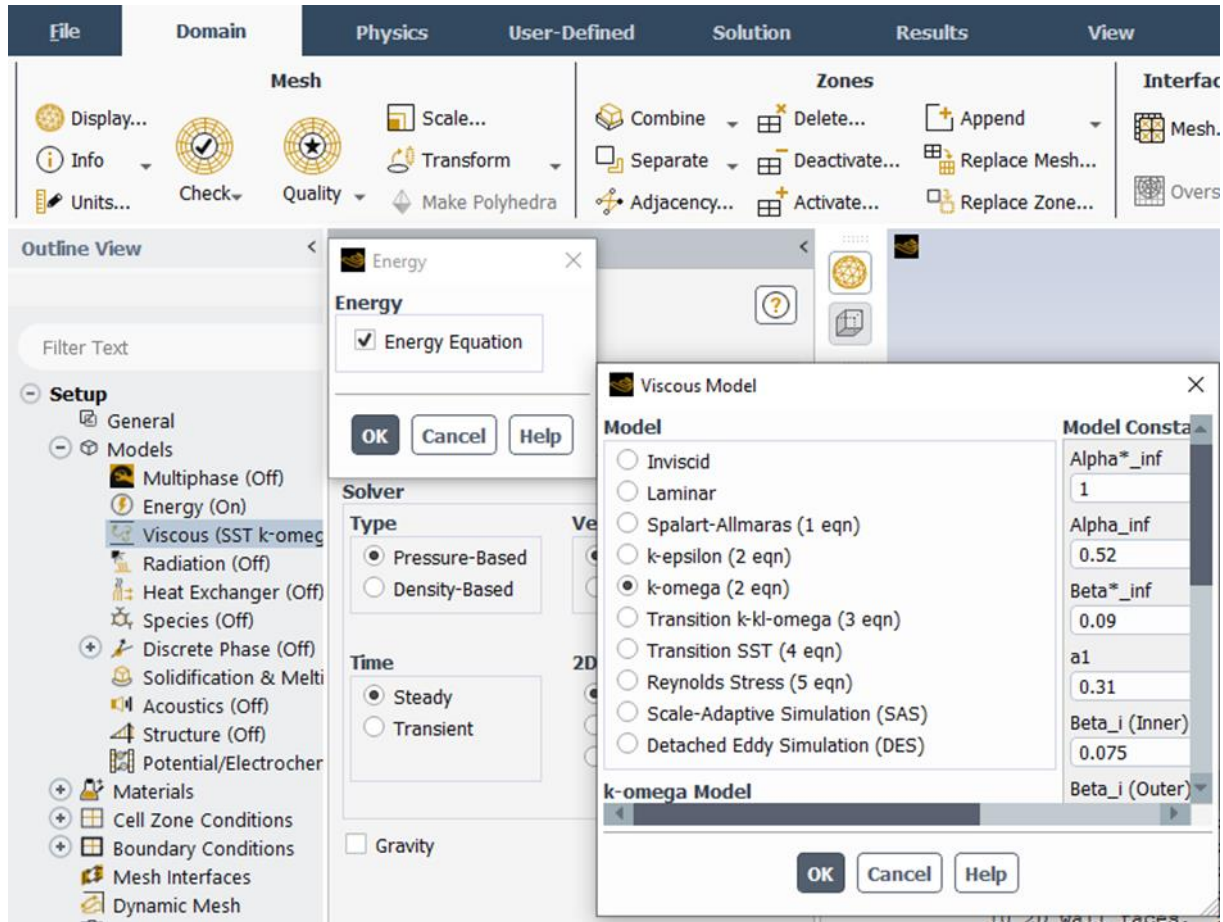


Figure 3.7 : Etablir l'équation d'énergie et le modèle de turbulence

- Définition des caractéristiques des matériaux : Setup → Materials...

Cette étape permet de spécifier les propriétés des matériaux utilisés dans la simulation. Dans notre cas, le fluide sélectionné est l'air.

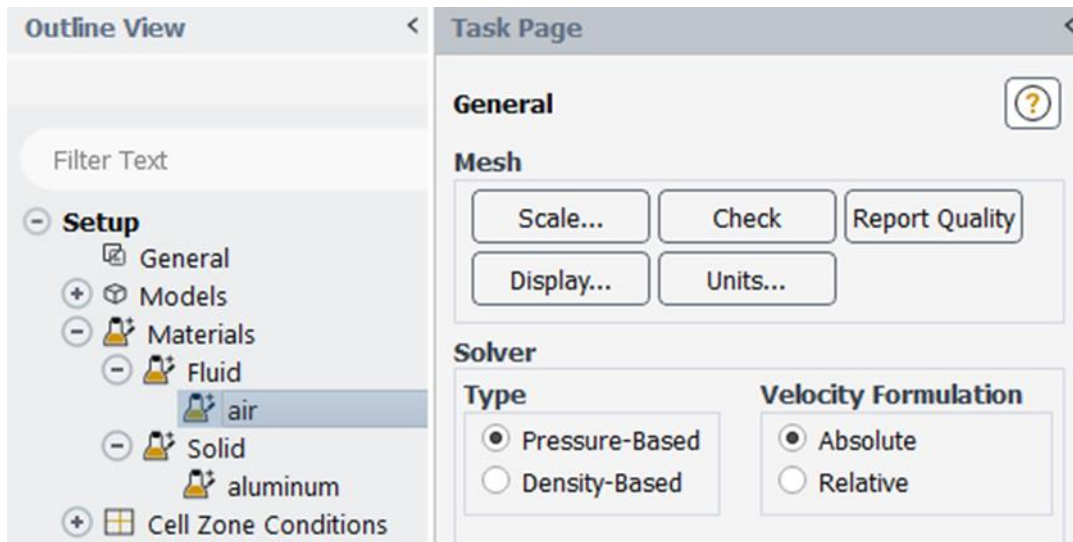


Figure 3.8 : Définition des caractéristiques du fluide

- Définition des conditions aux limites :

Les conditions aux limites sont spécifiées pour chaque frontière du domaine d'écoulement. Elles peuvent inclure des conditions de paroi, des conditions d'entrée et de sortie, des conditions de symétrie, ainsi que des frontières d'entraînement libre.

Setup → Boundary condition...

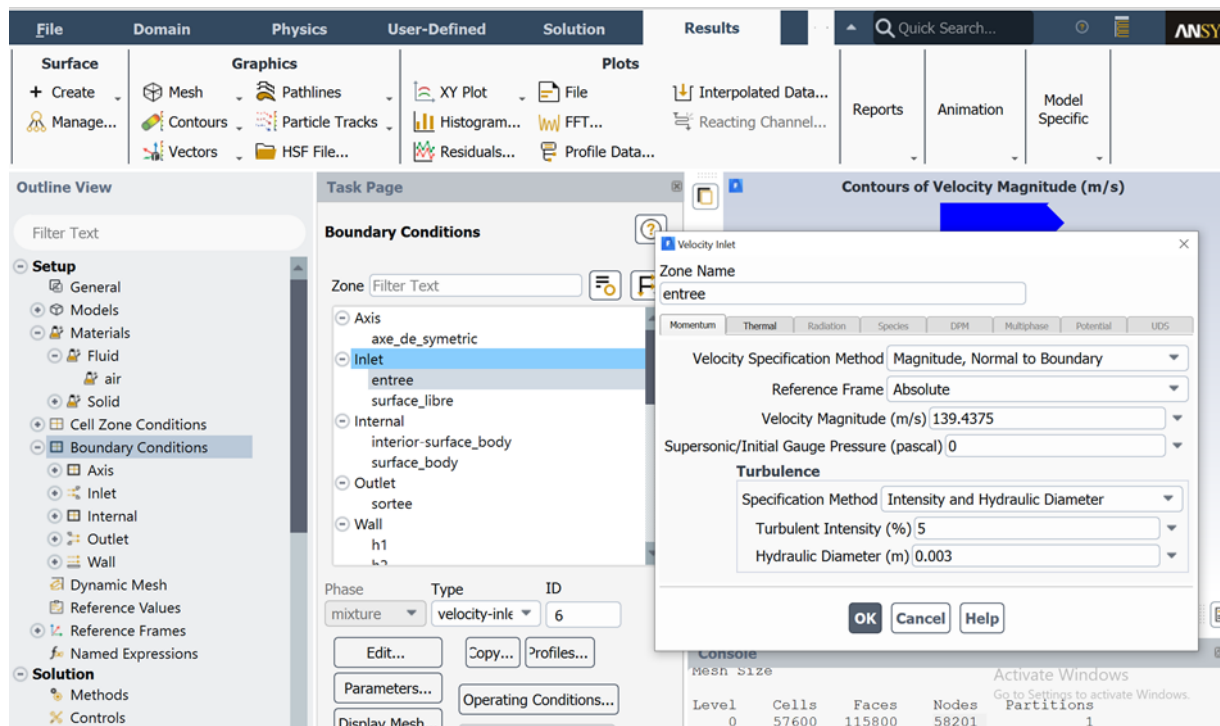


Figure 3.9 : Définition des conditions aux limites.

- Choix de la méthode de solution : Solution → Methods → Scheme...

Cette étape permet de sélectionner la méthode de résolution. Dans notre cas, nous avons opté pour le schéma de discrétisation Second Order Upwind ainsi que l'algorithme SIMPLE pour traiter le couplage pression-vitesse.

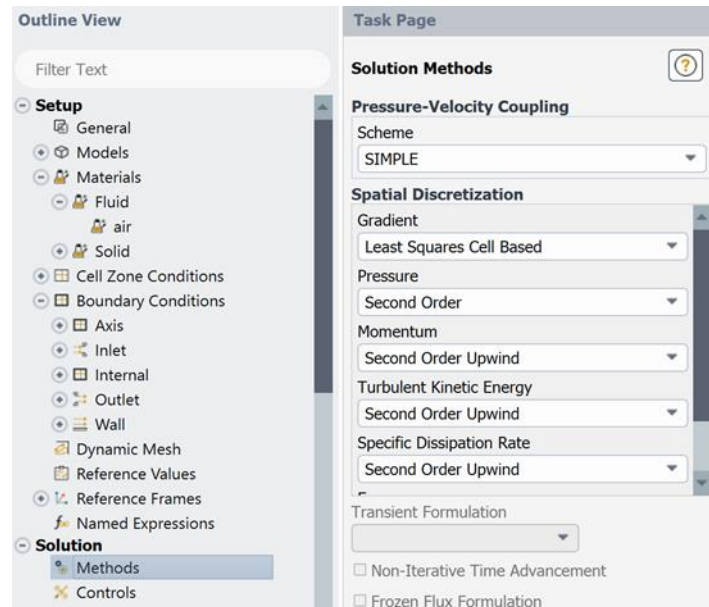


Figure 3.10 : Choix de solution

- Initialisation du domaine d'étude : Setup → Solution → Monitors → Initialization...

Cette étape consiste à initialiser le champ d'écoulement avec la valeur de départ souhaitée.

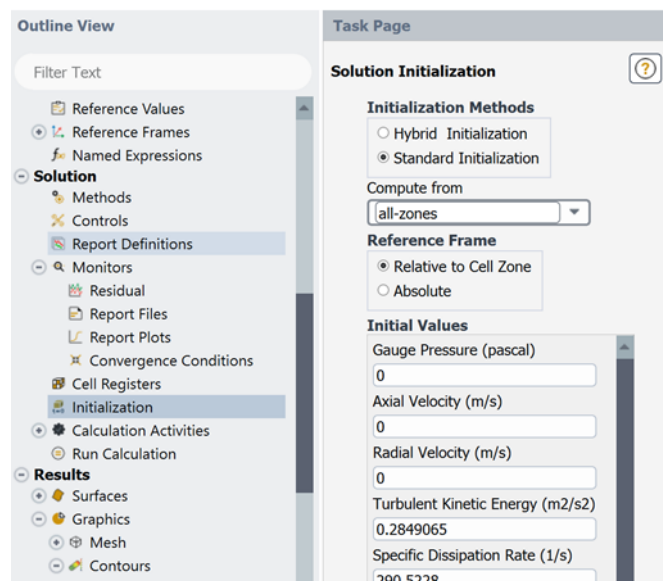


Figure 3.11: Initialisation par vitesse.

- Configuration du calcul: Setup → Monitors → Run Calculation → Number of Iterations...

Cette étape consiste à définir le nombre d'itérations pour la simulation. Il est recommandé d'activer l'option Plot dans la fenêtre Résiduel Monitors pour visualiser l'évolution des résidus au cours des itérations.

- Lancement des itérations jusqu'à la convergence : Setup → Run Calculation → Calculate...

Cette étape démarre le processus d'itération qui se poursuit jusqu'à ce que la solution atteigne la convergence, indiquée par la stabilisation des résidus ou l'atteinte des critères de convergence prédéfinis.

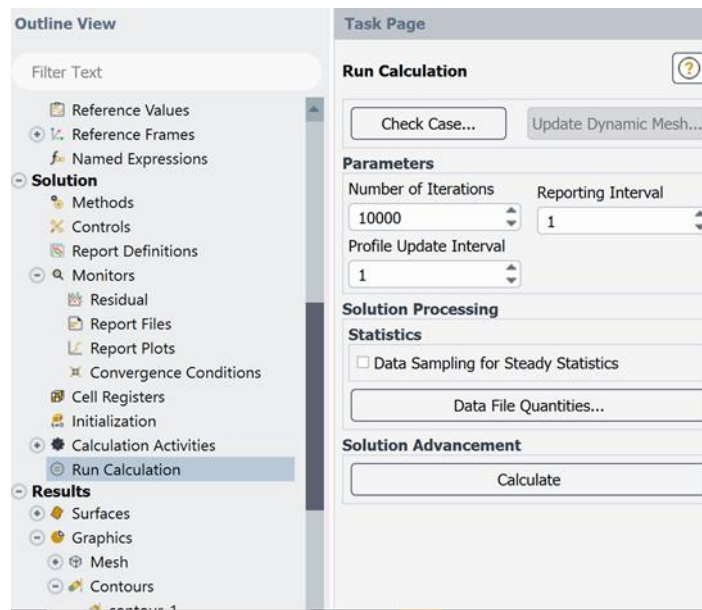


Figure 3.12 : Résiduel monitors et Lancement les itérations

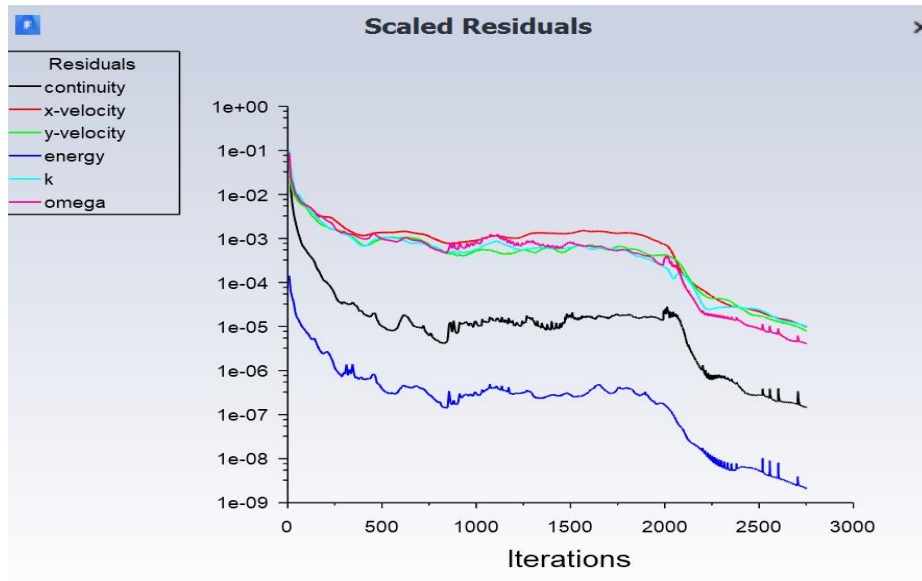


Figure 3.13 : Fenêtre des itérations

- A la fin dans cette étape on va récupérer les résultats, nous allons dans la case : Results

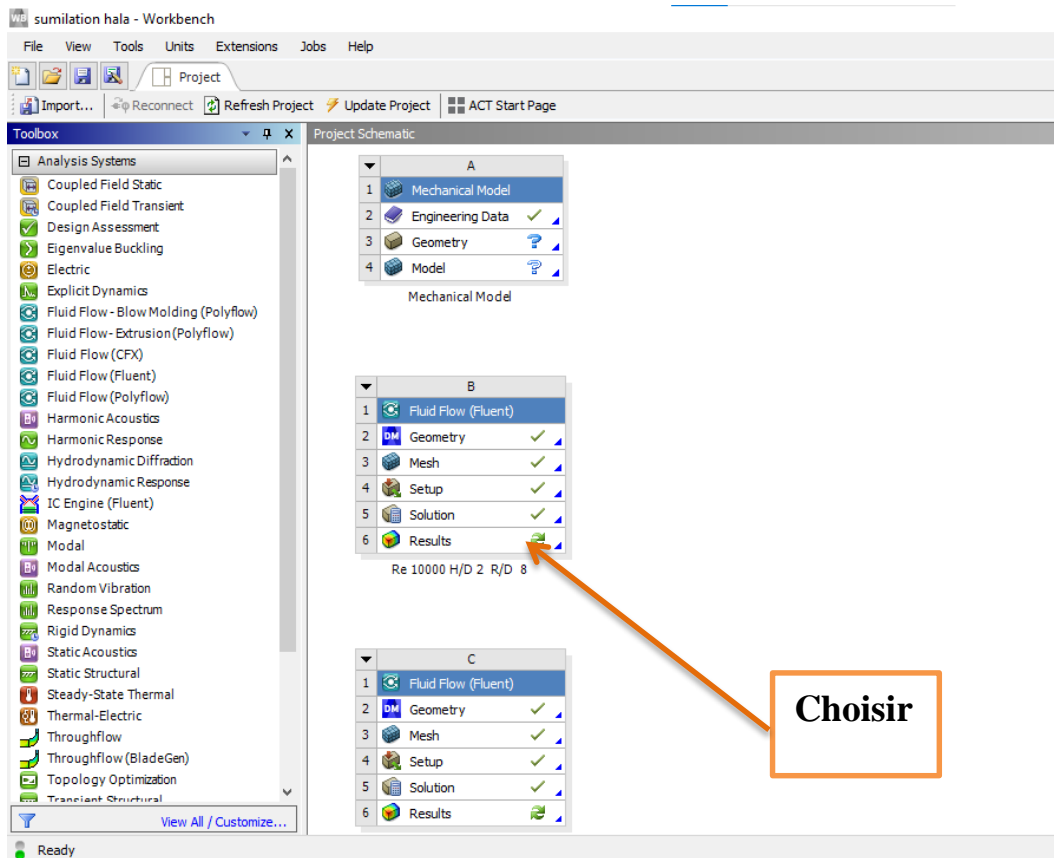


Figure 3.14 : Extraire les résultats.

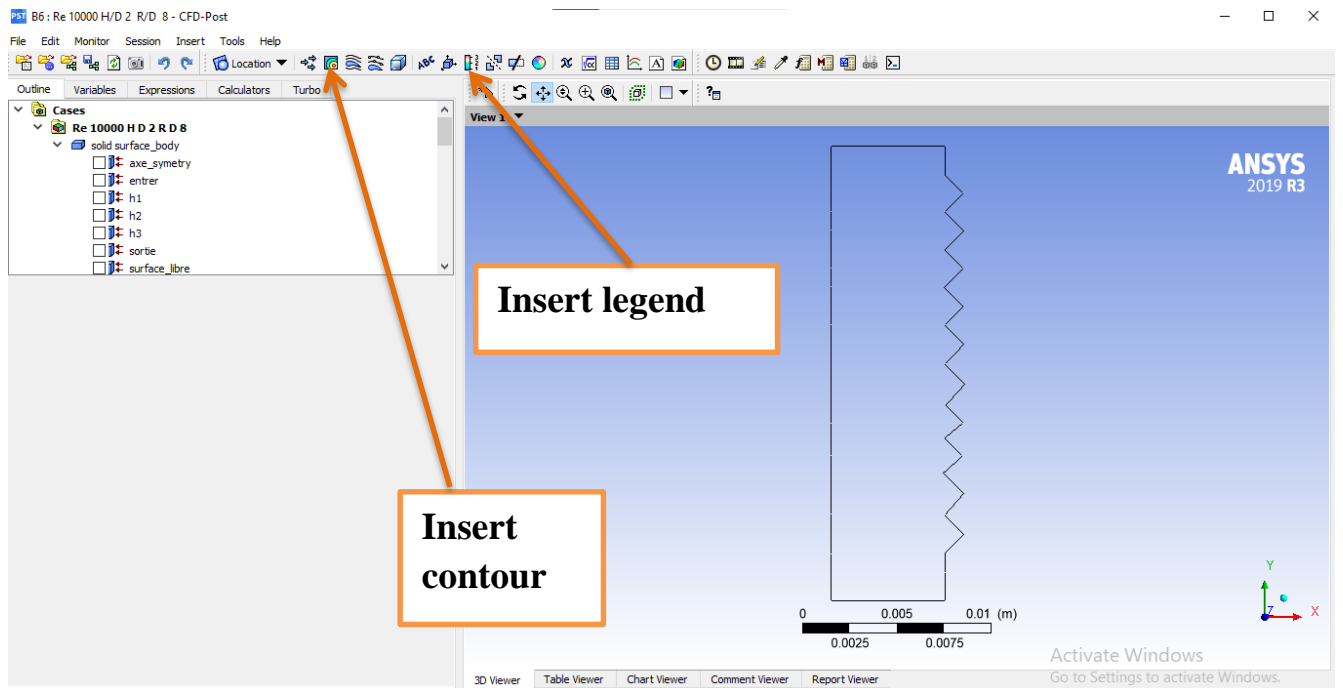


Figure 3.15 : Insert un contour et un légende.

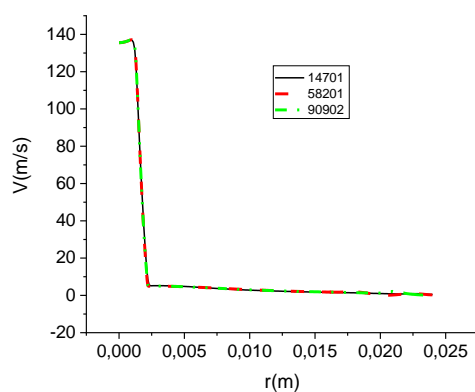
Chapitre 4 Discussion des résultats

Dans ce chapitre, on va présenter les résultats de champs dynamique obtenus à l'aide du code commercial ANSYS pour un jet turbulent impactant une paroi corruguée de type triangulaire, en utilisant le modèle de turbulence SST k- ω .

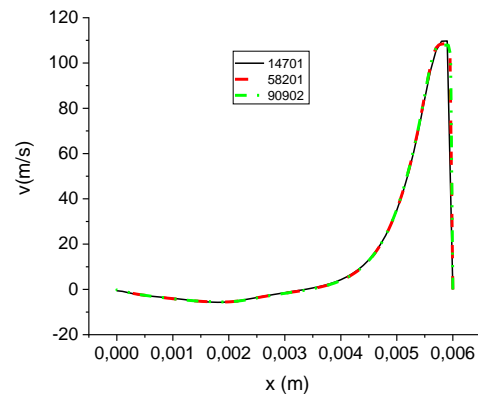
4.1 Effet de maillage

Dans cette section on va étudier l'effet de maillage sur la stabilité de la solution pour la paroi triangulaire. Les profils de vitesse et de l'énergie cinétique turbulent sont tracés et comparés dans les régions de jet libre et le jet pariétal pour cette maillage. Trois maillages avec différents nombre de nœuds ont été utilisés, M1(14701), M2(58201) et M3 (90902).

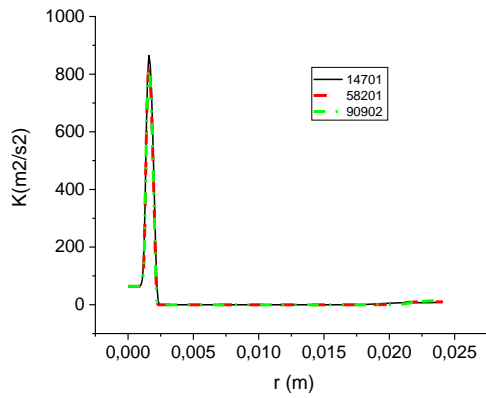
La figure (4.1) compare les profils de vitesse, de l'énergie cinétique turbulente et la température pour différentes positions axiales et radiales pour la paroi triangulaire. Le résultat obtenu montre que les profils sont presque identiques pour les deux maillages M2(58201) et M3 (90902). Dans ce cas on a choisi le Maillage M2 avec un nombre de nœuds égal à 58201 voir figure (4.2).



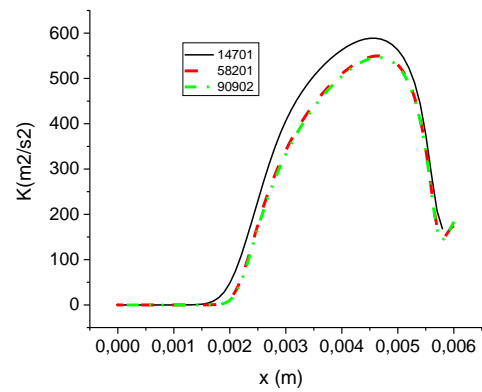
a) Vitesse axiale $x=0.003$ (m)



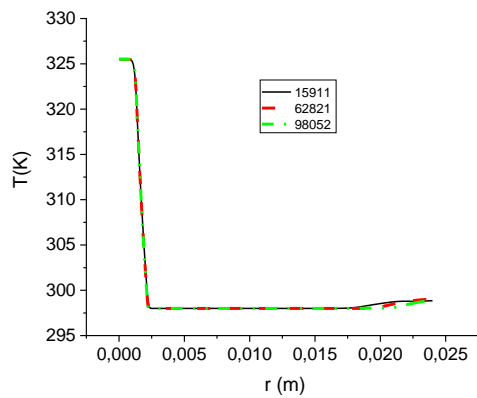
b) Vitesse radiale $r=0.002$ (m)



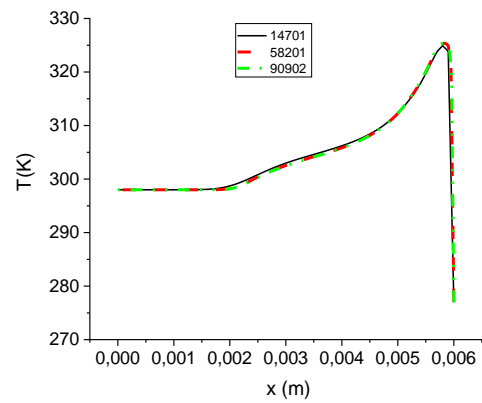
c) Turbulence k à x=0.002 (m)



d) Turbulence k à r=0.002 (m)



e) Température a x= 0,003 (m)



f) Température a r= 0,002 (m)

Figure 4.1 : Les profils des vitesses, de l'énergie turbulente et température dans les trois maillages - géométrie triangle.

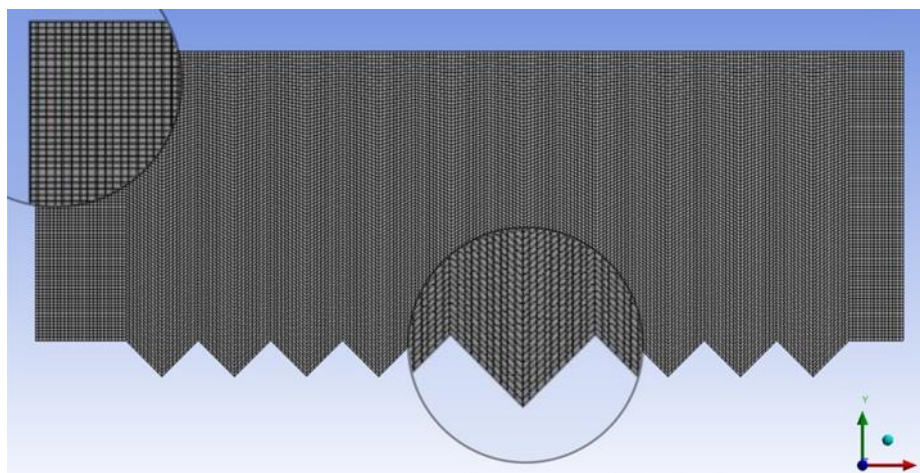


Figure 4. 2 : Maillage utilisé M3 = 58201.

4.2 Validation

La figure 4. 8 compare les résultats de simulation numérique de nombre de Nusselt moyen pour différent rayon de la plaque normalise par le diamètre avec l'expérimental qui réalise par **Sagot et al.** [6] On remarque que il y un sou estimation pour la valeur de $R/D = 6$ et un accorde pour les valeurs de $R/D = 8$ et 10 .

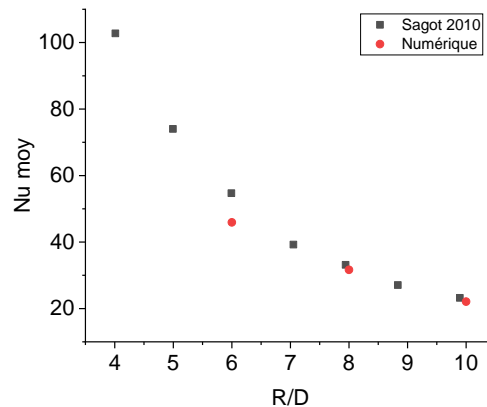


Figure 4. 3: Comparaison de valeurs numériques et expérimentales (Sagot 2010) du nombre de Nusselt moyen-géométrie triangulaire

4.3 Effet de nombre de Reynolds

Afin d'étudier l'effet du nombre de Reynolds sur les champs dynamiques, nous avons choisi quatre valeurs différentes du nombre de Reynolds: $Re = 5000, 10000, 23000$ et 30000 . Les autres paramètres ont été maintenus constants, avec $H/D = 2$ et $R/D = 8$.

La figure 4.4 présenter les contours de vitesse pour différent nombre de Reynolds considère. Il est clairement visible qu'il y effet important de nombre de Reynolds sur la vitesse. Pour une valeur élevé du nombre de Reynolds $Re = 30000$ il y une forte vitesse dans tous le domaine (jet libre et jet pariétale). Quand le nombre de Re diminue les valeurs de vitesse diminue aussi. A l'intérieur des cavités la même chose observe quand le nombre de Reynolds augmente la vitesse augmente aussi, a l'extérieur de cavité une valeur de vitesse important de coin de deuxième cavité allons jusqu'à a la fin de cinquième cavité.

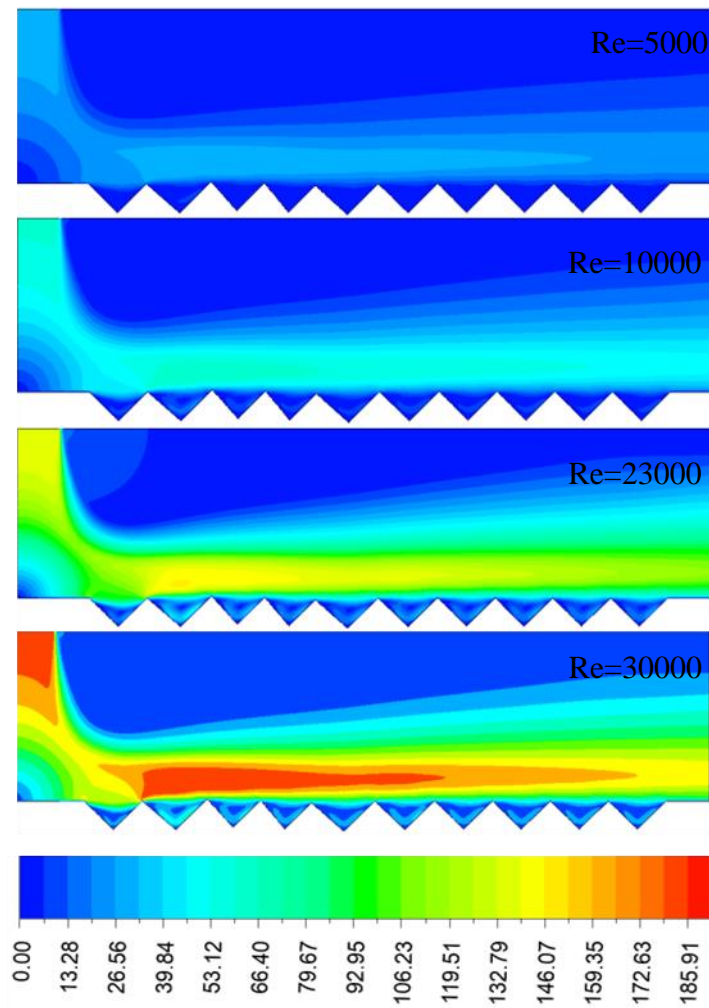
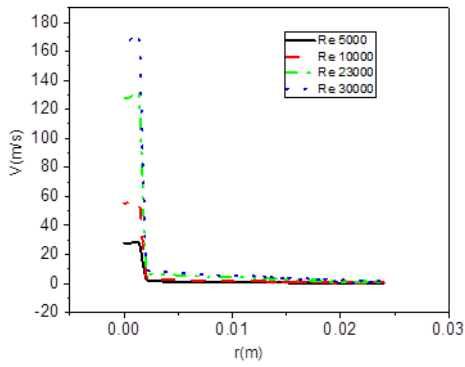
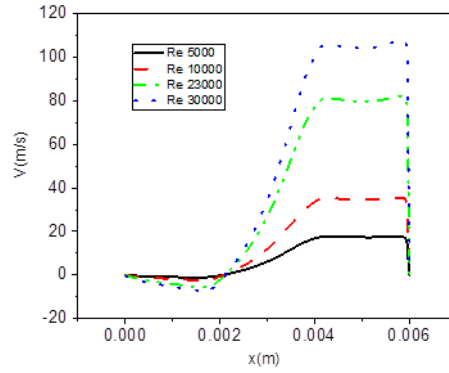


Figure 4.4: Les contours de vitesse -effet du Reynolds

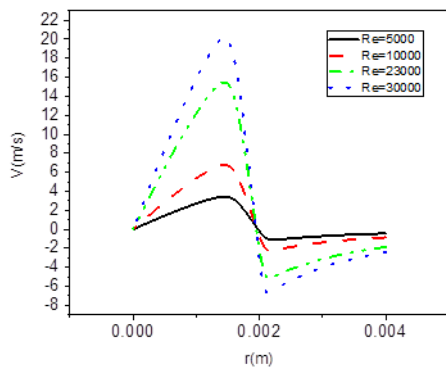
La figure 4.5 présenter les profile de vitesse à la position radiale $r = 0.002, 0.004$ et 0.0055 (m) et à la position axiale $x = 0.003, 0.004$ et 0.0055 (m) en remarque que il y une accélération de fluide dans les cas de nombre de Reynolds la plus grande valeur $Re = 30000$.



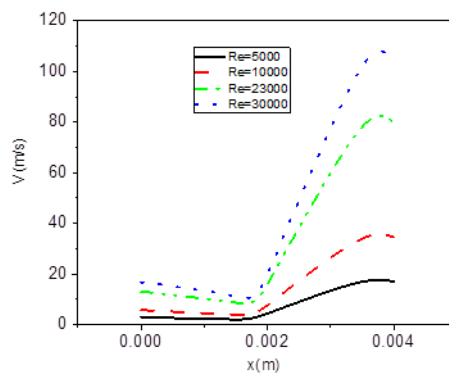
a-Vitesse axial $x=0.002$ (m)



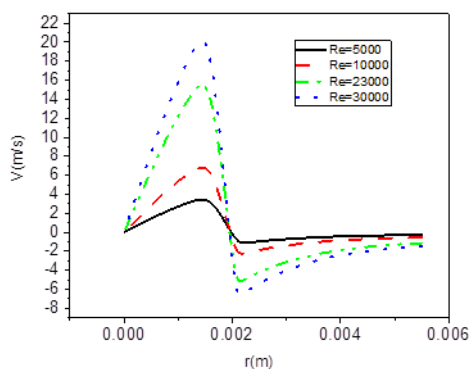
b-Vitesse radial $r=0.002$ (m)



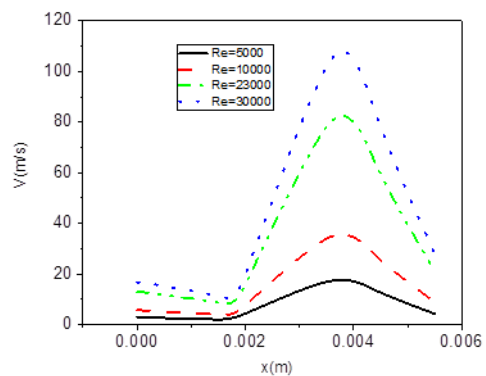
c-Vitesse axial $x=0.004$ (m)



d-Vitesse radial $r=0.004$ (m)



e-Vitesse axial $x=0.0055$ (m)



f-Vitesse radial $r=0.0055$ (m)

La figure 4.5 : les profils de la vitesse à la position radiale et à la position axiale

La figure 4.6 illustre les contours de pression pour différents nombres de Reynolds considérés. On remarque que des faibles valeurs de pression dans la plus grande partie du domaine sauf au zone de stagnation il est clairement visible une forte pression. Concernant l'effet de Reynolds, quand le

nombre de Reynolds augmente la valeur de pression au niveau de zone de stagnation augmente aussi. Il est remarquable aussi que il y une dépression important remarquable dans la deuxième cavité pour les deux cas $Re = 23000$ et 30000 .

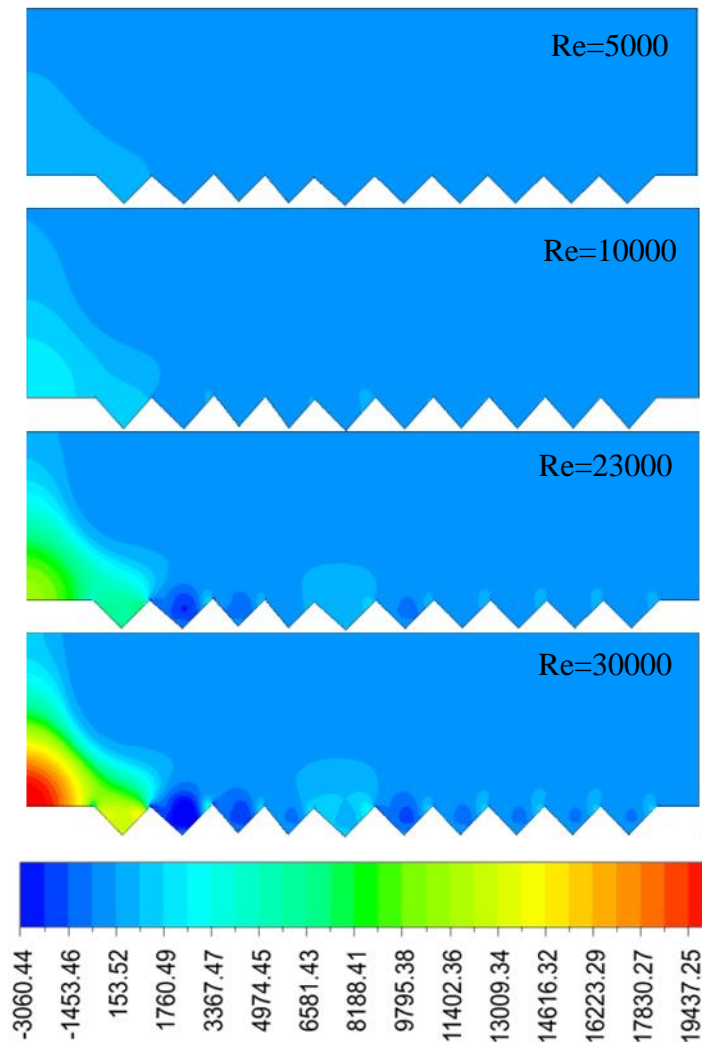


Figure 4.6 : Les contours de Pression -effet du Reynolds

La figure 4.7 montre les contours d'énergie cinétique turbulente pour différents nombres de Reynolds. Les champs de l'énergie cinétique turbulente dans le jet libre et le jet pariétal sont faiblement influencés par la variation du nombre de Reynolds. Les valeurs d'énergie cinétique la plus intense sont observées dans la zone de fort cisaillement et dans le jet pariétal à peu près aux positions r qui varient entre 6.5 (mm). À l'intérieur des cavités, il y a une influence du nombre de Reynolds : quand le nombre de Re augmente, les valeurs de l'énergie cinétique turbulente augmentent aussi.

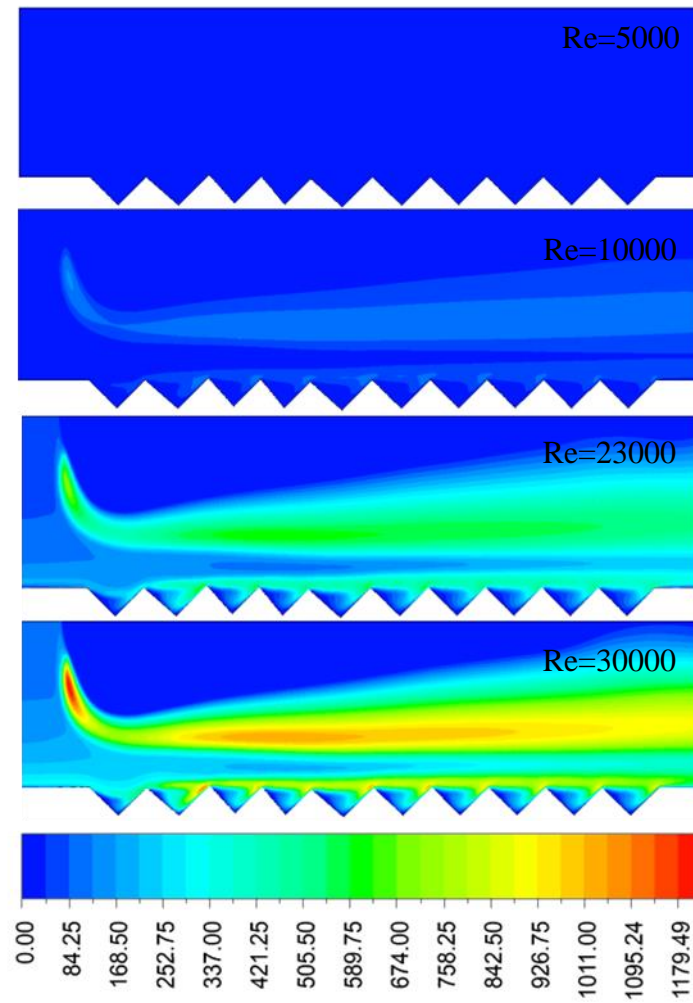
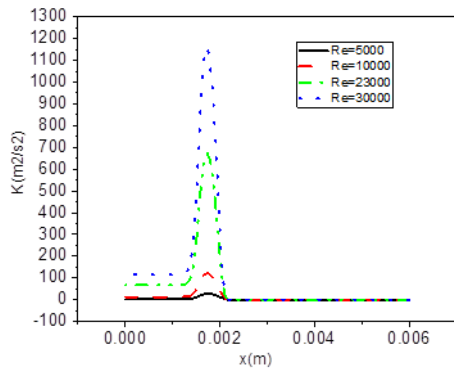
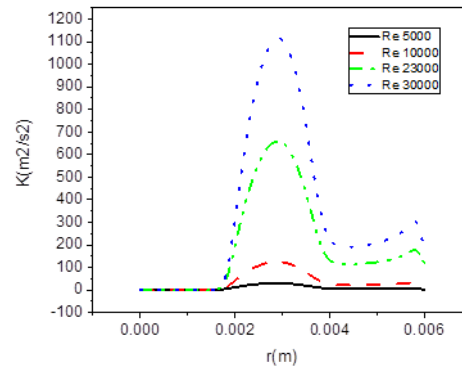


Figure 4.7 : Les contours d'énergie cinétique turbulente -effet du Reynolds

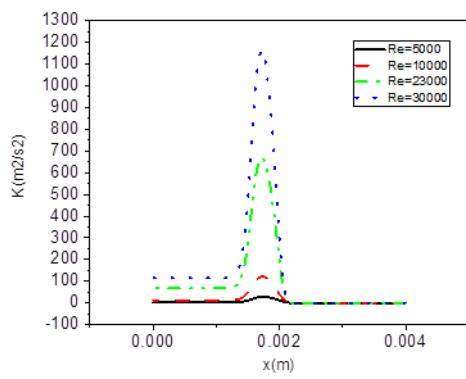
La figure 4.8 présenter les profile d'énergie cinétique turbulente à la position radiale $r= 0.002$, 0.004 et 0.0055 (m) et à la position axiale $x= 0.002$, 0.004 et 0.0055 (m). Le profiles de l'énergie cinétique turbulente confirme les contours de vitesse, un pic de l'énergie cinétique est remarque près de parois (jet pariétal) et dans la zone de fort cisaillement en remarque aussi que quand en augmente le nombre de Reynolds l'intensité de turbulence augmente aussi.



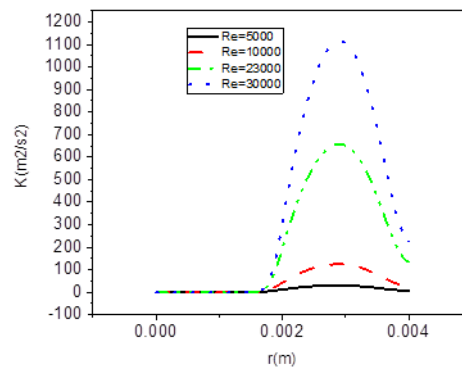
a - Turbulence K à r=0.002(m)



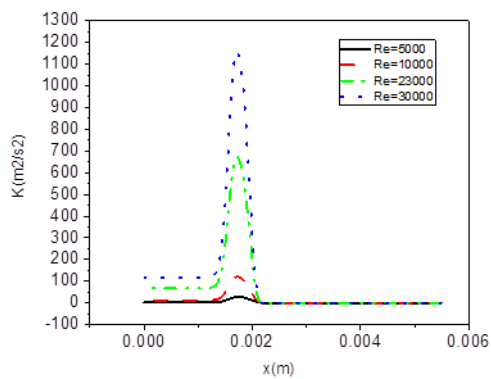
b- Turbulence k à x=0.002 (m)



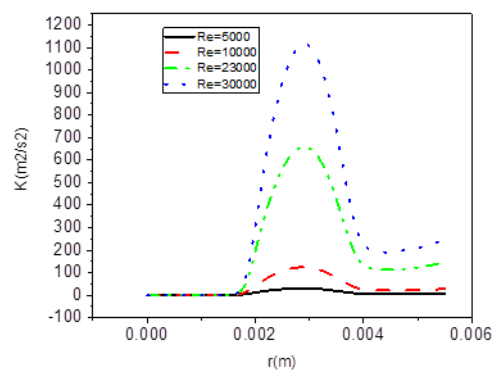
c - Turbulence K à r=0.004(m)



d- Turbulence k à x=0.004 (m)



e - Turbulence k à r=0.0055(m)



f - Turbulence k à x=0.0055 (m)

La figure 4.8 : les profils de Turbulence à la position radiale et à la position axiale

4.4 Effet de H/D

Pour étudier l'effet de la distance buse-paroi normalisée / le diamètre de jet (H/D) sur les champs dynamiques et thermiques, nous avons choisi quatre valeurs différentes : $H/D = 1, 2, 6$ et 8 . Les autres paramètres ont été maintenus constants, avec $R/D = 8$ et $Re = 23000$.

La figure 4.9 présente les contours de la vitesse obtenus pour les différentes distances buse-paroi. Le champ de la vitesse est influencé par ce paramètre.

Au niveau de jet libre le fluide s'écoule comme si il n'est pas une paroi dans les deux cas $H/D = 6$ et 8 par contre dans les autres cas le fluide est influencé par la paroi sur tous dans le cas de $H/D = 1$ il y a une déviation rapide. Dans le jet pariétal les valeurs maximales de vitesse sont observées pour une distance $H/D = 1$.

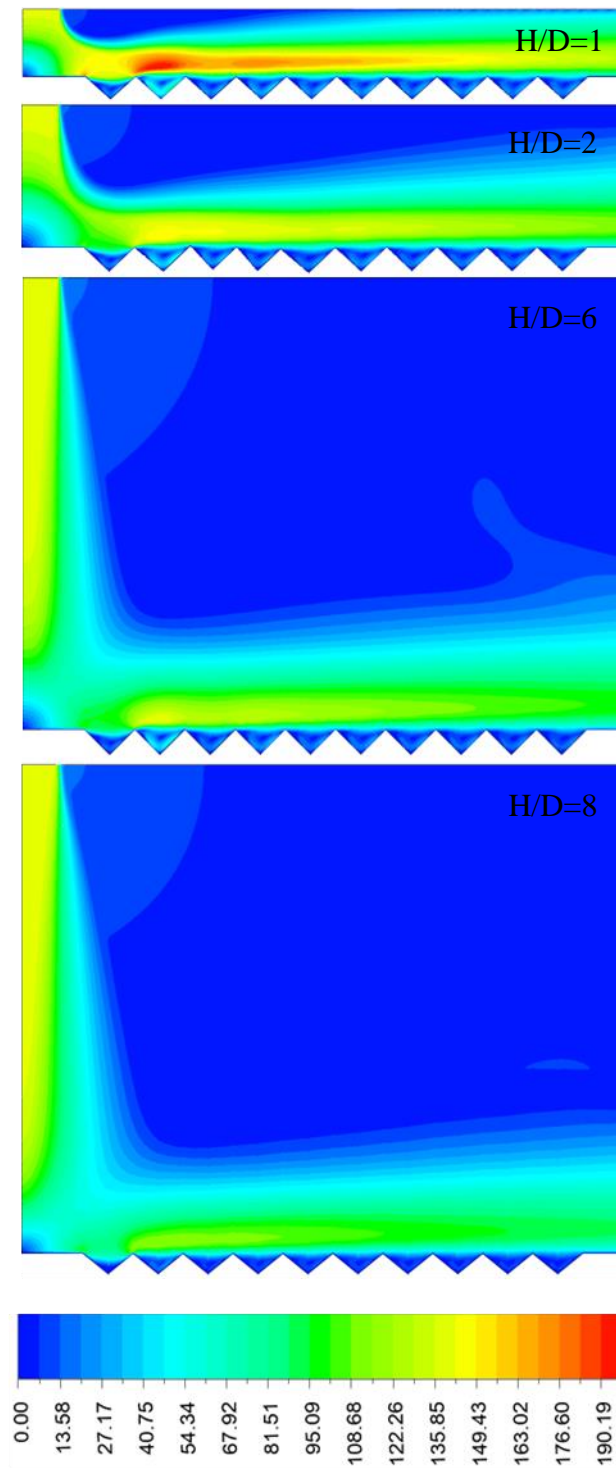
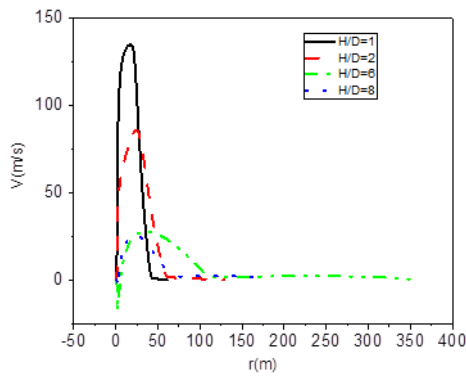
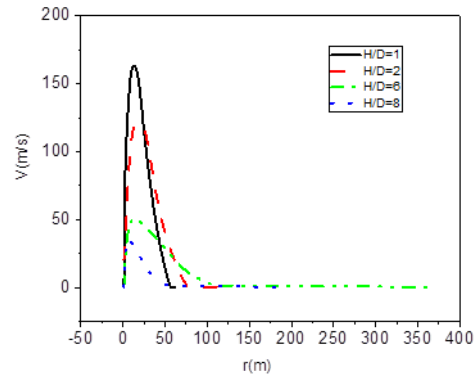


Figure 4.9 : Contours de vitesse -effet de H/D.

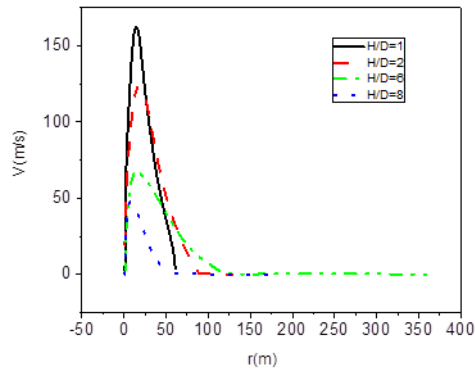
La figure 4.10 présente les profils de vitesse radiale pour différents positions $r = 4.5, 8.5, 12.5$ et 16.5 . Les profils de vitesse confirment les contours sur le jet pariétal il y a une accélération de fluide pour le cas $H/D = 1$ par rapport aux autres cas.



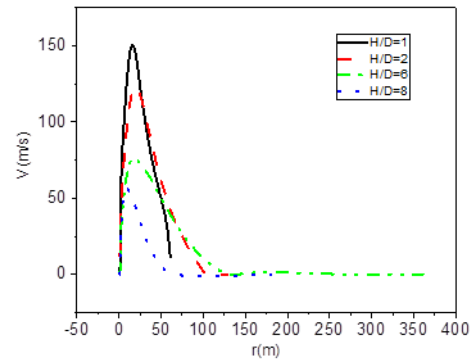
a- $r = 4.5 \text{ mm}$



b- $r = 8.5$



c- $r = 12.5$



d- $r = 16.5$

La figure 4.10 : les profils de la vitesse radiale à la position -effet d' H/D .

La figure 4.11 illustre les contours de pression pour différent distance buse-paroi normalise par le diamètre considère. On remarque que des faible valeurs de pression dans la plus part de le domaine sauf au zone de stagnation il est clairement visible une forte pression sur tous dans la distance $H/D = 1$ comparons les autres distances. En remarque aussi que il y une dépression dans la deuxième cavité pour les cas $H/D = 1, 2$ et 6 . Des valeurs de pression plus élevé au coin de chaque cavité par rapport à la valeur de pression dans la plus part de domaine.

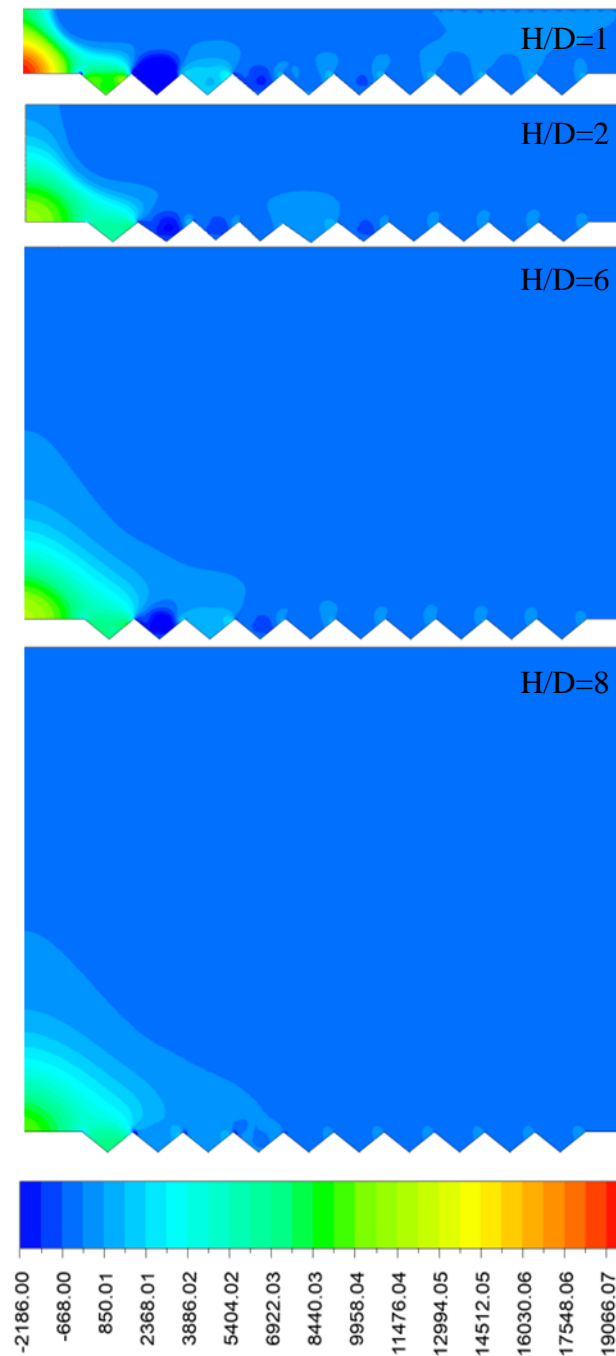


Figure 4.11 : Contours de pression -effet de H/D.

La figure 4.12 illustre les contours d'énergie cinétique turbulente pour différent distance buse-paroi normalise par le diamètre considère. Les contours montrent que l'énergie cinétique turbulente faible dans la majorité de domaine. Sauf dans quelque zone comme la zone de forte cisaillement, jet pariétale et les cavités pour certain cas H/D des valeurs maximales de l'énergie

cinétique turbulente. Concernant l'effet d' H/D , en remarque que les valeurs le plus élevé de l'énergie cinétique est enregistré pour les distances buse paroi $H/D = 1$ et 2.

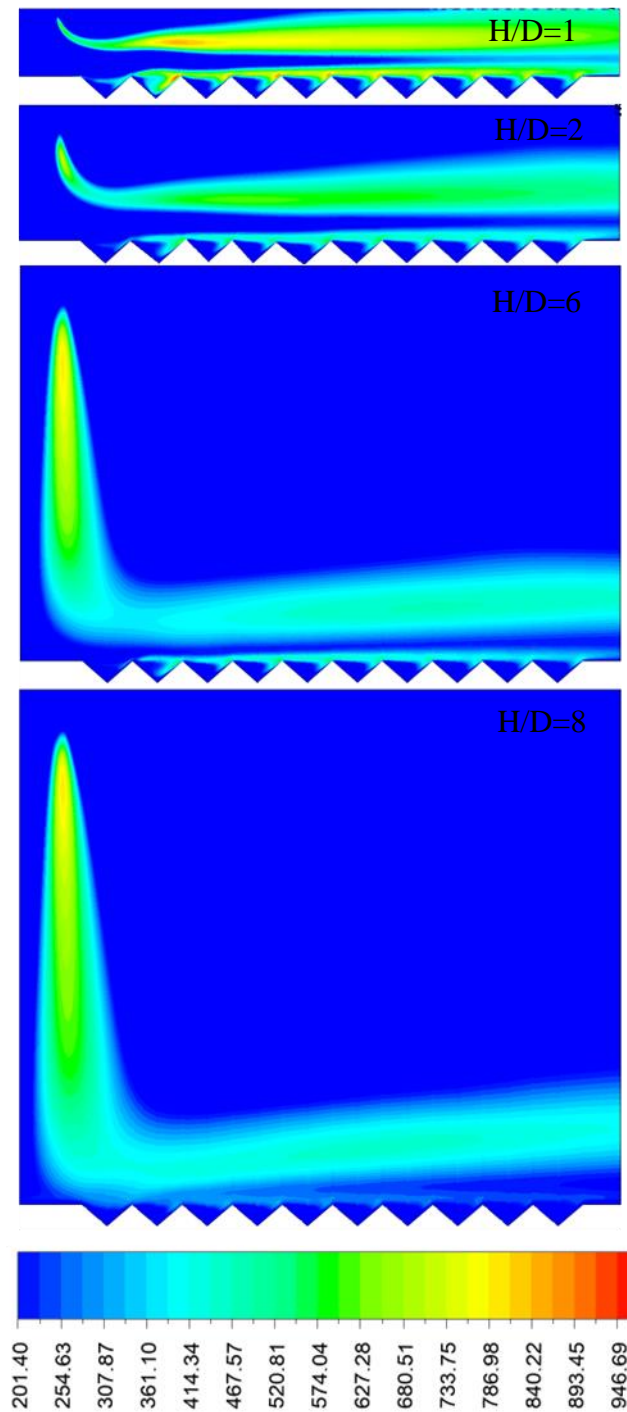
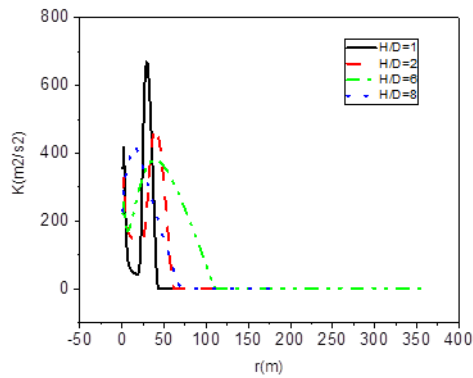


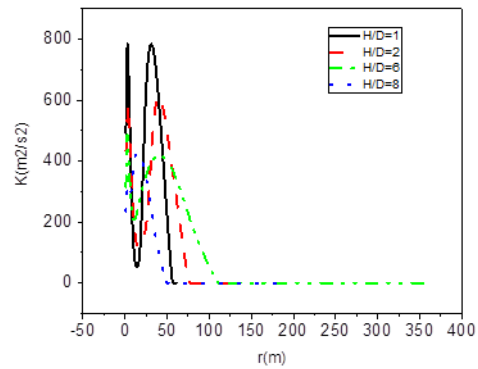
Figure 4.12 : Contours de l'énergie cinétique turbulente -effet d' H/D .

La figure 4.130 présente les profils de vitesse radiale pour différent position $r = 4.5, 8.5, 12.5$ et 16.5. Les profils l'énergie cinétique turbulente confirme les contours sur les valeurs maximal

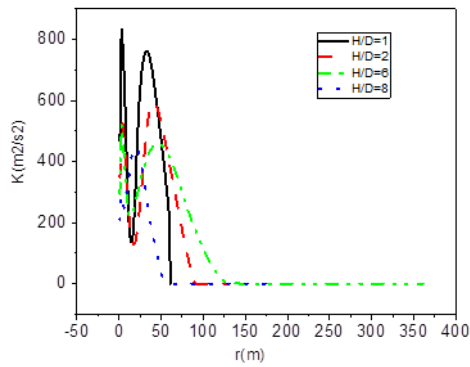
de l'énergie cinétique turbulente est enregistré pour la distance $H/D = 1$ et les autre cas des valeurs minimal.



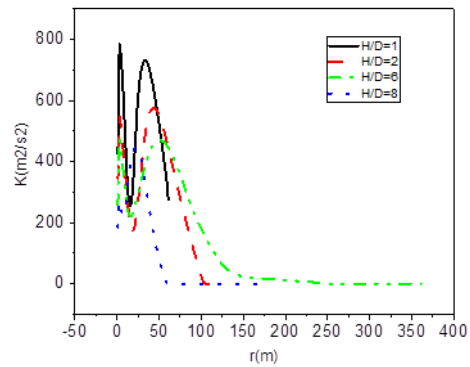
a- $r = 4.5\text{mm}$



b- $r = 8.5\text{m}$



c- $r = 12.5\text{ mm}$



d - $r = 16.5\text{ mm}$

La figure 4.13 : les profils de l'énergie cinétique turbulente-effet d' H/D ..

Conclusion et perspectives

Une simulation numérique d'un jet turbulent impactant une paroi corruguée de type triangulaire a été effectuée par le code commercial ANSYS 2019 R3 par le modèle de turbulence SST k- ω . Nous avons étudié l'effet de nombre de Reynolds et la distance buse-paroi sur le comportement dynamique.

Les conclusions sont résumées comme suite :

- Le jet impactant une paroi corruguée se divise en quatre zones: zone de jet libre, zone de stagnation, zone de jet pariétal et à l'intérieur des cavités.
- Il est clairement observé qu'il y a une zone de recirculation de fluide à l'intérieur de la cavité.
- Les valeurs maximales de l'énergie cinétique sont au niveau du jet pariétal.
- quand on augmente le nombre de Reynolds l'intensité de turbulence augmente aussi.
- les valeurs les plus élevées de l'énergie cinétique sont enregistrées pour les distances buse paroi $H/D = 1$ et 2 .
- les valeurs maximales de vitesse sont observées pour une distance $H/D = 1$.

Nous terminons ce mémoire par des perspectives:

- Etude de l'effet d'autres formes de corrugation.
- Etude de l'effet du modèle de turbulence sur la dynamique et thermique par un jet impactant.

Référence

- [1]. [https://www.etsmtl.ca/actualites/technique-du-jet-impactant-pour-le degivrage-au-sol](https://www.etsmtl.ca/actualites/technique-du-jet-impactant-pour-le-degivrage-au-sol)
- [2]. Dourdour Amina. Etude par la programmation d'un jet rond turbulent impactant une plaque plane circulaire. memoire magister (2014), département de genie mécanique, universite mentouri Constantine.
- [3] . COOPER, D., JACKSON, D. C., LAUNDER, B. E. et LIAO, G. X. 1993. Impinging jet studies for turbulence model assessment –I. Flow-field experiments. *Int. J. Heat Mass Transfer* 36(10), pp. 2675-2684.
- [4]. BAUGHN, J.W., SHIMIZU, S. 1989. Heat transfer measurement from a surface with uniform heat flux and an impinging jet. *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 1096-1098.
- [5]. ERCOFTAC open database, <http://www.ercoftac.mech.surrey.ac.uk>.
- [6]. B. Sagot, G. Antonini, et F. Buron, Enhancement of jet-to-wall heat transfer using axisymmetric grooved impinging plates, *Int. J. Therm. Sci*, 2010, Vol. 49, No. 6, P.1026-1030.
- [7]. Dairay, t, Fortune, v, Lamballais, e et Brizzi, Simulation numérique directes d'un jet impactant, 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon, France, 29 Aout -29 Septembre 2011, P.1-6.
- [8]. K. Jambunathan, E. Lai, M.A. Moss, et B.L. Button, A review of heat transfer data for single circular jet impingement, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1992, Vol. 13,P. 106-115.
- [9]. R. Viskanta, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets. *Exp Therm Fluid*, 1993, Vol. 6, P. 111-134.
- [10]. Naseem Uddin, Sven Olaf Neumann, Bernhard Weigand.2013. LES simulations of an impinging jet: On the origin of the second peak in the Nusselt number distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, Vol. 57, P.356–368.
- [11]. S. Hsieh, H. H. Tasi. et S. C. Chan, Local heat transfer in rotating square-ribroughened and smooth channels with jet impingement, *Int. J. Heat Mass Transfert*, 2004, Vol. 47, No. 12-13, P. 2769-2784.

- [12]. Anwarullah, M., Vasudeva rao, V. et Sharma, K.V, Effect of Nozzle Spacing on Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics of an Impinging Circular Jet in Cooling of Electronic Components, *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*, 2012, P. 7-12.
- [13].] Raheem,A., Siddique ,W. ,Waheed ,K., Aziz,I.,Javed, I.,Iqbal,M.N.,et Salameh, T.(2024).Heat transfert Enhancement of impinging jet-Corrugated solar air heaters. *Journal of solar energy engineering, Transactions of the ASME*, 146(4), Article 041007.
- [14]. SEBASTIEN,P, THIEN DUY,N, SOUAD, H, JULIEN, P et STEPHANE, V, 3-5 juin 2013, Transfert de chaleur et de masse par un jet impactant dans un système discoïde rotor-stator, XIème Colloque Interuniversitaire Franco-québécois sur la Thermique des Systèmes, Reims, France, pp.183-188.
- [15] F. R. Menter, Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*, 1994, Vol. 32, P. 1598-1605
- [16] D. C. Wilcox, Formulation of the k-omega turbulence model revisited. *AIAA Journal*, 2008, Vol. 46, No. 11, P. 2823-2838.
- [17] B. E. Launder et D. B. Spalding, The numerical computation of turbulent flows,*Comp. Meth. Appl. Mech. Eng*, 1974, Vol. 3, No. 2, P. 269-289.
- [18] Documentation fluent :<https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node217.htm>