



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département: Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Mécanique énergétique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Mohamed Abdallah Labeled

Le : jeudi 17 septembre 2020

Etude des échanges thermiques d'un jet impactant une surface verticale

Jury :

Dr.	Youcef Djebbloun	MCB	Université de Biskra	Président
Pr.	Nouredinne Belghar	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Arfaoui Ben Arfaoui	MAA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019 – 2020.

Dédicaces

Je dédie cet humble travail

À mes chers parents et à ma grande mère, رَحْمَهَا اللهُ

Pour leur amour, leur bonté et leur sacrifice,

Leur encouragement constant

À mes frères et sœurs

Pour toute ma famille

Aux superviseurs du Pr. BELGHAR Nouredine

A tous mes amis en particulier

Rima, Saif El-Islam, Abou Jihad, Nasser et Ali

Aux camarades de classe en particulier

Abdellatif, charaf Elddin, Badreddine, Arezqi, Maammar, Islam et Aymen

Un salut spécial à ma collègue Nour El-Houda pour son sacrifice avec moi

À tous ceux qui ont donné de son temps pour la science

Et pour tous ceux qui utilisent la science pour de bon

Et la prospérité de l'humanité.

Remerciement

Merci beaucoup aux superviseurs du Pr. Nouredine BELGHAR pour avoir accueilli Ahed sur ce sujet de recherche pour ses précieux conseils tout le temps pour son aide et ses conseils pour faire ce travail.

Je remercie Dr. Youcef DJEBLOUN pour avoir bien voulu accepter de présider le jury.

Je remercie Dr. Arfaoui BEN ARFAOUI pour avoir bien accepté d'examiner ce mémoire.

Je remercie tous les professeurs et tous les camarades de classe qui ont contribué à ma formation.

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude numérique d'un jet impactant turbulent affectant une surface verticale, avec transfert de chaleur, via technique CFD Workbench Fluent, en utilisant une version améliorée du modèle turbulent $k-\varepsilon$. Cette géométrie permet le refroidissement d'une surface chauffée avec une dimension mesurée entre la sortie de buse et l'espace d'impact. Les équations mathématiques qui régissent le phénomène étudié ont été résolues par le logiciel ANSYS Workbench, en se concentrant sur les résultats de la vitesse, de la température et de l'énergie cinétique turbulente à travers une dimension différente entre l'entrée de jet et la zone de collision, ainsi le nombre de Nusselt; pour un certain nombre de Reynolds.

Mots clés : Jet impactant, Modèle turbulent $k-\varepsilon$, Espace d'impact, Energie cinétique turbulent.

Abstract

The objective of this work is the numerical study of a turbulent impacting jet affecting a vertical surface, with heat transfer, via CFD Workbench Fluent technique, using an improved version of the turbulent $k-\varepsilon$ model. This geometry allows the cooling of a heated surface with a dimension measured between the nozzle outlet and the impact space. The mathematical equations governing the studied phenomenon were solved by the ANSYS Workbench software, focusing on the results of the speed, temperature and turbulent kinetic energy through a different dimension between the jet inlet and the collision zone, thus the Nusselt number; for a number of Reynolds.

Keywords : Impacting jet, $k-\varepsilon$ turbulent model, Impact space, Turbulent kinetic energy.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو الدراسة العددية لنفث صادم مضطرب يؤثر على سطح عمودي, مع نقل الحرارة عبر تقنية CFD Workbeshfluent باستخدام نسخة محسنة من نموذج k-ε المضطرب. تسمح هذه الهندسة بتبريد سطح ساخن بابعاد تقاس بين مخرج الفوهة ومساحة التأثير. تم حل المعادلات الرياضية التي تحكم الظاهرة المدروسة بواسطة برنامج CFD Workbeshfluent مع التركيز على نتائج السرعة ودرجة الحرارة والطاقة الحركية المضطربة من خلال بعد مختلف بين مدخل التدفق ومنطقة الاصطدام, وبالتالي رقم نيسولت لعدد من رينولدز.

الكلمات المفتاحية : تأثير النفثة, نموذج مضطرب k-ε, مساحة التأثير, الطاقة الحركية المضطربة

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

Dédicaces.....	II
Remerciement.....	III
Résumé.....	IV
Table des matières.....	VI
Listes des figures.....	XII
Liste des tableaux.....	XVI
Nomenclature	XVII

1. Introduction générale.....	1
-------------------------------	---

Chapitre. I : Description générale des transferts thermiques et des écoulements par jets

I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralité sur le transfert de chaleur.....	3
I.2.1 Définition modes de transfert de chaleur.....	3
I.2.1.a Différents modes de transfert de chaleur.....	3
I.3 Généralités de L'écoulement par jet.....	6
I.3.1 Jet impactant une surface rigide.....	8
I.3.2 Structure du jet impactant une paroi plane.....	9
I.3.2.a Types de jet impactant.....	10
I.3.1.b Impacts de jets de cœur potentiel ou de jet transitionnel.....	11
I.3.1.c Structure de jet impactant d'une paroi verticale.....	12
I.3.3 Classification des jets.....	14

TABLE DES MATIÈRES

I.3.3.a Types d'orifice (la géométrie de l'injecteur).....	14
I.3.3.b Types de jets impactants sur des surfaces différents.....	15
I.3.4 Domaine d'application.....	17
I.3.4.a L'utilisation de jet impactant dans le domaine de l'aviation.....	17
I.3.4.b Système de dégivrage ou anti-divrage.....	18
I.4 Analyse Bibliographique.....	20

Chapitre II : Modélisation Mathématique

II.1 Introduction.....	26
II.2 Les équations de gouvernant.....	26
II.2.1 Equation de continuité.....	26
II.2.2 Equation de quantité de mouvement.....	26
II.2.3 Equation d'énergie.....	26
II.3 Définition et division du problème (domaine physique).....	27
II.4 Hypothèses simplificatrice et les équations de transfert	28
II.5 Propriétés du problème (conditions aux limites).....	29
II.6 Fonction du courant.....	30
II.7 Modèle k- ϵ	30

Chapitre III : Formulation Numérique

III.1 Introduction.....	33
III.2 Généralité sur l'ANSYS (<i>workbench</i> Fluent).....	33
III.3 Description du problème	34

TABLE DES MATIÈRES

III.4 Construction de la géométrie (Le problème étudié).....	34
III.5 Étapes de présentation le problème dans logiciel (Ansys version 19.0).....	35
III.5.1 Création le projet.....	35
III.5.2 Création de la géométrie.....	36
III.5.3 Conditions aux limites du problème.....	38
III.5.4 Le maillage.....	39
III.5.4.1 Définition.....	39
III.5.4.2 Création le maillage.....	40
III.5.4.3 Configuration du maillage.....	40
III.6 Simulation numérique	42
III.6.1 Les étapes de lancement du calcul par fluent.....	43
III.6.1.1 Les conditions de la résolution.....	44
III.7 Conclusion.....	47

Chapitre IV : résultats et discussions

IV.1 Introduction.....	48
IV.2 Convergence des résultats.....	48
IV.3 Interprétation et discussion des résultats obtenus.....	49
IV.3.1 Profil des vitesses.....	50
IV.3.1.1 Contours de vitesse.....	50
IV.3.1.2 Courbes de vitesse.....	53
IV.3.2 Champ de la température.....	56
IV.3.2.1 Présentation des contours de la température.....	56

TABLE DES MATIÈRES

IV.3.2.2 Courbes de température.....	58
IV.3.3 Variation de l'énergie cinétique turbulente.....	62
IV.3.3.1 Contours de l'énergie cinétique turbulente.....	62
IV.3.2.2 Courbes d'énergie cinétique turbulente.....	65
IV.3.4 Présentation des lignes du courant.....	68
IV.4 Number de Nusselt.....	70
IV.5 Conclusion.....	73
Conclusion générale.....	74
Référence	75

LISTE DES FIGURES

Listes des figures

Chapitre I

Figure I. 1: Illustration des modes de transfert de chaleur.....	4
Figure I. 2 : Structure d'un jet libre circulaire.....	8
Figure I. 3 : Structure générale du jet libre.....	8
Figure I. 4 : a) Structure du jet impactant par Rady – b) Mélange dans un jet transitionnel impactant une paroi rigide. DING 2003.....	9
Figure I. 5 : Différents jets impactants, RADY en 2005 a) impact du noyau potentiel; b) impact du jet transitionnel.....	12
Figure I. 6 : Illustration d'une structure d'un jet impactant une surface verticale.....	13
Figure I. 7 : Définition d'un jet libre et d'un jet submergé.....	14
Figure I. 8 : Différents types d'orifice.....	15
Figure I. 9 : Visualisation de l'écoulement d'un jet en impact sur une paroi convexe.....	15
Figure I. 10 : Visualisation de l'écoulement d'un jet en impact sur une paroi convexe.....	16
Figure I. 11 : Différents types de jets impactants une surface.....	17
Figure I. 12 : Phénomène de givrage.....	18
Figure I. 13 : Dégivrage au sol par jet impactant.....	19
Figure I. 14 : Dispositif antigivrage vu du dessus de l'avion.....	19
Figure I. 15 : Dispositif antigivrage représenté au niveau de la section d'une aile.....	20

Chapitre II

Figure II. 1 : Géométries du problème physique considéré.....	28
--	----

LISTE DES FIGURES

Chapitre III

Figure III. 1 : Géométrie d'un jet impactant une surface vertical.....	34
Figure III. 2 : Interface de la création d'un projet.....	35
Figure III. 3 : Interface du logiciel <i>Workbench</i>	36
Figure III. 4 : Esquisses en 2D.....	37
Figure III. 5 : Géométrie du domain de calcul.....	38
Figure III. 6 : Interface de la création du maillage.....	39
Figure III. 7 : (A) et (B) Maillage (Triangles + quadrilatères) près des parois pour bien capter les couches limites.....	40
Figure III. 8 : Interface de sélection des options de simulation.....	41
Figure III. 9 : Ouverture le maillage dans fluent.....	42
Figure III. 10 : Sélection des fluides.....	43
Figure III. 11 : Boundary conditions.....	44
Figure III. 12 : Confirmer les conditions, avec une sélection l'itération.....	45
Figure III. 13 : Evolution des résidus des équations de continuité, énergie et quantité de mouvement pour le refroidissement d'une plaque chauffée par un jet impactant.....	45

Chapitre IV

Figure IV. 1 : Convergence des resultats.....	48
Figure IV. 2 : Présentation du contour de vitesse à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 3$	49
Figure IV. 3 : Présentation du contour de vitesse à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 7$	50
Figure IV. 4 : Présentation du contour de vitesse à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 10$	51

LISTE DES FIGURES

Figure IV. 5 : Présentation de la variation de la de vitesse pour Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et $H/D=3$	52
Figure IV. 6 : Présentation de la variation de la de vitesse pour Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et $H/D=7$	53
Figure IV. 7 : Présentation de la variation de la de vitesse pour Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et $H/D=10$	54
Figure IV. 8 : Présentation du contour de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 3$	55
Figure IV. 9 : Présentation du contour de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 7$	56
Figure IV. 10 : Présentation du contour de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 10$	57
Figure IV. 11 : Présentation du courbe de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 3$	58
Figure IV. 12 : Présentation du courbe de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 7$	59
Figure IV. 13 : Présentation du courbe de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $HD = 10$	60
Figure IV. 14 : Illustration de la variation de l'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D=3$	61
Figure IV. 15 : Illustration de la variation de l'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D=7$	62
Figure IV. 16 : Illustration de la variation de l'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D=10$	63
Figure IV. 17 : Courbe d'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D=3$	64
Figure IV. 18 : Courbe d'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D=7$	65
Figure IV. 19 : Courbe d'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D=10$	66

LISTE DES FIGURES

Figure IV. 20 : lignes de courant à $Re = 9,8.10^5$ pour $H/d = 3$	67
Figure IV. 21 : lignes de courant à $Re = 9,8.10^5$ pour $H/d = 7$	68
Figure IV. 22 : lignes de courant à $Re = 9,8.10^5$ pour $H/d = 10$	68
Figure IV. 23 : Iso contour de pression à $Re = 9,8.10^5$ pour $H/D=7$	70
Figure IV. 24 : Variation du nombre du Nusselt pour $H/D=3$	71
Figure IV. 25 : Variation du nombre du Nusselt pour $H/D=7$	72
Figure IV. 26 : Variation du nombre du Nusselt pour $H/D=10$	73

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1 : Résume les conditions expérimentales de quelques études de jets impactants..11

Tableau I. 1 : Résume les conditions expérimentales de quelques études de jets impactant...11

Chapitre II

Tableau II. 1 : Propriétés du fluide.....28

Tableau II. 2 : Propriétés du problème.....29

Tableau II. 3 : constantes de Jones et lauder.....30

Chapitre III

Tableau III. 1 : Dimensions du problème.....36

Nomenclature

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
Φ	Flux de chaleur transmis par conduction	[W]
λ	Conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur	[m ²].
$\frac{dT}{dx}$	Gradient de température en x	[K ⁰]
T_1, T_2	La température	(K ⁰)
h	coefficient d'échange entre la paroi et le fluide	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
σ	Constante de Stefan	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
ε	Facteur d'émission de la surface .	-
T_s	Température de la surface	[K ⁰]
T_a	Température du milieu environnant la surface	[K ⁰]
ϕ	désigne le flux pariétal	[W]
T_p	la température de paroi	[K ⁰]
T_{jet} ou $T_{réf}$	la température de jet.	[K ⁰]

Nomenclature

t	représente le temps	[s]
ρ	la masse volumique du fluide	[kg m ⁻³]
\vec{v} ($v_1 v_2 v_3$)	la vitesse eulérienne d'une particule fluid	[m s ⁻¹]
p	la pression	[Pa]
$\bar{\tau}$	le tenseur des contraintes visqueuses	[Pa]
\vec{f}	désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide	[m s ⁻²]
U	Vitesse moyenne axial	[m.s ⁻¹]
Nu	Nombre de Nusselt	-
N	la viscosité turbulente	[Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
Cp	Chaleur massique	[J.Kg ⁻¹ .k ⁻¹]
$\delta_{i,j}$	Delta de Kronecker ou Tenseur identité	-
Re	Nombre de Reynolds	-
Pr	Nombre de Predth	-
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique	[m ² .s ⁻²]

Nomenclature

K	l'énergie cinétique turbulente	$[m^2.s^{-2}]$
H	Hauteur d'impact	[m]
I	Intensité de turbulence	-
S_{ij}	Tenseur du taux de déformation	-
V	Vitesse moyenne radial	[m/s]
μ	Viscosité dynamique	$[Kg.m^{-1}.s^{-1}]$
C_μ	Constante empirique liée à la viscosité turbulente	-
R	Rayon	[m]
H	Coefficient de transfert convectif local	$[W/m^2]$
u_i	Fluctuation de vitesse suivant la direction i	[m/s]
$\overline{U_i U_j}$	les tensions turbulentes	-
$\overline{U_j}$	Composante de vitesse filtrée suivant la direction j	[m/s]
$\overline{U_i}$	Composante de vitesse filtrée suivant la direction i	[m/s]
Ψ	Fonction du courant	-

[Introduction générale]

1. Introduction générale

Les transferts de chaleur engendrés par les jets sont rencontrés dans plusieurs applications industrielles comme la trempe, découpe de verre, le séchage du papier, des textiles, des produits alimentaires ou encore de refroidissement des composants électroniques, des aubes des turbines, des feuillets métalliques ou plastiques, le refroidissement des aubes de turbine ou le chauffage des bords d'attaque dans les systèmes antigivrage, qui requièrent une efficacité élevée des échanges de chaleur sur la surface [1]. Le refroidissement par jets impactants est une solution prioritaire dans les applications industrielles lorsque l'on cherche d'extraire, ou d'apporter une densité de chaleur intense sur une surface [2]. Ce type d'applications a encouragé les chercheurs à analyser le comportement des faisceaux de jet et de comprendre leur interférence mutuelle. L'objectif de ce travail est d'étudier numériquement sur la meilleure distance pour refroidissement d'une surface chauffée par un jet impactant, et ce en examinant les structures dynamique et thermique de l'écoulement, ainsi que sur l'évolution des profils de vitesse, la température et le nombre de Nusselt pour différentes valeurs des paramètres de contrôle.

Le premier chapitre est consacré à clarifier les applications des jets dans le transfert de chaleur et des notions fondamentales relatives aux jets impactants, ainsi qu'une synthèse bibliographique des différents travaux antérieurs sur ce sujet. Dans le deuxième chapitre, nous avons exposé la géométrie du problème en question, ainsi que le modèle mathématique des différentes équations de conservation régissant le phénomène d'impact des jets. La coordination dimensionnelle est effectuée pour les équations appropriées et les conditions aux limites afin de contrôler l'étude et de traiter les résultats. Dans le troisième chapitre, nous présentons une description complète du programme ANSYS Workbench et de ses fonctions, nous expliquons aussi les démarches entreprises pour établir le phénomène en question. Dans le quatrième chapitre, la convergence des solutions est vérifiée, en comparant les résultats pour les différentes dimensions entre le jet et la zone de collision, ces résultats sont représentés graphiquement.

Enfin, le mémoire est achevé par une conclusion générale

Chapitre. I : Description générale des transferts thermiques et des écoulements par jets

I.1 Introduction

Les mécanismes de transfert thermique par jet impactant revêtent un caractère important pour les thermiciens à cause des forts flux locaux extraits. Cependant les phénomènes impliqués dans l'interaction d'un jet avec une surface portée à haute température (largement supérieure à la température de saturation du fluide de refroidissement) ne sont pas encore totalement maîtrisés. Dans l'industrie, ce type de refroidissement est typiquement utilisé dans les procédés nécessitant des vitesses de refroidissement élevées. Dans ce chapitre, une étude bibliographique sur les transferts thermique relative au jet continu et pulsé dans un écoulement transverse est proposée. Elle montre la complexité de ce type d'écoulement et présente les structures engendrées.

I.2 Généralité sur le transfert de chaleur

Le processus par lequel le transfert de l'énergie s'effectue est désigné par le terme transfert de chaleur. La grandeur transférée, appelée chaleur, ne peut être ni mesurée ni observée directement, mais les effets qu'elle produit sont sujets à l'observation et aux mesures. Le transfert thermique est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux zones, ou entre deux systèmes, dès qu'il apparaît entre eux un gradient de température et ce, quel que soit le milieu qui les sépare [3]. Fait de trois façons, conduction, rayonnement, et convection. Nous allons, dans ce qui suit, détailler ces trois modes.

I.2.1 Définition modes de transfert de chaleur

I.2.1.A Différents modes de transfert de chaleur

Un transfert thermique est l'un des modes d'échange d'énergie thermique entre deux systèmes; C'est une notion fondamentale de la thermodynamique. Contrairement au travail, la chaleur est le bilan de transferts d'énergie microscopiques et désordonnés.

On distingue trois types de transfert thermique, qui peuvent coexister :

- ✓ La conduction, due à la diffusion progressive de l'agitation thermique dans la matière.

- ✓ La convection, transfert thermique qui accompagne les déplacements macroscopiques de la matière.
- ✓ Le rayonnement, qui correspond à la propagation de photons [4].

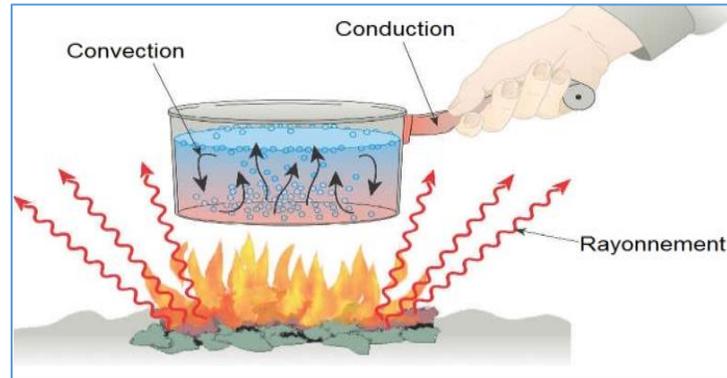


Figure I. 1: Illustration des modes de transfert de chaleur [5].

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, etc..., électronique). Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid [6].

I.2.1.a.1 La conduction

Le transfert par conduction est un échange d'énergie avec contact. Dans un gaz ou un liquide, l'énergie se propage par contact direct entre molécules au gré des chocs aléatoires à l'échelle microscopique. Dans les solides, la conduction thermique est assurée par les électrons de conduction et les phonons, autrement dit les vibrations du réseau cristallin.

Ces phonons interagissent avec les électrons libres, ce qui explique que la conductivité thermique et électrique soient liées. C'est pourquoi certains métaux comme le cuivre, l'argent, l'aluminium, l'innox ou l'acier sont des bons conducteurs d'électricité et de chaleur.

La conduction thermique est un transfert thermique spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse. Cette loi dite

de Fourier établit que la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température par relation [7].

- Le flux de chaleur Φ en watt qui circule en x

$$\Phi = -\lambda. S. \frac{dT}{dx} \quad (\text{I.1})$$

I.2.1.a.2 La convection

Il s'agit de la description du mouvement d'un fluide engendré par les forces d'Archimède dues aux variations de la masse volumique avec la température. Il y a donc couplage de la dynamique et de la thermique. Le champ de vitesse transporte la chaleur et, du fait de la dépendance de ρ avec, agit sur la distribution de masse volumique; en retour, les modifications de masse volumique créent du mouvement par le biais de la poussée d'Archimède.

On peut distinguer deux types de convection.

La convection naturelle (ou libre) est due à la différence de masse volumique entre les particules composant le fluide. Les particules des zones chaudes, de masse volumique plus faible, montent et laissent leur place à des particules plus froides ; elles cèdent une partie de l'énergie thermique et leur température diminue, ce qui les pousse à rejoindre une partie plus chaude.

La convection forcée est due à la mise en mouvement du fluide par une action extérieure comme un l'effet d'un ventilateur, turbine, pompe. Le mouvement accélère le transfert thermique. Dans le cas le plus simple d'une paroi solide de surface S et de température homogène T_1 en contact avec un fluide à la température T_2 à grande distance de la paroi, le flux thermique dépend du coefficient de convection thermique h du matériau. Le transfert thermique peut être formulé par la loi de de Newton :

$$\Phi = h S (T_1 - T_2) \quad (\text{I.2})$$

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et un solide. La quantité de chaleur échangée par unité de temps dépend de plusieurs paramètres :

La différence de températures entre le solide et le fluide ;

- ✓ La vitesse du fluide.
- ✓ La capacité thermique massique du fluide.
- ✓ La surface d'échange.
- ✓ L'état de surface du solide.
- ✓ Sa dimension ...etc.

Comme le transfert d'énergie par convection est très fortement lié au mouvement du fluide, il est nécessaire de connaître le mécanisme de l'écoulement du fluide avant d'examiner celui de l'écoulement de la chaleur. Un de plus importants aspects de l'étude hydrodynamique est d'établir si le mouvement du fluide est laminaire ou turbulent [3].

I.2.1.a.3 Le rayonnement [8]

Le rayonnement est un transfert thermique ne nécessite pas de milieu matériel par opposition aux deux autres. En effet, ce type de transfert thermique résulte de l'émission des rayons électromagnétiques transporte l'énergie. Ils sont émis par un corps chaud, tel que le soleil, et échauffent le corps qui les reçoit, dans ce cas nous avons la relation suivante

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (\text{I.3})$$

I.3 Généralités de L'écoulement par jet

La technique de jet impactant trouve de nombreuses applications industrielles et les résultats de sa mise en place dépendent de nombreux paramètres. Ainsi de nombreuses études expérimentales et numériques ont été menées dans le but d'une meilleure compréhension des phénomènes physiques intervenant et régissant l'impact d'un jet. . Nous allons présenter dans ce chapitre une partie des travaux de la littérature qui ont été conduit et qui se sont axés principalement sur les études expérimentales et numériques du jet impactant et les effets résultants sur les échanges thermiques [3].

Description de l'écoulement de jet

L'écoulement de jet appartient à la classe des écoulements cisailés libres. Cet écoulement intervient dans de nombreux processus naturels et de nombreuses applications parmi lesquelles on trouve :

- La propulsion aéronautique,
- La propulsion aérospatiale,
- L'injection de carburant,
- Le refroidissement,
- Le mélange,
- Procédés de découpe (de coupage d'eau),
- Le contrôle d'écoulements...

Ce type d'écoulement présente la particularité d'être extrêmement sensible aux conditions limites concernant aussi bien l'état amont de l'écoulement (état et épaisseur de couche limite, acoustique, intensités turbulentes...etc.) que l'atmosphère ambiante.

Structure du jet libre

Le jet libre circulaire d'après DIMOTAKIS en 1983 [09]. Le fluide est injecté dans une zone au repos (en sombre). De prime abord, l'écoulement se décompose en deux régions : une couche cisailée, où l'écoulement est rotationnel, et une région irrotationnelle qui l'entoure (FigureI.02). La couche de cisaillement est la région centrale soumise à de forts gradients de vitesse et caractérisée par son accroissement radial (largeur du jet). Ce dernier est le résultat de deux phénomènes distincts :

- ✓ D'une part la diffusion visqueuse.
- ✓ D'autre part un phénomène d'entraînement par des structures tourbillonnaires cohérentes, c'est-à-dire des tourbillons qui ont un temps de vie grand devant leur temps de retournement (égal à l_0/u_0) [10].

La notion de structures cohérentes fut exprimée pour la première fois par LIEPMANN en 1952 [11], avant d'être exploitée statistiquement par TOWNSEND [12]. La nature

intermittente de ces structures favorise l'entraînement de paquets de fluide ambiant irrotationnel à l'intérieur de la couche cisailée [13].

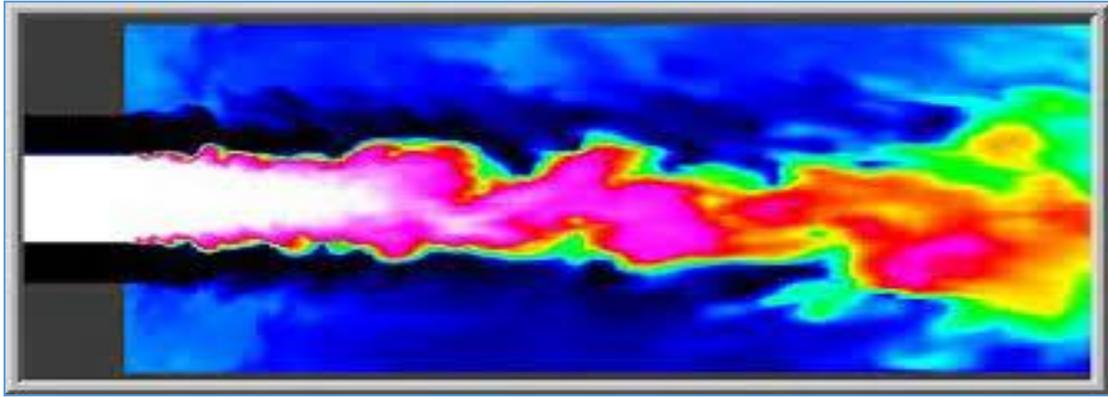


Figure I. 2 : Structure d'un jet libre circulaire.

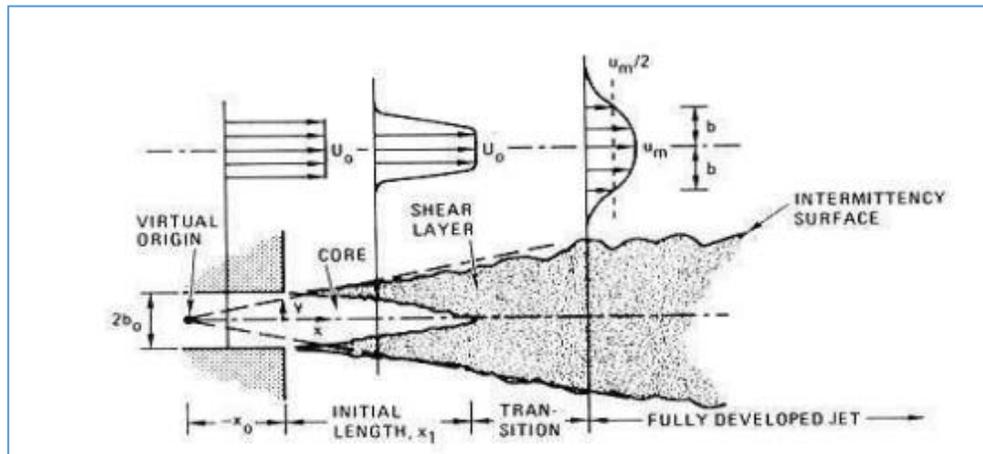


Figure I. 3 : Structure générale du jet libre [14].

I.3.1 Jet impactant une surface rigide

Les écoulements cisailés peuvent être divisés en deux types : les jets libres et les jets limités. Les jets impactants sont un exemple typique de ces derniers. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications technologiques où le mélange est important (transfert de masse ou de chaleur) : combustion, industrie chimique, chauffage ou refroidissement de surfaces. Ils se

forment également lors du remplissage de réservoirs, et sont responsables du mélange et du transfert de masse dans les réacteurs.

1.3.2 Structure du jet impactant une paroi plane

En général, le champ d'écoulement d'un jet impactant peut être décomposé en différentes régions (voir figure I.04) :

- Une région de jet pseudo-libre (en anglais « free jet region »),
- Une région d'impact ou de déflexion (appelée également région de stagnation ou « en anglais impingement region »),
- Une région de jet radial parallèle au mur (jet de paroi ou « en anglais wall-jet region »)

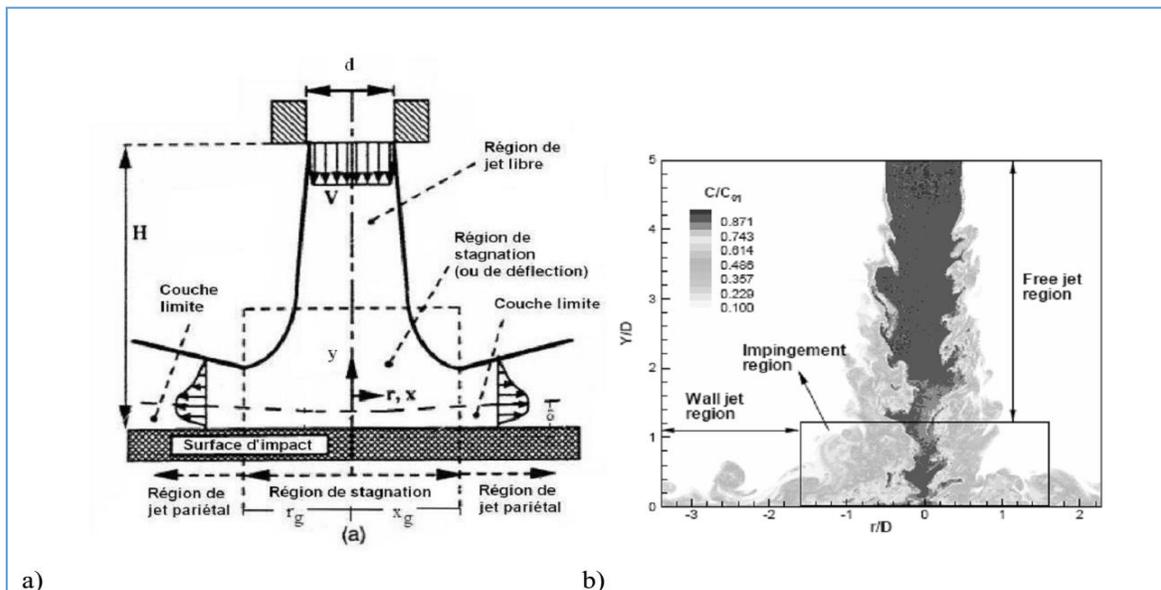


Figure I. 4 : a) Structure du jet impactant par Rady [15] – b) Mélange dans un jet transitionnel impactant une paroi rigide. DING 2003 [16].

Région de jet « libre »

La région de jet libre peut se composer des différentes zones précédemment décrites :

- Un noyau potentiel, une zone de transition.

- Une zone d'écoulement établi.

Ces dernières zones ne peuvent apparaître que lorsque la distance d'impact (h) est suffisamment grande pour permettre le développement du jet.

Région d'impact

La région d'impact se caractérise par une zone de stagnation (point d'accrochage situé à la paroi dans l'axe du jet) et par un changement de direction du jet avec une transition vers un jet pariétal (on parle aussi de région de déflexion). DING en 2003 [16], ont observé une structure hélicoïdale lorsque le jet impact la paroi, mais le point d'accrochage est bien localisé et stabilisé par la paroi d'impact de Y ZHENG [17], dans la région de déflexion, les propriétés moyennes de l'écoulement dévient de celles d'un jet libre. Dans cette région la vitesse sur l'axe central du jet diminue à mesure que l'écoulement approche du point de stagnation, jusqu'à atteindre une valeur nulle à la paroi.

Région de jet de paroi

La région de jet de paroi se caractérise par un écoulement dans la direction radiale. L'écoulement dévié au niveau de la paroi crée un jet qui se développe le long du mur. A une distance supérieure à $x/d = 3$ du point de stagnation, les fluctuations de pression deviennent indépendantes de la position du mur, ce qui est caractéristique du jet rampant développé [16].

Dans cette région, l'écoulement est dominé par les effets de paroi à travers les forces de viscosité. Pour une distance d'impact donnée, l'épaisseur de la couche limite est inversement proportionnelle au nombre de REYNOLDS d'injection. L'écoulement pariétal commence par accélérer puis il décélère en cédant de l'énergie au fluide environnant. Ainsi la composante radiale de la vitesse augmente linéairement et atteint un maximum à une distance x_g du point de stagnation. Le maximum de vitesse est atteint pour une distance x_g d'environ 1 diamètre lorsque la distance d'impact h/d est comprise entre 0 et 12 [18].

I.3.2.a Types de jet impactant

Les jets impactant peuvent être classés en trois types selon la distance d'impact h .

On distingue l'impact de noyau potentiel ($h/d < 3$), l'impact de jet transitionnel et l'impact d'un jet développé. Le tableau (I.1) résume les conditions expérimentales de quelques études.

	Type de jet	Nombre de Reynolds	Fluide	Technique	Distance d'impact (h/d)	Type d'impact
<i>Fairweather & Hargrave 2002</i>	rond	18 800	<i>Air</i>	PIV/LIF	2	cœur potentiel
<i>Fitzgerald 1998</i>	rond	8 500 ~ 23 000	FC-77	LDV	2 ~ 4	cœur potentiel
<i>Bilsky 2005</i>	rond	7 600 ~ 34 100	Eau	PIV	3	cœur potentiel
<i>Guillard 1998</i>	rond	11 000	Eau	LIF	4,8	jet transitionnel
<i>Ding 2003</i>	rond	6 000	Eau	LIF	5	jet transitionnel
<i>Nishino 1996</i>	rond	13 000	Eau	LDV	5,86	jet transitionnel
<i>Giralt 1977</i>	rond	80 000	<i>Air</i>	HWA	3 ~ 25	Jet développé
<i>Maurel & Sollic 2001</i>	<i>plan</i>	27 000	<i>Air</i>	PIV	5 ~ 25	Jet développé

Tableau I. 1 : Résume les conditions expérimentales de quelques études de jets impactants.

La plupart des travaux, et la totalité des études portant sur le mélange, sont effectués pour des jets de cœur potentiel ou de jet transitionnel, ce qui illustre le peu de données expérimentales disponibles dans le cas du jet développé.

I.3.1.b Impacts de jets de cœur potentiel ou de jet transitionnel

La figure suivante (figure I.5) montre un schéma de jets dans les cas de l'impact dit de cœur potentiel et de l'impact dit de jet en transition.

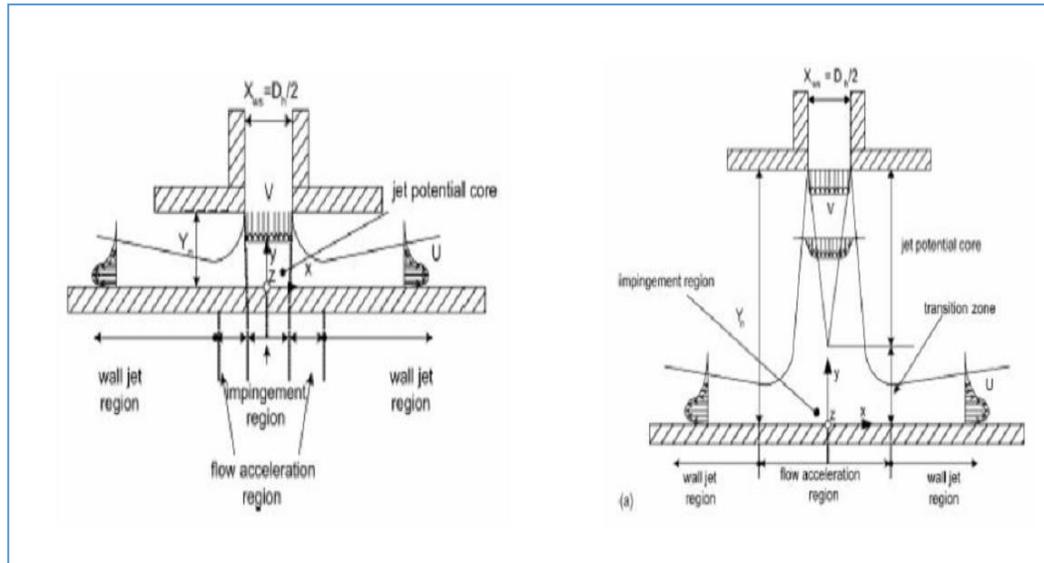


Figure I. 5 : Différents jets impactants, RADY en 2005 a) impact du noyau potentiel; b) impact du jet transitionnel [15].

Ces types de jet sont notamment utilisés pour les échanges thermiques. En effet, la distance optimale pour refroidir une surface se situe à l'endroit où l'intensité de la turbulence axiale atteint un maximum [19]. Ce maximum est localisé pour h/d compris entre 6 et 8.

Ceci explique que les jets impactants sont généralement étudiés pour des distances d'impact h inférieures à 10 diamètres. Malgré le nombre de publications sur les jets impactants, il existe très peu d'études systématiques de quantification de la couche de mélange. On peut tout de même citer les travaux de GUILLARD en 1998 [20] puis DING et al. En 2003 [16] jet impactant à faible distance ($y/d < 5$), qui utilisent la LIF pour évaluer la qualité de deux méthodes d'injection d'un traceur dans un jet. FAIRWHEATHER & HARGRAVE en 2002 [21], produisirent également des données quantitatives sur l'évolution de vitesse et d'un scalaire dans un jet d'air impactant une paroi rigide pour $y/d = 2$. Leur analyse se concentre plus particulièrement sur la région de jet pariétal après impact.

I.3.1.c Structure de jet impactant d'une paroi verticale

En général, le champ d'écoulement d'un jet impactant peut-être décomposer en différentes régions (Figure I. 6) :

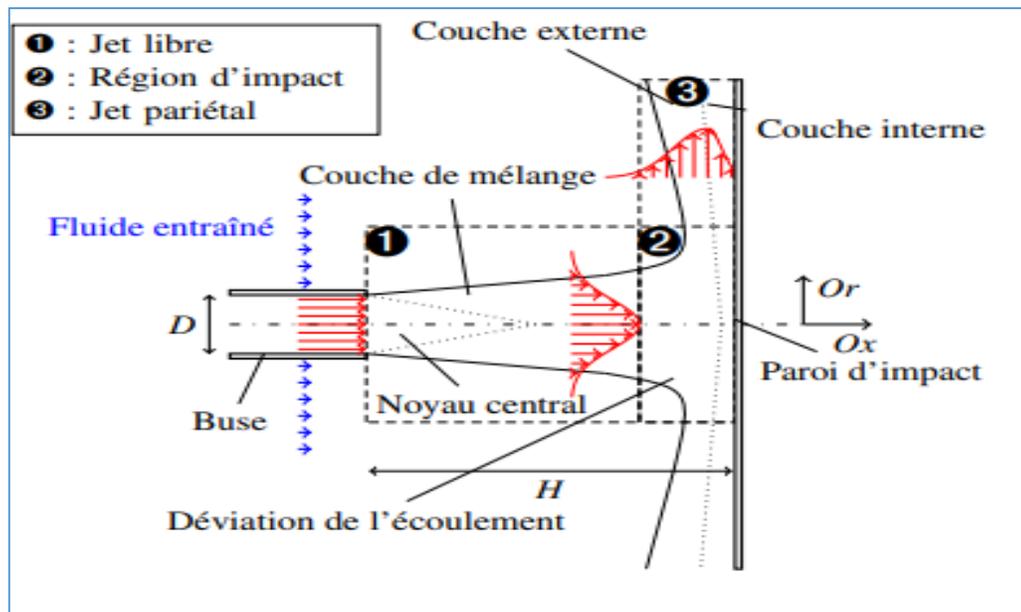


Figure I. 6 : Illustration d'une structure d'un jet impactant une surface verticale [1].

c.1 Région de jet libre

La région de jet libre correspond à la zone pour laquelle le jet ne voit pas la plaque. Celle-ci n'a donc aucune influence sur le jet et dans cette région, le jet se comporte comme un jet libre. Elle possède la même structure de jet libre précédemment décrite. Lorsque la distance d'impact est très petite, comme cela

c.2 Région du jet de paroi (région d'impact)

La région est caractérisée par un point de stagnation ainsi qu'une défection de l'écoulement axial du jet qui devient pariétal. A l'approche du point de stagnation, le jet ne possède plus les caractéristiques du jet libre. La vitesse sur l'axe du jet décroît jusqu'à devenir nulle à la paroi [22].

c.3 Région de jet pariétal

Cette région est caractérisée par le développement et l'épaississement d'un jet pariétal, c'est à dire le long de la surface d'impact et dont la vitesse radiale maximale diminue [23].

I.3.3 Classification des jets

La géométrie de l'injecteur est également de nature à séparer les jets en deux classes : pour un orifice circulaire, on parlera de jet rond, circulaire ou encore axisymétrique, tandis qu'un orifice rectangulaire donnera naissance à un jet dit plan ou encore bidimensionnel.

Dans le cas d'un jet rond impactant sur une paroi située à une distance H de l'injecteur, les transferts de chaleur à la paroi peuvent être exprimés par l'introduction du nombre de Nusselt [24].

$$Nu = \frac{\phi}{\lambda \frac{T_p - T_{jet}}{D}} \quad (I.4)$$

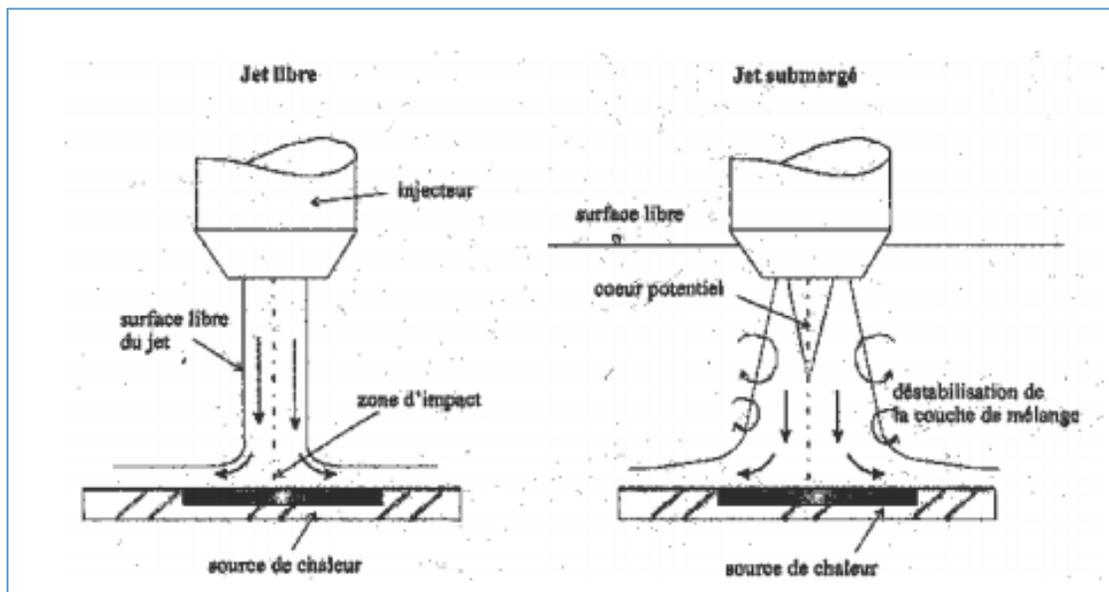


Figure I. 7 : Définition d'un jet libre et d'un jet submergé [24].

I.3.3.a Types d'orifice (la géométrie de l'injecteur)

La génération de vorticité à la sortie de l'injecteur est un élément important pour accentuer les échanges de chaleur. Récemment, Lee et Lee en 2000b [25] ont étudié les performances des 3 types d'orifices représentés sur la figure (I.8). L'analyse de leurs résultats montre qu'un orifice à bords tranchants provoque une légère amélioration des échanges du fait d'une meilleure tendance à générer de la vorticité dès la sortie du jet [1].

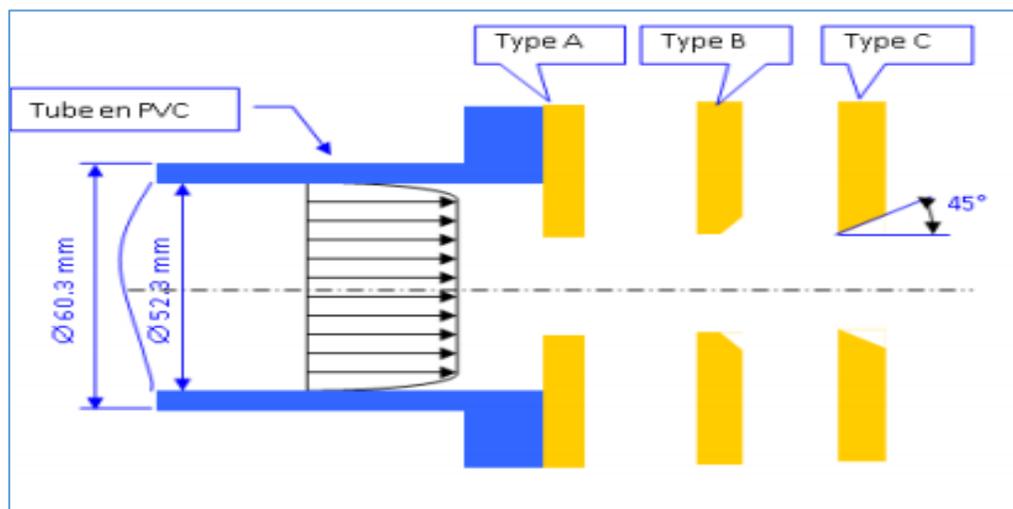


Figure I. 8 : Différents types d'orifice [2].

I.3.3.b Types de jets impactants sur des surfaces différentes

Les trois images suivantes illustrent comment le jet est entré en collision avec différents espaces.

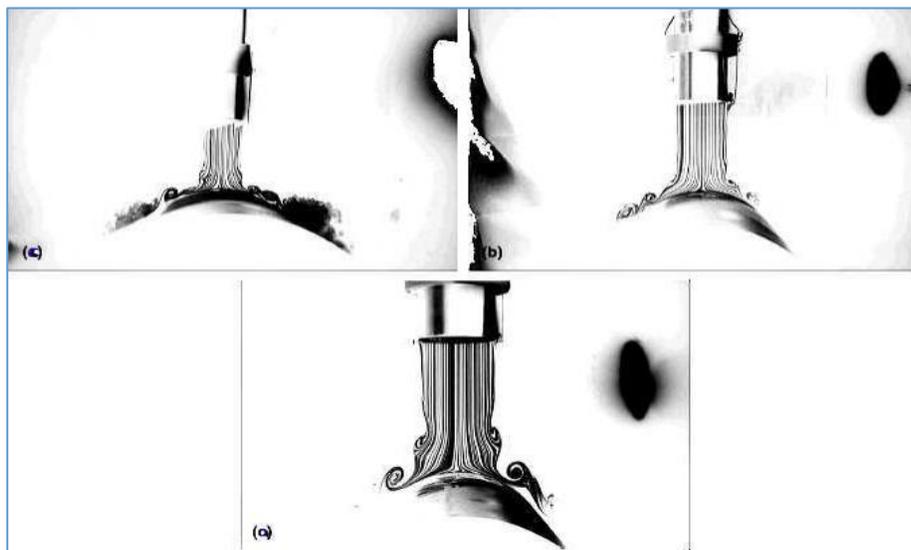


Figure I. 9 : Visualisation de l'écoulement d'un jet en impact sur une paroi convexe [14].

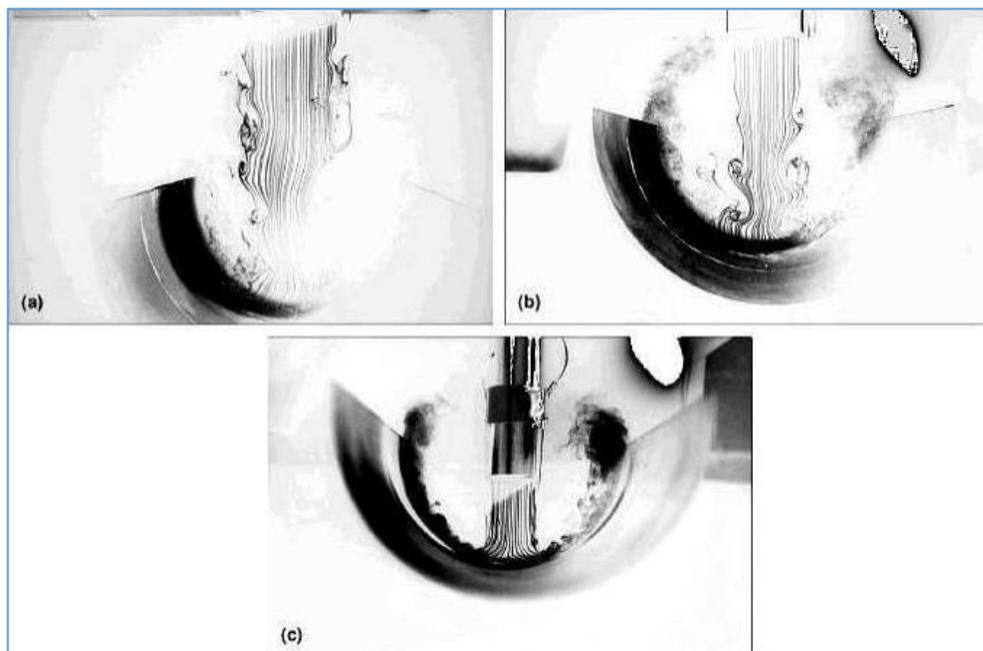


Figure I. 10 : Visualisation de l'écoulement d'un jet en impact sur une paroi convexe [14].

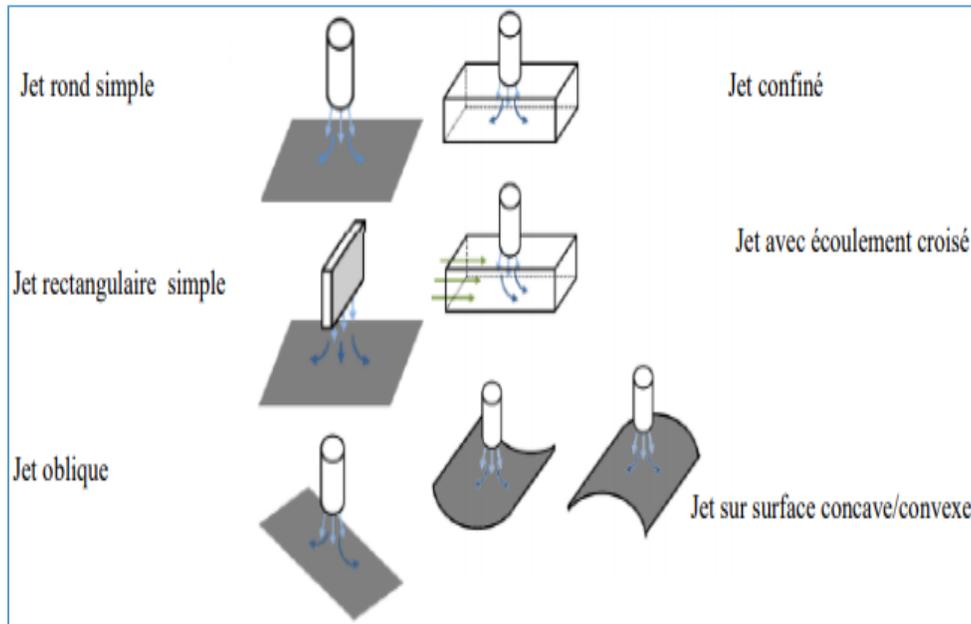


Figure I. 11 : Différents types de jets impactants une surface [2].

I.3.4 Domaine d'application

I.3.4.a L'utilisation de jet impactant dans le domaine de l'aviation

Le givrage est l'un des problèmes les plus sévères reliés aux conditions atmosphériques que peut rencontrer un aéronef. Les effets du givrage, bien connus, sont d'augmenter la traînée, de dégrader la maîtrise de l'appareil et de réduire le pouvoir sustentateur des surfaces.

L'écoulement de l'air autour des surfaces portantes étant modifié par la forme de glace, opérer un aéronef en condition de givrage peut être très dangereux. Le givrage se forme en présence de nuages d'eau surfondue ou de pluie verglaçante. La glace s'accumule essentiellement sur les surfaces frontales de l'aéronef : les ailes, les bords de nacelles, le pare-brise, les antennes, les tubes de pitot et l'empennage [26].

La figure suivante (Figure I.12) montre l'accumulation de glace sur l'aile de l'avion (Le givrage).



Figure I. 12 : Phénomène de givrage [27].

I.3.4.b Système de dégivrage ou anti-divrage

Le principe est assez simple, il s'agit d'enlever la neige ou la glace qu'il y a sur l'avion par une pulvérisation sous forte pression et au plus près de la surface avec un liquide de dégivrage chauffé. Deux alcools, l'éthylène glycol et le propylène glycol, plus ou moins dilués avec de l'eau, peuvent être utilisés pour le dégivrage des avions dans les aéroports car ils ont des températures de fusion nettement inférieures à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour l'éthylène glycol, $-59\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le propylène glycol). Ainsi pour dégivrer un avion on l'asperge d'un mélange de glycol et d'eau chaude (environ 80°). La pulvérisation d'un fluide d'anti-givrage, au moyen d'un jet et avec une buse très mobile, a pour but de répartir équitablement le fluide sur les surfaces à protéger pour les recouvrir d'une couche uniforme de 2 à 3 mm de liquide visqueux [27].

La figure (I.13) illustrant le processus de dégivrage par jet impactant, en utilisant un camion à l'aide de cette technique.



Figure I. 13 : Dégivrage au sol par jet impactant [28].

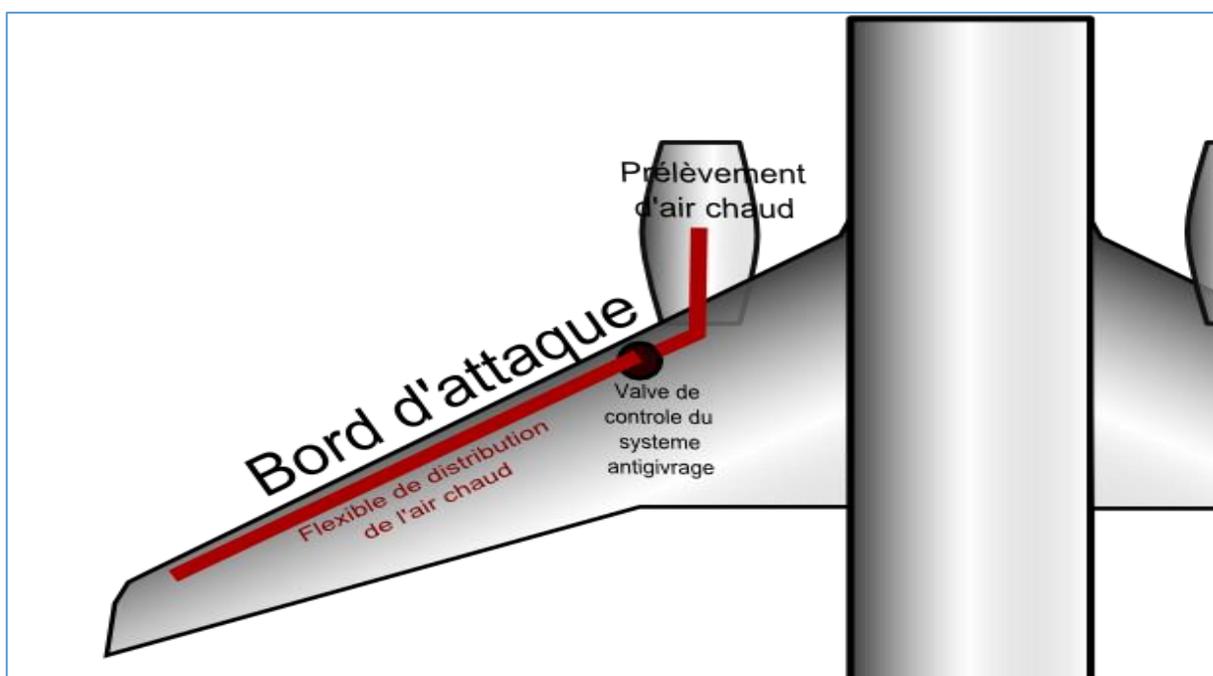


Figure I. 14 : Dispositif antigivrage vu du dessus de l'avion.

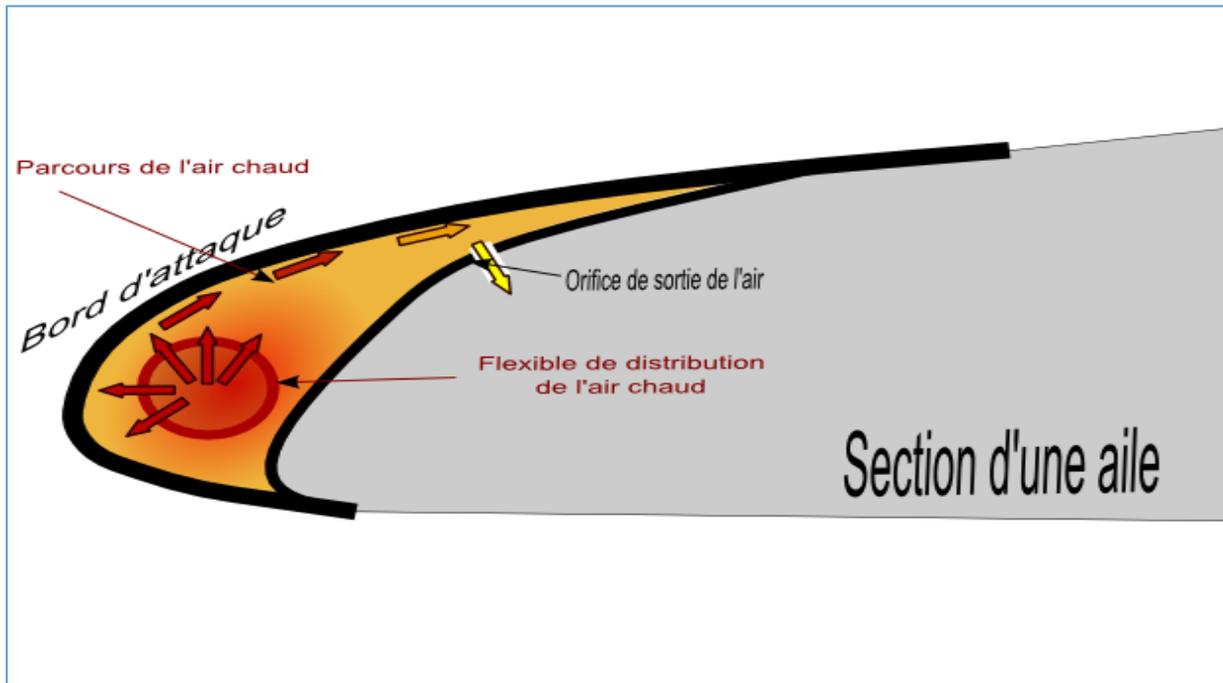


Figure I. 15 : Dispositif antigivrage représenté au niveau de la section d'une aile.

I.4 Analyse Bibliographique

Fabien Candelier et al [29], ont étudié de nombreuses applications industrielles, les jets sont employés dans le but de contrôler la température de surface d'un corps par convection forcée. Lorsque qu'un jet impacte une plaque horizontale dont la température est supérieure à celle du fluide, la dynamique de l'écoulement qui est en résulte devient complexe, dans la mesure où il se produit une compétition entre les effets de flottabilité engendrés par la différence de température entre la plaque et le fluide, et les effets d'inertie. En pratique, cette compétition se traduit par le décollement de la couche limite cinématique et thermique du fluide sur la plaque, à une distance plus ou moins éloignée de l'axe de la buse. Bien entendu, ce décollement de la couche limite a un effet important sur la quantité de chaleur échangée entre la plaque et le fluide, et donc, sur la qualité du refroidissement de la plaque.

Zidouni Kendil.F et al (2007) [30], ont étudiée Le transfert thermique d'un jet rond impactant une cavité cylindrique ouverte sur une extrémité à l'air ambiant est numériquement investigué pour une gamme de Reynolds 20 000 à 100000 et pour des distances d'impact L_f

(jet - fond de la cavité) variant de 2 à 30 fois le diamètre du jet. Les équations de transport régissant le transfert de quantité de mouvement et de chaleur sont couplées au modèle statistique de la turbulence à deux équations du type énergie – dissipation (k-e), basé sur l'hypothèse de la viscosité turbulente et diffusivité thermique de la turbulence. Les zones proches des parois solides sont traitées par une loi de paroi de type logarithmique pour mieux considérer le transport visqueux dans la sous-couche laminaire. La résolution numérique des équations aux variables primitives est réalisée à l'aide d'une méthode des volumes finis. Les résultats de transfert thermique sont compatibles avec la structure dynamique qui s'est développé à l'intérieur de la cavité. Nous avons également ressortie quelques similitudes dans l'évolution du nombre de Nusselt local de la paroi frontale par rapport à celui d'un jet impactant une plaque plane obtenue expérimentalement et théoriquement par plusieurs chercheurs.

Roux S. et al (2009) [31], une étude expérimentale aérodynamique et thermique de l'impact d'un jet rond unique sur une paroi plane. Un haut-parleur permet de moduler la vitesse du jet en sortie de buse. Des mesures de vitesse par PIV montrent que le forçage amplifie les structures tourbillonnaires dans la couche de mélange du jet. Selon le forçage, ces tourbillons peuvent être très stables ou donner lieu à des interactions régulières entre tourbillons. Des décompositions triples de vitesse montrent que les contributions moyennes, cohérentes et stochastiques de l'écoulement peuvent être adaptées en fonction de la fréquence et de l'amplitude du forçage acoustique. Les fluctuations de pression associées à ces tourbillons sur la plaque d'impact ont été mesurées et évaluées à l'aide d'un formalisme intégral pour la pression. Les transferts de chaleur moyens par convection entre le jet et la paroi d'impact révèlent deux principaux effets du forçage acoustique sur les variations radiales du nombre de Nusselt pour une petite distance d'impact. L'effet de l'impact du cône potentiel du jet sur la paroi disparaît lorsque le forçage acoustique conduit à une augmentation importante des niveaux de turbulence sur l'axe du jet. Le lobe secondaire de transferts de chaleur est déplacé et atténué par le forçage acoustique. Des mesures de températures pariétales fluctuantes mettent en évidence deux modes de propagation des fluctuations de température sur la plaque d'impact. Le premier est indépendant du forçage acoustique et correspond à une propagation

filamentaire. Le second est lié à la convection des tourbillons sur la plaque d'impact et correspond à la propagation radiale de fronts chauds et froids.

Slimani Mohamed (2011) [32], ont étudié numériquement d'un multi-jet turbulent libre, cette étude à double objectif est :

Une étude de la simulation de l'interaction entre jets multiples d'air. La configuration étudiée est composée de cinq jets dont un jet central et quatre jets périphériques équidistants.

Le choix s'est porté sur le code de calcul CFX 11.0 développé par ANSYS. Le calcul a été effectué pour différents taux d'espacement et différents stations. En plus une autre étude et la simulation de l'interaction entre les jets, une comparaison a été faite entre les deux modèles de turbulence K- ϵ et RSM et ce pour choisir le modèle le plus adéquat pour ce type d'écoulement.

DAIRAY et al (2011) [33], ont étudié par simulation numérique un jet axisymétrique confiné impactant sur une paroi plane par le code « Incompact3D ». L'objectif de cette étude est de traiter les conditions de sortie. Ce travail présente trois cas ; le premier un écoulement bidimensionnelle stationnaire avec un faible nombre de Reynolds $Re=50$, le deuxième un écoulement bidimensionnelle in stationnaire avec un nombre de Reynolds $Re=5300$ et le dernier un écoulement tridimensionnelle stationnaire avec un nombre de Reynolds $Re=50$. Ils ont remarqué dans le premier cas, que le choix de la condition de sortie n'influe pas sur la dynamique de l'écoulement. Le deuxième cas est qu'après une augmentation de nombre de Reynolds les auteurs ont souligné une difficulté de mise en œuvre d'une condition de sortie qui n'influe pas sur la dynamique globale de l'écoulement. Le troisième cas ils ont réalisé la première simulation pour raison de faire une simulation en cas turbulent.

Francis SHUM-KIVAN (2013) [34], ont étudié numérique du refroidissement des aubes d'une turbine de turboréacteur par jets impactant refroidir les aubes de turbine des moteurs aéronautiques consiste à impacter des jets d'air frais sur leur surface interne. Cette étude vise à mieux comprendre la dynamique complexe du jet impactant ainsi que les transferts thermiques associés. La configuration étudiée est celle d'un jet impactant rond non confiné à un nombre de Reynolds $Re = 23\ 000$. La distance entre la sortie de la buse et la plaque est de $2D$ ou $1D$ représente le diamètre de la buse. L'approche numérique de type simulation aux

Grandes échelles (SGE) résolue à la paroi est choisie. Celle-ci permet d'avoir accès aux phénomènes instationnaires et est susceptible, dans le cas d'écoulements aussi complexes, de fournir de meilleurs résultats par rapport aux méthodes statistiques. Les prédictions du code AVBP sont évaluées en les comparant à des données expérimentales ou à des SGE réalisées par d'autres auteurs. Les premiers résultats concernent la dynamique de l'écoulement et sont en accord avec les expériences. Puis l'étude se concentre sur les transferts thermiques en considérant le couplage fluide/structure. Des suggestions sont émises pour expliquer de possibles liens entre les vortex créés et les transferts thermiques locaux.

Stéphane ABIDE et al [35], ont présenté une méthode de décomposition de domaine appliquée à la simulation du refroidissement d'une lamelle solide par un jet plan en impact.

Cette technique repose sur l'utilisation d'une matrice d'influence pour assurer la continuité de la température et de la densité de flux à l'interface fluide/solide tout en conservant une précision d'ordre élevé (quatrième ordre compact). L'algorithme est validé sur une étude de la cavité différentiellement chauffée, puis il est utilisé pour calculer la température de surface lors du refroidissement d'une lamelle solide à faible nombre de Reynolds.

HALOUANE Yacine (2014) [36], le présent travail est une contribution à l'étude d'une interaction symétrique d'un jet axisymétrique turbulent, issu d'une longue conduite à l'intérieur d'une cavité cylindrique chauffée à fond fermé. L'interaction jet-cavité est analysée numériquement à l'aide de deux modèles statistiques de turbulence de fermeture en un point RANS :

- Le modèle K- ϵ réalisable du premier ordre.

- Le modèle des tensions de Reynolds (Reynolds Stress Model-RSM) du second ordre.

La résolution numérique des équations du mouvement et celle de l'énergie sont effectuées par le code CFD ANSYS (Fluent 14) basé sur une méthode des volumes finis et qui nécessite l'usage du code Gambit 6.3 pour générer la géométrie, le maillage et les conditions aux limites du problème. Les champs dynamique et thermique ont été investigués pour différentes distances d'impact du jet avec le fond de la cavité, de 2D à 12D (D étant le diamètre du jet) et pour une gamme du nombre de Reynolds Re variant de $2 \cdot 10^4$ à $5 \cdot 10^4$ correspondant à une turbulence pleinement développée.

Chapitre II : Modélisation Mathématique

II.1 Introduction

La trajectoire des jets impactant liée à plusieurs phénomènes physiques tels que la vitesse, la chaleur, la pression, etc. ... est résumée dans des équations mathématiques liées à la trajectoire et à l'issue du mouvement formé par jets et pour vous, le but de ce chapitre est d'expliquer les équations mathématiques de base pour ce problème. Les équations aux dérivées partielles, basées sur les principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, décrivant le phénomène physique avec les conditions aux limites appropriées, seront présentées sous leurs formes dimensionnelle et adimensionnelle.

II.2 Les équations de gouvernant

Les équations gouvernantes sont l'un des fondamentaux des équations de transport et elles sont :

II.2.1 Equation de continuité

L'équation de continuité est traduite par la loi de conservation de masse, comme suite :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{U}) = 0 \quad (\text{II.1})$$

Où :

ρ : est la masse volumique.

\vec{U} : est le vecteur vitesse.

II.2.2 Equation de quantité de mouvement

Les équations de la conservation de la quantité de mouvement sont données par les équations de Navier-Stokes:

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

II.2.3 Equation d'énergie

L'équation d'énergie est obtenue par l'application de premier principe de la thermodynamique, elle s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{D(\rho c_p T)}{Dt} = \Delta(KT) + q + \beta T \frac{Dp}{DT} + \mu \Phi = 0 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$\frac{D(\rho C_p T)}{Dt}$: La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(KT)$: La variation d'énergie par conduction.

q : puissance volumique dissipée.

$\beta T \frac{Dp}{DT}$: La variation d'énergie due à la compressibilité.

$\mu\Phi$: La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

Les coefficients C_p , K , β sont respectivement, la capacité calorifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation isobare du fluide.

II.3 Définition et division du problème (domaine physique)

La géométrie du problème physique considérée dans la présente étude est schématisée dans la figure (II.1), la géométrie étant bidimensionnelle en coordonnées cartésiennes. Le système consiste en une surface bidimensionnelle d'une hauteur ($2r$) avec un diamètre de la buse (D) avec une paroi (e) (paroi d'orifice). La distance entre la sortie de la buse et la paroi (l'espace d'impact) est (H).

A l'entrée de la buse, le liquide coule dans une distribution uniforme de vitesse (V) et de température (T). Le fluide frappe la surface chaude à une quantité de chaleur Q .

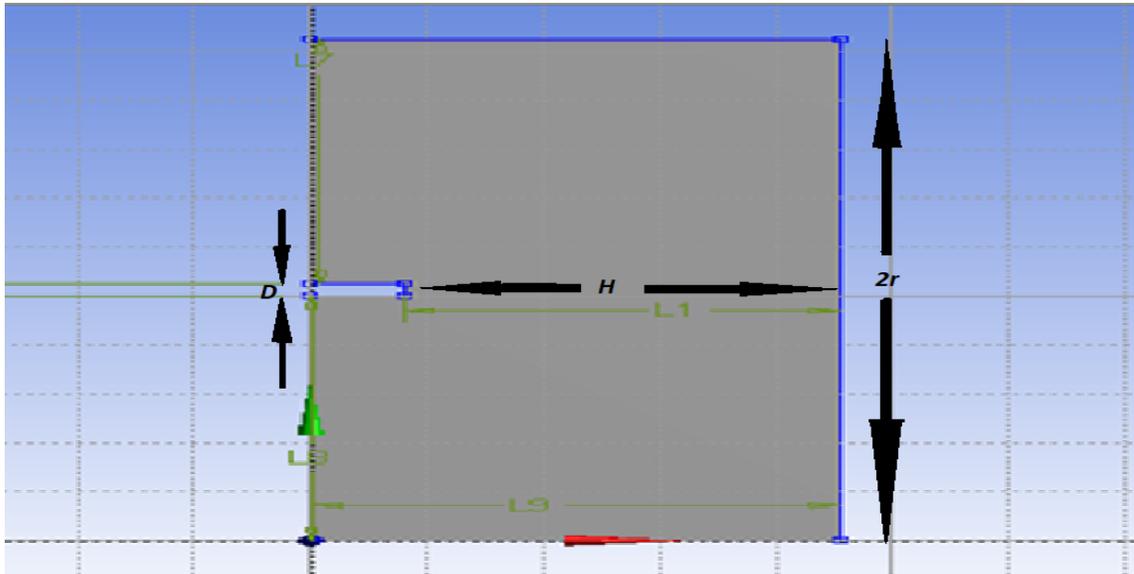


Figure II. 1 : Géométries du problème physique considéré.

II.4 Hypothèses simplificatrice et les équations de transfert

Les équations mathématiques qui régissent le phénomène de refroidissement d'un point chaud par un jet de collision sont d'une grande complexité en raison de son caractère non linéaire et couplé. La gestion de ces équations dans leur état est très difficile. Pour cette raison, certaines hypothèses simplifiées sont acceptées au cours de cette étude afin de rendre leur solution possible. On considère donc que :

- Le jet est considéré dans les deux cas: stationnaire et non stationnaire.
- Le fluide est considéré newtonien et la viscosité indépendante du taux de déformation du fluide. En fait dans le présent travail, il est supposé que $\mu = \text{cte}$.
- L'écoulement est bidimensionnel et en coordonnées cartésiennes.
- Le transfert de chaleur par rayonnement et la dissipation visqueuse sont négligeables.
- Les propriétés thermo physique du fluide sont constantes.

Et à partir de là, les équations de gouvernant après les conditions précédentes deviennent comme suit :

✓ **La continuité**

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{II.4})$$

✓ **Quantité de mouvement**

Suivant x

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (\text{II.5})$$

Suivant y

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \rho g \quad (\text{II.6})$$

✓ **Conservation d'énergie**

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] \quad (\text{II.7})$$

$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}$ Désigne le dérivé particulaire par rapport au temps $\vec{\nabla}$ le vecteur gradient

II.5 Propriétés du problème (conditions aux limites)

La solution exacte du système d'équations, obtenu précédemment, nécessite l'incorporation des conditions aux limites appropriées de champs dynamiques et thermiques. Et elles s'écrivent comme suit :

Propriétés du fluide : Le fluide utilisé est l'eau.

Fluide	$\rho [Kg/m^3]$	$\mu [Kg/m.s]$	$\lambda [W/m.K^0]$	$C_p [J/Kg.K^0]$
L'eau	998.2	1.003 E-03	0.6	4180

Tableau II. 1 : Propriétés du fluide.

Nombre de Reynolds, la température d'entrée ainsi la quantité de chaleur à la paroi d'impact sont :

Reynolds	Re	$9,8.10^5$
Température d'entrée	$T_o [K^o]$	296.15
Température de surface chaude	$Q [W/m^2]$	770

Tableau II. 2 : Propriétés du problème.

Après avoir effectué la forme adimensionnelle des équations gouvernantes, on constate l'apparition des nombres adimensionnels, déjà définis et décrits dans le chapitre précédent, tels-que :

Le nombre de Reynolds : $R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$ (II.8)

Le nombre de Prandtl : $P_r = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ (constant) (II.9)

La vitesse

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} \Leftrightarrow V = \frac{R_e \mu}{D \rho} = \frac{9,8.10^5 * 1.003.10^{-3}}{5.10^{-3} * 998,2} = 197.66 \text{ m/s}$$

II.6 Fonction du courant

La fonction de courant en physique, en particulier en mécanique des fluides, est une fonction (à valeurs complexes) définie pour des écoulements de différents types. Elle donne le paramètre de la composante non divergente de n'importe quel champ de vitesse dont la valeur est constante le long de chaque ligne de courant, L'équation de la fonction du courant est donnée comme suit [37] :

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y} ; \quad V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}$$
 (II.10)

II.7 Modèle $k-\varepsilon$

Le modèle $k-\varepsilon$ est un modèle de turbulence très populaire et très utilisé. C'est un modèle semi empirique à deux équations de transport : une pour l'énergie cinétique de turbulence k et l'autre pour le taux de dissipation de l'énergie ε . Il est basé sur l'hypothèse de Boussinesq. Il consiste à introduire dans les équations moyennées une viscosité turbulente telle que :

$$\overline{u_j u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{i,j} - \nu_t (U_{i,j} + U_{j,i}) \text{ et } \overline{u_j \theta} = \Gamma_t \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (\text{II.11})$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \text{ et } \Gamma_t = \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad (\text{II.12})$$

L'énergie cinétique de la turbulence k et son taux de dissipation ε sont donnés par :

$$U_j k_j = \nu_t (U_{i,j} + U_{j,i}) U_{i,j} + \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) k_j \right]_j - \varepsilon \quad (\text{II.13})$$

$$U_j \varepsilon_j = C_{\varepsilon_1} \nu_t \frac{\varepsilon}{k} (U_{i,j} + U_{j,i}) U_{i,j} - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \varepsilon_j \right]_j \quad (\text{II.14})$$

Le tableau des constantes empiriques les plus couramment utilisées sont celles de Jones et lauder, tel que [33] :

C_{ε_1}	C_{ε_2}	C_μ	σ_2	$\sum \varepsilon$
1.5	1.82	0.09	1.0	1.21

Tableau II. 3 : constantes de Jones et lauder.

〔 Chapitre III : Formulation Numérique 〕

III.1 Introduction

Avec les capacités de dynamique des fluides (CFD) les plus étendues de l'industrie, ANSYS nous assure des innovations de produits et de procédés. La dynamique des fluides joue un rôle important dans les produits de tous les jours – Du traitement de l'eau, des systèmes aérodynamique et automobile et aéronautique, ...etc. Dans les coulisses, la dynamique des fluides est impliquée dans la conception et la fabrication de centaines de produits de consommation, industriels et de défense. Pour toute application impliquant un flux de gaz, un écoulement de liquide ou le transfert de chaleur, l'analyse de la dynamique des fluides peut aider à créer une innovation et gagner en efficacité. ANSYS est un logiciel de simulation numérique FEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits. Les utilisateurs ANSYS sont de domaines industriels différents telles que la construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de consommation.

III.2 Généralité sur l'ANSYS (*workbenchFluent*)

C'est un logiciel permettant d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Il ne comporte pas de meilleur (le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS). Fluent très utilisé dans l'industrie et la recherche et développement à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (*LES, $K - \epsilon, K - \omega, SA, Reynolds stress$...*), combustion (pré-

mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multi-CPU).

Les équations qui interviennent sont celles de la mécanique des fluides, résolues par des méthodes numériques. Cependant, grâce au développement des méthodes numériques et des calculateurs de plus en plus puissants avec une grande capacité de mémoire, l'Ansys permet d'avoir des solutions très satisfaisantes.

III.3 Description du problème

L'écoulement considéré dans cette étude est bidimensionnel (2D), pleinement turbulent et stationnaire avec des conditions aux limites liées à la configuration étudiée. Pour reproduire numériquement la topologie de l'écoulement (présence de structure tourbillonnaire) ainsi que le champ thermique, le maillage doit être bien adapté pour chaque hauteur ($H/D=3,7$ et 10).

Ensuite, la modélisation passe par un choix judicieux des différences paramètre du problème. Tous les calculs sont effectués en double précision. Les critères de convergence des résidus normalisés des variables dépendantes ont été fixés à 10^{-6} .

III.4 Construction de la géométrie (Le problème étudié)

Cette étude constitue une étude numérique d'un système de jet impactant une surface verticale. La distance entre l'orifice (la buse), et surface d'impact est : $H/D=7$

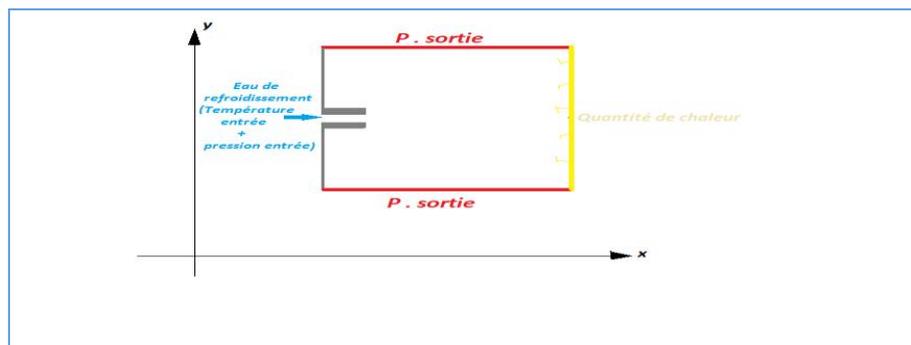


Figure III. 1 : Géométrie d'un jet impactant une surface vertical.

III.5 Étapes de présentation le problème dans logiciel (Ansys version 19.0)

III.5.1 Création le projet

Après le lancement du programme d'Ansys, une nouvelle fenêtre s'ouvrira automatiquement. Une liste d'études apparaîtra sur la gauche, en utilisant plusieurs méthodes que nous choisissons >>*mécanique des fluide (fluent)* ; Ensuite, une fenêtre apparaîtra dans l'espace de travail, où un petit espace apparaîtra sous cette fenêtre pour écrire le titre du problème.

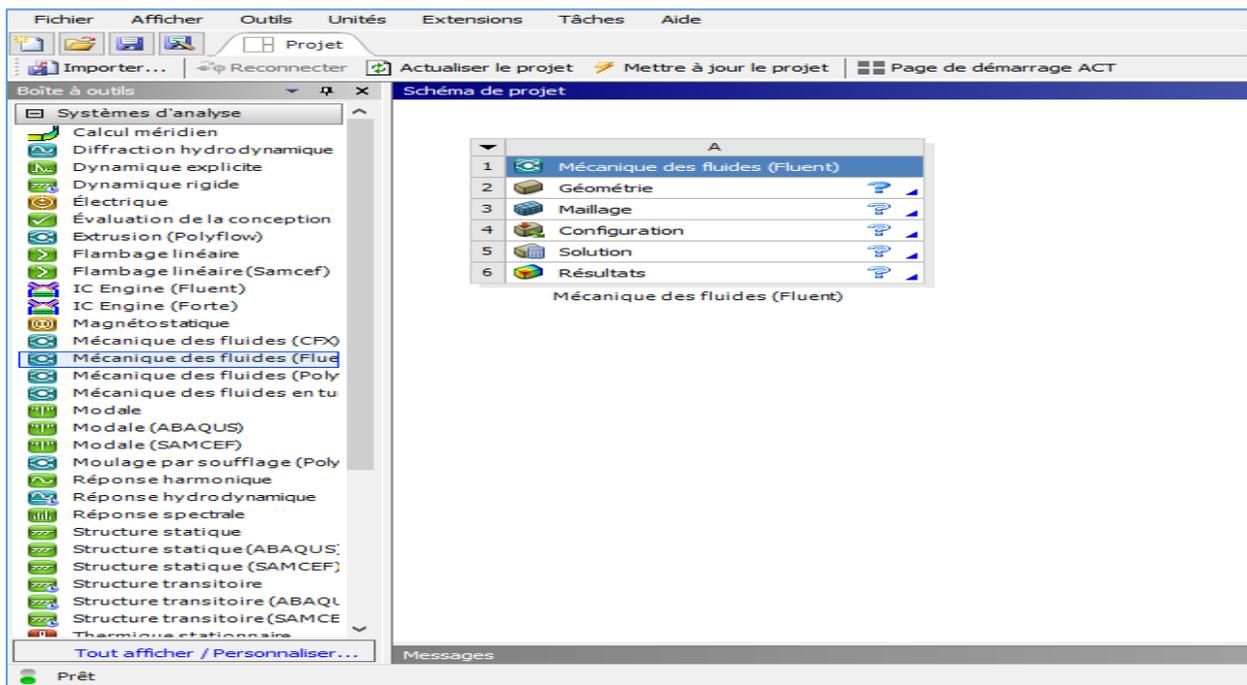


Figure III. 2 : Interface de la création d'un projet.

III.5.2 Création de la géométrie

Après l'apparition de la fenêtre de travail; Les étapes pour résoudre le problème apparaissent, cliquez sur la deuxième case >> *Géométrie*; Ensuite, Une nouvelle fenêtre s'ouvrira et vous montrera une fonctionnalité en trois dimensions (x, y, z), définissez le plan (x, y) Puis on clique>> *nouvelleEsquisse*, Tout d'abord, l'unité doit être identifié, et nous commençons à dessiner avec :

- Dessinez la forme avec des dimensions nettes et des angles réguliers.
- Préciser les côtes.
- Préciser les zones et leur nature (fluide ou solide).

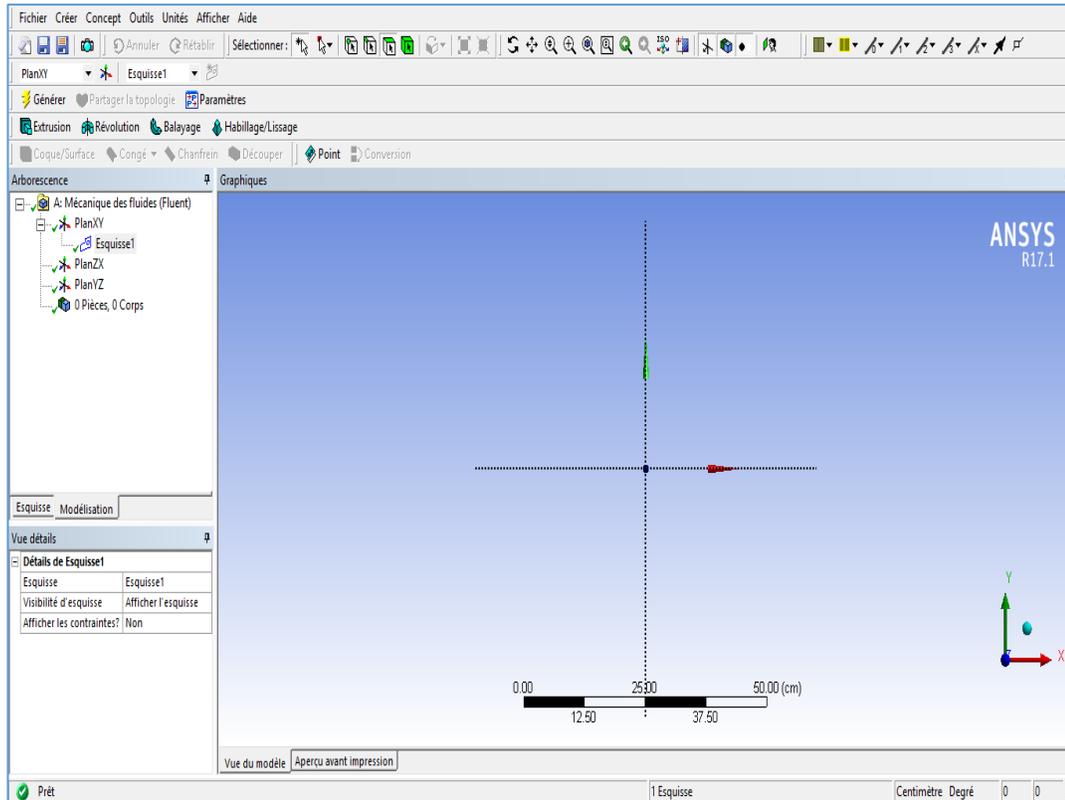


Figure III. 3 : Interface du logiciel *Workbench*.

Après avoir dessiné sur le plan (y, x), mais le problème est toujours tridimensionnel (3D) par rapport aux autres axes. Pour faire l'étude sur un plan(x, y), l'esquisse doit être convertie en 2D, c'est en cliquant en haut à gauche >>*Concept*>> *Surfaces à partir d'esquisses*

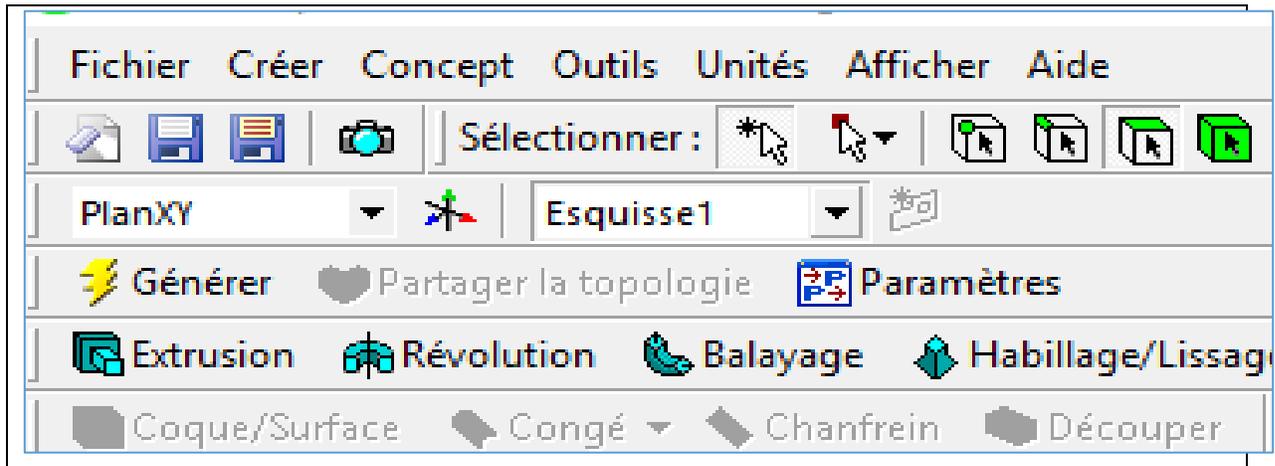


Figure III. 4 : Esquisses en 2D.

III.5.3 Conditions aux limites du problème

D : Diamètre de la buse	0.5	cm
H : Distant entre la buse et surface d'impact	7*D	cm
2r : La hauteur de surface d'impact	11*D	cm

Tableau III. 1 : Dimensions du problème.

Après les étapes que nous avons suivies et appliquées dans le logiciel, nous obtenons le formulaire suivant :

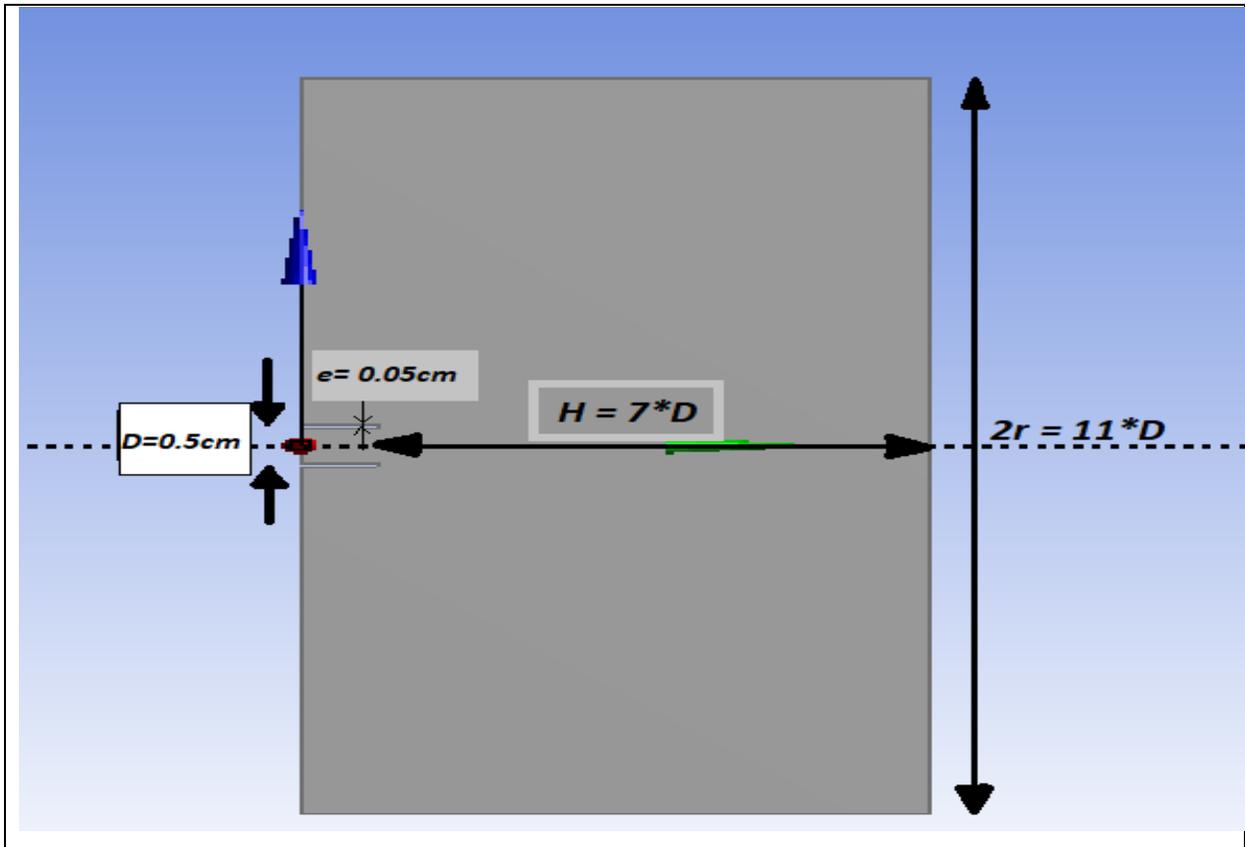


Figure III. 5 : Géométrie du domaine de calcul.

III.5.4 Le maillage

III.5.4.1 Définition

Le maillage est une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés fins et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques.

Sa dimension : typiquement 2D ou 3D ; son volume (dimension totale couverte) ; la surface ou volume moyen des cellules composant le maillage; la géométrie des cellules est triangles, quadrilatères (parallélogrammes, rectangles, carrés),...etc.

III.5.4.2 Création le maillage

Après avoir terminé le dessin et retourné à la liste de travail principale, nous choisissons le troisième case puis double-cliquez sur >>>**Maillage**, ici, vu que nous allons donner nous-même des spécifications, la méthode Automatique ira très bien. Nous allons apprendre à mailler les couches limites, les sillages set les swirls. Il apparaît sur l'écran en bas à gauche le nombre des nœuds et les éléments du maillage.

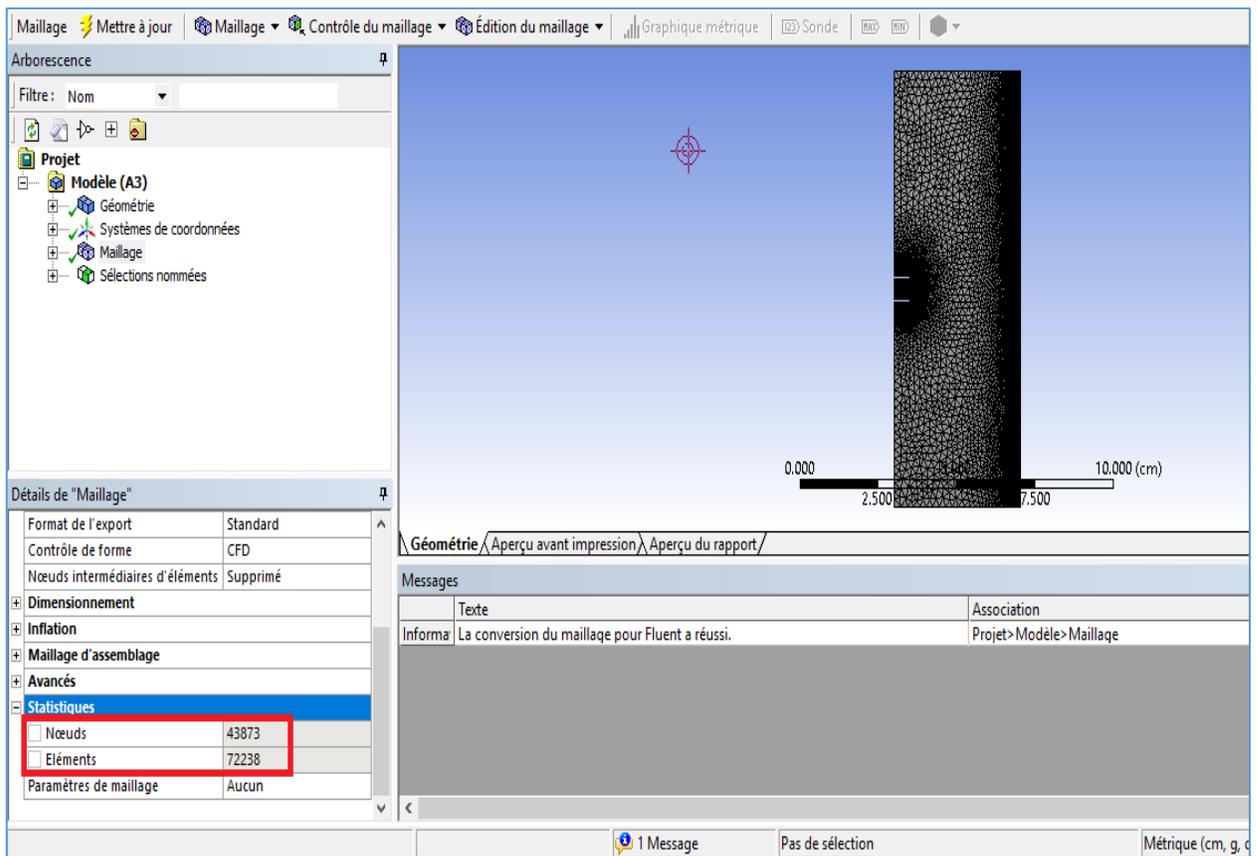


Figure III. 6 : Interface de la création du maillage.

III.5.4.3 Configuration du maillage

La géométrie des cellules peut être: triangles, quadrilatères (parallélogrammes, rectangles, carrés), polygones, en 2D; tétraèdres, prismes, hexaèdres (parallélépipèdes, cubes), polyèdres

en 3D...etc. Dans ce cas, vous sélectionnez le maillage entre triangulaire et quadratique comme le montre la figure suivante :

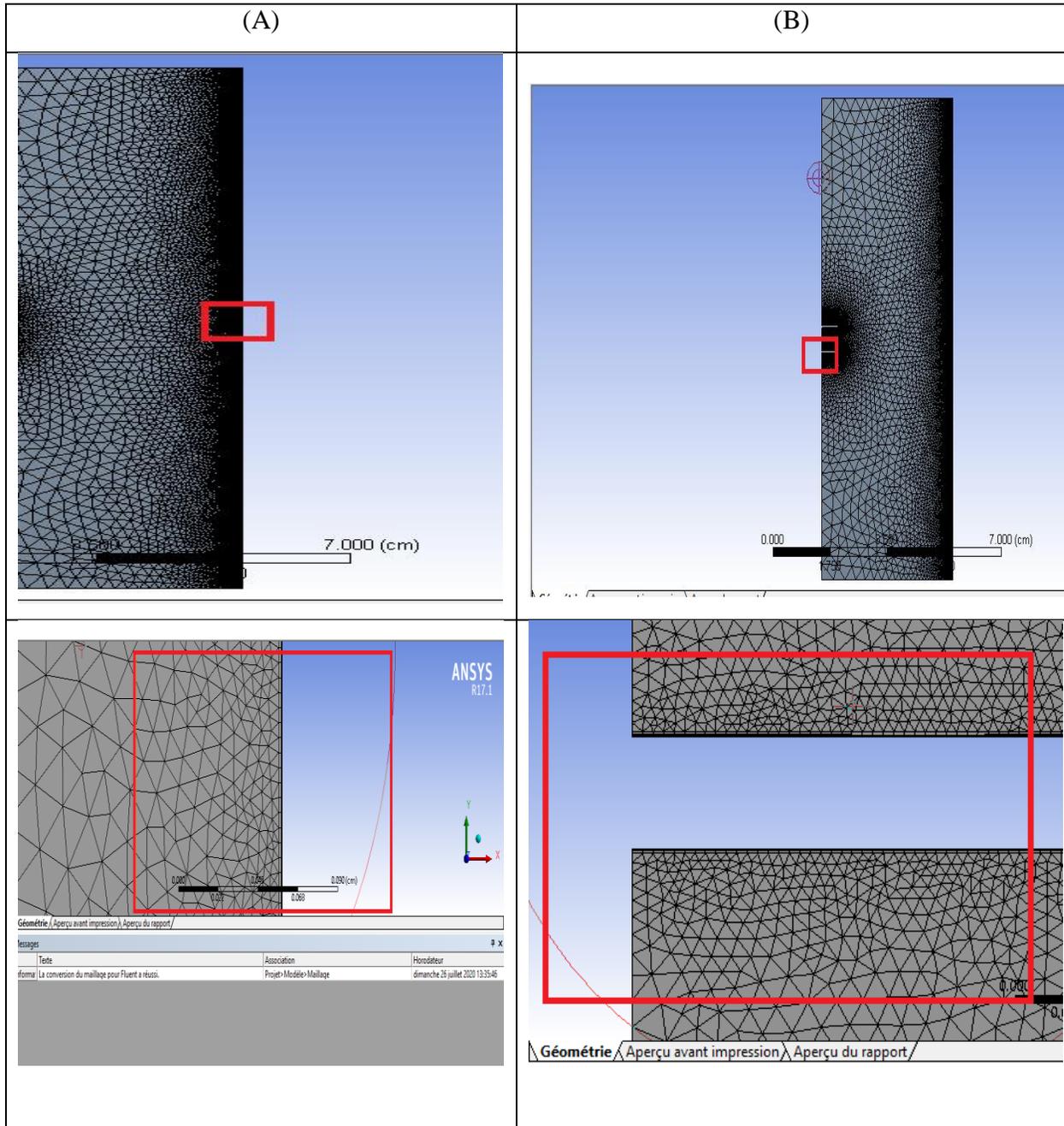


Figure III. 7 : (A) et (B) Maillage (Triangles + quadrilatères) près des parois pour bien capter les couches limites.

Le maillage utilisé pour cette simulation est raffiné au niveau de la paroi d'entrée et autour du jet. La zone de jet. Ce raffinage doit permettre de capter les forts gradients de vitesse en entrée causées par les contraintes de cisaillement et au sein du jet où la vitesse décroît rapidement et dans lequel on observe une forte intensité de la turbulence.

III.6 Simulation numérique

Une simulation numérique passe par trois étapes principales, à savoir : la préparation, la solution et le traitement des résultats :

- >> Pré processing << :

Préparation des données du problème (géométrie du domaine de calcul, de discrétisation, définition des phénomènes physiques et chimique du processus, détermination des propriétés du fluide, spécification des conditions aux limites).

- >>La résolution<< :

Ces les solutions du problème par une méthode numérique.

- >>Post processing :

Visualisation du domaine de calcul et du maillage, tracé des vecteurs de vitesse et des lignes de courant, contours, extractions de surfaces bien définis.

Après avoir créé le réseau et configuré la forme pour les simulations numériques, nous retournons au menu principal de travail et double-cliquez sur >>**Configuration**. Vous verrez plusieurs options pour étudier ces simulations, dont la plus importante est d'être précise ou double précision. Nous choisissons le double de la precision.

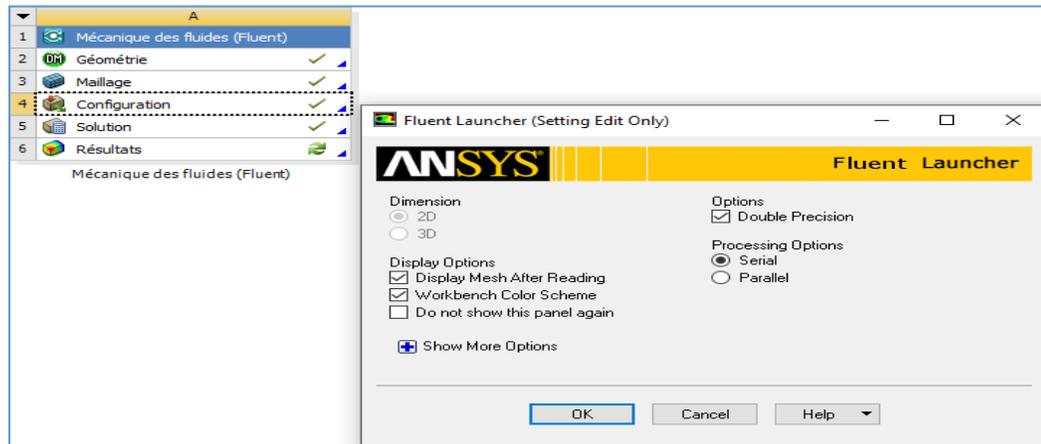


Figure III. 8 : Interface de sélection des options de simulation.

III.6.1 Les étapes de lancement du calcul par fluent

La forme sera déplacée dans une nouvelle fenêtre (ouverture le maillage dans fluent) pour la simulation et la connaissance des conditions.

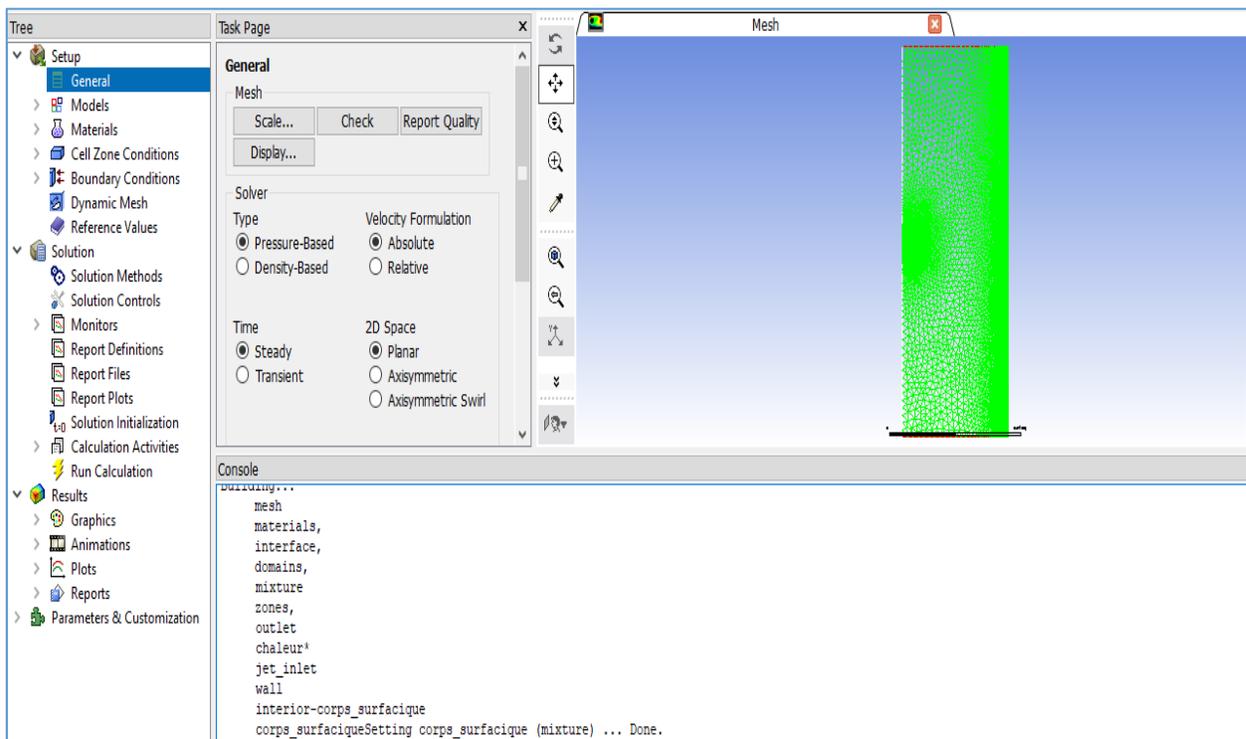


Figure III. 9 : Ouverture le maillage dans fluent.

III.6.1.1 Les conditions de la résolution

a. Les conditions générales

- Activer la gravité.
- Modèle de turbulence : K-epsilon (sans le reconfigurer),
- Activer l'équation de l'énergie

Vous devez choisir le fluide en fonction de vos études (l'eau), en cliquant dans le coin supérieur gauche de **>>Materials**, Puis appuyez deux fois sur **>>Fluid**, une nouvelle fenêtre apparaît, en cliquant sur **>>Fluent database**. En haut à droite, nous choisissons dans la liste qui **>>Water-liquid**, toutes ces étapes sont illustrées dans l'image suivante :

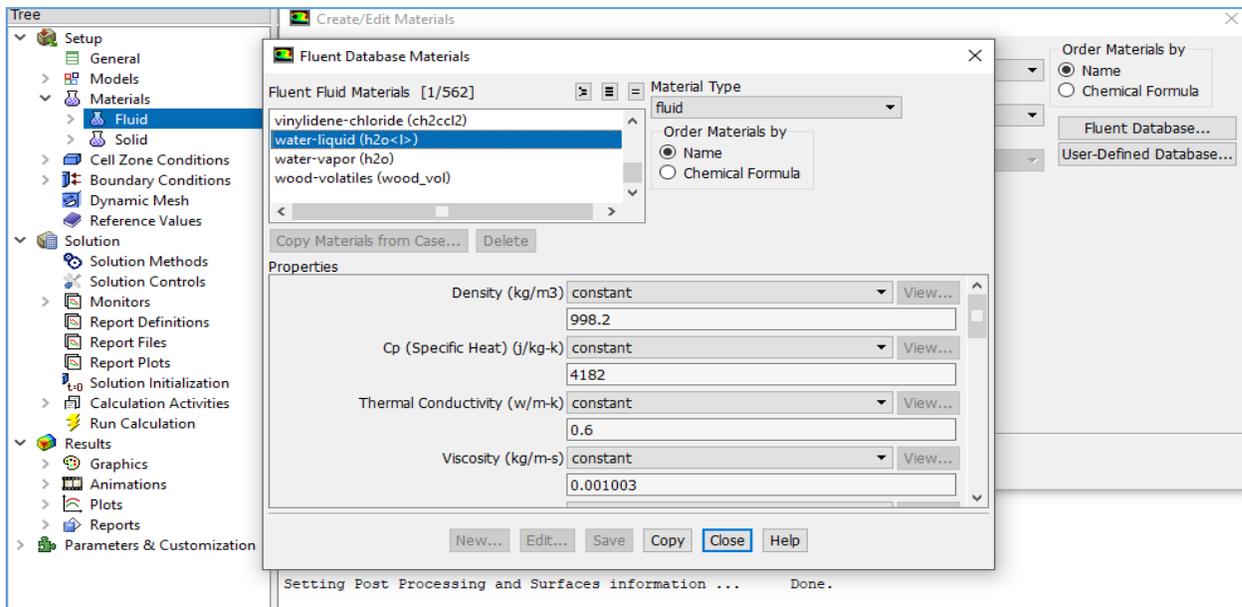


Figure III. 10 : Sélection des fluides.

b. Les boundary conditions

Les conditions de vitesse, de température et de pression sont déterminées à partir de **>>Boundary Conditions**, si vous allez dans la Boundary conditions, vous verrez que Fluent a nommé les parties internes de la structure. Nous ne les utilisons pas.

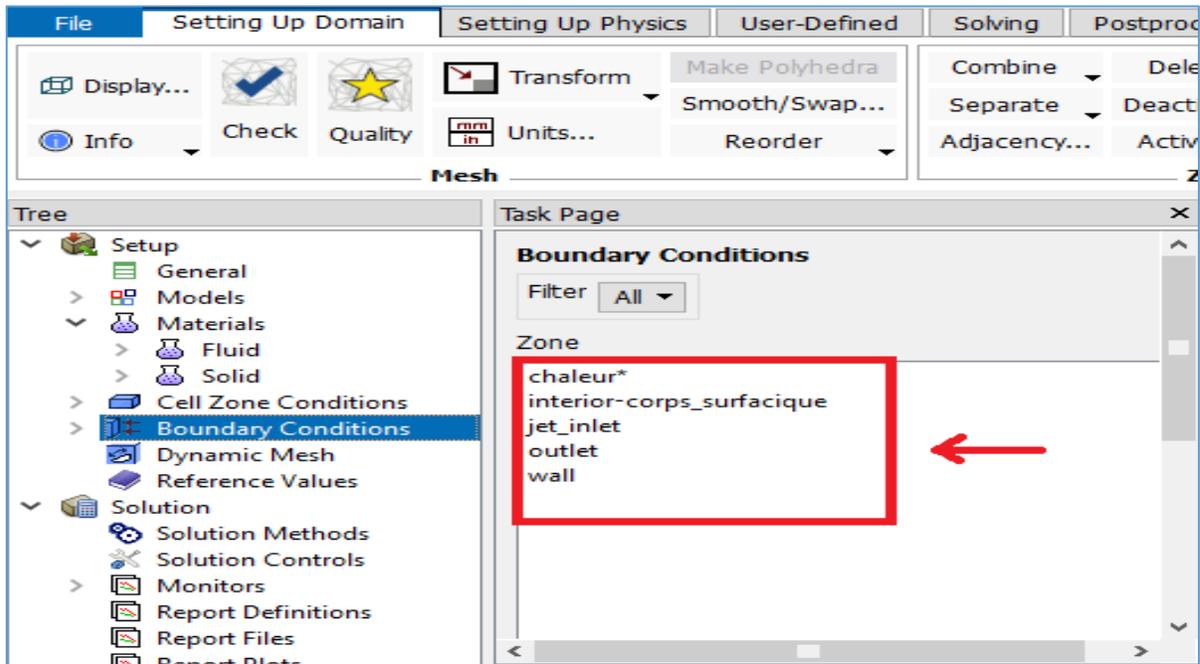


Figure III. 11 : Boundary conditions.

III.6.1.2 Définir le domaine de calcul (Lancement du calcul)

Après avoir défini les conditions générales et >>*Boundary condition*<<, le fluide utilisé, la vitesse, la température, etc... nous appuyons sur >>*Solution initialization* dans la case de gauche pour confirmer les conditions, puis sélectionnez l'option >>*Run Calculation*, pour démarrer le processus de calcul et Déterminez le nombre d'itérations.

Le calcul commencera immédiatement après avoir appuyé sur >>*Calculate*.

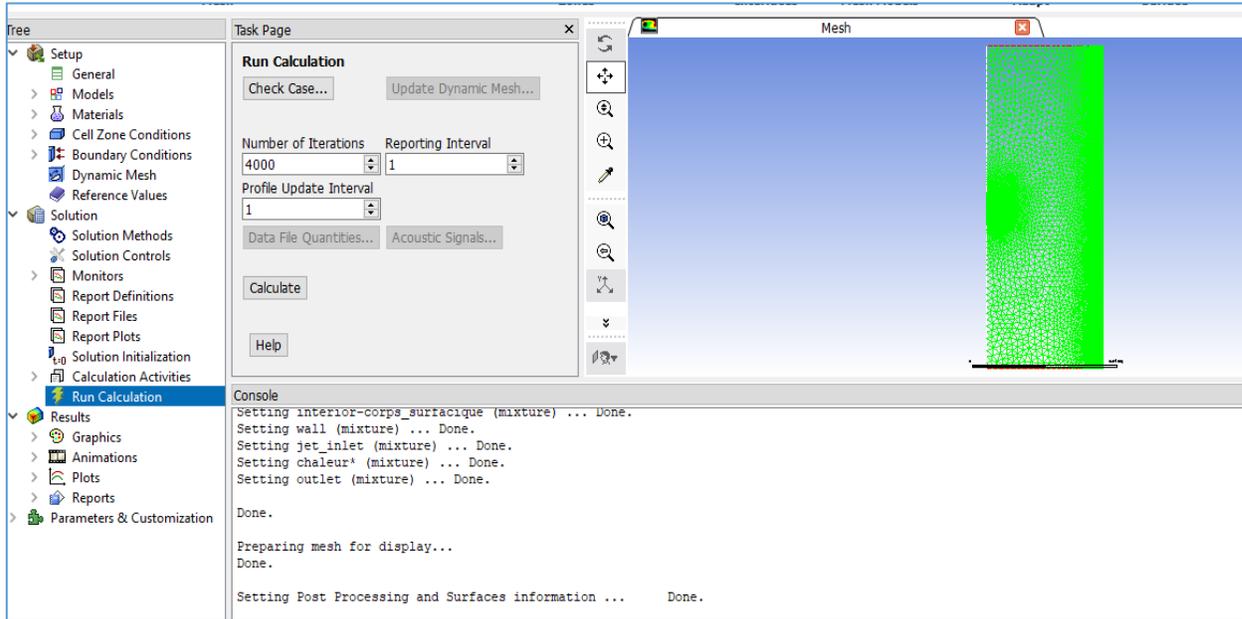


Figure III. 12 : Confirmer les conditions, avec une sélection l'itération.

- **Lancement du calcul**

Le processus de calcul se pour suivra jusqu'à ce que les solutions convergent.

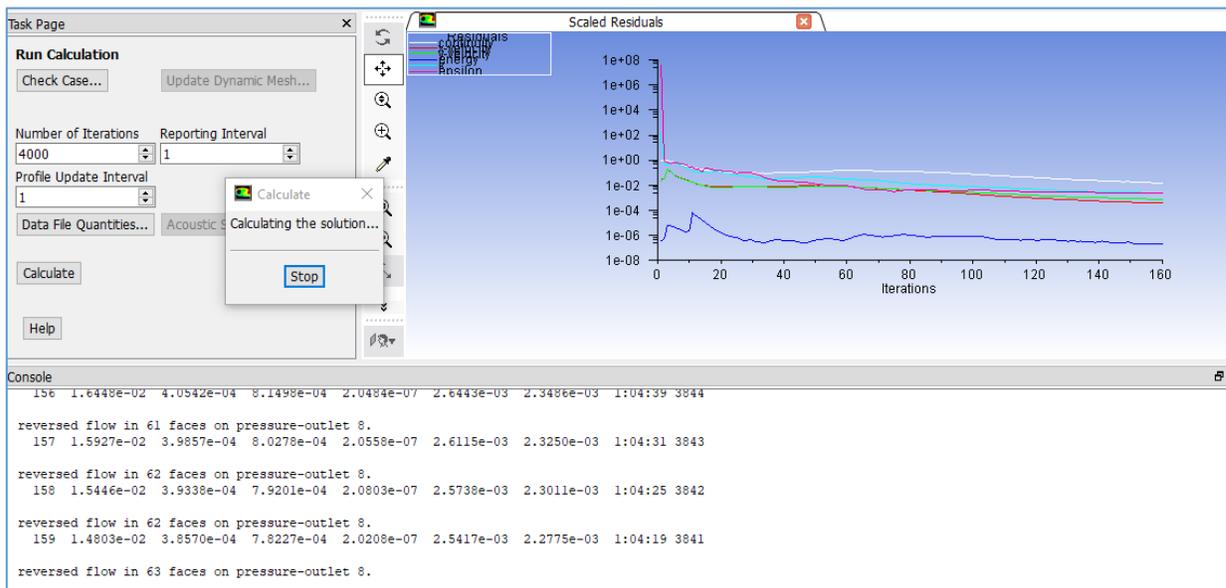


Figure III. 13 : Evolution des résidus des équations de continuité, énergie et quantité de mouvement pour le refroidissement d'une plaque chauffée par un jet impactant.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une explication détaillée d'ANSYS et comment l'utiliser, ainsi les étapes de calcul par ce logiciel utilisant la simulation numérique par CFD.

Nous avons intéressé dans nos résultats par le champ de température, les lignes de courant et le nombre de Nusselt, qui sera affichées, interprétées et discutées dans le chapitre suivant.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Le chapitre quatre traite les résultats obtenus avec le modèle de turbulence (k- ϵ) standard. Elle met en évidence les effets du nombre de Reynolds ($9,8 \cdot 10^5$) et le rapport géométrique $(H/d) = (3,7 \text{ et } 10)$ sur les comportements dynamique et thermique caractérisant un jet isotherme turbulent impactant la plaque plane placée verticalement.

IV.2 Convergence des résultats

Des solutions satisfaisantes sont obtenues lorsque les solutions convergent approximativement la même valeur. La figure (IV.01) montre les courbes de convergence des solutions pour plusieurs variables, y compris la vitesse sur les deux axes et les coefficients de turbulence (k- ϵ).

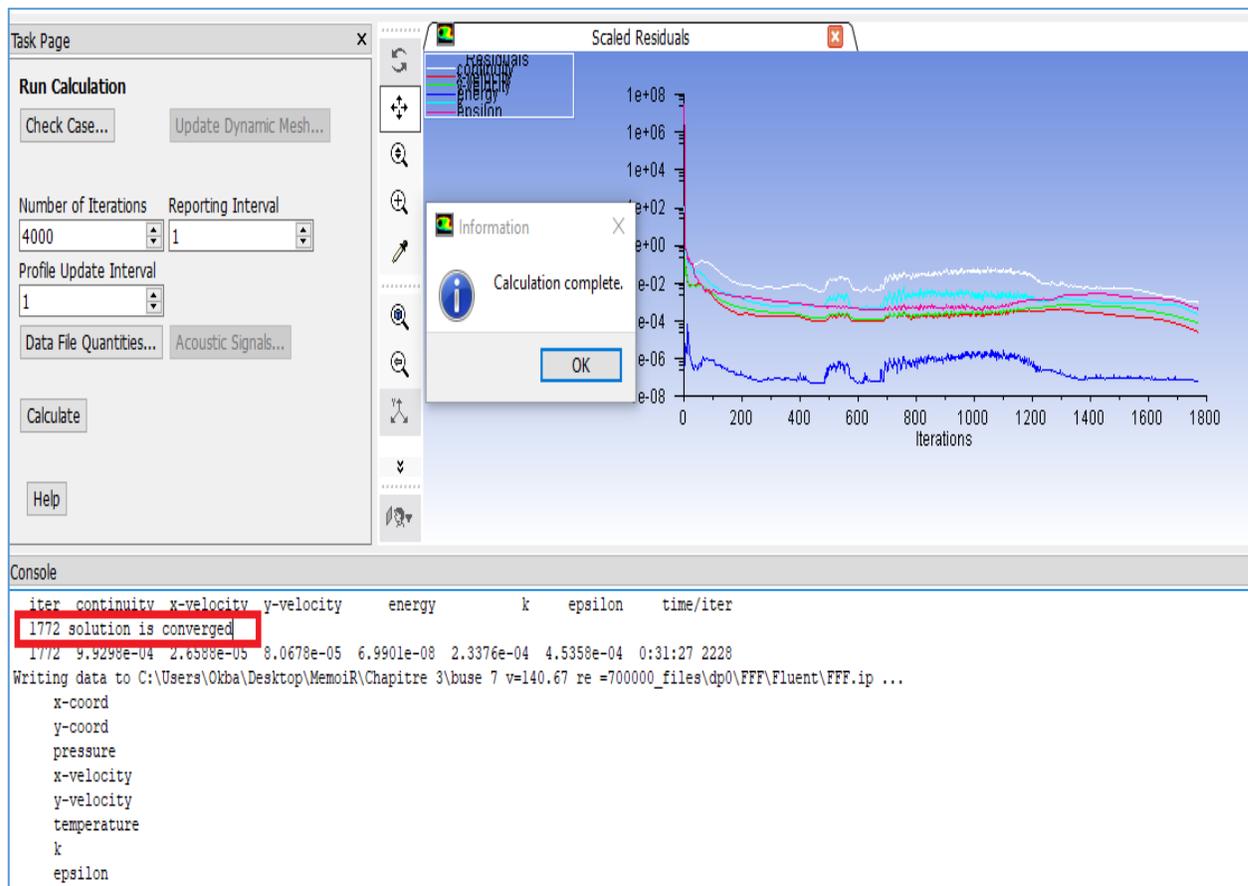


Figure IV. 1 : Convergence des résultats.

IV.3 Interprétation et discussion des résultats obtenus

IV.3.1 Profil des vitesses

IV.3.1.1 Contours de vitesse

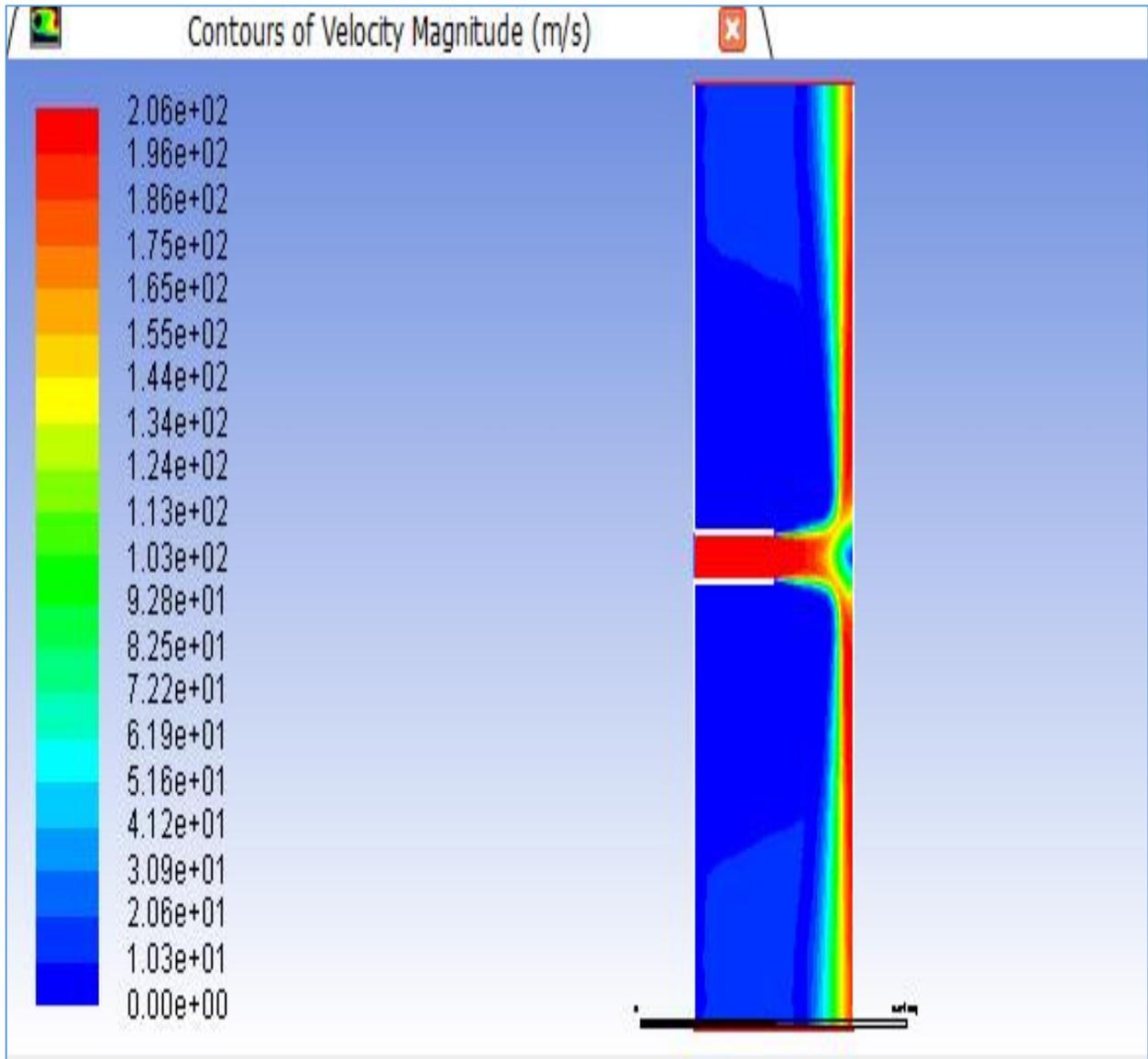


Figure IV. 2 : Présentation du contour de vitesse à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 3$.

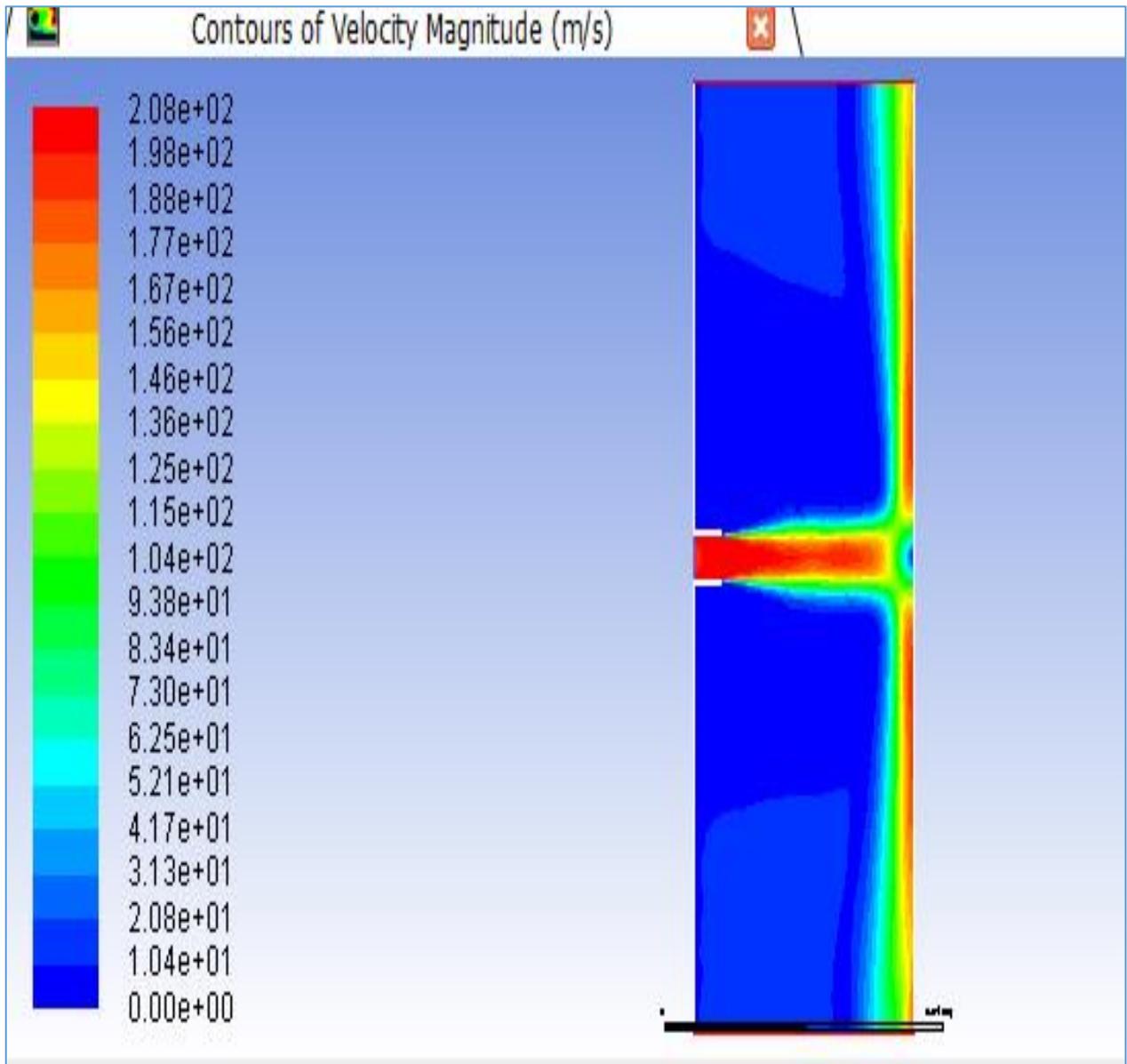


Figure IV. 3 : Présentation du contour de vitesse à la valeur de Reynolds $Re = 9,8 \cdot 10^5$ et le rapport $H/D = 7$.

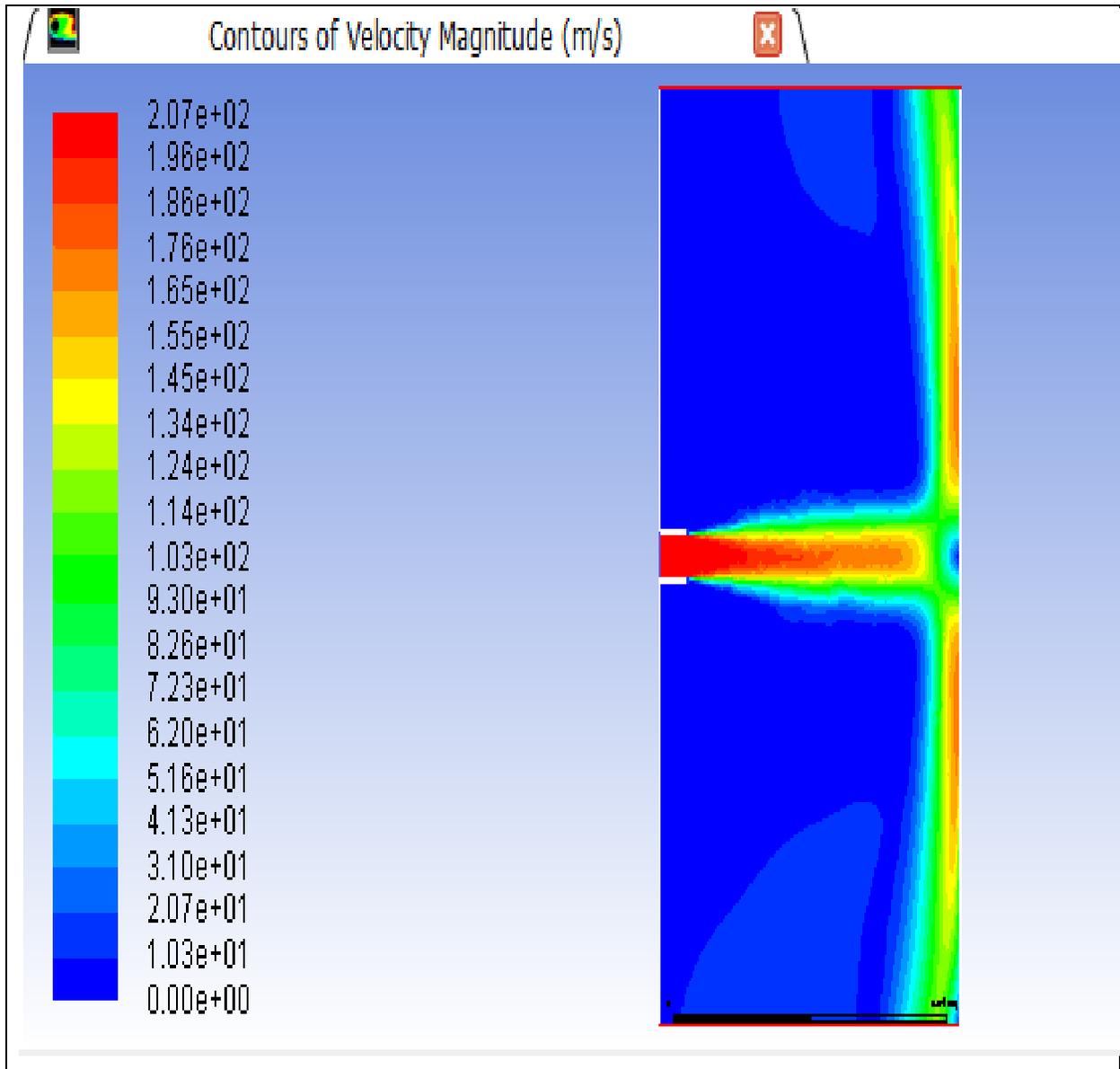


Figure IV. 4 : Présentation du contour de vitesse à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 10$.

L'analyse des résultats de contours des vitesses précédents la figure (IV.2, 3 et 4) est représentée par la variation de la vitesse de l'écoulement et sa propagation dans l'air à travers plusieurs expériences avec une différence de distance entre la buse et la zone de collision. Les

résultats expliquent que plus la buse est proche de la zone de collision, plus la taille de la vitesse se propage.

IV.3.1.2 Courbes de vitesse

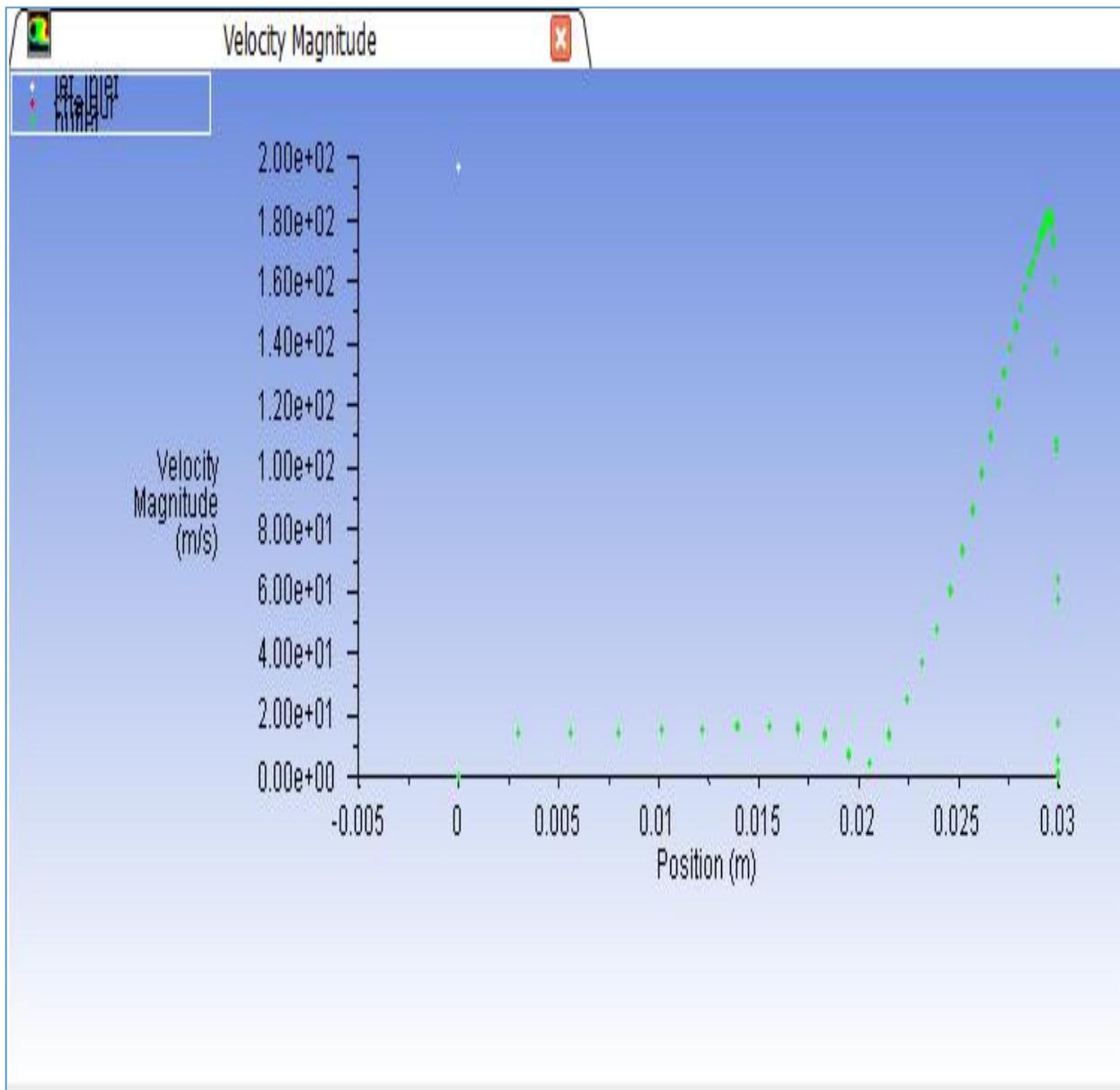


Figure IV. 5 : Présentation de la variation de la de vitesse pour Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et $H/D=3$.

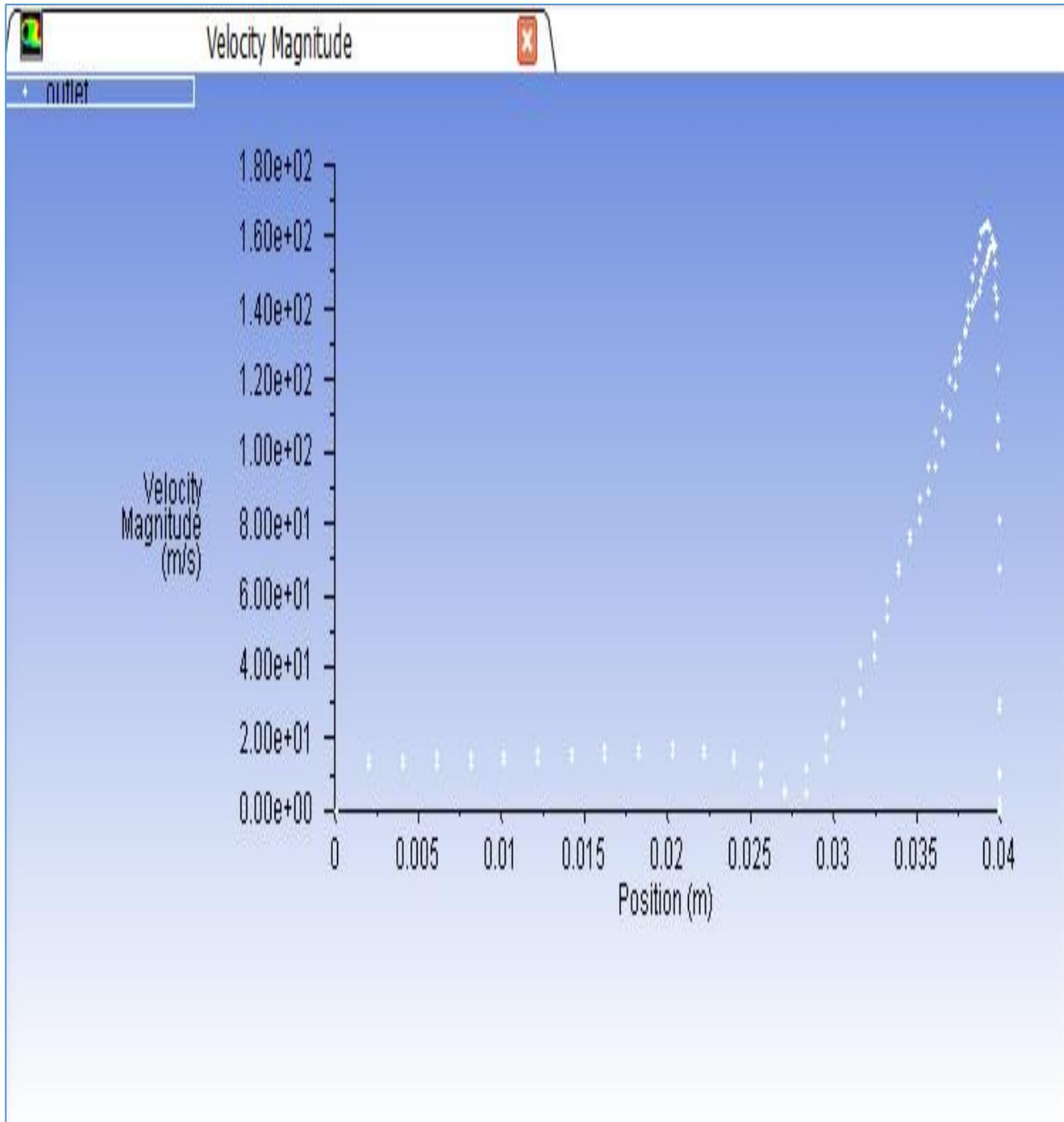


Figure IV. 6 : Présentation de la variation de la de vitesse pour Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et $H/D=7$.

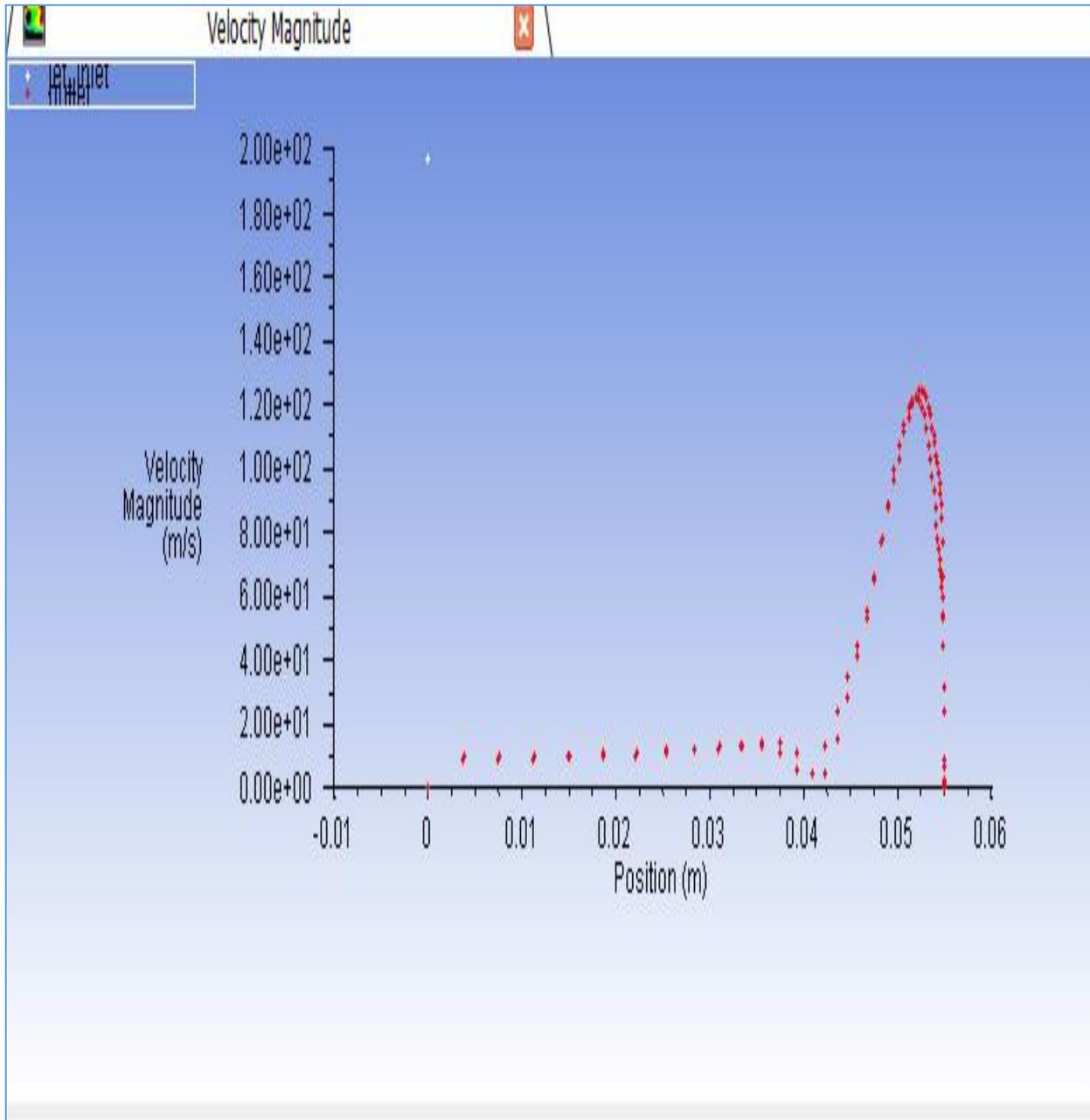


Figure IV. 7 : Présentation de la variation de la de vitesse pour Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et $H/D=10$.

Les courbes de vitesse des figures (IV.5, 6 et 7) ont été extraites en sortie du volume de contrôle. On remarque sur les figures (IV.6 et 7) la présence de deux courbes, et ceci est dû à la présence de deux directeurs (+y,-y).

Nous expliquons également la non-applicabilité des deux courbes dans les résultats, figures (IV.6 et 7), à l'existence de forces gravitationnelles et leur non influence dans les résultats de figure (IV.5), se réfèrent à la courte distance entre la buse et la zone de collision.

IV.3.2 Champ de la température

IV.3.2.1 Présentation des contours de la température

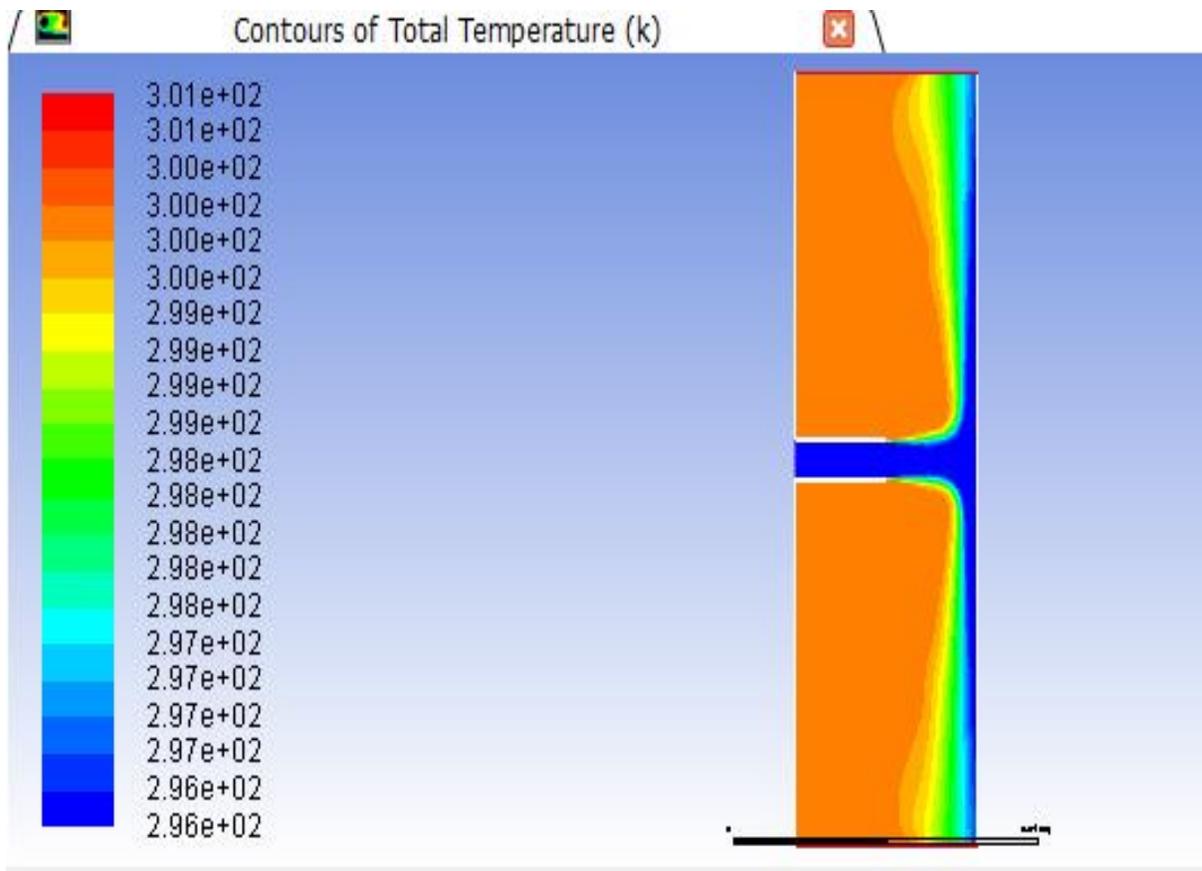


Figure IV. 8 : Présentation du contour de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 3$.

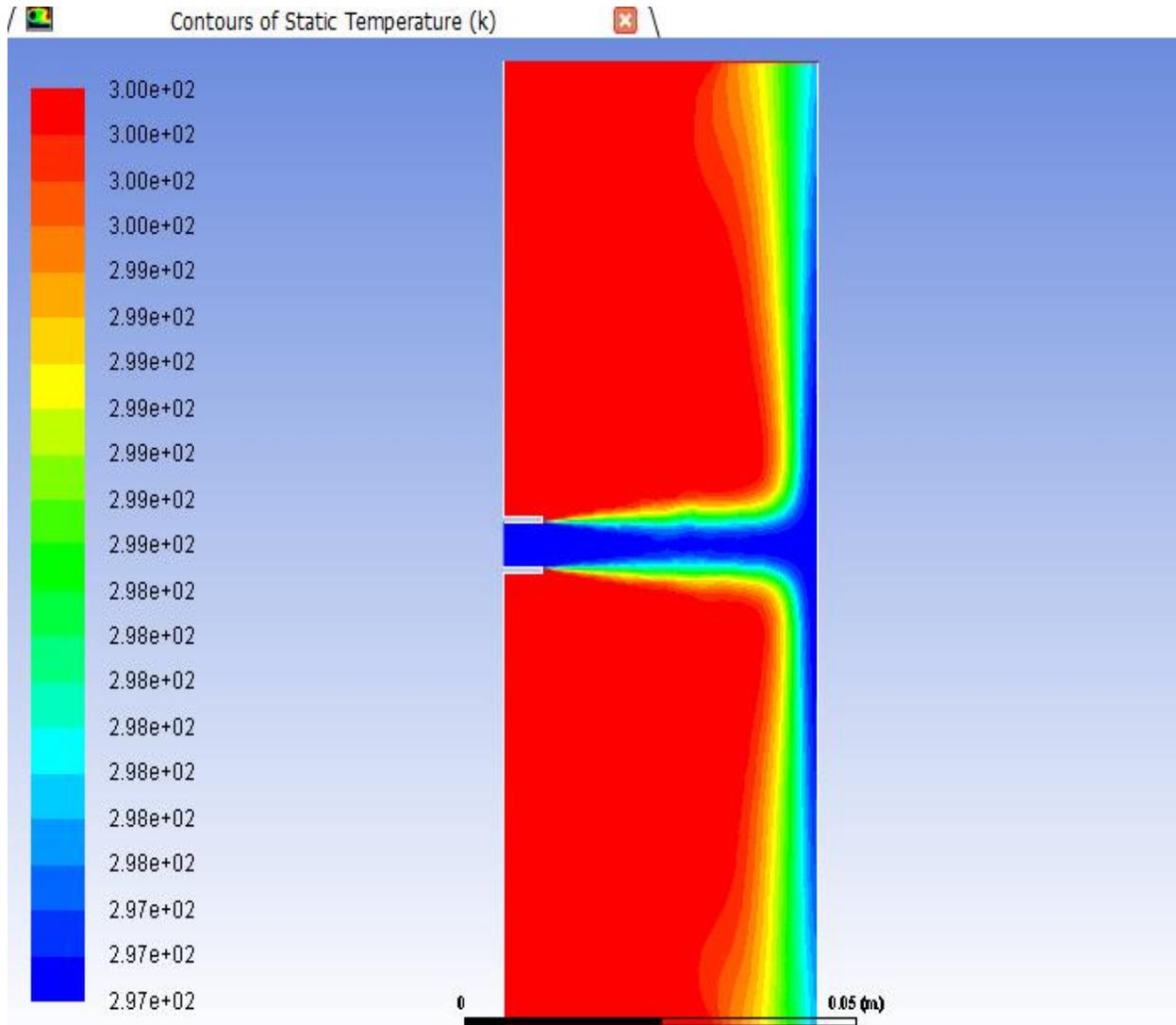


Figure IV. 9 : Présentation du contour de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 7$.

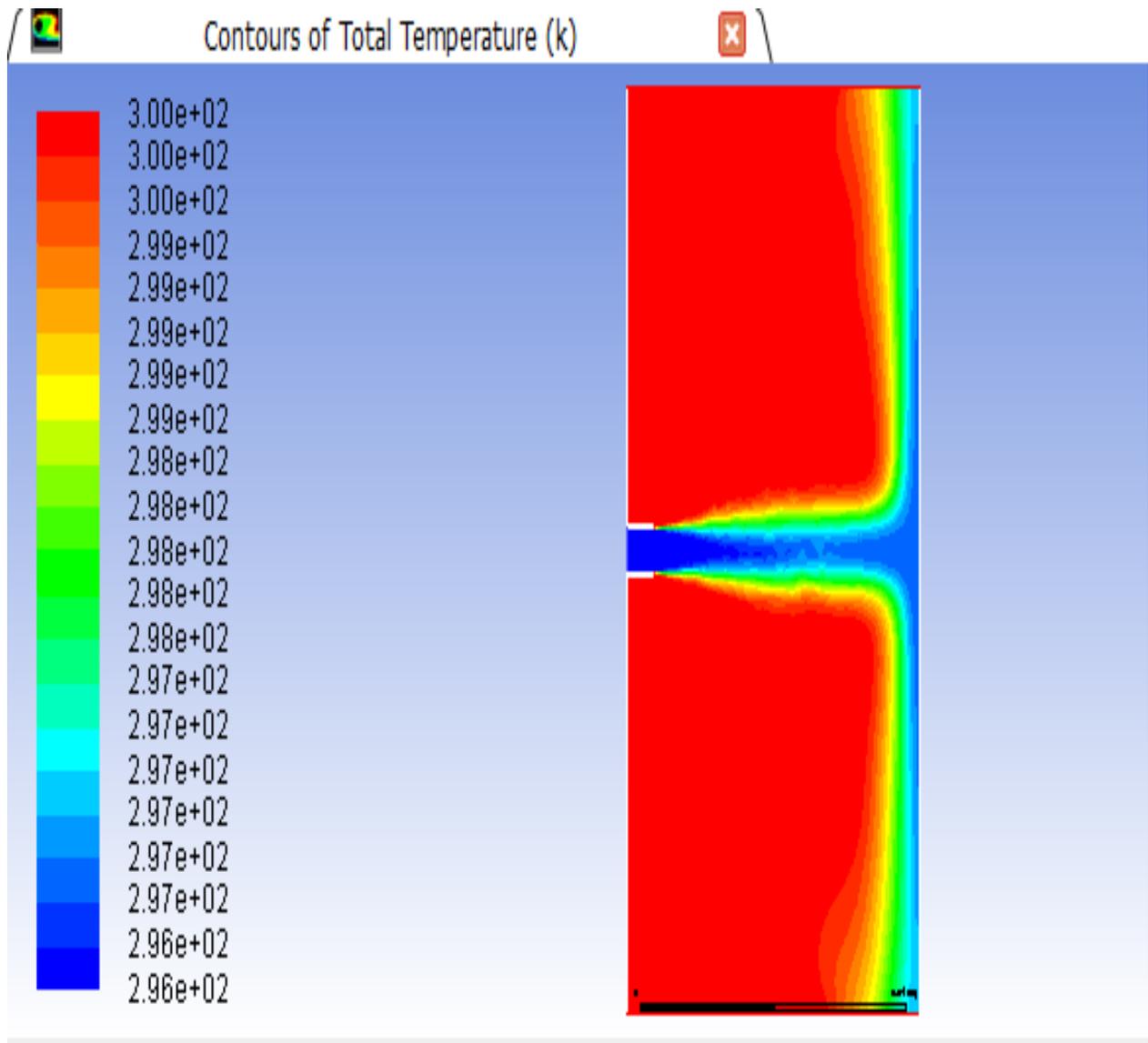


Figure IV. 10 : Présentation du contour de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8 \cdot 10^5$ et le rapport $H/D = 10$.

IV.3.2.2 Courbes de température

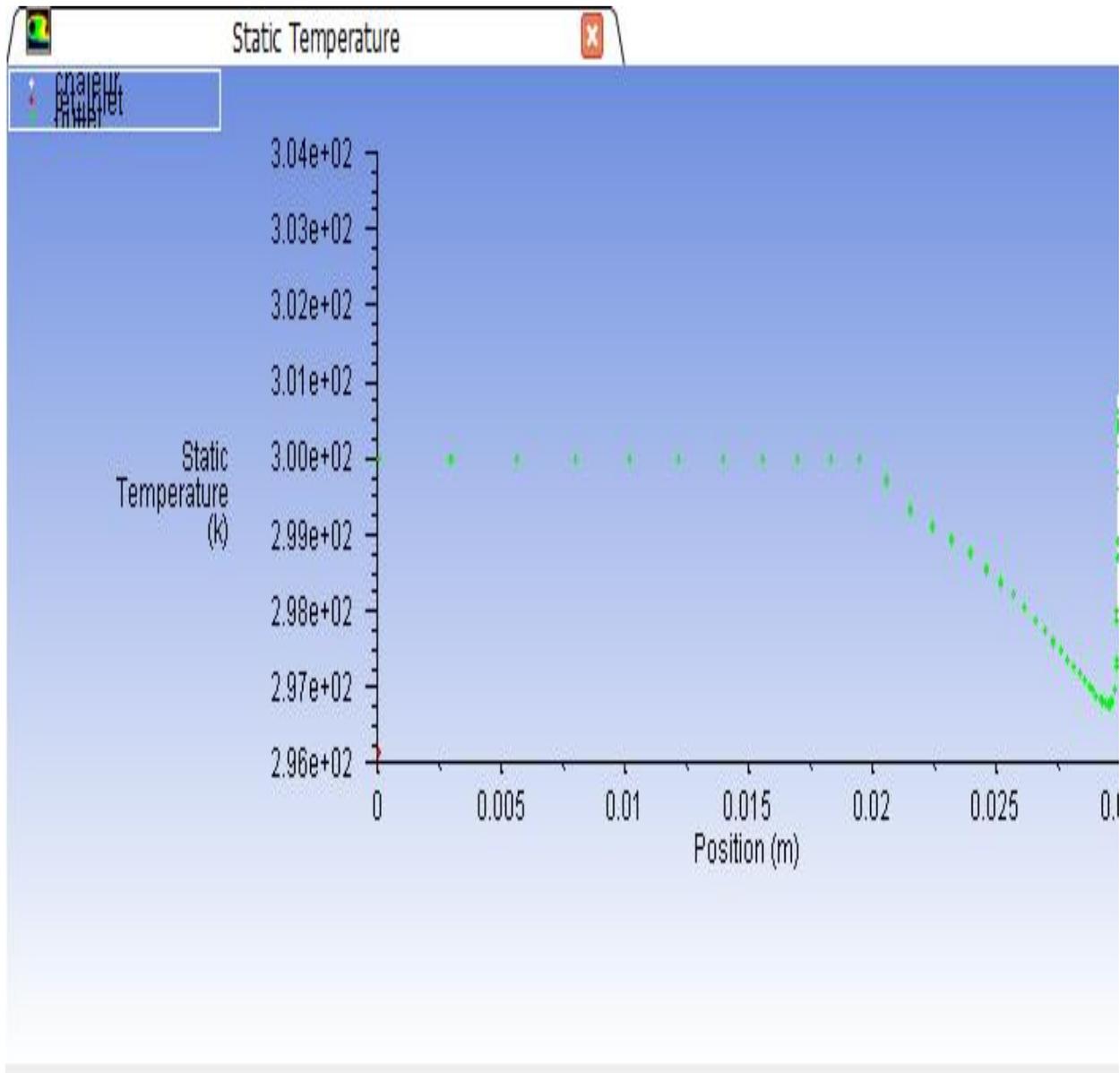


Figure IV. 11 : Présentation du courbe de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 3$.

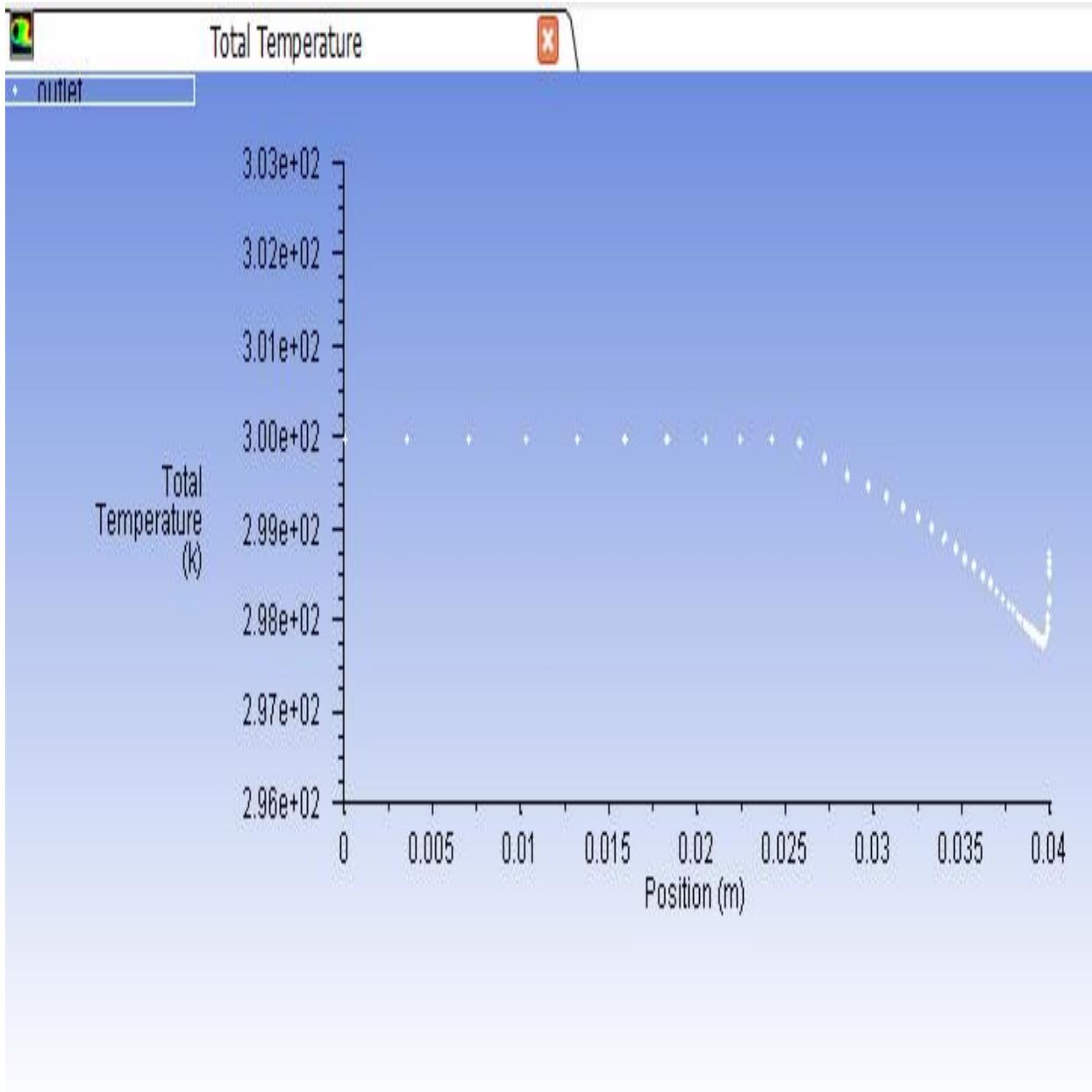


Figure IV. 12 : Présentation du courbe de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $H/D = 7$.

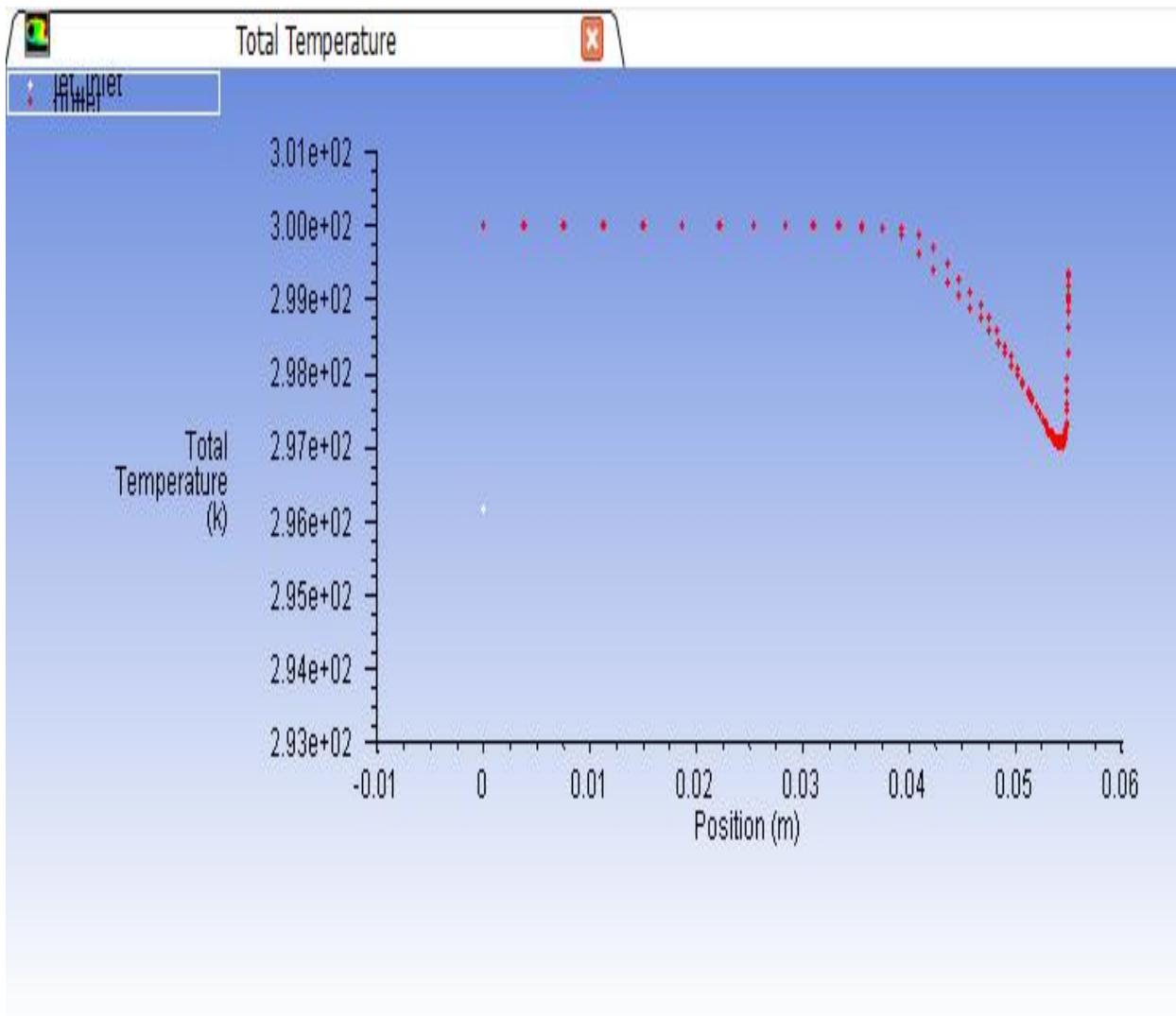


Figure IV. 13 : Présentation du courbe de température à la valeur de Reynolds $Re = 9,8.10^5$ et le rapport $\frac{H}{D} = 10$.

On remarque que les courbes de température à la sortie, varié (IV.11 et 13) passant par des valeurs supérieurs vers des valeurs inférieures, on observe aussi que la figure (IV.12), indique que le vortex (recirculation) provoque un échange thermique important, entre le fluide et la région chaude du problème en question.

IV.3.3 Variation de l'énergie cinétique turbulente

IV.3.3.1 Contours de l'énergie cinétique turbulente

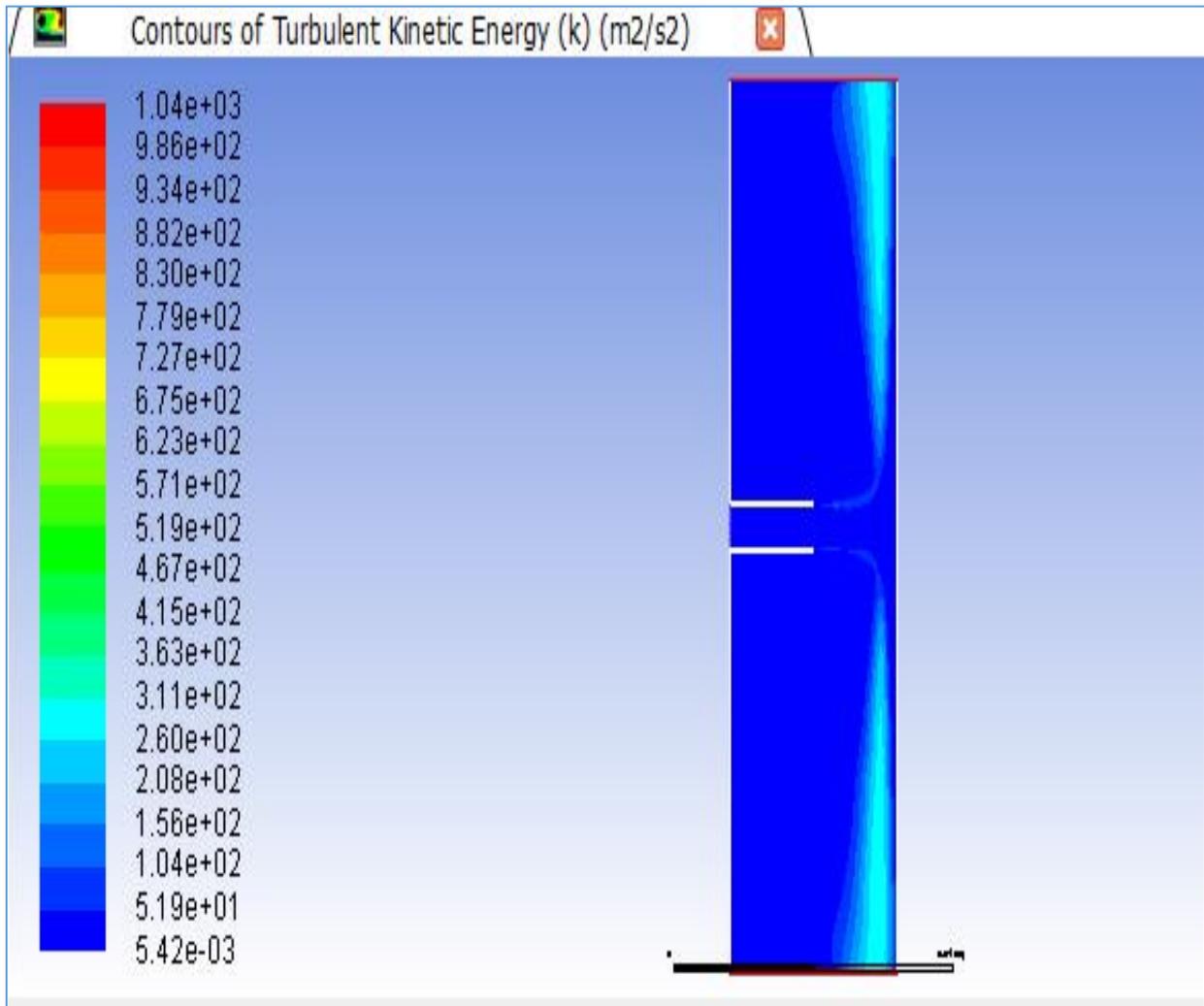


Figure IV. 14 : Illustration de la variation de l'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D = 3$.

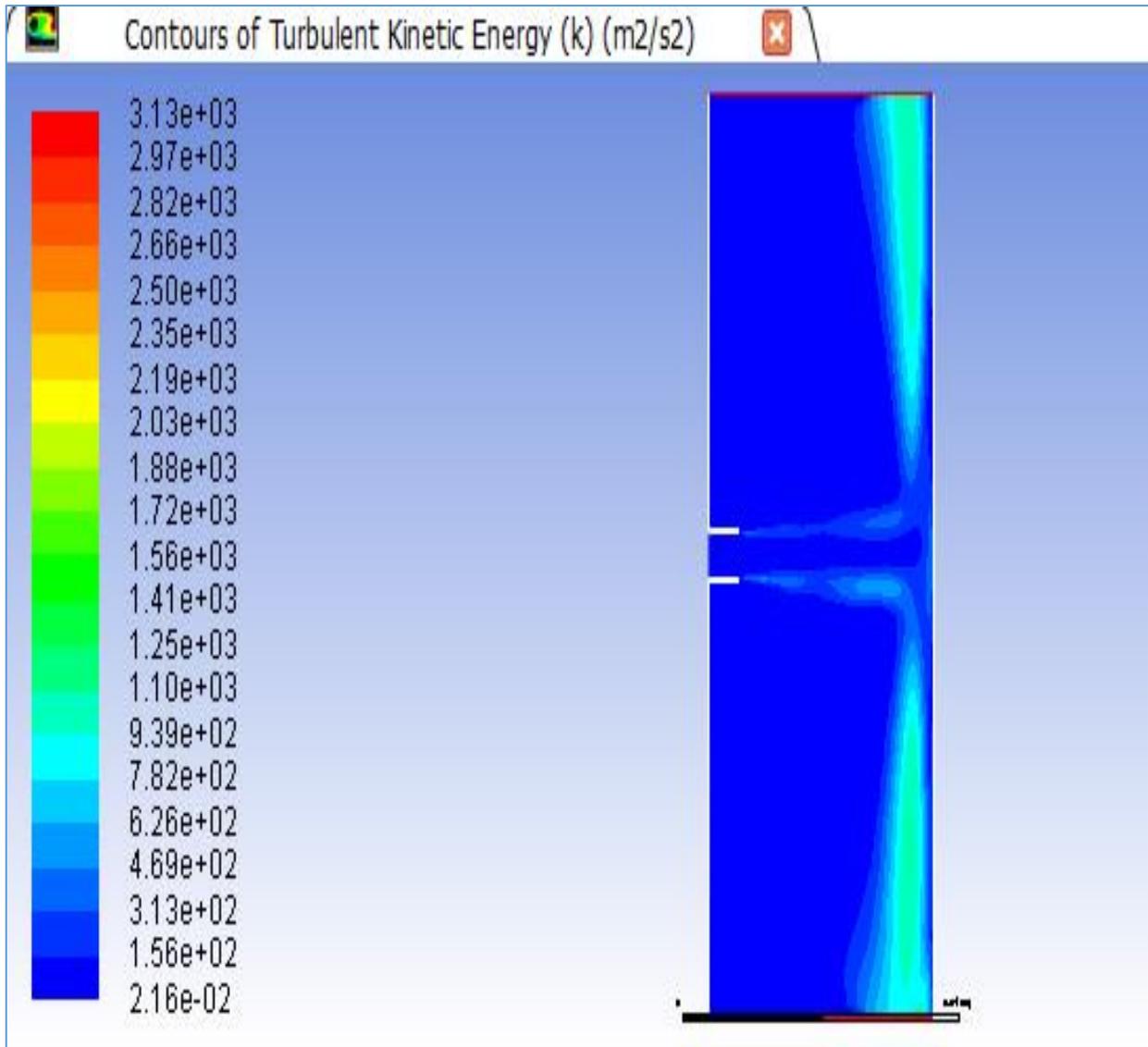


Figure IV. 15 : Illustration de la variation de l'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D = 7$.

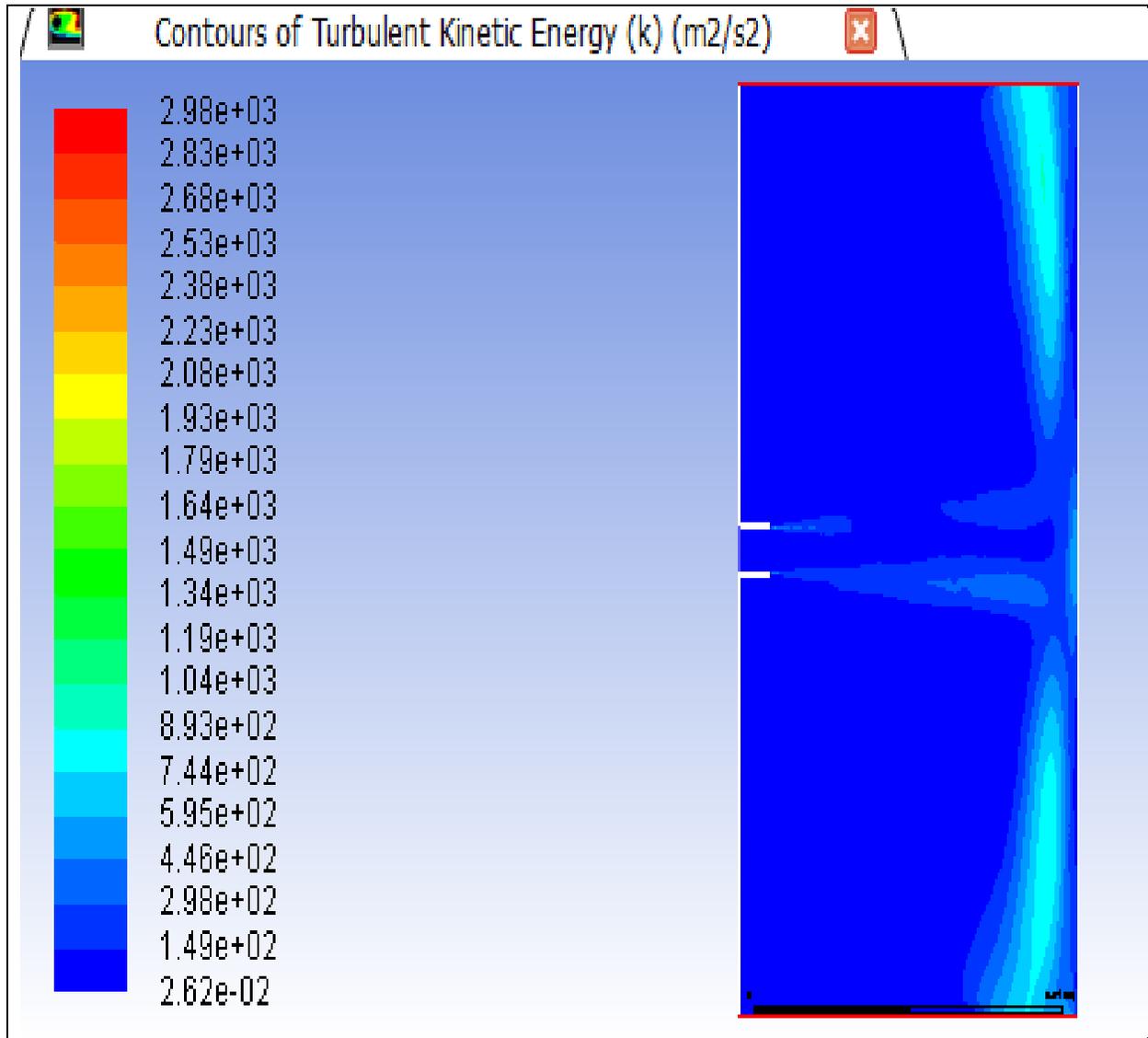


Figure IV. 16 : Illustration de la variation de l'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D = 10$.

IV.3.2.2 Courbes d'énergie cinétique turbulente

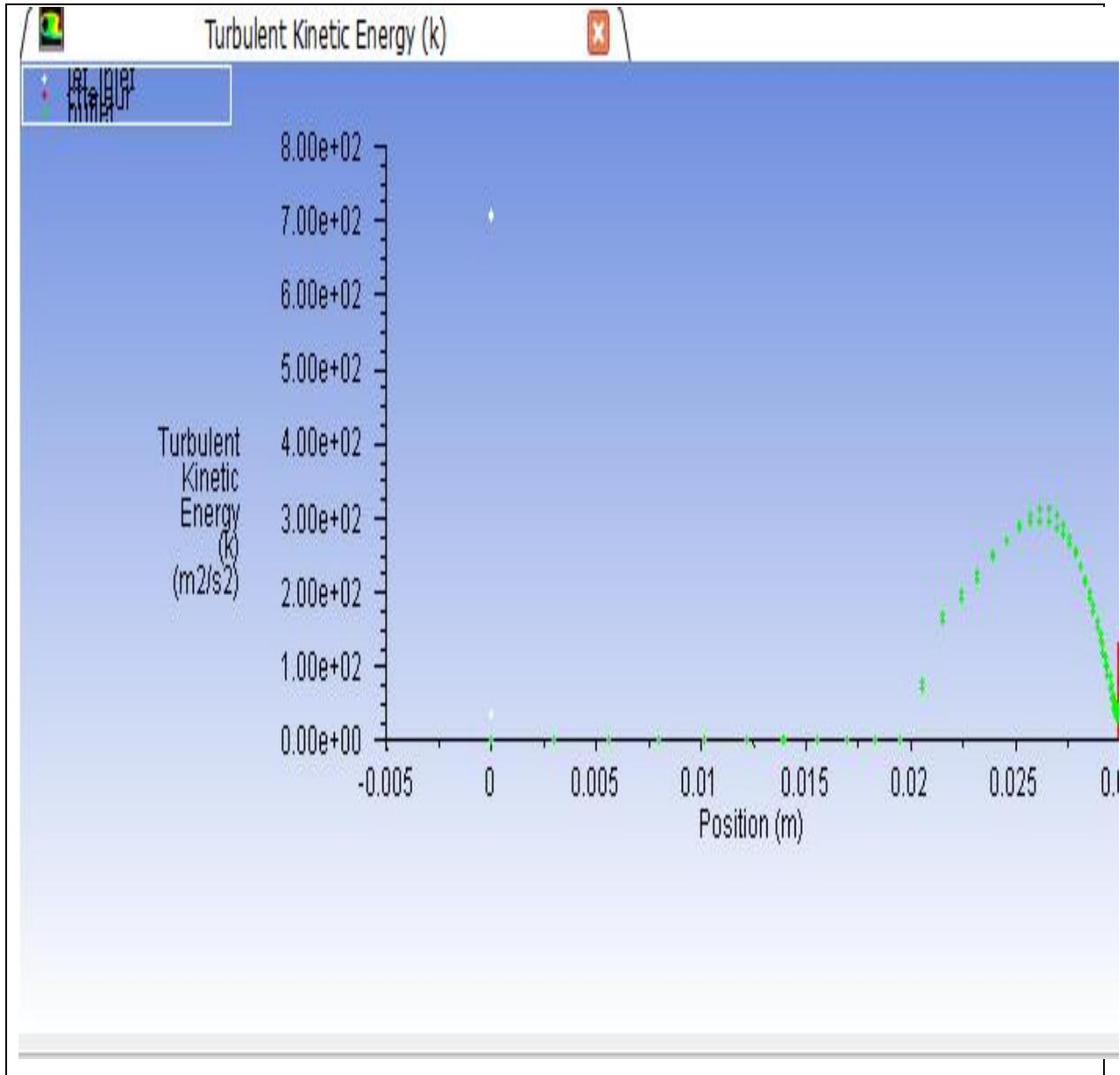


Figure IV. 17 : Courbe d'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D = 3$.

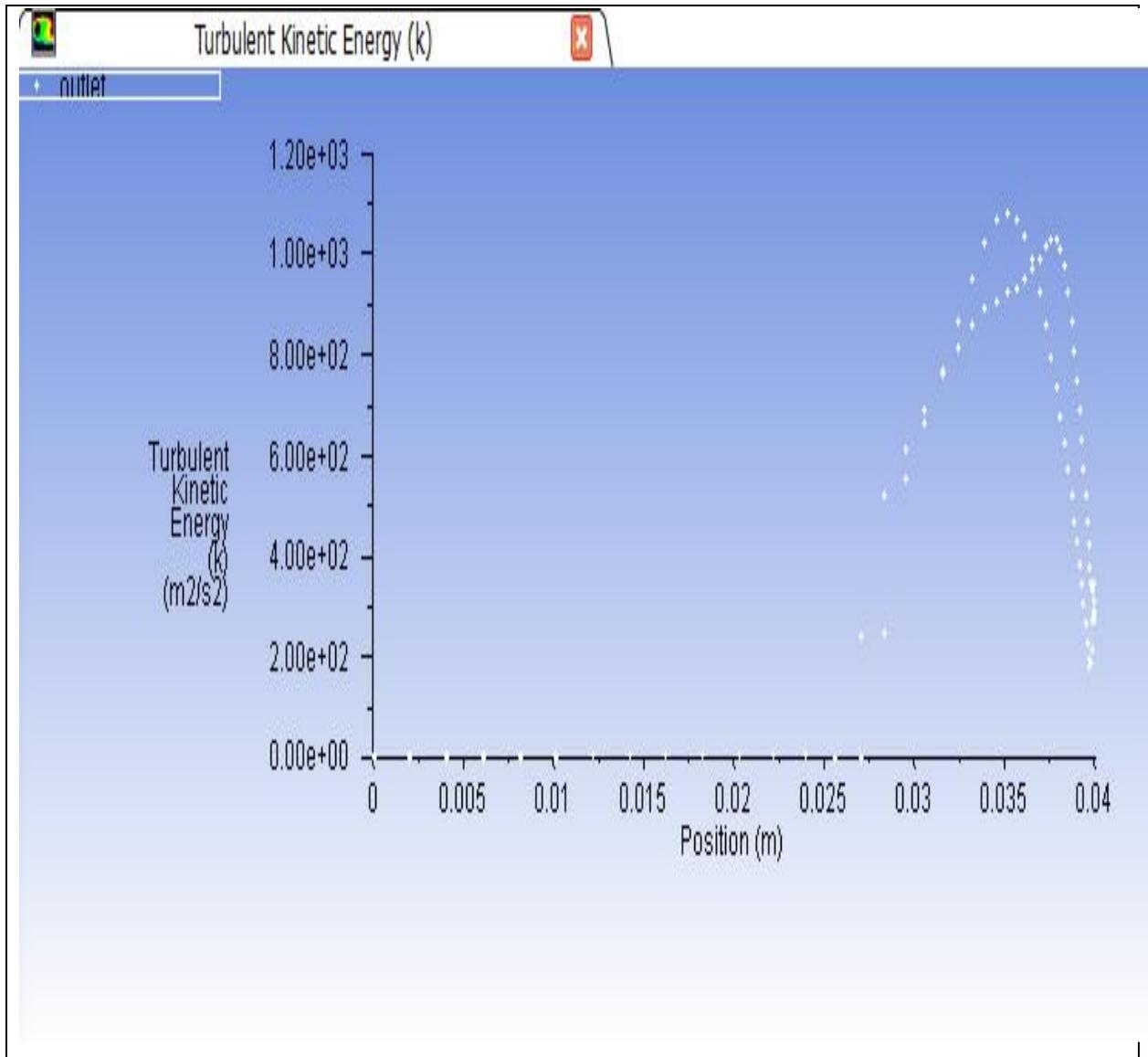


Figure IV. 18 : Courbe d'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D = 7$.

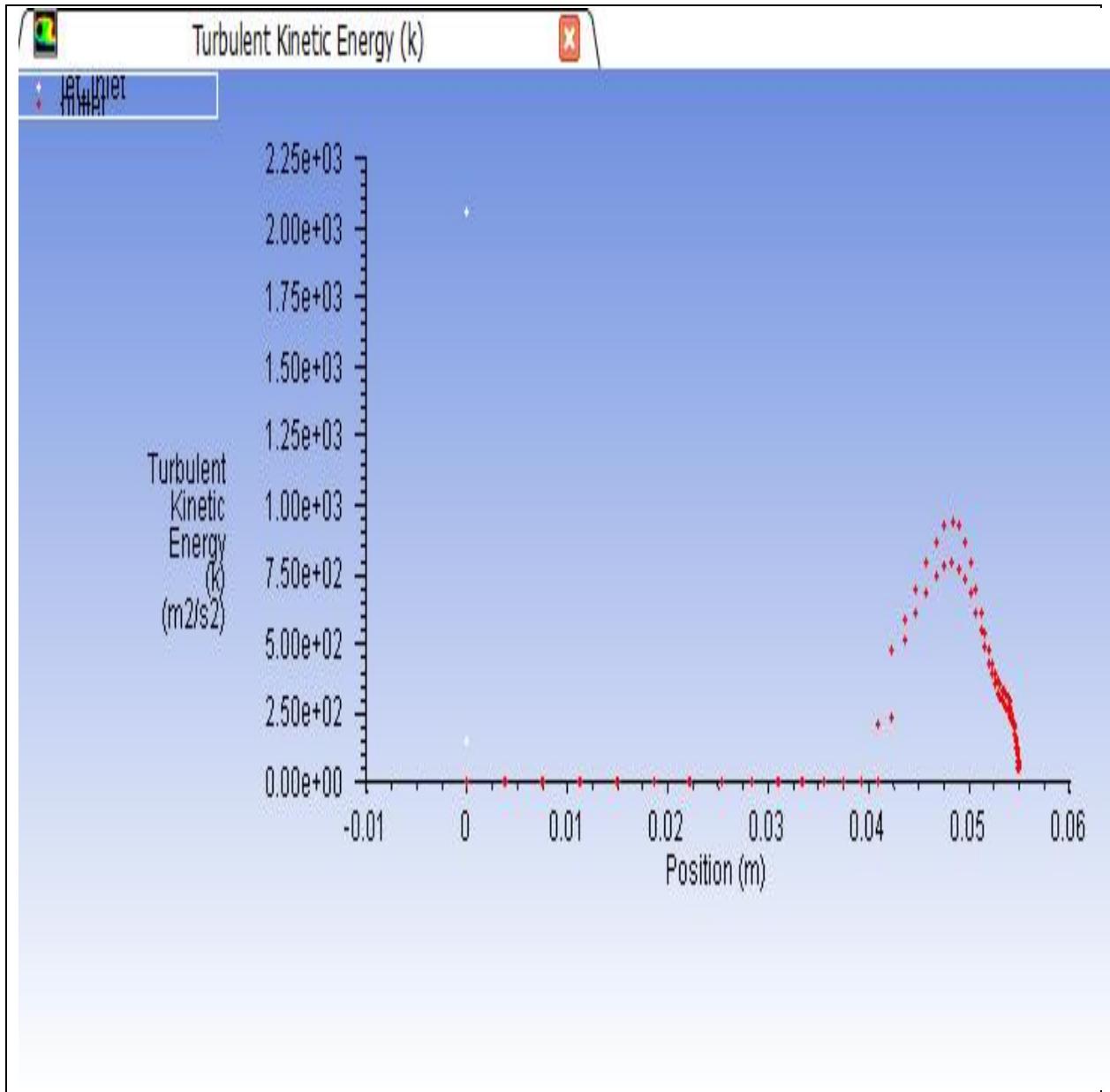


Figure IV. 19 : Courbe d'énergie cinétique turbulente à $Re = 9.8.10^5$ pour $H/D = 10$.

Les résultats de l'énergie cinétique turbulente regroupés dans les graphes des figures (IV.8, 9, 10, 11, 12, 13) pour une dimension idéale on peut atteindre une grande région de diffusion

de vortex. Cette dimension est la meilleure solution pour un avoir un bon échange thermique voir sur la figure IV.9.

L'énergie cinétique turbulente du vortex a également été mesurée à la sortie du volume et les courbes représentées par les figures (IV.11, 12 et 13) ont été obtenues, où chaque forme représente deux courbes différentes en termes d'axe y, et cette différence est due à la présence de forces gravitationnelles.

IV.3.4 Présentation des lignes du courant

Une autre comparaison des lignes de courant et du chemin turbulent a été faite avec variation de la distance entre la sortie de la buse et la zone de collision de fluide. Les figures suivantes montrent les résultats entre différentes dimensions ($H/D=3$; 7 et 10).

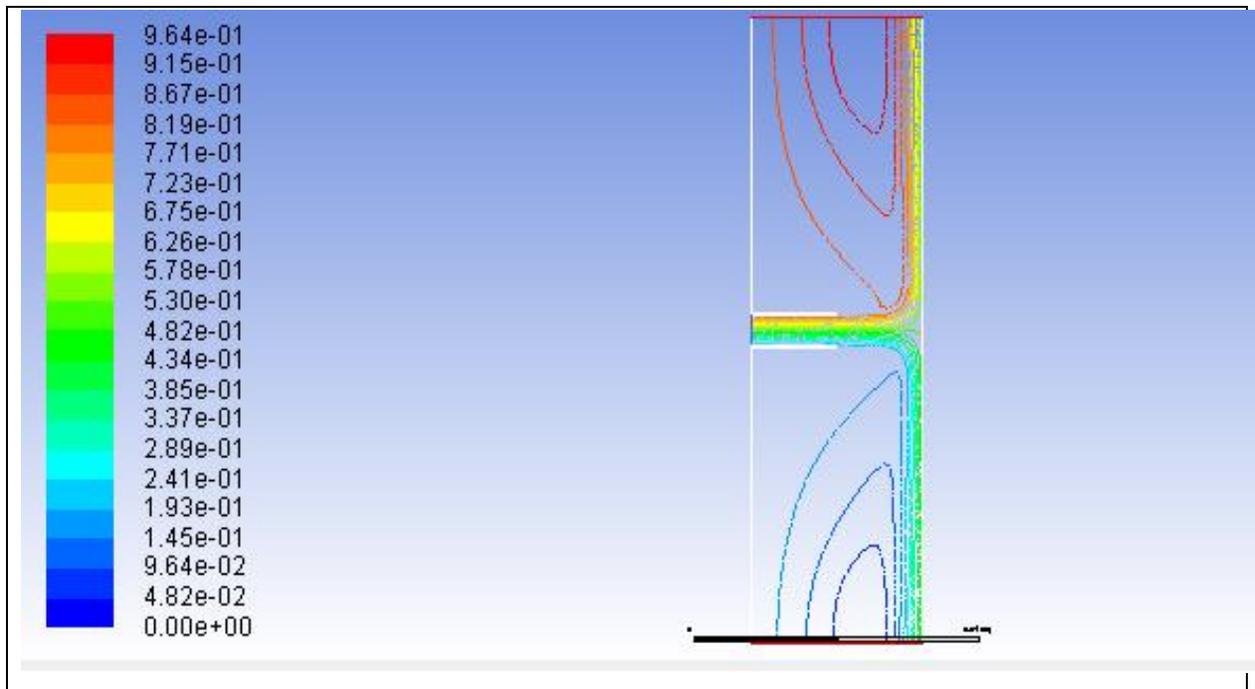


Figure IV. 20 : lignes de courant à $Re = 9,8.10^5$ pour $H/d = 3$.

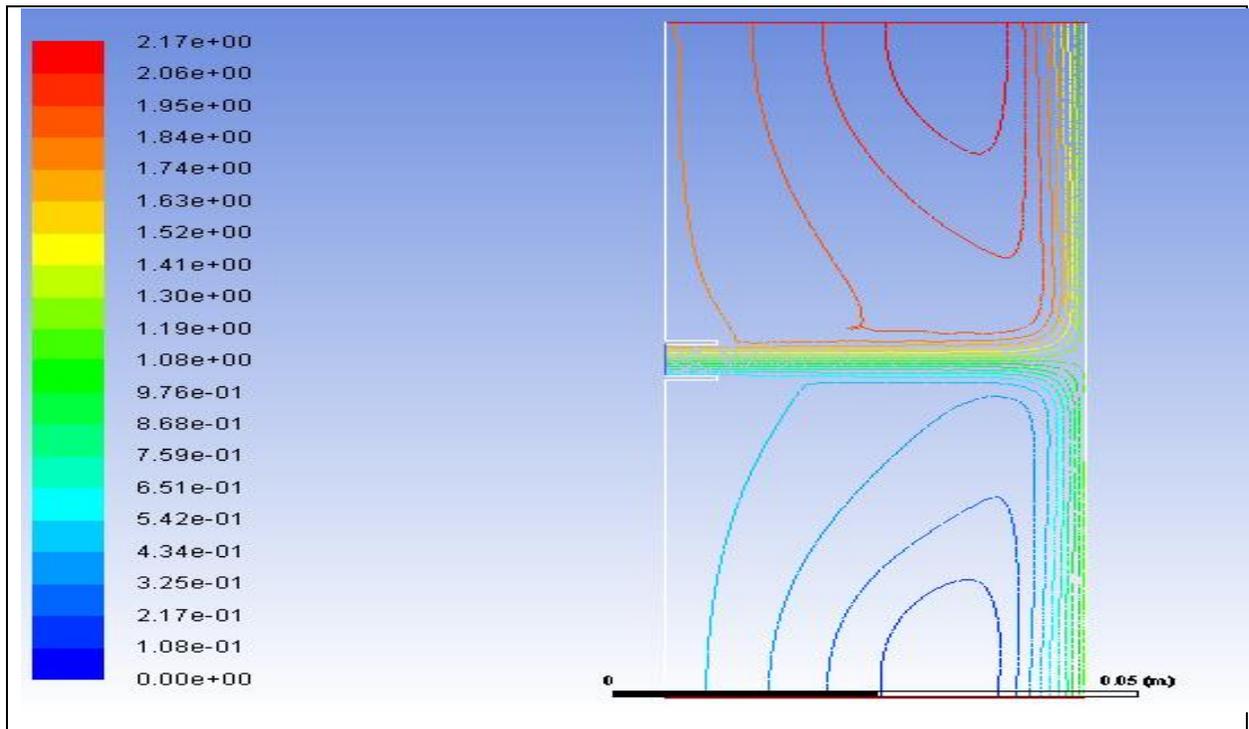


Figure IV. 21 : lignes de courant à $Re = 9,8 \cdot 10^5$ pour $H/d = 7$.

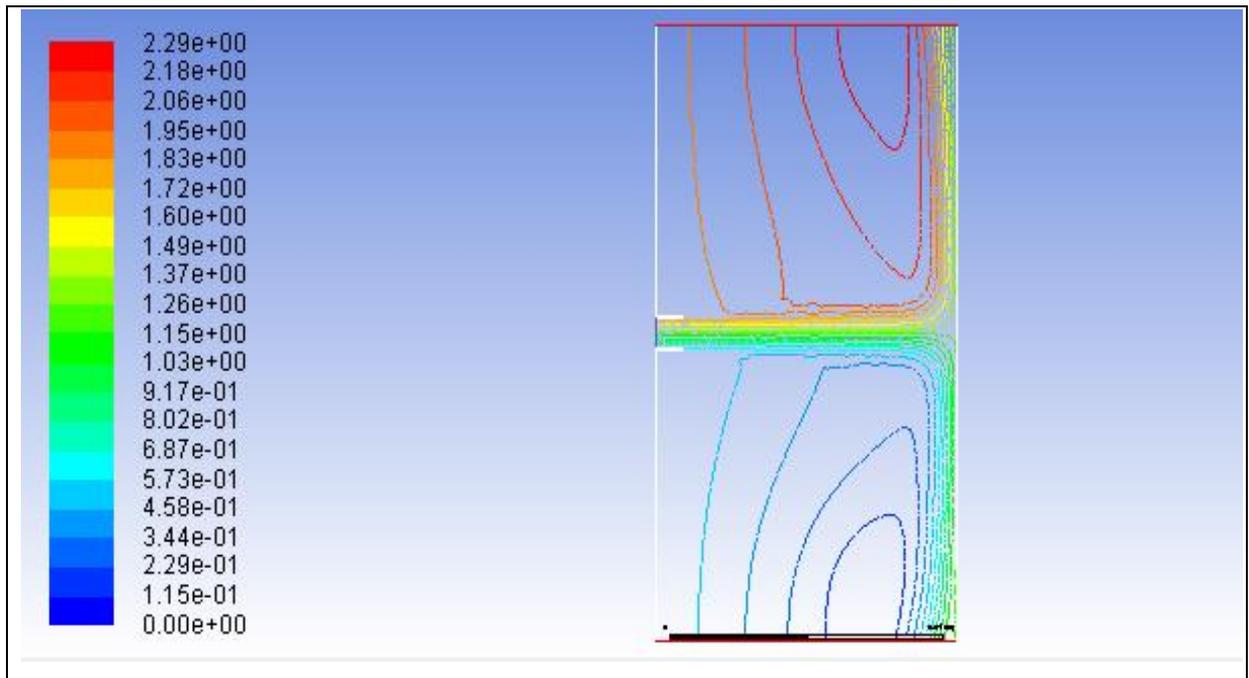


Figure IV. 22 : lignes de courant à $Re = 9,8 \cdot 10^5$ pour $H/d = 10$.

Il y a une remarque dans la figure (IV.15) qui montre que les lignes actuelles en haut sont supérieures, prenant une plus grande surface que les lignes actuelles en bas, et cela est dû à la présence de forces gravitationnelles. On signale aussi qu'aux figures (IV.14, 15 et 16) qu'arrangent ce qu'on a avancé permet de décrire le mouvement par des lignes de courant dans le domaine de calcul. Il est clairement justifié qu'au point de contact le changement de direction des lignes de courant selon la direction y . En aval du point de contact selon y , on mentionne que les lignes de courant s'éloignent un peu de la paroi et ceci est dû probablement à une flottabilité des particules qui ont ramassé une certaine énergie thermique. Ou probablement aussi, une couche limite épaisse s'étend. Cette figure met en évidence la présence de structures tourbillonnaires de forme annulaire (vortex). Elles sont produites par une dépression causée à la périphérie du jet, produisant naissance une zone de recirculation, ensuite convectées, déployées et déformées pour se dissiper finalement.

IV.4 Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt adimensionnel qui permet de quantifier les transferts thermiques entre un fluide et une paroi.

Il représente le rapport des échanges convectifs sur les échanges conductifs et est défini comme suit :

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (IV.1)$$

Avec

h : Le coefficient d'échange thermique convective.

D : Une grandeur caractéristique.

λ : Conductivité thermique du fluide. On impose un flux thermique à la paroi avec $q = 770W/m^2$. On quantifie les échanges thermiques avec le nombre de Nusselt qui représente le rapport des échanges convectifs au sein du fluide :

$$\phi = h(T_p - T_{réf}) \quad (IV.2)$$

h : Le coefficient d'échange de chaleur,

T_p : Température à la paroi et $T_{réf.}$ est une température de référence qui est fixé sur le jet (température d'eau).

Le nombre de Nusselt est résumé comme le nombre correspondant à l'échange de chaleur entre la surface d'impact (la surface chaude) et le liquide. Au point de stagnation, le fluide ramasse le maximum de chaleur dû à sa forte pression et aux contraintes de frottement en cette région, la figure suivante montre ceci :

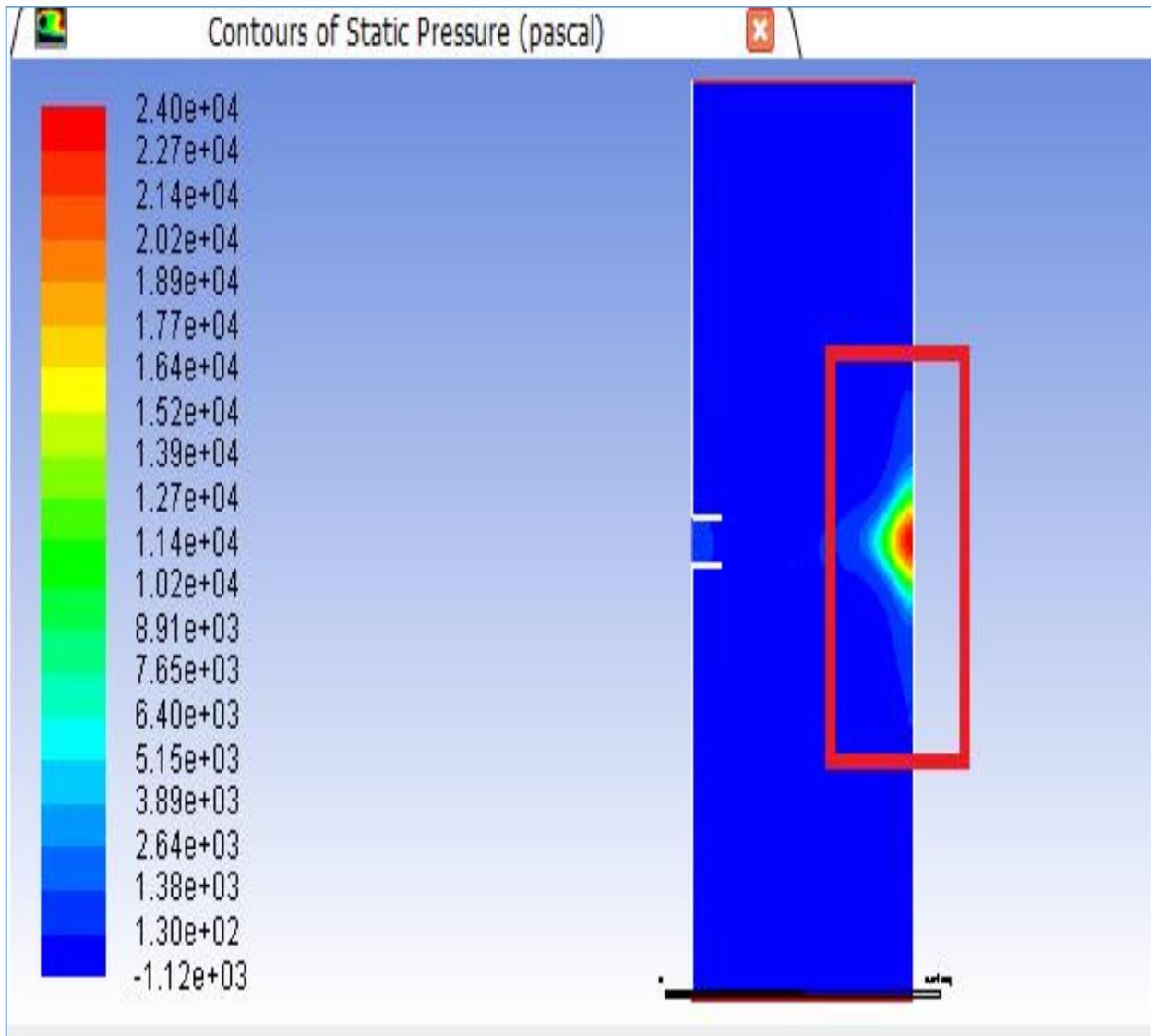


Figure IV. 23 : Iso contour de pression à $Re = 9,8.105$ pour $H/D=7$.

L'effet Nusselt commence après changer directement la direction du fluide vers l'axe y. l'effet de changement de direction provoque une bousculade élevée, donc un grand échange se produit. On peut dire ici que la meilleure solution est le rapport $H/d=7$ sensiblement le meilleur pour l'échange de chaleur, les figures (IV.18, 19 et 20) représentent les résultats et les changements de Nusselt par rapport à l'axe y.

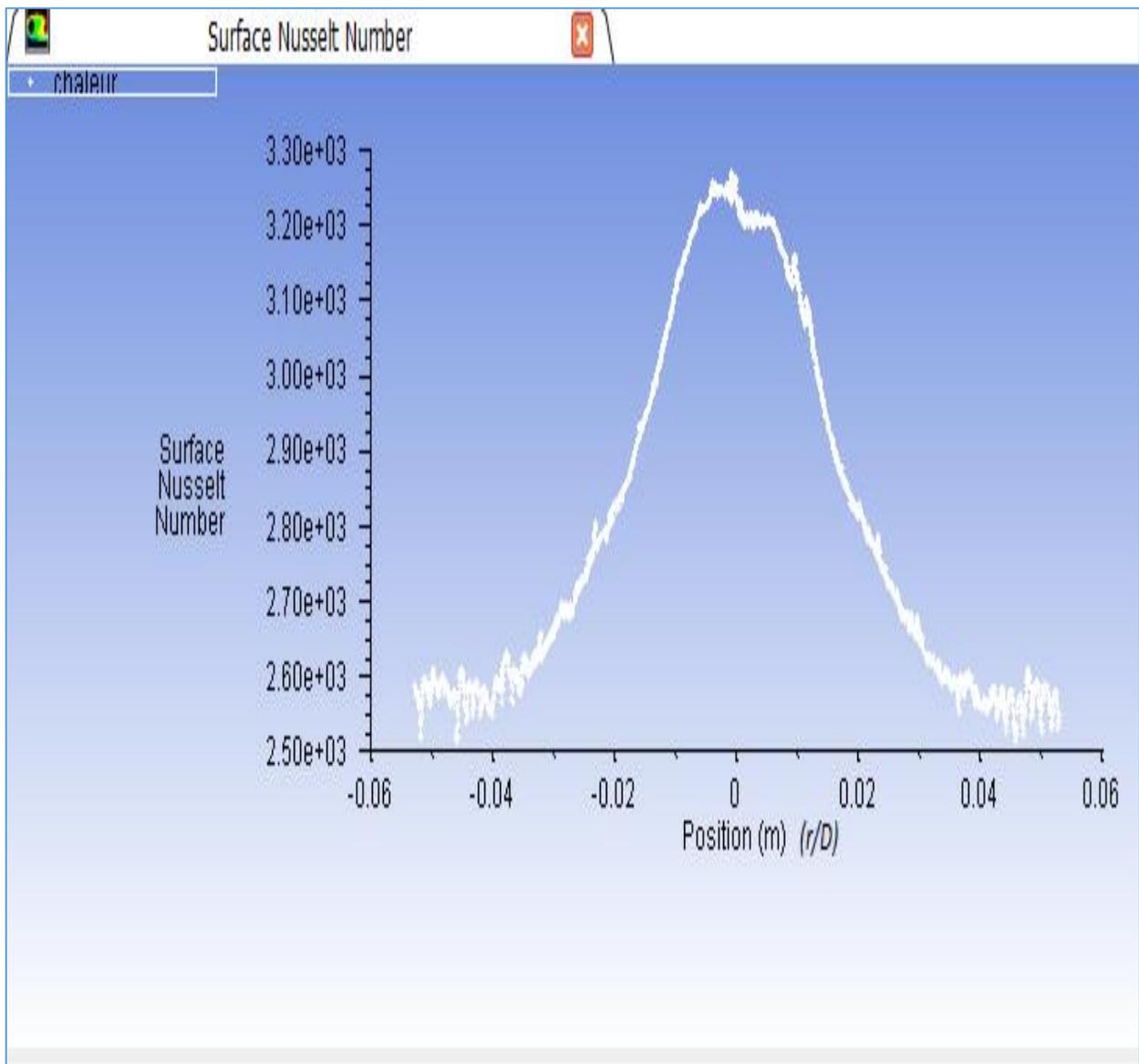


Figure IV. 24 : Variation du nombre du Nusselt pour $H/D=3$.

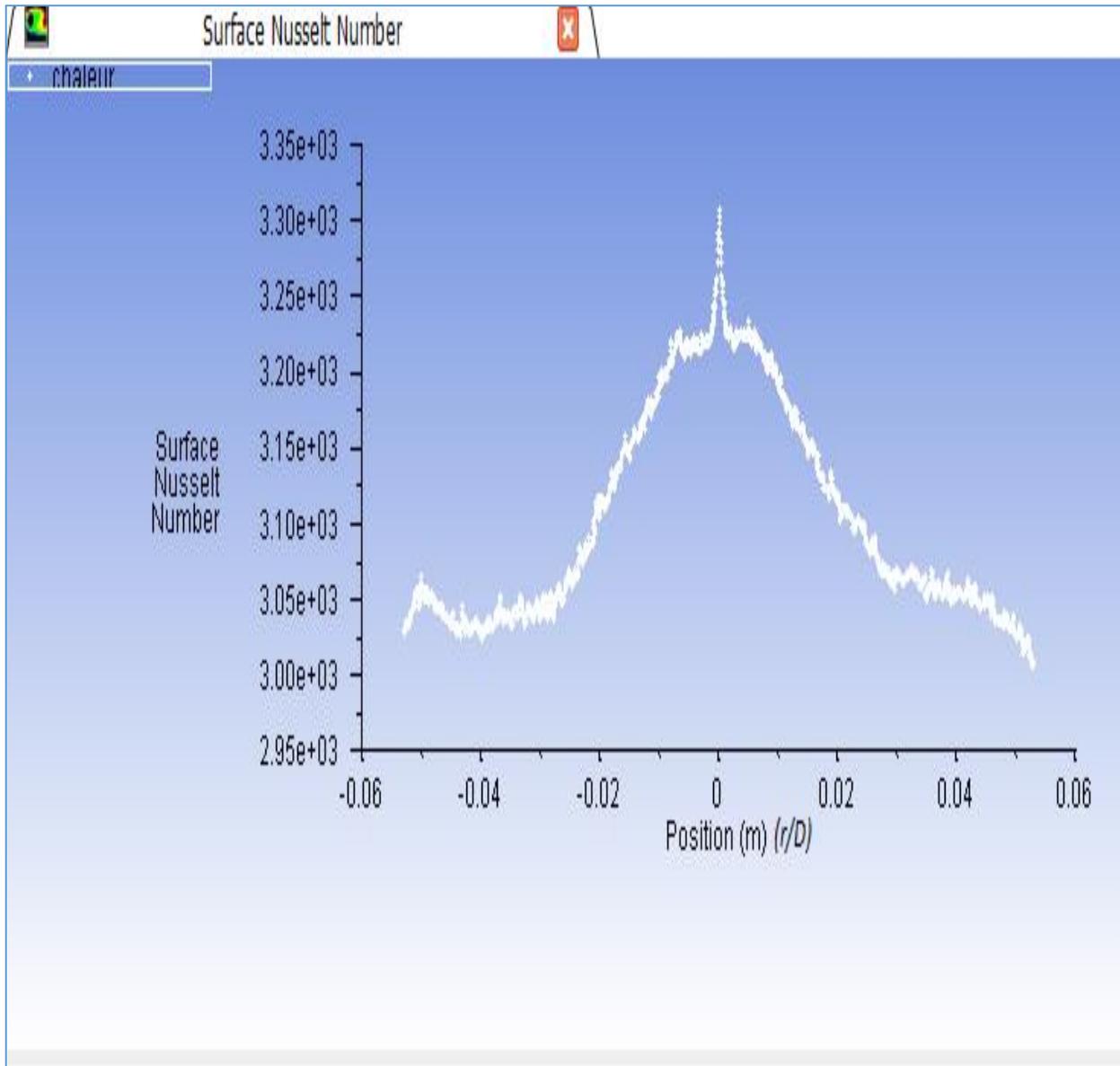


Figure IV. 25 : Variation du nombre du Nusselt pour H/D=7.

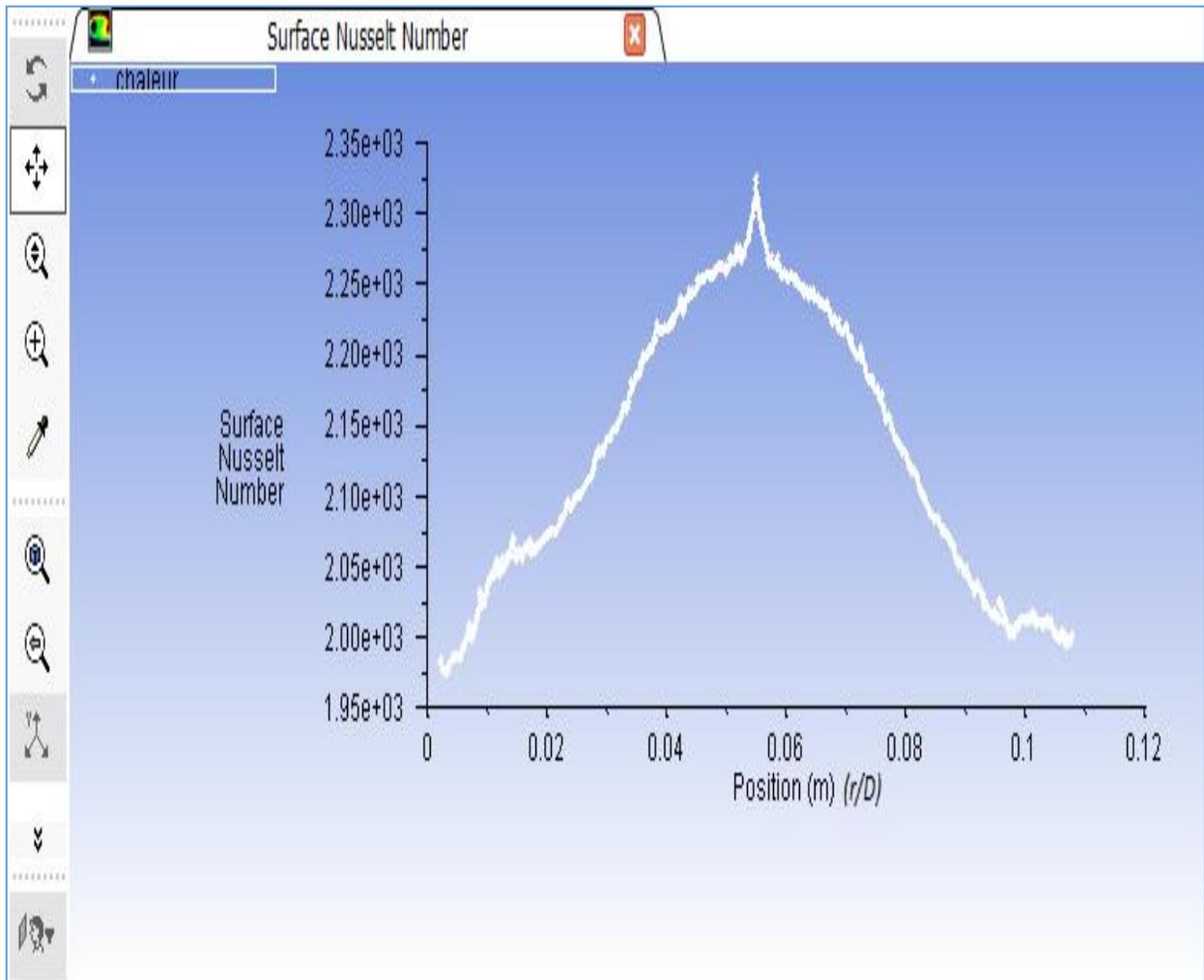


Figure IV. 26 : Variation du nombre du Nusselt pour H/D=10.

IV.5 Conclusion

A travers ce chapitre on a essayé d'incarner le traitement du phénomène en question avec le logiciel de calcul ANSYSWORKBENCH Fluent

Le traitement du problème avec ce logiciel passe par deux grands volets :

- Volet création de la géométrie et génération du maillage
- Volet résolution à travers fluent solver et présentation des résultats graphiquement

Les résultats ainsi obtenus seront exploités d'une façon adéquate afin de porter une discussion qualitative des phénomènes physiques enregistrés.

Conclusion générale

L'étude numérique du refroidissement d'une surface chaude placée verticalement devant un jet impactant lié à plusieurs phénomènes physiques tels que la vitesse, la température et l'énergie cinétique turbulente, les résultats obtenus dans ce mémoire ont été extraits en utilisant l'approche ANSYS basée sur le modèle de perturbation $k-\varepsilon$ à partir de données expérimentales avec les mêmes conditions et la présence d'une différence dans les configurations (le rapport $H/D=3,7$ et 10).

D'autres parts, les résultats obtenus sont cohérents avec d'autres travaux effectués dans le domaine du refroidissement par le système des jets impactant en écoulement turbulent et avec la théorie, ce qui valide en partie notre méthode de calcul [24], [38] et [39].

- [1]: **PIERRE GRENSON^{1*}, PHILIPPE REULET¹, BERTRAND AUPOIX¹** .“Étude expérimentale aérodynamique et thermique d’un jet rond chauffé impactant une paroi plane”. May 2016.
- [2] : **HAMMAMI AZZEDDINE**“Etude numérique d’un jet impactant un cylindre en rotation autour de son axe de symétrie avec et sans décalage de l’axe du jet par rapport à celui du cylindre avec transfert de chaleur”.
- [3]: **AOUCHICHE ABDENASSER** et **HADDADI ALI**“Etude Numerique Du Refroidissement D’une Plaque Chauffée Par Un Jet L’Impactant Dans Un Canal” univesité de msila, 2016.
- [4]: https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique.(site web consulté le 12/02/2020).
- [5]: <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/>. (site web consulté le 12/02/2020).
- [6]: Institut numérique.<https://www.institut-numerique.org/chapitre-ii-transfert-de-chaleur-51835722d7d9b>. (site web consulté le 19/02/2020).
- [7] : Le garrec, <http://www.legarrec.com/entreprise/transfert-thermique-definition/>.(site web consulté 22/03/2020).
- [8]: **KHIDER FATMA ZOHRA** et **BAKHTI FATMA ZOHRA** “Amélioration de la convection mixte en utilisant des ailettes cylindriques avec des ouvertures au niveau de la base” espace..univ.msila ; en 2016.
- [9] : **PAUL E. DIMOTAKIS, RICHARD C; MIAKE-LYE, ^{B)} AND DIMITRIS A. PAPANTONIOU**“ Structure and dynamics of round turbulent jets”, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125 (received 2 december 1982; accepted 18 july 1983) .
- [10]:**MARCEL LESIEUR**“La turbulence dans l’environnement et en aéronautique”, Professeur à l’INPG ENSHMG, La Houille Blanche, N°5-6 (Août 1994), pp. 100-109, Société Hydrotechnique de France, 194.
- [11] : **LIEPMANN, H.W.** “Aspects of the turbulence problem”. *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)* 3, 407–426 (November 1952).

- [12] : **A. A. TOWNSEND** "The Structure of Turbulent Shear Flow", Cambridge University Press, 1956.
- [13] : **BROWN, GARRY L. AND ROSHKO** "On density effects and large structure in turbulent mixing layers", *Anatol (1974) On density effects and large structure in turbulent mixing layers*. Journal of Fluid Mechanics, 64 (4). pp. 775-816. ISSN 0022-1120 California Institute of Technology (Received 15 January 1974).
- [14]: **DANIEL THIBAUT** "Etude du refroidissement par impact de jets à travers une paroi mince et avec un écoulement cisailant amont - application aux aubes de turbines-" .HAL Archives-ouverts.fr , 2010.
- [15] : **RADY M., ARQUIS E.**, "Heat transfer enhancement of multiple impinging slat jets with symmetric exhaust ports and confinement surface protrusion", Applied Thermal Engineering, 26, 1310-1319, 2005
- [16]: **DING R., REVSTEDT J, FUCHS L** "LIF study of mixing in circular impinging jets" - effects of boundary conditions. Proceedings of PSFVIP-4, June 3-5, Chamonix (FRA) 2003.
- [17] : **Y ZHENG, S KIIL, JE JOHANSSON** "pilot scale jet bubbling reactor for wet flue gas desulphurisation" - Chemical Engineering Science, 2003 Elsevier.
- [18] : **ABRAMOVICH. MASSACHUSETTS** "The Theory of Turbulent Jets" G. N. Institute of Tech. Press, Cambridge, Massachusetts. 1963.
- [19] : **J. KATAOKA et al** "Multiwavelength Observations of the Powerful γ -ray Quasar PKS 1510-089: Clues on the Jet Composition", Accepted by ApJ, september 2007 .
- [20] : **GUILLARD F., FRITZON R.; REVSTEDT J., ALDEN M.** "Mixing in a confined turbulent impinging jet using Planar laser"-induced fluorescence. Exp. Fluids 25 (2) : 143-150.
1998
- [21] : **M. FAIRWEATHER & G. HARGRAVE** "Experimental investigation of an axisymmetric, impinging turbulent jet. 2. Scalar field", October 2002 .

- [22]: **MOHAMED EL BACHIR HICHER**“Etude numérique d’un jet impactant sur une paroi plane”univ de biskra, en 2019.
- [23]: **BENMAMMAR LYDIA, BENYAHAI DAUD**“Etude numérique de l’écoulement de couche limite induit par un jet impactant sur une paroi verticale chauffée”univ de bejaia, en 2017
- [24]: **P. MARTY**“Le Refroidissement par Jets Fluides” Bilan des Recherches et Applications Récentesn, Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique (2001) 193-200 . Equipe LEGI-GRETh, CEA-Grenoble, 17 Av. des Martyrs, 38054 Grenoble cedex 9, France . en 2001.
- [25] : **LEE J. and LEE S-J.**,“The Effect of Nozzle Configuration on Stagnation Region Heat Transfer Enhancement of Axisymmetric Jet Impingement”, Int. J. Heat and Mass Transf., Vol. 43, pp. 3497-3509, 2000b.
- [26]: **MATHIEU FREGEAU** “Étude Et Simulation De La Formation De Glace Sur Aéronefs Et Modélisation De Systèmes Antigivrants” Université De Montréal. 2004.
- [27]: Laviation.fr <https://www.lavionnaire.fr/PhenomGivrage.php#GivreDef> , (site web consulté le 24/05/2020).
- [28]: **FRANCOIS MORENCY**et**SALEH YAKHYA**“technique de jet impactant pour le dégivrage au sol” ctualité scientifique et innovation de l’ets ,”13 OCT 2016” | Article de recherche | AÉROSPATIALE.
- [29]: **FABIEN CANDELIER, ZAKARIA GHRAB, PHILIPPE CAMINAT ET PHILIPPE BOURNOT** “Etude d’un jet impactant une plaque chauffée : décollement de la couche limite thermique et cinématique”. UNIMECA – IM2, 60 rue Joliot Curie, Technopôle de Château Gombert, 13 013 Marseille .
- [30] : F. **ZIDOUNI KENDIL**¹ et A. **MATAOUI**² “Simulation numérique du transfert thermique d’un jet rond impactant une cavité cylindrique” Revue des Energies Renouvelables CER’07 Oujda (2007) 259 – 264 .
- [31]:**ROUX, S., L. E. BRIZZI, AND EVA DORIGNAC.** "Dynamique d'un jet rond impactant une paroi contraint par un forçage acoustique." 19ème Congrès Français de Mécanique. 2009.

- [32]:**SLIMANI, MOHAMED**“modélisation numérique d’un multi-jet turbulent libre”en 2011.
- [33] :**DAIRAY, THIBAUT, et al.** "Simulations numériques directes d'un jet impactant." *20ème Congrès Français de Mécanique, 28 août/2 sept. 2011-25044, Besançon, France (FR)* (2011).
- [34] :**FRANCIS, SHUM-KIVAN**, “ Simulation numérique des grandes échelles de jets impactant “Dans le cadre d’un stage de fin d’études au sein du département CFD du CERFACS en 2013(Période : 11/02/2013 au 11/08/2013) .
- [35]: **STEPHANE, ABIDE^{1*}, STEPHANE VIAZZO² , CAMILLE SOLLIEC³**“Simulation numérique du refroidissement d’une plaque plane par un jet plan impactant” en 2005.
- [36] **HALOUANEYACINE** “ contribution à l’étude de l’interaction d’un jet axisymétrique avec une cavité cylindrique chauffée “ en vue de l’obtention du diplôme de DOCTORAT, en 2014.
- [37] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_de_courant . (site web consulté le 07/09/2020).
- [38] **A. ALIOUALI¹, K.TALBI², M. KADJA³**”Evolution D'un Jet Plan Laminaire, Non Confine, Impactant Une Surface Plane Chauffée.”, Laboratory of Applied Energetic and Pollution, Mechanical Engineering Department University Frères Mentouri Constantine 1, October 30-31, 2016, Constantine, Algeria .
- [39] ONERA,”Comparaison calculs/expériences sur le refroidissement par impact de jets subsoniques”, Office National d’Études et de Recherches Aérospatiales www.onera.fr, mars 2006.