

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installations énergétiques et turbomachines

Par :

ABDELLI Issam

RAHMOUNI Rabah

Thème

Etude de l'écoulement de stokes autour d'un cylindre chauffé

Soutenu : juin 2023. Devant le jury composé de :

Mr. M. ALLOUCHE

Président

Mr. F. NAIT BOUDA

Rapporteur

Mr. S. MOULOU

Examineur

Année Universitaire 2022-2023

Remerciement

Nous remercions d'abord « الله », qui nous a aidés et nous a donné le courage, la patience et la santé au cours de notre travail. C'est grâce à lui que nous avons accompli ce travail malgré tous les obstacles. Nous tenons également à remercier chaleureusement nos chers parents qui sont toujours à nos côtés.

Nous devons également remercier notre encadrant, M. NAIT BOUDA Faïçal, qui a contribué à l'élaboration de ce modeste travail. Ses conseils, ses critiques constructives et sa disponibilité nous ont permis d'approfondir nos connaissances et de les développer.

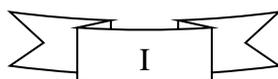
Nous adressons également nos plus sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté de juger et d'examiner notre travail.

Nos remerciements vont également à M. I. Sofiane, qui nous a apporté une aide précieuse.

Nous remercions également tous nos enseignants pour leurs efforts, ainsi que les responsables pédagogiques. Enfin, nous remercions tous nos amis A vous tous on

vous dit :

« MERCI ».



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en premier lieu à ma mère et mon père en témoignage de ma reconnaissance envers le soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'ils ont fait pour mon éducation ainsi que ma formation.

Je le dédie également à :

Mes chers frères et chères sœurs

Aux enfants de mes sœurs Izem, Ghiwane et Sarah.

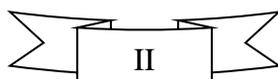
L'ensemble de mes ami(e)s,

Mon binôme Rabah,

Tous ceux qui ont une relation de près ou de loin avec la réalisation du présent mémoire, je vous dis :

« MERCI ».

A. ISSAM



Dédicaces

Je souhaite humblement dédier ce travail à :

Mon idéal, à cette personne qui est la source de mon bonheur et qui s'est toujours sacrifiée pour me voir réussir.

Toi, mon cher père, qui es la personne la plus importante à mes yeux, et à toi, ma mère, qui représente la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, et que j'adore profondément.

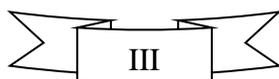
Ma famille, à qui je souhaite tout le succès possible,

Ma fiancée Chaima,

Mon binôme Issam,

Tous mes amis, qu'ils soient proches ou lointains, et qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

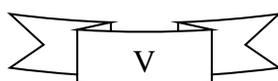
R. Rabah



Sommaire

Remerciement	I
Dedicaces	II
Sommaire	IV
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	X
NOMECLATURE	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
I. GENERALITES ET RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	3
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 REGIME LAMINAIRE	3
I.2.1 Ecoulement de stokes.....	4
I.2.1.1 Domaine d'application de l'écoulement de Stokes.....	4
I.3 CONVECTION THERMIQUE.....	5
I.3.1 Convection naturelle	5
I.3.2 Convection forcée	5
I.3.3 Convection mixte	5
I.4 NOMBRES ADIMENSIONNELS.....	6
I.4.1 Nombre de Reynolds.....	6
I.4.2 Nombre de Grashof.....	6
I.4.3 Nombre de Richardson	6
I.4.4 Nombre de Nusselt.....	7
I.5 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIE	7
II. PRESENTATION DU PROBLEME ET FORMULATION MATHEMATIQUE ET NUMERIQUE	14
II.1 INTRODUCTION	14
II.2 POSITION DU PROBLEME	14
II.3 ÉQUATIONS GENERALES DU MOUVEMENT.....	15
II.3.1 Equation de continuité	15
II.3.2 Equation de la quantité de mouvement.....	15
II.3.3 Équation de la conservation d'énergie.....	16

II.3.4	Approximation de Boussinesq	16
II.4	HYPOTHESES DU PROBLEME	16
II.5	SYSTEME D'EQUATIONS RETENUES	16
II.5.1	Equation de continuité	16
II.5.2	Equation de la quantité de mouvement	16
II.5.3	Équation d'énergie	17
II.6	CONDITIONS AUX LIMITES	17
II.7	PROCEDURE NUMERIQUE	17
II.8	LOGICIEL GAMBIT	18
II.9	CONSTRUCTION DE LA GEOMETRIE	18
II.10	LE MAILLAGE	19
II.11	SOLVER FLUENT « CONFIGURATION »	20
II.12	CONCLUSION	22
III.	RESULTATS ET DISCUSSIONS	23
III.1	INTRODUCTION	23
III.2	PROPRIETES DE FLUIDE ET LES CONDITIONS AUX LIMITES UTILISEES POUR NOTRE ETUDE	23
III.3	CHOIX DU MAILLAGE	23
III.3.1	Courbe des résidus et nombre d'itérations à $\Delta T = 2$ (k)	24
III.3.2	Pression statique en fonction de x	25
III.3.3	La pression statique maximale et minimale	26
III.3.4	Conclusion du Test de convergence	27
III.4	RESULTATS DE SIMULATIONS POUR $(\Delta T) = 2$ (K)	27
III.4.1	Courbe des résidus et nombre d'itérations	27
III.4.2	La distribution des lignes et du cercle autour du cylindre dans notre système étudié	28
III.4.3	La pression statique	29
III.4.3.1	Lignes placées sous le cylindre	29
III.4.3.2	Lignes placées au-dessus du cylindre	30
III.4.3.3	La pression statique autour du cylindre	31
III.4.4	Les profils de vitesse V_y	32
III.4.4.1	Lignes placées sous le cylindre	32
III.4.4.2	Lignes placées au-dessus du cylindre	33
III.4.4.3	Le profil de vitesse V_y autour du cylindre	34
III.4.5	Les profils de vitesse V_x	35



III.4.5.1 Lignes placées sous le cylindre	35
III.4.5.2 Lignes placées au-dessus du cylindre	36
III.4.6 La température statique	37
III.4.6.1 Lignes placées sous le cylindre	38
III.4.6.2 Lignes placées au-dessus du cylindre	39
III.4.6.3 La température statique autour du cylindre	40
III.4.7 Nombre de Nusselt autour du cylindre.....	40
III.4.8 Les profils de vitesse V_y et V_x a le long de la ligne $x=0.3$	41
III.5 RESULTATS DE SIMULATIONS POUR $\Delta T = 5$ (K).....	42
III.5.1 Courbe des résidus et nombre d'itérations	42
III.5.2 La pression statique en fonction de x	43
III.5.3 La pression statique autour du cylindre.....	44
III.5.4 Les profils de vitesse V_y en fonction de x	44
III.5.5 Le profil de vitesse V_y autour du cylindre	45
III.5.6 Les profils de vitesses V_x en fonction de x	46
III.5.7 La température statique en fonction de x	47
III.5.8 La température statique autour du cylindre.....	48
III.5.9 Nombre de Nusselt autour du cylindre.....	48
III.6 CALCUL DE (PRESSION, VITESSE, TEMPERATURE ET NOMBRE DE NUSSELT MINIMUM, MOYENNE ET MAXIMUM) A DIFFERENTES VALEURS DE (ΔT)	49
III.6.1 Pression statique (Pa) en fonction de ΔT (k).....	49
III.6.2 Vitesse V_y (m/s) en fonction de ΔT (k)	49
III.6.3 Température statique (K) en fonction de ΔT (k).....	49
III.6.4 Nombre de Nusselt autour du cylindre en fonction de ΔT (k)	50
III.7 COMMENTAIRES ET DISCUSSION	50
III.7.1 Pression statique, profil de vitesse et température en fonction de x	50
III.7.2 Profile de vitesse V_x en fonction de x	51
III.7.3 Nombre de Nusselt autour du cylindre.....	51
III.7.4 Les profils de vitesse V_x et V_y a le long de la ligne $x = 0.3$	52
III.7.5 Les variations de pression statique et de vitesse V_y en fonction de ΔT (k).....	52
III.7.6 Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du ΔT (k)	52
III.8 CONCLUSION	52
CONCLUSION GENERALE	54
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	55

Liste des figures

Figure I.1 : Ecoulement laminaire autour d'un cylindre [4]	3
Figure I.2 : Visualisation de l'écoulement rampant autour du cylindre ; Régime stationnaire décollé, K. Talbi (2010) [7]	4
Figure I.3 : Ecoulement rampant à $Re = 0.16$, d'après Van Dyke (1982), visualisation : S. Taneda (1980) [7].....	4
Figure II.1 : Géométrie du problème	15
Figure II.2 : Géométrie du problème représenté sur logiciel gambit.....	18
Figure II.3 : Détail du maillage (15x120).....	19
Figure II.4 : Détail du maillage (20x150).....	20
Figure II.5 : Choix de l'écoulement bidimensionnel (planar)	21
Figure II.6 : Choix des conditions aux limites pour l'intervalle étudié.	22
Figure III.1 : Evolutions des résidus Pour $n=15$ $m=120$	24
Figure III.2 : Evolutions des résidus Pour $n=20$ $m=150$	24
Figure III.3 : La pression statique en fonction de x à la ligne $y = 3.1$ placée au-dessus du cylindre	25
Figure III.4 : La pression statique en fonction de x à la ligne $y=3.1$ placée au-dessus du cylindre ..	25
Figure III.5 : La pression statique maximale et minimale Pour le maillage $n=15$, $m=120$	26
Figure III.6 : La pression statique maximale et minimale Pour le maillage $n=20$, $m=150$	26
Figure III.7 : Evolutions des résidus Pour le maillage $n=20$ $m=150$	27
Figure III.8 : La distribution des lignes afin de calculer la pression, de vitesse V_y , ainsi que de la température sous et au-dessus du cylindre	28
Figure III.9 : point de départ et la direction de calcul de la pression, la vitesse V_y et la température statique le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm autour de l'axe du cylindre	28
Figure III.10 : la distribution de pression statique autour du cylindre	29
Figure III.11 : Pression statique en fonction de x à la ligne $y=2.5$	29
Figure III.12 : Pression statique en fonction de x à la ligne $y = 2.9$	30
Figure III.13 : Pression statique en fonction de x à la ligne $y=3.1$	30
Figure III.14 : Pression statique en fonction de x à la ligne $y=3.4$	31
Figure III.15 : La pression statique autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm....	31
Figure III.16 : la distribution des profils de vitesse V_y autour du cylindre.....	32
Figure III.17 : Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=2.5$	32
Figure III.18 : Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=2.9$	33

Figure III.19: Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=3.1$	33
Figure III.20: Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=3.4$	34
Figure III.21: Le profil de vitesse V_y autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm	34
Figure III.22: la distribution des profils de vitesse V_x autour du cylindre.....	35
Figure III.23: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=2.2$	35
Figure III.24: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=2.9$	36
Figure III.25: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=3.1$	36
Figure III.26: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=4$	37
Figure III.27: la distribution de température statique autour du cylindre.....	37
Figure III.28: Température statique en fonction de x à la ligne $y=2.9$	38
Figure III.29: Température statique en fonction de x à la ligne $y=2.94$	38
Figure III.30: Température statique en fonction de x à la ligne $y=3.06$	39
Figure III.31: Température statique en fonction de x à la ligne $y=3.3$	39
Figure III.32: La température statique autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm	40
Figure III.33: Les contours de surface, le point de départ et la direction de calcul du nombre de Nusselt autour du cylindre.....	40
Figure III.34: Nombre de Nusselt autour du cylindre. (curve length).....	41
Figure III.35: la ligne $x=0.3$	41
Figure III.36: Les profils de vitesse V_x et V_y a le long de la ligne $x = 0.3$ placée à droite du cylindre.....	42
Figure III.37: Evolutions des résidus Pour le maillage $n=20$ $m=150$	42
Figure III.38: Pression statique en fonction de x à la ligne $y=2.9$ cm placée sous le cylindre.....	43
Figure III.39: Pression statique en fonction de x à la ligne $y=3.1$ cm placée au-dessus du cylindre	43
Figure III.40: La pression statique autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm....	44
Figure III.41: Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=2.9$ cm placée sous le cylindre	44
Figure III.42: Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=3.1$ cm placée au-dessus du cylindre.....	45
Figure III.43: Le profil de vitesse V_y autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm	45
Figure III.44: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=2.9$ cm placée sous le cylindre	46

Figure III.45: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=3.1$ cm placée au-dessus du cylindre.....	46
Figure III.46: Température statique en fonction de x à la ligne $y=2.94$ cm placée sous le cylindre.....	47
Figure III.47: Température statique en fonction de x à la ligne $y=3.06$ cm placée au-dessus du cylindre.....	47
Figure III.48: La température statique autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm	48
Figure III.49: Nombre de Nusselt autour du cylindre (curve length).....	48
Figure III.50: Variation du nombre de Nusselt moyen autour du cylindre en fonction de ΔT (k)...	50

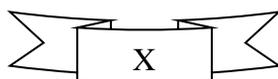
Liste des tableaux

Tableau III.1: Pression statique minimum, moyenne et maximum (Pa) en fonction de ΔT (k)49

Tableau III.2: la vitesse V_y minimum, moyenne et maximum (m/s) en fonction de ΔT (k).....49

Tableau III.3: température statique minimum, moyenne et maximum (k) en fonction de ΔT (k)...49

Tableau III.4: nombre de Nusselt minimum, moyenne et maximum autour du cylindre en fonction de ΔT (k)50



NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unite (SI)
----------	------------	------------

Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds	-
Fr	Nombre de Froude	-
Gr	Nombre de Grashof	-
Ri	Nombre de Richrdson	-

Lettres latines

Symboles	Dénominations	
----------	---------------	--

D	Diamètre	[m]
H	Hauteur de canal	[m]
ΔT	Différence de température entre la sphère et le fluide	[k]
T	Température	[k]
T_s	Température de la sphère	[k]
T_∞	Température de fluide	[k]
V	Vitesse caractéristique	[m. s ⁻¹]
V_∞	Vitesse d'entrée	[m. s ⁻¹]
V_{\min}	Vitesse minimale	[m. s ⁻¹]
V_{moy}	Vitesse moyenne	[m. s ⁻¹]
V_{\max}	Vitesse maximale	[m. s ⁻¹]
U	Vitesse d'écoulement	[m. s ⁻¹]
L	Longueur caractéristique	[m]
g	Accélération de la pesanteur	[m. s ⁻²]
h.	Coefficient de transfert par convection	[W. m ⁻² . K ⁻¹]

u, v,	Composante des vitesses suivant x et y	[m. s ⁻¹]
x, y	Coordonnée cartésienne	-
t	Temps	[s]
C _p	La chaleur spécifique du fluide à pression constante	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
P	pression	[Pa]

Symboles graces

v	La viscosité cinématique	[m ² . S ⁻¹]
β	Coefficient de dilatation thermique	[K ⁻¹]
λ	Conductivité thermique du fluide	[W. m ⁻¹ K ⁻¹]
ρ	Masse volumique	[Kg. m ⁻³]
ρ ₀	Masse volumique de référence	[Kg. m ⁻³]
μ	Viscosité dynamique	[Kg. m ⁻¹ .s ⁻¹]
α	Diffusivité thermique	[m ² .s ⁻¹]

Introduction générale

Introduction générale

La compréhension des écoulements de fluides autour d'objets solides revêt une grande importance dans de nombreux domaines scientifiques et techniques. L'étude des phénomènes de convection thermique associés à ces écoulements est particulièrement pertinente pour des applications allant du refroidissement de composants électroniques à la modélisation des transferts de chaleur dans des processus industriels. Dans ce contexte, l'écoulement de Stokes offre une approche simplifiée pour analyser des situations où les forces d'inertie sont négligeables par rapport aux forces visqueuses.

Le phénomène de l'écoulement de Stokes tire son nom du mathématicien et physicien George Gabriel Stokes. Il décrit le comportement des fluides dans des situations où la vitesse des particules est très faible, ce qui entraîne une diffusion et une dissipation de l'énergie cinétique [1]. L'écoulement de Stokes est couramment utilisé pour étudier des phénomènes tels que la diffusion des polluants, la séparation des particules ou encore le mouvement des microorganismes dans des milieux fluides.

L'étude de l'écoulement de Stokes autour d'un cylindre chauffé peut être réalisée à l'aide de différentes méthodes, telles que l'approche analytique, la modélisation numérique et les expérimentations en laboratoire. Chaque méthode offre ses avantages et ses limites, mais toutes visent à mieux comprendre les caractéristiques de l'écoulement, telles que les profils de vitesse, les champs de température et les phénomènes de convection.

Pour atteindre cet objectif, nous utiliserons des techniques de simulation numérique avancées pour résoudre les équations de Stokes et les équations de conservation de l'énergie, en tenant compte des conditions aux limites appropriées. Ces simulations nous permettront d'obtenir des informations détaillées sur les champs de vitesse, les gradients de pression, les distributions de température et les flux de chaleur associés à cet écoulement particulier.

Tout d'abord, l'écoulement est essentiellement stationnaire, ce qui signifie que les propriétés de l'écoulement ne changent pas avec le temps. De plus, l'écoulement est symétrique par rapport au cylindre et il est régi par des équations de conservation telles que l'équation de continuité, l'équation de Navier-Stokes et l'équation de conservation d'énergie simplifiée pour le régime de Stokes.

Dans le cadre du présent travail, nous nous intéressons à l'étude d'un écoulement de Stokes autour d'un cylindre chauffé. L'étude porte sur le comportement de l'écoulement du fluide et l'influence des différents paramètres dynamiques et géométriques.

Ce mémoire est structuré en plusieurs parties, comprenant une introduction générale, trois chapitres, une conclusion générale. Le premier chapitre examine les notions générales et propose une

revue bibliographique des travaux antérieurs qui ont abordé le thème traité. Le deuxième chapitre présente la description du modèle physique, le modèle mathématique adopté et les conditions aux limites correspondantes. Enfin, le troisième chapitre se concentre sur la validation du modèle adopté et l'interprétation des résultats obtenus à partir des simulations réalisées.

Chapitre I

Généralités et recherches

Bibliographiques

I. Généralités et recherches Bibliographiques

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'écoulement de Stokes qui se produit autour d'un cylindre chauffé. Nous abordons les aspects théoriques, les modèles et les paramètres clés qui caractérisent cet écoulement.

Pour mener à bien cette étude, nous avons effectué une recherche bibliographique approfondie sur le sujet. Nous avons examiné des articles scientifiques, des publications spécialisées, des ouvrages de référence et des thèses pertinentes qui ont abordé l'écoulement de Stokes autour d'un cylindre chauffé.

I.2 Régime laminaire

L'écoulement laminaire se caractérise par un mouvement régulier des particules, créant l'impression que le fluide est constitué de couches glissant en parallèle. Dans cette configuration, les forces visqueuses l'emportent sur les effets d'inertie qui provoquent la turbulence. Par conséquent, les échanges de masse entre les couches se limitent principalement à l'échelle microscopique, entraînant une faible possibilité de mélange significatif.[2]

Ce phénomène se produit lorsque les fluides présentent une viscosité élevée, une vitesse moyenne relativement basse et circulent à travers des conduites de petite taille. Les particules de fluide suivent des trajectoires parallèles aux parois. De plus, la vitesse des particules passant par un point donné de l'écoulement reste constante au fil du temps.[3]

Exemple : écoulement des huiles des circuits hydrauliques industriels (vérins, etc.).

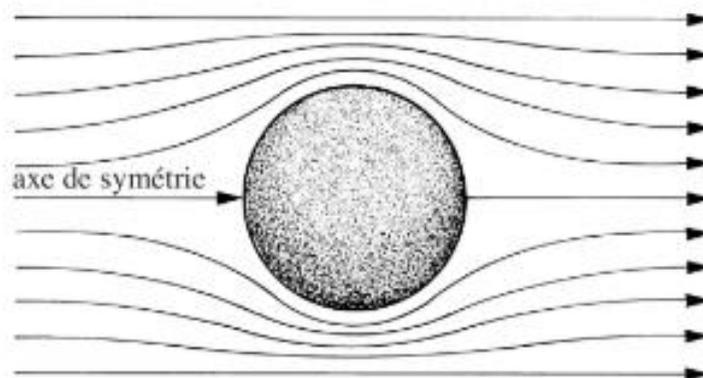


Figure I.1 : Ecoulement laminaire autour d'un cylindre [4]

I.2.1 Écoulement de Stokes

L'écoulement de Stokes, également connu sous le nom d'écoulement rampant, se produit lorsque la vitesse du fluide qui s'écoule est très faible, lorsque la viscosité des fluides est très élevée et/ou lorsque la taille des particules est petite.[5] Dans l'écoulement de Stokes, le nombre de Reynolds est très faible ($Re \ll 1$), ce qui signifie que les effets d'inertie peuvent être négligés par rapport à la résistance visqueuse.[6]

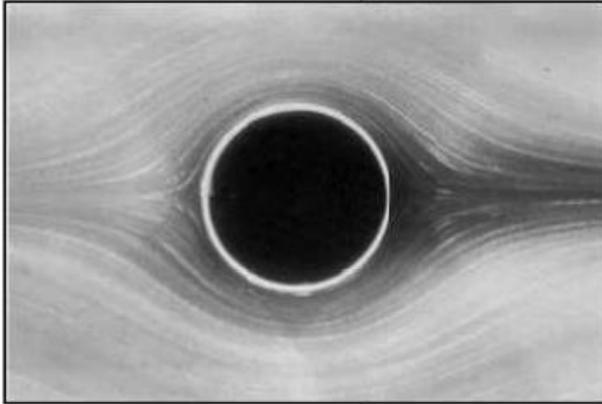


Figure I.3: Écoulement rampant à $Re = 0.16$, d'après Van Dyke (1982), visualisation : S. Taneda (1980) [7]

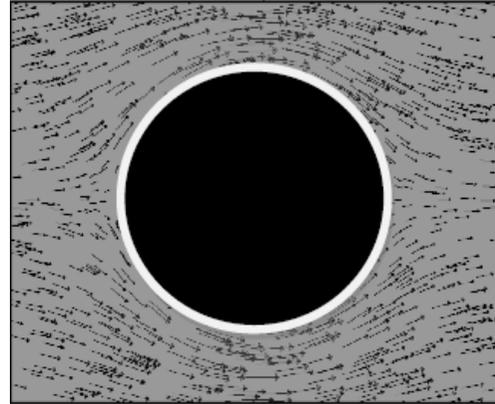


Figure I.2: Visualisation de l'écoulement rampant autour du cylindre ; Régime stationnaire décollé, K. Talbi (2010) [7]

I.2.1.1 Domaine d'application de l'écoulement de Stokes

Le domaine d'application de l'écoulement de Stokes est très vaste. Les équations de Stokes sont utilisées dans de nombreux domaines scientifiques et techniques pour modéliser le mouvement des fluides visqueux à faible vitesse, voici quelques exemples :

I.2.1.1.1 Biologie

L'écoulement de Stokes en biologie cellulaire étudie les mouvements des cellules dans des environnements visqueux, comme les tissus biologiques et les microorganismes. Il permet de comprendre la locomotion, les interactions et les échanges de substances cellulaires. Il modélise également le mouvement des fluides dans les cellules sanguines,[15] les cellules ciliées, les flagelles, les vaisseaux sanguins et les voies respiratoires, [16] y compris la locomotion des microorganismes et le mouvement du mucus dans les poumons. [17]

I.2.1.1.2 Géophysique

L'écoulement de Stokes est utilisé pour représenter le déplacement des fluides dans les glaciers, les rivières et les écoulements en milieu poreux. Il est également appliqué pour modéliser le

mouvement des plaques tectoniques dans la croûte terrestre et pour étudier des processus tels que l'écoulement de lave ou de glace dans une première approximation. De plus, il est utilisé pour comprendre l'écoulement du verre dans les processus de fabrication de fenêtres.[16]

I.2.1.1.3 Génie chimique

L'écoulement de Stokes est appliqué pour représenter le déplacement des liquides dans les microcanaux, les réacteurs chimiques et les colonnes de chromatographie. Les équations de Stokes sont également employées pour modéliser le mouvement des particules dans les suspensions, les flux de gaz contenant des particules et les colorants de fumée.[17]

I.3 Convection thermique

I.3.1 Convection naturelle

La convection naturelle se produit lorsque le mouvement du fluide est engendré par les différences de densité entre les particules chaudes et froides présentes dans un fluide, placé dans un champ de forces gravitationnelles. Cette disparité de densité, généralement due à une différence de température, combinée à la force gravitationnelle, crée une force de flottabilité qui, à son tour, engendre une différence de quantité de mouvement.[8]

I.3.2 Convection forcée

La convection est considérée comme forcée lorsque le mouvement du fluide est induit par une force externe. Dans des conditions naturelles, la convection forcée est causée par le vent, qui résulte lui-même du gradient local de la pression atmosphérique. Bien que le fluide échange de la chaleur avec les parois, son mouvement est principalement influencé par des facteurs autres que les différences de température.[9] Par exemple, dans un sèche-cheveux, l'air est chauffé au contact de résistances électriques, puis il est propulsé plus loin grâce à un ventilateur.

I.3.3 Convection mixte

Lorsque les transferts de chaleur et de masse impliquent à la fois la convection naturelle et la convection forcée, on parle de convection mixte. Dans ce cas, les mouvements de l'air sont influencés à la fois par les facteurs responsables du vent et par les variations verticales de température. Ce scénario se produit fréquemment dans des conditions naturelles où la vitesse du vent est faible.[8]

I.4 Nombres adimensionnels

I.4.1 Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds (Re) est un nombre adimensionnel qui caractérise le type d'écoulement d'un fluide. Il est défini comme le rapport des forces d'inertie, qui génèrent de la turbulence, aux forces de frottement visqueux, qui favorisent un écoulement régulier. Lorsqu'il s'agit d'écoulements à travers des conduites, le nombre de Reynolds est calculé en utilisant la formule suivante :

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (I.1)$$

Avec :

U : la vitesse de l'écoulement

D : diamètre de la canalisation en

ν : viscosité cinématique

L'écoulement de Stokes correspond aux très faibles valeurs du Reynolds (inférieures à 1).

Dans une conduite cylindrique :

Si $Re < 2000$, le régime est laminaire

Si $Re > 2500$, le régime est turbulent.

Si $2000 < Re < 2500$, le régime est transitoire. [10]

I.4.2 Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof permet de définir le rapport entre les forces de poussé (Archimède) et les forces visqueuses agissant sur un fluide ; il s'exprime comme suit :

$$Gr = \frac{g\beta L^3 (\Delta T)}{\nu^2} \quad (I.2)$$

Où g est l'accélération de la pesanteur, β le coefficient de dilatation ou d'expansion thermique, ΔT la différence de température, ν viscosité dynamique.[12]

I.4.3 Nombre de Richardson

Il est également important de définir le nombre de Richardson, qui caractérise la convection dite mixte, où les phénomènes de convection naturelle et forcée sont d'ordres de grandeur similaires et donc en compétition lorsque l'écoulement se produit principalement de bas en haut. Le nombre de

Richardson est défini comme le rapport entre le nombre de Grashof et le carré du nombre de Reynolds. Il convient également de mentionner que ce nombre est le rapport entre l'énergie potentielle de gravité et l'énergie cinétique, c'est-à-dire :

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (I.3)$$

Le rapport de Gr/Re^2 détermine quel type de convection on a :

$Ri = Gr/Re^2 \ll 1$ (Convection forcée)

$Ri = Gr/Re^2 \gg 10$ (convection naturelle)

$1 \ll Ri = Gr/Re^2 \ll 10$ (Convection mixte). [13]

I.4.4 Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt, Nu, est une mesure pratique utilisée pour évaluer le coefficient d'échange le flux de chaleur par convection. Il exprime le rapport entre le flux de chaleur total transféré et le flux de chaleur transféré par conduction. Lorsqu'il s'agit d'un écoulement cylindrique, Nu peut être interprété comme le rapport entre le diamètre du tube et l'épaisseur du film de fluide dans lequel le gradient de température est concentré.[14]

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (I.4)$$

h : Coefficient de transfert par convection , D : Diamètre du tuyau , λ Conductivité thermique du fluide.

I.5 Synthèse bibliographie

Emad Esmael Habib (2020) [18] Étude numérique du transfert de chaleur par convection laminaire à partir de cylindres de différentes sections transversales. Les équations adimensionnelles de quantité de mouvement et d'énergie sont résolues par la méthode du volume fini. Effet de la section transversale et du nombre de Rayleigh sur le transfert de chaleur. Résultats : augmentation significative du transfert de chaleur avec le nombre de Rayleigh pour tous les cylindres. Le cylindre elliptique à orientation élancée présente le plus haut transfert de chaleur local et moyen

Swetava Ganguli, Sanjiva K. Lele (2020) [19] Des simulations résolues ont été utilisées pour étudier les effets du transfert de chaleur et de la flottabilité sur la traînée d'une particule sphérique chauffée à faible nombre de Reynolds dans un fluide à propriétés variables. La quantité de chaleur ajoutée par

la sphère couvre différents régimes de chauffage. La particule est uniformément chauffée et ne présente pas de gradients internes. Les nombres adimensionnels de Reynolds visqueux et inertiels Re_{bi} et Re_{bi} liés à la flottabilité sont étudiés, et les effets de l'orientation de la gravité sont examinés. On observe des variations significatives du coefficient de traînée lorsque le nombre de Froude diminue ou la température de la sphère augmente. La traînée totale dans un écoulement à faible Re en présence de flottabilité est une superposition linéaire de la traînée dans deux configurations : la convection forcée et la convection naturelle. L'effet de la variation de température sur la traînée est significatif dans les deux cas.

Vitor José das Neves Rodrigues, Jian Su (2015) [20] Dans cette étude, une simulation numérique bidimensionnelle de la convection naturelle est réalisée dans une enceinte comportant une paroi inférieure maintenue à une température constante élevée, une paroi supérieure à une température constante basse, et un cylindre chaud à l'intérieur. Cette simulation est réalisée à l'aide d'un logiciel de dynamique des fluides computationnelle (CFD), ANSYS CFX 15.0. L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'influence de la géométrie du corps, de la position du corps dans l'enceinte, des propriétés du fluide, ainsi que de la différence de température entre les parois, en utilisant les nombres de Prandtl et de Rayleigh. Des régimes d'écoulement laminaire permanent et transitoire ont été identifiés pour des nombres de Prandtl de 0,7 et 7,0, avec un nombre de Rayleigh atteignant 10^7 .

R.M. Valladaresa, P. Goldsteinb, C. Sternc, et A. Callesd (2002) [21] Ce programme simule le mouvement d'objets à travers des fluides, en se concentrant spécifiquement sur la dynamique d'une sphère de petite taille immergée dans un fluide visqueux incompressible. La sphère est soumise à plusieurs forces externes, notamment la gravité, le frottement, une force stochastique simulant les interactions microscopiques et la flottabilité. Les nombres de Reynolds sont maintenus à de faibles valeurs pour garantir un écoulement symétrique et non séparé autour de la sphère. L'analyse numérique est réalisée en résolvant l'équation du mouvement à l'aide de l'algorithme de Verlet. En plus des résultats numériques, le programme propose également une animation interactive illustrant ce phénomène physique. Bien qu'il ait été initialement développé à des fins pédagogiques, ce programme peut également être utilisé dans la recherche pour étudier le mouvement des gouttes de pluie ou des polluants dans l'atmosphère.

Fernando V. Castellões, João N.N. Quaresma, Renato M. Cotta (2010) [22] Ce travail présente une étude sur l'augmentation des échanges thermiques en combinant des écoulements à faible nombre de Reynolds avec des canaux dotés de parois ondulées. Le modèle proposé prend en compte la diffusion de chaleur axiale le long du fluide ainsi que des régions adiabatiques en amont et en aval de la section de transfert de chaleur ondulée. Il tient compte des faibles valeurs de nombres de Reynolds

(et donc de Péclet) qui sont couramment observées dans ce type de problèmes. Pour résoudre l'équation de l'énergie, une méthodologie hybride numérique-analytique est développée en utilisant la technique de transformation intégrale généralisée (TTIG) en mode de transformation partielle. Pour illustrer cette approche, un canal à plaques parallèles lisses est utilisé, mettant en évidence l'importance de la conduction thermique axiale dans le fluide. L'amélioration du transfert de chaleur est évaluée en termes de nombre de Nusselt local et de température adimensionnelle moyenne le long de la section de transfert de chaleur. L'influence des paramètres géométriques de l'ondulation et du nombre de Reynolds est également abordée.

Tania sauma Perez (2016) [23] Une étude expérimentale a examiné la dynamique d'une sphère immergée dans un écoulement visqueux en rotation. Lorsque le nombre de Reynolds est élevé, une sphère solide lisse se positionne au centre du cylindre. Cependant, à mesure que le nombre de Reynolds diminue, la sphère adopte une position excentrique d'équilibre qui ne peut être expliquée par les calculs stokesiens. Cette position est prédite avec précision par un modèle supposant un petit nombre de Reynolds fini. Lorsque le nombre de Reynolds diminue encore en dessous d'une valeur critique, la sphère commence à osciller périodiquement autour de son point fixe initial, décrivant des orbites circulaires. Pour de très faibles valeurs de Reynolds, la sphère se dépose sur un point fixe situé sur la paroi du cylindre, mais cette configuration devient instable aux oscillations verticales. Pour une sphère poreuse, un point fixe excentrique existe également, mais il est plus proche de l'axe central du cylindre par rapport au cas d'une sphère solide. La plage de stabilité de ce point fixe est plus grande que pour le cas d'une sphère solide. Enfin, l'étude des sphères présentant différentes rugosités montre qu'il n'y a pas d'effet significatif sur le point fixe excentré ou au début de l'instabilité, ce qui confirme la robustesse du point fixe.

Helen J. Wilson (2012) [24] L'article propose une approche numérique pour calculer le mouvement de trois sphères dans un fluide visqueux au repos. Cette méthode s'appuie sur la solution de Lamb pour le flux de Stokes et utilise la méthode des réflexions, offrant une grande précision malgré sa complexité numérique. Bien qu'elle soit moins efficace que les méthodes multipolaires, elle permet de traiter facilement des sphères de différentes tailles.

Les auteurs ont validé leur méthode en la comparant à des études existantes, et ont constaté qu'elle était plus précise que la dynamique stokesienne (SD), avec des erreurs significatives se produisant uniquement lorsque la séparation entre les sphères était d'environ 0,1 rayon. Ils ont ensuite présenté les résultats pour un exemple de système composé de sphères de tailles différentes. Cette méthode n'est pas adaptée à plus de trois sphères et est plus appropriée pour les problèmes de mobilité que pour les problèmes de résistance.

Mwangi Wanjiku Lucy, Mathew Ngugi Kinyanjui, Roy Phineas Kiogora (2016) [25] Cette étude analyse l'impact de la viscosité variable sur l'écoulement magnétohydrodynamique en convection naturelle autour d'une sphère chauffée. Les équations sont résolues numériquement pour différents paramètres tels que le nombre de Reynolds, le nombre de Grashof, le paramètre magnétique et le paramètre de variation visqueuse. Les résultats montrent des variations significatives dans la vitesse, la température et le transfert de chaleur du fluide. Ces découvertes sont pertinentes pour l'ingénierie, la technologie et la biomédecine.

Daoyun Song, Rakesh K. Gupta, et Rajendra P. Chhabra (2011) [26] Une étude systématique a examiné l'effet des frontières finies sur la traînée subie par une sphère rigide le long de tubes cylindriques remplis de fluides modèles de type Carreau. Les équations gouvernantes et les conditions aux limites ont été résolues numériquement pour diverses conditions, telles que le rapport de diamètre sphère-tube (0-0,5), le nombre de Reynolds (1-100), le nombre de Carreau (0,1-100) et l'indice de loi de puissance (0,2-1). L'obstruction et les changements de vitesse près de la sphère augmentent la force de traînée et retardent sa descente. L'effet des parois diminue avec une baisse de l'indice de loi et une augmentation du nombre de Carreau, ce qui amplifie l'amincissement par cisaillement. Outre l'impact sur la traînée hydrodynamique, la sévérité de la liaison avec les parois affecte les caractéristiques du sillage. Les calculs numériques concordent avec les rapports expérimentaux disponibles dans la littérature scientifique.

A.-M. DALBERT, F. PENOT et J.-L. PEUBE (1981) [27] Cette étude explore l'écoulement laminaire dans un canal vertical avec deux plaques parallèles sous différentes densités de flux thermique. Elle résout les équations d'écoulement en tenant compte de la chute de pression due à la vitesse du fluide entrant. Les résultats sont comparés à ceux d'une plaque plane et les conditions d'applicabilité des études précédentes sont définies. Les profils d'écoulement, de vitesse et de température sont donnés pour différentes asymétries de chauffage des parois, et les températures le long des parois ainsi que les nombres de Nusselt sont calculés pour caractériser le transfert de chaleur.

Ahmad Talaei, et Timothy J. Garrett (2020) [28] Cet article aborde la modélisation de l'écoulement autour d'une sphère dans un fluide visqueux et incompressible à faible nombre de Reynolds. Les auteurs ont développé une méthode basée sur une approche de séparation des variables pour obtenir une solution analytique générale aux équations de Navier-Stokes pour un écoulement bidimensionnel symétrique autour d'une sphère. Ils ont reproduit les lignes de courant et les vitesses d'écoulement près d'une sphère en mouvement, et ont identifié la position angulaire juste derrière la sphère où se produit une séparation entre un écoulement laminaire et une région stagnante. Pour générer des tourbillons autour d'une sphère se déplaçant rapidement, les auteurs ont proposé une solution obtenue à

l'aide d'une substitution de variable qui ne nécessite pas la séparation des variables. Cette solution dépend des fonctions de Bessel de premières et deuxièmes espèces. Enfin, pour des conditions limites spécifiques, ils ont présenté la formation de tourbillons derrière une sphère en mouvement rapide.

P-Y. Lagrée (2019) [16] La présente étude se concentre sur les écoulements à faible nombre de Reynolds, qui se caractérisent par de petits nombres de Reynolds. Bien que la solution de Stokes pour le mouvement d'une sphère de rayon L se déplaçant à la vitesse U_0 soit largement connue ($F=6\pi\mu LU_0$) de tous, peu de gens sont conscients que les étapes suivantes nécessitent une expansion asymptotique adaptée pour être calculées. La situation devient encore plus complexe lorsqu'il s'agit de l'écoulement en deux dimensions autour d'un cercle, car il n'existe pas de solution analytique pour le flux de Navier-Stokes en deux dimensions, ce qui est connu sous le nom de "Paradoxe de Stokes". Heureusement, une méthode appelée méthode des expansions asymptotiques, développée en 1957, permet de calculer le débit et d'estimer la traînée sur un cylindre.

Tristan AURÉGAN (2020) [29] Cet article présente une étude sur l'écoulement autour d'une particule s'élevant dans un flux infini en rotation. Initialement observé par Taylor en 1923, ce phénomène est caractérisé par la formation de colonnes de fluide en amont et en aval de la particule. En 1970, Maxworthy a réalisé des expériences avec de l'injection de colorant, confirmant ainsi l'augmentation de la traînée sur la particule. Des études analytiques et numériques ultérieures ont tenté de reproduire ces résultats, mais ont rencontré des divergences entre les résultats expérimentaux et la traînée théorique attendue. Pour étudier plus précisément le mouvement régulier et axisymétrique d'une sphère ascendante dans un fluide en rotation, les auteurs ont utilisé la simulation numérique directe et ont mesuré la traînée sur la particule sur une large plage de nombres de Reynolds modérés ($1 \leq Re \leq 30$).

S.H. Lee et Tzuyin Wu (2007) [30] Cet article examine la force de traînée exercée sur une sphère en mouvement le long de l'axe d'un tuyau circulaire rempli d'un fluide visqueux dans des conditions de faible nombre de Reynolds. Les équations de Navier-Stokes incompressibles sont formulées avec une pseudo-compressibilité, et un schéma numérique utilisant la méthode des volumes finis est appliqué avec une stratégie de flux numérique (Total-Variation Diminishing TVD). Les calculs sont effectués pour différents nombres de Reynolds et rapports de diamètre de tuyau à sphère. Les résultats sont comparés à des valeurs théoriques basées sur la solution linéarisée de Stokes et une technique de régression des moindres carrés est utilisée pour obtenir une expression reliant la force de traînée, le nombre de Reynolds et le rapport de diamètre tuyau/sphère.

Siavash Hedayati Nasab (2017) [31] Cette étude se concentre sur le mouvement de sphères tombant à travers des fluides. Elle utilise des données expérimentales pour modéliser mathématiquement ce

mouvement en utilisant les équations de Newton et de Navier-Stokes. Ces équations sont résolues numériquement, et les résultats sont comparés aux données expérimentales. L'objectif est de comprendre comment la densité, la viscosité, la température et l'accélération gravitationnelle influencent la vitesse de descente des sphères à travers le fluide.

Sunil Datta et Shanu Singhal (2011) [17] Dans cet article décrit une étude portant sur un écoulement stationnaire, à faible nombre de Reynolds, devant une sphère perméable avec une source en son centre. En utilisant la méthode des expansions asymptotiques appariées et en supposant que l'intensité de la source est petite, les solutions internes et externes sont générées pour résoudre le problème. Des graphiques représentant les lignes de courant sont dessinés pour illustrer les effets de S et R . L'expression de la traînée calculée montre que l'effet d'une source est de diminuer la traînée subie par la sphère.

Z.B. Ouattara, A. Magnin, P. Jay (2015) [32] L'étude porte sur la simulation numérique de l'écoulement incompressible d'un fluide de Bingham autour d'un obstacle cylindrique en mouvement constant près d'une paroi. La plage d'étude comprend les écoulements rampants et inertiels, avec des nombres de Reynolds entre 0,001 et 20. L'influence de la paroi est explorée pour des espacements entre le cylindre et la paroi allant de $0,01D$ à $100D$. Les solutions sont obtenues pour différents nombres d'Oldroyd, variant de 0 à 10, permettant d'analyser l'effet du seuil d'écoulement sur les effets visqueux. Les résultats mettent en évidence l'influence des nombres sans dimension sur les lignes de courant, les zones de recirculation, les zones rigides statiques et en mouvement ainsi que les champs de contrainte, y compris les coefficients de traînée et de portance. Les résultats obtenus sont comparés aux solutions disponibles dans la littérature pour les écoulements de fluide de Bingham et de fluide newtonien dans les milieux infinis et les lubrifications hydrodynamiques.

M. Dolz, A. Casanovas, J. Delegido, et M.J. HernandezUn (2003) [33] dispositif expérimental a été conçu pour permettre la mesure directe de la force agissant sur une sphère immergée dans un fluide en mouvement. Ce l'expérience confirme la proportionnalité directe entre la force et chacune des variables impliquées (vitesse relative sphère-fluide, sphère rayon et viscosité du fluide). Une démonstration expérimentale simple a été faite de la loi de Stokes pour des sphères immergées dans des fluides en mouvement, pour très petits nombres de Reynolds, le long de tubes cylindriques.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une recherche bibliographique approfondie sur le sujet de notre mémoire, en abordant divers concepts fondamentaux. Nous avons examiné les différents régimes d'écoulement possibles, exploré les différentes formes de transfert de chaleur par convection, et introduit plusieurs nombres adimensionnels essentiels. Afin d'enrichir notre étude, nous avons également cherché différentes sources bibliographiques traitant spécifiquement de ce sujet.

Chapitre II

Présentation du problème et formulation

Mathématique et Numérique :

II. Présentation du problème et formulation Mathématique et numérique

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les équations qui permettent de modéliser le problème étudié. Ces équations sont rédigées en coordonnées cartésienne afin de faciliter les calculs et d'obtenir une analyse plus précise des résultats, compte tenu de la géométrie du domaine de travail. Le sujet d'étude porte sur l'écoulement de Stokes autour d'un cylindre chauffé.

II.2 Position du problème

Nous cherchons à modéliser numériquement le phénomène physique suivant : l'écoulement de Stokes d'un fluide visqueux autour d'un cylindre stationnaire chauffé, placé à l'axe entre deux parois verticales parallèles. Cependant, dans notre cas, nous étudions ce phénomène en deux dimensions. Nous prenons donc une coupe verticale le long de l'axe de la géométrie utilisée. Ainsi, nous obtenons un écoulement bidimensionnel autour d'un obstacle de forme circulaire, comme illustré dans la figure. II.1.

La configuration géométrique que nous examinons est un canal par lequel passe le fluide :

- Longueur : 60 mm
- Largeur : 10 mm
- Il contient un cercle de diamètre 1 mm, situé à une position $(-0.5 < x < 0.5)$ et à une hauteur $y = 29.5$ mm

Le fluide entre à une vitesse $V_x = 0$ et $V_y = \text{constante}$, ainsi qu'une température $T_\infty = \text{constante}$

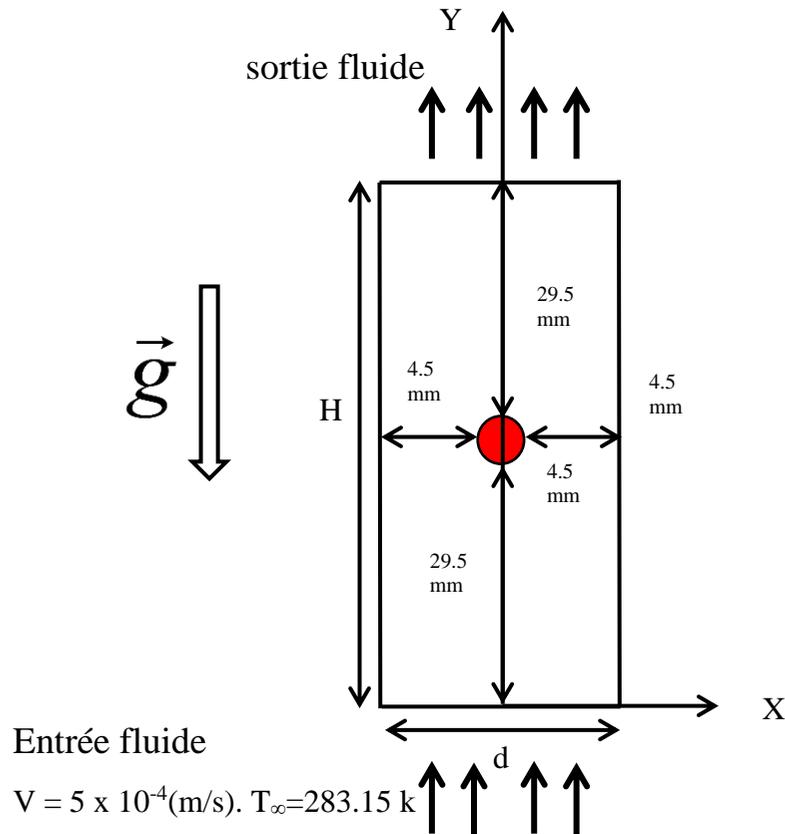


Figure II.1: Géométrie du problème

II.3 Équations générales du mouvement

Les équations exprimant les phénomènes d'écoulements sont principalement celles de dérivées des lois physiques de conservation de masse de la quantité de mouvement et de l'énergie. Pour un fluide newtonien, les équations sont les suivantes :

II.3.1 Equation de continuité

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

II.3.2 Equation de la quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide et son mouvement et la cause qui le produit. On peut indiquer que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. La forme générale de l'équation de Navier-Stokes pour un fluide newtonien est :

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (\text{II.2})$$

II.3.3 Équation de la conservation d'énergie

L'équation de la conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différents termes, soit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (II.3)$$

II.3.4 Approximation de Boussinesq

L'approximation de Boussinesq postule la masse volumique sont négligeables. la masse volumique ρ est constante lors d'un écoulement thermo-convectif à l'exception du terme lié à la gravité où elle dépend uniquement de la température T . [34]. L'approximation est exprimée comme suit :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_\infty)] \quad (II.4)$$

Le coefficient de dilatation isobare du fluide, soit :

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left[\frac{\partial \rho}{\partial T} \right] \quad (II.5)$$

II.4 Hypothèses du problème

- Régime permanent
- Écoulement laminaire et bidimensionnel
- Fluide visqueux newtonien

II.5 Système d'équations retenues

II.5.1 Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (II.6)$$

II.5.2 Equation de la quantité de mouvement

Les équations de Navier Stokes de l'écoulement (en convection naturel et mixte) en 2D s'écrivent :

Suivant l'axe (x) :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (II.7)$$

Suivant l'axe (y) :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + g\beta(T - T_\infty) \quad (II.8)$$

II.5.3 Équation d'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (II.9)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (II.10)$$

II.6 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont :

$$\text{Pour } : x = \left(-\frac{D}{2}\right) \text{ et } 0 \leq y \leq H ; u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$\text{Pour } : x = \left(\frac{D}{2}\right) \text{ et } 0 \leq y \leq H ; u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0.$$

$$\text{Pour } : y = 0 \text{ et } \left(-\frac{D}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{D}{2}\right) ; u = 0, v = v_\infty ; T = T_\infty$$

Sur la paroi du cylindre les conditions standards sont posées : vitesses nulles et température égale à la température de la paroi.

II.7 Procédure numérique

Pour réaliser une simulation numérique, la première étape consiste à définir un modèle géométrique représentatif du domaine à étudier. Ensuite, il est nécessaire de discrétiser ce domaine, c'est-à-dire de le mailler selon les propriétés de la géométrie et de l'écoulement. Il faut également sélectionner un schéma de discrétisation adapté pour chaque terme du système. Une fois les équations

discrétisées, il est important de choisir une méthode de résolution adéquate pour le système d'équations algébriques résultant.

II.8 Logiciel gambit

Il s'agit d'un préprocesseur intégré utilisé pour l'analyse en dynamique des fluides numérique CFD (Computation Fluide Dynamics). Ce logiciel permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine à étudier et de subdiviser ce domaine en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. La définition des conditions aux limites appropriées, au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, est également réalisée à ce stade. Il permet de créer différents types de maillages en fonction de la géométrie et de spécifier le type de matériau (fluide ou solide). Des outils de création, de génération et de vérification de maillage du modèle étudié sont disponibles dans son interface, qui permet également de détecter les défauts.

II.9 Construction de la géométrie

Le but de la construction de la géométrie est de définir le domaine de calcul, qui sera caractérisé par des faces dans un problème en deux dimensions, pour ce là nous avons dessiné une géométrie qui représente notre problème.

Pour cette géométrie on a pris :

Un domaine fluide de dimensions 10 mm de largeur et 60 mm de longueur.

- Un cylindre de diamètre 1 mm placée à une position ($-0.5 < x < 0.5$) et à une hauteur $y = 29.5$ mm

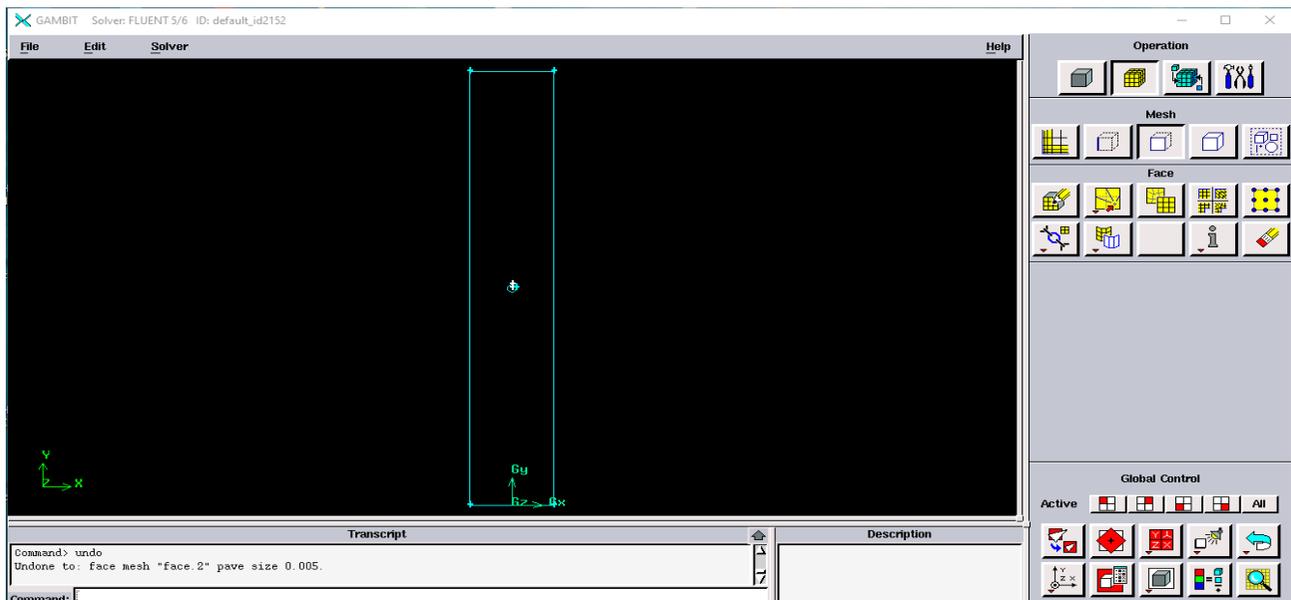


Figure II.2: Géométrie du problème représenté sur logiciel gambit

II.10 Le maillage

Le maillage est la représentation discrète d'un milieu continu, utilisée pour des simulations numériques ou des représentations graphiques. Il est défini par des éléments proportionnés finis et caractérisé par sa dimension (2D ou 3D), son volume total et la géométrie de ses cellules (en 2D : parallélogrammes, rectangles, carrés et polygones, en 3D : cylindre, sphère, cube). Il existe différents types de maillages : structurés, non structurés ou hybrides. Lorsque la géométrie du problème est régulière, comme dans notre cas (par exemple : rectangulaire et circulaire), le choix de maillage est simple. Nous avons opté pour un maillage serré autour un cylindre, comme illustré dans la figure présentant la géométrie du problème sur le logiciel Gambit

Pour notre cas on a choisi deux maillages de ((15×120) et (20×150)) les deux maillages sont très serrés au niveau du cylindre comme le montre la figure :

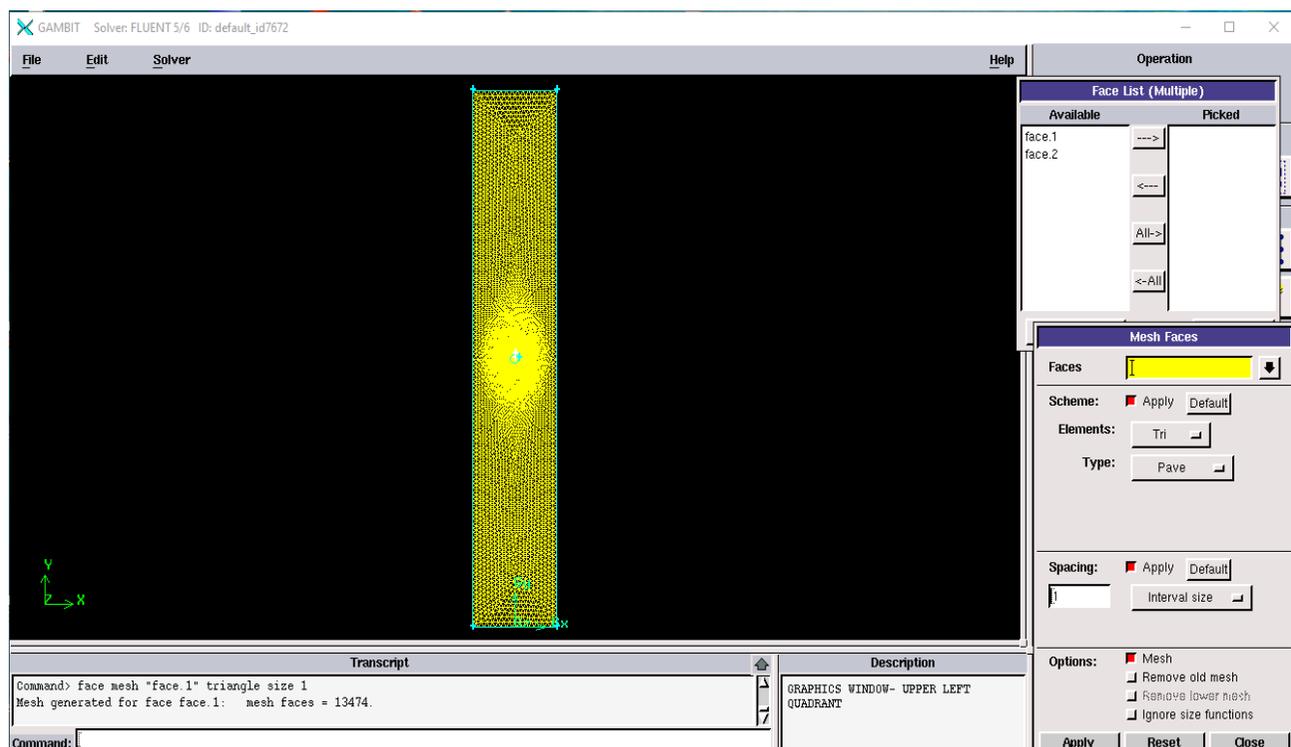


Figure II.3: Détail du maillage (15x120)

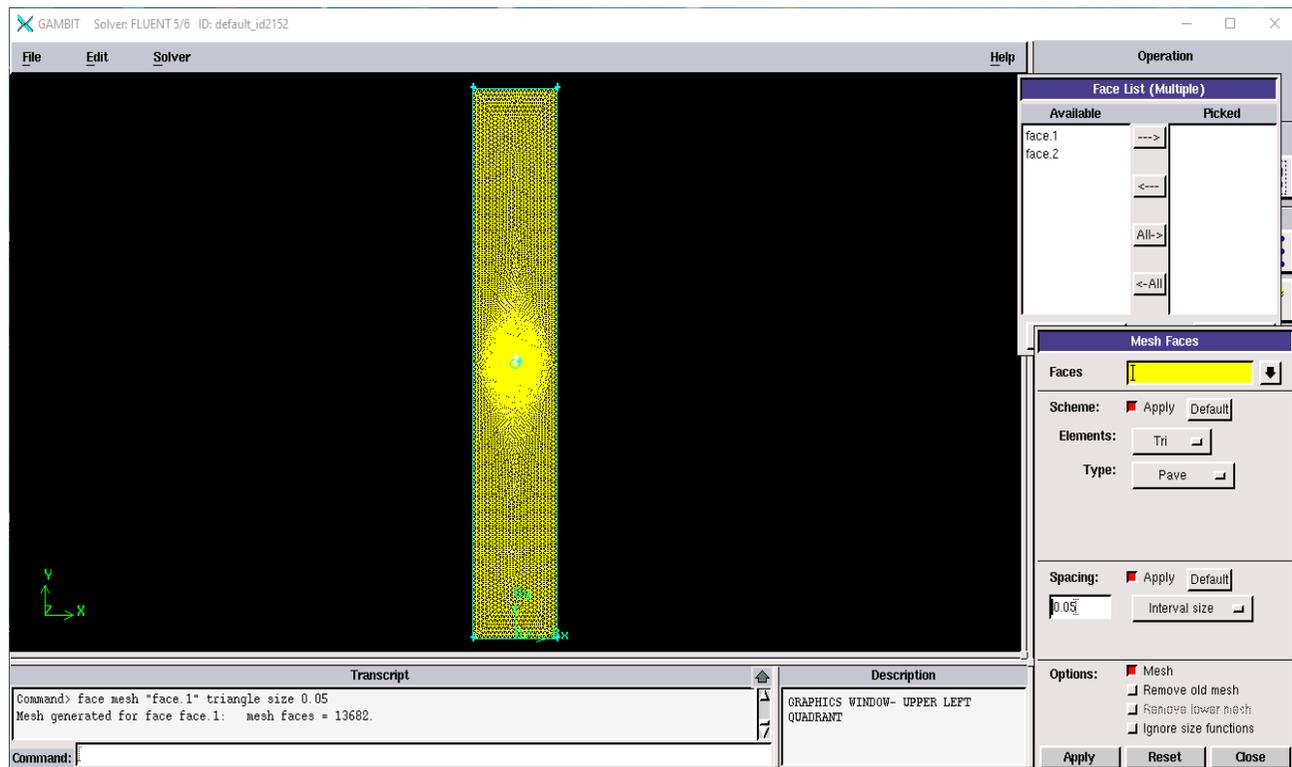


Figure II.4: Détail du maillage (20x150)

II.11 Solver fluent « Configuration »

La prise en main de l'interface de FLUENT est plutôt aisée. Pour commencer, il convient d'importer un maillage préalablement travaillé dans la section de configuration. Une fois que le maillage est en place, il faut définir les paramètres requis pour le calcul, notamment en choisissant le modèle physique adapté et en fixant les conditions initiales et aux limites en fonction de ce modèle. Une fois cela fait, il ne reste plus qu'à lancer le calcul.

La génération du calcul dans « Fluent » passe par les étapes suivantes :

- 1- Démarrer la version 2D de Fluent.
- 2- Le solver fluent charge automatiquement la géométrie et le maillage. Par contre si la géométrie été faite par d'autre logicielles comme GAMBIT : **File** → **import** → **mesh**.
- 3- Écoulement laminaire. General → **2D space** → **planar**.

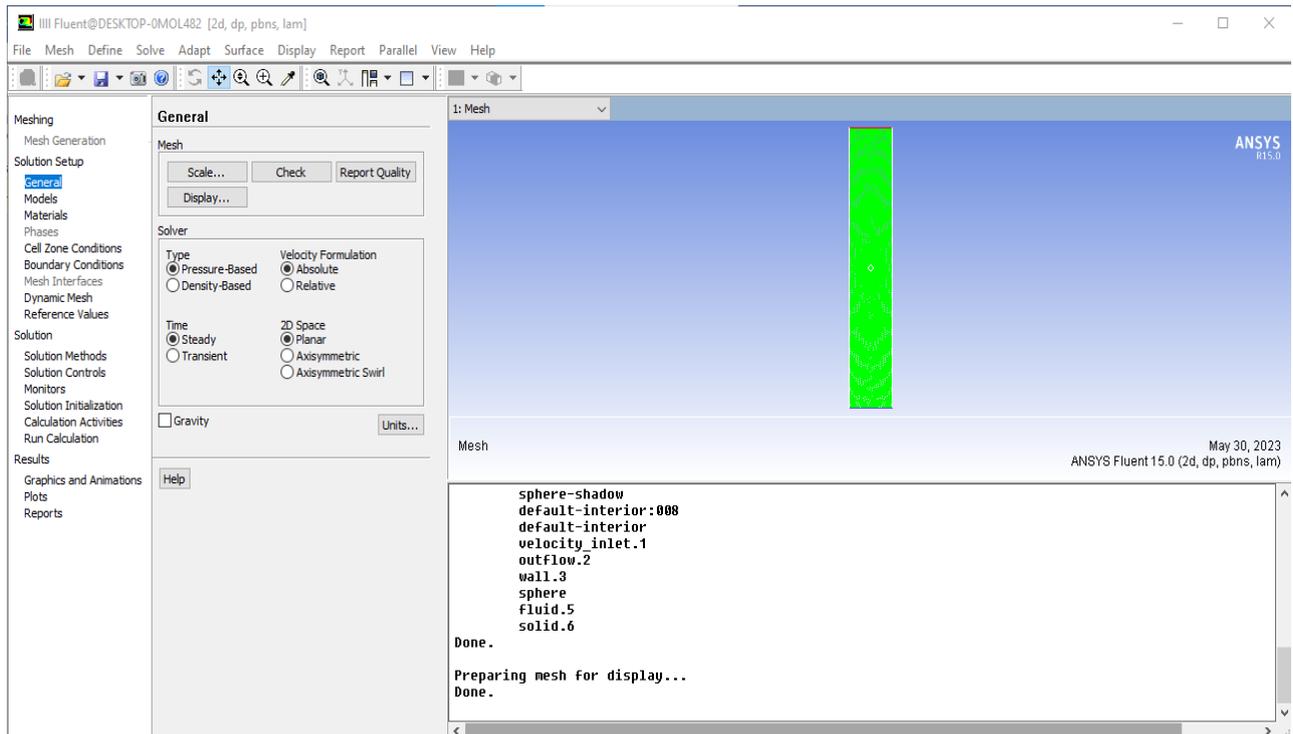


Figure II.5: Choix de l'écoulement bidimensionnel (planar)

- 4- Vérification du maillage. **General** → **Check** → **report quality**
- 5- Modèles. **Energy** → **on**, **viscous** → **laminar**.
- 6- Définir la Matière. **Materials** → **Fluid** → **create/edit materials** → **fluent database material** → **fluid (water liquid)** → **boussenessq**, **solid (aluminum)**
- 7- Celles zones conditions → **operating conditions** → **gravity**
- 8- Définir les conditions aux limites. **Boundary conditions (sphere: momentum** → **Stationary Wall, temperature** → $T = T_1$, **velocity inlet** → **momentum** → **velocity specification method** → **components** → **Y-velocity (m/s) = cst**, **thermal** → **temperature = T_2** , **périphérie** **:(outflow, wall)**)
- 9- Reference values → **velocity inlet** → **fluid**

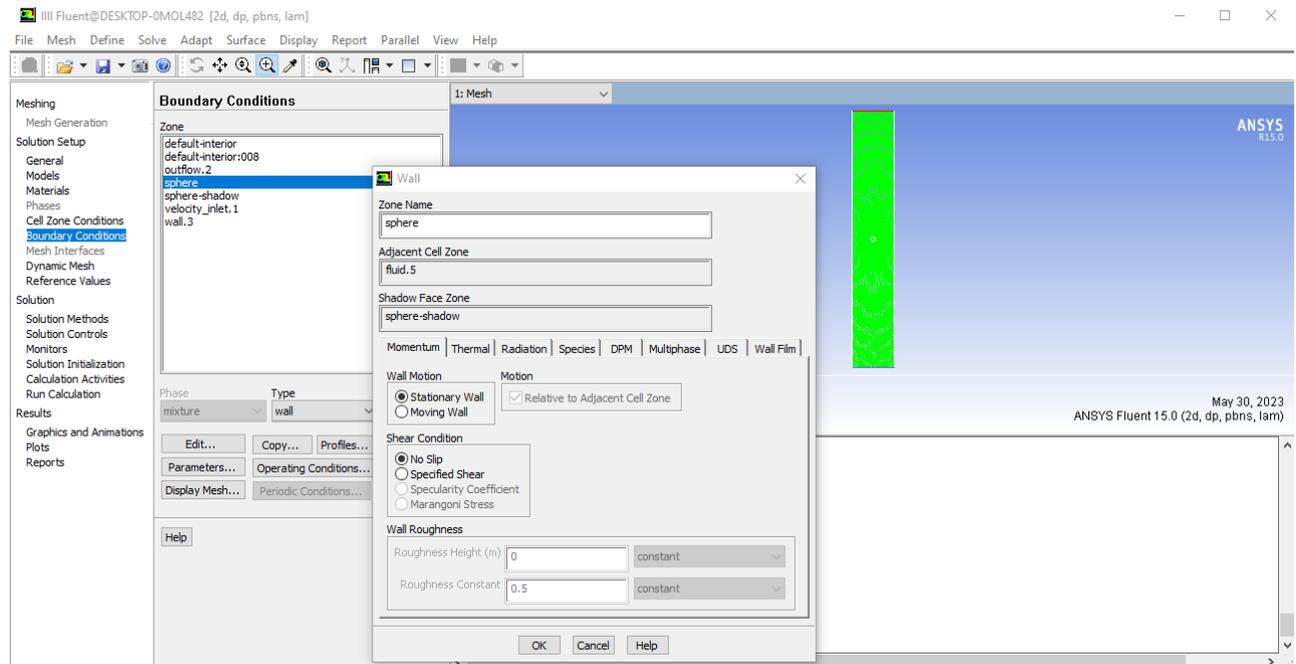


Figure II.6: Choix des conditions aux limites pour l'intervalle étudié.

- 10- Le fichier Case (regroupe toutes informations liées à la géométrie).
- 11- Le fichier data (contient tous les paramètres et données des calculs).
- 12- Initialiser le calcul. Solution **Initialization** → **Initialize**.
- 13- Vérifier les résidus des calculs. **Monitors** → **Residual**.
- 14- Choisir du nombre des itérations et lancer les calculs. **Run calculation** → **nombre of iterations** → **calculate**.
- 15- Post traitement des résultats. (**Display, Plot, Report** etc.)

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé le modèle mathématique pour le problème traité. Ce modèle consiste en un système d'équations de Navier-Stokes qui gouvernent l'écoulement de Stokes autour d'un cylindre chauffé.

L'utilisation de méthodes numériques est essentiellement nécessaire pour résoudre les équations de bilan. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel FLUENT, qui est basé sur la méthode des volumes finis. En ce qui concerne la création de la géométrie et du maillage, nous avons utilisé le logiciel Gambit.

Chapitre III

[Résultats et discussions]

III. Résultats et discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons les résultats de la simulation numérique effectuée avec le logiciel de calcul Fluent afin d'analyser l'écoulement de Stokes autour d'un cylindre chauffé. Nous avons sélectionné le maillage le plus optimal pour obtenir des résultats de haute qualité.

III.2 Propriétés de fluide et les conditions aux limites utilisées pour notre étude

On a pris comme fluide l'eau liquide (H_2O), il est défini par les caractéristiques suivantes :

- la viscosité dynamique $\mu = 1.003 \times 10^{-3}$ (kg/ (m.s))
- la masse volumique $\rho = 998.2$ kg/m³
- coefficient de dilatation à $T_\infty = 283.15$ K, $\beta = 2.72 \times 10^{-4}$ (1/K)
- viscosité cinématique : $\nu = 1.004 \times 10^{-6}$ (m²/s)

Avec :

- Le diamètre du cylindre $D = 1$ mm, la distance entre les deux plaques parallèles $d = 10$ mm
- vitesse d'écoulement entrée : $V_\infty = 5 \times 10^{-4}$ (m/s)
- température de fluide entrée : $T_\infty = 283.15$ K
- La température du cylindre :

Premier cas $T = 285.15$ K, $\Delta T \rightarrow 2$ K

Deuxième cas $T = 288.15$ K, $\Delta T \rightarrow 5$ K

ΔT : Différence de température entre le cylindre et le fluide.

A partir de ces données et la formule en premier chapitre de (Re) on obtient :

$Re = 0,5 < 1$ (écoulement de stokes)

III.3 Choix du maillage

Test d'indépendance du maillage : Afin de choisir le maillage approprié pour notre étude on teste deux maillages.

Nous simulons le problème pour les deux maillages : 15x120 et 20x150.

Soient n et m le nombre de nœuds respectivement suivant l'axe des x et l'axe des y.

III.3.1 Courbe des résidus et nombre d'itérations à $\Delta T = 2 \text{ K}$

Pour n=15 m=120

Le nombre d'itération après la convergence est=1352

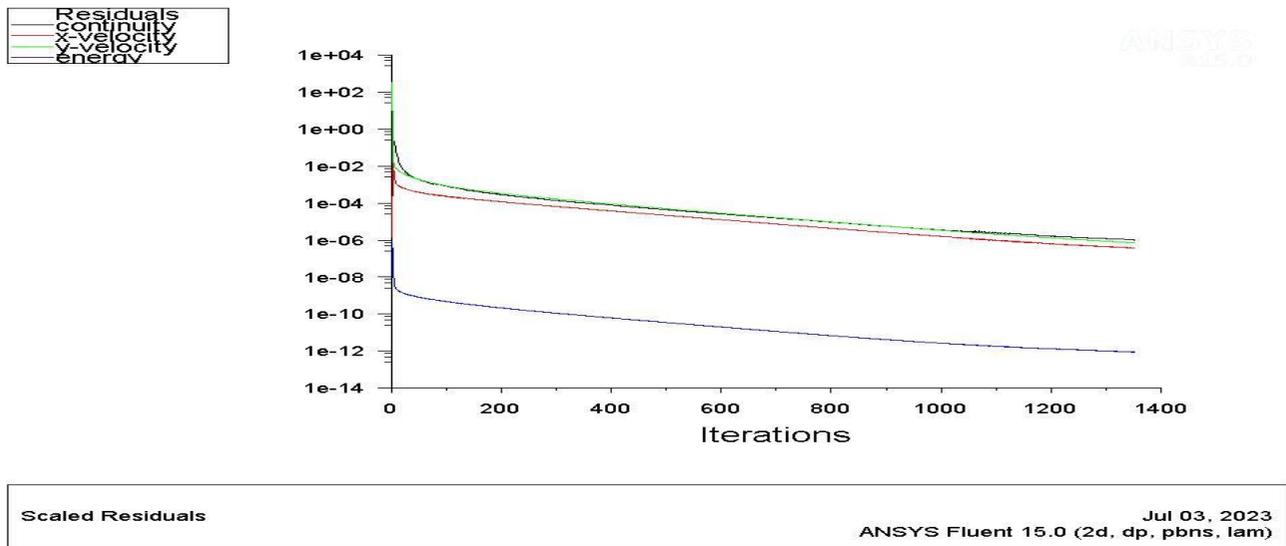


Figure III.1: Evolutions des résidus Pour n=15 m=120

Pour n=20 m=150

Le nombre d'itération après convergence est=1351

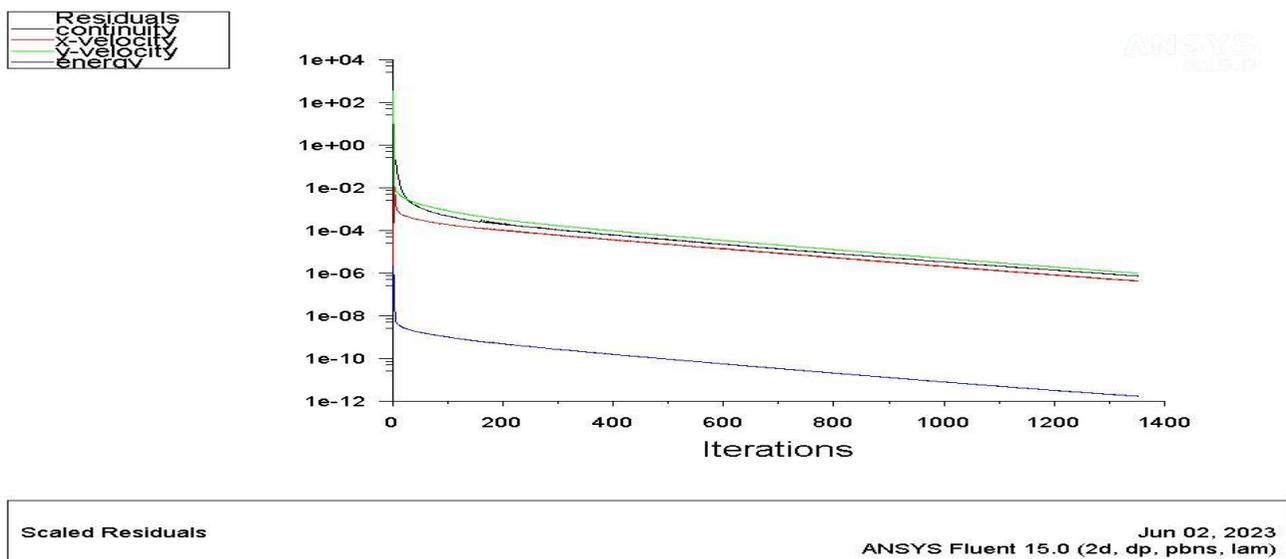


Figure III.2: Evolutions des résidus Pour n=20 m=150

III.3.2 Pression statique en fonction de x

Ci-dessous les courbes de pression statique en fonction de x à la ligne $y = 3.1$ pour les deux maillages :

Pour le maillage $n=15$ $m=120$

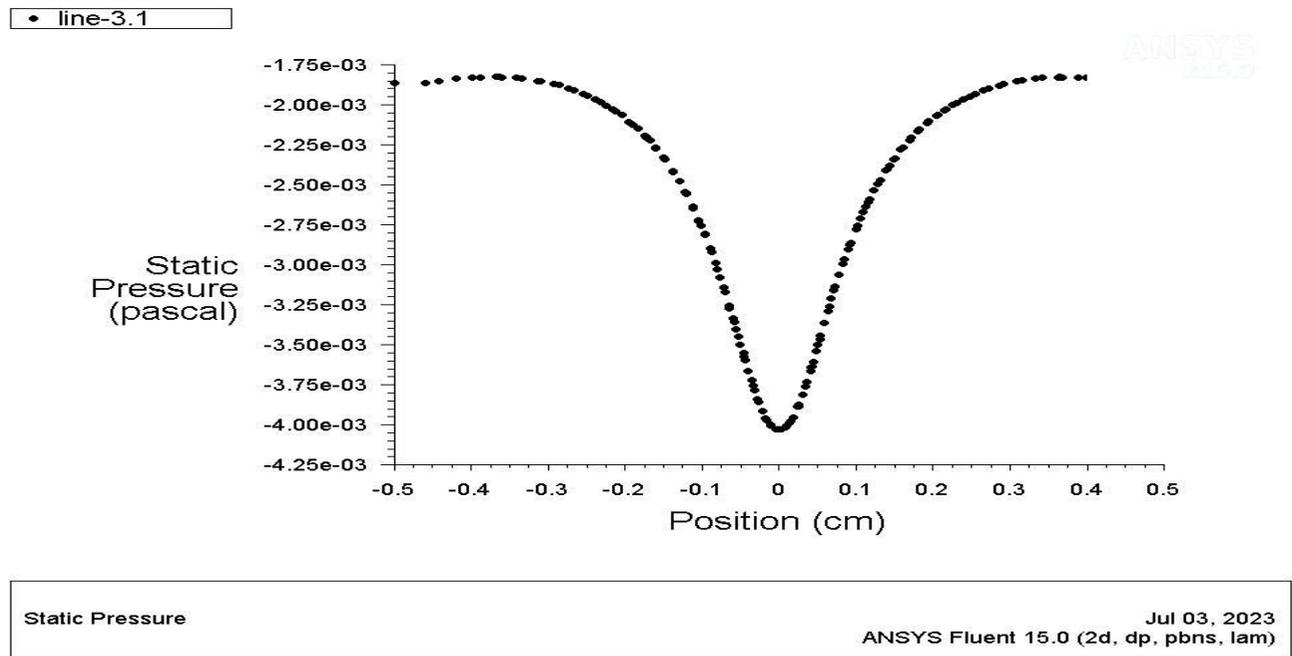


Figure III.3: La pression statique en fonction de x à la ligne $y = 3.1$ placée au-dessus du cylindre

Pour le maillage $n=20$ $m=150$

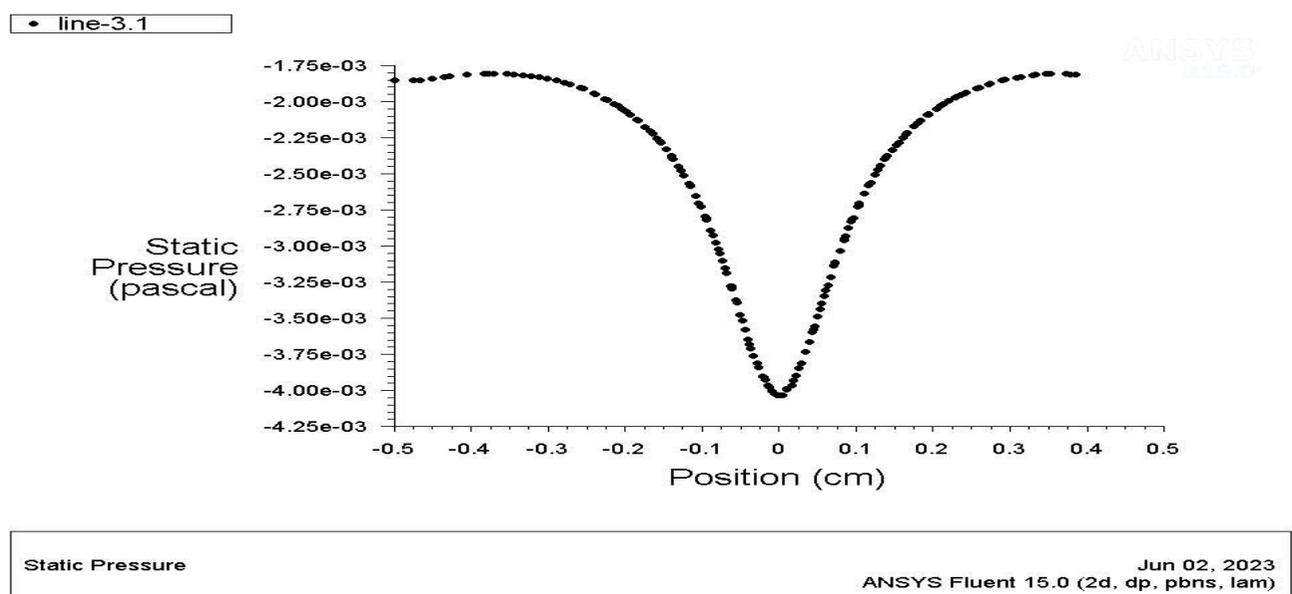


Figure III.4: La pression statique en fonction de x à la ligne $y=3.1$ placée au-dessus du cylindre

III.3.3 La pression statique maximale et minimale

Pour le maillage n=15 m=120

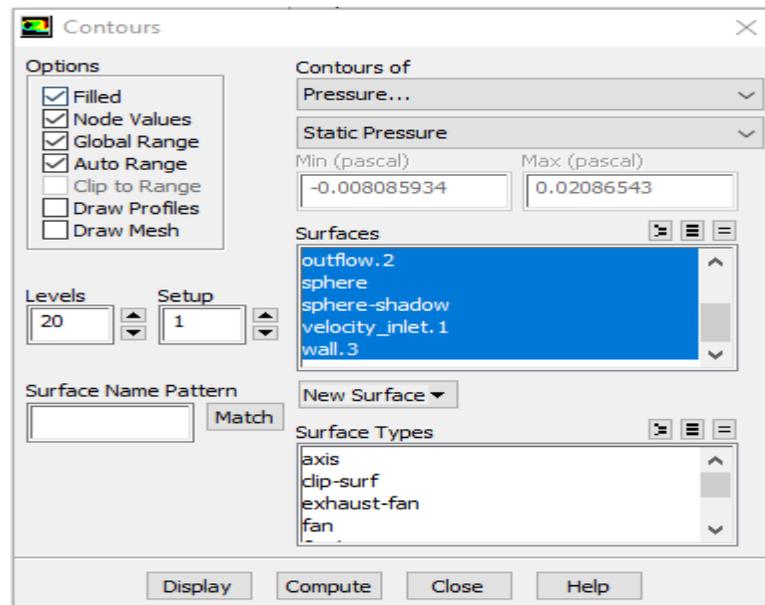


Figure III.5: La pression statique maximale et minimale Pour le maillage n=15, m=120

$P_{\max} = 0.02086543$ (Pa) ; $P_{\min} = -0.008085934$ (Pa)

Pour le maillage n=20 m=150

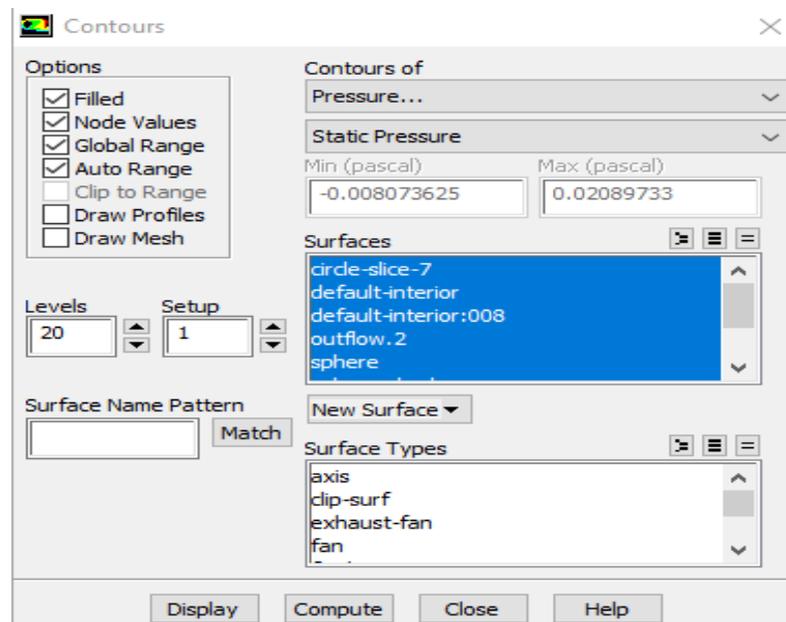


Figure III.6: La pression statique maximale et minimale Pour le maillage n=20, m=150

$P_{\max} = 0.02089733$ (Pa) ; $P_{\min} = -0.008073625$ (Pa)

III.3.4 Conclusion du Test de convergence

D'après la comparaison des résultats avec les deux maillages 15x120 et 20x150, on constate que le maillage 20x150 donne des résultats très proches de ceux de 15x120. Ainsi, pour la suite de nos calculs on choisit alors le maillage 20x150.

III.4 Résultats de simulations pour $(\Delta T) = 2$ (k)

Pour : $Re = 0.5$, et $\Delta T = 2$ (k), on obtient :

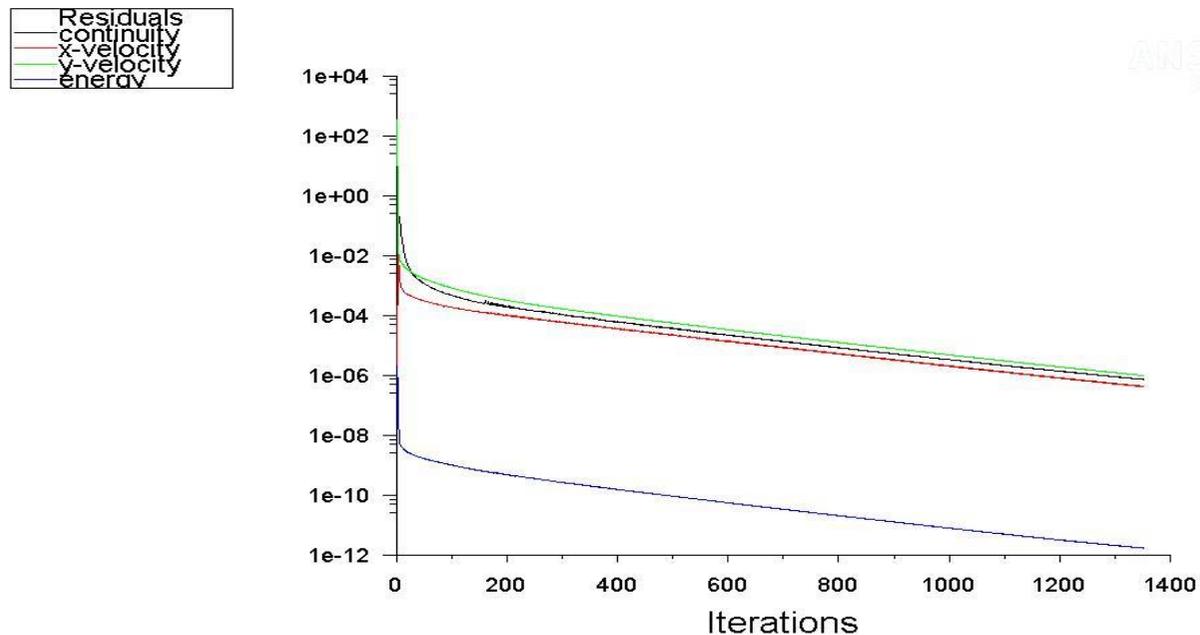
$$Gr = 5.31$$

$$Ri = 21.26 > 10 \text{ (convection naturelle)}$$

III.4.1 Courbe des résidus et nombre d'itérations

Pour le maillage $n=20$ $m=150$

Le nombre d'itération après la convergence est = 1351



Scaled Residuals

Jun 02, 2023
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, lam)

Figure III.7: Evolutions des résidus Pour le maillage $n=20$ $m=150$

III.4.2 La distribution des lignes et du cercle autour du cylindre dans notre système étudié

La distribution des lignes et du cercle pour calcul la pression, la vitesse V_y et V_x , ainsi que de la température sous, au-dessus et autour du cylindre étudié est illustrée dans les figures III.8 et III.9.

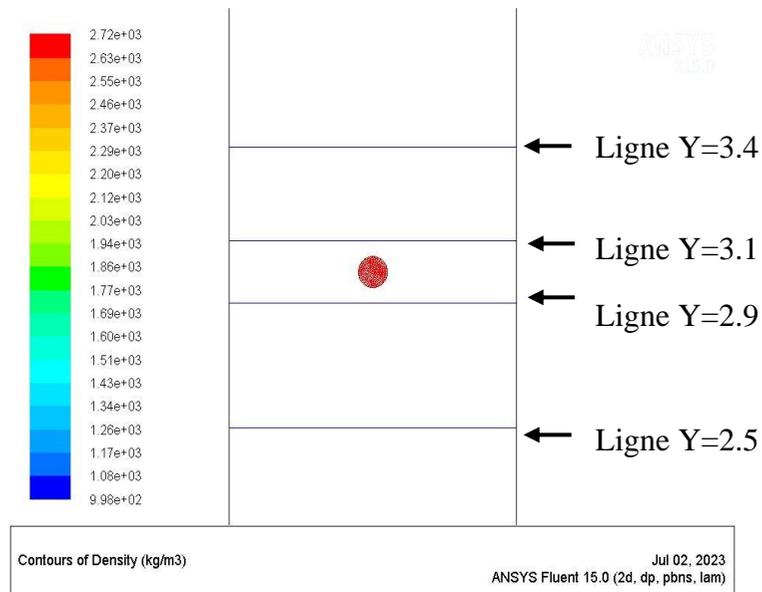


Figure III.8 : La distribution des lignes afin de calculer la pression, de vitesse V_y , ainsi que de la température sous et au-dessus du cylindre

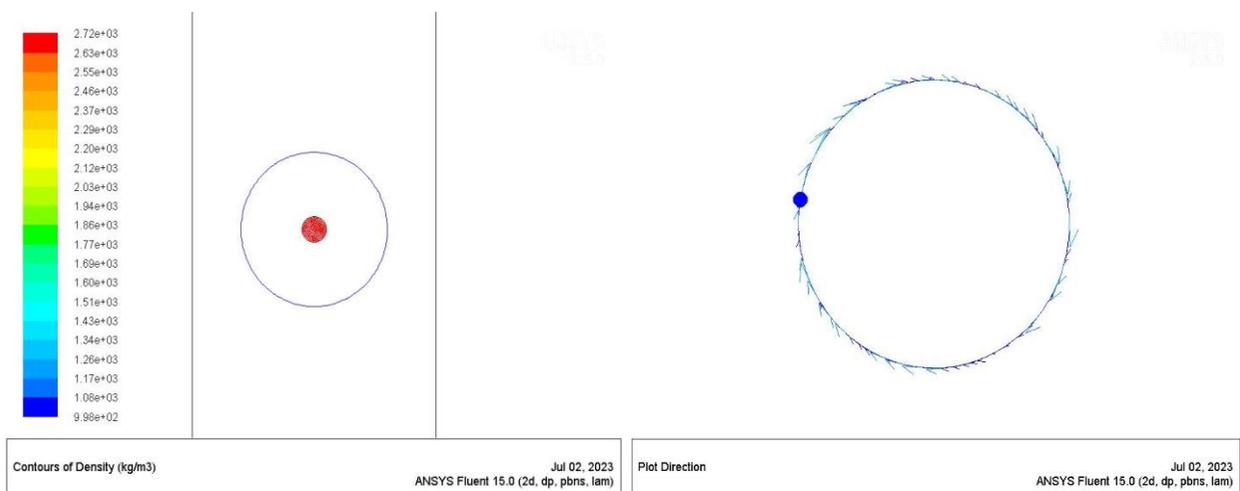


Figure III.9: point de départ et la direction de calcul de la pression, la vitesse V_y et la température statique le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm autour de l'axe du cylindre

III.4.3 La pression statique

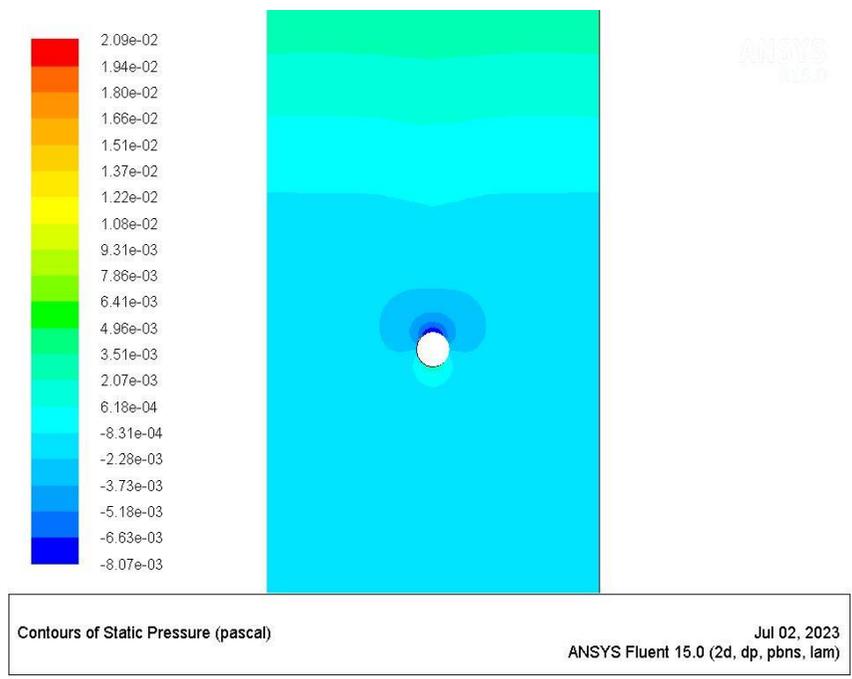


Figure III.10: la distribution de pression statique autour du cylindre

III.4.3.1 Lignes placées sous le cylindre

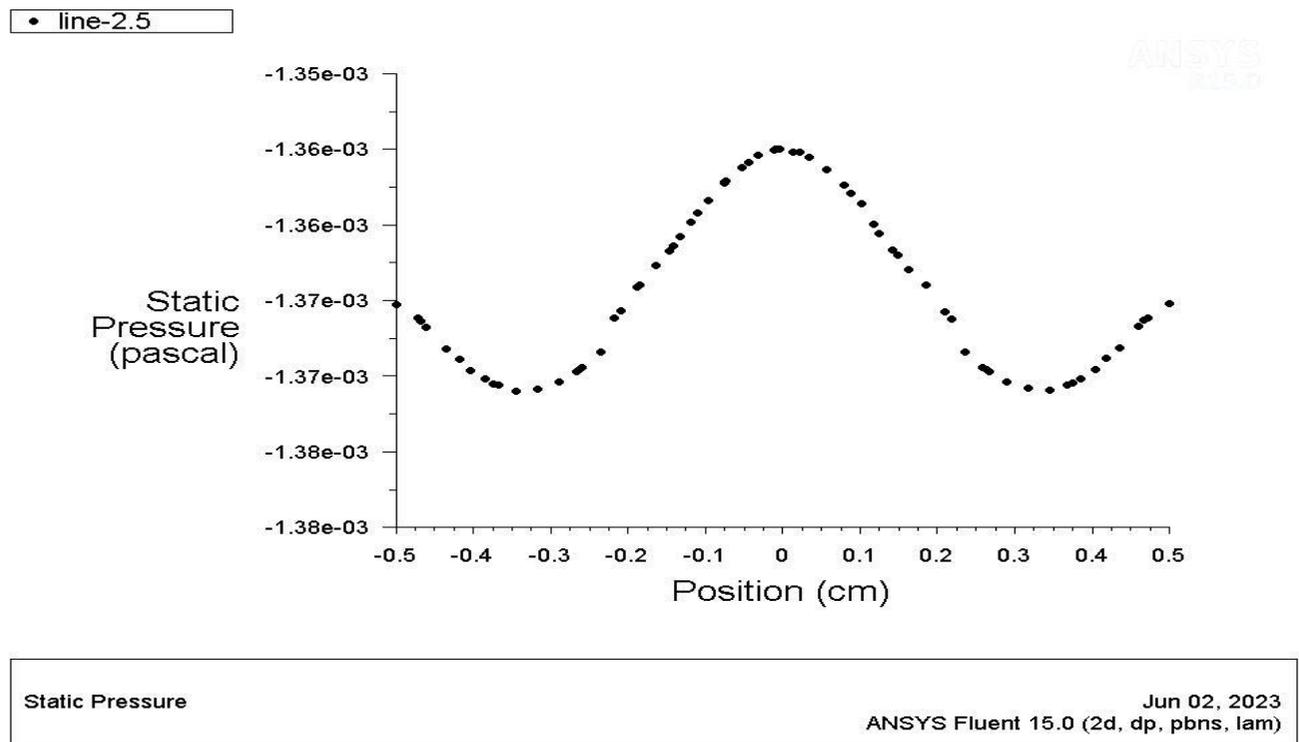


Figure III.11: Pression statique en fonction de x à la ligne y=2.5

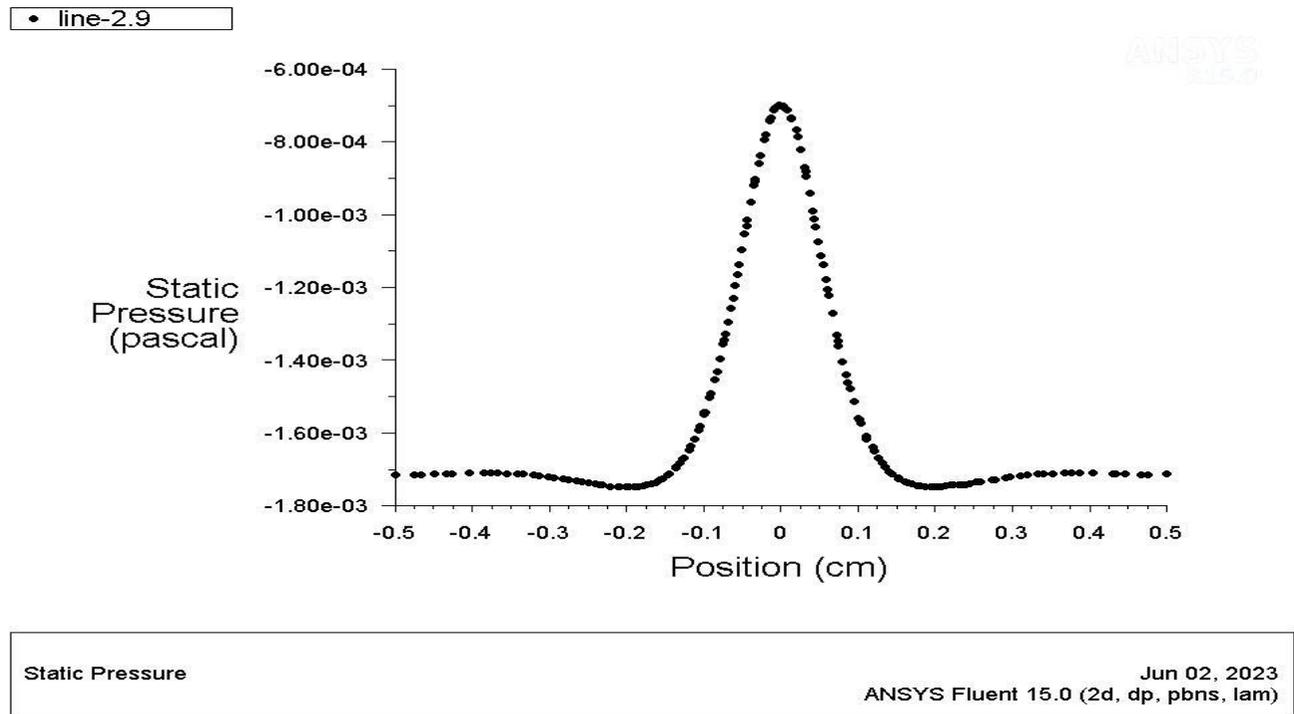


Figure III.12: Pression statique en fonction de x à la ligne y = 2.9

III.4.3.2 Lignes placées au-dessus du cylindre

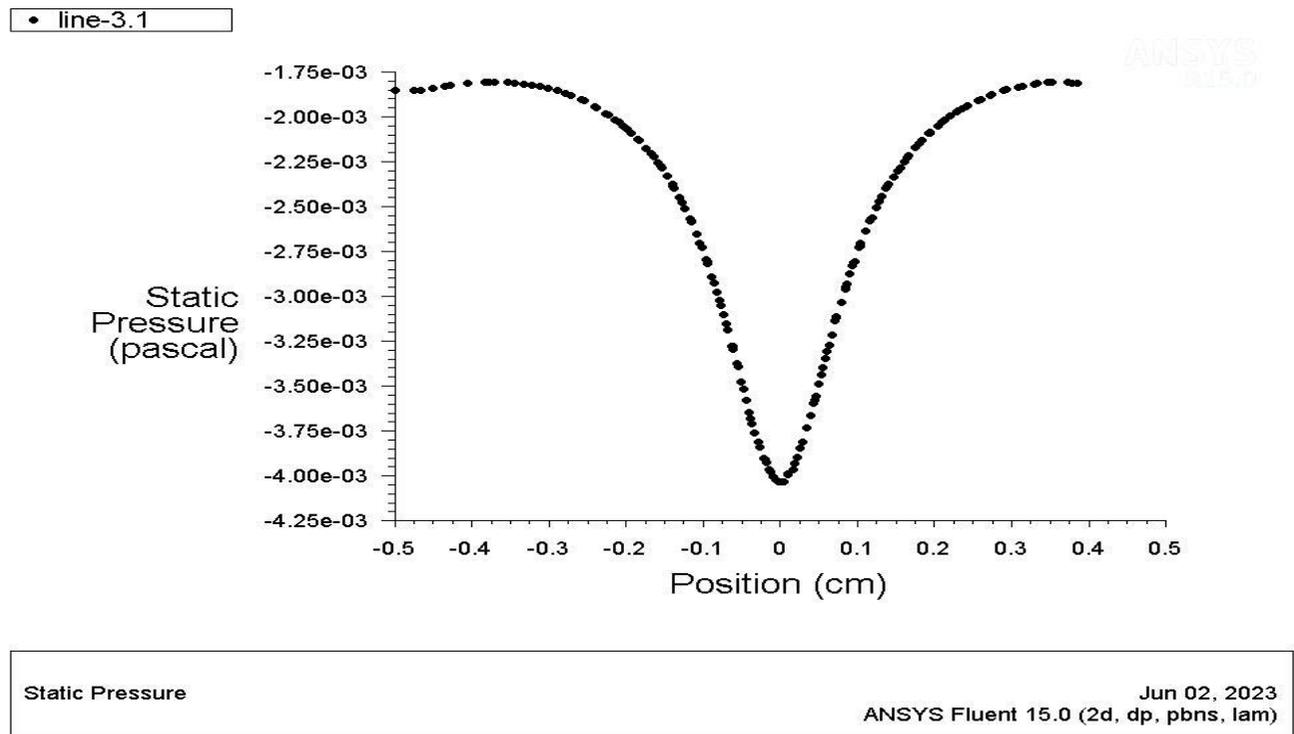


Figure III.13: Pression statique en fonction de x à la ligne y=3.1

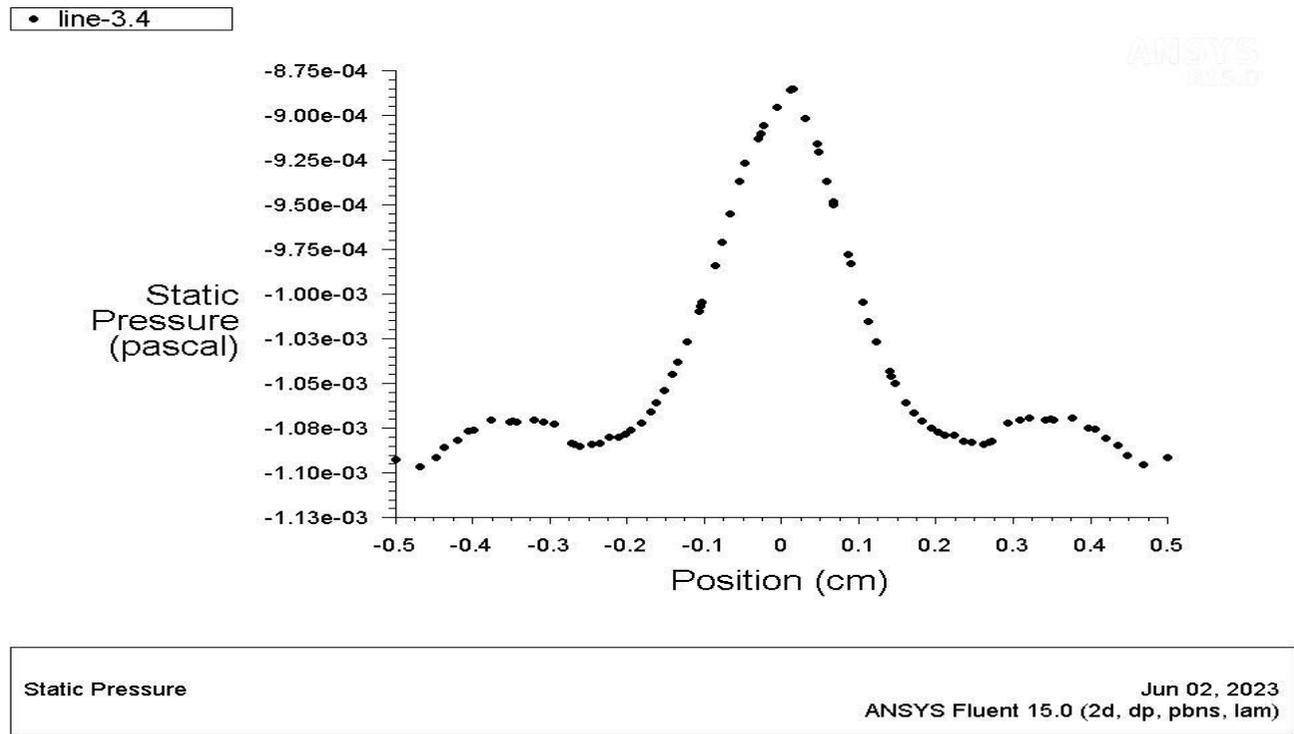


Figure III.14: Pression statique en fonction de x à la ligne y=3.4

III.4.3.3 La pression statique autour du cylindre

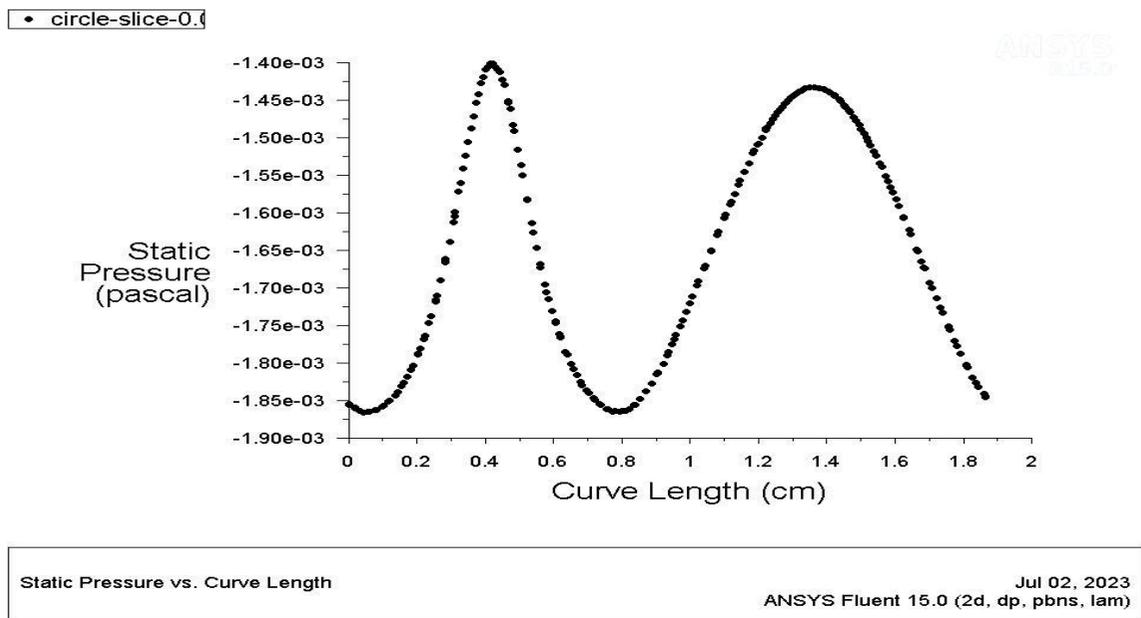


Figure III.15: La pression statique autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre D=6 mm

III.4.4 Les profils de vitesse V_y

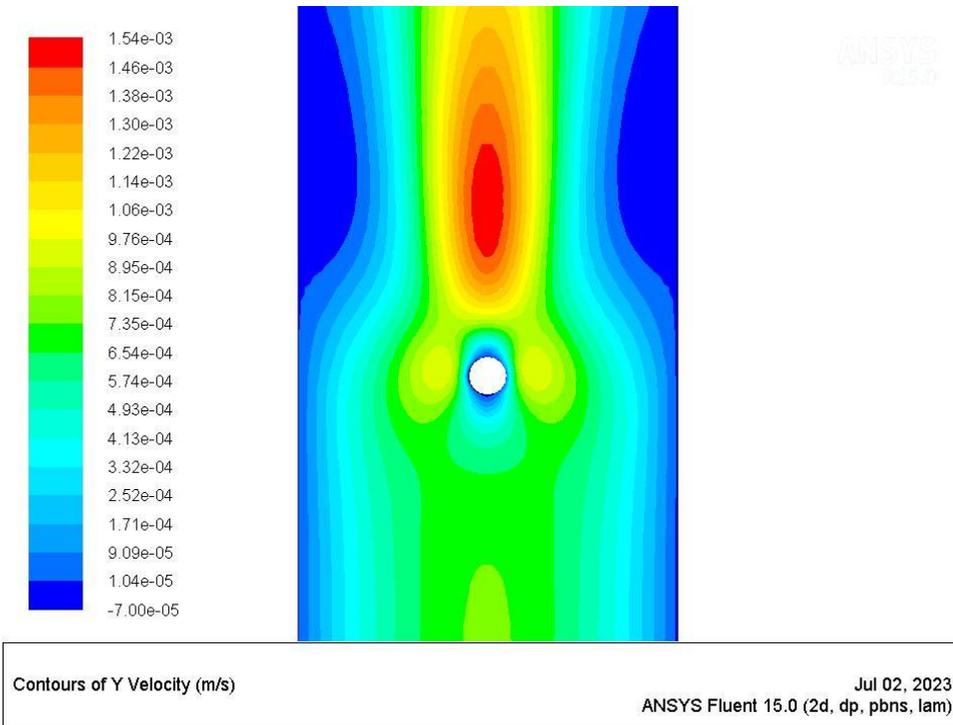


Figure III.16: la distribution des profils de vitesse V_y autour du cylindre

III.4.4.1 Lignes placées sous le cylindre

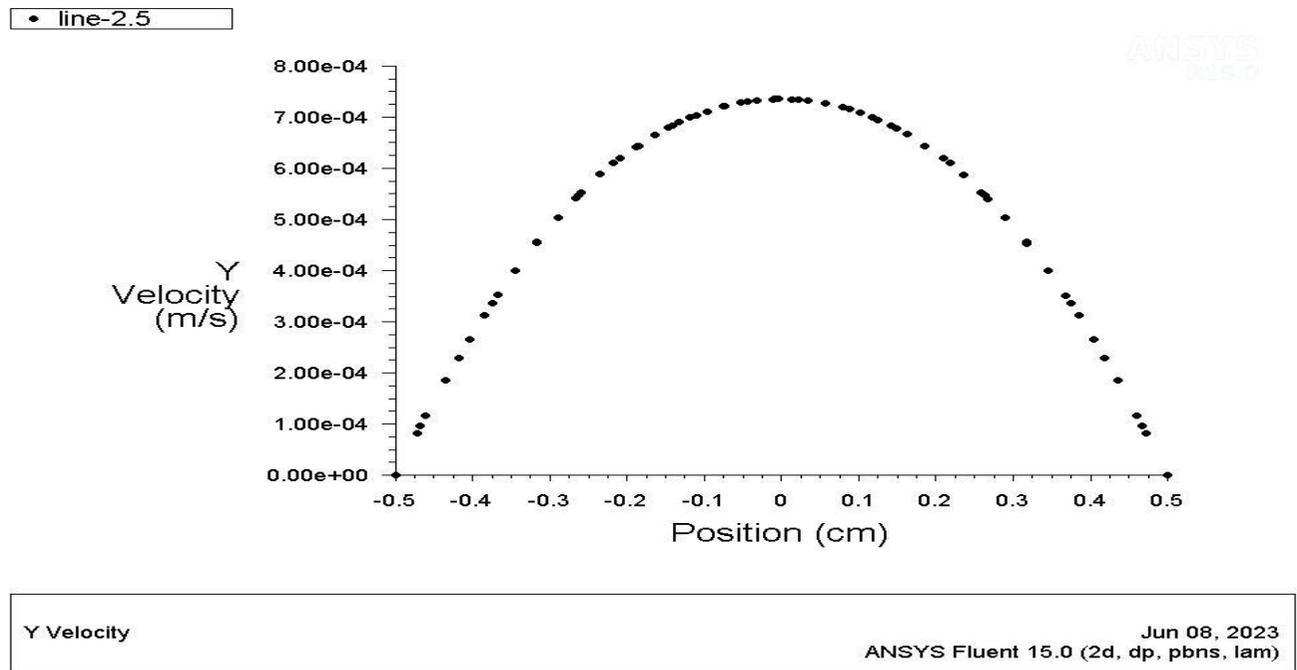


Figure III.17: Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=2.5$

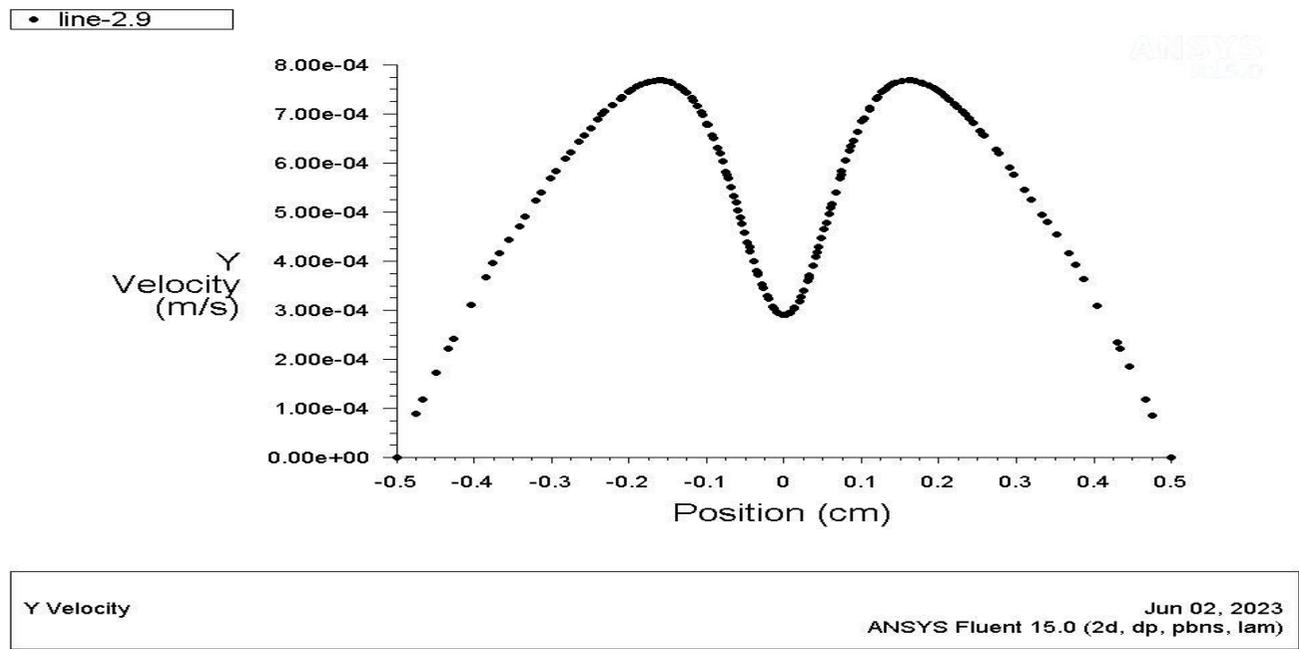


Figure III.18: Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=2.9$

III.4.4.2 Lignes placées au-dessus du cylindre

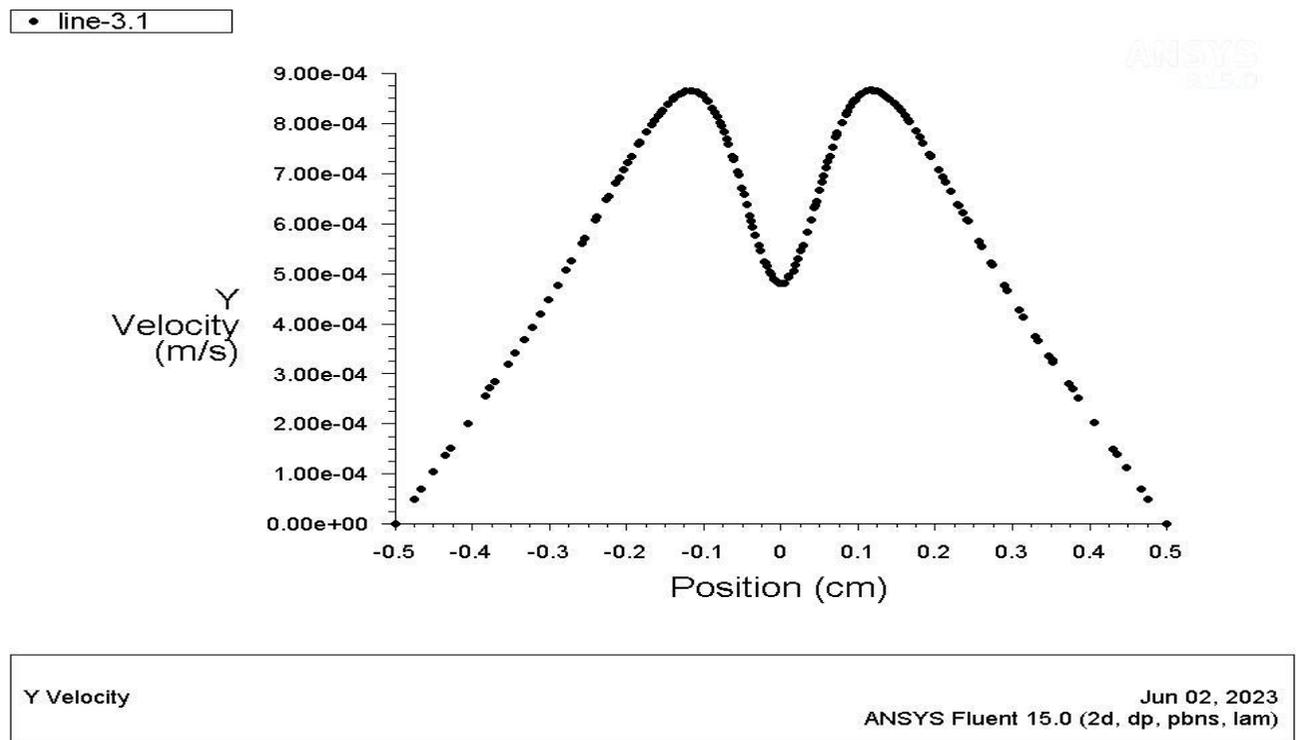


Figure III.19: Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=3.1$

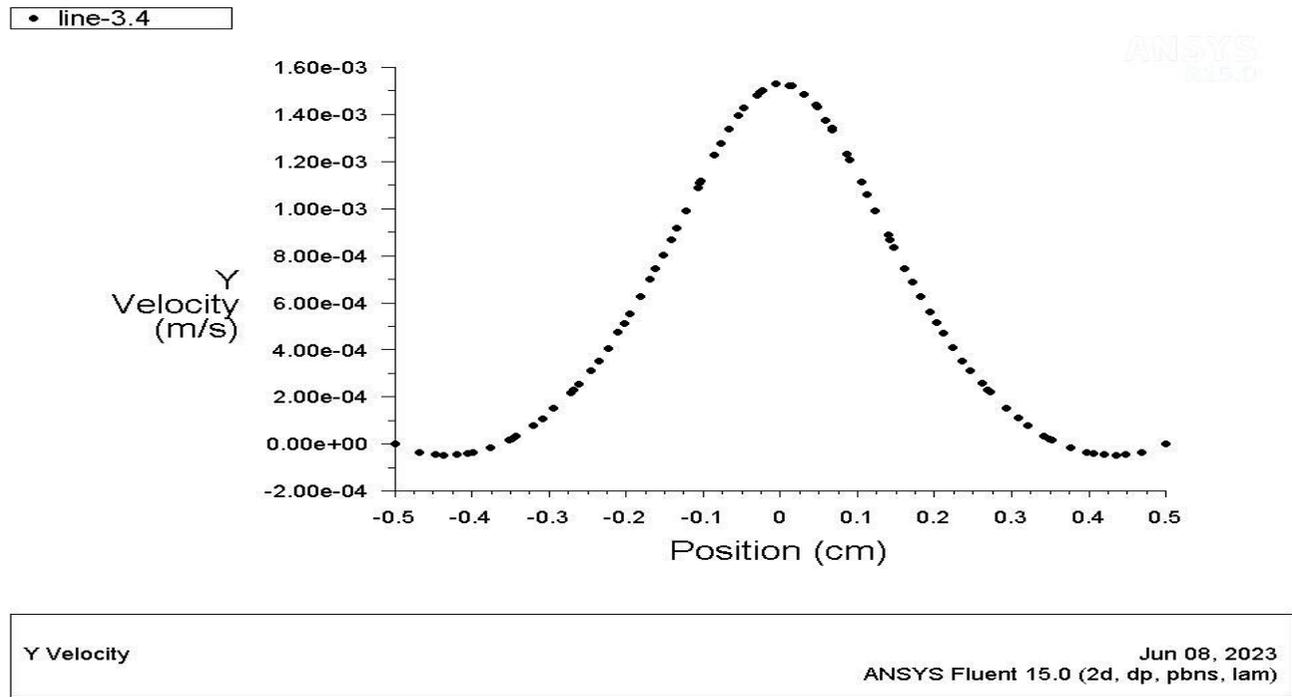


Figure III.20: Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=3.4$

III.4.4.3 Le profil de vitesse V_y autour du cylindre

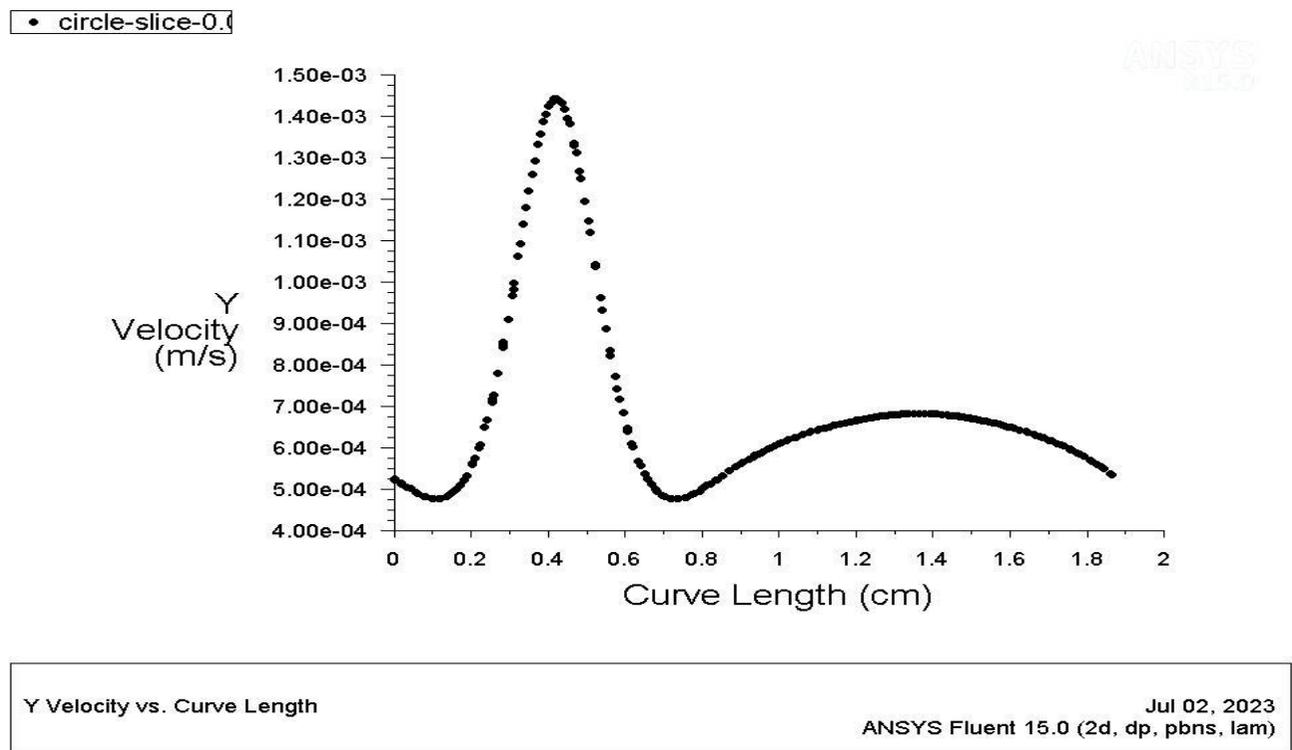


Figure III.21: Le profil de vitesse V_y autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm

III.4.5 Les profils de vitesse V_x

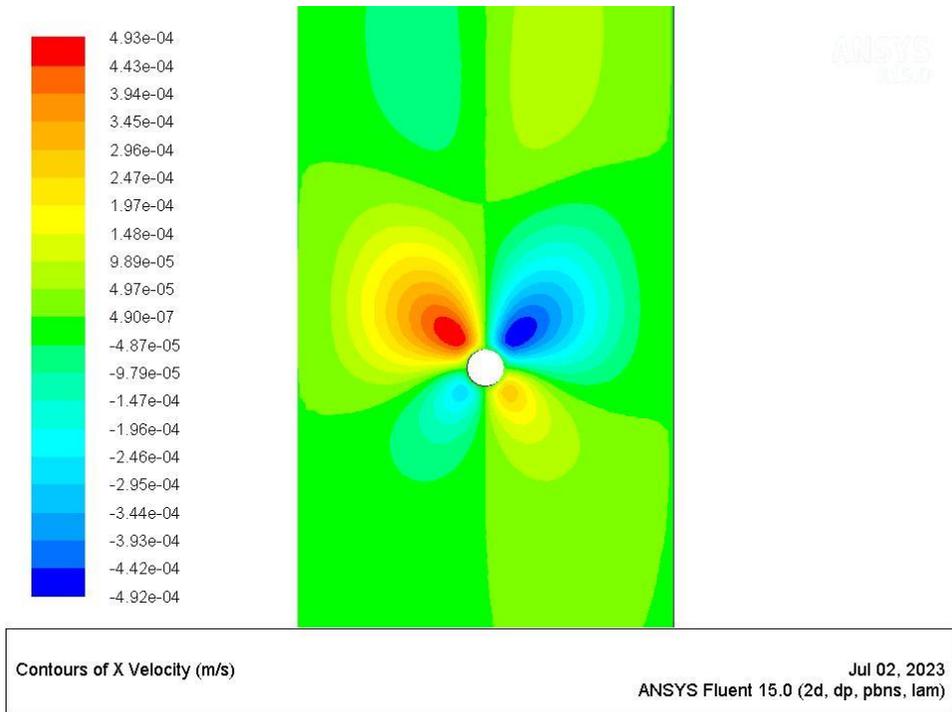


Figure III.22: la distribution des profils de vitesse V_x autour du cylindre

III.4.5.1 Lignes placées sous le cylindre

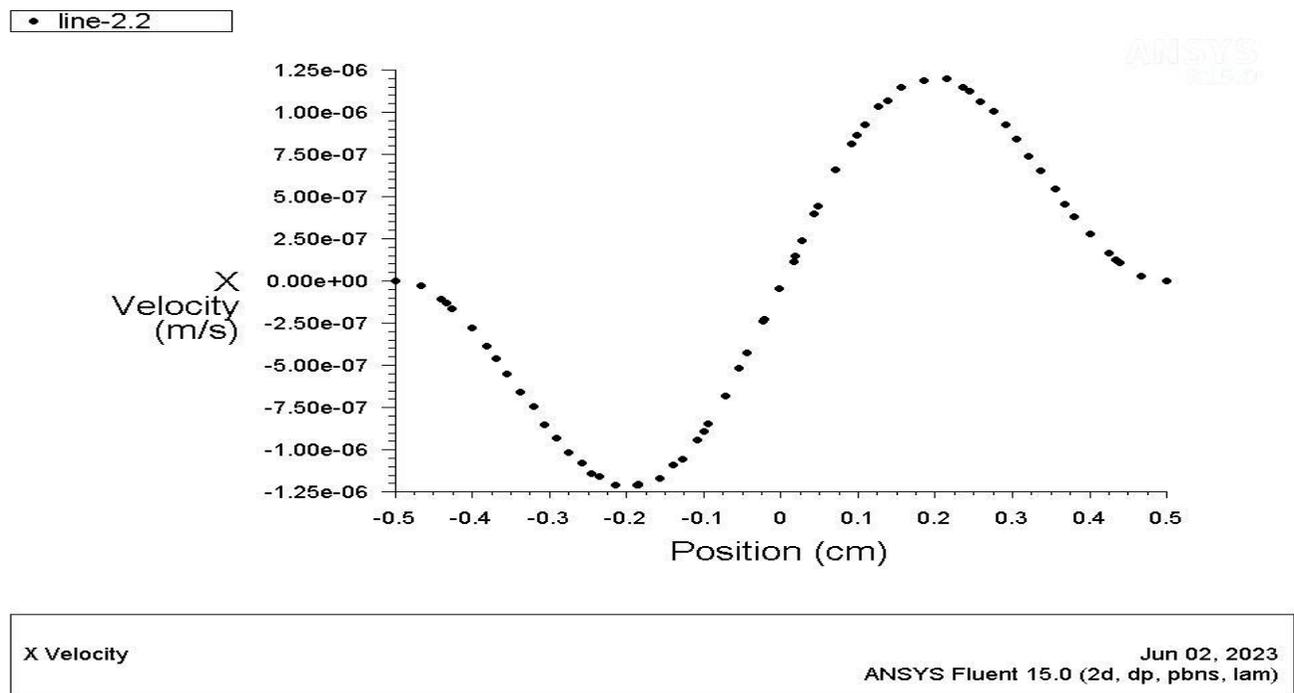


Figure III.23: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=2.2$

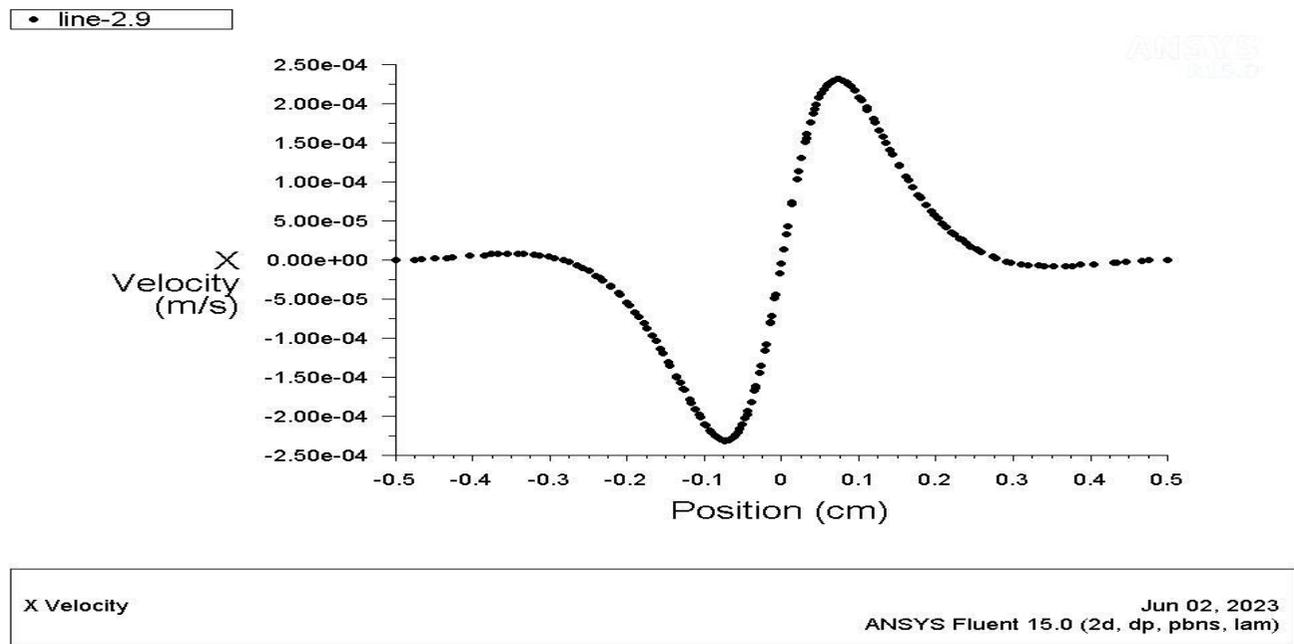


Figure III.24: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=2.9$

III.4.5.2 Lignes placées au-dessus du cylindre

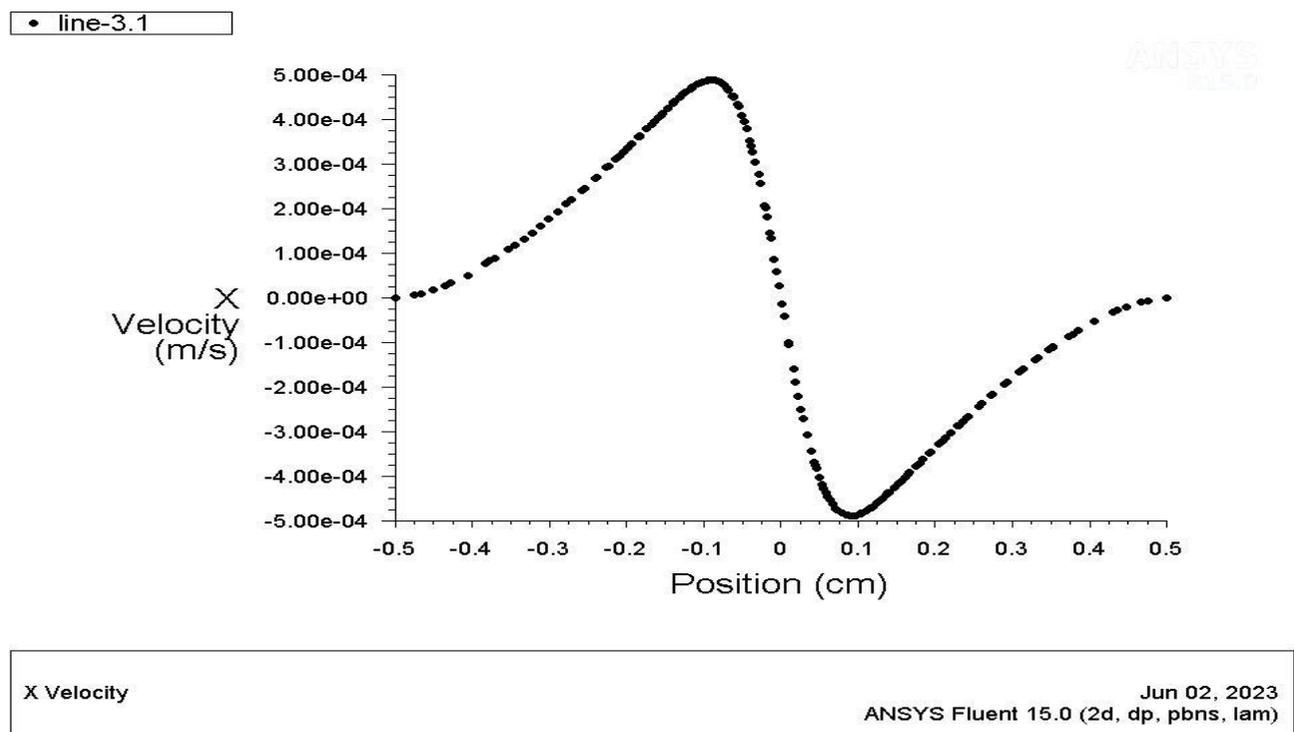


Figure III.25: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=3.1$

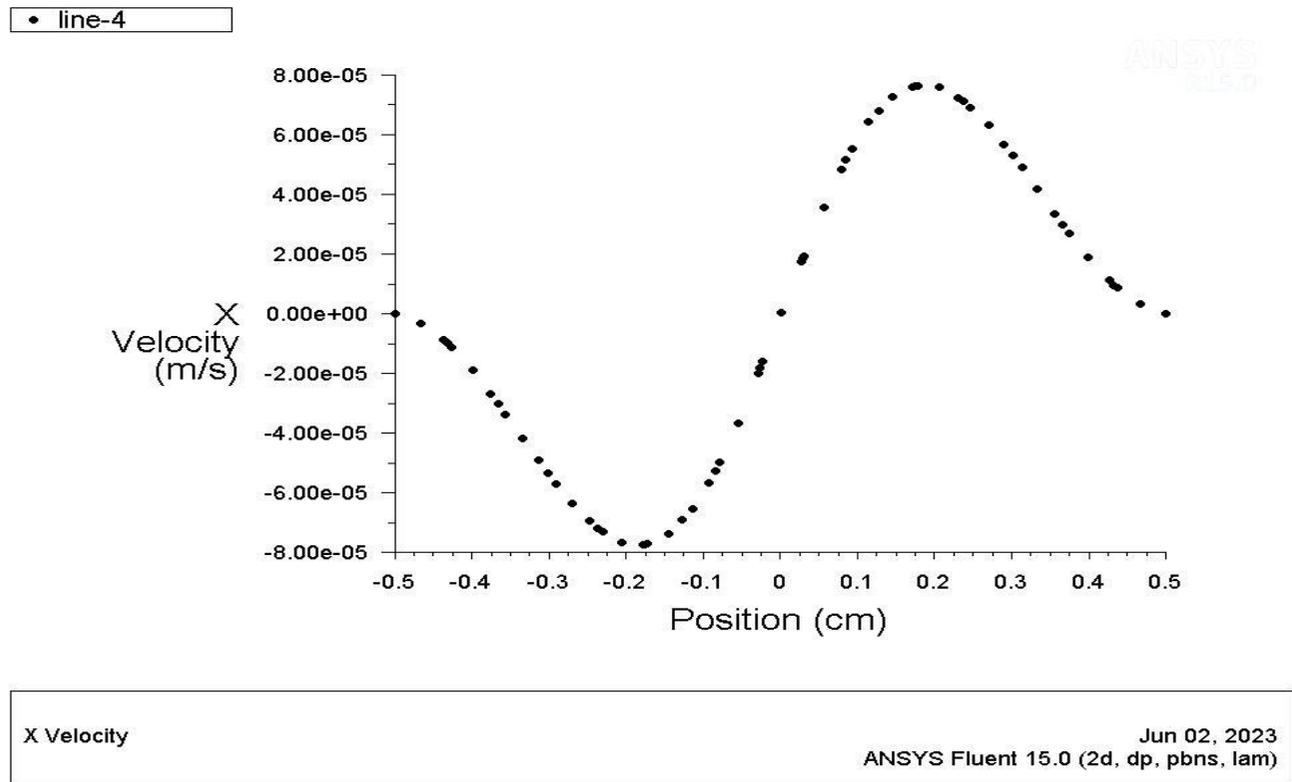


Figure III.26: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=4$

III.4.6 La température statique

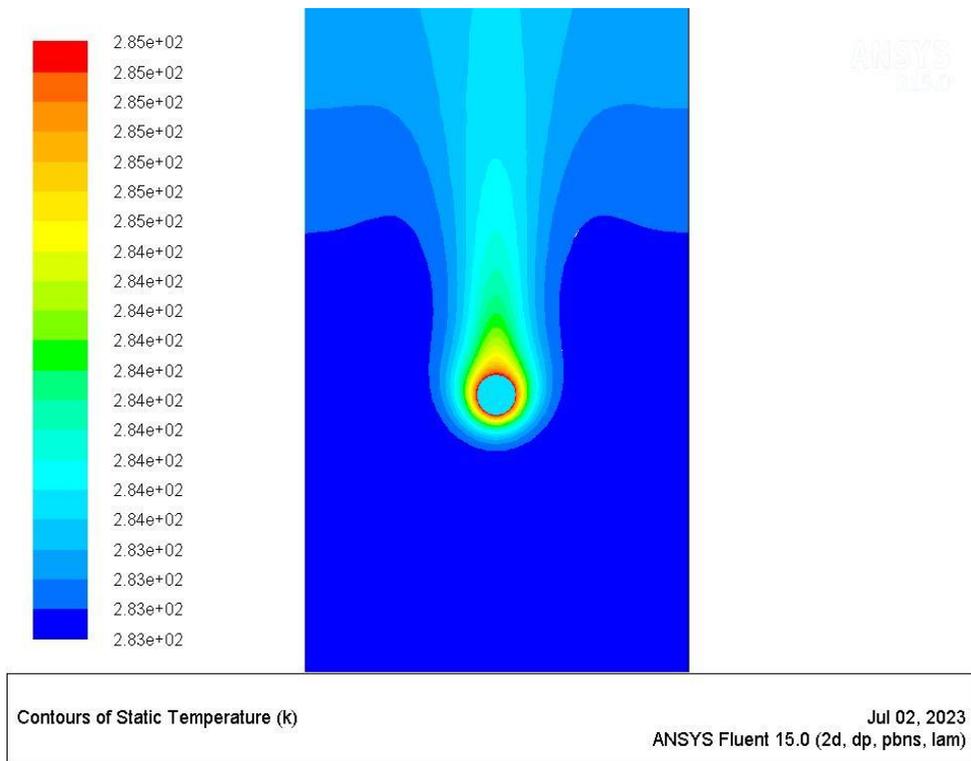


Figure III.27: la distribution de température statique autour du cylindre

III.4.6.1 Lignes placées sous le cylindre

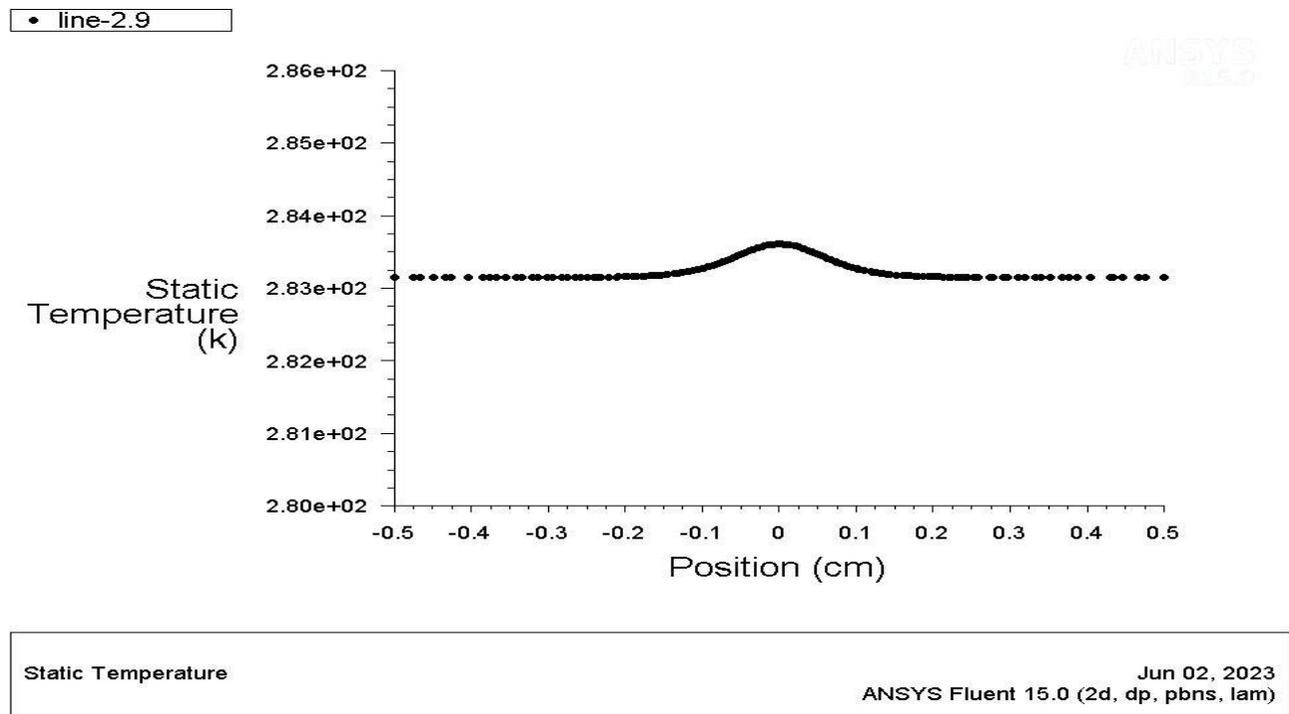


Figure III.28: Température statique en fonction de x à la ligne y=2.9

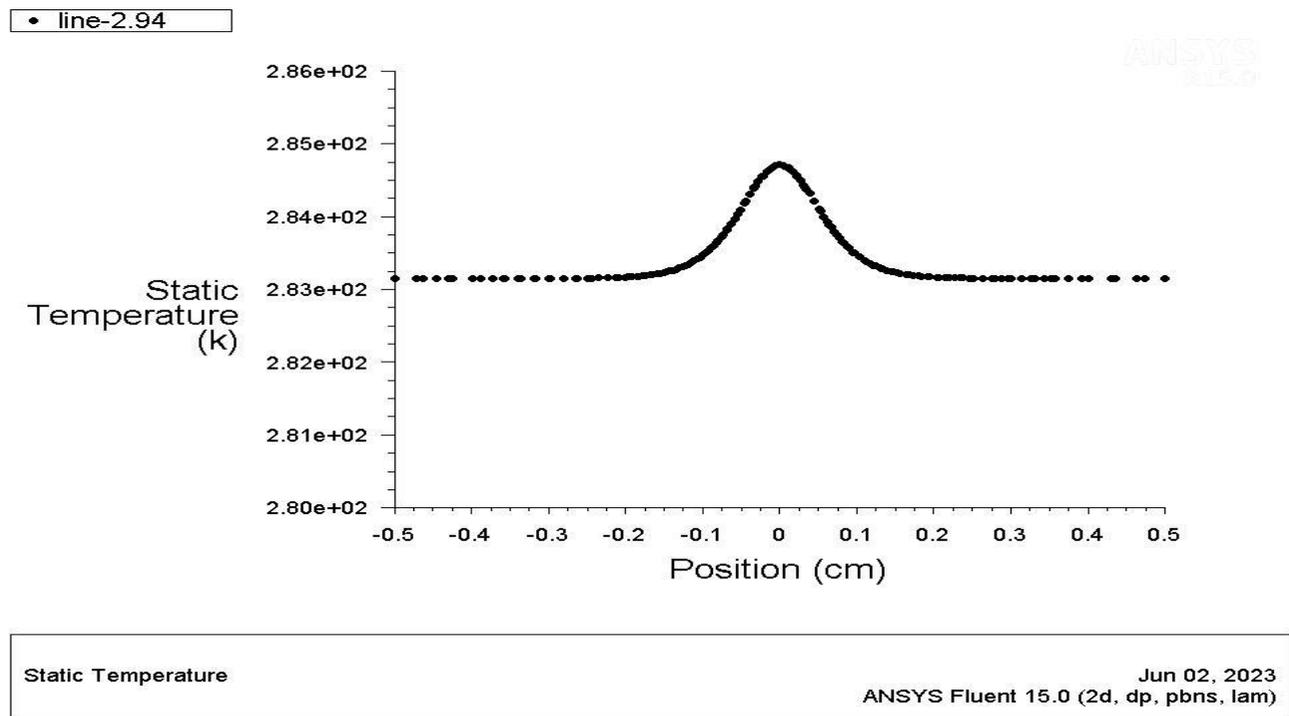


Figure III.29: Température statique en fonction de x à la ligne y=2.94

III.4.6.2 Lignes placées au-dessus du cylindre

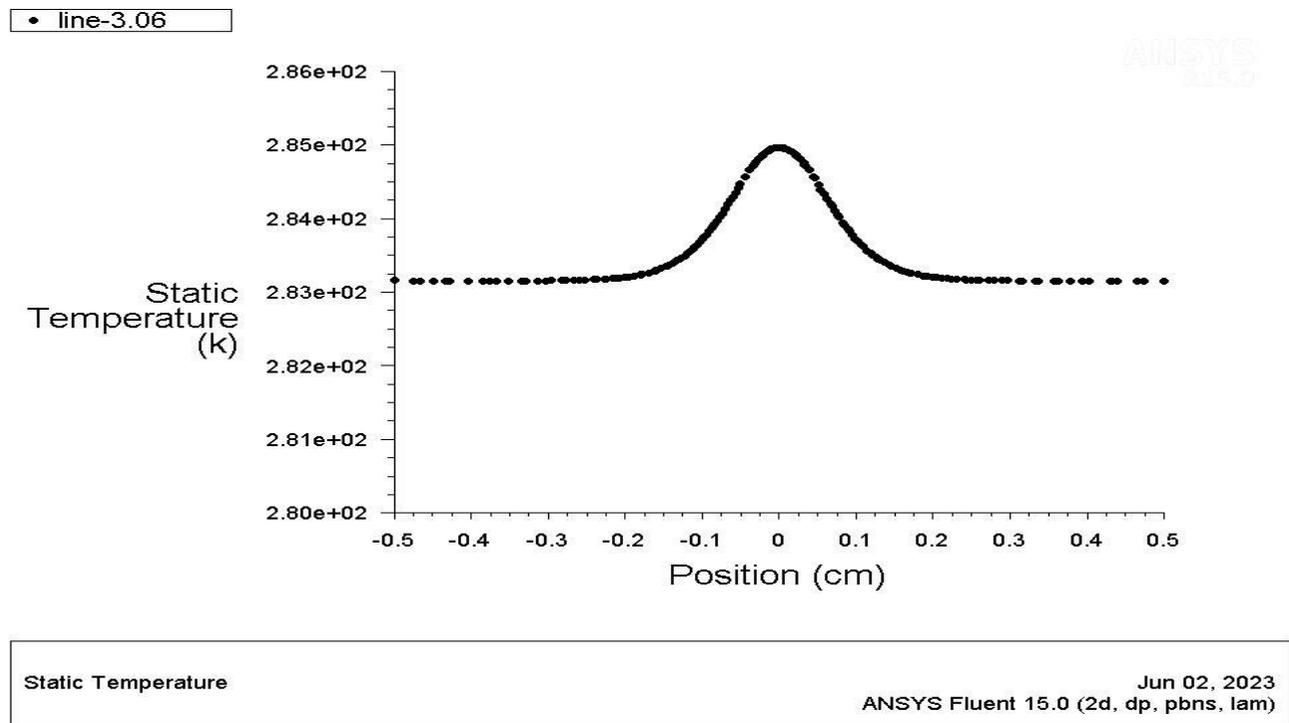


Figure III.30: Température statique en fonction de x à la ligne y=3.06

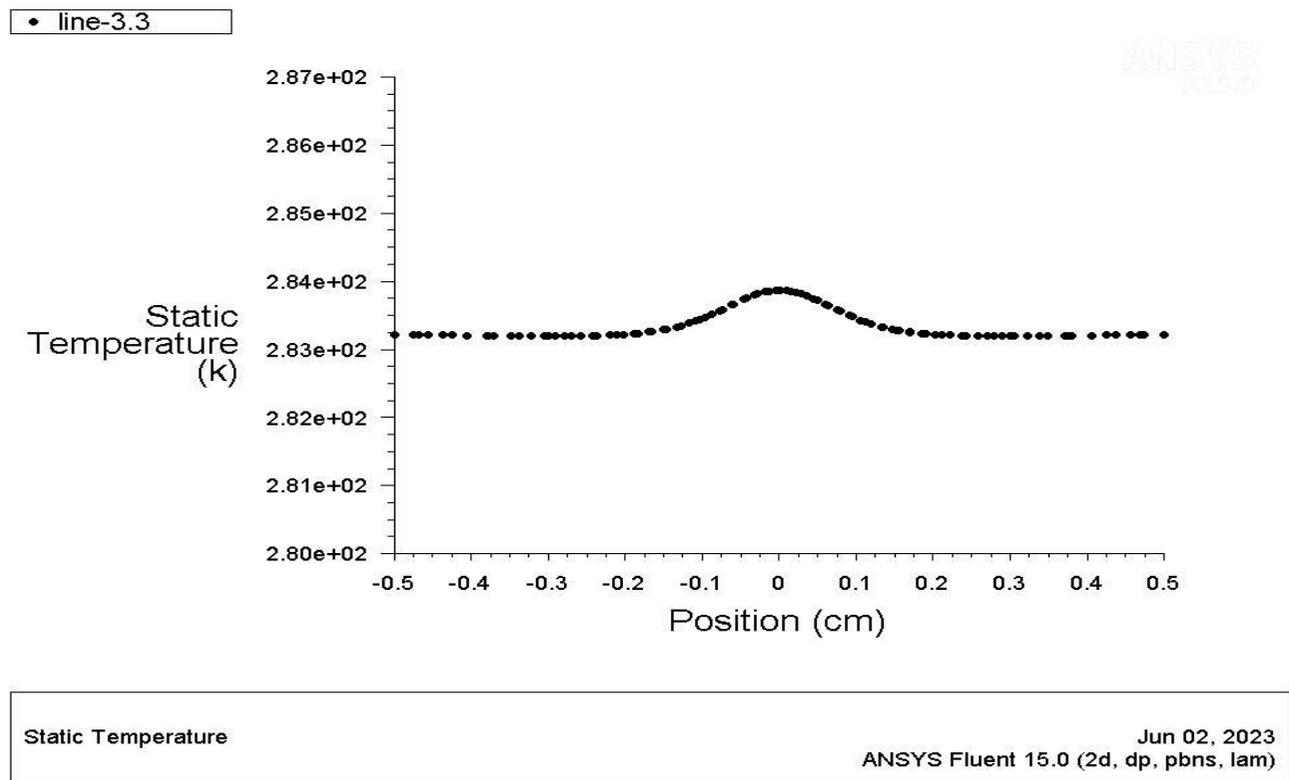
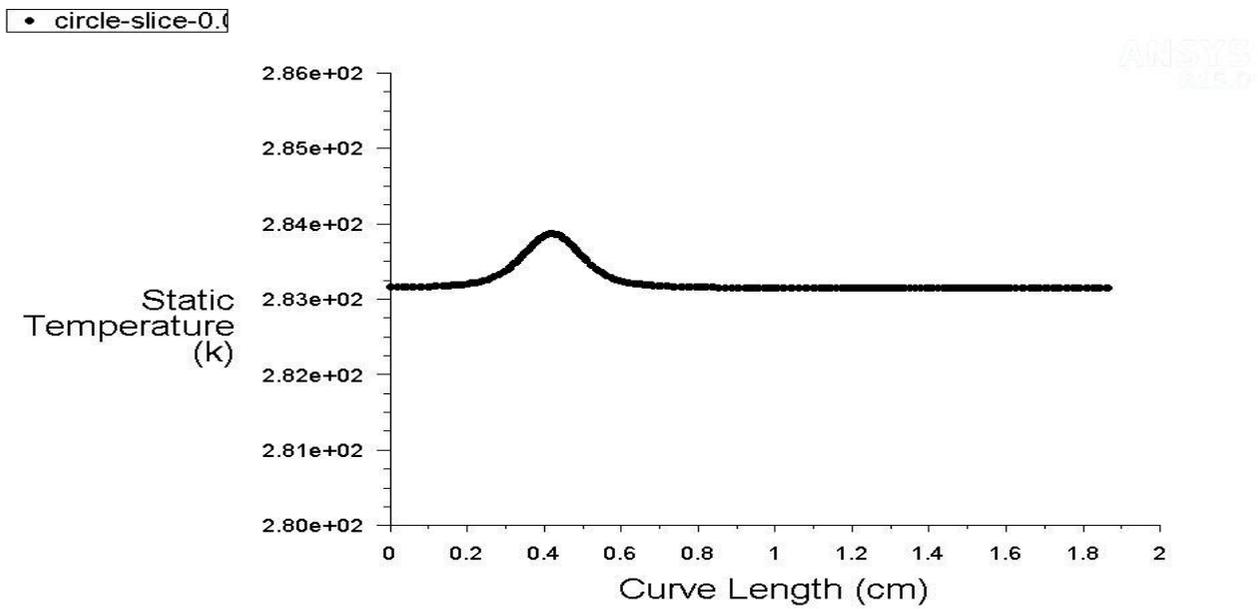


Figure III.31: Température statique en fonction de x à la ligne y=3.3

III.4.6.3 La température statique autour du cylindre



Static Temperature vs. Curve Length Jul 02, 2023
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, lam)

Figure III.32: La température statique autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm

III.4.7 Nombre de Nusselt autour du cylindre.

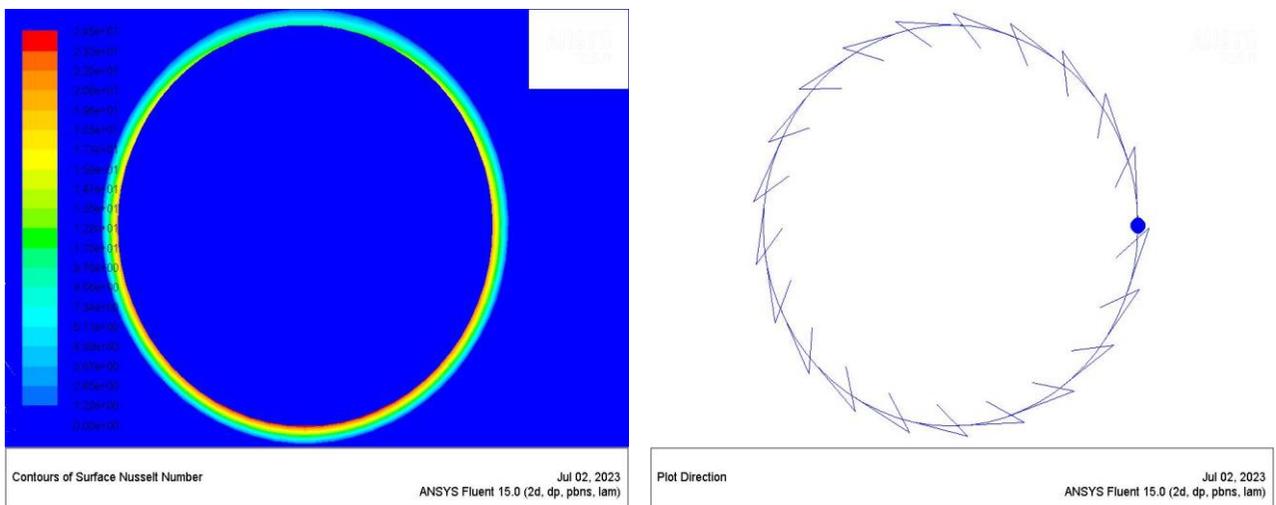


Figure III.33: Les contours de surface, le point de départ et la direction de calcul du nombre de Nusselt autour du cylindre.

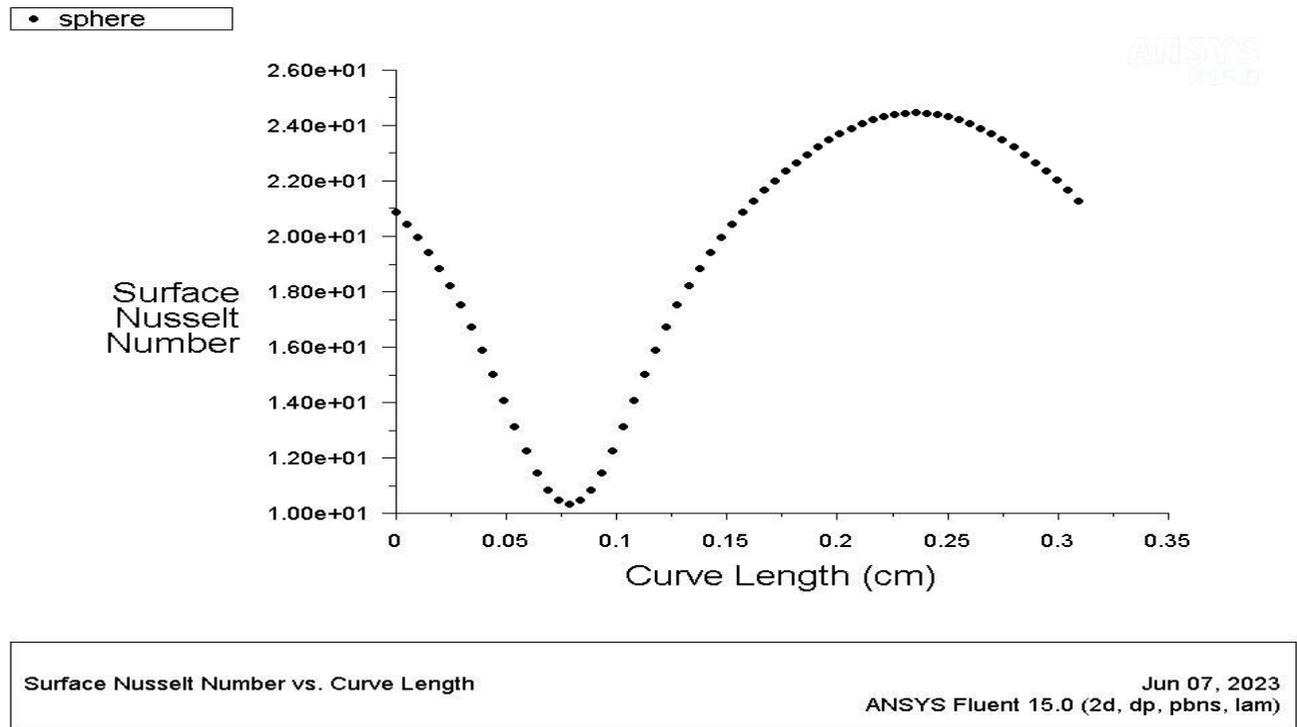


Figure III.34: Nombre de Nusselt autour du cylindre. (curve length)

III.4.8 Les profils de vitesse V_y et V_x a le long de la ligne $x=0.3$

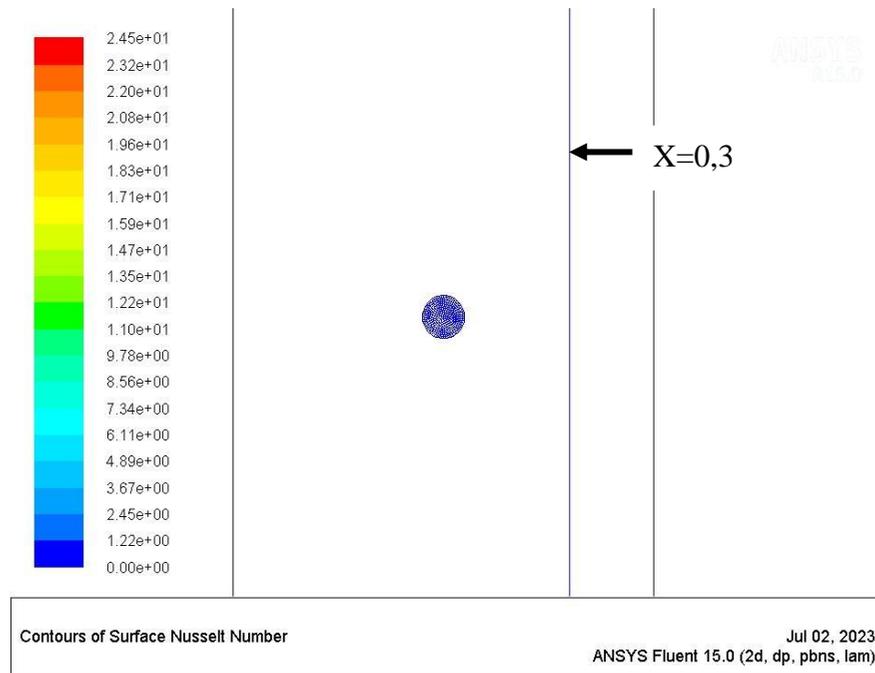


Figure III.35: la ligne $x=0.3$

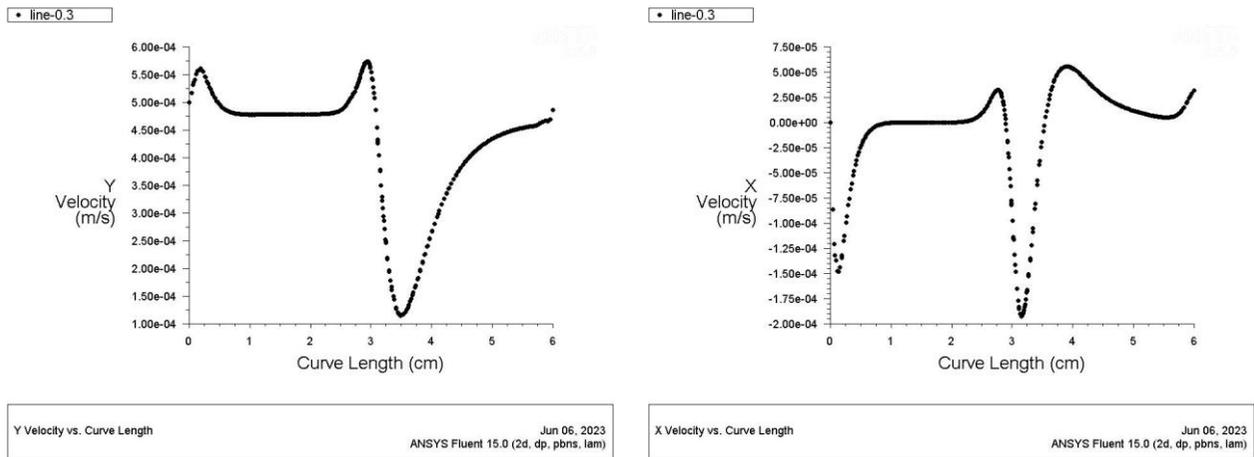


Figure III.36: Les profils de vitesse V_x et V_y a le long de la ligne $x = 0.3$ placée à droite du cylindre

III.5 Résultats de simulations pour $\Delta T = 5$ (k)

Pour $Re = 0.5$ et $\Delta T = 5$ (k), on obtient :

$$Gr = 13.2355$$

$$Ri = 52.942 > 10 \text{ (convection naturelle)}$$

III.5.1 Courbe des résidus et nombre d'itérations

Le nombre d'itération après la convergence est=1292

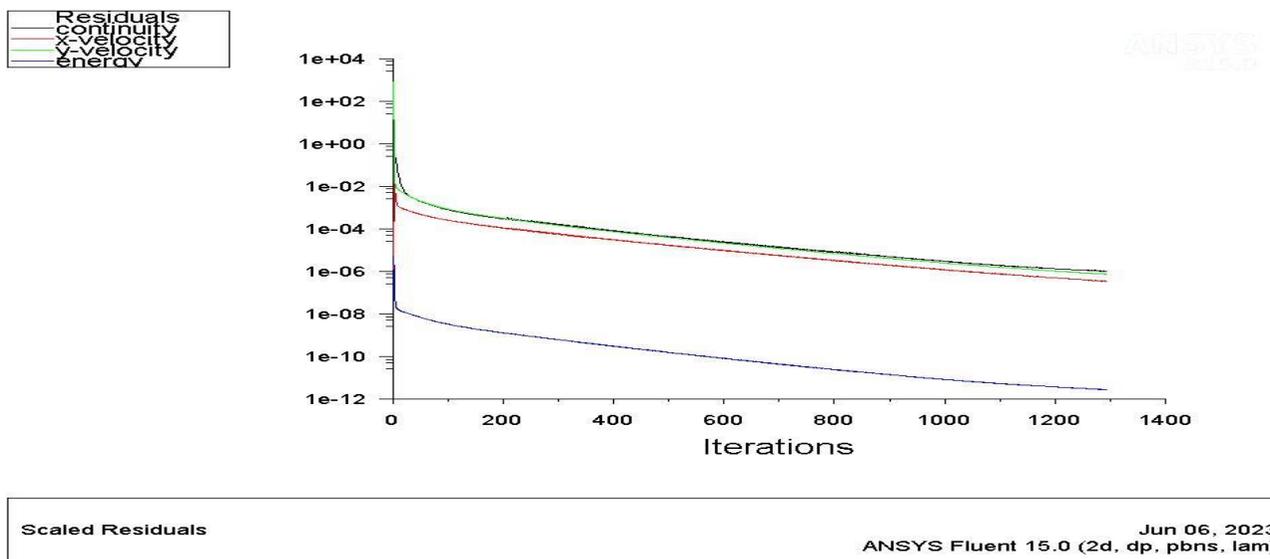


Figure III.37: Evolutions des résidus Pour le maillage $n=20$ $m=150$

III.5.2 La pression statique en fonction de x

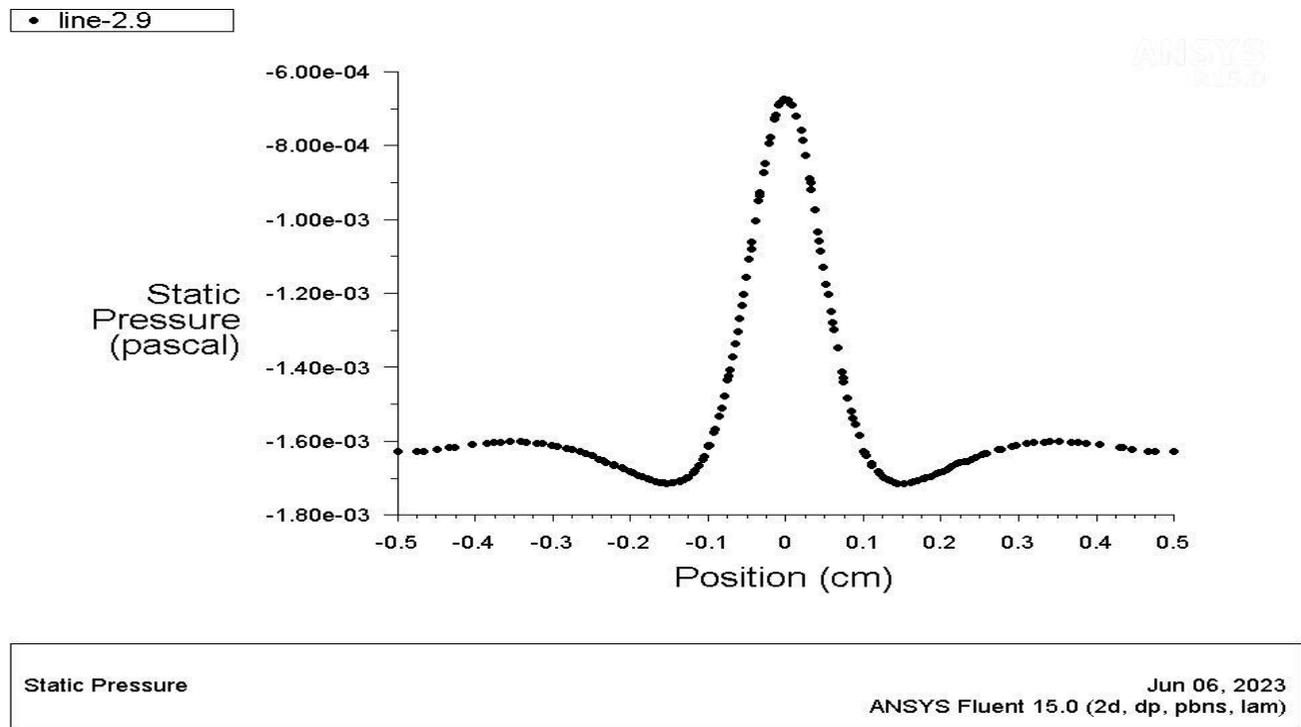


Figure III.38: Pression statique en fonction de x à la ligne y=2.9 cm placée sous le cylindre

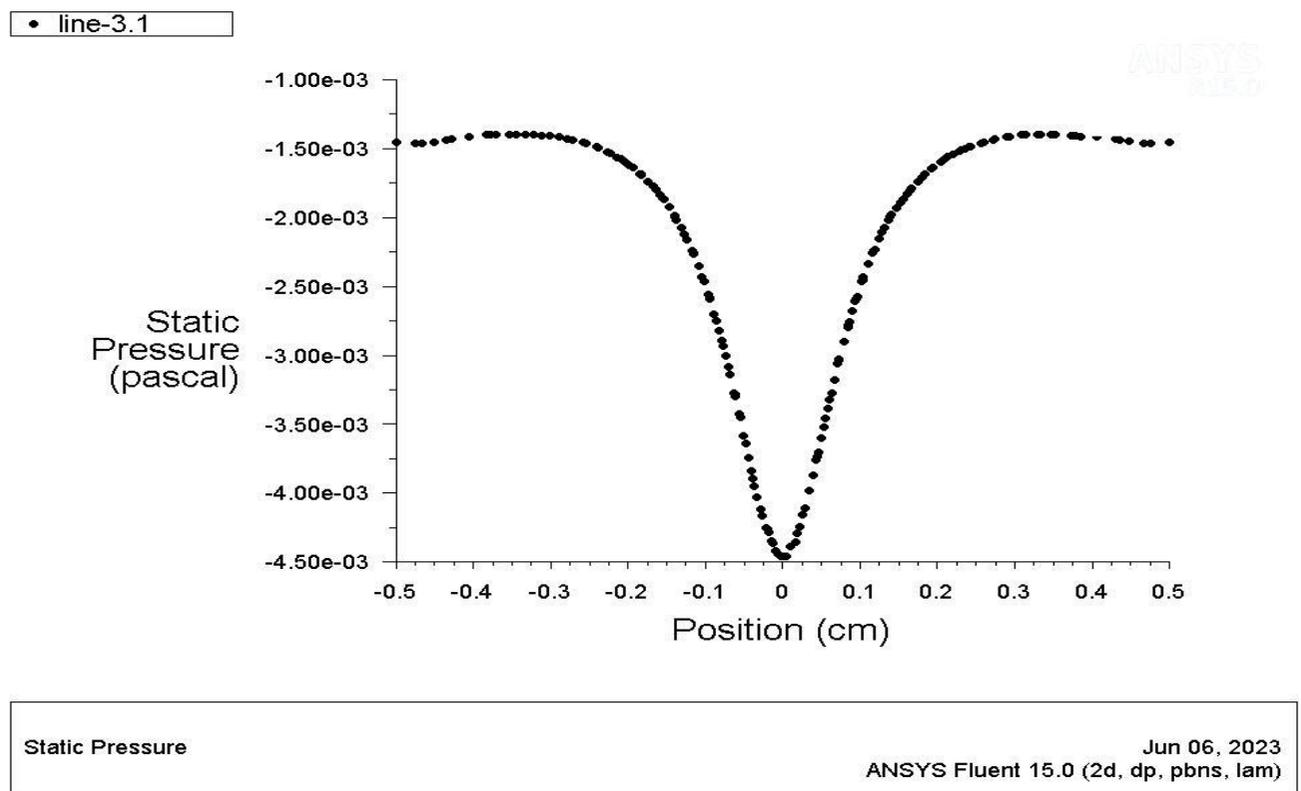


Figure III.39: Pression statique en fonction de x à la ligne y=3.1 cm placée au-dessus du cylindre

III.5.3 La pression statique autour du cylindre

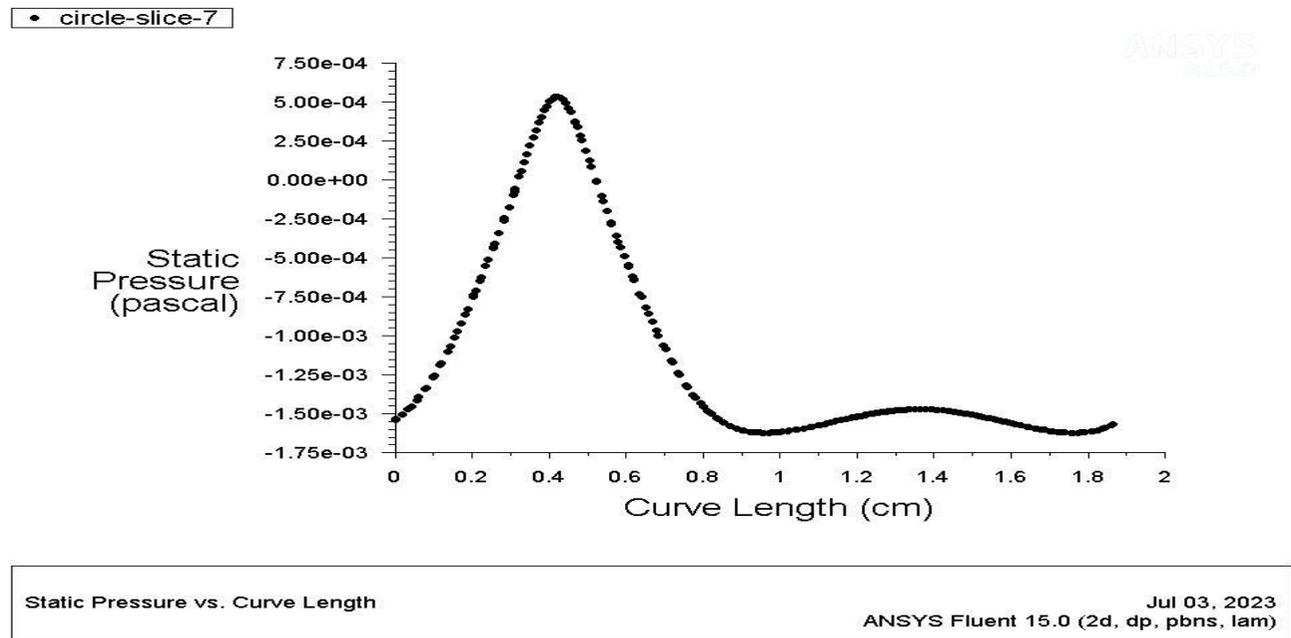


Figure III.40: La pression statique autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm

III.5.4 Les profils de vitesse V_y en fonction de x

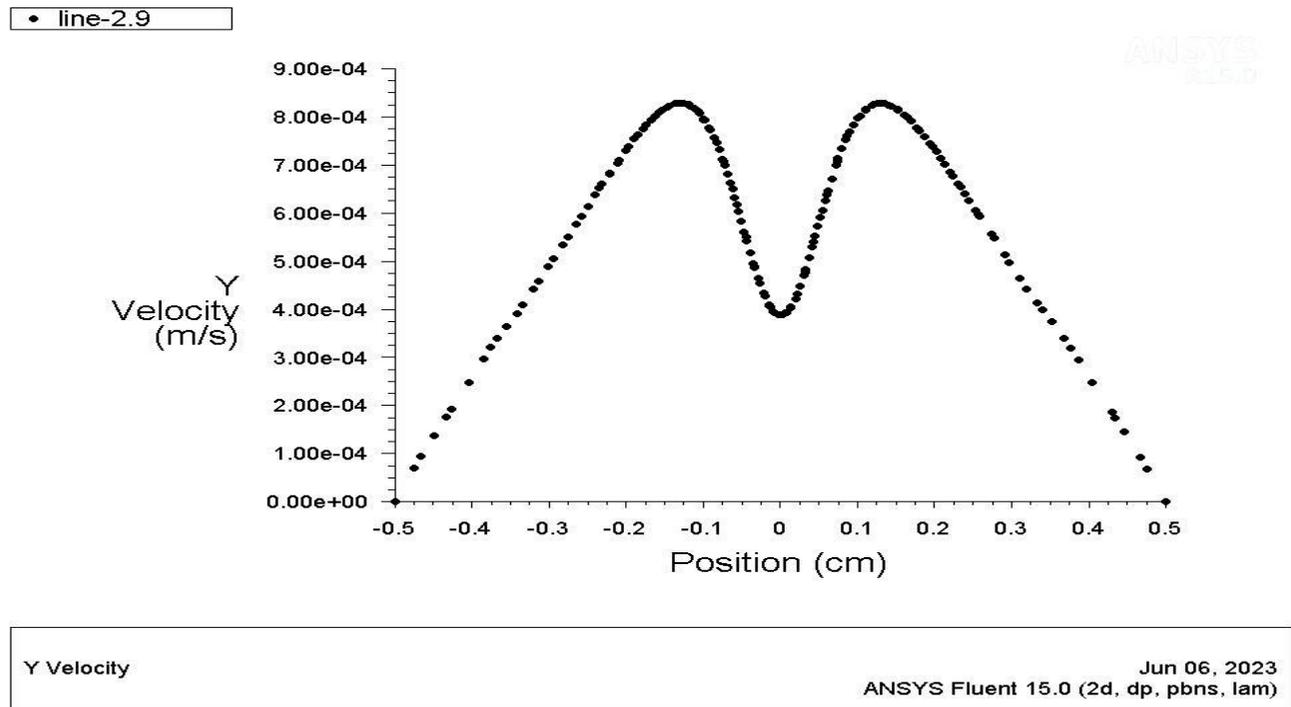


Figure III.41: Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=2.9$ cm placée sous le cylindre

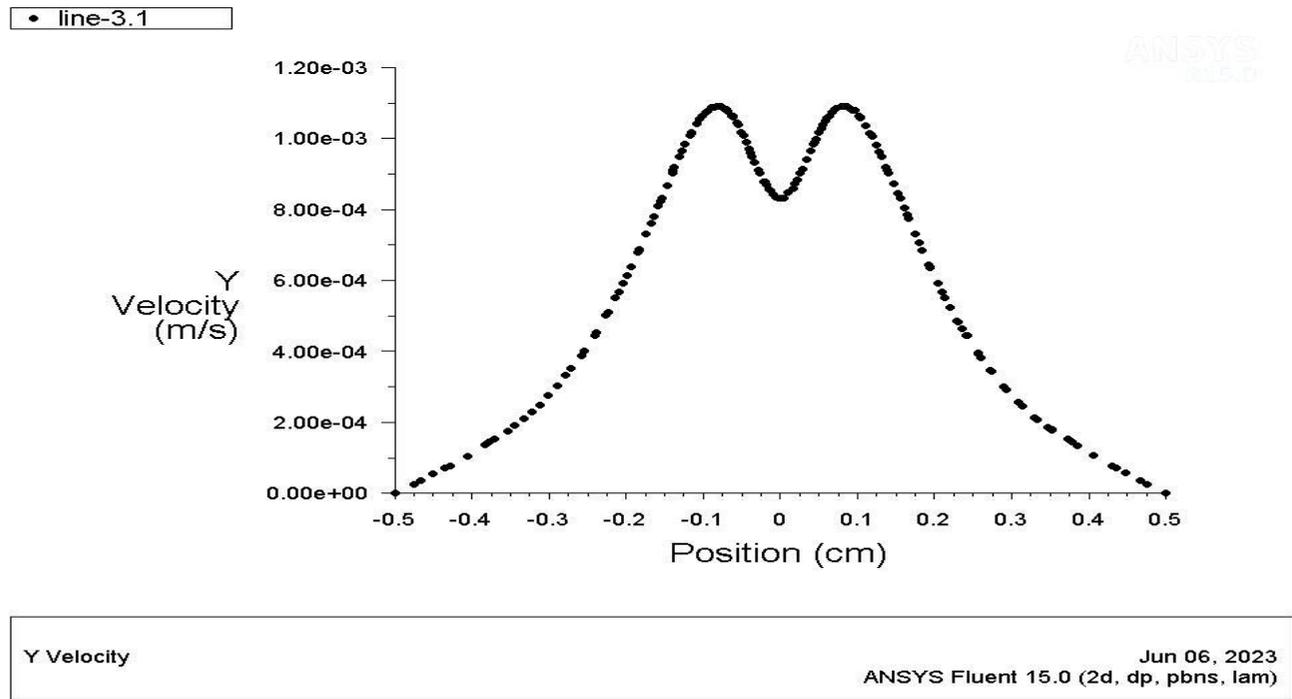


Figure III.42: Le profil de vitesse V_y en fonction de x à la ligne $y=3.1$ cm placée au-dessus du cylindre

III.5.5 Le profil de vitesse V_y autour du cylindre

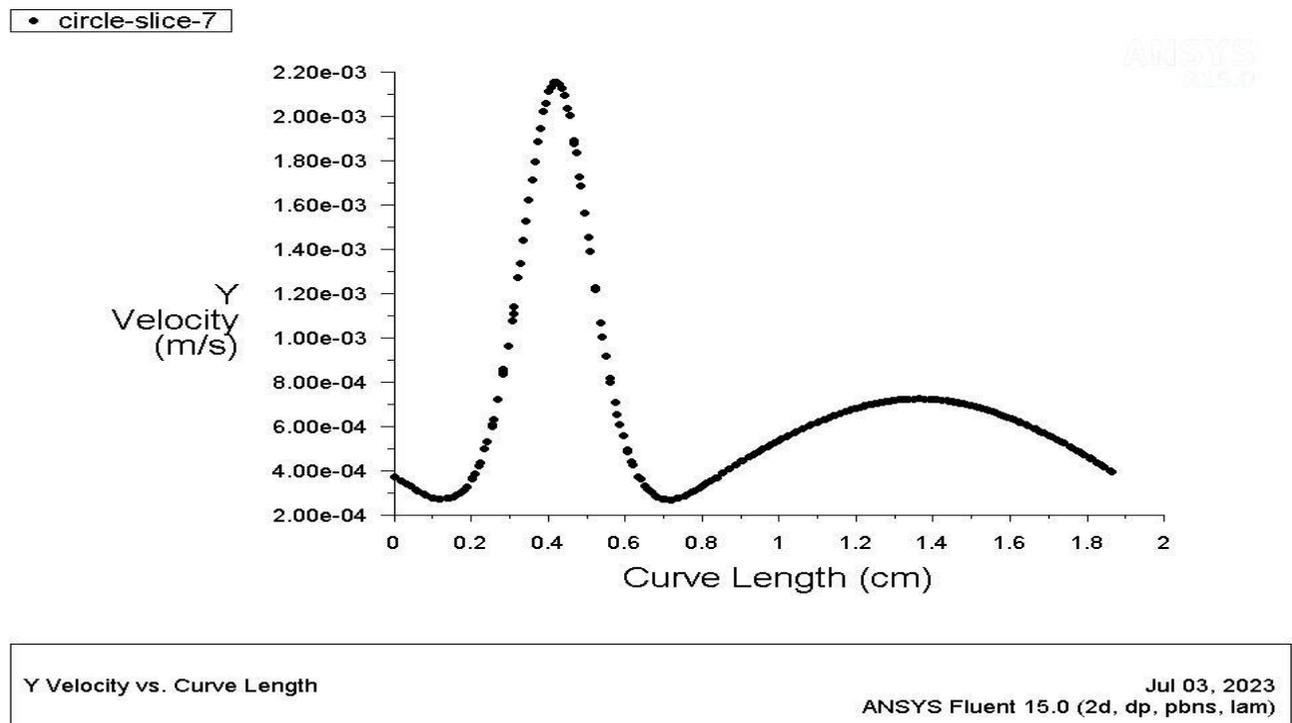


Figure III.43: Le profil de vitesse V_y autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm

III.5.6 Les profils de vitesses V_x en fonction de x

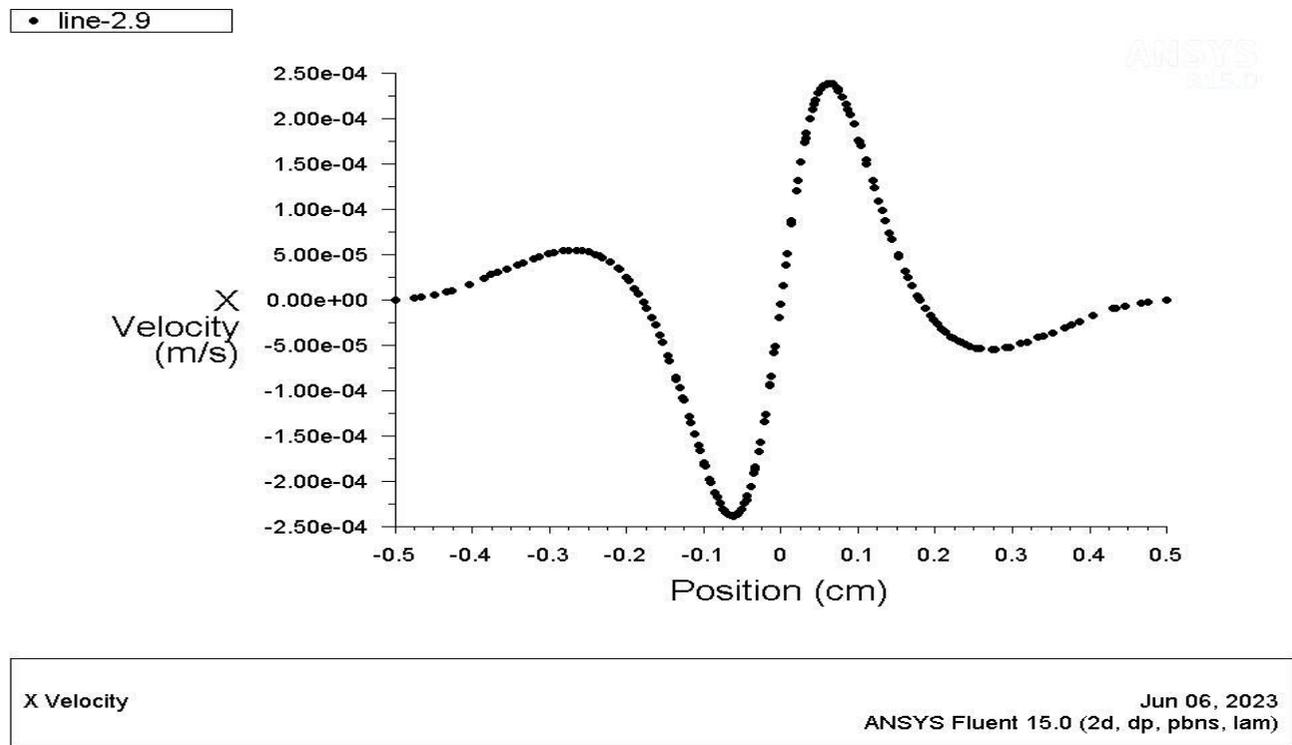


Figure III.44: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=2.9$ cm placée sous le cylindre

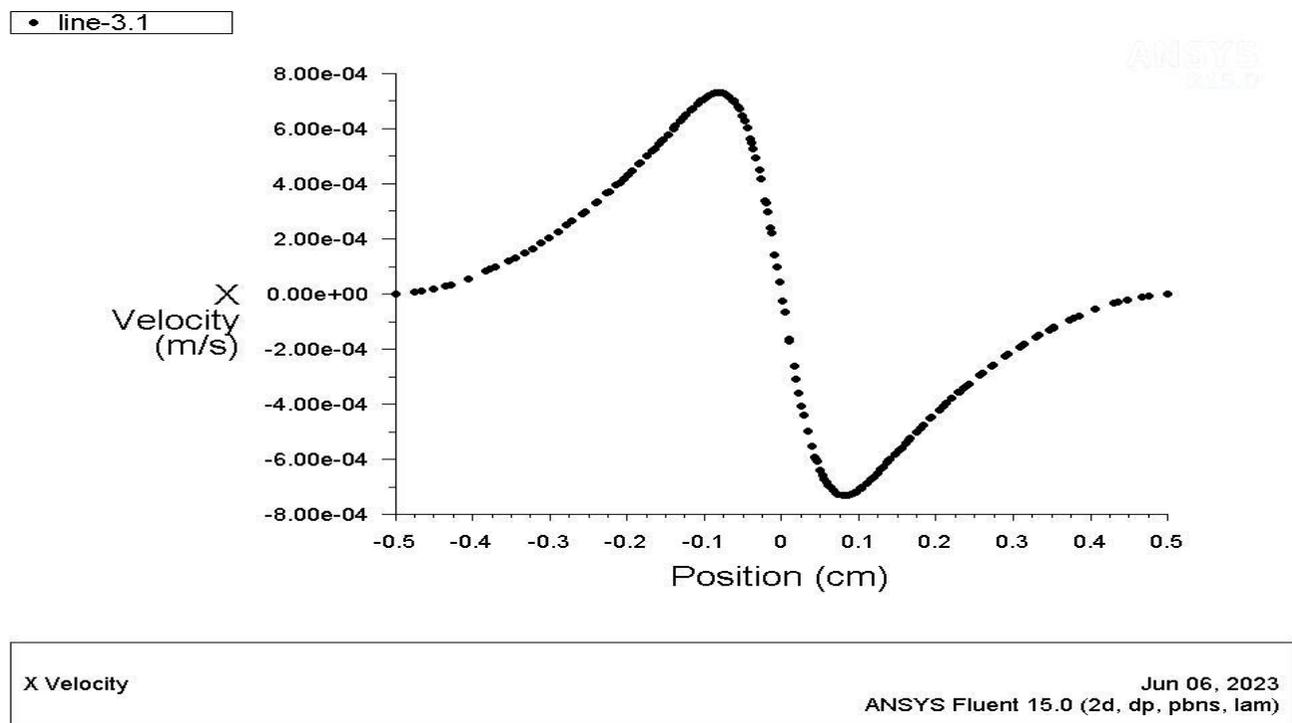


Figure III.45: Le profil de vitesse V_x en fonction de x à la ligne $y=3.1$ cm placée au-dessus du cylindre

III.5.7 La température statique en fonction de x

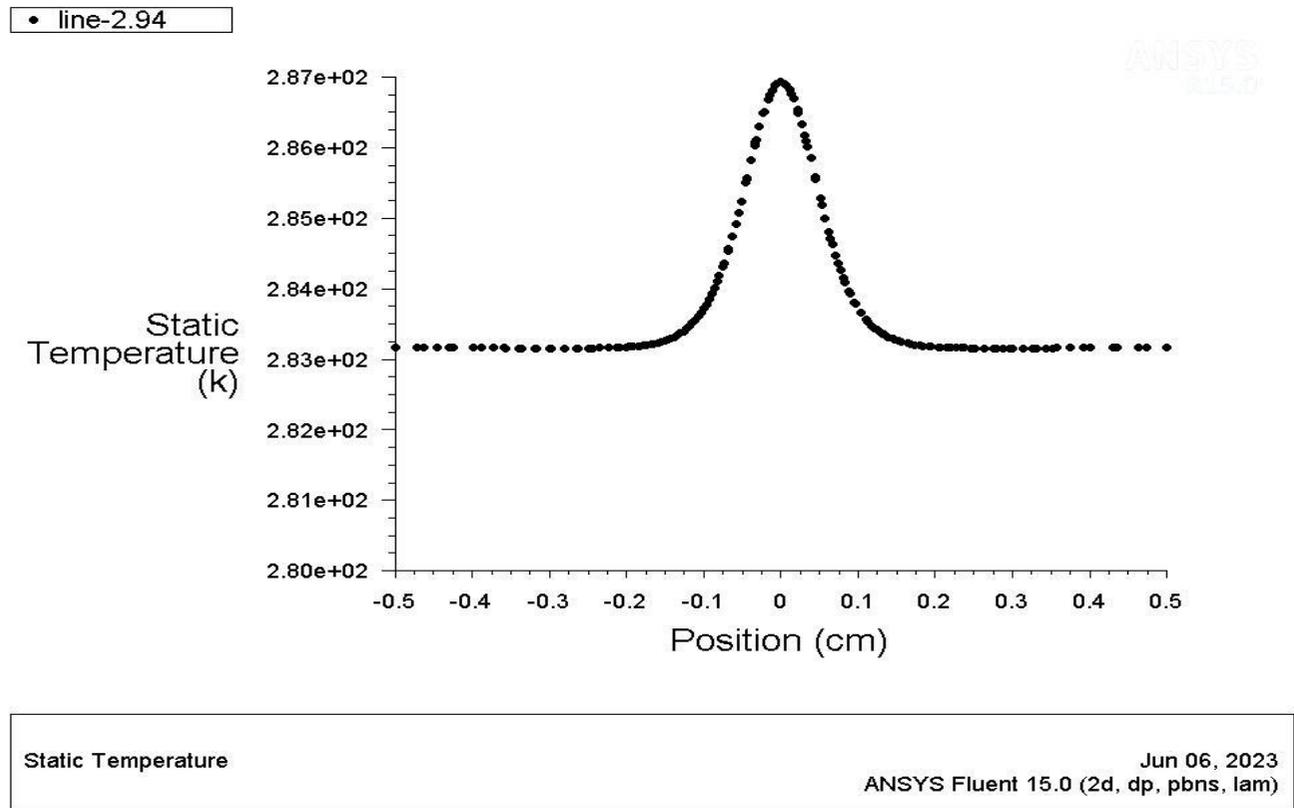


Figure III.46: Température statique en fonction de x à la ligne y=2.94 cm placée sous le cylindre

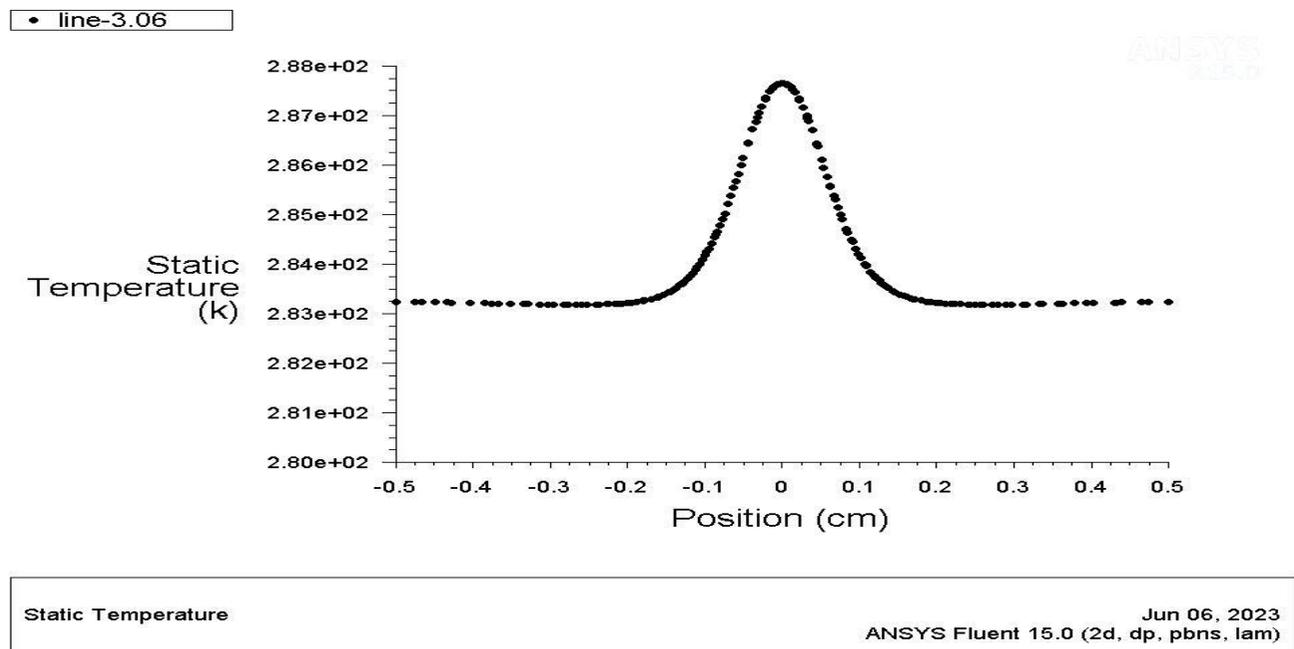
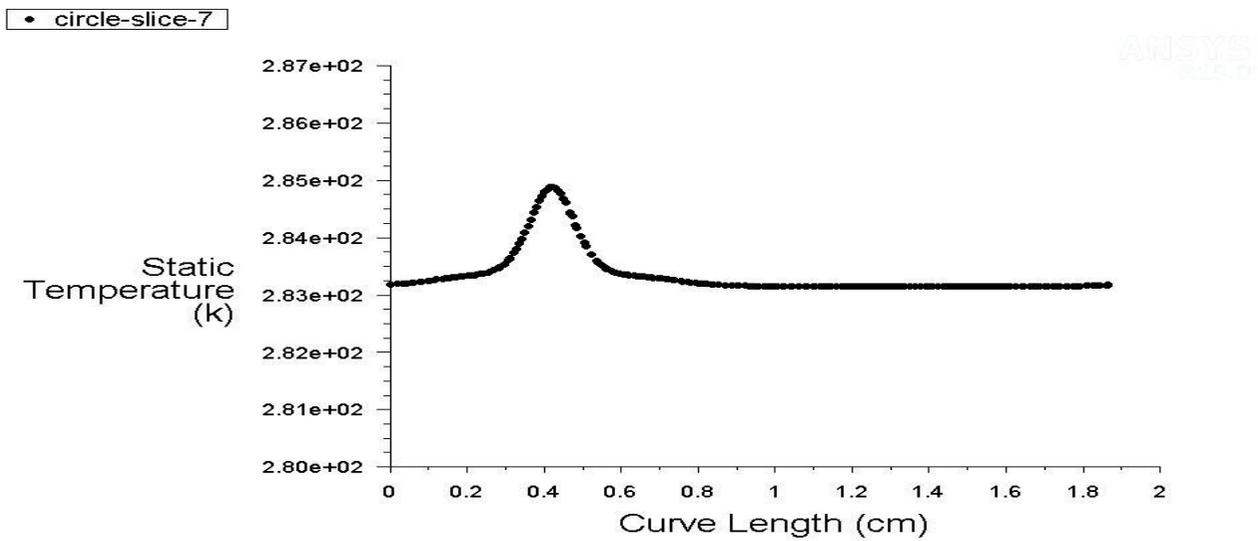


Figure III.47: Température statique en fonction de x à la ligne y=3.06 cm placée au-dessus du cylindre

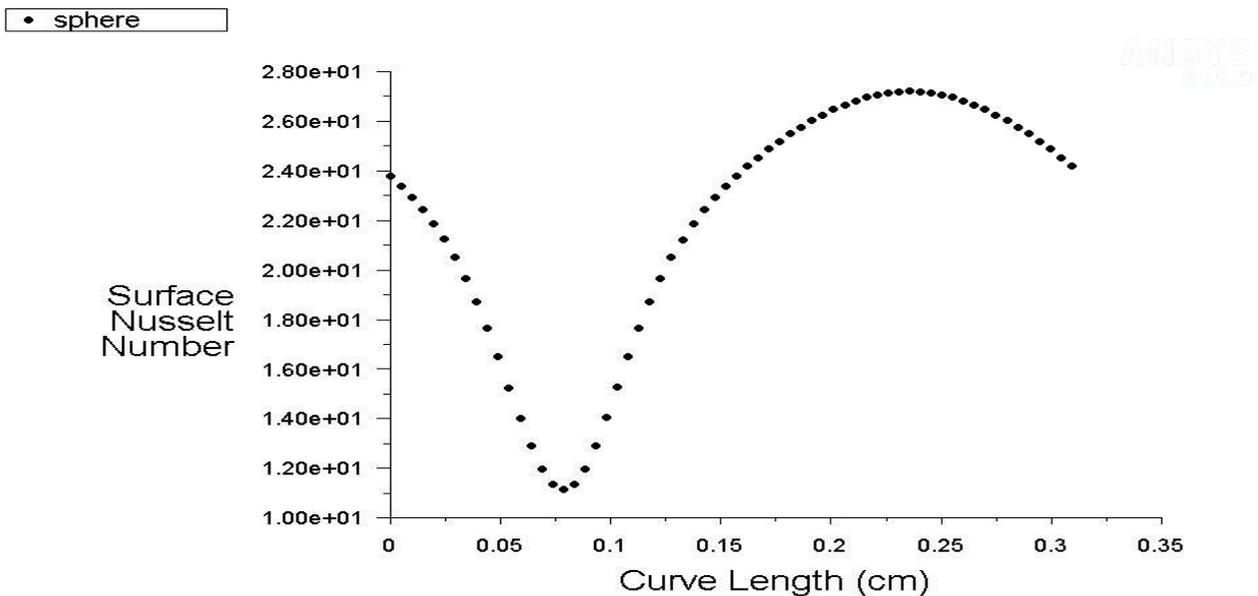
III.5.8 La température statique autour du cylindre



Static Temperature vs. Curve Length Jul 03, 2023
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, lam)

Figure III.48: La température statique autour du cylindre le long d'un cercle de diamètre $D=6$ mm

III.5.9 Nombre de Nusselt autour du cylindre



Surface Nusselt Number vs. Curve Length Jun 07, 2023
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, lam)

Figure III.49: Nombre de Nusselt autour du cylindre (curve length)

III.6 Calcul de (pression, vitesse, température et nombre de Nusselt minimum, moyenne et maximum) à différentes valeurs de (ΔT)

Pour les valeurs de $\Delta T = (1, 2, 3, 4, 5, 6)$ on a :

III.6.1 Pression statique (Pa) en fonction de ΔT (k)

	P (min)	P (moy)	P (max)
$\Delta T = 1$	-0.0062537575	0.00019883548	0.0076497272
$\Delta T = 2$	-0.008132901	0.002632533	0.020899728
$\Delta T = 3$	-0.0097583719	0.0052716797	0.035408705
$\Delta T = 4$	-0.011205739	0.008160149	0.051062156
$\Delta T = 5$	-0.012523921	0.011322379	0.06751012
$\Delta T = 6$	-0.013744557	0.014559456	0.08458773

Tableau III.1: Pression statique minimum, moyenne et maximum (Pa) en fonction de ΔT (k)

III.6.2 Vitesse V_y (m/s) en fonction de ΔT (k)

	V (min)	V (moy)	V (max)
$\Delta T = 1$	-3.4334503e-06	0.00051915133	0.0011801959
$\Delta T = 2$	-7.4038573e-05	0.00052958325	0.0015422778
$\Delta T = 3$	-0.00012401832	0.0005362216	0.001799825
$\Delta T = 4$	-0.00015801725	0.00054115814	0.0020116067
$\Delta T = 5$	-0.00017968462	0.00054530933	0.0021917906
$\Delta T = 6$	-0.00019506161	0.00054839696	0.002346304

Tableau III.2: la vitesse V_y minimum, moyenne et maximum (m/s) en fonction de ΔT (k)

III.6.3 Température statique (K) en fonction de ΔT (k)

	T (min)	T (moy)	T (max)
$\Delta T = 1$	283.15	283.23911	284.15
$\Delta T = 2$	283.15	283.33115	285.15
$\Delta T = 3$	283.15	283.4286	286.15
$\Delta T = 4$	283.15	283.53104	287.15
$\Delta T = 5$	283.15	283.63861	288.15
$\Delta T = 6$	283.15	283.74884	289.15

Tableau III.3: température statique minimum, moyenne et maximum (k) en fonction de ΔT (k)

III.6.4 Nombre de Nusselt autour du cylindre en fonction de ΔT (k)

	Nu (min)	Nu (moy)	Nu (max)
$\Delta T = 1$	9.812977	17.99912	23.10861
$\Delta T = 2$	10.32653	19.41313	24.460102
$\Delta T = 3$	10.680087	20.460652	25.529756
$\Delta T = 4$	10.944917	21.297742	26.428127
$\Delta T = 5$	11.156768	22.002102	27.213359
$\Delta T = 6$	11.333772	22.613525	27.913059

Tableau III.4: nombre de Nusselt minimum, moyenne et maximum autour du cylindre en fonction de ΔT (k)

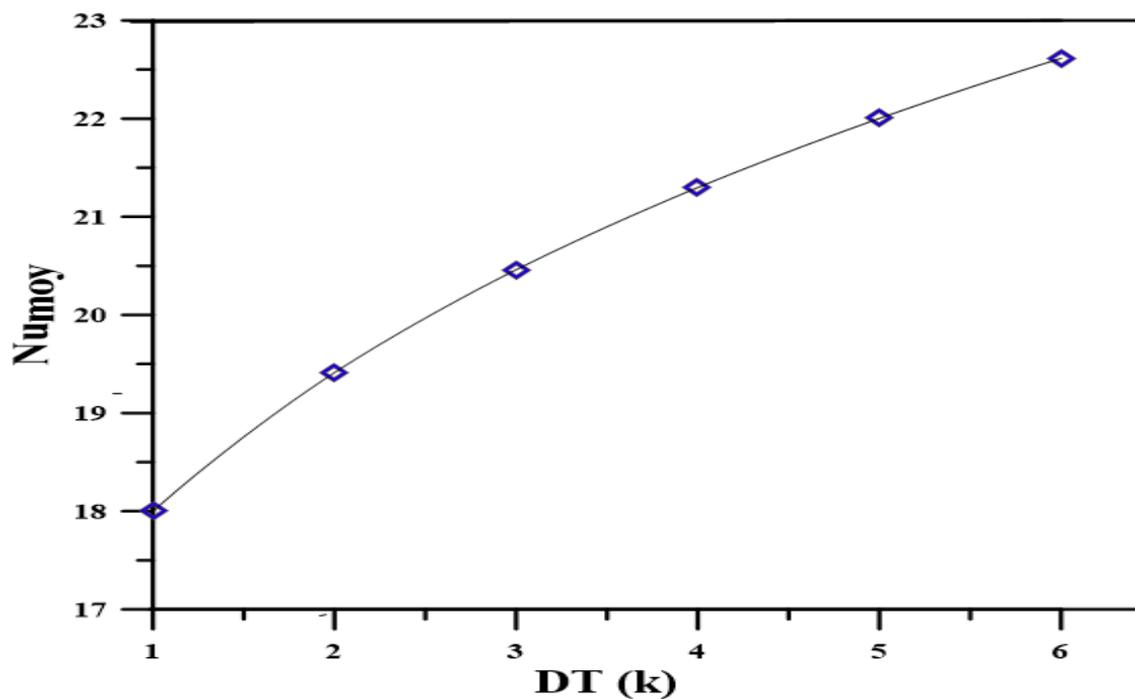


Figure III.50: Variation du nombre de Nusselt moyen autour du cylindre en fonction de ΔT (k)

III.7 Commentaires et discussion

III.7.1 Pression statique, profil de vitesse et température en fonction de x

Pour les courbes de profil de vitesse, de pression statique et de température en fonction de x, on observe que lorsque la température du fluide augmente, la vitesse d'écoulement augmente et la pression statique diminue, comme le montrent les figures III (11 à 32) et (38 à 48).

Les courbes montrent qu'il existe une relation entre le gradient de température dans le système, la vitesse d'écoulement et la pression statique. Lorsqu'il y a une différence de température entre le

cylindre et le fluide, un transfert de chaleur s'opère du corps chaud (le cylindre chauffé) vers le fluide environnant, créant ainsi un gradient de température.

Ce transfert de chaleur entraîne une augmentation de la température du fluide à proximité du cylindre. Cela se traduit par une augmentation de la vitesse de l'écoulement autour du cylindre.

Selon le principe de Bernoulli :

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = cte \quad III.1$$

Lorsque la vitesse de l'écoulement augmente, la pression statique diminue. Cette relation inverse entre la vitesse et la pression conduit à une diminution de la pression statique à mesure que la vitesse de l'écoulement augmente en raison de l'augmentation de la température du fluide. Ceci est en accord avec le principe de conservation de l'énergie dans l'écoulement.

Lorsque l'écoulement est adjacent au cylindre (à sa gauche et à sa droite), la diminution de la section transversale de passage entraîne une augmentation de la vitesse et une diminution de la pression afin de maintenir l'énergie totale de l'écoulement constante, conformément au principe de Bernoulli. Ces observations mettent en évidence l'importance de l'équilibre entre les effets visqueux et les effets de pression dans un écoulement de Stokes autour d'un cylindre chauffé.

III.7.2 Profil de vitesse V_x en fonction de x

Les courbes de profil de vitesse V_x en fonction de x révèlent la présence de deux zones distinctes séparées par l'axe $y = 0$, comme le montrent les figures III (22 à 26, et 44, 45). Ces résultats sont obtenus à partir de la projection des vecteurs vitesse le long de l'axe x . Dans les zones négatives, la vitesse est dirigée vers la gauche (en direction négative de l'axe x), tandis que dans les zones positives, la vitesse est dirigée vers la droite (en direction positive de l'axe x). L'axe $y = 0$ représente la limite entre ces deux directions opposées de la vitesse. Les deux zones distinctes de vitesse dirigées vers la gauche et vers la droite sont principalement le résultat de la symétrie de l'écoulement, de la déviation du fluide autour du cylindre en raison de la géométrie du système.

III.7.3 Nombre de Nusselt autour du cylindre

Les figures III (33, 34, et 49) représentent la variation du nombre de Nusselt autour du cylindre. Lorsque le fluide s'écoule autour du cylindre chauffé, il y a un transfert de chaleur du cylindre vers le fluide. Sous le cylindre, la couche limite thermique est plus mince en raison du fort gradient thermique causé par l'arrivée de fluide froid sur le cylindre chaud, ce qui favorise un meilleur transfert de chaleur. Cela se traduit par des valeurs de nombre de Nusselt plus élevées. Au-dessus du cylindre, la couche limite thermique est plus épaisse en raison du faible gradient thermique causé par

le départ du fluide chauffée par sur le cylindre, ce qui diminue l'efficacité du transfert de chaleur et entraîne des valeurs de nombre de Nusselt plus faibles.

III.7.4 Les profils de vitesse V_x et V_y a le long de la ligne $x = 0.3$

D'après la figure III.36. Nous avons observé que lorsque V_y est constant, V_x devient nul, ce qui indique un écoulement établi. Près du cylindre, nous avons observé plusieurs cas différents. En général, lorsque V_y augmente, V_x diminue et vice versa. Cependant, à proximité du cylindre, V_y et V_x augmentent simultanément en raison de la diminution de la section transversale qui entraîne une augmentation de la vitesse d'écoulement. Ces variations sont influencées par la vitesse, la géométrie du cylindre et les effets thermiques, ce qui impacte la direction et l'intensité de l'écoulement.

III.7.5 Les variations de pression statique et de vitesse V_y en fonction de ΔT (k)

D'après les tableaux III.1 et III.2, on remarque que lorsque la différence de température (ΔT) augmente, la pression statique et la vitesse d'écoulement augmentent. À cause du gradient de densité créé. Cela se produit dans la convection thermique, lorsque le fluide est chauffé, ce qui le fait bouger pour équilibrer les différences de température. En même temps, la pression statique peut également augmenter lorsque la différence de température augmente. Habituellement, lorsque la vitesse d'écoulement augmente, la pression statique diminue selon l'équation de Bernoulli. Cependant, avec une augmentation de (ΔT), la pression statique augmente pour maintenir l'équilibre.

III.7.6 Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction du ΔT (k)

L'augmentation de (ΔT) entraîne une augmentation du nombre de Nusselt comme illustré dans la figure. III.50, qui mesure l'efficacité du transfert de chaleur par convection. Cette relation est due à la proportionnalité directe entre le nombre de Nusselt, la différence de température et la vitesse d'écoulement. Une augmentation de (ΔT) favorise un transfert de chaleur plus important. De plus, une augmentation de DT augmente la vitesse d'écoulement, ce qui contribue à une meilleure efficacité du transfert de chaleur.

III.8 Conclusion

Après la présentation des différents résultats obtenus lors de la simulation : nous observons l'existence de relations entre la vitesse, la pression statique, le nombre de Nusselt et la différence de température (ΔT). Ces conclusions sont cruciales pour la compréhension de l'écoulement et du transfert de chaleur dans des configurations similaires. Les courbes de vitesse et de pression statique montrent une relation inverse. L'augmentation ou la diminution de la différence de température entraîne des variations correspondantes de la vitesse, de la pression et du nombre de Nusselt, tout en

maintenant l'énergie totale constante. Le nombre de Nusselt varie en fonction de la position, avec des valeurs plus élevées sous le cylindre en raison d'un transfert de chaleur amélioré.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons d'abord défini le problème physique en effectuant une recherche bibliographique approfondie axée sur les écoulements autour d'obstacles en général, et plus particulièrement autour d'un cylindre chauffé, qui est l'objet principal de notre étude.

Cette étude présente une simulation numérique de l'écoulement de Stokes autour d'un cylindre chauffé. L'écoulement convectif est à l'origine en régime de convection mixte mais le fait de considéré un régime d'écoulement de Stokes nous permet de considérer une convection naturelle. Le logiciel de calcul Fluent a été utilisé pour modéliser et simuler ce phénomène. En utilisant le modèle laminaire, les équations régissant l'écoulement ont été discrétisées par la méthode des volumes finis, et les conditions aux limites appropriées ont été appliquées pour obtenir le système final à résoudre.

L'étude se concentre sur l'influence de la différence de température (ΔT) sur les propriétés de l'écoulement d'un fluide autour du cylindre chauffé, telles que la pression statique, la vitesse de l'écoulement et le nombre de Nusselt qui caractérise les transferts de chaleur convectif.

Cette simulation nous a permis de mieux comprendre les caractéristiques de l'écoulement de Stokes autour du cylindre chauffé. Nous avons observé les résultats suivants :

Les courbes de vitesse et de pression statique dans notre étude montrent une relation inverse : lorsque la vitesse de l'écoulement augmente, la pression statique diminue, et vice versa. Lorsque l'écoulement est adjacent au cylindre (à sa gauche et à sa droite), la diminution de la section transversale de passage entraîne une augmentation de la vitesse et une diminution de la pression afin de maintenir l'énergie totale de l'écoulement constante, conformément au principe de Bernoulli.

Sous le cylindre, la couche limite thermique est plus mince en raison du fort gradient thermique causé par l'arrivée de fluide froid sur le cylindre chaud, ce qui favorise un meilleur transfert de chaleur. Cela se traduit par des valeurs de nombre de Nusselt plus élevées. Au-dessus du cylindre, la couche limite thermique est plus épaisse en raison du faible gradient thermique causé par le départ du fluide chauffée par sur le cylindre, ce qui diminue l'efficacité du transfert de chaleur et entraîne des valeurs de nombre de Nusselt plus faibles.

L'augmentation ou la diminution de la différence de température entraîne des variations correspondantes de la vitesse, de la pression et du nombre de Nusselt.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Stokes, G.G. (1851) On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, Part II, 9, 8-106.
- [2] Physique-chimie TSI2/TSI2*. France : Ellipses, 2015.
- [3] Soutter, Marc., Mermoud, André., Musy, André. Ingénierie des eaux et du sol : processus et aménagements. Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2007.
- [4] Girault, Hubert H. Electrochimie physique et analytique. Suisse, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2007.
- [5] Helvacı, Serife S., Peker, Sümer M. Solid-Liquid Two Phase Flow. Pays-Bas : Elsevier Science, 2011.
- [6] C. Gouriou, Contrôle d'écoulement interne au moyen d'actionneur ElectroHydroDynamique, THÈSE de doctorat en mécanique, énergétique et aéronautique, université de Poitiers, 2017, 249 p.
- [7] B. EL-HOUAS, étude expérimentale et numérique d'un écoulement autour d'obstacles carre et cylindrique, Constantine, Présenté pour obtenir le diplôme de MAGISTER En Génie Mécanique Option : énergétique appliquée en engineering, Université mentouri Constantine, 2010, 82p.
- [8] C. D. Akowanou, influence de l'anisotropie hydrodynamique sur les phénomènes thermo convectifs dans les champs de sites poreux saturés par des fluides à rhéologie variée, THÈSE de doctorat en Energétique et Environnement, Abomey-Calavi, Université de Abomey-Calavi, 2008, 287 p.
- [9] Bioclimatologie : Concepts et applications. France : Quae, 2007.
- [10] Letellier, Christophe. Introduction à la circulation des fluides physiologiques - Cours et exercices corrigés. Royaume-Uni : Editions Ellipses, 2022.
- [11] V. Menard, convection naturelle dans une cavité contenant une source de chaleur, de onerq centre de Toulouse, thèse de doctorat en l'aéronautique et l'énergétique, école doctorale : énergétique et dynamique des fluides (Toulouse), 2005, 228 p.
- [12] M. M. Said, étude de la convection mixte à travers des surfaces complexes, thèse de doctorat en génie mécanique, Oran, Université des Sciences et de la Technologie-Oran Mohamed Boudiaf, 2014, 118 p.

- [13] Bennajah, Mounir., Chaouni, Naoil. Échangeurs de chaleur : technologie, calcul et design. France : Ed. Technip, 2014.
- [14] Morchain, Jérôme. Modélisation des bioréacteurs : interactions hydrodynamiques et biologie. Royaume-Uni : ISTE Editions Limited, 2018.
- [15] P.-Y. Lagr'ee. Small Re flows, $\varepsilon = Re \ll 1$. CNRS & SU (UPMC Univ Paris 06), UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Boite 162, F-75005 Paris, France, 2019.
- [16] S. Datta et S. Singhal, Small Reynolds Number Steady Flow Past a Sphere with a Source at its Centre, vol. 6, n° 1, 2011, pp. 201 – 210.
- [17] E. E. Habib, Numerical Study of Natural Convection from a Horizontal Cylinder with Different Cross Sections, 2020, Vol. 43, No. 5, pp. 246-259.
- [18] Swetava Ganguli, Sanjiva K. Lele, Drag of a Heated Sphere at Low Reynolds Numbers in the Presence of Buoyancy, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA 94305, 2020, p.1-12.
- [19] V. J. D. N. Rodrigues, J. Su Computational Simulation of Natural Convection in a Square Cavity containing a Hot Cylinder, 2015, São Paulo, SP, Brazil, October 4-9.
- [20] R. M. Valladares, P. Goldstein, C. Stern, et A. Calles, « Simulation of the motion of a sphere through a viscous fluid », Rev. Mex. Fis. 49 (2) (2003) 166–174.
- [21] Fernando V. Castellões, João N.N. Quaresma, Renato M. Cotta, Convective heat transfer enhancement in low Reynolds number flows with wavy walls, F.V. Castellões et al. / International Journal of Heat and Mass Transfer 53 (2010) 2022–2034.
- [22] Tania Sauma Perez. An experimental Study on the Motion and Fixed Points of a Light Sphere in a Stokes' Flow. A thesis submitted to the University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, School of Physics and Astronomy, 2016,110p.
- [23] H. J. Wilson, « Stokes flow past three spheres », *J. Comput. Phys.*, vol. 245, p. 302-316, juill. 2013, doi: 10.1016/j.jcp.2013.03.020.
- [24] Mwangi Wanjiku Lucy, Mathew Ngugi Kinyanjui, Roy Phineas Kiogora. Effects of Variable Viscosity on Unsteady Natural Convection Hydromagnetic Flow Past an Isothermal Sphere. American Journal of Applied Mathematics. Vol. 4, No. 6, 2016, pp. 258-270.

- [25] D. Song, R. K. Gupta, et R. P. Chhabra, « Wall Effect on A Spherical Particle Settling along The Axis of Cylindrical Tubes Filled with Carreau Model Fluids », 2011, p.1-7.
- [26] A-M. Dalbert, F. Penot et J-I. Peube, convection naturelle laminaire dans un canal vertical chauffe a flux constant, vol. 24. No. 9. pp. 1463 1473. 1981.
- [27] A. Talaei et T. Garrett, « An analytical solution to the Navier–Stokes equation for incompressible flow around a solid sphere », Engineering, preprint, août 2020. doi: 10.31223/OSF.IO/KTCDE.
- [28] T. Aurégan, Direct numerical simulation of the flow around a sphere translating in a rotating fluid, Institute of Fluid Mechanics of Toulouse, 2020.
- [29] S.-H. Lee et T. Wu, « Drag Force on a Sphere Moving in Low-Reynolds-Number Pipe Flows », *J. Mech.*, vol. 23, n° 4, p. 423-432, déc. 2007, doi: 10.1017/S1727719100001477.
- [30] S. H. Nasab, Free Falling of Spheres in a Quiescent Fluid, A Thesis in The Department of Mechanical, Industrial, and Aerospace Engineering, University Montréal, Québec, Canada, 2007, 79 p.
- [31] Z. B. Ouattara, A. Magnin, et P. Jay, Interaction d'une paroi avec l'écoulement d'un fluide à seuil autour d'un obstacle cylindrique, 2015,19, p.24-28.
- [32] M. Dolz, A. Casanovas, J. Delegido, et M. J. Hernandez, an experimental setup to verify stokes' law using an electronic balance, 2004, Rev,50, p.29-32.
- [33] D. VANPOUILLE. Développement de modèles de turbulence adaptés à la simulation des écoulements de convection naturelle à haut nombre de Rayleigh. Toulouse. Université de Toulouse. 2013, 2016 p.

Résumé

Etude de l'écoulement de stokes autour d'un cylindre chauffé

Le travail réalisé dans ce mémoire vise à comprendre l'écoulement de Stokes autour d'un cylindre chauffé. Après avoir présenté différentes formules mathématiques ainsi que des hypothèses simplificatrices, nous avons procédé à la simulation numérique. La géométrie a été créée à l'aide du logiciel Gambit, et la simulation a été réalisée avec le logiciel ANSYS Fluent. Les résultats obtenus nous ont permis de comprendre l'effet de la différence de température entre l'écoulement de fluide et le cylindre chauffé sur la pression statique, la vitesse d'écoulement et le nombre de Nusselt.

Mots clés : écoulement de stokes (1), formules mathématiques (2), Simulation Fluent (3), cylindre chauffé (4), nombre de Nusselt (5).

Abstract

Study of Stokes flow around a heated cylinder

The aim of this thesis is to understand the Stokes flow around a heated cylinder. After presenting various mathematical formulas and simplifying assumptions, we conducted numerical simulation. The geometry was created using Gambit software, and the simulation was performed using ANSYS Fluent software. The obtained results allowed us to understand the effect of the temperature difference between the fluid flow and the heated cylinder on the static pressure, flow velocity, and Nusselt number.

Keywords: Stokes flow (1), mathematical formulas (2), Fluent simulation (3), heated cylinder (4), Nusselt number (5).