

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة حسيبة بن بوعلي- الشلف
Université Hassiba Benbouali-Chlef
كلية التكنولوجيا
Faculté de technologie
قسم الهندسة الميكانيكية
Département de Génie mécanique



PROJET FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du Diplôme de

Master

Spécialité: énergétique

Thème

**Etude expérimentale des transferts thermiques d'un jet impactant
un obstacle de forme cylindrique: application aux refroidissements
des composants électroniques**

Présenté par :
Mr: ZIANI AYOUB
Mr: ZAAFAR FOUAD

Encadré et dirigé par :
Pr: BRAIKIA MOHAMED

Année universitaire :2024/2025

Remerciements

Je commence par rendre grâce à Dieu Tout-Puissant,
Le Très Miséricordieux, qui m'a accordé la force et la patience pour mener à bien ce travail
modeste.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadrant le Professeur Mohamed.Braïkia, pour la
confiance qu'il m'a témoignée et pour m'avoir permis de réaliser ce travail dans un climat de
respect et de collaboration.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à M. Zerroukat Khaled, ingénieur
au laboratoire de mécanique, pour son aide précieuse dans l'utilisation des différentes
machines, ce qui a grandement facilité
la partie expérimentale de cette recherche.

Ma gratitude s'adresse aussi aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en
acceptant d'examiner et d'évaluer ce travail.

Je remercie aussi vivement l'ensemble de nos professeurs, pour les connaissances transmises
et leurs orientations bienveillantes tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus chaleureux à mes chers amis : Tsabet
Abdelhamid, Tahar Belkacem, Foudhil et Abdelhak, pour leur soutien constant et leur
précieuse amitié.

AYOUB

Dédicace

À mes parents :

Qui ont œuvré sans relâche pour ma réussite, grâce à leur amour immense, leurs précieux sacrifices et leur soutien constant. Pour leurs conseils avisés et leur présence inestimable, je leur exprime, à travers ce travail, aussi modeste soit-il, ma reconnaissance et ma gratitude éternelles.

À ma chère grand-mère :

Qui fut un véritable pilier dans ma vie, par ses prières sincères et sa sagesse qui ont éclairé mon chemin. Son affection et son dévouement ont largement contribué à l'atteinte de ce succès.

À mes frères bien-aimés Hamza, Ahmed et Islam,

Pour leur amour et leur soutien indéfectible.

À toute ma famille,

Et en particulier à mes oncles Abderrahmane Kacem et hicham,

En témoignage de ma gratitude pour leur appui et leurs encouragements constants.

À mes chers camarades de faculté (Amine, Medjid, Hamid),

Et à mes amis proches Abdennour, Adam ,Walid et sofiane,

Pour leur soutien, leur amitié sincère et les moments précieux partagés.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à rendre ce travail possible,

J'adresse mes plus sincères remerciements.

AYOUB

Remerciements

Je rends tout d'abord grâce à Dieu Tout-Puissant, Le Clément et Le Miséricordieux, qui m'a accordé la patience et la persévérance nécessaires pour achever ce travail modeste.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadrant le Professeur Mohamed.Braïkia, pour son soutien constant, ses conseils avisés et pour m'avoir offert un cadre de travail empreint de confiance et de respect.

Je remercie également M. Zerroukat Khaled, ingénieur au laboratoire de mécanique, pour son aide précieuse et son assistance dans l'utilisation des équipements mécaniques, qui ont grandement facilité la partie expérimentale de ce mémoire.

Je tiens aussi à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer et d'enrichir ce travail par leurs observations.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de nos professeurs, pour leur encadrement bienveillant et leurs enseignements qui ont jalonné notre parcours académique.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à mes amis : Amine Bousdi, Gouadria Abdelmadjid et Zidan Mohamed Amine, pour leur précieux soutien et leur amitié fidèle.

FOUAD

Dédicace

À mes chers parents,

Qui ont toujours été mon soutien et mon refuge, grâce à leur amour, leurs sacrifices et leur patience inépuisable. Je leur dédie ce travail comme un témoignage de fidélité et de gratitude éternelle.

À mes frères,

Pour leur affection et leur appui constants, qui ont été une source de force tout au long de mon parcours.

À toute ma famille,

Pour leurs prières et leurs encouragements qui m'ont accompagné à chaque étape.

À mes plus chers amis Amine, Medjid, Mostapha et Zakaria.

En reconnaissance de leur soutien, de leur fidélité et des précieux moments partagés ensemble.

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin,

Je dédie ce travail avec mes sincères remerciements.

FOUAD

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude expérimentale des transferts thermiques d'un jet d'air impactant un obstacle de forme cylindrique métallique, dans le but d'optimiser les systèmes de refroidissement utilisés dans les applications industrielles et aéronautiques, notamment pour le refroidissement des composants thermiques.

Les essais ont été réalisés dans une chambre d'expérimentation de dimensions (3,0 m × 2,9 m × 3,1 m), en utilisant deux géométries de diffuseurs : un diffuseur tourbillonnaire et un diffuseur lobé. Les mesures de température, de vitesse et du nombre de Nusselt ont été effectuées pour différentes hauteurs d'impact ($h/d = 2, 4, 6, 8$) et sur plusieurs positions radiales et axiales, avec l'obstacle cylindrique placé comme élément central du système expérimental.

Les résultats montrent que la géométrie du diffuseur et la distance d'impact influencent fortement la répartition thermique et l'efficacité du transfert de chaleur. Le diffuseur lobé favorise une meilleure homogénéité thermique et un mélange plus efficace de l'air, tandis que le diffuseur tourbillonnaire intensifie localement l'échange thermique. Ces observations ouvrent des perspectives pour l'optimisation des systèmes de refroidissement par jets d'air appliqués aux composants électroniques et énergétiques.

Mots clés : Jet impactant, obstacle cylindrique métallique, diffuseur lobé, diffuseur tourbillonnaire, transfert de chaleur, refroidissement des composants, étude expérimentale.

Abstract

This dissertation presents an experimental study of heat transfer generated by an air jet impinging on a metallic cylindrical obstacle, with the objective of improving cooling systems used in industrial and aeronautical applications, particularly for the cooling of thermal components.

The experiments were conducted in a test chamber measuring (3.0 m × 2.9 m × 3.1 m), using two types of air diffusers: a swirling diffuser and a lobed diffuser. Temperature, velocity, and Nusselt number were measured at different impact heights ($h/d = 2, 4, 6, 8$) and at various axial and radial positions, with the cylindrical obstacle acting as the central element of the setup.

The results indicate that both diffuser geometry and impact distance significantly affect thermal distribution and heat transfer performance. The lobed diffuser provided better thermal uniformity and air mixing, while the swirling diffuser enhanced localized heat transfer. These findings offer practical insights for optimizing impinging jet cooling systems applied to electronic and energy components.

Keywords: Impinging jet, metallic cylindrical obstacle, lobed diffuser, swirling diffuser, heat transfer, component cooling, experimental study.

ملخص

يتناول هذا العمل دراسة تجريبية لانتقال الحرارة الناتج عن اصطدام نفاث هوائي بجسم أسطواني معدني، بهدف تحسين أداء أنظمة التبريد المستعملة في التطبيقات الصناعية والطائرات، مع التركيز على تطبيقات تبريد المكونات الحرارية

اجريت التجارب داخل غرفة اختبار بأبعاد (3.0 م × 2.9 م × 3.1 م) باستعمال نوعين من الناشرات الهوائية: ناشر توربيني وناشر ذو شكل موج. تم قياس درجات الحرارة، السرعات وعدد نوسلت عند ارتفاعات مختلفة وعلى محاور شعاعية ومحورية متعددة، مع وضع الجسم الأسطواني كعنصر مركزي في التجارب

أظهرت النتائج أن شكل الناشر والمسافة الفاصلة عن سطح الاصطدام لهما تأثير كبير على توزيع الحرارة وفعالية انتقالها. حيث أبان الناشر المموج عن أداء أفضل من حيث التجانس الحراري والمزج، بينما ساهم الناشر التوربيني في تعزيز انتقال الحرارة محلياً. تسمح هذه النتائج باقتراح حلول عملية لتحسين تصميم أنظمة التبريد بالهواء الموجه نحو المكونات الإلكترونية والطاقوية

الكلمات المفتاحية: نفاث هوائي مصطدم، جسم أسطواني معدني، ناشر مموج، ناشر توربيني، انتقال الحرارة، تبريد المكونات، دراسة تجريبية

Table de matière

ملخص / résumé / abstract

Table de matière

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

I.1. Introduction	04
I.2. Aperçu général sur les jets	05
I.3. Différentes applications des jets	05
I.4. Structure du jet libre	06
I.5. Jets libres laminaires	08
I.6. Jets libres turbulents stationnaires	09
I.6.1. Généralités	09
I.6.2. Structure du jet libre turbulent	09
I.7. Application de jet turbulent libre	09
I.8. Caractéristiques des jets	10
I.9. Jet impactant	10
I.10. Structure d'un jet impactant	11
I.11. Types de jets issus de diffuseurs	12
I.12. Jet tourbillonnaire	13
I.12.1. Description d'un jet tourbillonnaire	13
I.12.2. Le nombre de tourbillonnement (swirl)	14
I.13. Transfert de chaleur	15
I.13.1. Modes de transferts de chaleur	15
I.14. Grandeurs influençant le développement du jet	16
I.14.1. Nombre de Prandtl	16
I.14.2. Le nombre de Nusselt	17
I.14.3. Nombre de Reynolds	17
I.15. Les travaux qui ont été réalisés sur la technique d'impacts de jets	18
I.16. Conclusion	21

Chapitre II : Etude expérimentale

II.1 Introduction	23
II.2 Dispositif expérimentale	23
II.3 Configurations étudiées	24

Table de matière

II.4 Géométrie des diffuseurs utilisés	26
II.4.1 Diffuseur lobé	26
II.4.2 Diffuseur tourbillonnaire	27
II.5 Conditions opératoires	27
II.5.1 Diffuseur tourbillonnaire	27
II.5.2 Diffuseur lobé	27
II.6 Mode Opérateur	28
II.7 Procédures de mesure	28

Chapitre III : Etude expérimentale de l'effet de la hauteur d'impact et de la géométrie du diffuseur

III.1 Introduction	30
III.2 Configuration N : 01 diffuseurs tourbillonnaires	30
III.2.1.1 Distribution de la température axiale T_a pour $h/d=2$	30
III.2.1.2 Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$	31
III.2.1.3 Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=2$	32
III.2.1.4. Distribution de la vitesse radiale pour $h/d=2$	33
III.2.1.5 Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=2$	34
III.2.1.6 Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$	35
III.2.2.1 Distribution de la température axiale pour $h/d=4$	36
III.2.2.2 Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$	37
III.2.2.3 Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=4$	38
III.2.2.4 Distribution de la vitesse radiale pour $h/d=4$	39
III.2.2.5 Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=4$	40
III.2.2.6 Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$	41
III.2.3.1 Distribution de la température axiale pour $h/d=6$	42
III.2.3.2 Distribution de la température radiale pour $h/d=6$	43
III.2.3.3 Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=6$	44
III.2.3.4 Distribution de la vitesse radial pour $h/d=6$	45
III.2.3.5 Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=6$	46
III.2.3.6 Evolution du nombre de Nusselt radiale pour $h/d=6$	47
III.2.4.1 Distribution de la température axiale pour $h/d=8$	48
III.2.4.2 Distribution de la température radial pour $h/d=8$	49
III.2.4.3 Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=8$	50
III.2.4.4 Distribution de la vitesse radial pour $h/d=8$	51

Table de matière

III.2.4.5 Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=8$	52
III.2.4.6 Evolution du nombre de Nusselt radiale pour $h/d=8$	53
III.3 Configuration N : 02 Diffuseur est à géométrie lobé.	54
III.3.1.1 Distribution de la température axiale T_a pour $h/d=2$	55
III.3.1.2 Distribution de la température radial T_r pour $h/d=2$	56
III.3.1.3 Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=2$	57
III.3.1.4 Distribution de la vitesse radial pour $h/d=2$	58
III.3.1.5 Evolution du nombre de Nusselt axial pour $h/d=2$	59
III.3.1.6 Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$	60
III.3.2.1 Distribution de la température axial pour $h/d=4$	61
III.3.2.2 Distribution de la température radial T_r pour $h/d=4$	62
III.3.2.3 Distribution de la vitesse axial pour $h/d=4$	63
III.3.2.4 Distribution de la vitesse radiale pour $h/d=4$	64
III.3.2.5 Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=4$	65
III.3.2.6 Evolution du nombre de Nusselt radiale pour $h/d=4$	66
III.3.3.1 Distribution de la température axiale pour $h/d=6$	67
III.3.3.2 Distribution de la température radial T_r pour $h/d=6$	68
III.3.3.3 Distribution de la vitesse axial pour $h/d=6$	69
III.3.3.4 Distribution de la vitesse radiale pour $h/d=6$	70
III.3.3.5 Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=6$	71
III.3.3.6 Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$	72
III.3.4.1 Distribution de la température axiale pour $h/d=8$	73
III.3.4.2 Distribution de la température radiale pour $h/d=8$	74
III.3.4.3 Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=8$	75
III.3.4.4 Distribution de la vitesse radiale pour $h/d=8$	76
III.3.4.5 Evolution du nombre de Nusselt axial pour $h/d=8$	77
III.3.4.6 Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$	78

Chapitre IV : Comparaisons et discussions des résultats obtenus pour les deux configurations étudiées.

IV.1 Introduction	81
IV.2 surface impactée.....	81

Table de matière

IV.2.1.1 Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=2$	81
IV.2.1.2 Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=2$	82
IV.2.1.3 Evaluation du nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=2$	83
IV.2.1.4 Evaluation du nombre de Nusselt radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=2$	84
IV.2.1.5 Comparaison de la distribution de la vites axial entre les deux configurations à $h/d=2$	85
IV.2.2.1 Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à $h/d=4$	86
IV.2.2.2 Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=4$	87
IV.2.2.3 Evaluation du nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=4$	88
IV.2.2.4 Evaluation du nombre de Nusselt radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=4$	89
IV.2.2.5 Comparaison de la distribution de la vites axial entre les deux configurations à $h/d=4$	90
IV.2.3.1 Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=6$	91
IV.2.3.2 Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=6$	92
IV.2.3.3 Evaluation du nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=6$	93
IV.2.3.4 Evaluation du nombre de Nusselt radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=6$	94
IV.2.3.5 Comparaison de la distribution de la vites axial entre les deux configurations à $h/d=6$	95
IV.2.4.1 Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=8$	96

Table de matière

IV.2.4.2 Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=8$	97
IV.2.4.3 Evaluation du nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=8$	98
IV.2.4.4 Evaluation du nombre de Nusselt radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=8$	99
IV.2.4.5 Comparaison de la distribution de la vites axial entre les deux configurations à $h/d=8$	100
Conclusion.....	102
Références bibliographiques	105

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

Figure (1.1). Plan de symétrie d'un jet circulaire turbulent à $Re=10000$ DIMOTAKIS	06
Figure (1.2). Représentation schématique de la structure du jet libre. Nicolas.....	07
Figure (1.3). Structure d'un jet en impactant	11
Figure (1.4). Représentation du jet tourbillonnaire	13
Figure (I . 5) : Types de transfert de chaleur	15

Chapitre II : Etude expérimentale

Figure (II.1) : Banc d'essai de l'étude expérimentale	24
Figure (II.2) : seystem de coordnnées ($x/d, y/d, r/d$).....	24
Figure (II.3) : Photos de l'obstacle utilisé	25
Figure (II.4) : position de mesure (H/D)	25
Figure (II.5) : installation de l'obstacle cylindrique.....	26
Figure (II.6) : diffuseur lobé.....	26
Figure (II.7) : diffuseur tourbillonnaire	27
Figure (II.8) : veloci-calc	28
Figure (II.9) : thermomètre digital	28

Chapitre III : Etude expérimentale de l'effet de la hauteur d'impact et de la géométrie du diffuseur

Figure (III.1) : Distribution de la température axial T_a à $h/d=2$	30
Figure (III.2) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=2$ et $r/d=0$	31
Figure (III.3) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$	31
Figure (III.4) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=2$ et $r/d=1$	31
Figure (III.5) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$	31
Figure (III.6) : distribution de la vitesse V_a axial pour $h/d=2$	32
Figure (III.7) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=2$ et $r/d=0$	33
Figure (III.8) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$	33
Figure (III.9) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=2$ et $r/d=1$	33
Figure (III.10) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$	33
Figure (III.11) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=2$	34
Figure (III.12) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=0$	35
Figure (III.13) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$	35
Figure (III.14) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=1$	35
Figure (III.15) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$	35

Liste des figures

Figure (III.16) : Distribution de la température axial T_a à $h/d=4$	36
Figure (III.17) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=4$ et $r/d=0$	37
Figure (III.18) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$	37
Figure (III.19) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=4$ et $r/d=1$	37
Figure (III.20) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$	37
Figure (III.21) : Distribution de la vitesse V_a axiale pour $h/d=4$	38
Figure (III.22) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=4$ et $r/d=0$	39
Figure (III.23) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$	39
Figure (III.24) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=4$ et $r/d=1$	39
Figure (III.25) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$	39
Figure (III.26) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=4$	40
Figure (III.27) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=0$	41
Figure (III.28) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$	41
Figure (III.29) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=1$	41
Figure (III.30) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$	41
Figure (III.31) : Distribution de la température axial T_a à $h/d=6$	42
Figure (III.32) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=6$ et $r/d=0$	43
Figure (III.33) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$	43
Figure (III.34) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=6$ et $r/d=1$	43
Figure (III.35) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$	43
Figure (III.36) : distribution de la vitesse V_a axiale pour $h/d=6$	44
Figure (III.37) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=6$ et $r/d=0$	45
Figure (III.38) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$	45
Figure (III.39) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=6$ et $r/d=1$	45
Figure (III.40) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$	45
Figure (III.41) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=6$	46
Figure (III.42) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=0$	47
Figure (III.43) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$	47
Figure (III.44) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=1$	47
Figure (III.45) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$	47
Figure (III.46) : Distribution de la température axial T_a à $h/d=8$	48
Figure (III.47) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=8$ et $r/d=0$	49
Figure (III.48) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$	49
Figure (III.49) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=8$ et $r/d=1$	49

Liste des figures

Figure (III.50) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=8$ et $r/d=1.5$	49
Figure (III.51) : distribution de la vitesse V_a axiale pour $h/d=8$	50
Figure (III.52) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=8$ et $r/d=0$	51
Figure (III.53) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$	51
Figure (III.54) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=8$ et $r/d=1$	51
Figure (III.55) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=8$ et $r/d=1.5$	51
Figure (III.56) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=8$	52
Figure (III.57) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=0$	53
Figure (III.58) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$	53
Figure (III.59) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=1$	53
Figure (III.60) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=1.5$	53
Figure (III.61) : Distribution de la température axiale T_a à $h/d=2$	55
Figure (III.62) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=0$	56
Figure (III.63) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$	56
Figure (III.64) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=1$	56
Figure (III.65) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$	56
Figure (III.66) : Distribution de la vitesse axiale T_a à $h/d=2$	57
Figure (III.67) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=0$	58
Figure (III.68) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$	58
Figure (III.69) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=1$	58
Figure (III.70) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$	58
Figure (III.71) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=2$	59
Figure (III.72) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=0$	60
Figure (III.73) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$	60
Figure (III.74) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=1$	60
Figure (III.75) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$	60
Figure (III.76) : Distribution de la température axiale T_a à $h/d=4$	61
Figure (III.77) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=0$	62
Figure (III.78) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$	62
Figure (III.79) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=1$	62
Figure (III.80) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$	62
Figure (III.81) : Distribution de la vitesse axiale T_a à $h/d=4$	63
Figure (III.82) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=4$ et $r/d=0$	64
Figure (III.83) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$	64

Liste des figures

Figure (III.84) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=4$ et $r/d=1$	64
Figure (III.85) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$	64
Figure (III.86) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=4$	65
Figure (III.87) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=0$	66
Figure (III.88) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$	66
Figure (III.89) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=1$	66
Figure (III.90) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$	66
Figure (III.91) : Distribution de la température axial T_a à $h/d=6$	67
Figure (III.92) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=6$ et $r/d=0$	68
Figure (III.93) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$	68
Figure (III.94) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=6$ et $r/d=1$	68
Figure (III.95) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$	68
Figure (III.96) : Distribution de la vitesse axial T_a à $h/d=6$	69
Figure (III.97) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=6$ et $r/d=0$	70
Figure (III.98) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$	70
Figure (III.99) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=6$ et $r/d=1$	70
Figure (III.100) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$	70
Figure (III.101) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=6$	71
Figure (III.102) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=0$	72
Figure (III.103) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$	72
Figure (III.104) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=1$	72
Figure (III.105) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$	72
Figure (III.106) : Distribution de la température axial T_a à $h/d=8$	73
Figure (III.107) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=8$ et $r/d=0$	74
Figure (III.108) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$	74
Figure (III.109) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=8$ et $r/d=1$	74
Figure (III.110) : Distribution de la température radial T_r pour $h/d=8$ et $r/d=1,5$	74
Figure (III.111) : Distribution de la vitesse axial T_a à $h/d=8$	75
Figure (III.112) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=8$ et $r/d=0$	76
Figure (III.113) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$	76
Figure (III.114) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=8$ et $r/d=1$	76
Figure (III.115) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=8$ et $r/d=1.5$	76
Figure (III.116) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=8$	77
Figure (III.117) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=0$	78

Liste des figures

Figure (III.118) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$	78
Figure (III.119) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=1$	78
Figure (III.120) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=1.5$	78

Chapitre IV : Comparaisons et discussions des résultats obtenus pour les deux configurations étudiées.

Figure (IV.1) : Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à $h/d=2$	81
Figure (IV.2) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=0$	82
Figure (IV.3) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=0.5$	82
Figure (IV.4) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=1$	82
Figure (IV.5) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=1.5$	82
Figure (IV.6) : Distribution de nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à $h/d=2$	83
Figure (IV.7) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=0$	84
Figure (IV.8) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=0.5$	84
Figure (IV.9) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=1$	84
Figure (IV.10) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=1.5$	84
Figure (IV.11) : Comparaison de la distribution de la vitesse axial entre les deux configurations à $h/d=2$	85
Figure (IV.12) : Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à $h/d=4$	86
Figure (IV.13) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=0$	87

Liste des figures

Figure (IV.14) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=0.5$	87
Figure (IV.15) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=1$	87
Figure (IV.16) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=1.5$	87
Figure (IV.17) : Evaluation du nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=4$	88
Figure (IV.18) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=0$	89
Figure (IV.19) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=0.5$	89
Figure (IV.20) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=1$	89
Figure (IV.21) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=1.5$	89
Figure (IV.22) : Comparaison de la distribution de la vitesse axial entre les deux configurations à $h/d=4$	90
Figure (IV.23) : Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à $h/d=6$	91
Figure (IV.24) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=0$	92
Figure (IV.25) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=0.5$	92
Figure (IV.26) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=1$	92
Figure (IV.27) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=1.5$	92
Figure (IV.28) : Distribution de nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à $h/d=6$	93
Figure (IV.29) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=0$	94

Liste des figures

Figure (IV.30) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=0.5$	94
Figure (IV.31) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=1$	94
Figure (IV.32) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=1.5$	94
Figure (IV.33) : Comparaison de la distribution de la vitesse axial entre les deux configurations à $h/d=6$	95
Figure (IV.34) : Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à $h/d=8$	96
Figure (IV.35) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=0$	97
Figure (IV.36) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=0.5$	97
Figure (IV.37) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=1$	97
Figure (IV.38) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=1.5$	97
Figure (IV.39) : Distribution de nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à $h/d=8$	98
Figure (IV.40) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=0$	99
Figure (IV.41) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=0.5$	99
Figure (IV.42) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=1$	99
Figure (IV.43) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=1.5$	99
Figure (IV.44) : Comparaison de la distribution de la vitesse axial entre les deux configurations à $h/d=8$	100

Introduction

Générale

Introduction général

Introduction Générale

Les progrès récents en thermodynamique et en mécanique appliquée ont considérablement amélioré les performances des systèmes de refroidissement thermique utilisés dans les applications aéronautiques et industrielles. Cependant, de nombreux défis subsistent, nécessitant des solutions innovantes, notamment en ce qui concerne l'amélioration du transfert de chaleur et la réduction des effets négatifs des écoulements d'air turbulents. Le transfert de chaleur par jets constitue un domaine fondamental en ingénierie thermique, jouant un rôle clé dans plusieurs applications, telles que le refroidissement des composants électroniques, les turbines à gaz et les surfaces d'échange thermique dans diverses industries. Les performances de ces systèmes de refroidissement dépendent de l'interaction complexe entre l'écoulement du jet et la géométrie environnante, rendant l'étude de ce phénomène essentielle pour optimiser l'efficacité du refroidissement et réduire les coûts énergétiques. Dans ce contexte, cette étude vise à analyser le transfert de chaleur résultant de l'impact d'un jet d'air sur un obstacle cylindrique, un cas géométrique présentant de nombreuses applications dans le refroidissement industriel et les systèmes thermiques. Il est bien connu que les jets d'air à grande vitesse améliorent l'efficacité des échanges thermiques, mais ils peuvent également provoquer des turbulences affectant la distribution de la chaleur et la pression sur la surface impactée. Comprendre ce phénomène est donc crucial pour optimiser les stratégies de refroidissement utilisées dans les applications d'ingénierie, telles que les systèmes de refroidissement par air pour les composants électroniques et les avions à réaction.

Cette étude repose sur une approche expérimentale, utilisant des techniques de mesure thermique et d'analyse d'écoulement pour examiner l'effet de divers paramètres, tels que la vitesse du jet, l'angle d'impact et les caractéristiques de l'obstacle cylindrique, sur le transfert de chaleur. Grâce à ces analyses, des recommandations pratiques seront formulées afin d'améliorer l'efficacité du refroidissement dans les applications d'ingénierie avancées, contribuant ainsi à renforcer la performance thermique.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres : le premier est consacré à une revue bibliographique sur les écoulements de jets et le transfert de chaleur associé, suivi d'une description détaillée de la méthodologie expérimentale et des outils utilisés dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre se concentre sur l'analyse et la discussion des résultats obtenus, tandis que le dernier chapitre présente les conclusions et recommandations issues de cette étude.

Chapitre I

Etude bibliographique sur les jets

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

I.1. Introduction

L'étude des jets impactant joue un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans le domaine du refroidissement et du contrôle thermique. Parmi ces applications, l'utilisation des jets impactant pour le refroidissement des composants est particulièrement étudiée en raison de leur efficacité en transfert thermique. La performance de ces systèmes dépend de plusieurs paramètres influençant la dynamique des jets et leur interaction avec la surface impactée.

De nombreuses recherches expérimentales et numériques ont été menées afin d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques associés à l'impact des jets. Ces études ont permis de classifier les jets selon différentes caractéristiques, notamment en fonction de leur structure d'écoulement et de leur mode de diffusion. On distingue ainsi plusieurs types de jets et leurs applications variées, allant du refroidissement industriel aux procédés de combustion et de propulsion.

Étant donné la complexité et la diversité des paramètres à considérer, une analyse approfondie devient indispensable. Ce chapitre présentera une revue des études menées sur les jets impactant, en mettant en évidence leur importance dans l'amélioration du transfert thermique. Nous aborderons tout d'abord les caractéristiques générales des jets, suivies d'une classification des différents types de jets et de leurs applications. Ensuite, nous présenterons les différentes formes de diffusion des jets ainsi qu'une synthèse des principaux travaux réalisés sur les jets d'air, en mettant en avant leurs implications dans le refroidissement des composants.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

I.2. Aperçu général sur les jets

Un jet est un écoulement de fluide (liquide ou gaz) qui s'échappe soudainement d'un milieu statique à travers une ouverture ou une buse, formant ainsi une zone d'écoulement distincte. Le comportement du jet dépend des conditions environnantes et peut être classé en deux types principaux en fonction des limites de l'écoulement : [1].[2]

Jet confiné : Influencé par la présence de parois proches qui limitent son expansion, il interagit davantage avec les surfaces environnantes.

Jet libre : Non affecté par des parois proches, il se développe librement dans un milieu ouvert.

Le jet libre fait partie des écoulements cisailés libres, tout comme les sillages et les vagues. Il se forme lorsqu'un fluide est injecté à travers une ouverture ou une buse. Sa structure évolue sous l'effet de la turbulence initiale créée par l'injection et des variations de vitesse à l'intérieur du jet, ce qui entraîne la formation de tourbillons et une diffusion progressive de l'écoulement.

I.3. Différentes applications des jets

Les jets impactant sont utilisés dans plusieurs applications industrielles parmi lesquelles les processus de séchage, de refroidissement et de réchauffement. Par exemple, on peut citer : [3]

- Découpe et refroidissement de nappes de verre en fusion.
- Evaporation de l'eau de la pâte à papier dans l'industrie papetière.
- Refroidissement de feuillets métalliques ou plastiques.
- Refroidissement de moteurs thermiques, circuits hydrauliques, chambres de combustion, aubes de turbines et moteurs électriques de grande puissance destinés à une nouvelle génération de voitures électriques.
- Refroidissement de denrées alimentaires.

I.4. Structure du jet libre

Pour mieux comprendre les structures propres au jet impactant, il est d'abord essentiel d'étudier le cas du jet libre. La figure (1.1) illustre le développement d'un jet libre circulaire, selon [4]. Dans cette représentation, un fluide coloré (en clair) est injecté dans une zone initialement au repos (en sombre).

L'écoulement peut être décomposé en deux régions principales :

La couche de cisaillement, où l'écoulement est rotationnel. Cette région centrale est soumise à de forts gradients de vitesse et se caractérise par un accroissement radial, appelé largeur du jet. La région irrotationnelle, qui entoure la couche de cisaillement et où l'écoulement reste essentiellement non tourbillonnaire.

L'élargissement de la couche de cisaillement résulte de deux mécanismes distincts : [5]

1. La diffusion visqueuse, qui tend à homogénéiser les vitesses du fluide.
2. L'entraînement par des structures tourbillonnaires cohérentes, c'est-à-dire des tourbillons dont le temps de vie est bien supérieur à leur temps de retournement, contribuant ainsi au mélange et à l'expansion du jet.

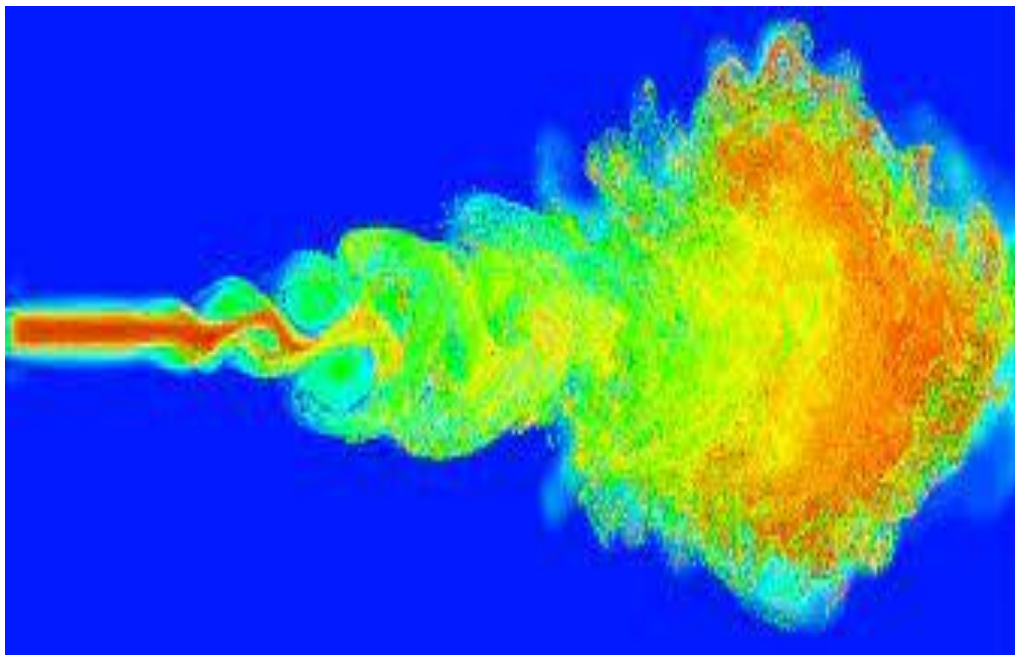


Figure (1.1) : Plan de symétrie d'un jet circulaire turbulent à $Re=10000$ [6]

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

Les structures tourbillonnaires cohérentes observées dans la région de la couche cisailée du jet résultent des instabilités de Kelvin-Helmholtz, causées par la différence de vitesse entre l'intérieur et l'extérieur du jet. Ces instabilités entraînent des ondulations de l'interface, suivies de son enroulement, jusqu'à la formation de tourbillons qui génèrent une couche de mélange.

Sur la figure, on distingue trois principales zones :

La région irrotationnelle : située au centre du jet, où l'écoulement reste stable sans tourbillons significatifs.

La région cisailée : où apparaissent les instabilités et les structures tourbillonnaires sous l'effet du gradient de vitesse.

L'entraînement du fluide ambiant : causé par l'interaction du jet avec son environnement, ce qui favorise le mélange des fluides et l'expansion du jet.

Ces phénomènes sont caractéristiques des jets turbulents et jouent un rôle clé dans le transport et le mélange des fluides.

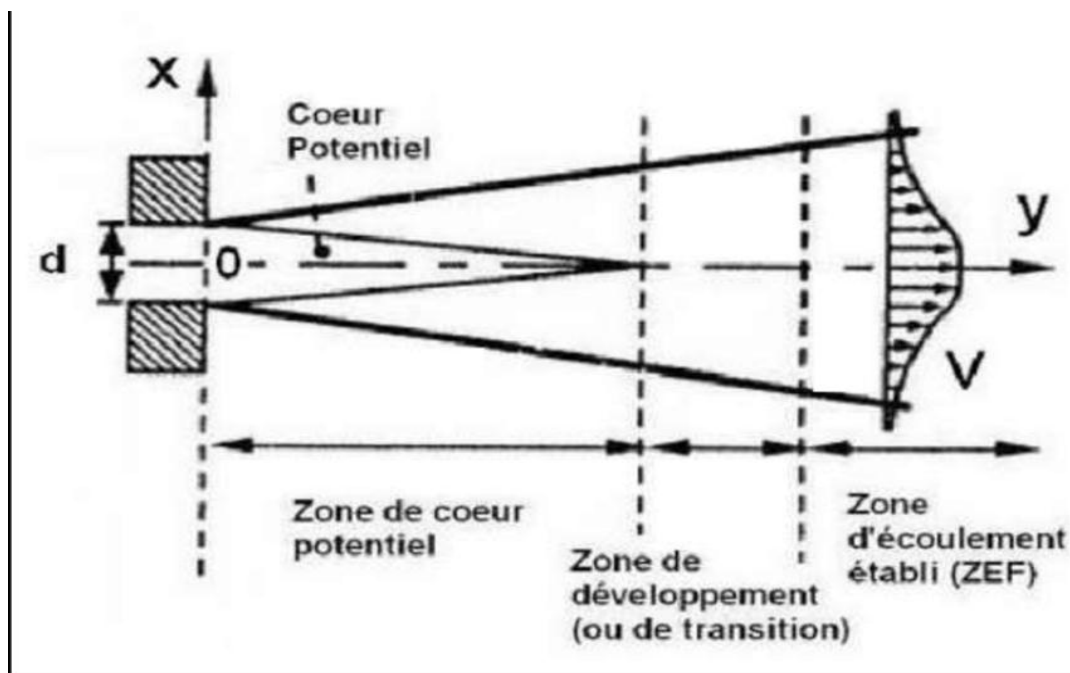


Figure. (1.2) : Représentation schématique de la structure du jet libre.[7]

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

Le système de coordonnées associé au jet est illustré dans la figure (1.2). L'origine O est située au centre de la sortie du jet, avec l'axe x représentant la direction axiale et l'axe y la direction radiale. L'écoulement du jet libre se divise en trois principales zones :

Le cœur potentiel : Dans cette région initiale, la vitesse reste constante et égale à la vitesse de sortie. Ce cœur est délimité latéralement par la couche de mélange qui commence à se former à sa périphérie. Expérimentalement, la longueur du cône potentiel est définie comme la distance où la vitesse mesurée sur l'axe central reste à 95 % à 99 % de. Cette longueur dépend fortement des conditions initiales, notamment le profil de vitesse et le niveau de turbulence à la sortie de l'orifice.

La zone de développement : C'est une région de transition où les instabilités de Kelvin-Helmholtz commencent à apparaître sous l'effet du gradient de vitesse. Ces instabilités induisent des déformations de l'interface du jet, favorisant la génération de tourbillons et l'entraînement du fluide ambiant, ce qui accélère le mélange. Cette zone joue un rôle clé dans la transition vers un écoulement pleinement turbulent

La zone d'écoulement établi (ZEF) : Dans cette région, le profil de vitesse est totalement développé et l'écoulement devient pleinement turbulent. On y observe un spectre continu d'échelles tourbillonnaires, où de grands tourbillons coexistent avec de plus petites structures, jusqu'à atteindre l'échelle minimale définie par l'échelle de Kolmogorov.

Cette structure en trois zones est une caractéristique fondamentale des jets turbulents et joue un rôle crucial dans le transport de quantité de mouvement et le mélange des fluides.

I.5. Jets libres laminaires

Le jet laminaire représente la forme d'écoulement de jet la plus simple. Il provient généralement d'une conduite droite, et son régime est caractérisé par le nombre de Reynolds évalué à la sortie de l'orifice.

L'écoulement d'un jet libre est régi par trois types de forces principales :

Les forces d'inertie, qui résultent de la quantité de mouvement du fluide.

Les forces de pesanteur, qui dépendent de la densité du fluide et du champ gravitationnel.

Les contraintes visqueuses, qui traduisent les effets de friction internes au fluide.

Dans le cas des jets turbulents, les contraintes visqueuses sont généralement négligeables par rapport aux forces d'inertie et de pesanteur. En revanche, pour un jet laminaire, elles jouent un rôle essentiel dans la dynamique de l'écoulement.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

Le jet étudié ici est supposé rond et stationnaire, évoluant dans un fluide ambiant initialement au repos. Le tableau 1 ci-dessous récapitule les expressions analytiques du champ de vitesse moyenne et du champ de concentration associés à ce type d'écoulement.

I.6. Jets libres turbulents stationnaires

I.6.1. Généralités

Le cas de jets turbulents est désormais abordé et, par conséquent les phénomènes de diffusion moléculaire sont totalement négligeables devant ceux de mélange turbulent ; le comportement du jet devient indépendant de la viscosité du fluide ambiant ou de celle du fluide injecté.

I.6.2. Structure du jet libre turbulent

D'après le jet libre turbulent se compose de deux régions principales [8] :

- Une région de développement (ou région d'entrée) de l'écoulement où il y a coexistence entre un noyau potentiel de forme conique et des couches de mélange ; la vitesse initiale u_0 y est constante et la zone de mélange se trouve de part et d'autre de ce noyau potentiel figure (I-3) .
- Une région établie où il n'y a plus de noyau potentiel et les lois de comportement sont semblables. Elle est aussi appelée région de similitude.

I.7. Application de jet turbulent libre

Les jets turbulents libres à diffuseur trouvent de nombreuses applications pratiques dans divers domaines industriels et technologiques. Parmi les principales utilisations, on peut citer :

Propulsion aéronautique : Les moteurs à réaction exploitent les jets turbulents libres à diffuseur pour la génération de poussée. L'air est comprimé à haute pression dans la chambre de combustion, puis expulsé à grande vitesse à travers une tuyère conique divergente, créant ainsi une force de propulsion.

Refroidissement des composants électroniques : Ces jets sont largement utilisés pour le refroidissement localisé des composants électroniques tels que les processeurs et les circuits intégrés. Le jet d'air dirigé vers le composant permet une dissipation efficace de la chaleur par la formation d'un film d'air frais.

Traitement des déchets : Dans certaines applications environnementales, les jets turbulents libres à diffuseur sont utilisés pour la fragmentation des déchets organiques en particules plus fines, facilitant ainsi leur traitement et leur élimination ultérieure.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

Contrôle de la pollution : Les jets turbulents à diffuseur peuvent contribuer à la réduction des émissions polluantes en facilitant l'aspiration et la dispersion des gaz nocifs. L'éjection à grande vitesse crée une zone de basse pression qui entraîne les polluants dans le flux d'air, améliorant ainsi leur dilution et leur captation.

I.8. Caractéristiques des jets

Le nombre de Reynolds est un critère essentiel pour déterminer le type d'écoulement (laminaire ou turbulent). Cependant, il est important de noter que la transition entre ces deux régimes dépend largement des caractéristiques géométriques de l'injecteur. Les jets se définissent principalement par :

- Le régime d'écoulement : on distingue trois régimes principaux :
 - Écoulement laminaire ($Re < 1800$) : les lignes de courant sont parallèles, les forces d'inertie sont faibles comparées aux forces de viscosité. L'écoulement peut rester stablement laminaire, en particulier pour des nombres de Reynolds très faibles ($Re < 300$).
 - Écoulement transitoire ($2000 < Re < 2300$) : dans cette zone, le régime d'écoulement est incertain, car les forces d'inertie et les forces de viscosité sont du même ordre de grandeur.
 - Écoulement turbulent ($Re > 2300$) : les forces d'inertie deviennent dominantes par rapport aux forces de viscosité, entraînant le développement de la turbulence dans l'écoulement.
- L'épaisseur de la buse : il s'agit de l'épaisseur pour un jet plan ou du diamètre pour un jet circulaire.
- Le profil de vitesse à la sortie de la buse : un profil uniforme est obtenu si l'on utilise un convergent bien conçu. À défaut, le développement d'une couche limite le long de la paroi interne de la buse engendre un profil de vitesse parabolique.

I.9. Jet impactant

La technique des jets impactant se trouve dans de nombreuses applications industrielles et les résultats de sa mise en place dépendent de nombreux paramètres. Ainsi, de nombreuses études expérimentales et numériques ont été menées dans le but d'une meilleure compréhension des phénomènes physiques intervenant et régissant l'impact d'un jet. Pour comprendre les structures propres au jet en impact, il convient d'abord de s'intéresser au cas du jet libre.

I.10. Structure d'un jet impactant

Le champ d'écoulement d'un jet impactant peut être divisé en différentes régions

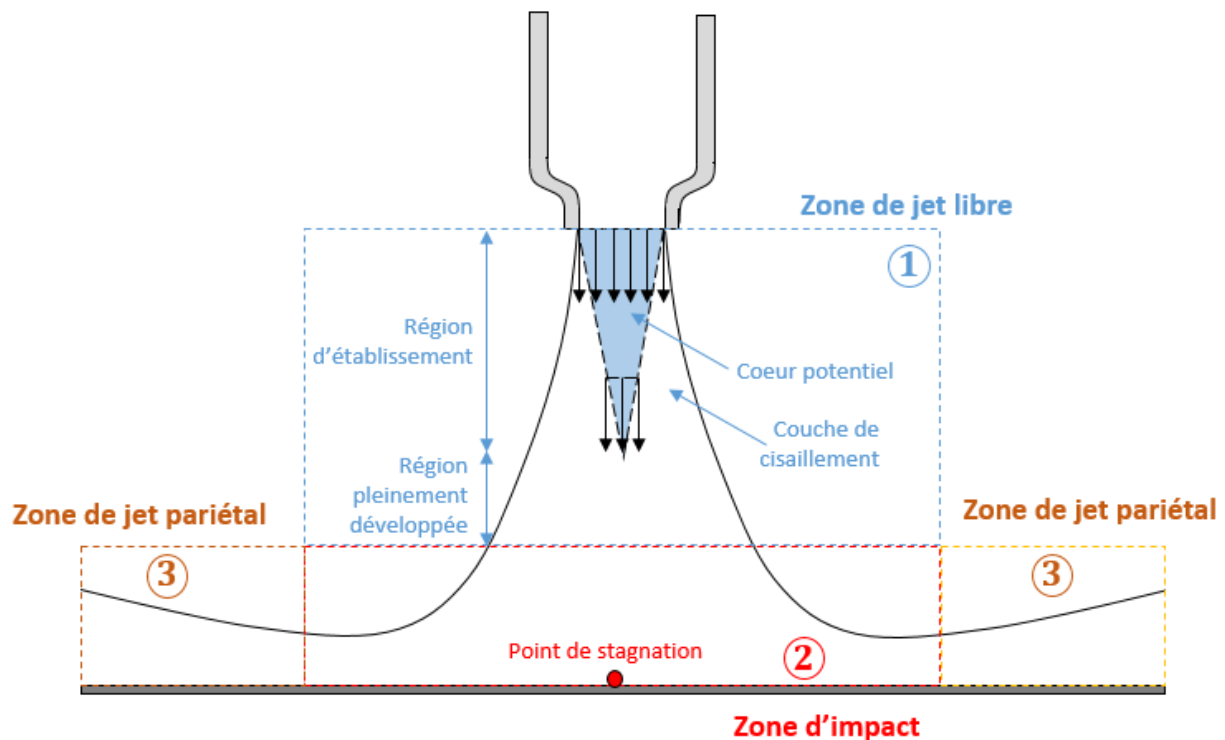


Figure. (1.3) : Structure d'un jet en impactant [9]

- **Zone du cône potentiel :**

Cette zone est située près de l'orifice d'injection et est caractérisée par un jet qui conserve sa vitesse de sortie le long de l'axe. Elle correspond à la portion initiale du jet avant toute interaction avec l'air ambiant.

- **Zone de transition :**

Cette zone commence lorsque les couches de cisaillement du jet commencent à interagir, provoquant une certaine diffusion du jet et une diminution de la vitesse axiale. À ce stade, le jet commence à se mélanger avec l'air ambiant.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

- **Zone d'impact :**

La région d'impact correspond au point où le jet rencontre la surface cible. À cet endroit, la vitesse axiale du jet diminue jusqu'à zéro, ce qui crée une zone de stagnation. Cette zone est caractérisée par une forte augmentation de la pression et une déviation de l'écoulement vers un jet radial qui se déplace le long de la surface.

- **Zone du jet pariétal :**

Cette zone se situe après le point d'impact et est caractérisée par un jet qui évolue le long de la paroi. La vitesse radiale augmente jusqu'à un maximum, puis décroît en raison des pertes d'énergie dans le fluide.

I.11. Types de jets issus de diffuseurs

- **Jets libre :** Les jets libres sont des écoulements fluides issus de diffuseurs qui ne sont pas confinés par des parois solides à proximité immédiate. Ils se propagent librement dans le milieu ambiant et peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leur géométrie et de leurs caractéristiques d'écoulement :

- **Jets plans :** Ces jets proviennent de diffuseurs ayant une section transversale plate et se propagent dans une direction perpendiculaire à leur plan. Ils sont largement utilisés dans des applications telles que la ventilation, le refroidissement et la pulvérisation.

- **Jets coniques :** Issus de diffuseurs à section transversale conique, ces jets s'étendent dans une direction axiale. Ils sont couramment employés dans les systèmes de propulsion, les réacteurs et les turbines en raison de leur capacité à concentrer l'écoulement dans un cône bien défini.

- **Jets turbulents :** Caractérisés par une forte turbulence et un mélange rapide avec le milieu ambiant, ces jets sont particulièrement adaptés à la diffusion de matières, aux procédés de pulvérisation et aux systèmes de traitement des eaux. Leur instabilité favorise un échange efficace entre le jet et son environnement.

I.12. Jet tourbillonnaire

I.12.1. Description d'un jet tourbillonnaire

Le jet vortex est le plus couramment utilisé pour obtenir les débits souhaités. De sorte qu'il diffère du jet traditionnel car il a une composante de vitesse tangentielle. Avec on peut utiliser la roue de ventilateur axiale pour générer un écoulement turbulent ou utiliser des systèmes de vortex mécaniques.[10].[11]

La description d'un jet peut être ramenée à la délimitation en différentes zones, soit le long de l'axe, soit du centre vers la Selon [12], la description d'un jet tourbillonnaire (swirling jet) est schématisée comme suit : [13]

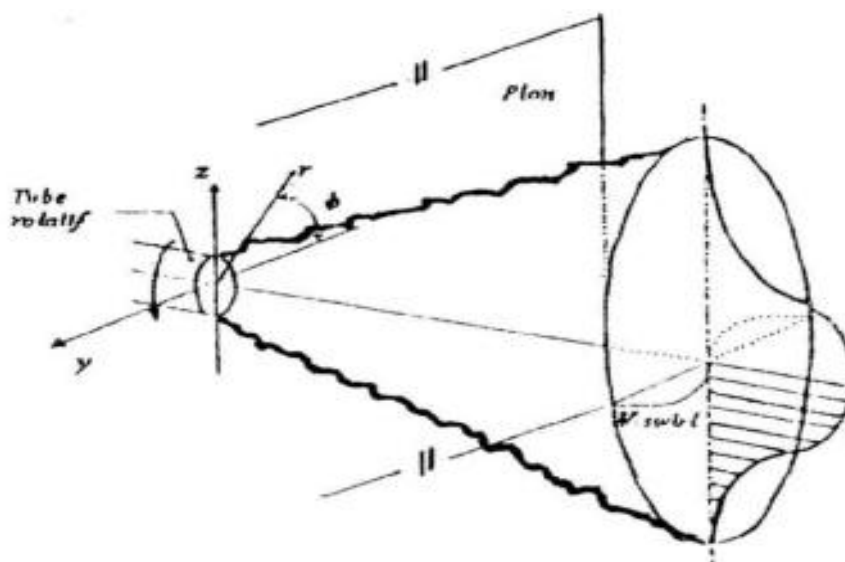


Figure (1.4) : Représentation du jet tourbillonnaire [14]

I.12.2. Le nombre de tourbillonnement (swirl)

Le tourbillonnement consiste à ajouter une composante azimutale au champ de vitesse d'un écoulement. Il en résulte, dans un écoulement confiné, un équilibre entre les forces centrifuges agissant sur les particules des fluides. Les forces de pression confèrent à l'écoulement un effet de courbure au niveau de la zone de mélange. Le tourbillonnement rend les structures cohérentes fortement organisées. Dans le cas du jet libre, elles deviennent plus faibles en supprimant appariement des tourbillons (le vortex-pairing). En faisant un accroissement de la turbulence, il a été observé qu'à partir d'une certaine intensité de tourbillonnement, une zone de recirculation apparaissait dans l'écoulement principal. La taille et la position de cette zone de recirculation varient avec l'intensité du tourbillonnement. Le tourbillonnement généré a pour effet de rendre la turbulence anisotrope, et il présente un effet inhibiteur sur le transfert de l'énergie de grosses structures vers les petites structures. Le tourbillonnement est caractérisé par un nombre adimensionnel qui définit une mesure du rapport entre le flux axial du moment angulaire et la poussée axiale suivant [15]

$$S = \frac{\int_0^r r^2 U W dr}{R \int_0^r r^2 \left[U^2 - \frac{W^2}{2} \right] dr} \quad (I.1)$$

Le nombre de swirl peut être évalué à toute position du jet, car les deux quantités sont calculables. Le tourbillonnement permet de favoriser et $\sim 19 \sim$ d'améliorer le processus de mélange et de transfert. Aussi le jet présente l'avantage de s'épanouir plus rapidement par rapport au jet libre. Une autre formule empirique est utilisée pour le calcul du nombre de swirl. Elle définit le nombre de swirl en fonction des paramètres géométriques du générateur de swirl. Ce nombre S peut s'écrire d'après [16]. sous la forme suivante :

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - \frac{R_h^3}{R_n^3}}{\frac{R_h^2}{1 - \frac{R_h^2}{R_n^2}}} \right] tg \alpha \quad (I.2)$$

Avec:

α : c'est l'angle d'inclinaison des ailettes formant le générateur de tourbillonnement

R_h : est le rayon de la vanne support du diffuseur ;

R_n : est le rayon de diffuseur. On notera que dans le cas d'un dispositif de tourbillonnement sans moyeu ($R_h = 0$), l'expression se réduit selon: à :

$$S = \frac{2}{3} \tan \alpha \quad (I.3)$$

Dans cette étude, les vitesses axiales et tangentielles U et W , respectivement, ont été mesurées à la sortie d'un diffuseur tourbillonnaire avec un anémomètre à fil chaud, à sondes triples (DISA55M01). Quatre valeurs du nombre de swirl peuvent être utilisées, $S=0$ pour $\alpha=0^\circ$, $S=0,4$ pour $\alpha=30^\circ$, $S=0,7$ pour $\alpha=45^\circ$ et $S=1,3$ pour $\alpha=60^\circ$, respectivement. le nombre de swirl utilisé est celui qui correspond à $\alpha=60^\circ$. [17]

I.13. Transfert de chaleur

I.13.1. Modes de transferts de chaleur

Le processus par lequel l'énergie est transférée est désigné par le terme transfert de chaleur. La quantité transférée, appelée chaleur, ne peut être ni mesurée ni observée directement, mais ses effets peuvent être observés et mesurés. Le transfert thermique est l'un des modes les plus courants d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux zones ou entre deux systèmes dès qu'un gradient de température apparaît entre eux, quel que soit le milieu qui les sépare. Il se produit de trois manières : conduction, rayonnement et convection. Nous allons, dans ce qui suit, détailler ces trois modes.[18]

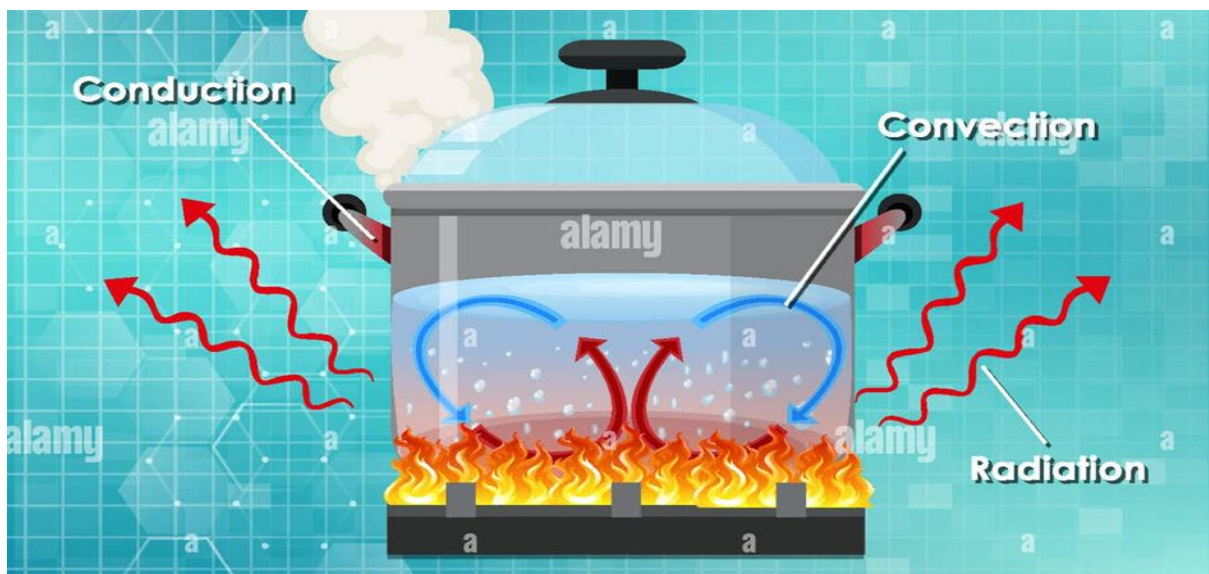


Figure (I . 5): Types de transfert de chaleur [19]

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

Le transfert de chaleur est l'un des modes d'échange d'énergie thermique entre deux systèmes. C'est une notion fondamentale de la thermodynamique. Contrairement au travail, la chaleur est le résultat de transferts d'énergie microscopiques et désordonnés. On distingue trois types de transfert thermique, qui peuvent coexister :

La conduction, est un transfert de chaleur qui se produit dans les solides (ou fluides au repos) sans mouvement de matière. Elle résulte de phénomènes microscopiques comme l'agitation des atomes, des molécules ou le flux d'électrons libres. Ce processus correspond au passage d'énergie des particules chaudes (énergie de vibration élevée) vers les particules froides (énergie de vibration plus faible), dû aux collisions. Dans les solides, surtout les métaux, le transfert s'effectue aussi par déplacement des électrons libres dans le réseau cristallin. Ainsi, les bons conducteurs d'électricité sont en général aussi de bons conducteurs de chaleur.

La convection, résulte du déplacement de molécules entraînant un transfert macroscopique de l'énergie thermique. Ce phénomène se produit dans les fluides (liquides ou gaz) ainsi qu'à l'interface entre un solide et un fluide. On distingue deux types de convection :

- La convection forcée dans laquelle l'écoulement du fluide est forcé par un dispositif mécanique quelconque (pompe ou gravité pour un liquide, ventilateur pour de l'air).
- La convection naturelle: lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un fluide, le fluide chaud, qui aura une masse volumique plus faible que le fluide froid aura tendance à monter sous l'effet de la poussée d'Archimède.

Le rayonnement est un transfert d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Il est souvent associé au rayonnement infrarouge, car cette partie du spectre est généralement prédominante dans les échanges thermiques.

I.14. Grandeurs influençant le développement du jet

I.14.1. Nombre de Prandtl

Ce nombre permet d'évaluer l'importance relative entre deux mécanismes impliqués dans la convection d'un fluide : la diffusion de quantité de mouvement (viscosité cinématique, ν) et la diffusion thermique (diffusivité thermique, α).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (I.4)$$

La valeur Général de $Pr = 0.7$

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

Le rapport entre ces deux grandeurs donne des indications sur les propriétés thermo physiques du fluide étudié.

I.14.2. Le nombre de Nusselt

Nusselt est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et une paroi. Il met en rapport le transfert par convection par rapport au transfert par conduction. Il est d'autant plus élevé que la convection prédomine sur la conduction. En règle générale, les corrélations de transfert de chaleur dans ce régime sont décrites par l'équation suivante : [20]

$$Nu = C. Re^m. Pr^n \quad (I.5)$$

Les constantes C, m et n dépendent de la géométrie du jet et de la géométrie de la surface d'impact. Les nombres adimensionnels de Nusselt (Nu), Reynolds (Re) et Prandtl (Pr) tiennent compte des propriétés thermo physiques du fluide à sa température en sortie de buse. nous donnons quelques corrélations concernant une surface statique impactée par un jet d'air pour un régime d'écoulement turbulent. On prend ($C=0,037$; $m=0,8$; $n=0,33$)

I.14.3. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds Re représente le rapport des forces d'inertie et des forces visqueuses. Il caractérise la nature du régime de l'écoulement, à savoir laminaire, transitoire, ou turbulent, quelle que soit la nature du fluide.

$$Re = \rho.v.Dh / \mu \quad (I.6)$$

Avec :

ρ : masse volumique d'air

μ : viscosité dynamique d'air

v : vitesse expérimentale

Dh : diamètre hydraulique

Aux faibles valeurs ($Re < 2000$) les forces de viscosité dominant et l'écoulement est laminaire. Aux valeurs intermédiaires ($2000 < Re < 3000$) l'écoulement est inertiel mais toujours laminaire : il est en transition vers la turbulence. Aux fortes valeurs ($Re > 3000$) l'écoulement est turbulent.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

I.15. Les travaux qui ont été réalisés sur la technique d'impacts de jets

ROUX.S, BRIZZIL.E, DORIGNAC.E, 2009 [21], ont fait une étude expérimentale sur la dynamique d'un jet rond turbulent impactant une paroi plane, pour un nombre de Reynolds de 28000 et une distance d'impact de 5 diamètres. Le jet est excité par un haut-parleur, sur une gamme de nombre de Strouhal allant de 0 à 1.5, permettant ainsi de modifier la structure dynamique du jet. Divers outils d'analyse et moyens de phase ont été appliqués afin d'observer l'influence de forçage acoustique sur les structures cohérentes de l'écoulement.

STEPHANE ROUX, 2006 [22], a fait une étude expérimentale aérodynamique et thermique de l'impact d'un jet rond unique sur une paroi plane, en mettant un haut-parleur qui permet de moduler la vitesse du jet à la sortie de buse. Des mesures de vitesse montrent que le forçage amplifie les structures tourbillonnaires dans la couche de mélange du jet. Selon le forçage, ces tourbillons peuvent être très stables ou donner lieu à des interactions régulières entre tourbillons. Des décompositions triples de vitesse montrent que les contributions moyennes, cohérentes et stochastiques de l'écoulement peuvent être adaptées, en fonction de la fréquence et de l'amplitude du forçage acoustique. Les fluctuations de pression associées à ces tourbillons sur la plaque d'impact ont été mesurées et évaluées à l'aide d'un formalisme intégral pour la pression. Les transferts de chaleur moyens par convection entre le jet et la paroi d'impact, révèlent deux principaux effets du forçage acoustique sur les variations radiales du nombre de Nusselt pour une petite distance d'impact. L'effet de l'impact du cône potentiel du jet sur la paroi disparaît lorsque le forçage acoustique conduit à une augmentation importante des niveaux de turbulence sur l'axe du jet. Des mesures de températures pariétales fluctuantes mettent en évidence deux modes de propagation des fluctuations de température sur la plaque d'impact. Le premier est indépendant du forçage acoustique et correspond à une propagation filamentaire. Le second est lié à la convection des tourbillons sur la plaque d'impact et correspond à la propagation radiale de fronts chauds et froids. Une autre section a pour objectif de présenter les principaux résultats généraux sur l'aérodynamique d'un jet rond en impact sur une paroi plane. On se limitera au cas du jet impactant la plaque perpendiculairement. De nombreux articles abordent ce cas, dont les principaux sont cités par Goldstein et Franchett, 1988 [23]. De manière générale,

L'écoulement est caractérisé par :

- la hauteur d'impact: c'est la distance entre la section de sortie du tube d'injection et la paroi d'impact;

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

– le nombre de Reynolds du jet, calculé à partir de la vitesse moyenne dans le tube d'injection et du diamètre de ce tube.

BENHACINE A, 2012 [24] a étudié, par simulation numérique, de jets plans turbulents impactant des parois courbées à l'aide du code de calcul Fluent, en utilisant trois modèles de turbulence, notamment le modèle $k-\epsilon$, le modèle des contraintes de Reynolds RSM et le modèle de simulation des grandes échelles LES. Les effets de la courbure de la paroi et de la distance entre la sortie de l'entrée du jet et le point d'impact ont été mis en évidence. La première partie du travail traite la performance des trois modèles de turbulence dans la simulation d'un jet plan turbulent isotherme impactant une paroi courbée convexe d'un demi-cylindre pour laquelle des résultats expérimentaux sont disponibles. La deuxième partie est une étude des phénomènes instantanés et statistiques caractérisant le jet libre, la région de stagnation et le jet pariétal par la méthode LES. Le comportement de l'écoulement isotherme dans les différentes parties du domaine est exploré. L'effet de la courbure de la paroi sur la dynamique du jet pariétal est mis en évidence par comparaison de l'évolution d'un jet impactant une paroi courbée et celle sur une paroi plane. La troisième partie, fruit d'un travail de collaboration avec le Département de « Mechanical Engineering, Petroleum Institute », Abu Dhabi, est une étude d'un jet impactant un demi-cylindre avec transfert de chaleur.

NEMDILI S, 2015 [25] présente une étude à caractère numérique basée sur un code commercial résolvant les équations de Navier-Stokes et l'équation de l'énergie moyennée par la méthode des volumes finis. Le travail représente une simulation d'écoulement autour d'un cube chauffé à une température de 60°C, placé dans un écoulement d'air forcé à 20°C. Le cube est exposé aussi à un jet perpendiculaire avec une température de 20°C.

Zakaria Ghrab et al [26] ont étudié de nombreuses applications industrielles, les jets sont employés dans le but de contrôler la température de surface d'un corps par convection forcée. Lorsque qu'un jet impacte une plaque horizontale dont la température est supérieure à celle du fluide, la dynamique de l'écoulement qui en résulte devient complexe, dans la mesure où il se produit une compétition entre les effets de flottabilité engendrés par la différence de température entre la plaque et le fluide, et les effets d'inertie.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les jets

En pratique, cette compétition se traduit par le décollement de la couche limite cinématique et thermique du fluide sur la plaque, à une distance plus ou moins éloignée de l'axe de la buse. Bien entendu, ce décollement de la couche limite a un effet important sur la quantité de chaleur échangée entre la plaque et le fluide, et donc, sur la qualité du refroidissement de la plaque. L'objet de cette recherche est donc de parvenir à caractériser le lieu de décollement de la couche limite en fonction de 3 paramètres, à savoir, la différence de température entre la plaque et le fluide, le débit imposé (i.e. le nombre de Reynolds) et la hauteur de la buse par rapport à la plaque. A cette fin, différentes investigations expérimentales sont réalisées : • visualisation par tomographie laser, • vélocimétrie par LDV et tube de Pitôt, • mesure de température par thermocouple. Les résultats obtenus expérimentalement présentent une bonne reproductibilité et nous permettent d'évaluer de manière quantitative l'effet des 3 paramètres étudiés sur le lieu de décollement de la couche limite.

Les mesures de vitesse dans les jets sont classiquement réalisées par fil chaud ou par PIV (Particle Image Velocimetry). La première méthode donne de bons résultats lorsque l'écoulement est propre et que les niveaux de température restent raisonnables. La seconde méthode permet une visualisation plus globale de l'écoulement. On lui préfère parfois la visualisation par tranche laser (ou lumineuse), qui met clairement en évidence l'apparition d'instabilités lorsque le nombre de Reynolds dépasse un seuil critique (d'après Varieras et al, 2001), [27].

I.16. Conclusion

L'étude bibliographique présentée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence la richesse et la diversité des recherches menées sur les jets fluides. Les différentes catégories de jets, qu'ils soient libres, turbulents, impactant ou tourbillonnaires, ont été décrites en soulignant leurs structures, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application. Une attention particulière a été accordée au transfert de chaleur, dont la compréhension repose sur l'utilisation des nombres adimensionnels classiques tels que Reynolds, Prandtl et Nusselt. Les expériences effectuées dans la littérature montrent que le comportement des jets est fortement influencé par les conditions initiales et par la géométrie de l'orifice, ce qui détermine à la fois la structure de l'écoulement et l'efficacité des échanges thermiques. Enfin, la synthèse des travaux antérieurs a permis de mettre en lumière les méthodes expérimentales et numériques les plus utilisées, constituant ainsi une base solide pour la suite de cette étude, qui vise à approfondir l'analyse du jet impactant et des phénomènes associés.

Chapitre II

Etude expérimentale

Chapitre II : Etude expérimentale

II.1. Introduction

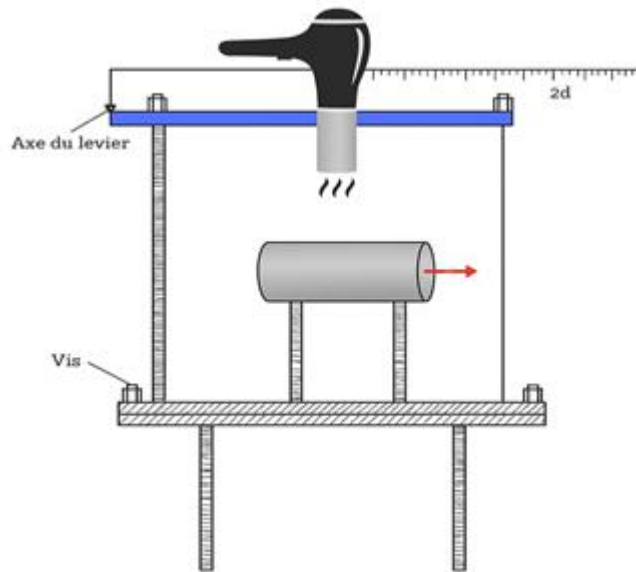
Cette étude vise à mettre en évidence le rôle essentiel joué par les jets dans les phénomènes de transfert de masse et de chaleur au sein des écoulements turbulents, compte tenu de la diversité de leurs applications industrielles. L'étude bibliographique réalisée dans le premier chapitre a souligné l'importance particulière de ces phénomènes.

En s'appuyant sur les travaux antérieurs relatifs à l'utilisation des jets dans différentes applications, nous avons identifié les paramètres clés influençant le choix de la géométrie des diffuseurs ainsi que les configurations des jets étudiés. Ce chapitre se concentre sur la mesure expérimentale des températures, des vitesses et du nombre de Nusselt, en étudiant deux configurations différentes de jet simple (avec un seul diffuseur) impactant une surface solide placée à une distance variable H/D , tout en faisant varier la géométrie du diffuseur pour chaque configuration.

Deux configurations de jets d'air impactant une surface solide sont ainsi étudiées: la première correspond à un diffuseur à géométrie tourbillonnaire, la deuxième à un diffuseur de géométrie lobée.

II.2. Dispositif expérimentale

Les expériences ont été menées dans une chambre de 3 mètres de long, 2,9 mètres de large et 3,1 mètres de haut. Ces dimensions permettent de réaliser un test idéal dans des conditions de ventilation verticale libre avec une poussée uniforme. Le dispositif expérimental est constitué d'un cadre métallique cylindrique d'un diamètre de 0,11 mètre et d'une longueur de 20 cm, sur lequel est fixée une plaque en plexiglas. À l'autre extrémité, un appareil installé au sommet souffle de l'air chaud dirigé vers le bas (Figure II.1). La partie inférieure de cet appareil est fixée à un diffuseur d'air (lobé, tourbillonnaire) selon la configuration de l'installation. Les températures (T_i) et les vitesses (U_i) sont mesurées à l'aide d'un appareil multifonction de mesure de la vitesse de l'air (type VelociCalc Plus Air Velocity Meter), qui est un instrument multifonction à haute précision. Les données peuvent être affichées à l'écran, imprimées ou enregistrées dans un tableau, ce qui permet leur transfert facile vers un ordinateur pour un traitement statistique précis. La précision est de $\pm 0,015$ m/s pour la vitesse et de $\pm 0,1$ °C pour la température mesurée par le capteur thermique. Un thermomètre numérique est placé dans la pièce, à l'extérieur de l'ouverture, pour mesurer immédiatement la température ambiante (T_a).



Figure(II.1) : Banc d'essai de l'étude expérimentale

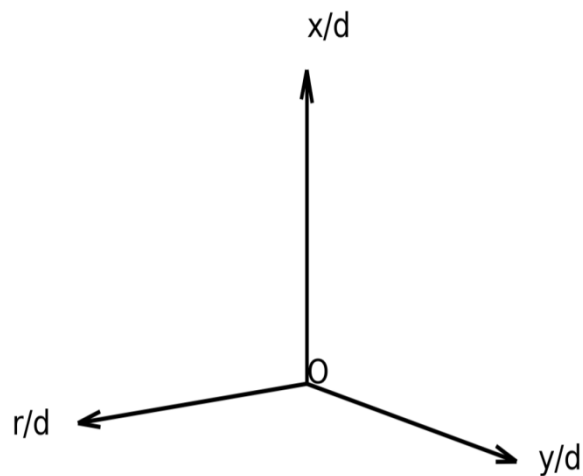


Figure (II.2) : System de coordonnées (x/d, y/d, r/d)

II.3. Configurations étudiées

Le procédé se fait en soufflant de l'air chaud à travers un dispositif fixé sur la plaque en verre maillé en haut. L'air entre en collision avec l'obstacle, qui est un obstacle cylindrique que nous avons placé horizontalement sur la même plaque en verre maillé, avec la division de sa surface en quatre axes ($r/d=0$, $r/d=0.5$, $r/d=1$, $r/d=1.5$) où chaque axe est divisé en 5 points ($y/d=0$, $y/d=0.5$, $y/d=2$, $y/d=3$, $y/d=4$) Comme le montre la (figure II.3).

Chapitre II : Etude expérimentale

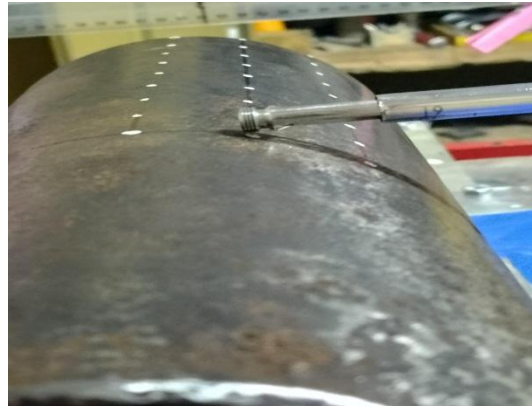
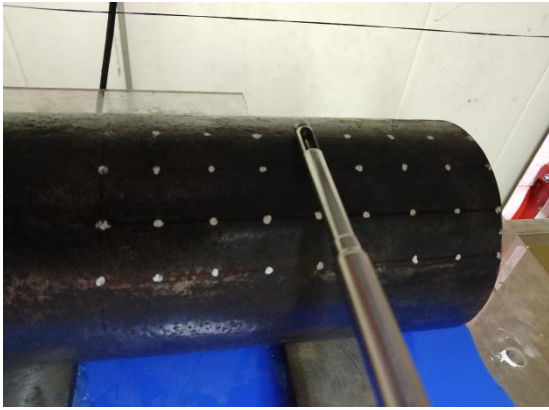


Figure (II.3) : Photos de l'obstacle utilisé

Nous plaçons un anémomètre thermique à chaque point mentionné (y/d) sur chaque axe (r/d) pour mesurer la température et la vitesse à chaque point, ainsi que la température et la vitesse au-dessus de la surface tout au long de l'axe x/d . Pour plus de clarté, nous effectuons les mesures axialement et radialement, et nous répétons la même procédure à différentes hauteurs ($h/d=2$, $h/d=4$, $h/d=6$, $h/d=8$).

D'abord, nous avons utilisé le diffuseur tourbillonnaire, puis nous avons installé le diffuseur lobé et effectué les mêmes mesures mentionnées précédemment. Remarquez les formes

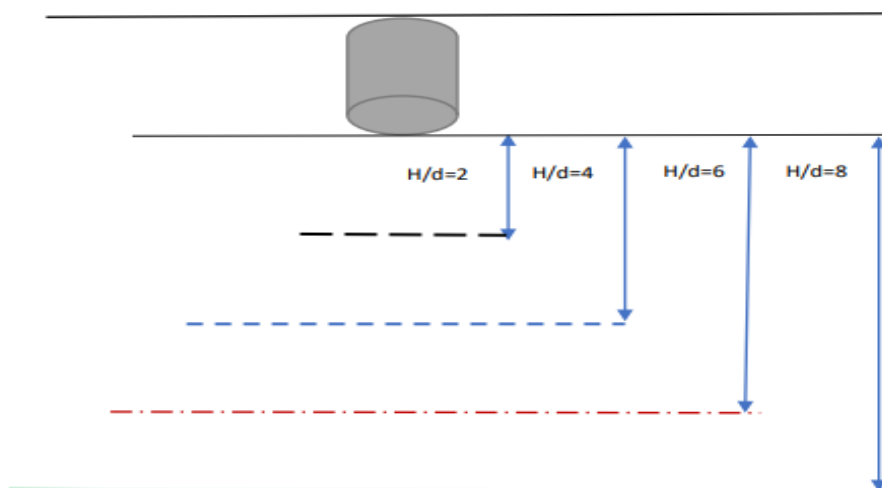


Figure (II.4) : position de mesure (H/D)

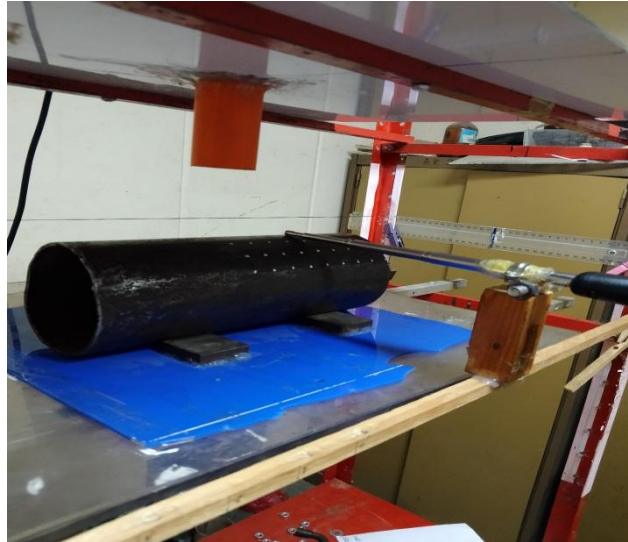


Figure (II. 5) : installation de l'obstacle cylindrique

II.4. Géométrie des diffuseurs utilisés

II.4.1. Diffuseur lobé

Le diffuseur illustré dans la figure II.3 est constitué d'un tube circulaire de 40 mm de diamètre et de 0.092 m de longueur, avec une sortie lobée comportant six lobes inclinés de 14° vers l'extérieur dans le sens de l'écoulement. Les creux entre les lobes sont inclinés de 22° vers l'intérieur. La longueur de chaque lobe (H) est d'environ 15 mm, tandis que sa largeur (W) est d'environ 6 mm. Ce design vise à améliorer les caractéristiques de l'écoulement de l'air et à renforcer le mélange aérodynamique dans les expériences ou les applications pratiques.

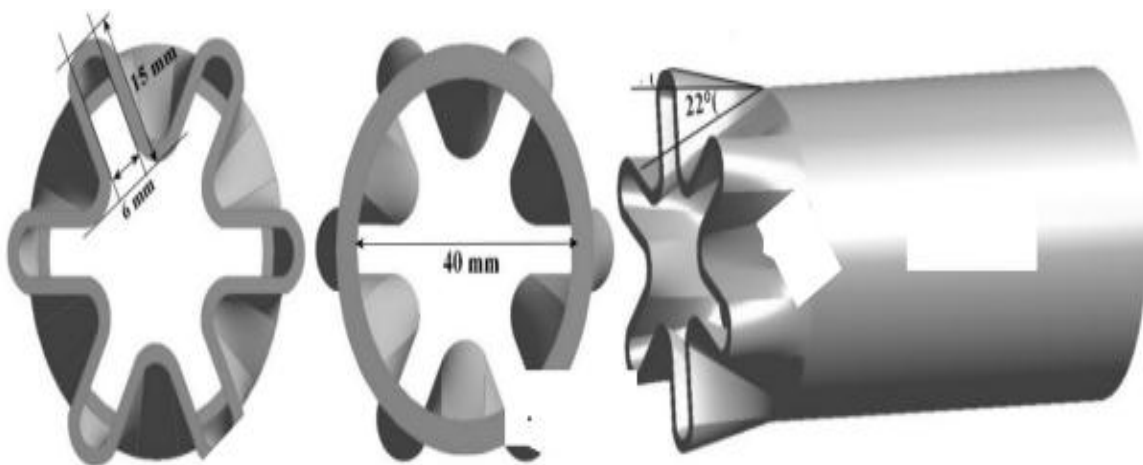


Figure (II.6) : diffuseur lobé

Chapitre II : Etude expérimentale

II.4.2. Diffuseur tourbillonnaire

Il s'agit d'un tube circulaire avec un diamètre intérieur de 0,04 m et une longueur totale de 0,092 m, équipé de 12 ailettes disposées à l'intérieur pour générer un écoulement tourbillonnaire. La longueur de chaque ailette est d'environ 0,01 m. La fonction de ce type de diffuseur est de créer un tourbillon à l'intérieur de l'écoulement afin d'améliorer le mélange et de contrôler les caractéristiques du flux à la sortie. Ce design permet d'augmenter l'efficacité de la diffusion par rapport aux diffuseurs circulaires classiques.

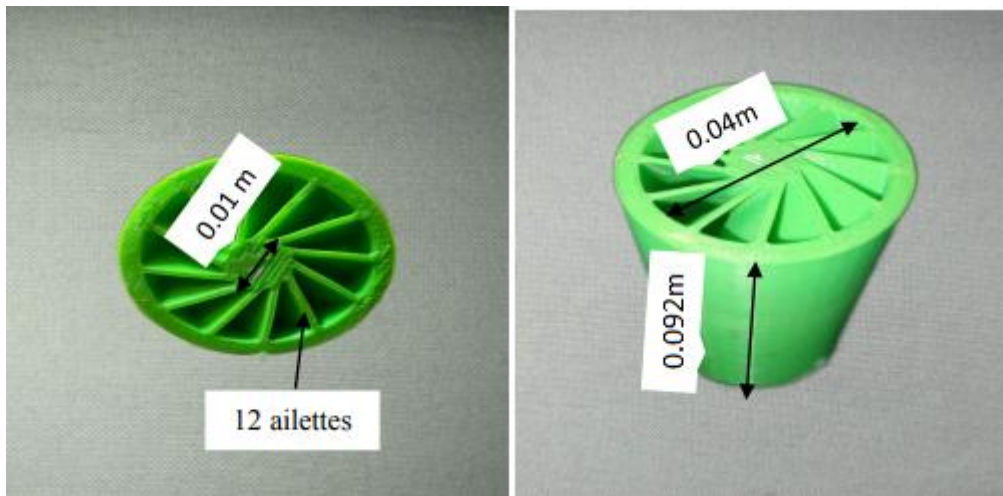


Figure (II.7) : Diffuseur tourbillonnaire

II.5. Conditions opératoires

II.5.1. Diffuseur tourbillonnaire

Nous avons mesuré les températures et vitesses et le nombre de Reynolds à la sortie du diffuseur

$T_{max} = 63^{\circ}\text{C}$ et $V_{max} = 18\text{m/s}$ et $Re_{max} = 37560$ et $S = 0.385$

II.5.2 Diffuseur lobé :

Nous avons mesuré les températures et vitesses et le nombre de Reynolds à la sortie du diffuseur

$T_{max} = 63^{\circ}\text{C}$ et $V_{max} = 18\text{m/s}$ et $Re_{max} = 37560$ et $S = 0.175$

Chapitre II : Etude expérimentale

II.6 Mode Opérateur

La vitesse réduite U_r est calculée par rapport à la vitesse de référence U_0 comme suit :

$$V_r = \frac{V_i}{V_{Max}} \quad (\text{II.1})$$

La température réduite T_r est obtenue par rapport à la température de référence T_{max} et la température ambiante T_a comme suit :

$$T_r = \frac{T_i - T_a}{T_{max} - T_a} \quad (\text{II.2})$$

II.7. Procédures de mesure

Les valeurs de la température de l'écoulement (T_i) et des vitesses (V_i) ont été mesurées à l'aide d'un anémomètre de type VELOCICALC PLUS MODÈLE 9515 (manuel d'utilisation et de service n° 1980321, Révision J, juillet 2010). Cet appareil est un instrument de mesure de haute précision (voir figure II.8). Selon le manuel de l'instrument, la précision des mesures de vitesse et de température utilisées dans cette étude est la suivante :

Pour la vitesse

Plage de 0 à 50 m/s, avec une précision de $\pm 3\%$ de la lecture ou ± 3 ft/min ($\pm 0,015$ m/s), selon la valeur la plus élevée. La résolution est de 0,01 m/s.

Pour la température

Plage de -10 à 60 °C, avec une précision de $\pm 0,3$ °C. La résolution est de 0,1 °C.



Figure(II.8) : veloci-calc



Figure (II.9) : thermomètre digital

Chapitre III

Influence de la hauteur d'impact et de la géométrie du diffuseur

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier expérimentalement deux configurations de jet simple impactant une surface solide située à une distance H/D du diffuseur et où H varie. Nous présenterons ainsi les résultats expérimentaux en considérant la vitesse réduite V_r , la température réduite T_r et l'évolution du nombre de Nusselt en fonction de $(r/d, x/d, y/d)$ et de la hauteur d'impact H/D .

Les deux configurations étudiées se distinguent par la géométrie du diffuseur : la première correspond à un diffuseur à géométrie tourbillonnaire, et la deuxième à un diffuseur de type lobée,

III.2. Configuration N : 01 diffuseurs tourbillonnaires

Nous présentons les résultats sous forme de : profils de la température axiale T_a , température réduite T_r , profil du nombre de Nusselt et profil de vitesse moyenne sans dimension U_r en fonction du rapport x/D Figures (III.1) jusqu'à (III.60), en fonction de la hauteur d'impact (2D, 4D, 6D et 8D)

III.2.1.1. Distribution de la température axiale T_a pour $h/d=2$

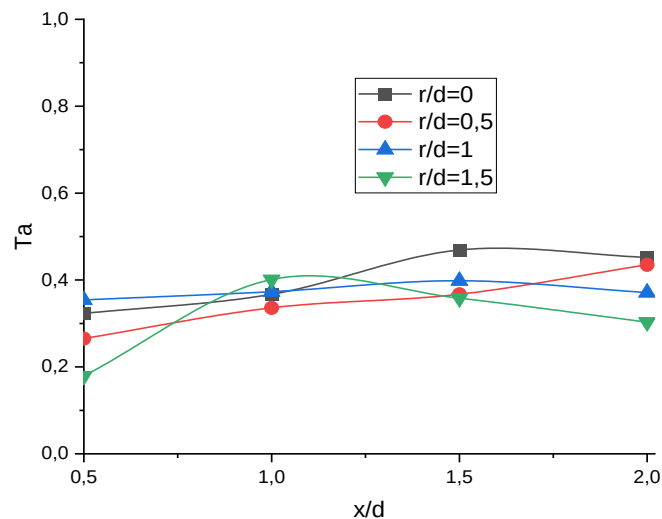


Figure (III.1) : Distribution de la température axiale T_a à $h/d=2$

Dans cette configuration où l'obstacle est à deux diamètres de l'orifice de soufflage la température axiale augmente au fur et mesure que x/d augmente jusqu'à deux diamètres de l'orifice de soufflage, sauf pour la configuration où $r/d=1,5$, la température axiale commence à décroître à partir de $x/d=1$ ceci est dû à la géométrie du diffuseur. Pour les trois

configurations ou la température augmente, il y aura un transfert d'énergie thermique vers ces zones.

III.2.1.2. Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$

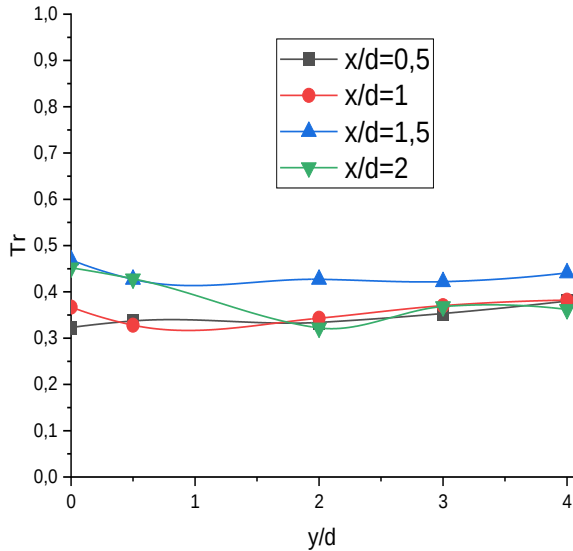


Figure (III.2) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=0$

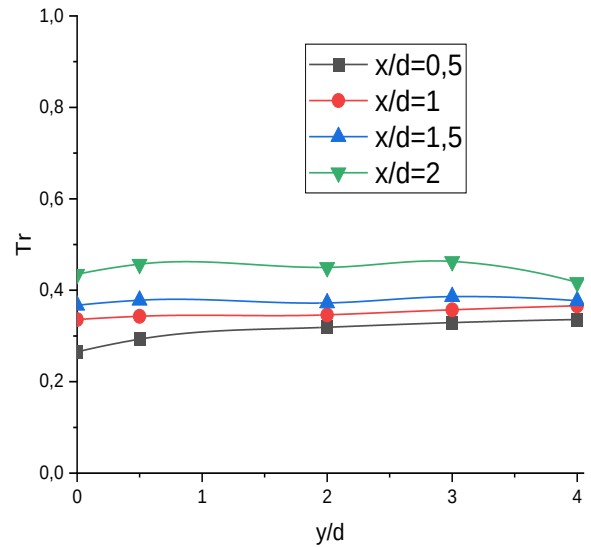


Figure (III.3) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$

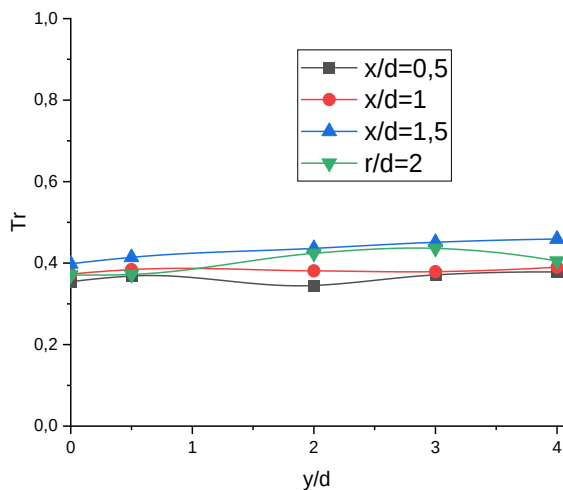


Figure (III.4) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=1$

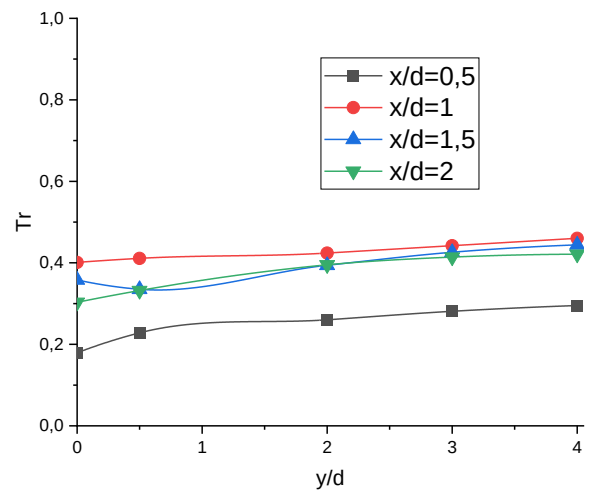


Figure (III.5) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$

Radialement ou bien le long de l'axe de l'obstacle qui est un cylindre creux, on constate une stabilité et homogénéité presque parfaite sur toute la longueur de l'impact et presque pour toutes les stations r/d , sauf que l'amplitude de la température, change d'une station à une autre. Ainsi on observe que l'amplitude la plus importante de la température sur la surface de l'obstacle c'est-à-dire à $x/d=2$, est obtenu à la station $r/d=0,5$ comme le montre la figure III.3

III.2.1.3. Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=2$

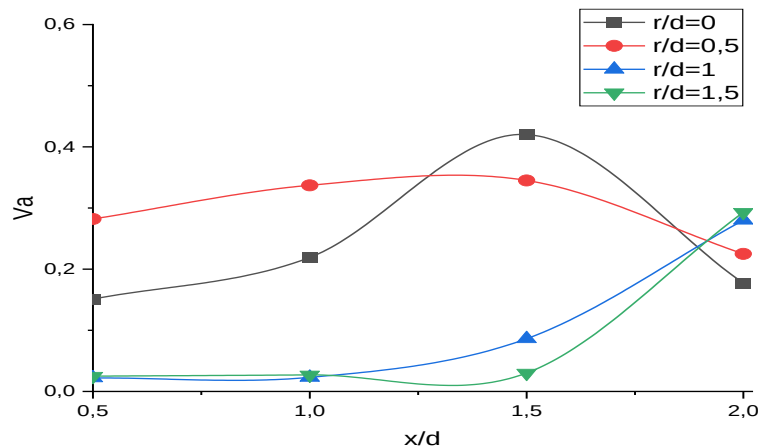


Figure (III.6) : distribution de la vitesse V_a axial pour $h/d=2$

La figure (III.6) illustre l'évolution de la vitesse axiale V_a en fonction de la coordonnée relative x/d pour un rapport de hauteur $h/d = 2$. On constate que la vitesse axiale atteint des valeurs élevées sur l'axe ($r/d = 0$), avec un maximum autour de $x/d = 1,5$, avant de décroître progressivement. Pour $r/d = 0,5$, la vitesse reste quasiment stable avec une légère tendance à diminuer vers la fin du domaine étudié. En revanche, aux positions radiales plus éloignées ($r/d = 1$ et $1,5$), les vitesses sont faibles au début de l'écoulement, puis augmentent progressivement pour rejoindre celles de l'axe vers $x/d \approx 2$.

2.1.4. Distribution de la vitesse radiale pour $h/d=2$:

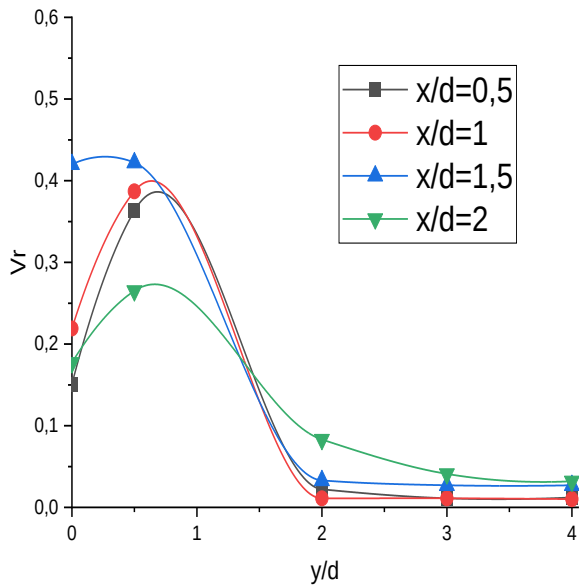


Figure (III.7) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=0$

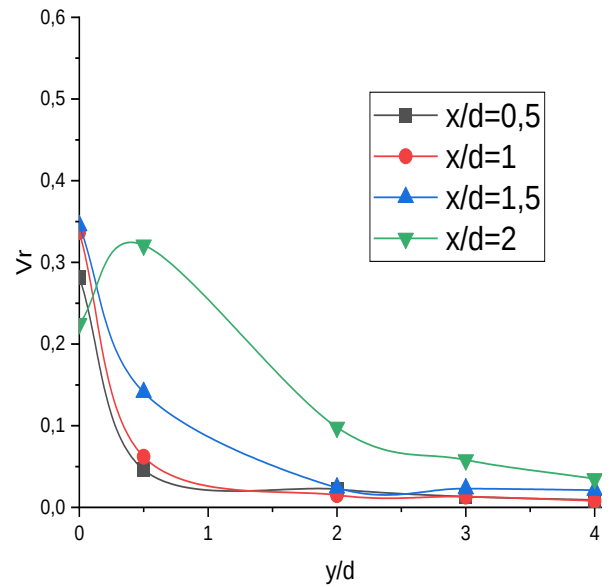


Figure (III.8) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$

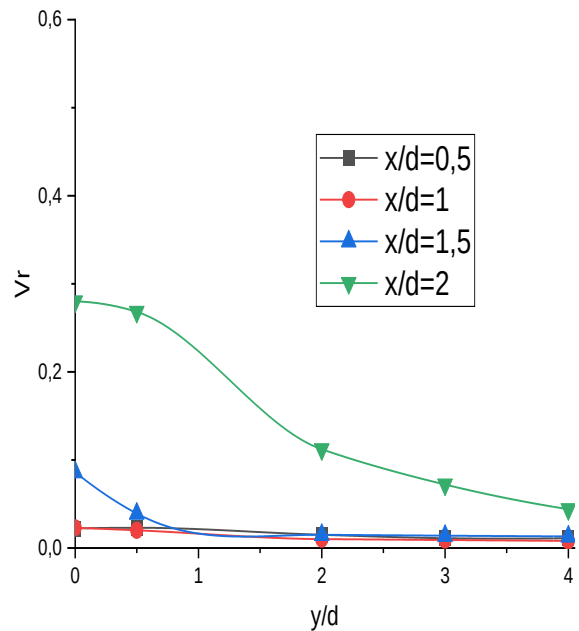


Figure (III.9) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=1$

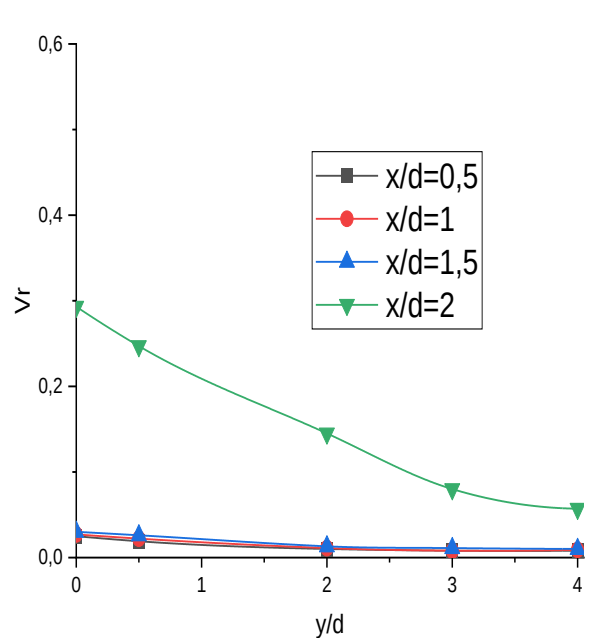
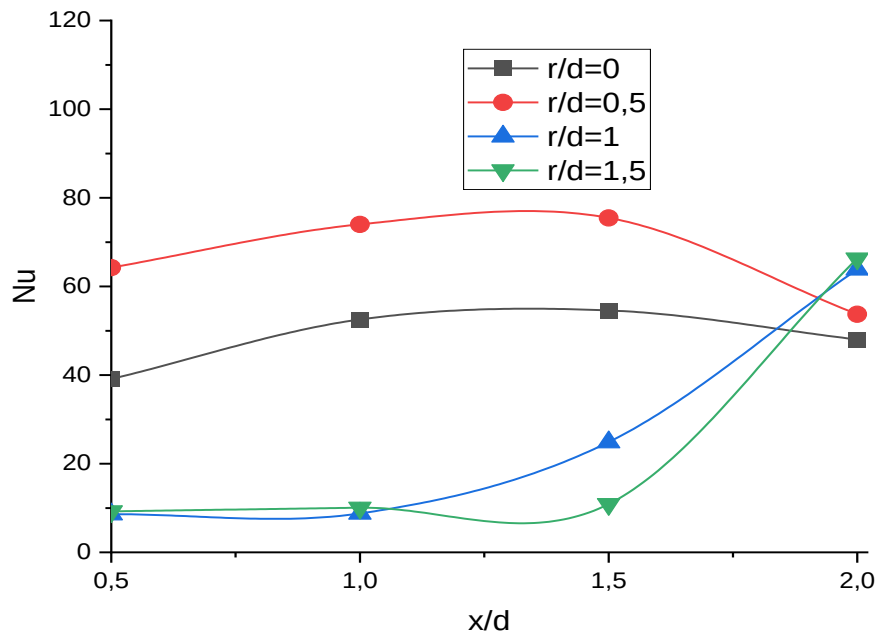


Figure (III.10) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$

III.2.1.5. Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=2$ Figure (III.11) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=2$

La figure III.11 illustre l'évolution du nombre de Nusselt axial pour $h/d = 2$. On observe que les valeurs sont plus élevées au niveau de $r/d = 0,5$, où un maximum est enregistré par rapport aux autres positions, suivies par celles de $r/d = 0$ qui restent plus faibles mais relativement stables. En revanche, aux positions éloignées ($r/d = 1$ et $1,5$), le nombre de Nusselt démarre très bas puis augmente nettement vers $x/d = 2$. Ce comportement montre que le transfert thermique est plus intense près de l'axe, avec une contribution croissante des positions radiales éloignées à mesure que l'écoulement progresse.

III.2.1.6. Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$

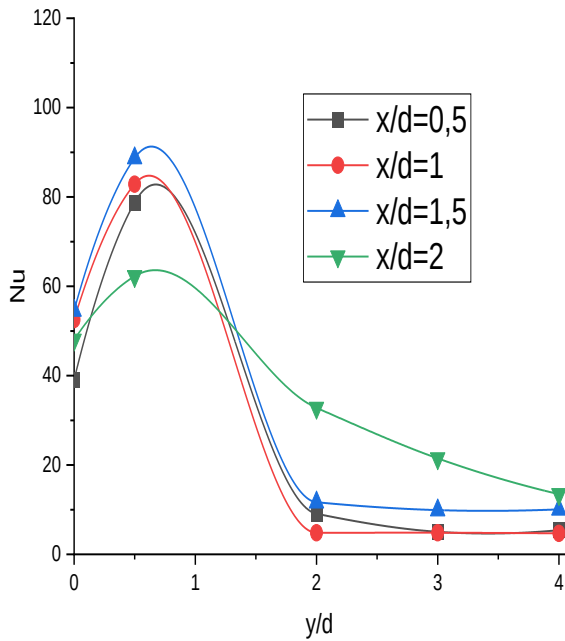


Figure (III.12) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=0$

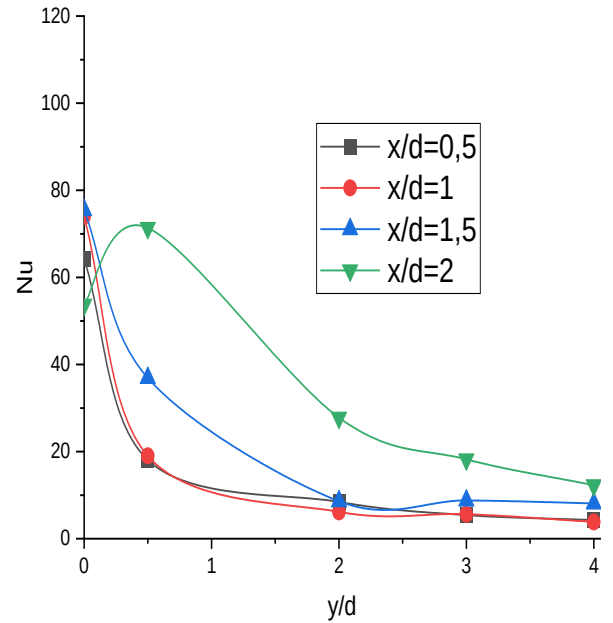


Figure (III.13) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$

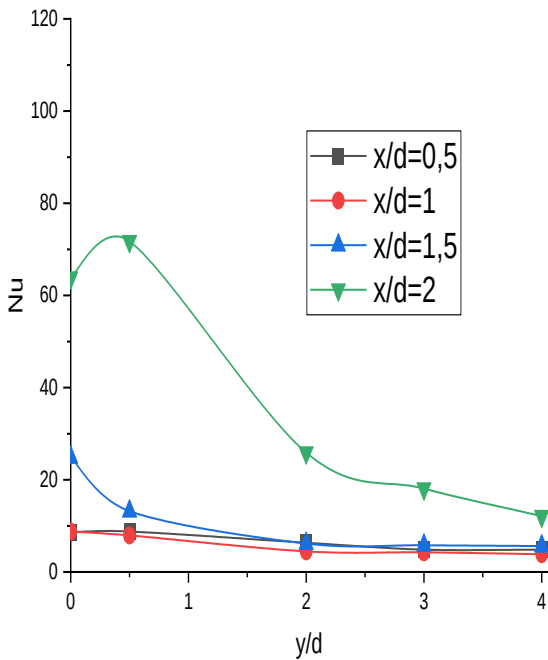


Figure (III.14) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=1$

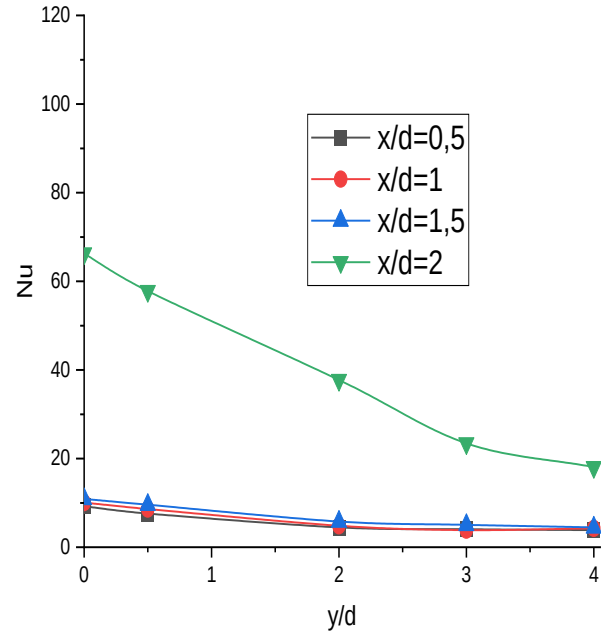


Figure (III.15) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$

Les figures (III.12 – III.15) représentant l'évolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d = 2$ et différentes positions radiales, on observe que les valeurs de Nu sont élevées près de l'axe (x/d faible), notamment pour $r/d = 0$, où le transfert thermique est maximal. Ensuite, ces valeurs diminuent progressivement avec l'augmentation de la coordonnée radiale y/d , pour se stabiliser à des niveaux faibles en périphérie. Il apparaît également que l'amplitude du maximum diminue en s'éloignant de l'axe ($r/d = 0,5 ; 1 ; 1,5$), ce qui confirme que l'intensité de l'échange thermique est essentiellement concentrée au centre puis s'atténue vers les bords.

III.2.2.1. Distribution de la température axiale pour $h/d=4$

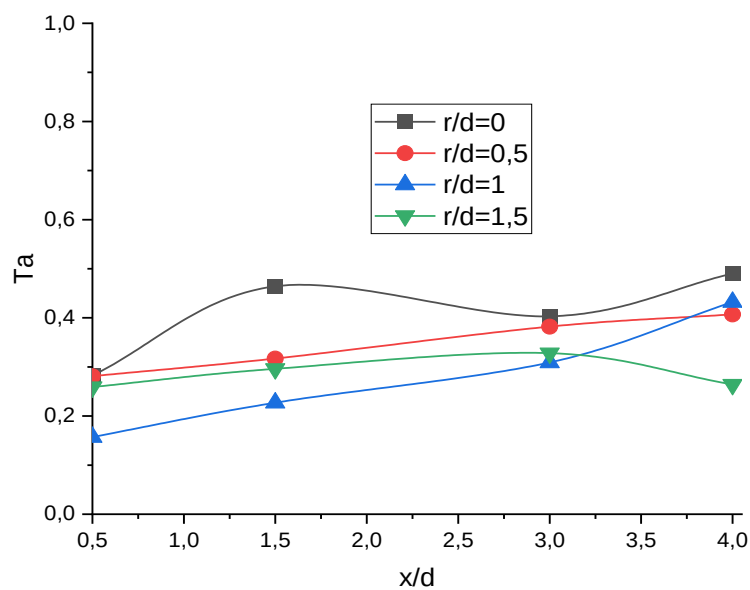


Figure (III.16) : Distribution de la température axiale T_a à $h/d=4$

Dans cette configuration où l'obstacle se trouve à une distance $h/d = 4$, la température augmente avec x/d . On observe que la valeur maximale de la température se situe à la station $r/d = 0$, à la surface de l'obstacle en $x/d = 4$, à l'exception de la configuration où $r/d = 0,5$, où la température commence à diminuer à partir de $x/d = 3$. Cela est dû à la géométrie du diffuseur..

III.2.2.2. Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$

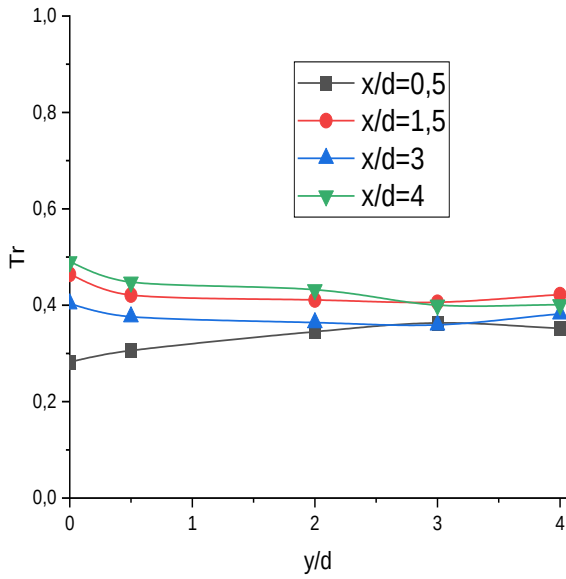


Figure (III.17) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=0$

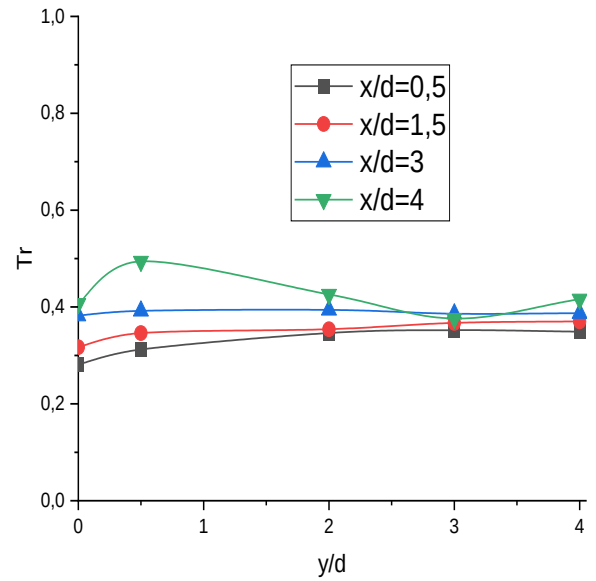


Figure (III.18) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$

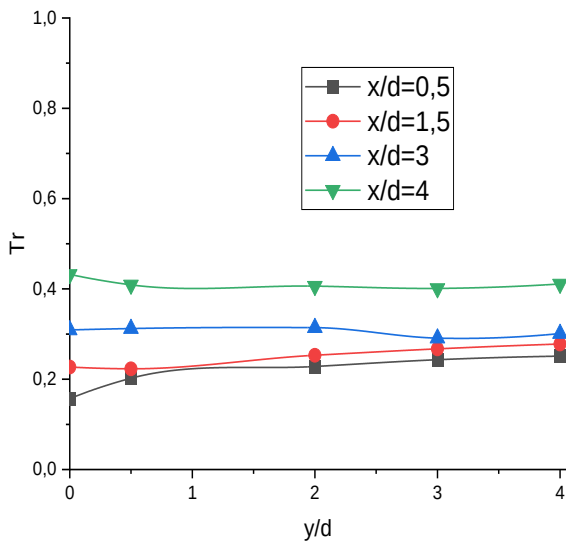


Figure (III.19) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=1$

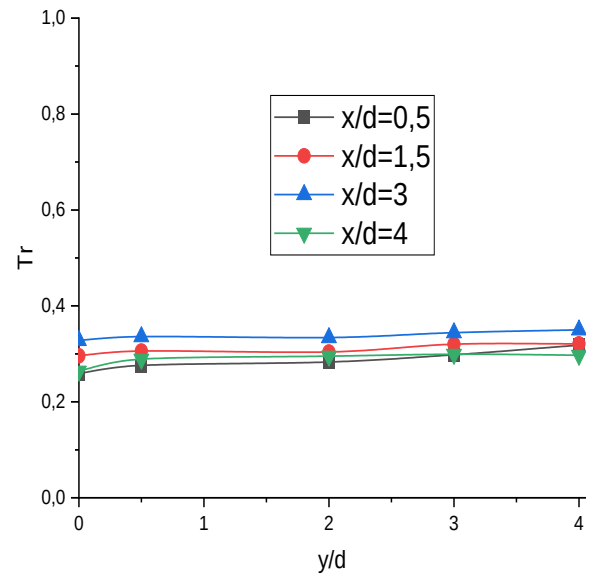


Figure (III.20) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$

Radialement, le long de l'axe de l'obstacle, on remarque une stabilité et une homogénéité quasi complètes tout au long de la trajectoire de l'impact et le long des stations r/d . Cependant, la température varie d'une zone à une autre. On constate que l'amplitude la plus importante de la température se trouve à $H/d = 4$, c'est-à-dire à la surface de l'obstacle, aux positions $r/d = 1$ et $r/d = 0.5$, comme indiqué..

III.2.2.3. Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=4$

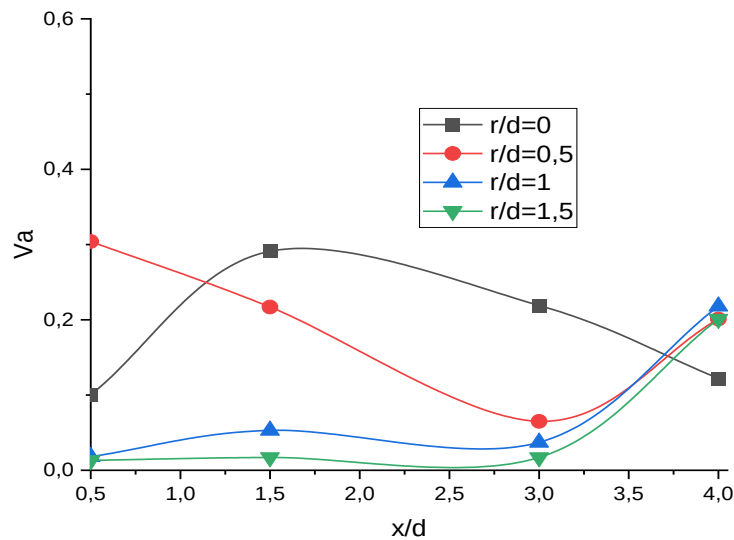


Figure (III.21) : Distribution de la vitesse V_a axiale pour $h/d=4$

Dans cette configuration où la distance $h/d = 4$, on observe que la distribution axiale de la vitesse V_a varie selon la position r/d . Sur l'axe central ($r/d = 0$), la vitesse commence par une valeur moyenne à $x/d = 0.5$, puis augmente progressivement pour atteindre un maximum vers $x/d \approx 1.5$, avant de diminuer graduellement en s'approchant de $x/d = 4$. Pour $r/d = 0.5$, on remarque une décroissance continue de la vitesse le long de l'axe, atteignant une valeur minimale à $x/d = 3$, puis une légère remontée à $x/d = 4$. Quant aux stations plus éloignées de l'axe ($r/d = 1$ et $r/d = 1.5$), la vitesse reste relativement faible et quasi stable tout au long du parcours, avec toutefois une augmentation notable à $x/d = 4$, ce qui traduit l'influence de la géométrie de l'écoulement au bord de l'obstacle.

III.2.2.4 Distribution de la vitesse radiale pour $h/d=4$

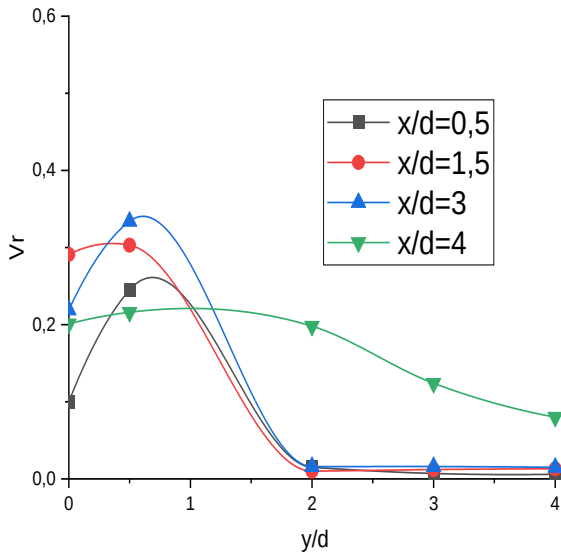


Figure (III.22) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=4$ et $r/d=0$

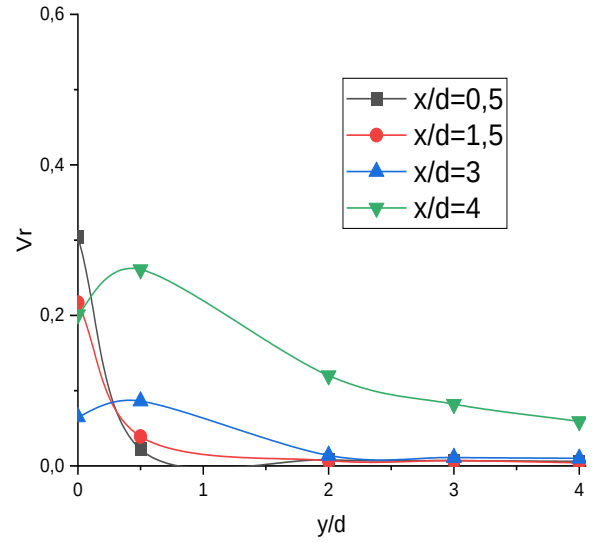


Figure (III.23) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$

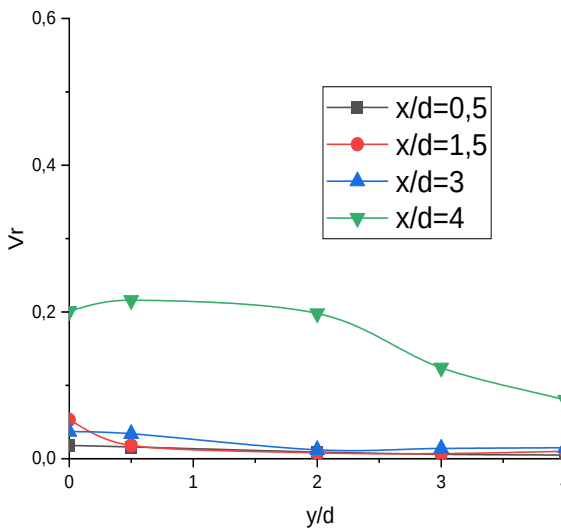


Figure (III.24) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=4$ et $r/d=1$

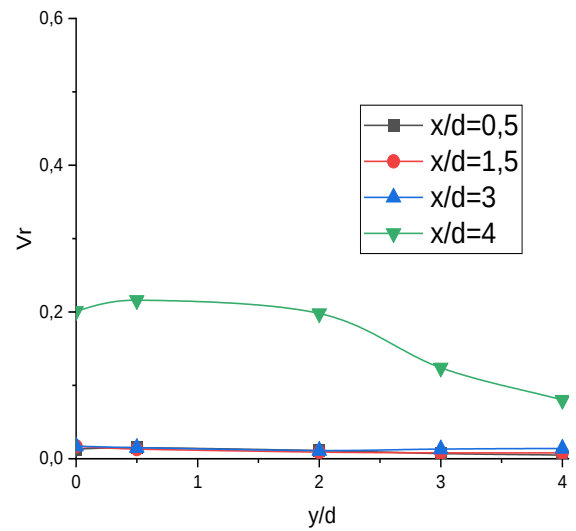
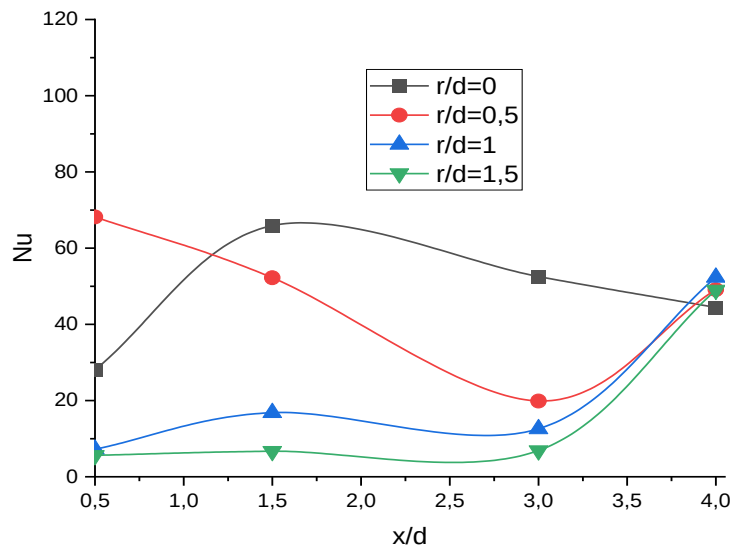


Figure (III.25) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$

III.2.2.5. Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=4$:Figure (III.26) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=4$

Dans cette configuration pour $h/d = 4$, on observe que le nombre de Nusselt varie clairement avec la position x/d et selon la valeur de r/d . Sur l'axe central ($r/d = 0$), Nu commence par une valeur moyenne puis atteint un maximum vers $x/d \approx 1.5$, avant de diminuer progressivement pour se stabiliser vers $x/d = 4$. Pour $r/d = 0.5$, Nu est élevé au départ puis décroît continuellement jusqu'à $x/d = 3$, avant de remonter légèrement. Aux positions latérales ($r/d = 1$ et $r/d = 1.5$), Nu reste relativement faible et stable, avec une augmentation notable à $x/d = 4$, traduisant l'effet de la géométrie de l'écoulement et l'intensification du transfert thermique au bord de l'obstacle.

III.2.2.6. Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$

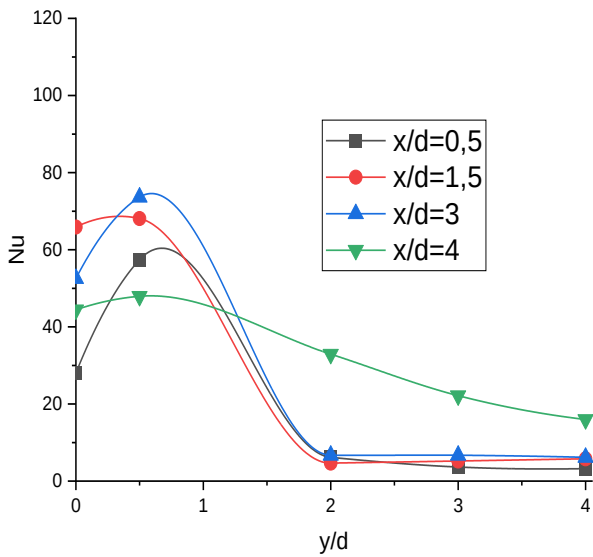


Figure (III.27) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=0$

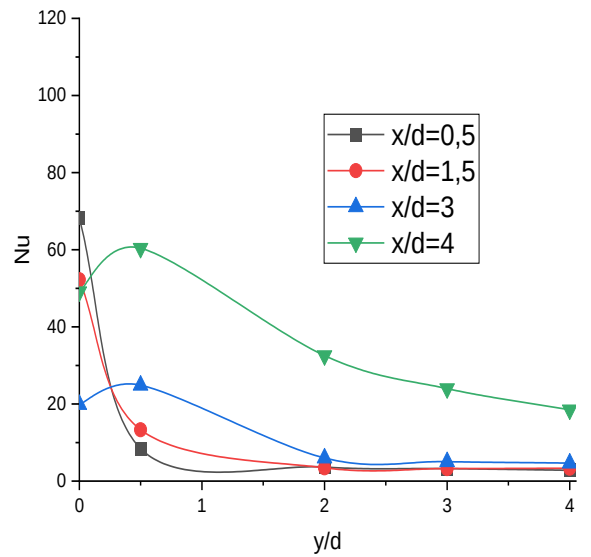


Figure (III.28) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$

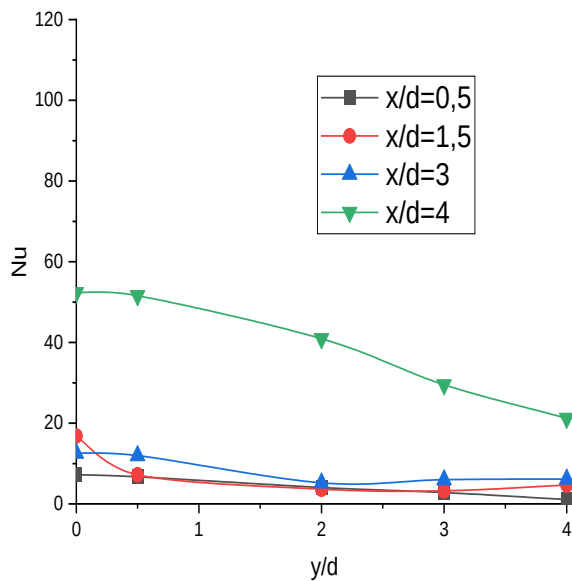


Figure (III.29) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=1$

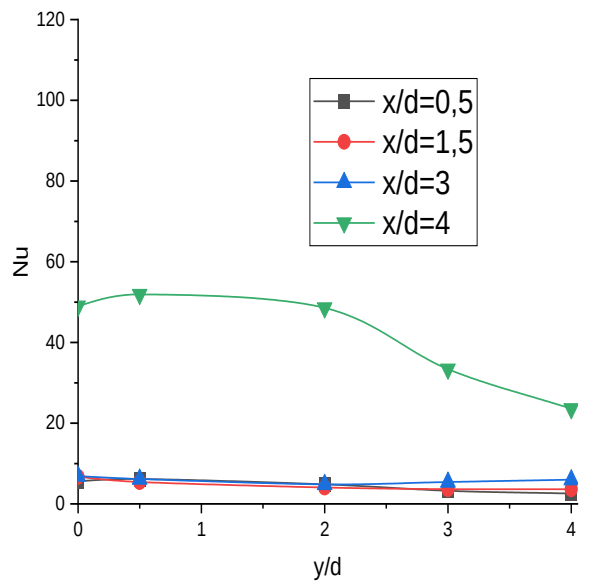


Figure (III.30) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$

On observe que le nombre de Nusselt est élevé près de l'axe, en particulier pour $x/d = 1.5$ et $x/d = 4$, puis il diminue nettement avec y/d jusqu'à atteindre des valeurs faibles et stables en périphérie. La courbe correspondant à $x/d = 4$ se distingue par des valeurs plus élevées que les autres cas sur l'ensemble des positions, traduisant une intensification du transfert thermique. En revanche, les valeurs restent très faibles pour $x/d = 3$ et $x/d = 0.5$, surtout loin de l'axe

III.2.3.1. Distribution de la température axiale pour $h/d=6$

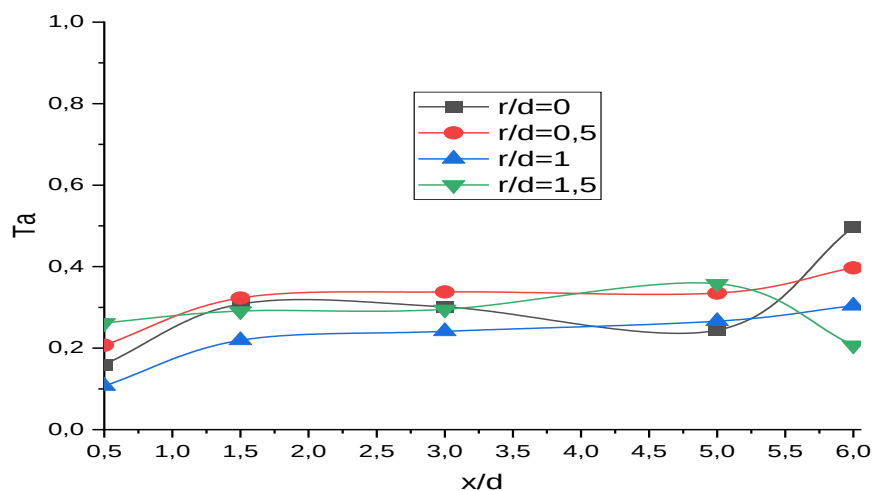


Figure (III.31) : Distribution de la température axiale T_a à $h/d=6$

La figure (III.2.3.1) présente la distribution de la température axiale pour $h/d = 6$. On remarque que la température reste globalement stable à des valeurs intermédiaires pour toutes les positions radiales ($r/d = 0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5$) avec seulement de faibles variations. Près de l'axe ($r/d = 0$), une augmentation notable apparaît vers la fin ($x/d \approx 6$), tandis que les autres courbes montrent un comportement similaire avec une légère tendance à la hausse ou à la baisse selon la position radiale. De manière générale, cette distribution met en évidence une certaine homogénéité thermique le long de l'axe, avec un renforcement de l'échange thermique au centre du jet aux distances plus éloignées.

III.2.3.2. Distribution de la température radiale pour $h/d=6$

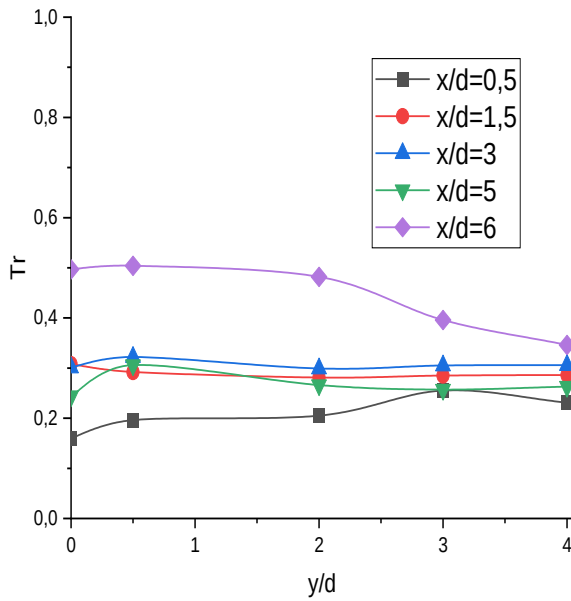


Figure (III.32) : Distribution de la température radiale Tr pour $h/d=6$ et $r/d=0$

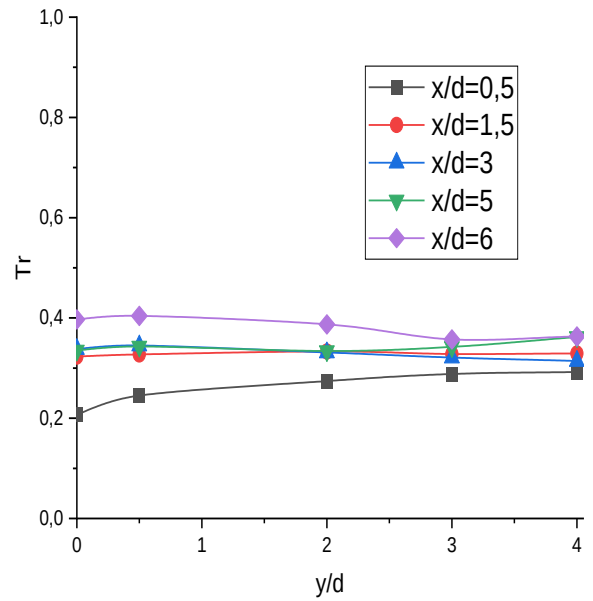


Figure (III.33) : Distribution de la température radiale Tr pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$

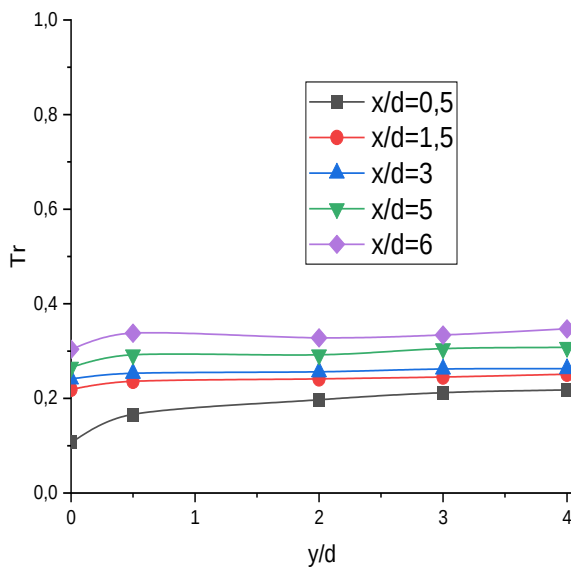


Figure (III.34) : Distribution de la température radiale Tr pour $h/d=6$ et $r/d=1$

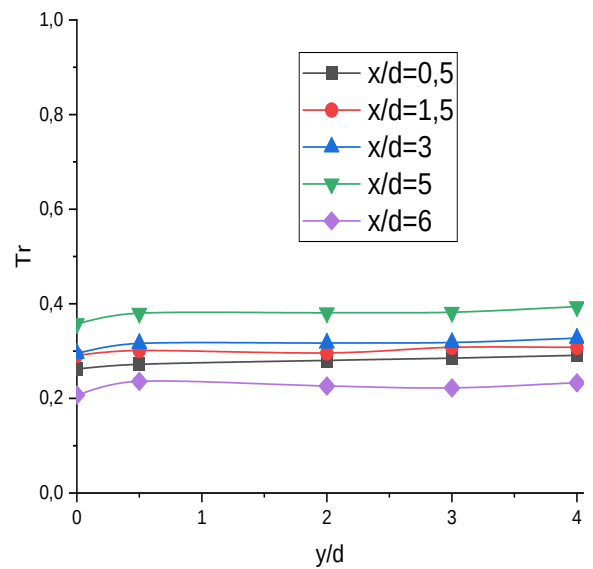


Figure (III.35) : Distribution de la température radiale Tr pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$

Les figures (III.32 – III.35) présentent la distribution de la température radiale pour $h/d = 6$ et différentes positions radiales ($r/d = 0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5$). On remarque que la température reste globalement stable selon la direction radiale avec seulement de faibles écarts, les valeurs les plus élevées étant enregistrées aux sections éloignées ($x/d = 5$ et 6) par rapport aux sections plus proches ($x/d = 0,5 ; 1,5 ; 3$). De manière générale, ce comportement met en évidence une tendance du système vers une homogénéisation thermique dans la direction transversale avec l'avancement de l'écoulement, tout en conservant une influence axiale plus marquée aux grandes distances.

III.2.3.3. Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=6$

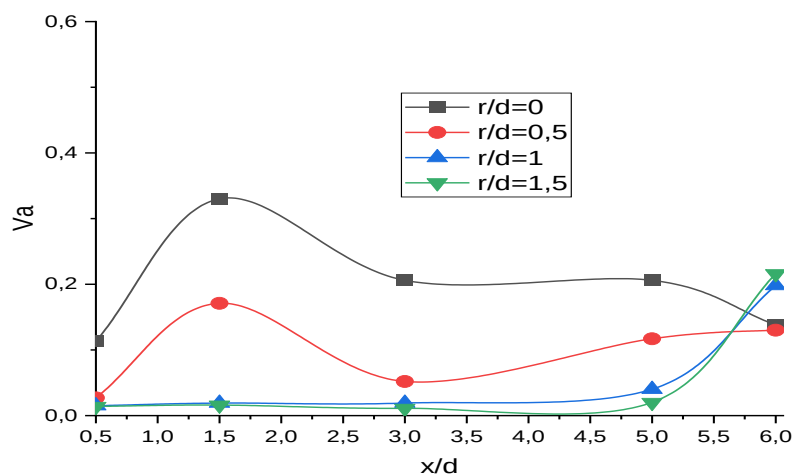


Figure (III.36) : distribution de la vitesse V_a axial pour $h/d=6$

La figure III.36 montre la distribution de la vitesse axiale V_a en fonction de x/d au rapport $h/d = 6$. On remarque que la vitesse atteint sa valeur maximale sur l'axe $r/d = 0$ avec un pic à $x/d = 1,5$, puis diminue progressivement. Pour $r/d = 0,5$, les valeurs restent inférieures à celles enregistrées sur l'axe avec une valeur maximale plus basse. Aux positions radiales plus éloignées $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, la vitesse reste presque nulle dans les sections proches, mais elle augmente clairement de $x/d = 5$ à $x/d = 6$. Ce comportement confirme que la vitesse axiale est la plus élevée près de l'axe et diminue radialement.

III.2.3.4. Distribution de la vitesse radial pour $h/d=6$

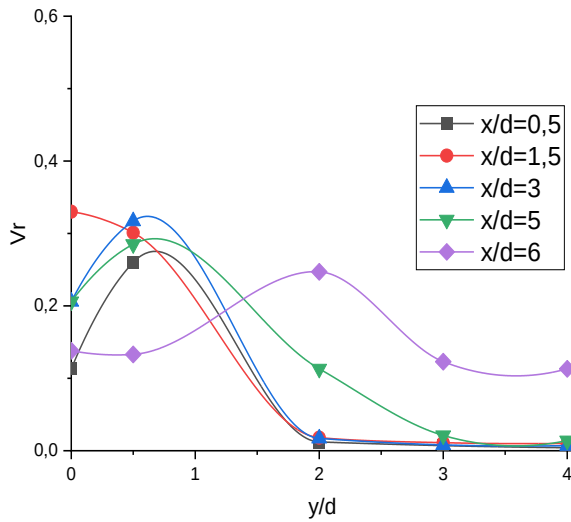


Figure (III.37) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=6$ et $r/d=0$

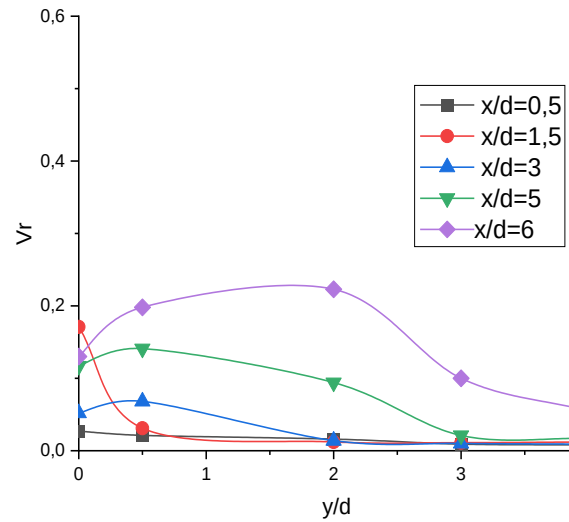


Figure (III.38) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=6$ et $r/d=0,5$

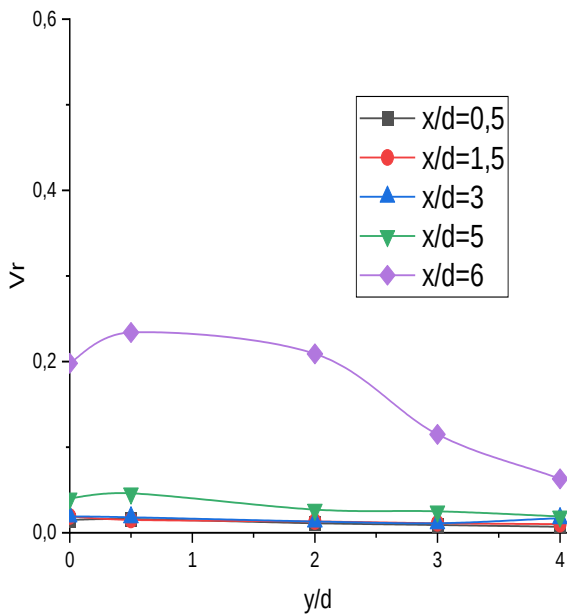


Figure (III.39) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=6$ et $r/d=1$

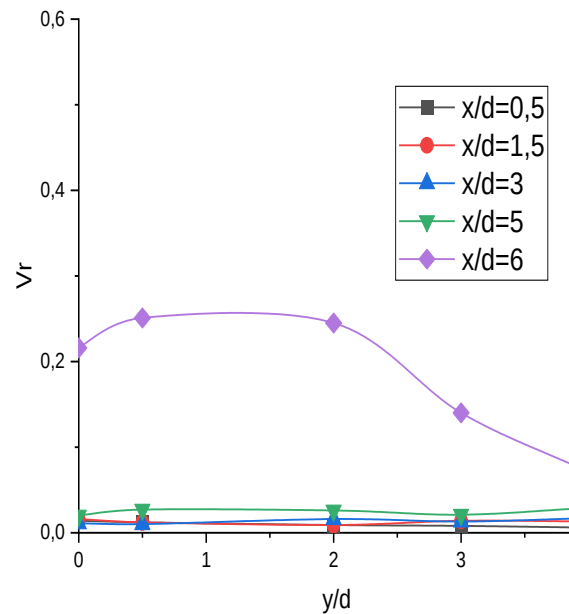
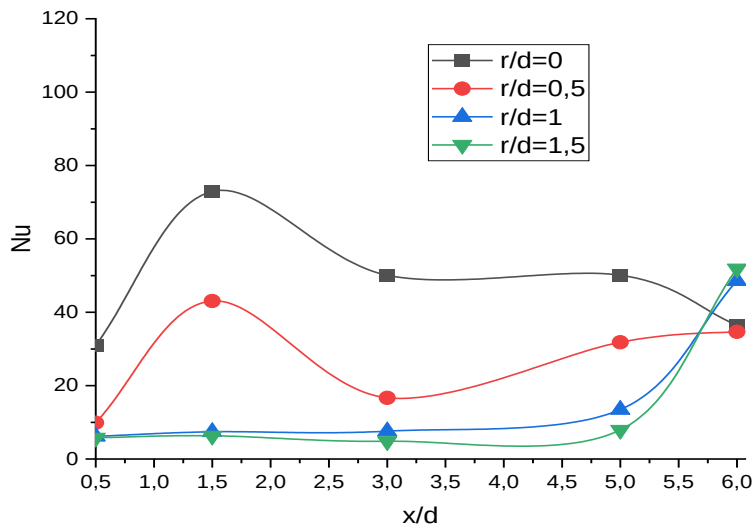


Figure (III.40) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=6$ et $r/d=1,5$

III.2.3.5. Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=6$:Figure (III.41) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=6$

La figure III.41 présente la distribution du nombre de Nusselt axial pour le rapport $h/d = 6$. On remarque que les valeurs maximales de Nu sont atteintes sur l'axe $r/d = 0$ où l'échange thermique est le plus intense. Il atteint son maximum à $x/d = 1,5$ et reste élevé le long de l'axe central. Les courbes correspondant à $r/d = 0,5$ montrent des valeurs intermédiaires, tandis qu'elles restent faibles pour $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, à l'exception d'une augmentation notable près du bord à $x/d = 6$. Ce comportement met en évidence l'influence de la position étudiée sur l'intensité du transfert de chaleur.

III.2.3.6. Evolution du nombre de Nusselt radiale pour $h/d=6$

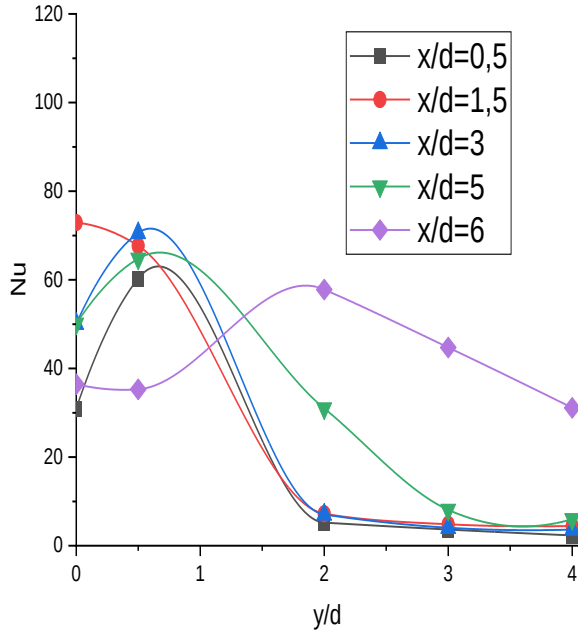


Figure (III.42) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=0$

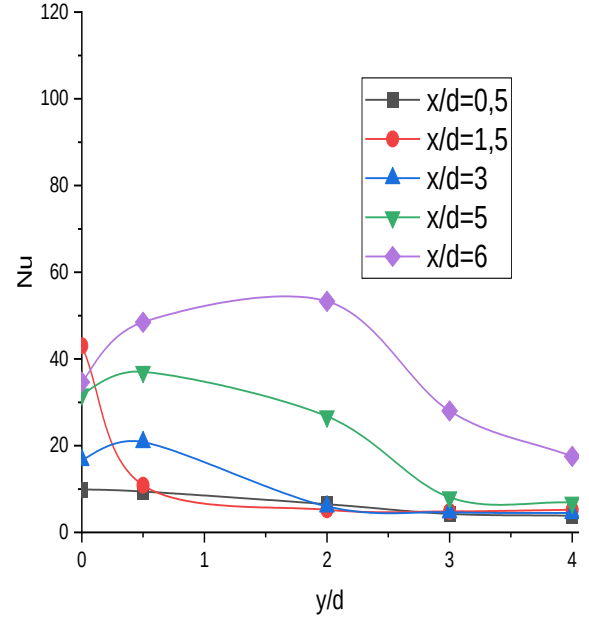


Figure (III.43) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$

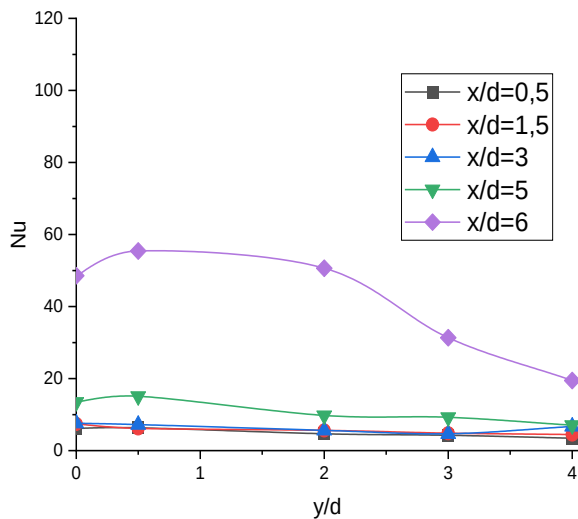


Figure (III.44) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=1$

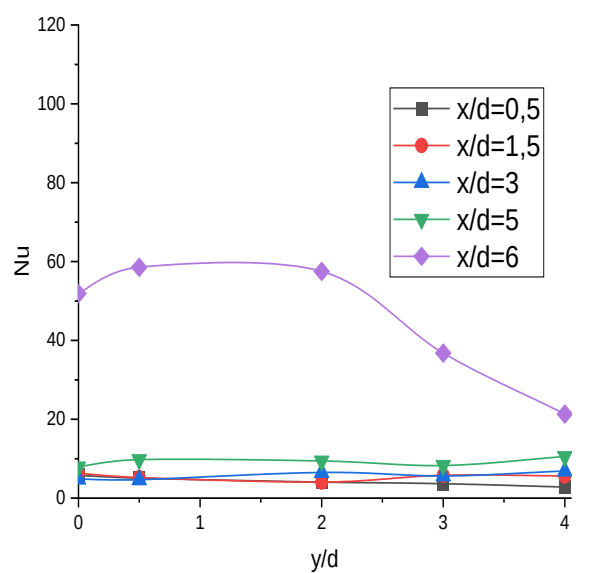


Figure (III.45) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$

Les figures III.42 – III.45 représentent l'évolution du nombre de Nusselt radial pour différentes positions radiales, on observe que les valeurs de Nu sont maximales près de l'axe où le transfert thermique est le plus intense. Par la suite, ces valeurs diminuent progressivement avec l'augmentation de la coordonnée radiale pour se stabiliser à des niveaux faibles en périphérie. À la position $r/d = 0,5$, des valeurs intermédiaires apparaissent entre le centre et les bords, tandis qu'aux positions $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, les courbes semblent relativement stables avec des valeurs beaucoup plus faibles, ce qui confirme que l'intensité de l'échange thermique reste concentrée au centre. De plus, l'effet de la position $x/d = 6$ demeure particulièrement marqué, reflétant un transfert thermique plus important par rapport aux autres cas.

III.2.4.1. Distribution de la température axiale pour $h/d=8$

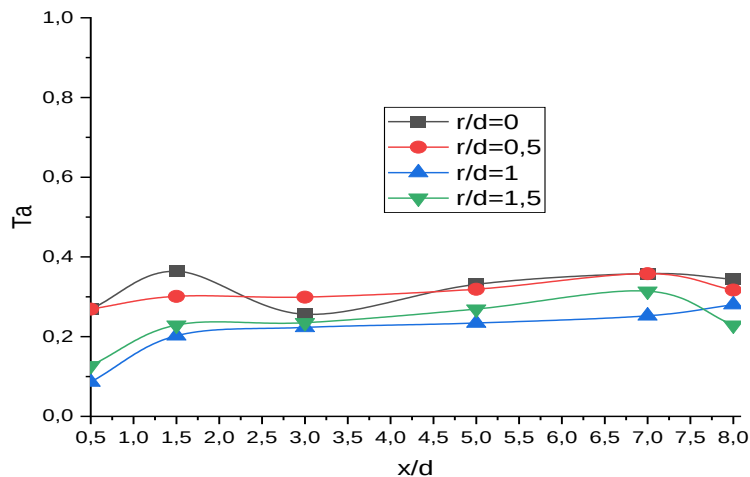


Figure (III.46) : Distribution de la température axiale T_a à $h/d=8$

À cette distance importante ($h/d = 8$), le jet a déjà perdu une grande partie de son énergie thermique avant d'atteindre l'obstacle. Ainsi, les valeurs de température à $x/d = 0,5$ apparaissent relativement faibles et restent globalement stables tout au long de l'axe. Les stations $r/d = 0$ et $r/d = 0,5$ présentent des valeurs légèrement plus élevées que $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, ce qui traduit l'influence persistante du centre du jet, avec quelques fluctuations autour de $x/d = 6$ et $x/d = 7$. De manière générale, le comportement axial de la température se caractérise ici par une diminution et une tendance à l'homogénéité, en raison de la dispersion du jet et de son mélange avec le milieu ambiant.

III.2.4.2. Distribution de la température radial pour $h/d=8$

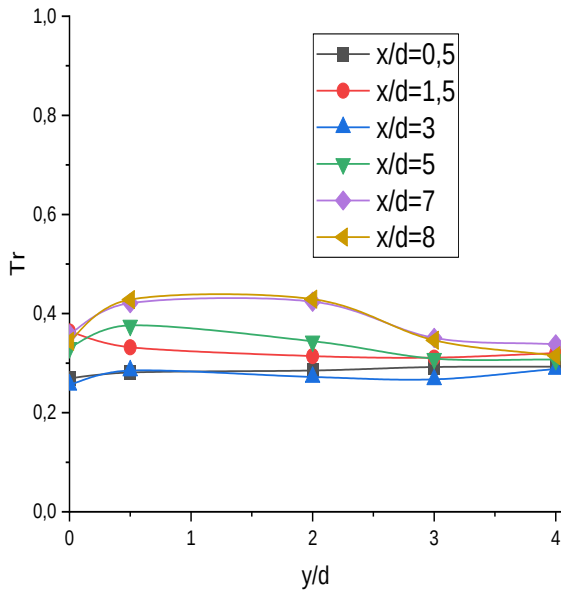


Figure (III.47) : Distribution de la température radial Tr pour $h/d=8$ et $r/d=0$

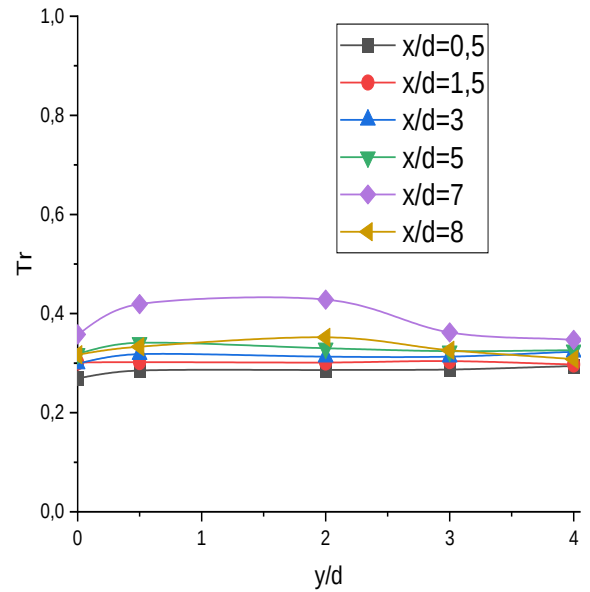


Figure (III.48) : Distribution de la température radial Tr pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$

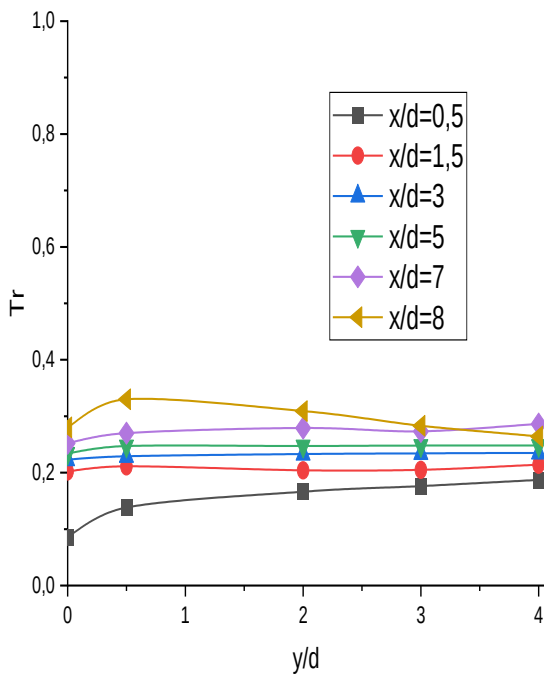


Figure (III.49) : Distribution de la température radial Tr pour $h/d=8$ et $r/d=1$

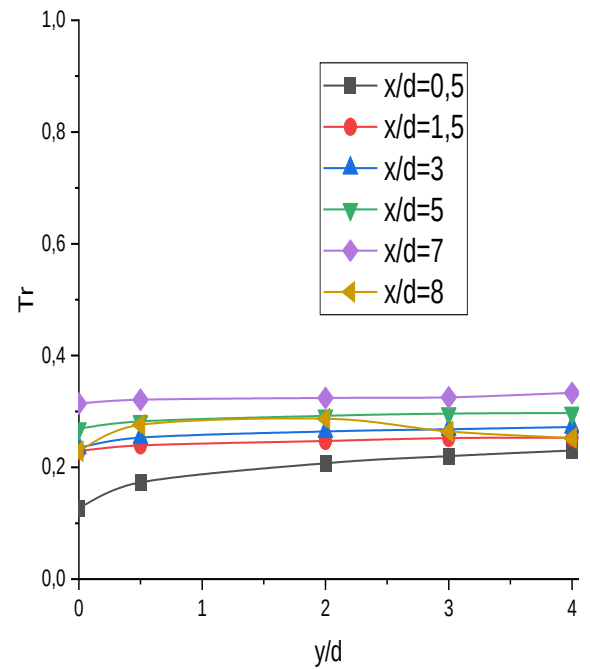


Figure (III.50) : Distribution de la température radial Tr pour $h/d=8$ et $r/d=1.5$

Les figures III.47 – III.50 présentent la la distribution de la température radiale T_r pour $h/d=8$ en fonction de différentes valeurs de r/d et x/d . Il apparaît que la distribution radiale reste globalement uniforme avec la variation de y/d : les valeurs sont relativement plus élevées au centre $r/d=0$ puis diminuent progressivement vers les bords. De plus, l'augmentation de $r/d=0.5$, $r/d=1$ et $r/d=1.5$ entraîne une diminution générale du niveau de la température radiale. En outre, lorsque la distance axiale y/d augmente, les écarts entre les courbes se réduisent et les valeurs tendent à se rapprocher, ce qui reflète une homogénéité croissante et une stabilisation thermique le long de l'axe.

III.2.4.3. Distribution de la vitesse axiale pour $h/d= 8$

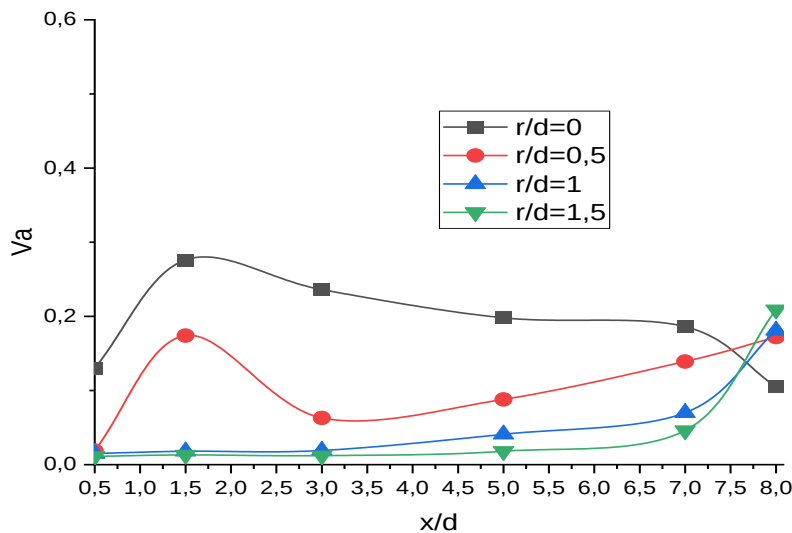


Figure (III.51) : distribution de la vitesse V_a axial pour $h/d=8$

La figure III.51 présente la distribution de la vitesse axiale pour $h/d=8$. Il apparaît que la vitesse atteint sa valeur maximale sur l'axe $r/d=0$, avec un pic à $x/d=1.5$, puis diminue progressivement avec l'augmentation de x/d . Pour $r/d=0.5$, la vitesse atteint également sa valeur maximale à $x/d=1.5$ avant de décroître, en restant inférieure à celle de l'axe et supérieure aux valeurs observées pour $r/d=1$ et $r/d=1.5$. En s'éloignant davantage de l'axe aux positions $r/d=1$ et $r/d=1.5$, les valeurs sont nettement plus faibles et presque nulles sur la majeure partie du domaine, avant d'augmenter progressivement près de la sortie à $x/d=8$. Cela montre que l'écoulement est principalement concentré sur l'axe, puis se répartit progressivement vers les bords avec l'augmentation de la distance axiale.

III.2.4.4. Distribution de la vitesse radial pour $h/d = 8$

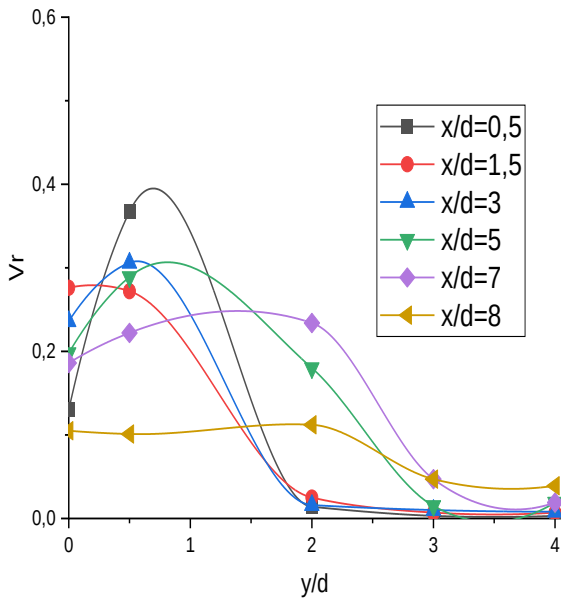


Figure (III.52) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=8$ et $r/d=0$

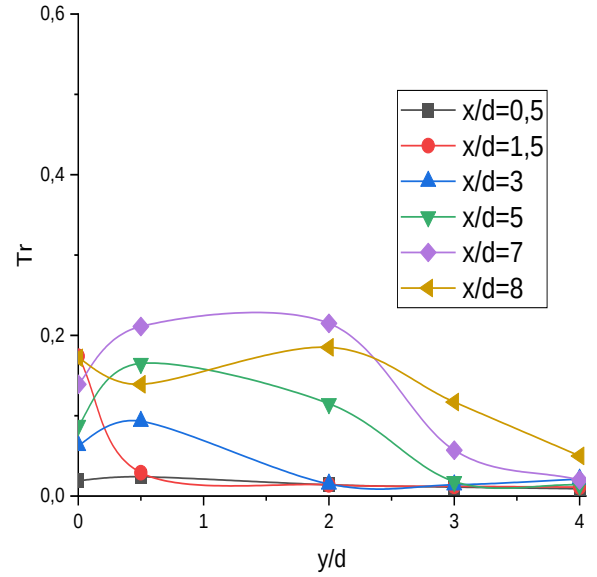


Figure (III.53) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$

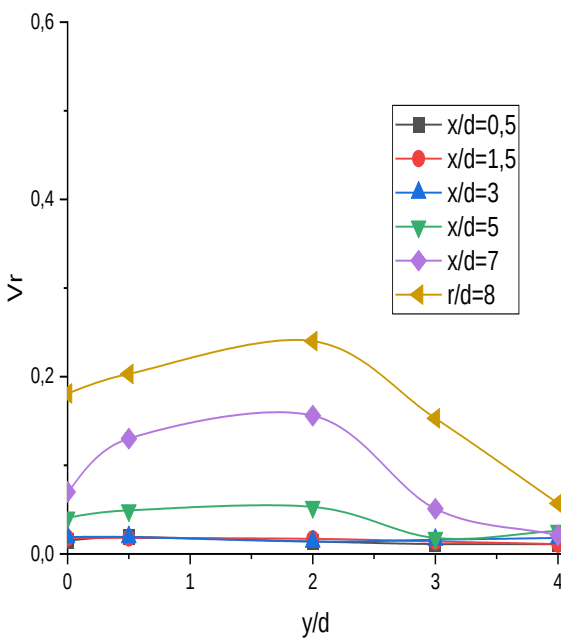


Figure (III.54) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=8$ et $r/d=1$

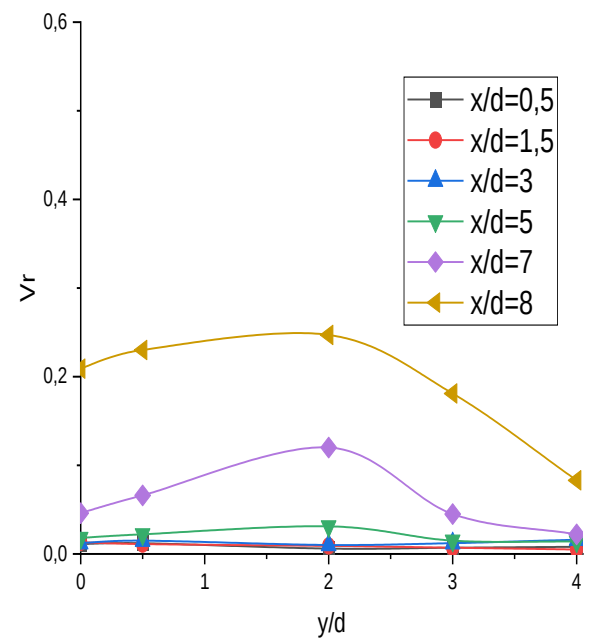
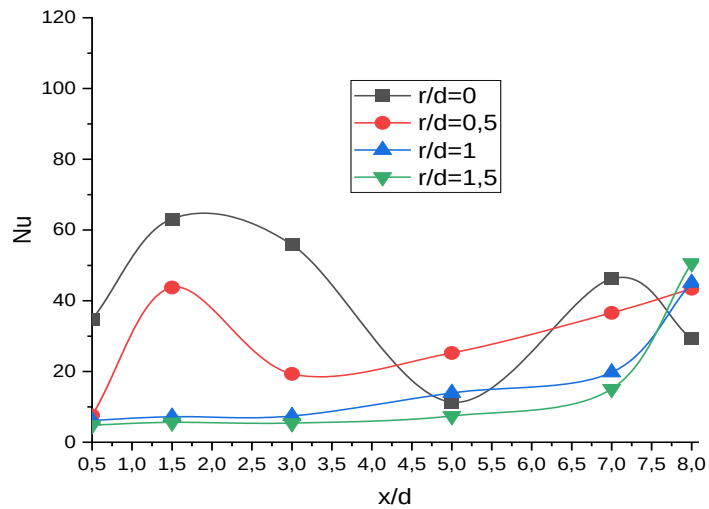


Figure (III.55) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=8$ et $r/d=1.5$

III.2.4.5. Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=8$ Figure (III.56) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=8$

La figure III.56 montre l'évolution du nombre de Nusselt axial pour $h/d=8$. On remarque que les valeurs sont maximales sur l'axe $r/d=0$, avec des variations marquées présentant des pics et des creux tout au long du domaine. Pour $r/d=0,5$, les valeurs sont plus faibles mais conservent le même comportement général, avec un pic précoce suivi d'une augmentation progressive vers la sortie. En revanche, pour $r/d=1$ et $r/d=1,5$, les valeurs restent faibles au départ puis augmentent nettement près de la sortie à $x/d \approx 8$. Cela montre que le transfert thermique est plus intense sur l'axe et s'atténue en s'en éloignant, avant de se renforcer à nouveau près de la sortie.

III.2.4.6. Evolution du nombre de Nusselt radiale pour $h/d=8$

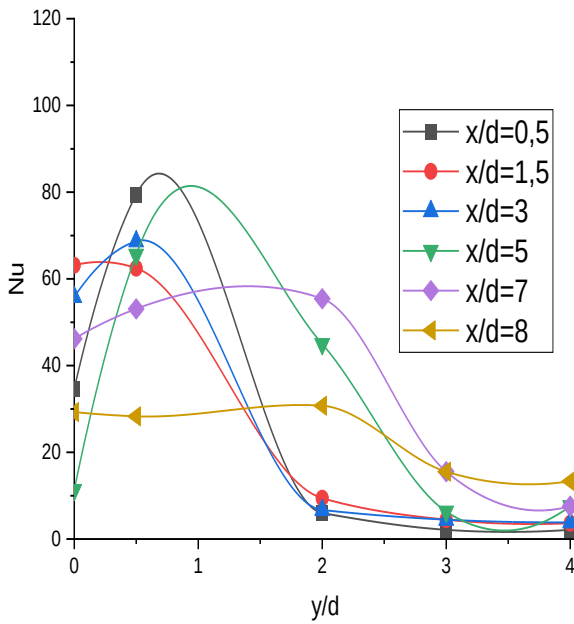


Figure (III.57) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=0$

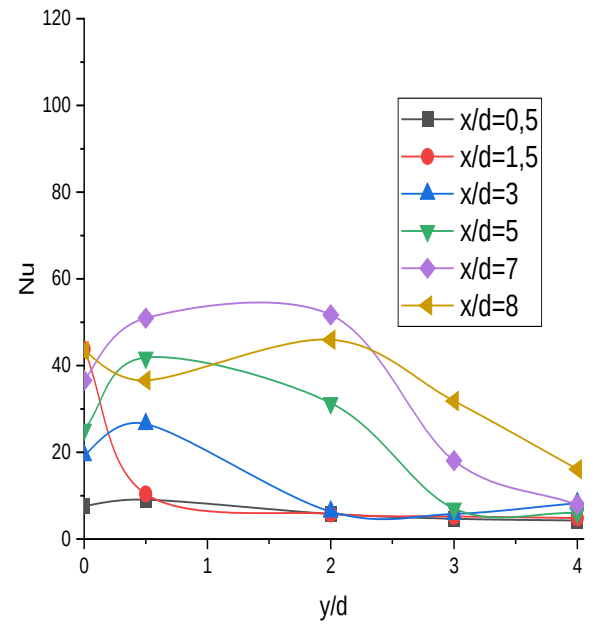


Figure (III.58) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$

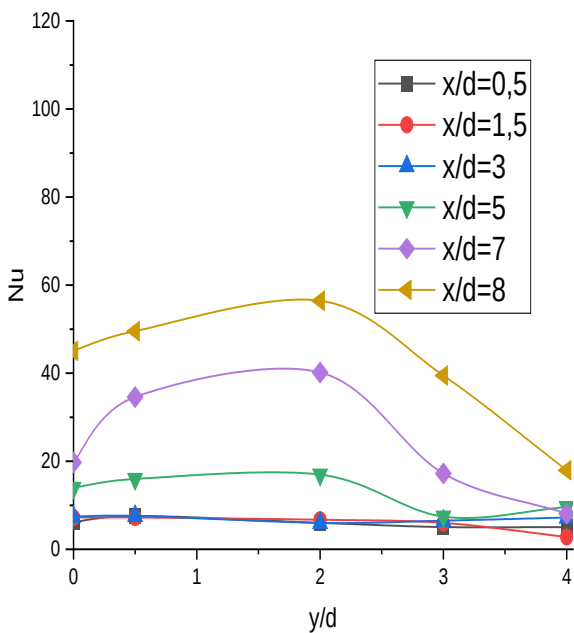


Figure (III.59) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=1$

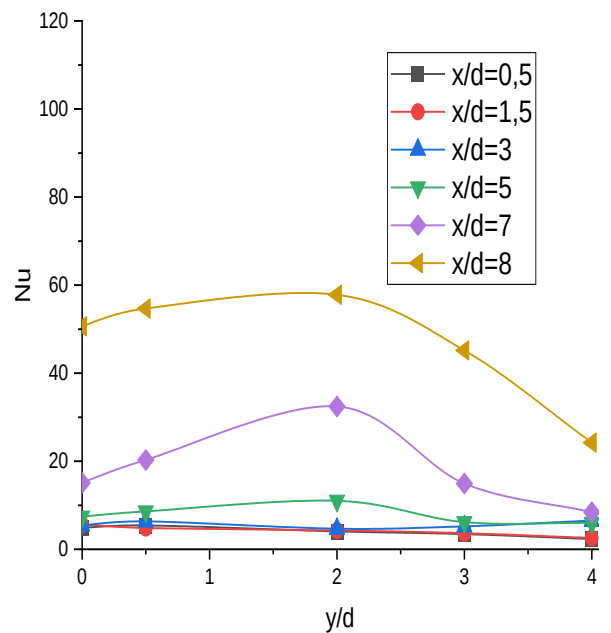
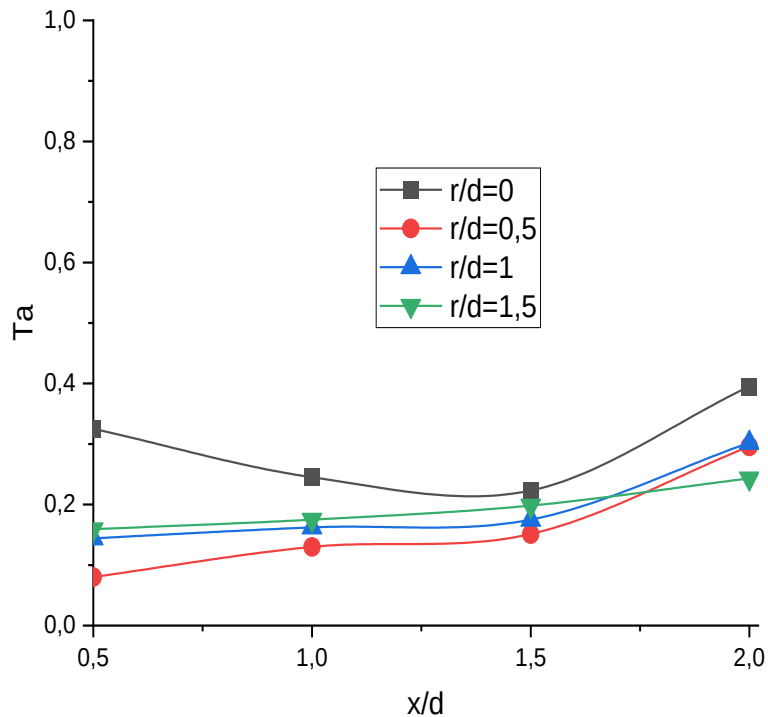


Figure (III.60) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=1.5$

Il ressort des courbes que le nombre de Nusselt pour $h/d = 8$ enregistre des valeurs élevées au départ pour $r/d = 0$ dans la figure III.57, puis diminue rapidement avec l'augmentation de y/d jusqu'à s'approcher de zéro. Pour $r/d = 0.5$ dans la figure III.58 et $r/d = 1$ dans la figure III.59, les valeurs maximales apparaissent près de la surface de l'obstacle avant de décroître progressivement vers une stabilisation. En revanche, pour $r/d = 1.5$ dans la figure III.60, les valeurs restent relativement faibles par rapport aux autres cas. De manière générale, les plus grandes valeurs sont enregistrées pour $x/d = 8$ tandis qu'elles diminuent nettement aux positions plus petites, ce qui met en évidence l'influence de la position de la station sur l'intensité du transfert thermique

III.3. Configuration N : 02 Diffuseur est à géométrie lobé

Nous présentons les résultats, la température axial T_a , la température réduite T_r le profil de Nusselt et et profil de vitesse moyenne sans dimension U_r en fonction du rapport x/D Figures (III.61) jusqu'à (III.120), en fonction de la hauteur d'impact ($2D$, $4D$, $6D$ et $8D$)

III.3.1.1. Distribution de la température axiale T_a pour $h/d=2$ Figure (III.61) : Distribution de la température axial T_a à $h/d=2$

À cette courte distance ($h/d = 2$), le jet conserve une énergie thermique élevée lors de son impact avec l'obstacle. La valeur maximale apparaît à $x/d = 0.5$ sur l'axe $r/d = 0$, puis elle diminue progressivement jusqu'à $x/d = 1.5$ avant de remonter légèrement à $x/d = 2$ sous l'effet de la surface. Les valeurs à $r/d = 0.5$ suivent la même tendance mais à un niveau plus bas, tandis que les stations latérales $r/d = 1$ et $r/d = 1.5$ restent faibles et plus stables, ce qui confirme que l'effet thermique est concentré au centre et s'atténue vers les bords.

III.3.1.2. Distribution de la température radial T_r pour $h/d=2$

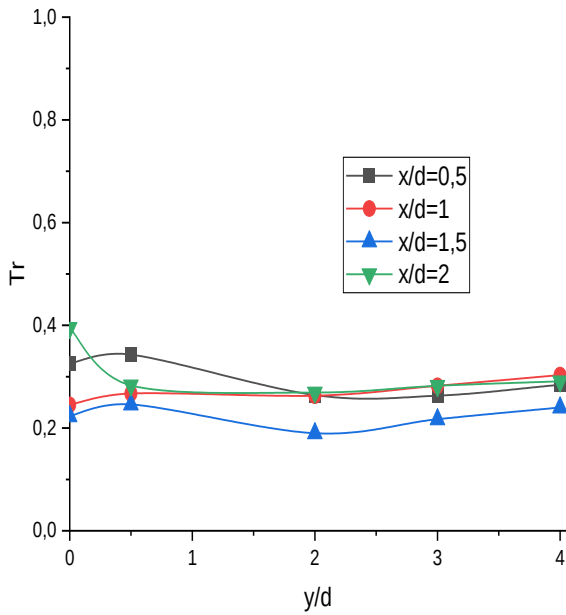


Figure (III.62) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=0$

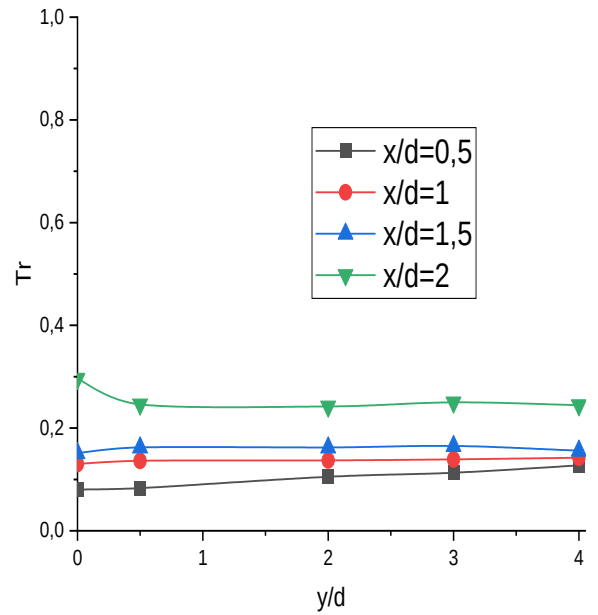


Figure (III.63) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$

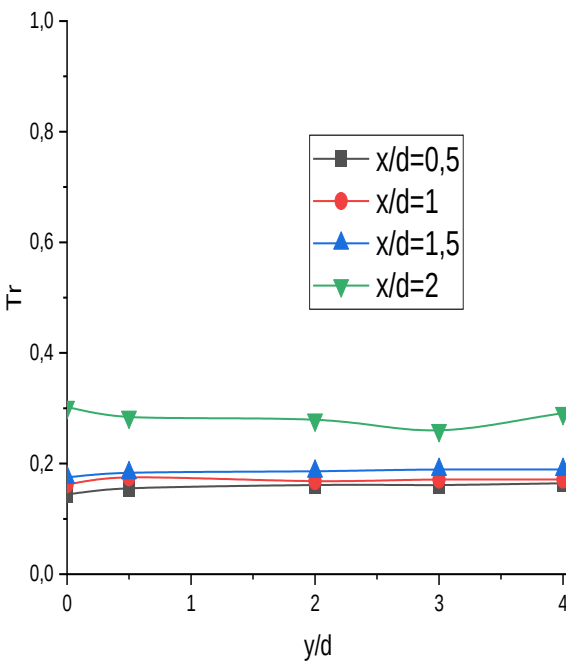


Figure (III.64) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=1$

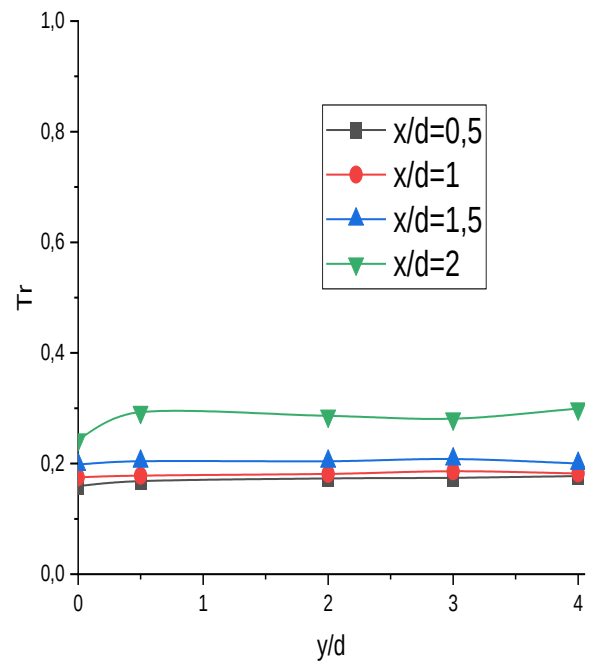


Figure (III.65) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$

À travers la distribution radiale de la température pour les différentes positions axiales x/d (0.5, 1, 1.5, 2), on remarque que les valeurs les plus élevées apparaissent sur les axes centraux $r/d = 0$ et $r/d = 0.5$, notamment au début de l'impact, puis elles diminuent progressivement en s'éloignant vers $y/d = 2$ et au-delà. Cette diminution traduit la perte d'énergie thermique et la diffusion du jet dans le milieu ambiant. Pour $r/d = 1$, les valeurs sont plus faibles et relativement régulières, tandis qu'à $r/d = 1.5$ la température reste basse et presque stable sur tout le parcours, confirmant que l'effet thermique du jet reste concentré près du centre et s'atténue rapidement vers les bords. De manière générale, ce comportement montre qu'à cette distance proche, le jet concentre l'essentiel de son influence thermique dans la zone d'impact direct, avec un affaiblissement marqué dans les régions latérales.

III.3.1.3. Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=2$

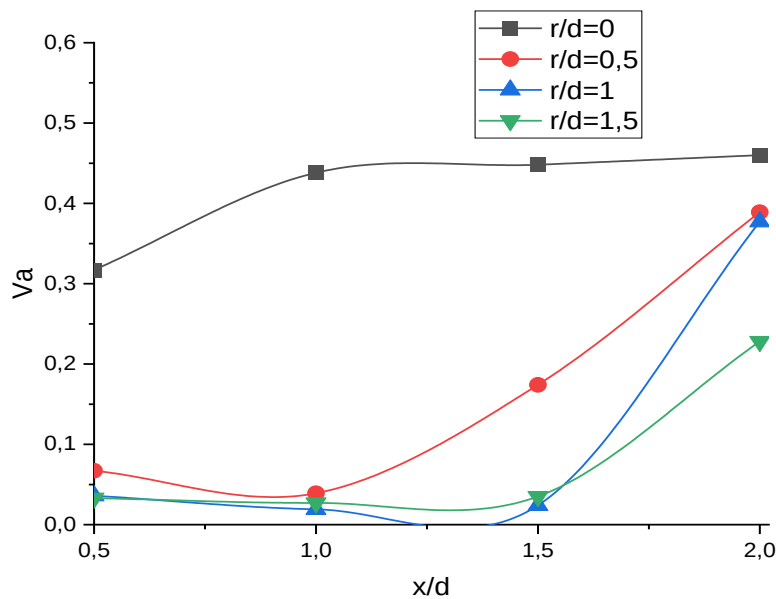


Figure (III.66) : Distribution de la vitesse axiale T_a à $h/d=2$

Pour la configuration $h/d = 2$, on observe que la vitesse axiale augmente progressivement avec x/d pour le cas $r/d = 0$, atteignant sa valeur maximale à $x/d = 2$. Pour $r/d = 0,5$, la vitesse est faible au départ, puis elle commence à croître de manière significative après $x/d = 1$, pour atteindre une valeur proche de celle du centre à $x/d = 2$. En revanche, pour $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, la vitesse reste quasi nulle ou très faible tout au long de la trajectoire, avant de s'élever légèrement vers la fin. Cela montre que l'effet du jet central est plus marqué sur l'axe et dans les zones proches de celui-ci, tandis qu'il s'atténue vers les régions périphériques.

III.3.1.4. Distribution de la vitesse radial pour $h/d=2$

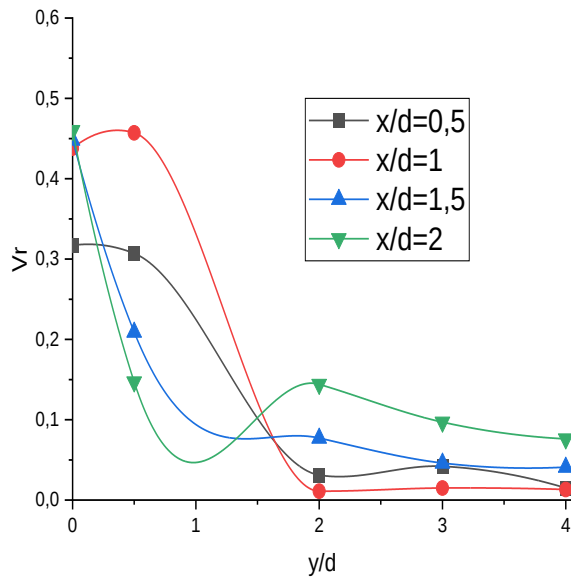


Figure (III.67) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=0$

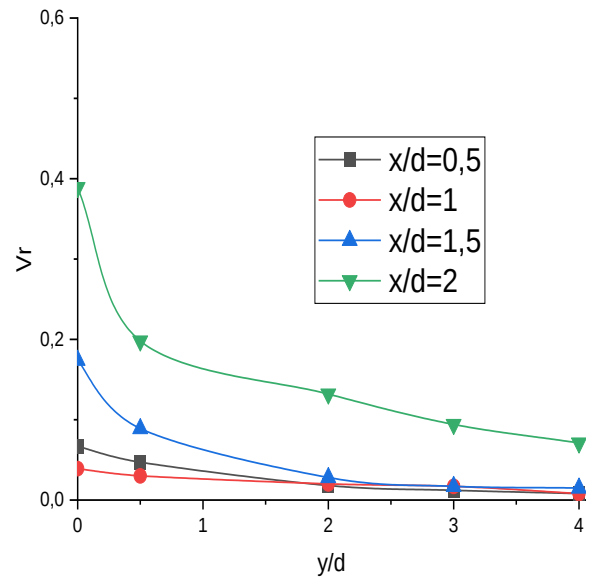


Figure (III.68) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$

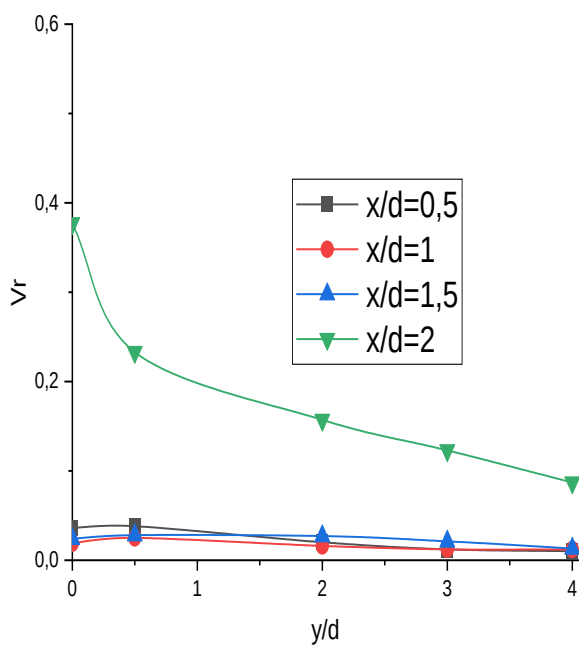


Figure (III.69) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=1$

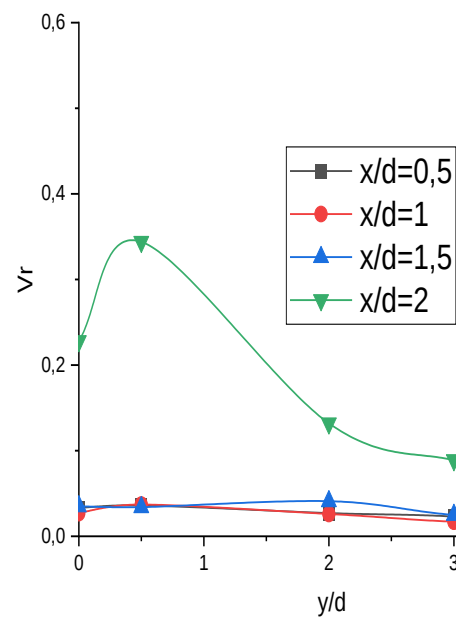
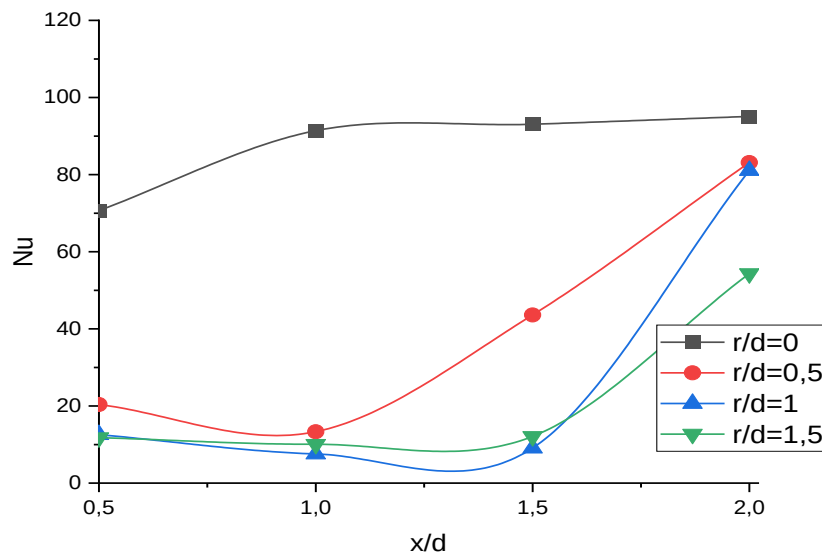


Figure (III.70) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$

III.3.1.5. Evolution du nombre de Nusselt axial pour $h/d=2$ Figure (III.71) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=2$

À travers la distribution du nombre de Nusselt axial pour $h/d = 2$, on remarque que les valeurs les plus élevées sont enregistrées pour $r/d = 0$, où le nombre de Nusselt atteint une valeur importante et reste pratiquement stable à partir de $x/d = 1$ jusqu'à $x/d = 2$. Pour $r/d = 0,5$, le nombre de Nusselt diminue légèrement au début, puis commence à croître de manière significative à partir de $x/d \approx 1,2$, pour atteindre, à $x/d = 2$, une valeur proche de celle de l'axe. En revanche, pour $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, le nombre de Nusselt reste relativement faible tout au long de la trajectoire, avec une légère augmentation vers la fin. Cela montre que le transfert de chaleur est plus intense au niveau de l'axe et dans les zones qui lui sont proches, alors qu'il s'atténue dans les régions périphériques où l'influence du jet est plus faible..

III.3.1.6. Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$

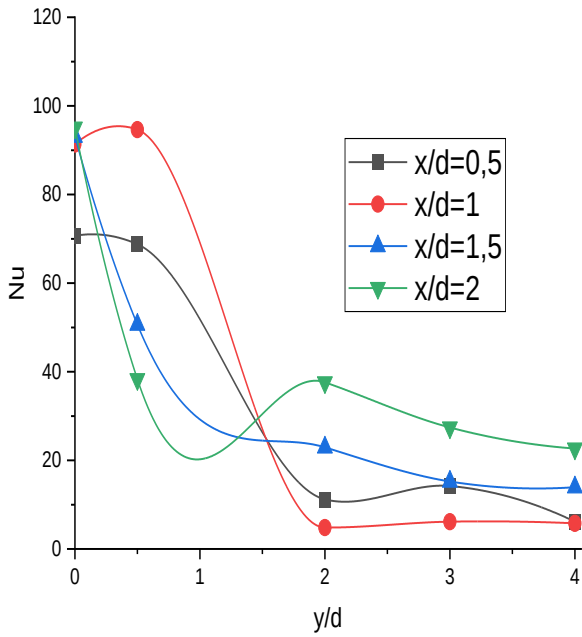


Figure (III.72) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=0$

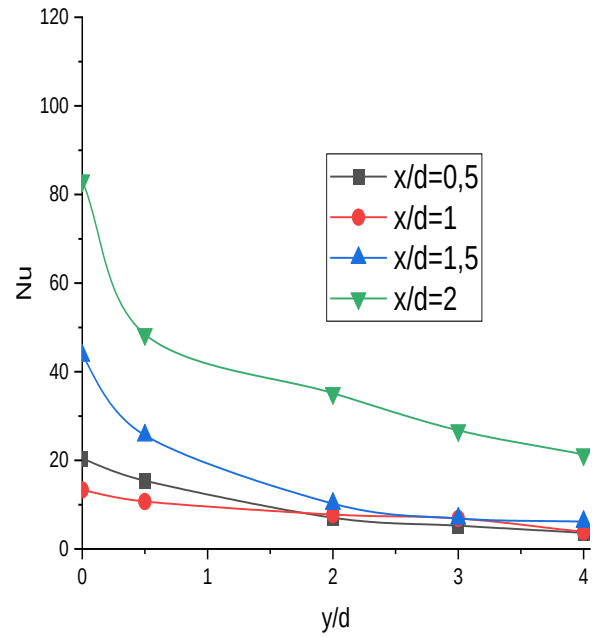


Figure (III.73) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=0.5$

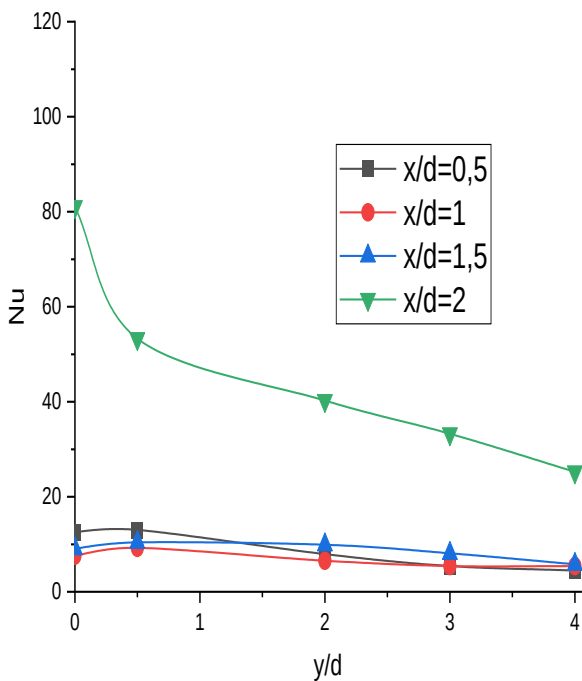


Figure (III.74) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=1$

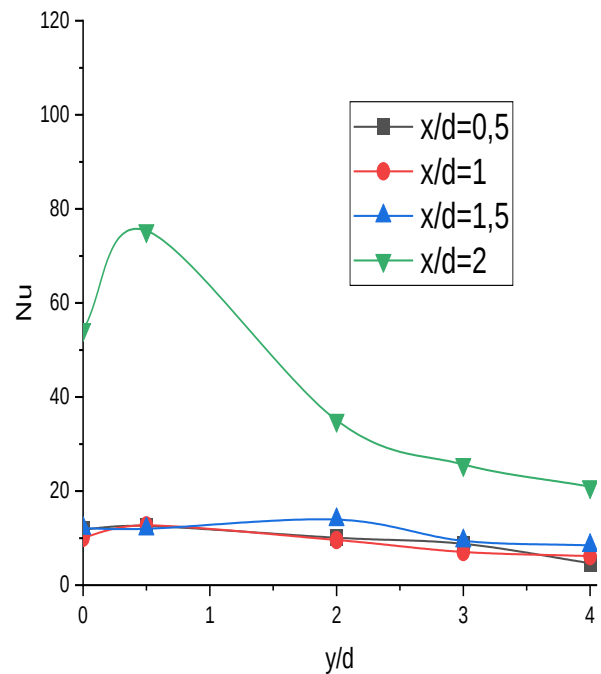


Figure (III.75) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ et $r/d=1.5$

À travers l'évolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d = 2$, on constate que les valeurs les plus élevées apparaissent près du centre ($r/d = 0$ et $r/d = 0,5$), notamment à $y/d = 0,5$, puis elles diminuent rapidement en s'éloignant radialement. Pour $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, les valeurs sont globalement plus faibles et plus stables le long de l'axe.

III.3.2.1. Distribution de la température axial pour $h/d=4$

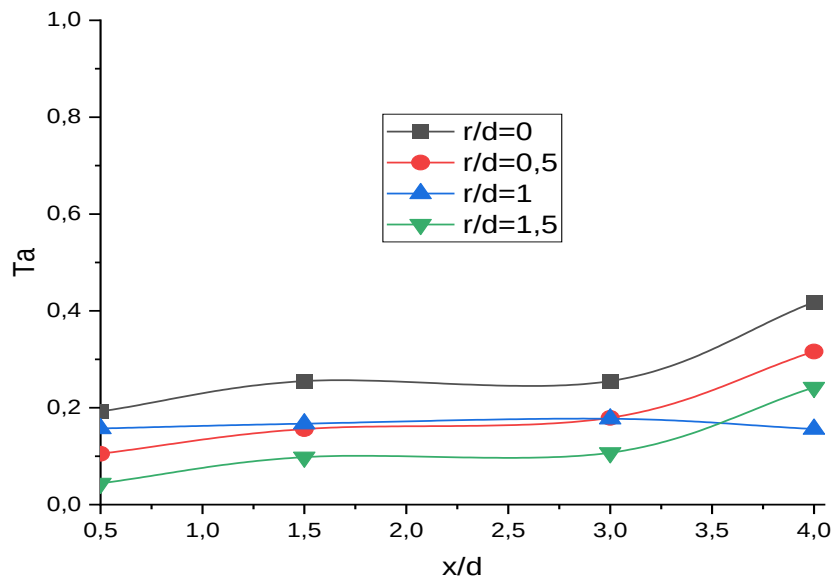


Figure (III.76) : Distribution de la température axiale T_a à $h/d=4$

On remarque que la température reste relativement faible le long de l'axe, avec de légères variations selon les positions r/d . Sur l'axe central ($r/d = 0$), les valeurs sont les plus élevées, en particulier à $x/d = 4$. Pour $r/d = 0,5$ et $r/d = 1$, les valeurs sont plus faibles mais suivent la même tendance croissante vers la fin du parcours. Quant à $r/d = 1,5$, les valeurs demeurent les plus basses presque tout au long de l'axe, avec une légère augmentation à $x/d = 4$. De manière générale, la température augmente progressivement avec x/d et les différences deviennent plus marquées à la surface ($x/d = 4$).

III.3.2.2. Distribution de la température radial T_r pour $h/d=4$

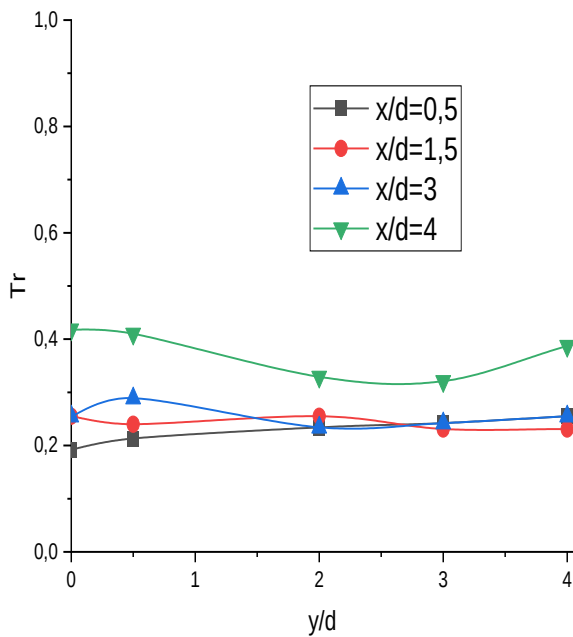


Figure (III.77) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=0$

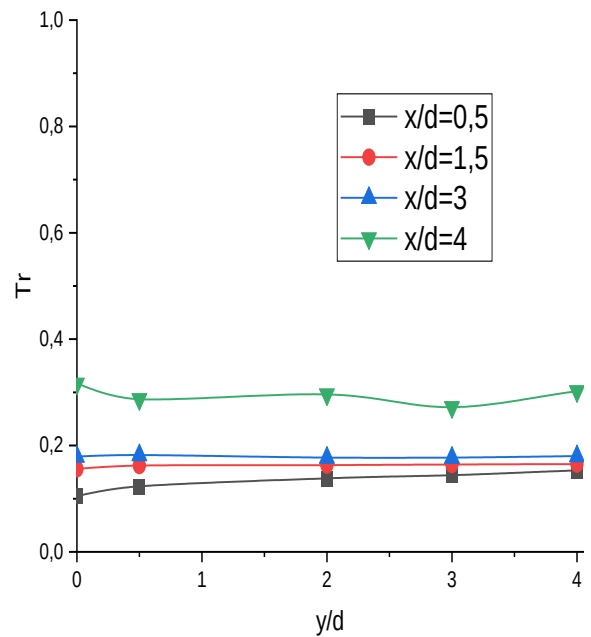


Figure (III.78) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$

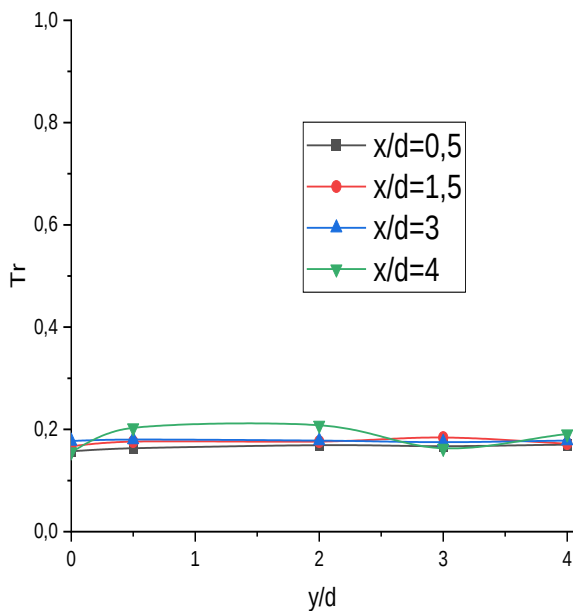


Figure (III.79) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=1$

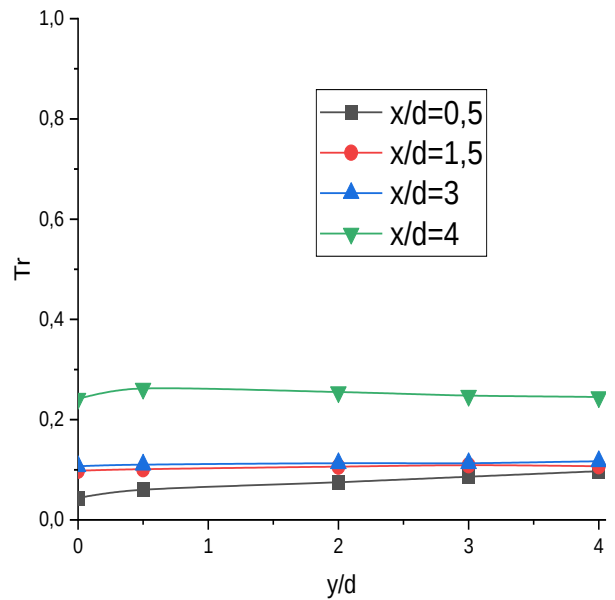


Figure (III.80) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$

Les courbes montrent que la distribution radiale de la température reste relativement homogène le long des différentes stations x/d . Pour $r/d = 0$, on observe un pic thermique en $y/d = 0$ qui diminue progressivement vers $y/d = 3 - 4$. Pour $r/d = 0,5$, $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, les valeurs demeurent globalement stables avec de faibles variations. Toutefois, la station $x/d = 4$ (courbe verte) se distingue par une élévation notable des valeurs par rapport aux autres stations, reflétant un mélange plus marqué et une diffusion thermique plus importante à cette position.

III.3.2.3. Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=4$

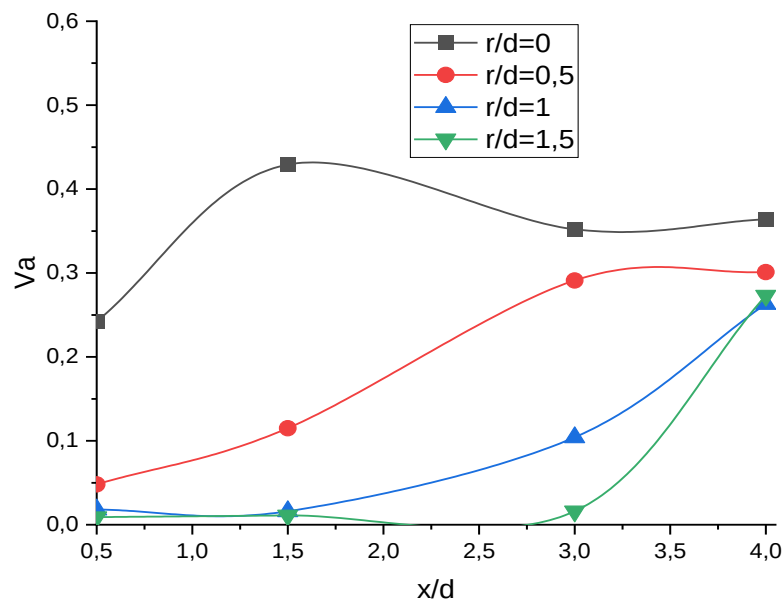


Figure (III.81) : Distribution de la vitesse axiale V_a à $h/d=4$

La vitesse axiale V_a augmente avec x/d à $r/d = 0$ jusqu'à un maximum vers $x/d = 1,5$, puis diminue légèrement et se stabilise. À $r/d = 0,5$, elle croît progressivement pour se stabiliser vers $x/d = 3,5$. Pour $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, la vitesse reste faible au départ puis augmente nettement près de $x/d = 4$, en raison de la diffusion latérale du jet. En résumé, la vitesse maximale est observée au centre ($r/d = 0$), tandis qu'aux zones périphériques ($r/d = 1$ et $1,5$) l'augmentation est plus tardive.

III.3.2.4. Distribution de la vitesse radiale pour $h/d=4$

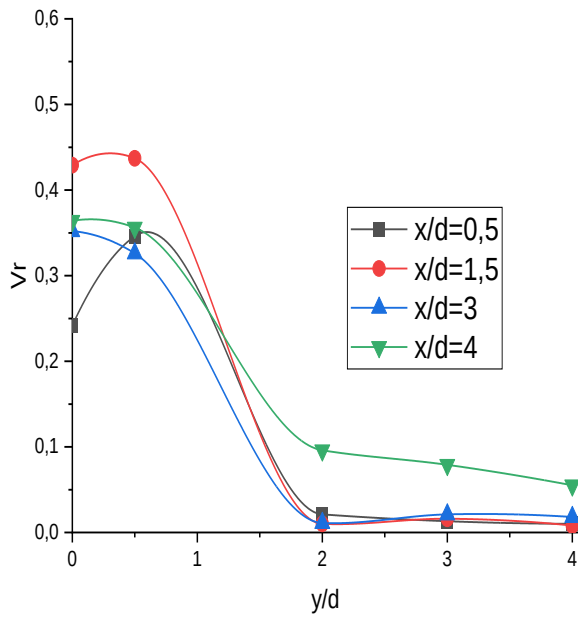


Figure (III.82) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=4$ et $r/d=0$

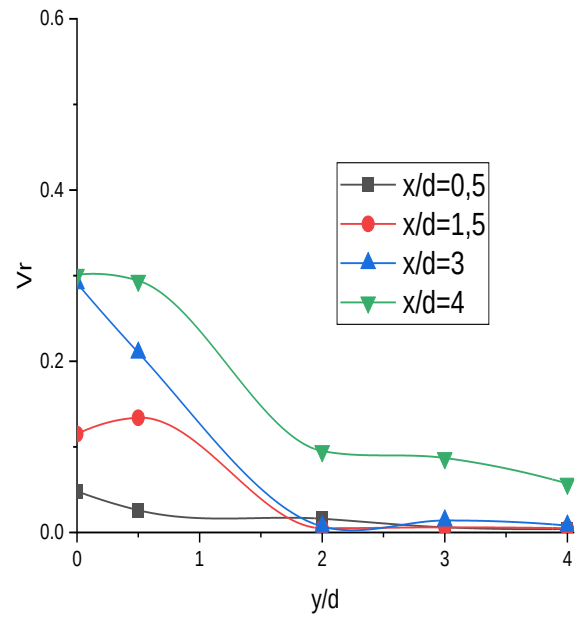


Figure (III.83) : distribution de la vitesse radial V_r pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$

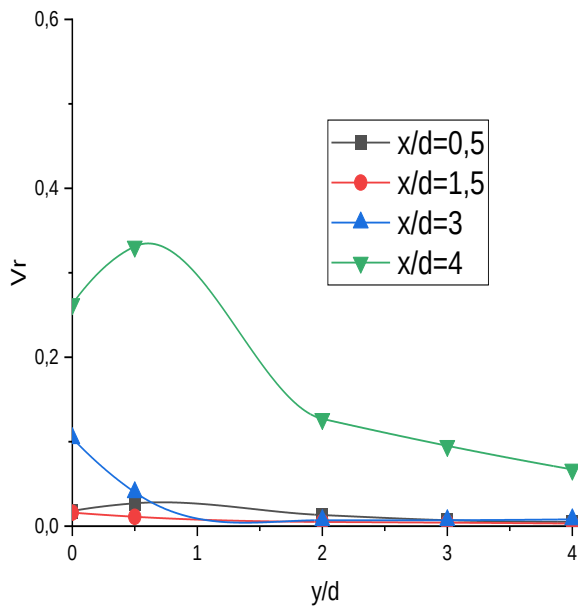


Figure (III.84) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=4$ et $r/d=1$

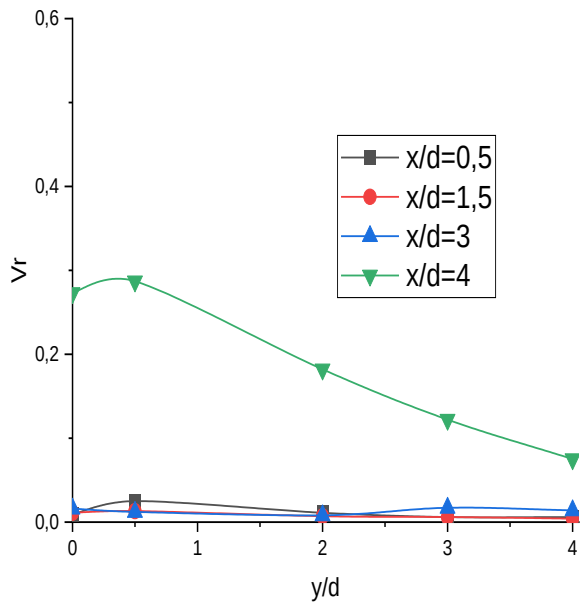
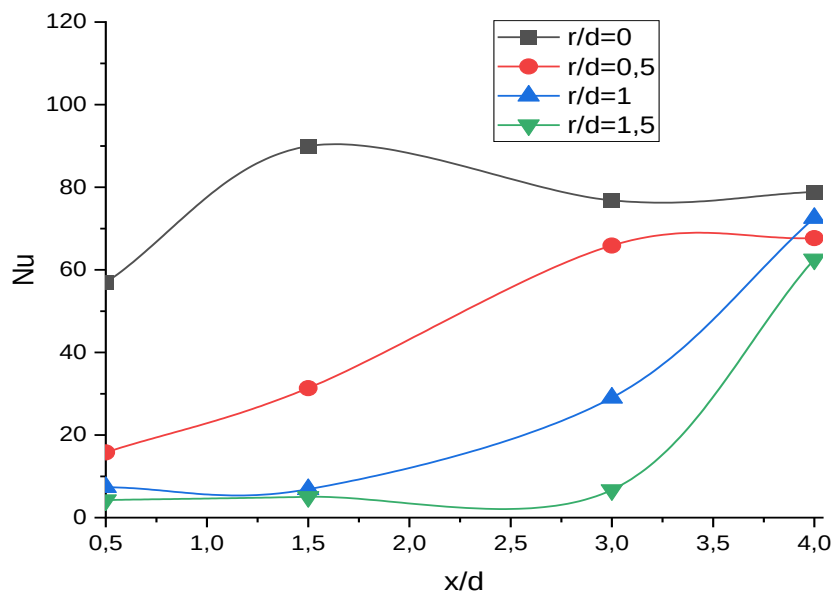


Figure (III.85) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$

III.3.2.5. Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=4$:Figure (III.86) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=4$

On observe que le nombre de Nusselt à $r/d = 0$ démarre avec une valeur élevée, atteint un maximum vers $x/d = 1,5$, puis diminue progressivement pour se stabiliser. Pour $r/d = 0,5$, il augmente continuellement avec x/d jusqu'à devenir presque constant vers $x/d = 3,5$. Aux stations $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, les valeurs restent faibles au début, puis croissent nettement à partir de $x/d \geq 3$, pour rejoindre les valeurs centrales vers $x/d = 4$. En général, la valeur maximale du nombre de Nusselt est enregistrée au centre ($r/d = 0$), tandis que l'augmentation tardive en périphérie ($r/d = 1$ et $1,5$) reflète l'effet de la diffusion latérale de l'écoulement et l'amélioration du transfert thermique loin de l'axe.

III.3.2.6. Evolution du nombre de Nusselt radiale pour $h/d=4$

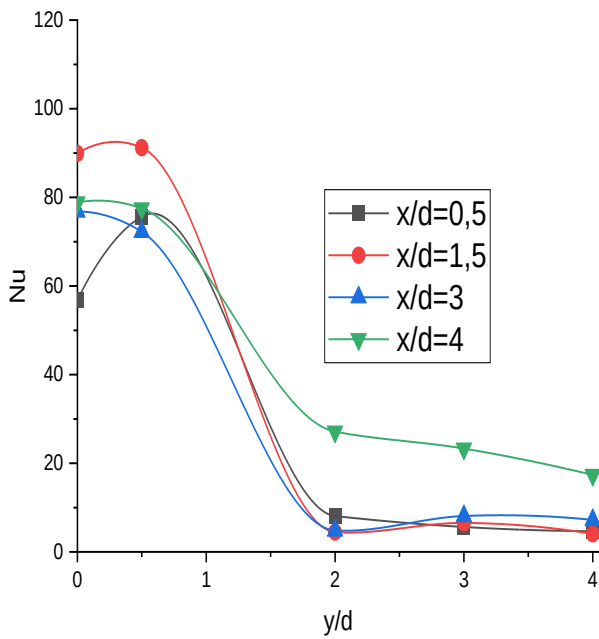


Figure (III.87) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=0$

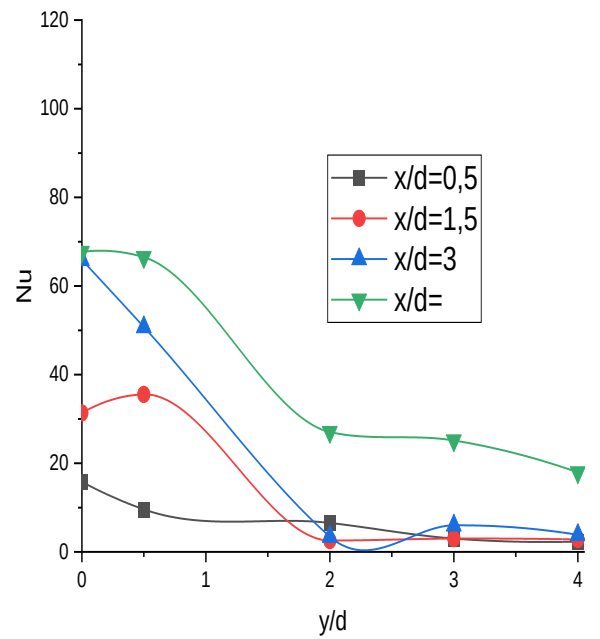


Figure (III.88) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=0.5$

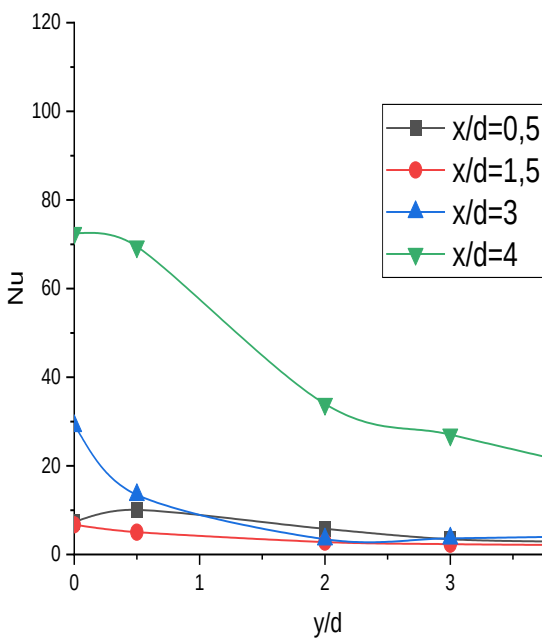


Figure (III.89) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=1$

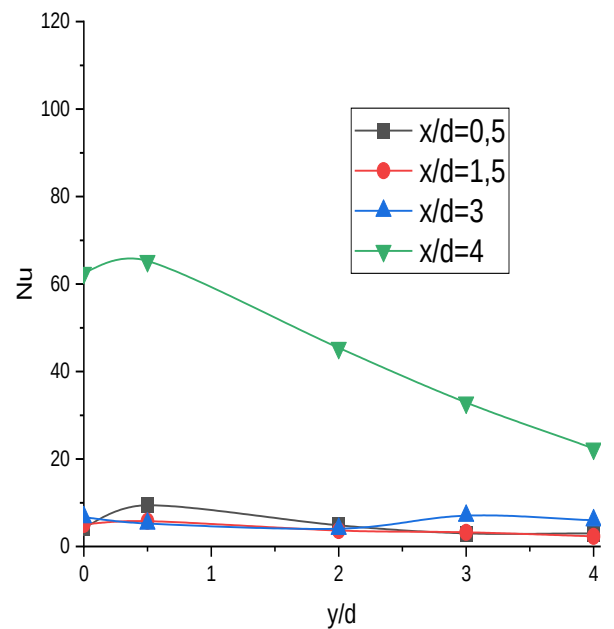


Figure (III.90) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=4$ et $r/d=1.5$

Les courbes montrent que le nombre de Nusselt est élevé sur l'axe ($r/d = 0$), surtout pour

$x/d = 0,5$ et $1,5$, puis il diminue rapidement avec l'augmentation de y/d . À $r/d = 0,5$, les valeurs restent plus faibles mais suivent la même tendance décroissante. Pour les positions périphériques ($r/d = 1$ et $1,5$), les valeurs initiales sont très basses et presque stables le long de y/d , sauf pour $x/d = 4$ où l'on observe une augmentation notable liée à la diffusion latérale de l'écoulement. En général, l'efficacité du transfert thermique est plus importante près de l'axe et diminue progressivement vers la périphérie.

III.3.3.1. Distribution de la température axiale pour $h/d=6$

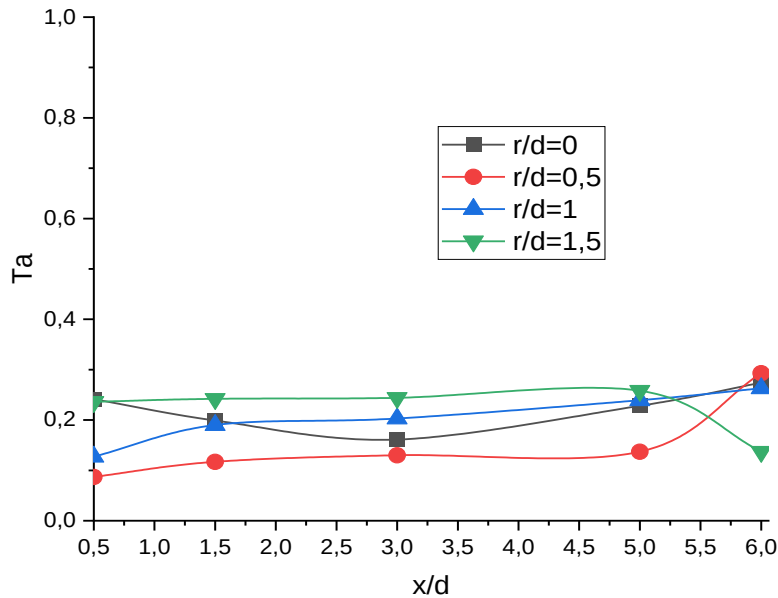


Figure (III.91) : Distribution de la température axiale T_a à $h/d=6$

Les courbes montrent que les valeurs de température restent relativement faibles le long de x/d , avec de légères différences entre les stations. Aux positions $r/d = 0$ et $r/d = 0,5$, la température est plus basse et demeure presque stable tout au long du trajet. En revanche, pour $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, les valeurs sont plus élevées et tendent à rester stables jusqu'à $x/d = 5$, avant de diminuer à $r/d = 1,5$ en fin de parcours. Globalement, la distribution traduit une homogénéité thermique relative avec de faibles écarts entre l'axe et la périphérie.

III.3.3.2. Distribution de la température radial T_r pour $h/d=6$

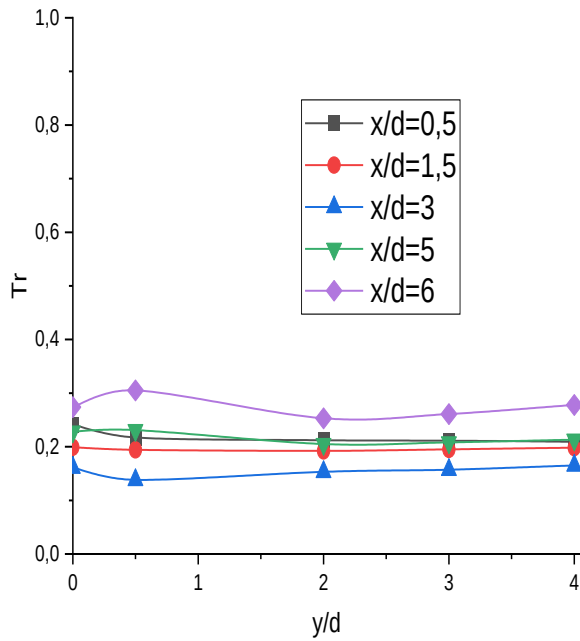


Figure (III.92) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=6$ et $r/d=0$

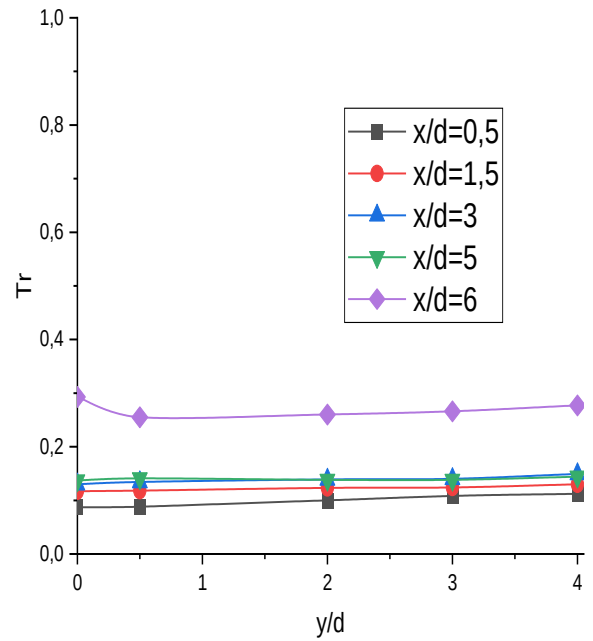


Figure (III.93) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$

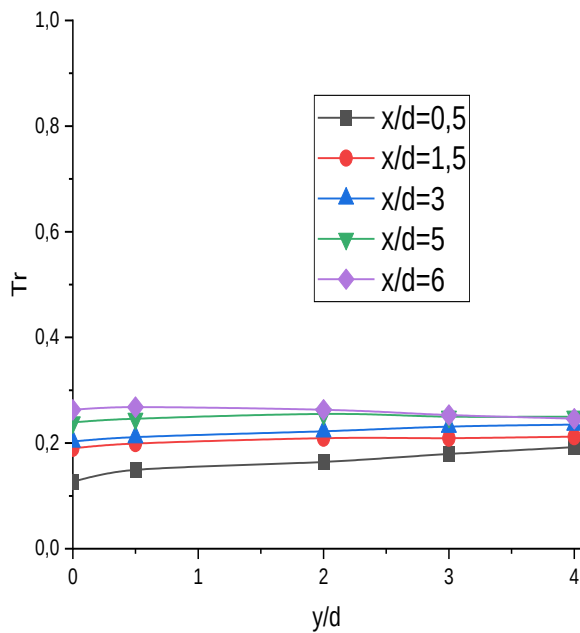


Figure (III.94) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=6$ et $r/d=1$

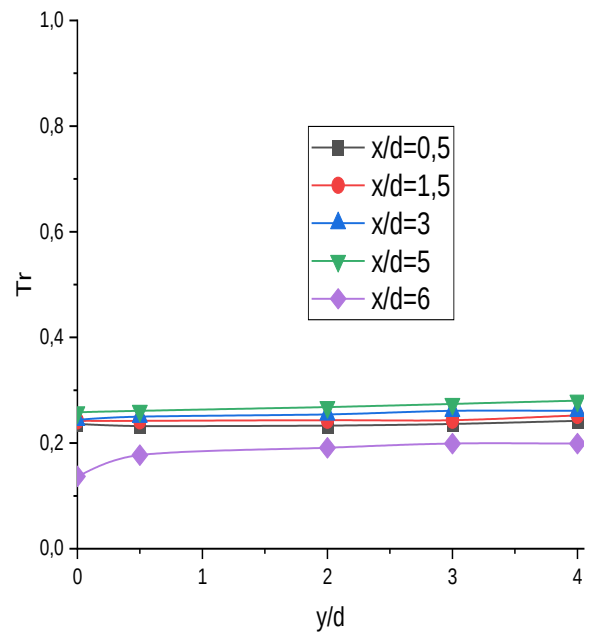


Figure (III.95) : Distribution de la température radiale T_r pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$

Les courbes montrent que la température reste légèrement plus élevée sur l'axe ($r/d = 0$), surtout pour $x/d = 0,5$, mais cette différence disparaît rapidement avec l'augmentation de y/d . Aux positions $r/d = 0,5$ et $r/d = 1$, les valeurs sont proches et quasiment stables tout au long de la direction radiale, ce qui traduit une homogénéité thermique marquée. En périphérie ($r/d = 1,5$), le comportement est similaire avec des valeurs faibles et peu différenciées. Globalement, la distribution radiale de la température pour $h/d = 6$ se caractérise par une stabilité et une homogénéité, avec de faibles écarts entre le centre et les bords.

III.3.3.3. Distribution de la vitesse axial pour $h/d = 6$

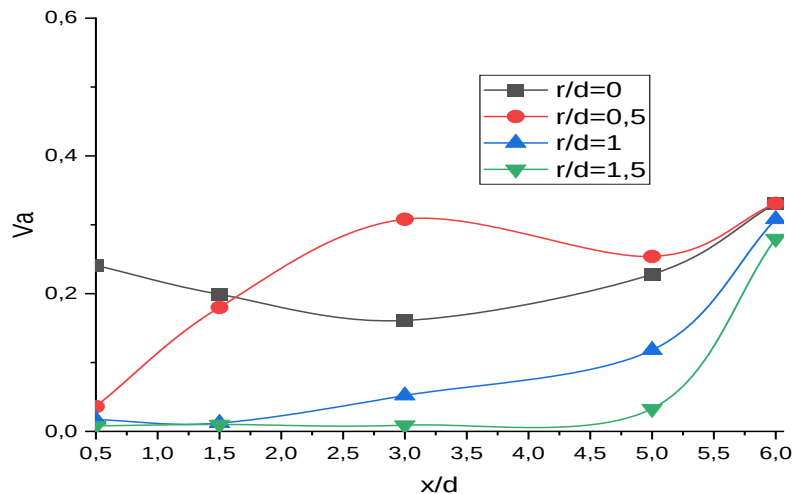


Figure (III.96) : Distribution de la vitesse axiale V_a à $h/d = 6$

La courbe montre que la vitesse sur l'axe ($r/d = 0$) débute avec une valeur moyenne, puis diminue progressivement jusqu'à $x/d \approx 3$, avant de croître de nouveau vers la fin du parcours. Pour $r/d = 0,5$, la vitesse augmente nettement avec x/d , atteint un maximum autour de $x/d = 3$, puis baisse légèrement avant de se stabiliser. Aux positions périphériques ($r/d = 1$ et $1,5$), la vitesse reste quasi nulle au départ, mais elle s'accroît de manière significative à partir de $x/d = 4,5$, pour atteindre des valeurs proches de celles du centre à $x/d = 6$. Globalement, la courbe illustre un transfert de l'énergie cinétique du centre vers la périphérie au fur et à mesure que x/d augmente, reflétant une diffusion plus large du jet à cette distance.

III.3.3.4. Distribution de la vitesse radiale pour $h/d=6$

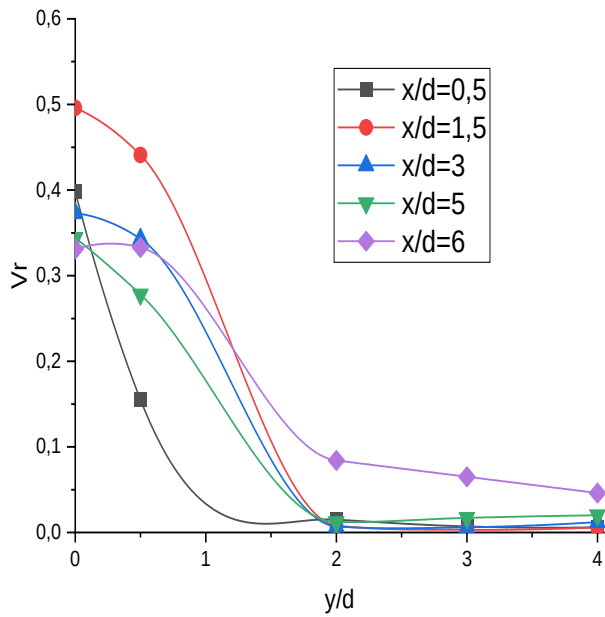


Figure (III.97) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=6$ et $r/d=0$

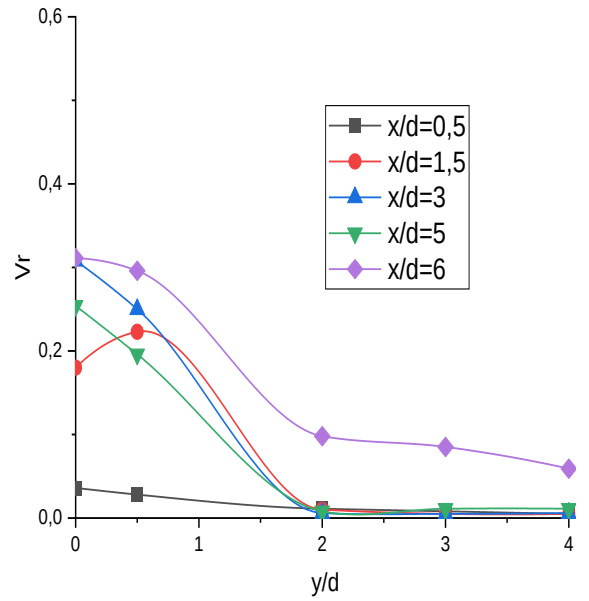


Figure (III.98) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$

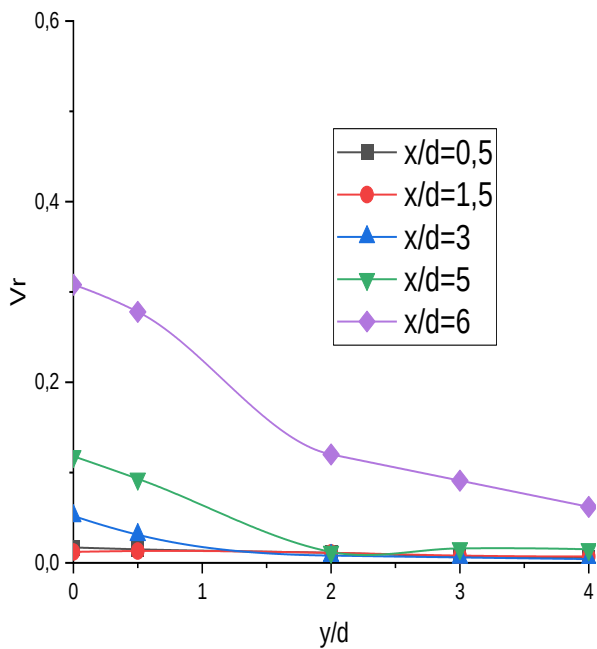


Figure (III.99) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=6$ et $r/d=1$

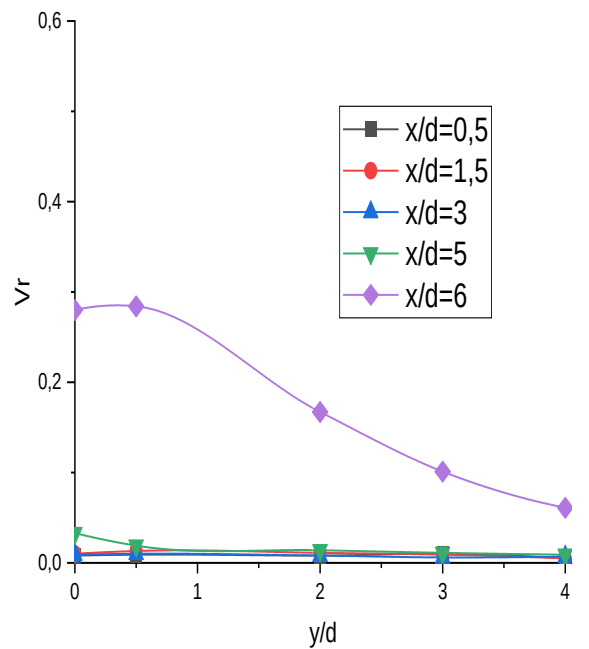
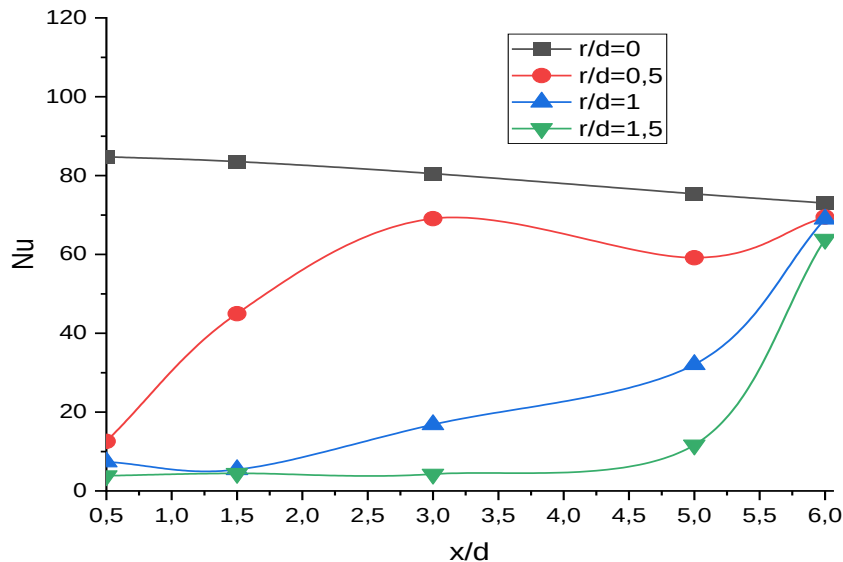


Figure (III.100) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$

III.3.3.5. Evolution du nombre de Nusselt axiale pour $h/d=6$:Figure (III.101) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=6$

La courbe montre que les valeurs à $r/d = 0$ restent relativement élevées et presque stables tout au long de x/d . Pour $r/d = 0,5$, le nombre de Nusselt augmente nettement et atteint un maximum vers $x/d = 3$, puis il diminue progressivement. Aux positions périphériques ($r/d = 1$ et $1,5$), les valeurs sont faibles au départ mais commencent à croître à partir de $x/d \approx 3,5$, pour rejoindre des niveaux proches de ceux du centre à la fin du parcours ($x/d = 6$). Globalement, la courbe indique que le transfert thermique est maximal au centre, tandis qu'en périphérie il se développe plus tardivement en raison de la diffusion de l'écoulement.

III.3.3.6. Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$

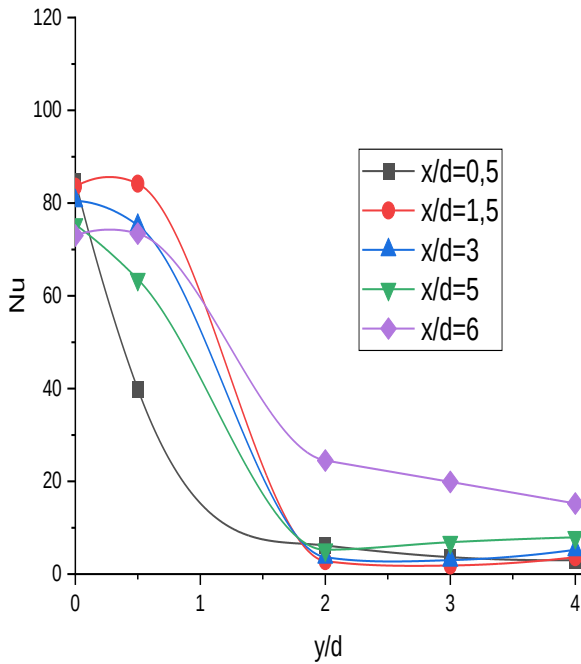


Figure (III.102) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=0$

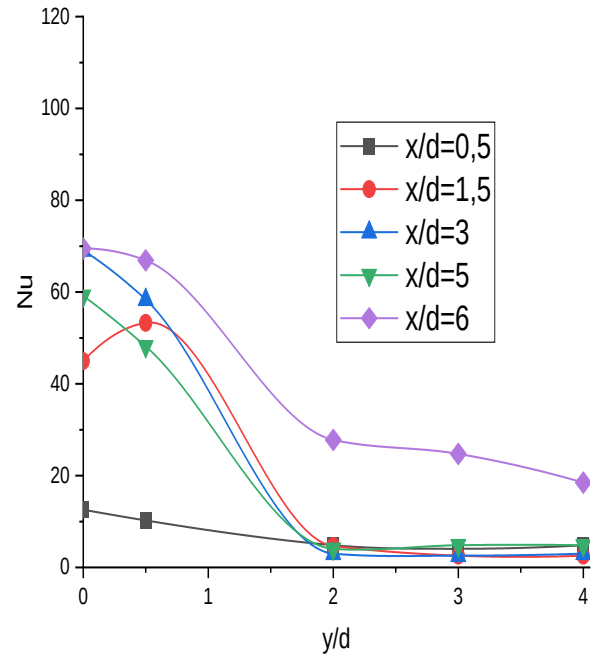


Figure (III.103) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=0.5$

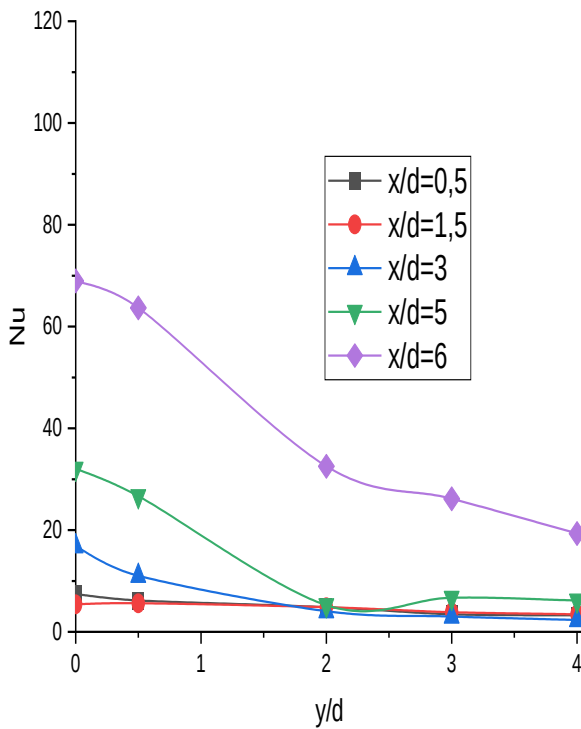


Figure (III.104) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=1$

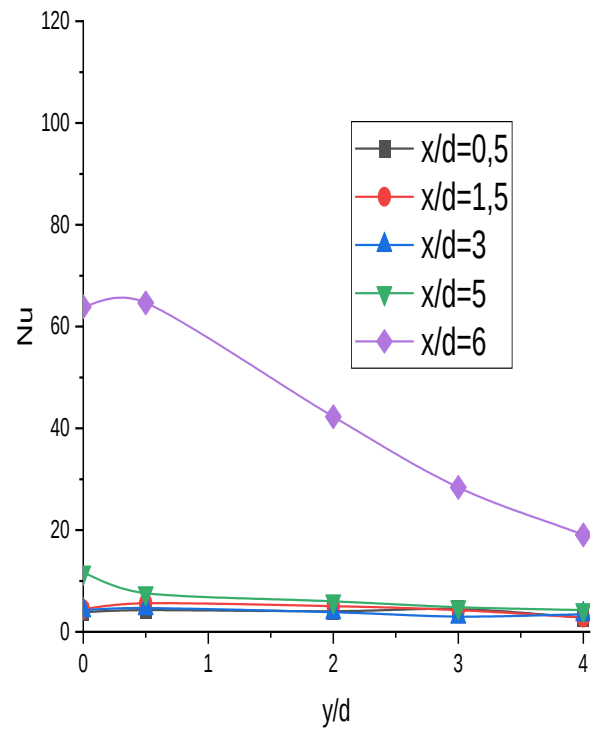


Figure (III.105) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=6$ et $r/d=1.5$

Les courbes montrent que Nu atteint son maximum au centre ($r/d = 0$) puis diminue rapidement avec y/d . Pour $r/d = 0,5$ et 1 , le profil est plus étalé mais de valeurs plus faibles, tandis qu'à $r/d = 1,5$ il reste très bas. On note aussi qu'à $x/d = 6$, Nu est plus élevé car il correspond à la surface de l'obstacle.

III.3.4.1. Distribution de la température axiale pour $h/d=8$

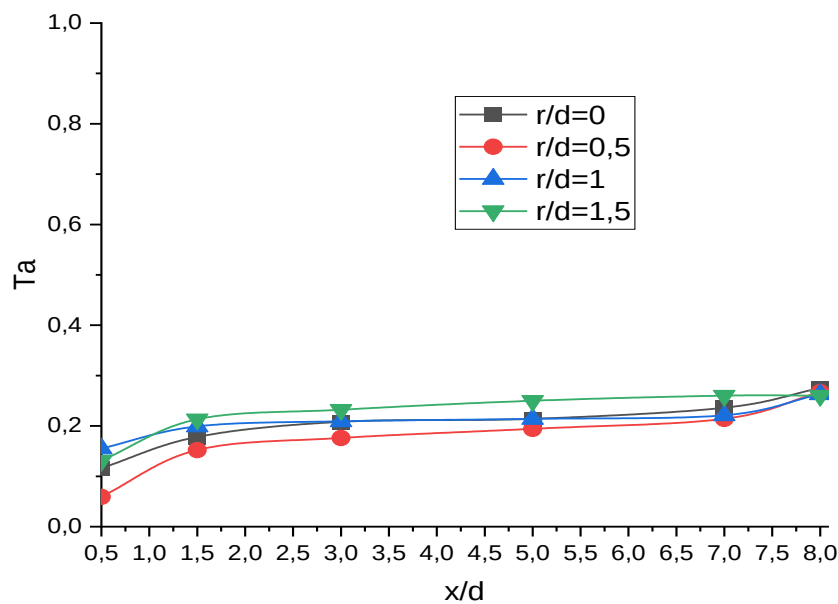


Figure (III.106) : Distribution de la température axiale T_a à $h/d=8$

Les courbes montrent que les valeurs de la température restent faibles et presque similaires pour toutes les positions r/d , avec une légère augmentation à $x/d = 8$, correspondant à la surface de l'obstacle. Cela indique que le jet a perdu une grande partie de son énergie thermique avant d'atteindre la surface, entraînant une distribution presque uniforme de la température.

III.3.4.2. Distribution de la température radiale pour $h/d=8$

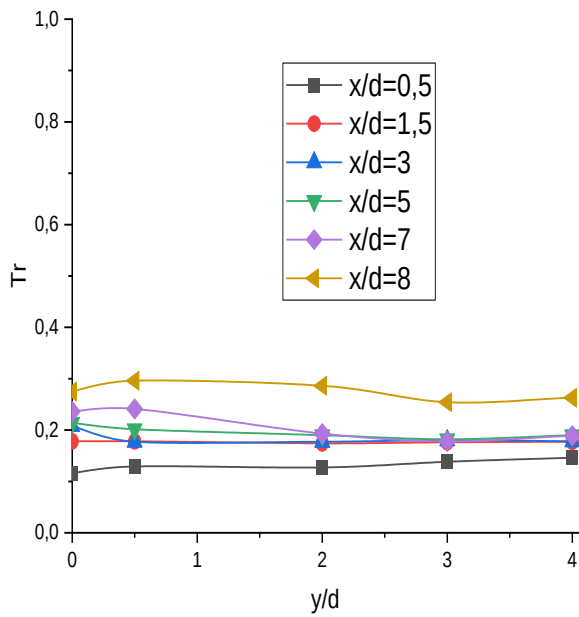


Figure (III.107) : Distribution de la température radiale Tr pour $h/d=8$ et $r/d=0$

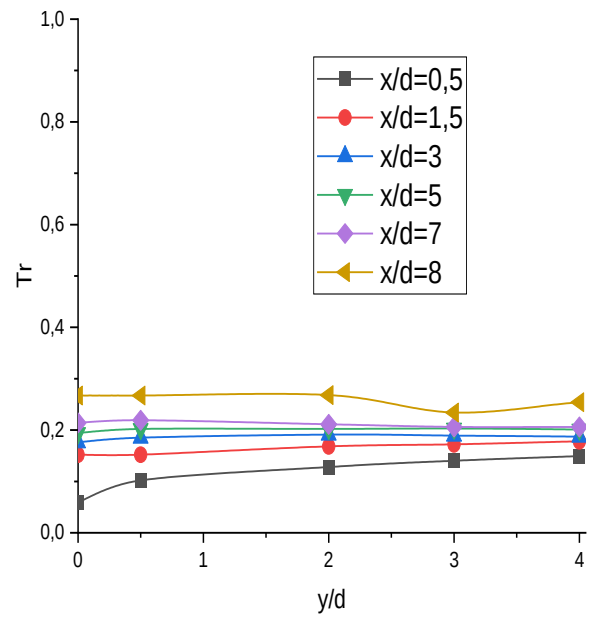


Figure (III.108) : Distribution de la température radiale Tr pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$

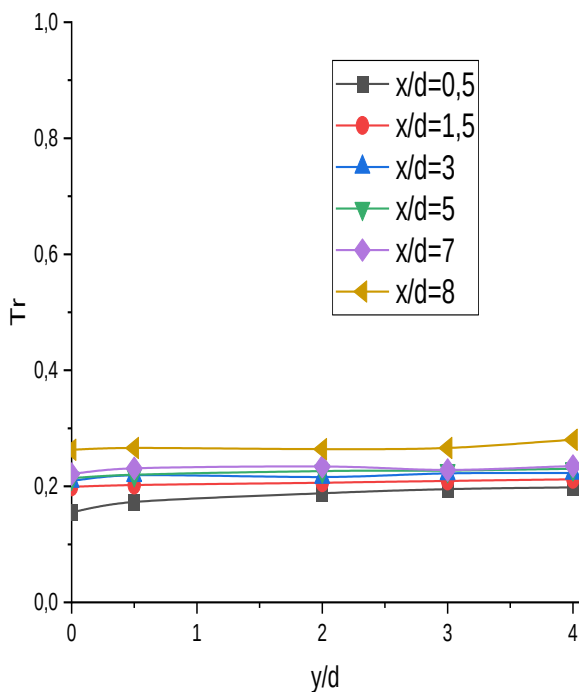


Figure (III.109) : Distribution de la température radiale Tr pour $h/d=8$ et $r/d=1$

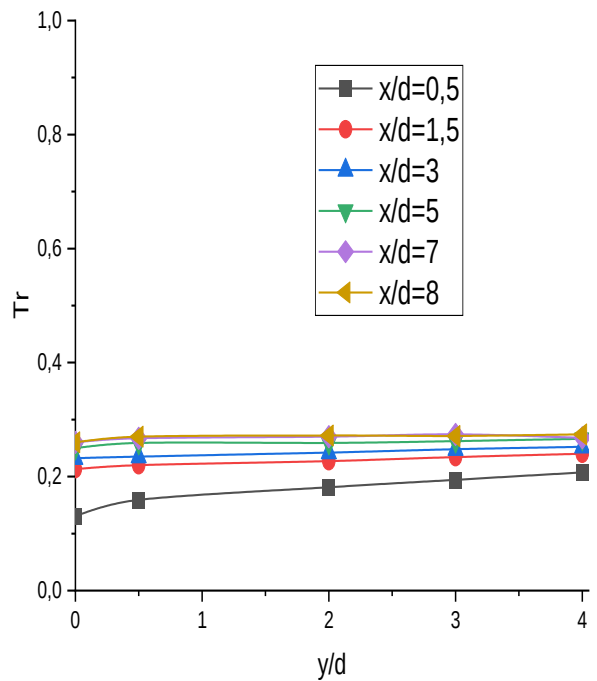


Figure (III.110) : Distribution de la température radiale Tr pour $h/d=8$ et $r/d=1,5$

À $x/d = 0,5$, la température est plus faible que sur les autres axes, malgré la proximité de la sortie du diffuseur lobé. Cela s'explique par le fait que le jet est encore en phase d'expansion et n'a pas encore atteint l'obstacle avec intensité, ce qui réduit le transfert thermique. À partir de $x/d = 1,5$, les profils deviennent presque plats et faibles sur toutes les lignes r/d , à l'exception de $x/d = 8$ où les valeurs les plus élevées sont enregistrées, puisqu'il s'agit de la surface de l'obstacle. Globalement, la distribution reste homogène avec de faibles écarts, traduisant un champ thermique très diffus et un impact réduit du jet sur l'échange thermique

III.3.4.3. Distribution de la vitesse axiale pour $h/d=8$

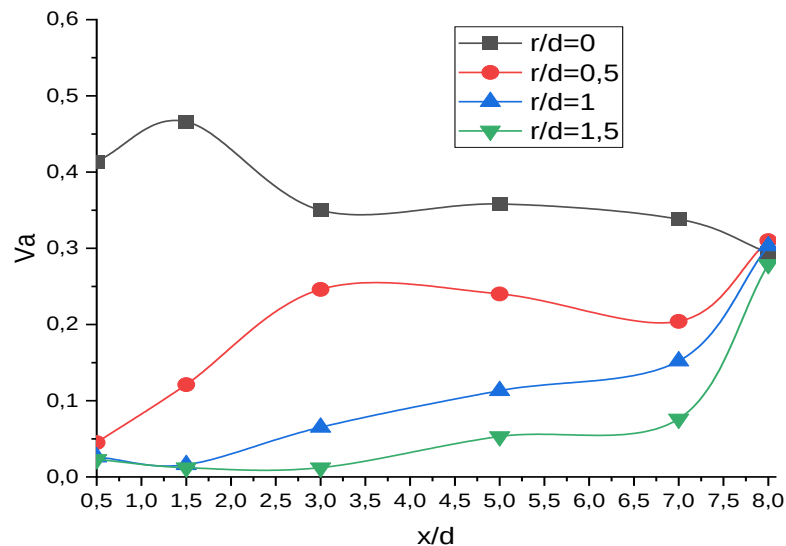


Figure (III.111) : Distribution de la vitesse axiale T_a à $h/d=8$

La vitesse est maximale au centre $r/d = 0$ au début du trajet ($x/d = 0,5$), puis elle diminue progressivement jusqu'à se stabiliser après $x/d \approx 3$. Pour $r/d = 0,5$, elle augmente jusqu'à environ $x/d = 2,5$ avant de décroître, tandis que pour $r/d = 1$ les valeurs s'élèvent graduellement à partir de niveaux faibles. Enfin, à $r/d = 1,5$, la vitesse reste très basse avec une légère augmentation en fin de parcours.

III.3.4.4. Distribution de la vitesse radiale pour $h/d=8$

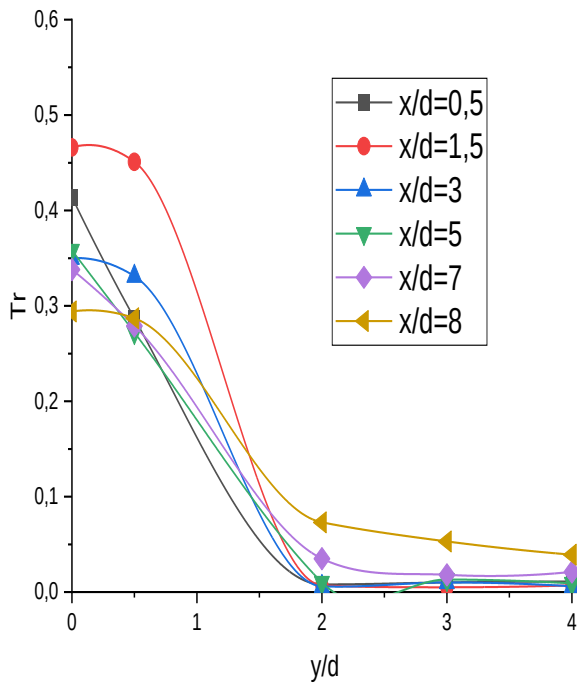


Figure (III.112) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=8$ et $r/d=0$

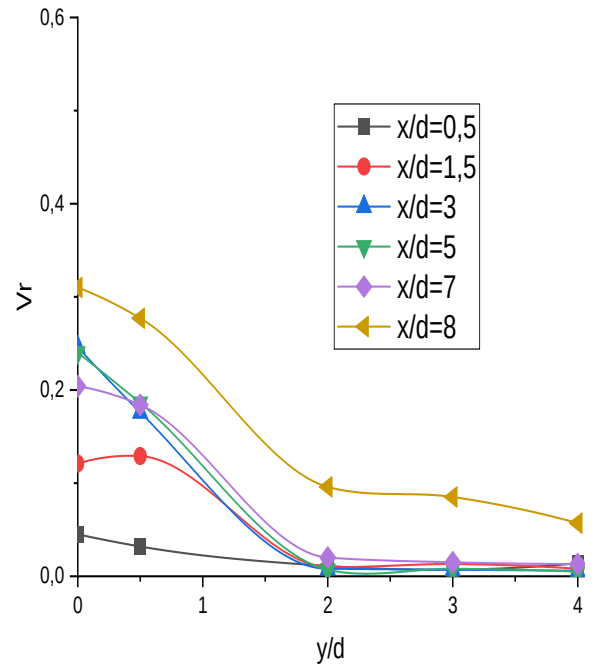


Figure (III.113) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$

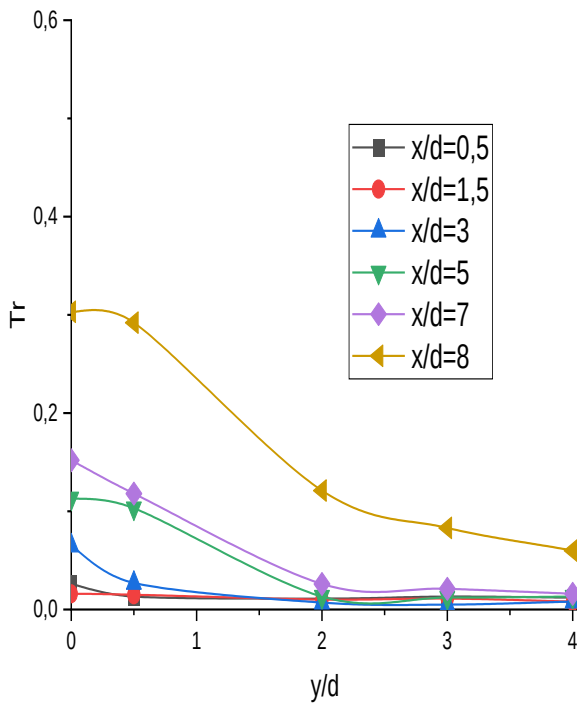


Figure (III.114) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=8$ et $r/d=1$

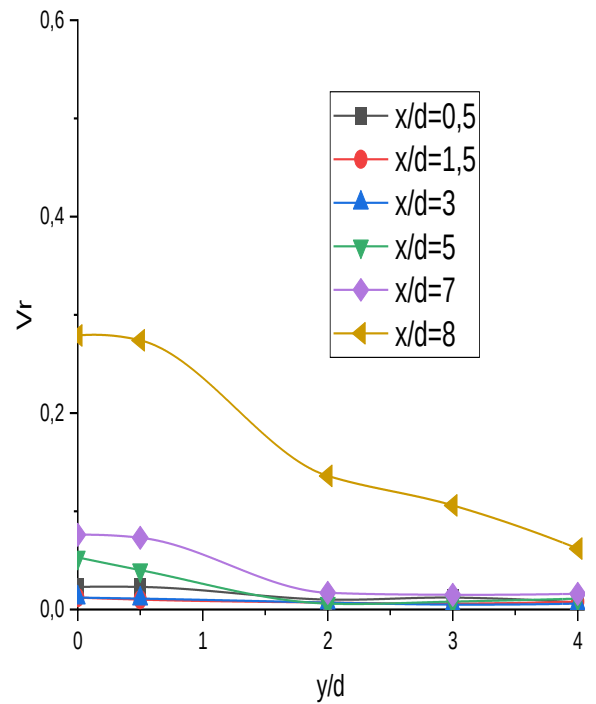
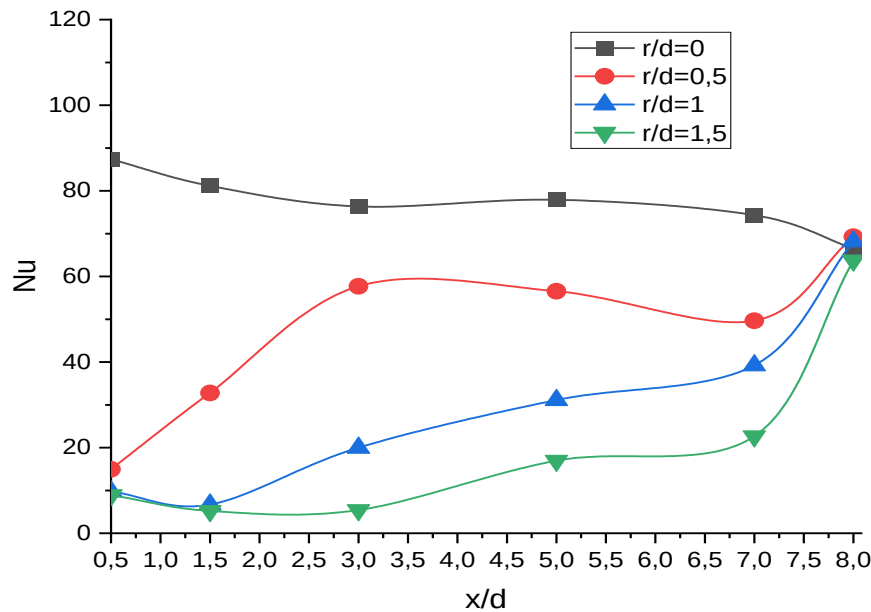


Figure (III.115) : distribution de la vitesse radiale V_r pour $h/d=8$ et $r/d=1.5$

III.3.4.5. Evolution du nombre de Nusselt axial pour $h/d=8$ Figure (III.116) : Distribution de nombre de Nusselt axial à $h/d=8$

On observe que les valeurs les plus élevées apparaissent au centre $r/d = 0$, où le nombre de Nusselt est important dès $x/d = 0.5$ puis diminue progressivement jusqu'à atteindre une quasi-stabilité après $x/d \approx 3$. Pour $r/d = 0.5$, le comportement est différent avec une augmentation rapide qui atteint un maximum vers $x/d = 3$, suivie d'une légère baisse et d'une stabilisation. À $r/d = 1$, les valeurs sont faibles au départ mais augmentent progressivement le long de l'axe, tandis qu'à $r/d = 1.5$ elles restent très basses sur tout le parcours avec une hausse notable à proximité de $x/d = 8$.

III.3.4.6. Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$

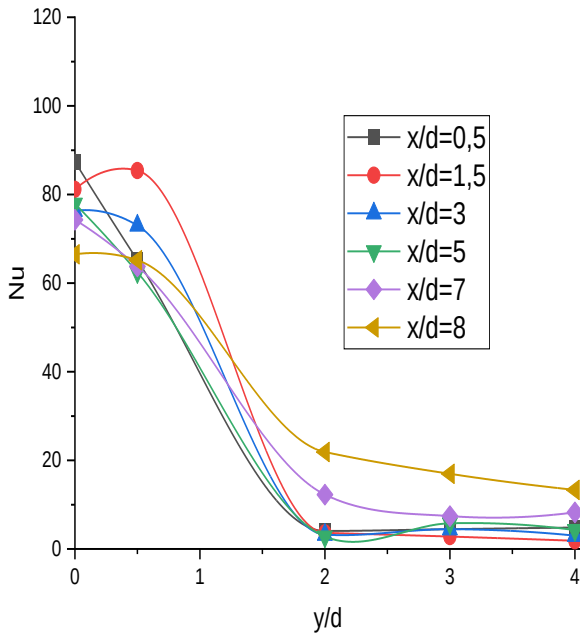


Figure (III.117) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=0$

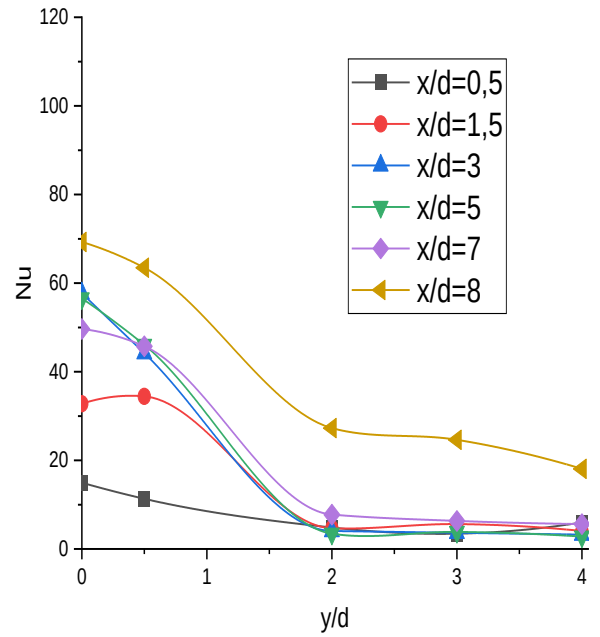


Figure (III.118) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=0.5$

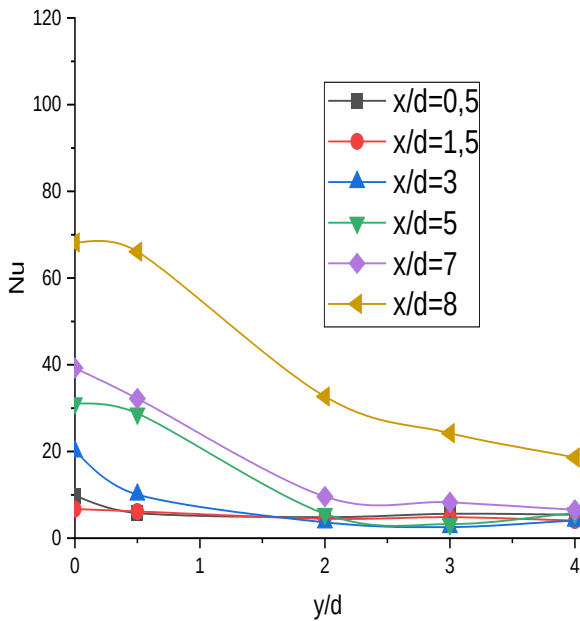


Figure (III.119) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=1$

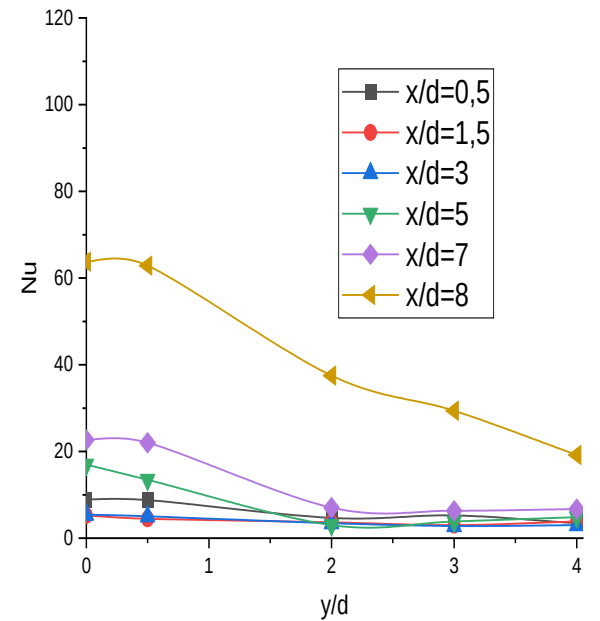


Figure (III.120) : Evolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=8$ et $r/d=1.5$

On constate que, pour les courbes de x/d , la valeur du nombre de Nusselt est élevée, notamment à $y/d = 0,5$ où elle atteint son maximum, puis elle commence à diminuer vers $y/d = 2$. Au-delà, la valeur du Nusselt devient très faible et reste stable tout au long du parcours radial jusqu'au bord de l'obstacle, à l'exception de la courbe $x/d = 8$ qui présente la valeur la plus élevée, correspondant à la surface de l'obstacle, ce qui met en évidence l'importance de l'échange thermique qui s'y produit.

Chapitre IV

**Comparaisons et discussions
des résultats obtenus pour les
deux configurations étudiées.**

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre on compare les distributions des profils des trois paramètres adimensionnels mesurés (températures, vitesses et nombre de Nusselt dans les deux directions axiales et radiales) des deux diffuseurs lobés et tourbillonnaires dans toutes les stations étudiées.

IV.2. surface impactée

IV.2.1.1. Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=2$

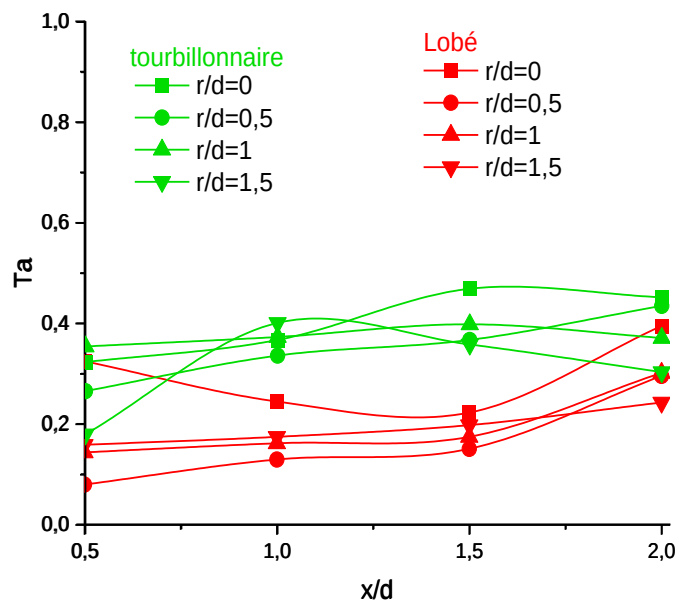


Figure (IV.1) : Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à $h/d=2$

La figure IV.1 illustre une comparaison entre la distribution de la température axiale pour les jets tourbillonnaires (en vert) et lobés (en rouge) à $h/d = 2$.

On remarque que les jets tourbillonnaires présentent des valeurs de température plus élevées aux différentes positions r/d , traduisant un transfert thermique plus efficace, tandis que les valeurs pour les jets lobés restent relativement faibles avec une évolution limitée le long de l'axe.

IV.2.1.2. Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=2$

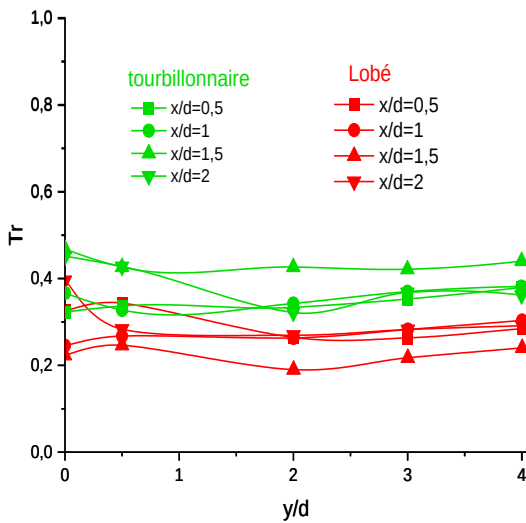


Figure (IV.2) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=0$

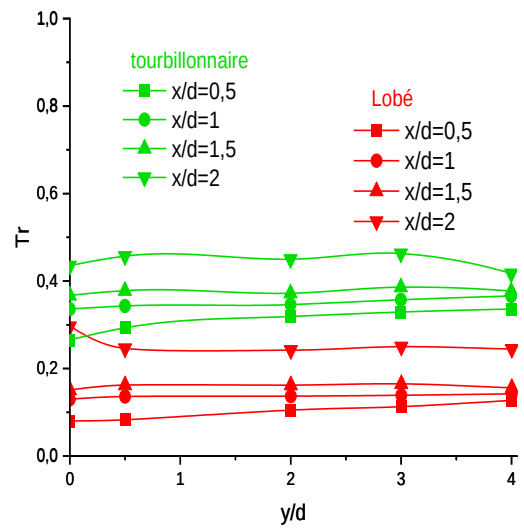


Figure (IV.3) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=0.5$

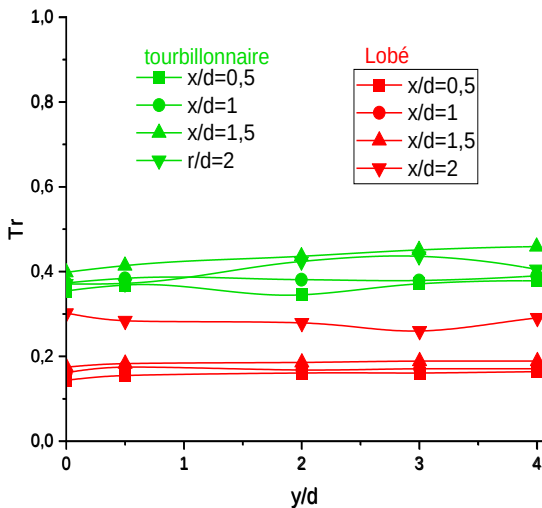


Figure (IV.4) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=1$

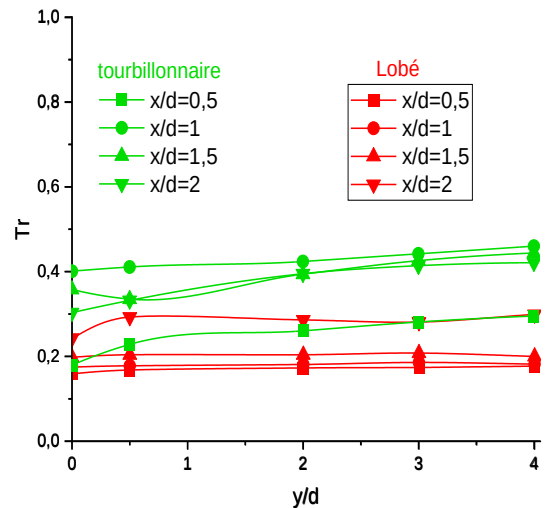


Figure (IV.5) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=1.5$

D'après les figures (IV.2 – IV.5) représentant la comparaison de la distribution radiale de la température entre les deux configurations à $h/d = 2$ et pour différentes positions radiales, on observe clairement que les valeurs correspondant à la configuration tourbillonnaire sont plus élevées que celles de la configuration lobée. Cet écart reste marqué pour toutes les positions r/d , ce qui montre que l'écoulement tourbillonnaire favorise un meilleur mélange et donc un transfert thermique plus efficace par rapport à la configuration lobée, où les valeurs restent plus faibles et relativement stables.

IV.2.1.3. Evaluation du nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=2$

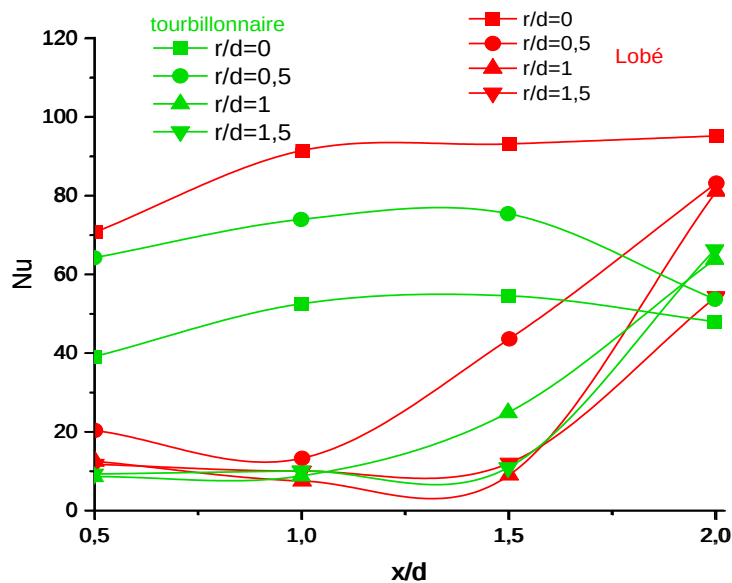


Figure (IV.6) : Distribution de nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à $h/d=2$

La figure IV.6 illustre l'évolution du nombre de Nusselt axial à $h/d = 2$ pour différentes positions radiales. On remarque que les valeurs correspondant à la configuration lobée en rouge sont nettement plus élevées par rapport à la configuration tourbillonnaire en vert, en particulier au centre $r/d = 0$. Cela indique que la configuration lobée assure un transfert thermique plus efficace sur l'axe, tandis que la configuration tourbillonnaire reste moins performante dans ce domaine.

IV.2.1.4. Evaluation du nombre de Nusselt radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=2$

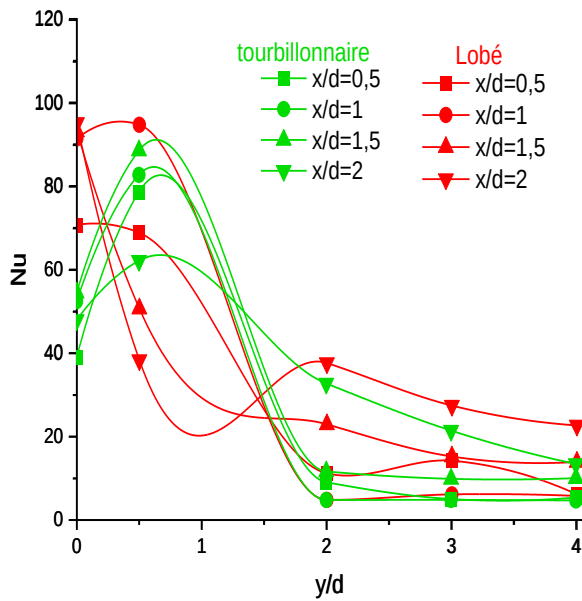


Figure (IV.7) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=0$

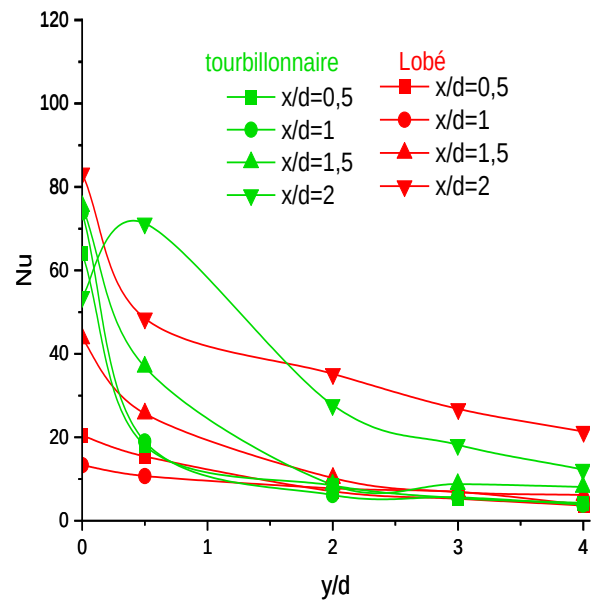


Figure (IV.8) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=0.5$

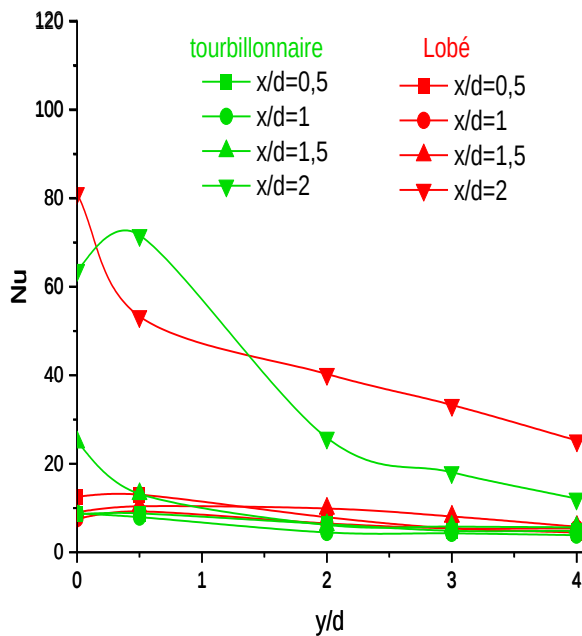


Figure (IV.9) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=1$

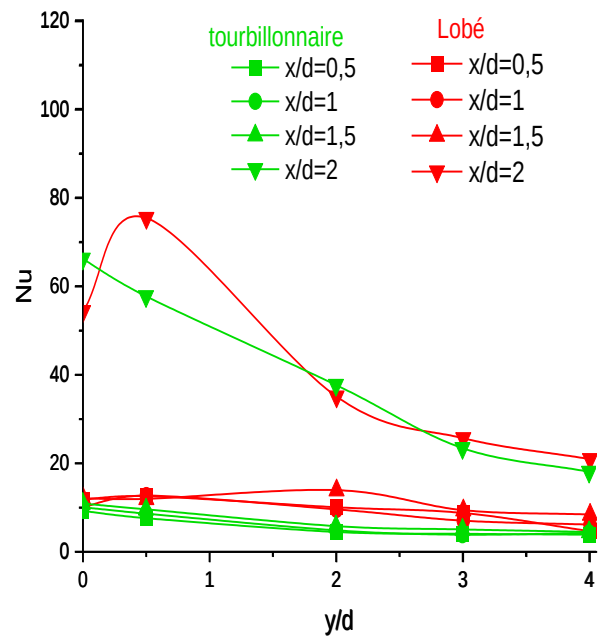


Figure (IV.10) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=2$ et $r/d=1.5$

Les figures IV.7 à IV.10 présentent l'évolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d=2$ selon différentes positions. On remarque que les valeurs sont nettement plus élevées dans la configuration lobée par rapport à la configuration tourbillonnaire aux positions centrales $r/d=0$ et $r/d=0.5$, où l'écart apparaît de manière marquée. En revanche, pour $r/d=1$ et $r/d=1.5$, les valeurs diminuent dans les deux configurations et l'écart devient moins visible, ce qui montre que l'efficacité de la configuration lobée se concentre principalement au centre puis s'atténue progressivement vers les bords.

IV.2.1.5. Comparaison de la distribution de la vites axial entre les deux configurations à $h/d=2$

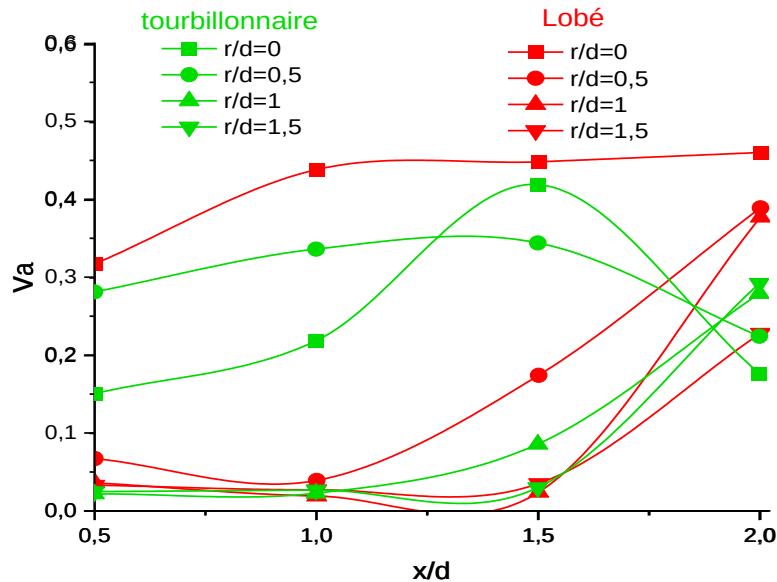


Figure (IV.11) : Comparaison de la distribution de la vitesse axiale entre les deux configurations à $h/d=2$

La figure IV.11 montre que la vitesse axiale dans la configuration lobée en rouge reste globalement élevée et stable aux différentes positions, notamment sur l'axe $r/d=0$, tandis que la configuration tourbillonnaire en vert présente une variabilité plus marquée avec des valeurs qui augmentent localement puis diminuent nettement, en particulier pour $r/d=0$ et $r/d=0.5$. Cela indique que l'écoulement lobé conserve une vitesse plus régulière par rapport à l'écoulement tourbillonnaire.

IV.2.2.1. Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à $h/d=4$

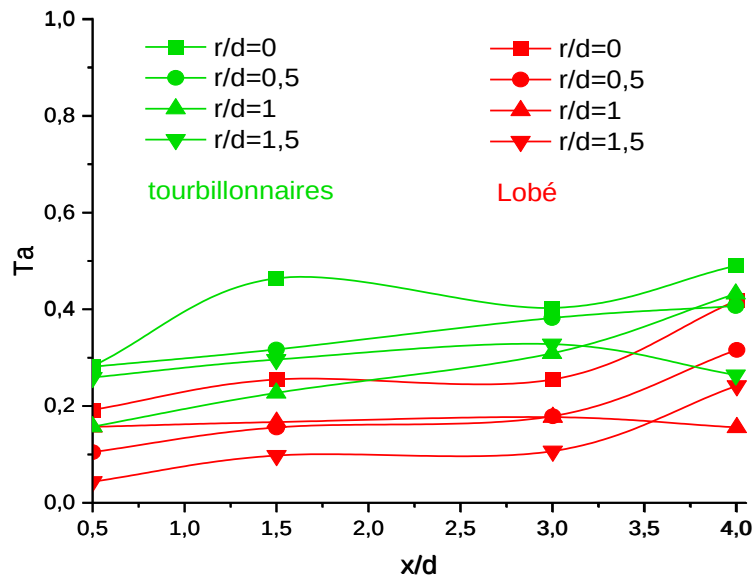


Figure (IV.12) : Comparaison de la distribution de la température axiale entre les deux configurations à $h/d=4$

La figure IV.12 montre la comparaison de la distribution de la température axiale pour $h/d=4$ entre les deux configurations. On remarque que les valeurs dans la configuration tourbillonnaire en vert sont nettement plus élevées que celles de la configuration lobée en rouge à toutes les positions, ce qui indique une efficacité supérieure de l'écoulement tourbillonnaire pour élever la température axiale par rapport à l'écoulement lobé

IV.2.2.2. Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=4$

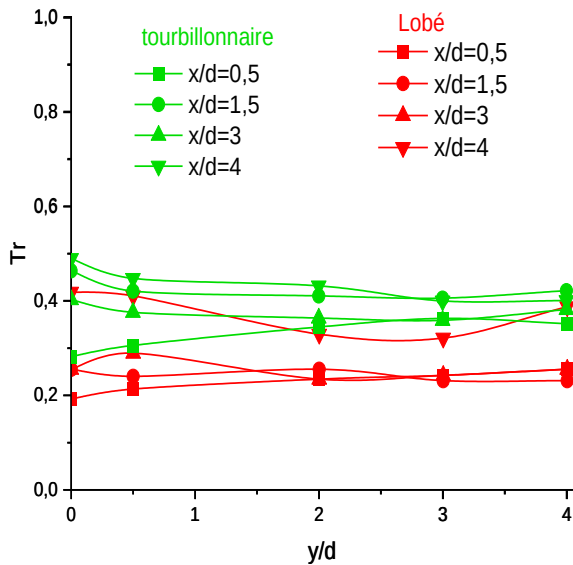


Figure (IV.13) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=0$

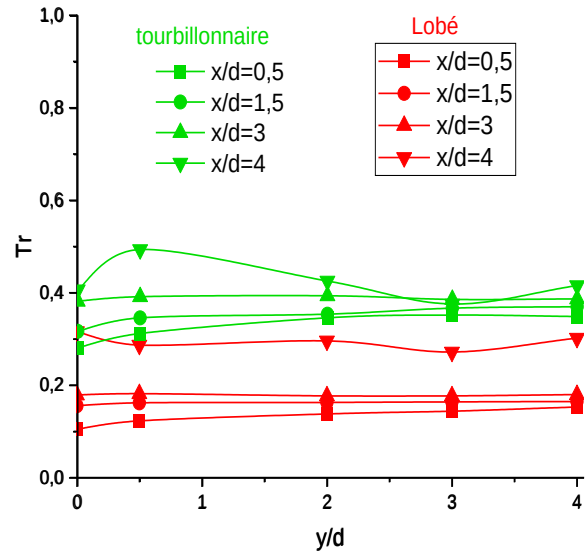


Figure (IV.14) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=0.5$

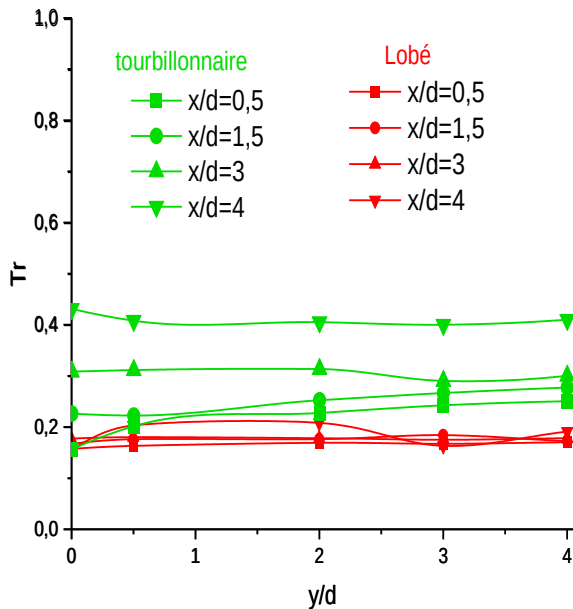


Figure (IV.15) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=1$

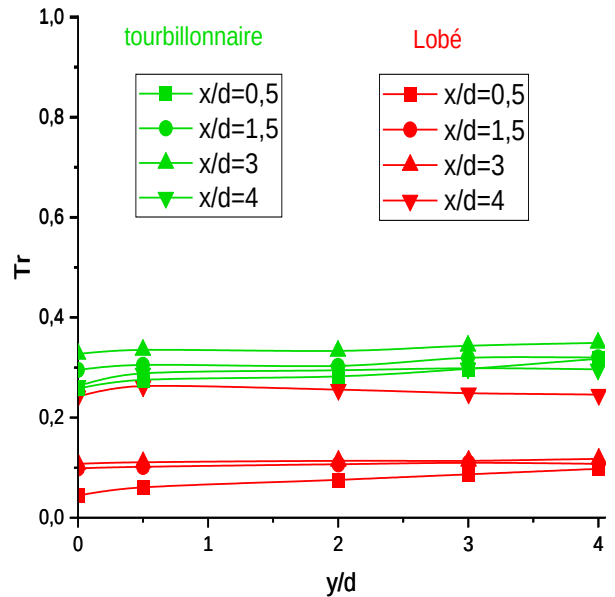


Figure (IV.16) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=1.5$

Les figures IV.13 à IV.16 présentent la distribution de la température radiale à $h/d=4$ pour différentes positions de r/d . On remarque que les valeurs dans la configuration tourbillonnaire en vert restent toujours supérieures à celles de la configuration lobée en rouge avec une légère variation selon la position, ce qui confirme une efficacité plus élevée de l'écoulement tourbillonnaire dans l'élévation de la température par rapport à l'écoulement lobé.

IV.2.2.3. Evaluation du nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=4$

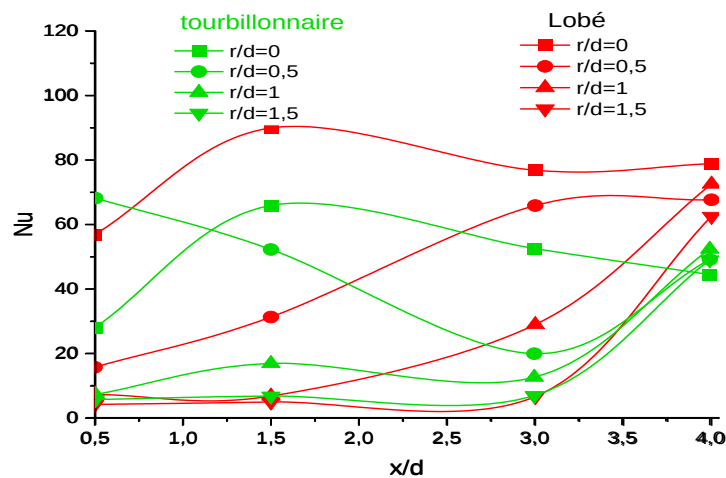


Figure (IV.17) : Evaluation du nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=4$

La figure IV.17 illustre l'évolution du nombre de Nusselt axial pour $h/d = 4$. On observe que les valeurs dans la configuration lobée en rouge sont nettement plus élevées que celles de la configuration tourbillonnaire en vert aux différentes positions, en particulier au centre $r/d = 0$ où l'écart est plus marqué, ce qui indique une efficacité supérieure du transfert thermique dans l'écoulement lobé.

IV.2.2.4. Evaluation du nombre de Nusselt radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=4$

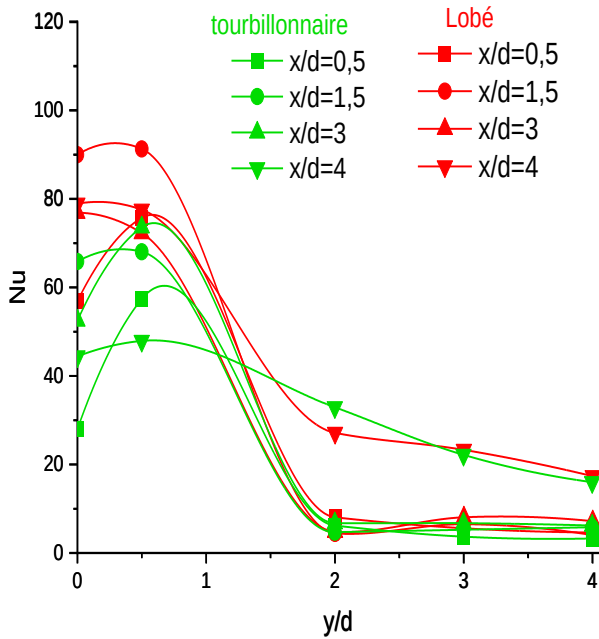


Figure (IV.18) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=0$

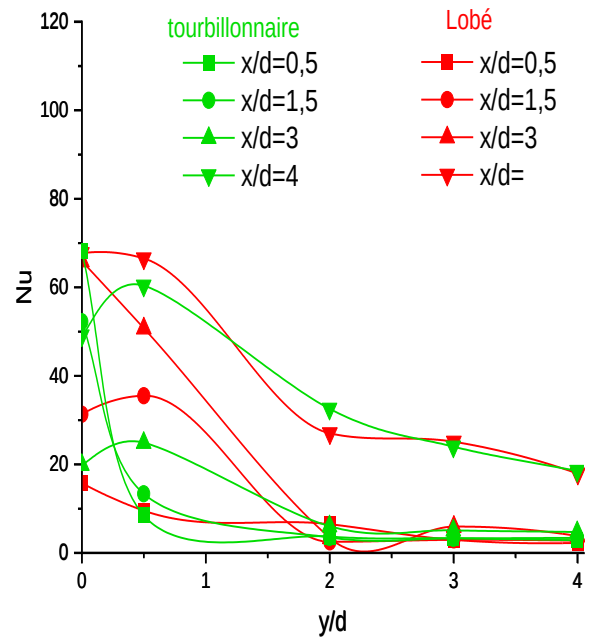


Figure (IV.19) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=0.5$

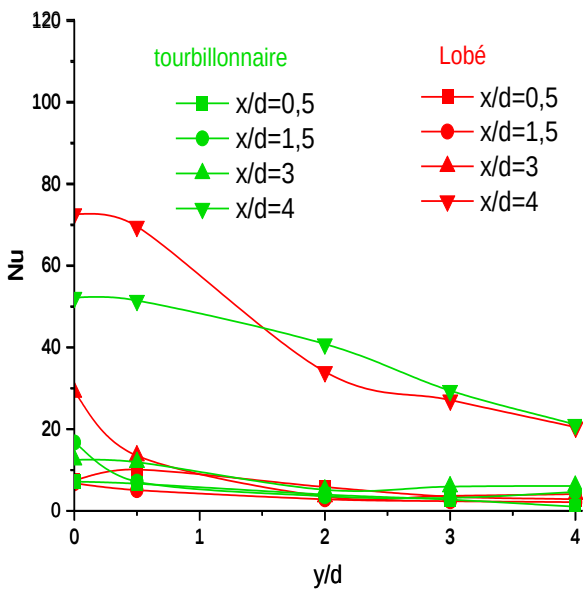


Figure (IV.20) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=1$

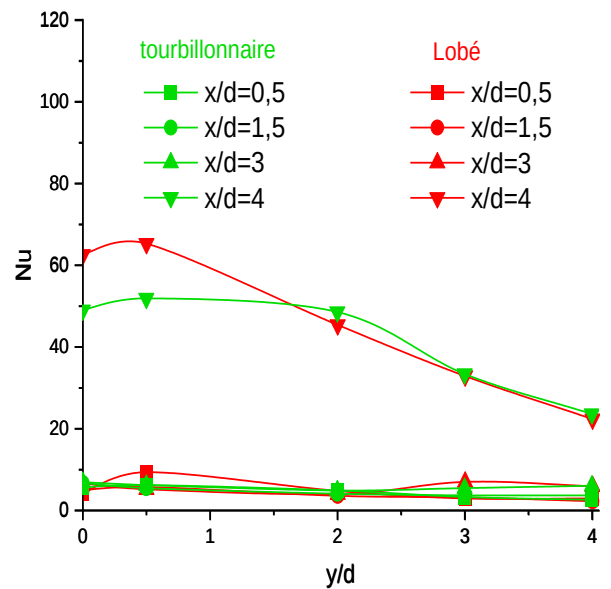


Figure (IV.21) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=4$ et $r/d=1.5$

La figure IV.18 à IV.21 illustre l'évolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d = 4$. On observe que les valeurs dans la configuration lobée en rouge sont généralement supérieures à celles de la configuration tourbillonnaire en vert, en particulier près du centre $r/d = 0$ et $r/d = 0,5$, tandis que l'écart diminue progressivement aux positions radiales plus grandes $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$ où les courbes deviennent proches. Cela indique que l'effet de la configuration lobée est plus marqué au centre et décroît vers les bords.

IV.2.2.5. Comparaison de la distribution de la vites axial entre les deux configurations à $h/d=4$

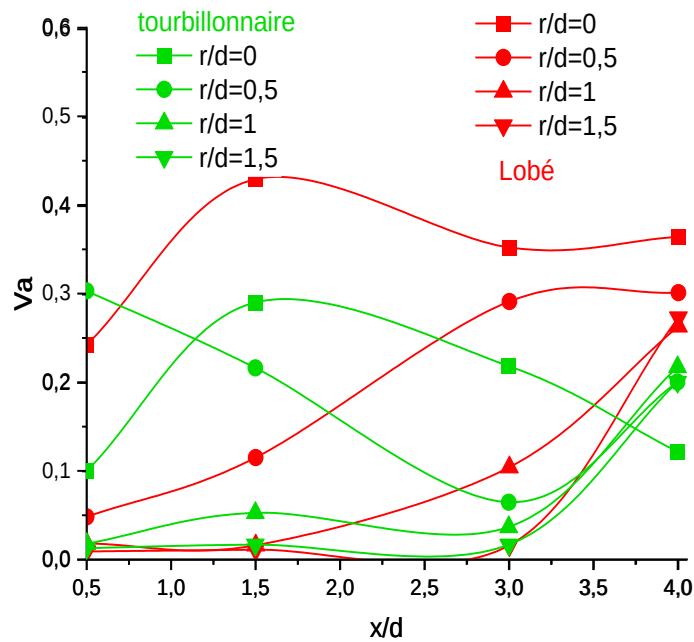


Figure (IV.22) : Comparaison de la distribution de la vitesse axiale entre les deux configurations à $h/d=4$

La figure IV.22 montre la comparaison de la distribution de la vitesse axiale pour $h/d = 4$. On remarque que la configuration lobée conserve des valeurs plus élevées et plus stables aux différentes positions, notamment sur l'axe $r/d = 0$ et $r/d = 0,5$, tandis que la configuration tourbillonnaire présente des fluctuations plus marquées avec des valeurs relativement plus faibles, ce qui indique une régularité plus importante de l'écoulement dans le cas lobé par rapport au cas tourbillonnaire.

IV.2.3.1. Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=6$

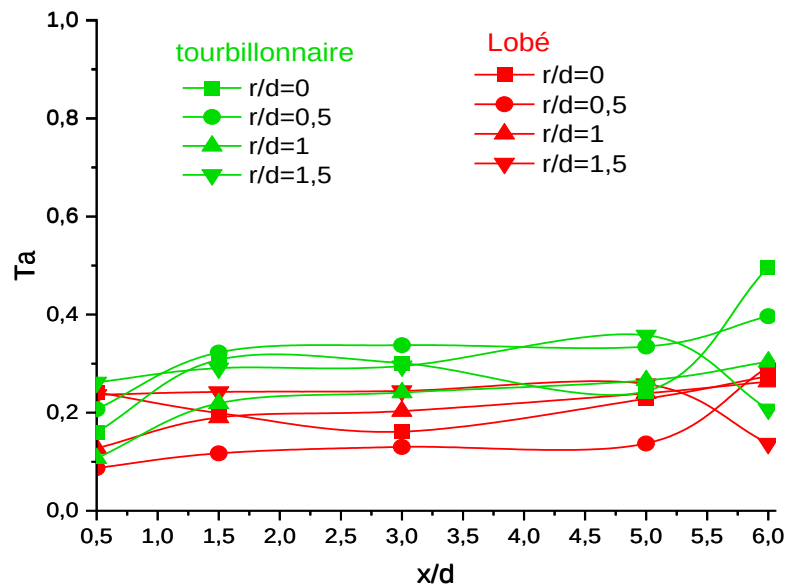


Figure (IV.23) : Comparaison de la distribution de la température axiale entre les deux configurations à $h/d=6$

La figure IV.23 montre la comparaison de la distribution de la température axiale pour $h/d = 6$. On observe que la configuration tourbillonnaire en vert présente des valeurs plus élevées que la configuration lobée en rouge le long de l'axe, notamment près du centre $r/d = 0$ et $r/d = 0,5$. Avec l'avancement selon l'axe x/d , l'écart entre les deux configurations diminue progressivement et les valeurs deviennent proches, ce qui indique que l'effet de la configuration tourbillonnaire est plus marqué dans les premières zones puis s'atténue en s'éloignant de l'entrée.

IV.2.3.2. Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=6$

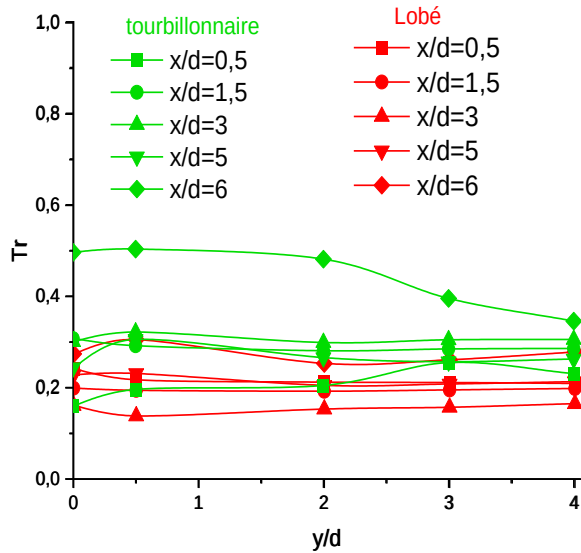


Figure (IV.24) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=0$

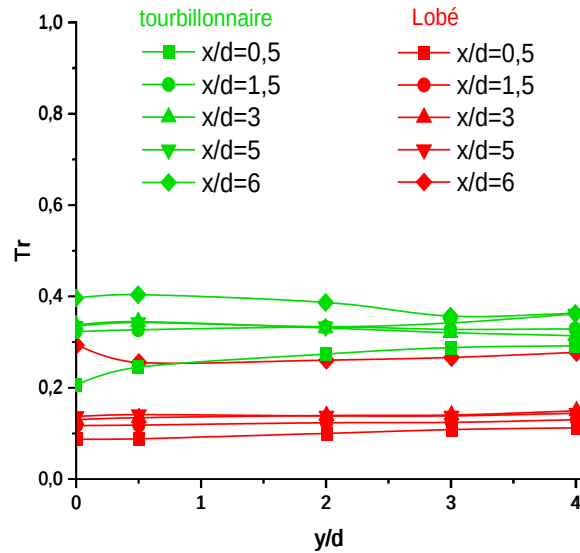


Figure (IV.25) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=0.5$

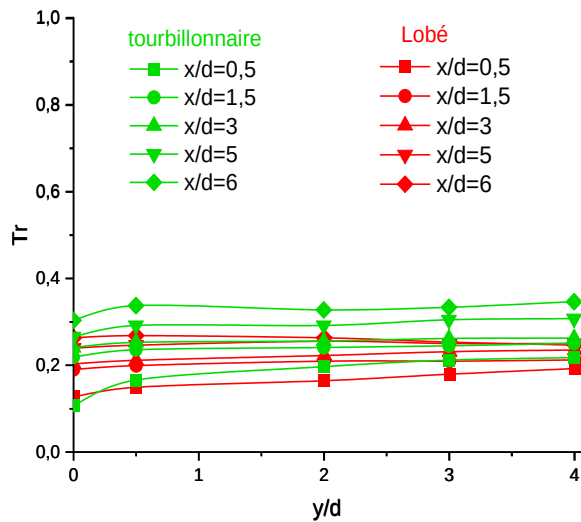


Figure (IV.26) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=1$

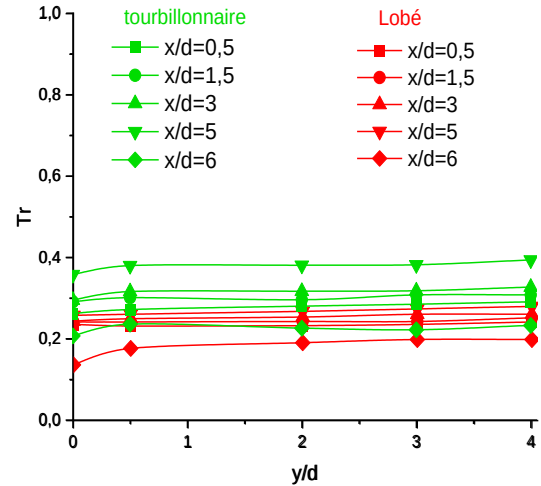


Figure (IV.27) : Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=1.5$

Les figures IV.24 à IV.27 montrent l'évolution de la distribution radiale de la température pour $h/d = 6$. On remarque que les valeurs dans la configuration tourbillonnaire (en vert) restent plus élevées que celles de la configuration lobée (en rouge) aux différentes positions $r/d = 0, 0,5, 1$ et $1,5$, avec un écart plus marqué près du centre ($r/d = 0$ et $r/d = 0,5$). En revanche, cet écart diminue progressivement aux positions radiales plus grandes où les courbes deviennent proches. Cela indique que l'effet de la configuration tourbillonnaire sur l'élévation de la température est plus prononcé au centre et décroît vers les bords.

IV.2.3.3. Evaluation du nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=6$

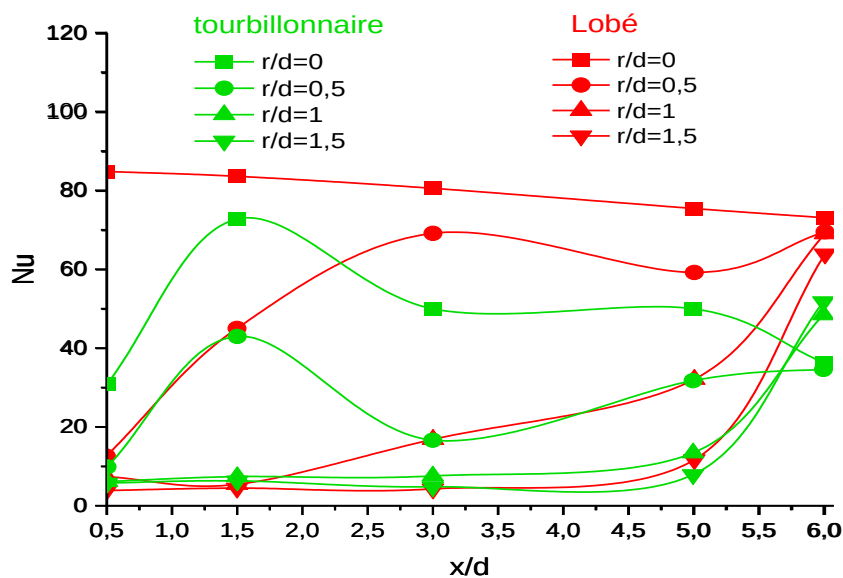


Figure (IV.28) : Distribution de nombre de Nusselt axial entre les deux configuration à $h/d=6$

La figure IV.28 illustre l'évolution du nombre de Nusselt axial à $h/d = 6$. On remarque que les valeurs dans la configuration lobée (en rouge) restent nettement supérieures à celles de la configuration tourbillonnaire (en vert), surtout sur l'axe $r/d = 0$ et $r/d = 0,5$, tandis que l'écart diminue progressivement aux positions radiales plus grandes $r/d = 1$ et $r/d = 1,5$, où les courbes tendent à se rapprocher. Cela met en évidence la supériorité de la configuration lobée dans l'amélioration du transfert thermique le long de l'axe.

IV.2.3.4. Evaluation du nombre de Nusselt radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=6$

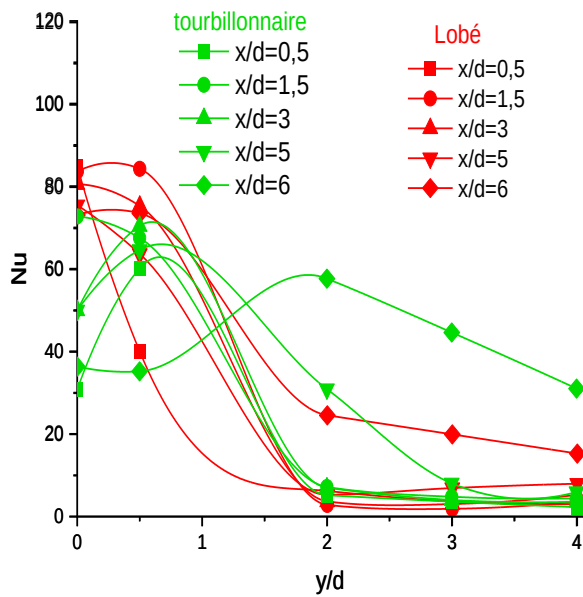


Figure (IV.29) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=0$

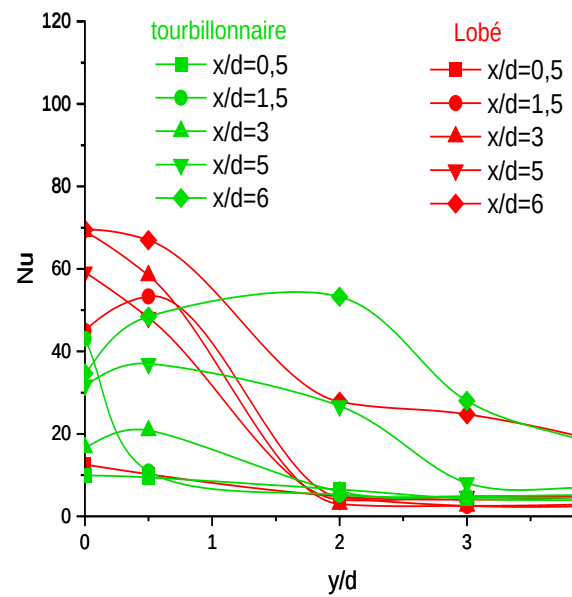


Figure (IV.30) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=0.5$

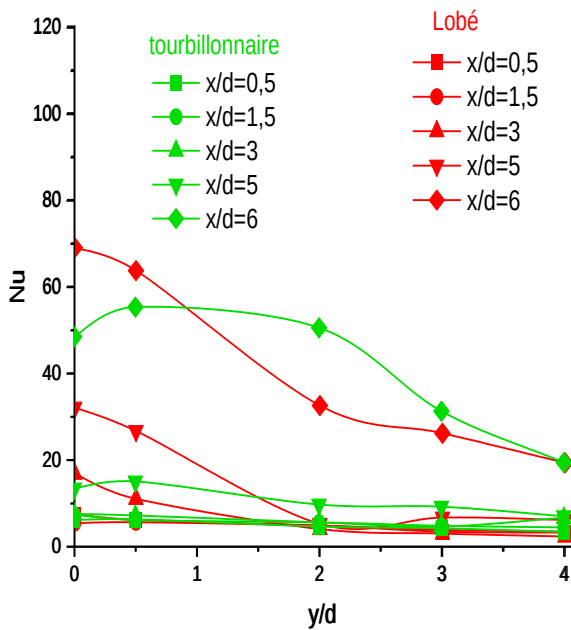


Figure (IV.31) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=1$

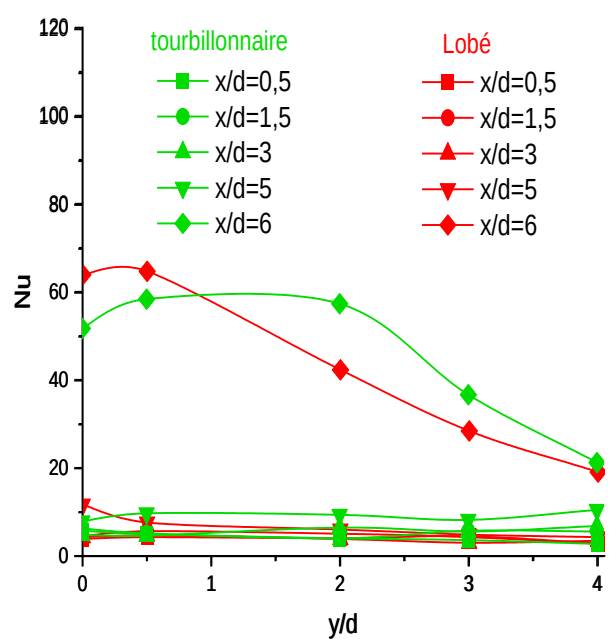


Figure (IV.32) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=6$ et $r/d=1.5$

Les figures IV.29 à IV.32 montrent l'évolution du nombre de Nusselt radial pour $h/d = 6$. On remarque que les valeurs dans la configuration lobée sont généralement plus élevées que dans la configuration tourbillonnaire, surtout près du centre à $r/d = 0$ et $r/d = 0.5$ où l'écart est net. Cet écart diminue progressivement aux positions radiales plus grandes $r/d = 1$ et $r/d = 1.5$, où les courbes deviennent plus proches, ce qui indique que l'effet de la configuration lobée est plus marqué au centre puis décroît vers les bords.

IV.2.3.5. Comparaison de la distribution de la vites axial entre les deux configurations à $h/d=6$

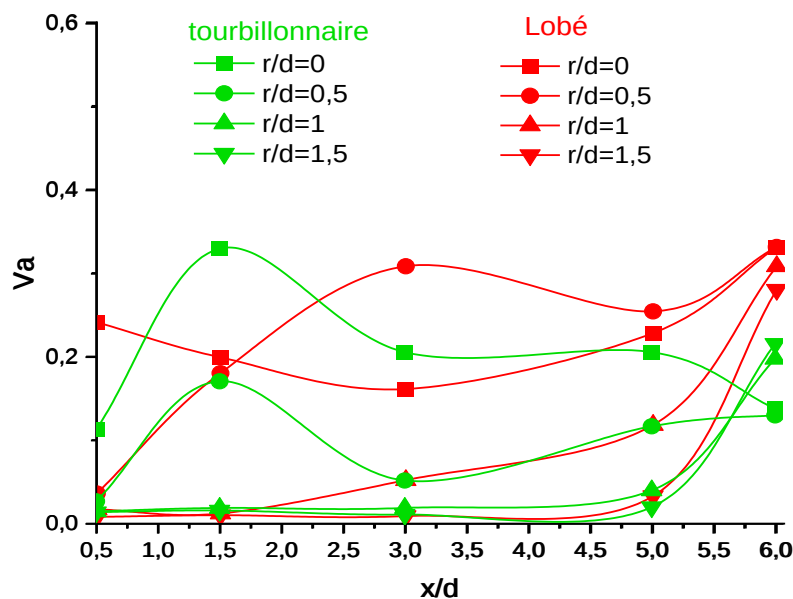


Figure (IV.33) : Comparaison de la distribution de la vitesse axiale entre les deux configurations à $h/d=6$

La figure IV.33 montre l'évolution de la vitesse axiale pour $h/d = 6$. On remarque que les valeurs dans la configuration lobée sont plus élevées et plus stables le long de l'axe, tandis que la configuration tourbillonnaire présente une variation plus marquée avec des pics et des creux à certains emplacements, ce qui indique une vitesse plus régulière dans la configuration lobée.

IV.2.4.1. Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=8$

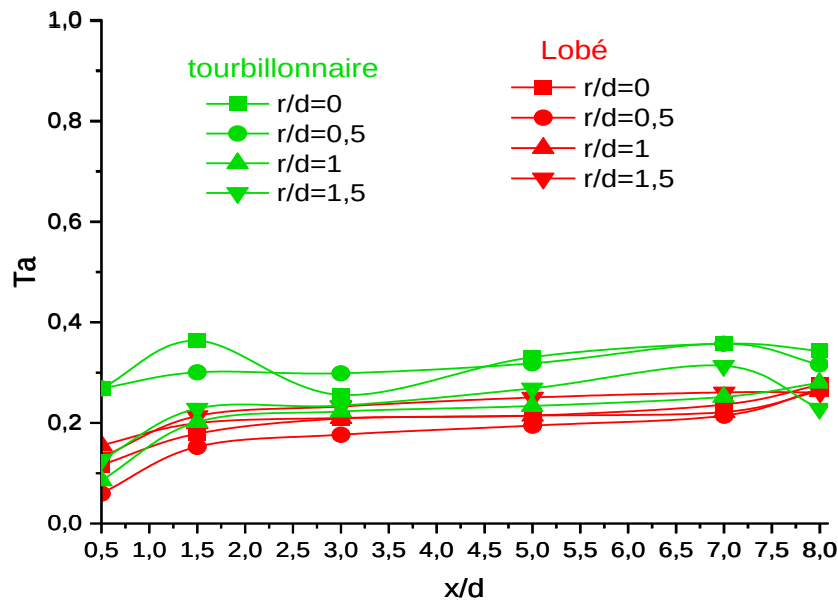


Figure (IV.34) : Comparaison de la distribution de la température axial entre les deux configurations à $h/d=8$

La figure IV.34 illustre l'évolution de la distribution axiale de la température pour $h/d = 8$. On remarque que les valeurs dans la configuration tourbillonnaire restent supérieures à celles de la configuration lobée tout au long de l'axe, avec un rapprochement notable des courbes aux distances plus éloignées, ce qui indique que l'effet tourbillonnaire sur l'élévation de la température est plus marqué près de l'entrée et diminue progressivement le long de l'axe.

IV.2.4.2. Comparaison de la distribution de la température radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=8$

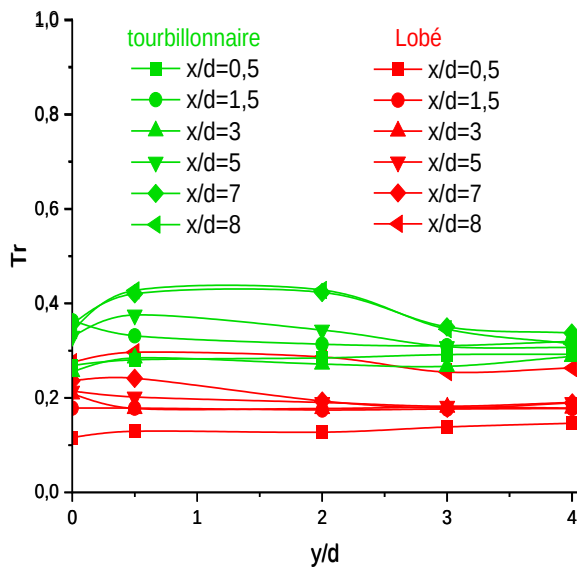


Figure (IV.35) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=0$

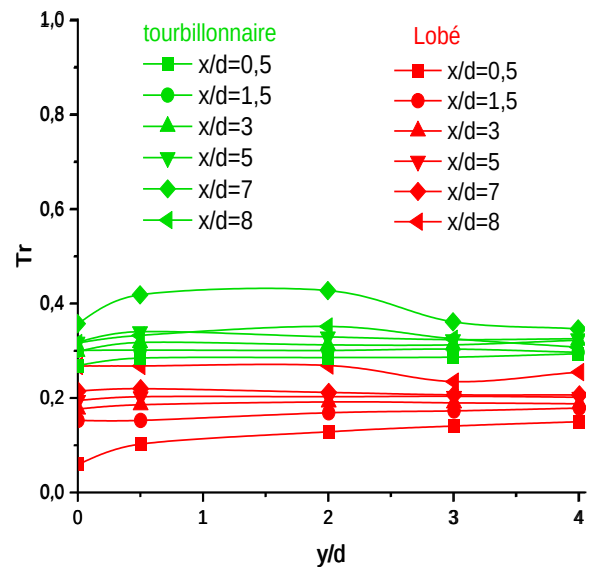


Figure (IV.36) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=0.5$

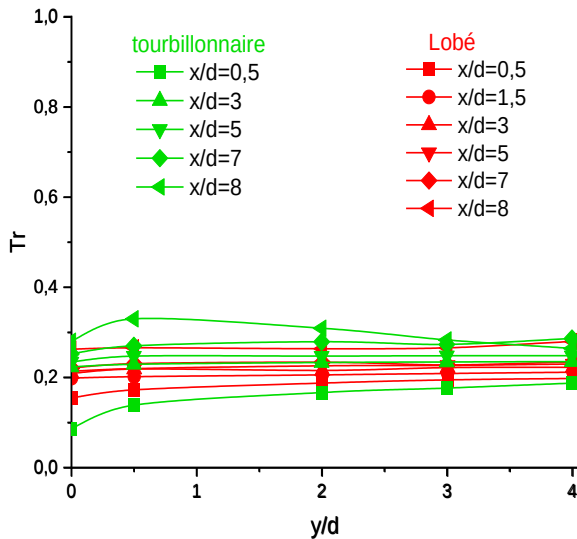


Figure (IV.37) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=1$

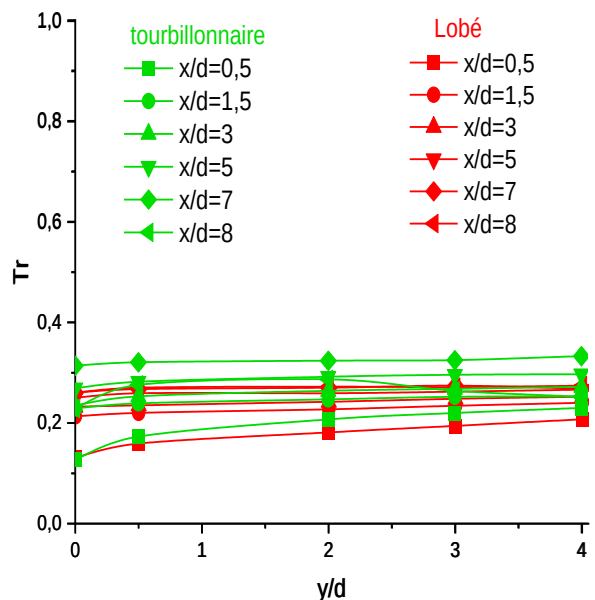


Figure (IV.38) : Comparaison de la distribution de la température radiale entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=1.5$

Les figures IV.35–IV.38 illustrent l'évolution de la distribution radiale de la température pour $h/d = 8$ à différentes positions de r/d . On remarque que les valeurs dans le cas tourbillonnaire restent supérieures à celles enregistrées dans le cas lobé, ce qui confirme que l'effet du tourbillon sur l'élévation de la température demeure plus marqué, mais diminue progressivement avec l'augmentation de la distance radiale, où les valeurs tendent à se rapprocher aux extrémités.

IV.2.4.3. Evaluation du nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à hauteur $h/d=8$

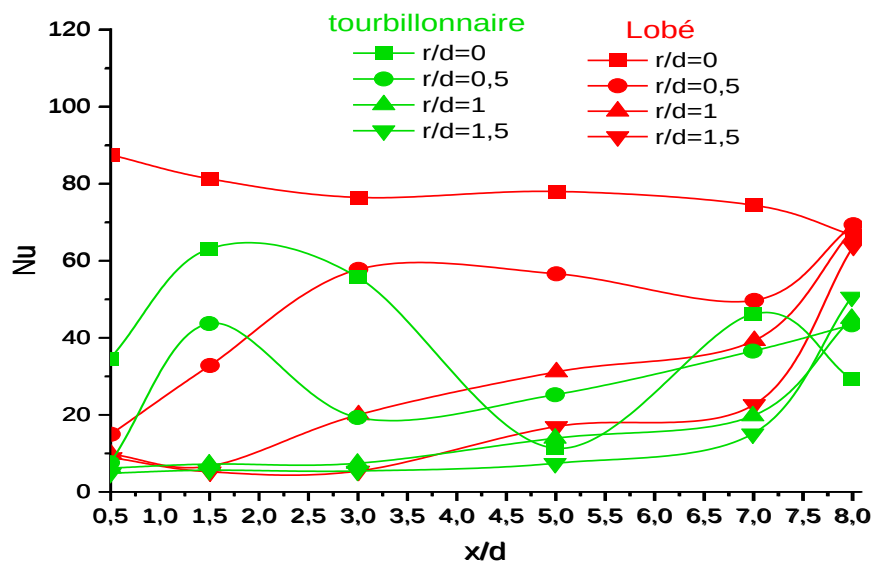


Figure (IV.39) : Distribution de nombre de Nusselt axial entre les deux configurations à $h/d=8$

La figure IV.39 illustre l'évolution du nombre de Nusselt axial à $h/d = 8$. On remarque que la configuration lobée maintient des valeurs relativement élevées et stables, notamment au centre ($r/d = 0$), tandis que la configuration tourbillonnaire présente des pics locaux aux abscisses proches de $x/d \approx 1,5$ puis diminue nettement le long de l'axe. Aux positions radiales plus grandes, les écarts entre les deux configurations se réduisent, ce qui traduit un transfert thermique axial plus stable et plus efficace.

IV.2.4.4. Evaluation du nombre de Nusselt radial entre les deux configurations à hauteur $h/d=8$

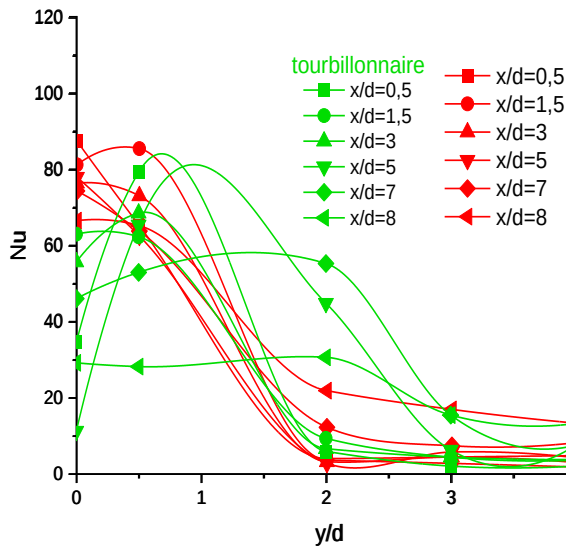


Figure (IV.40) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=0$

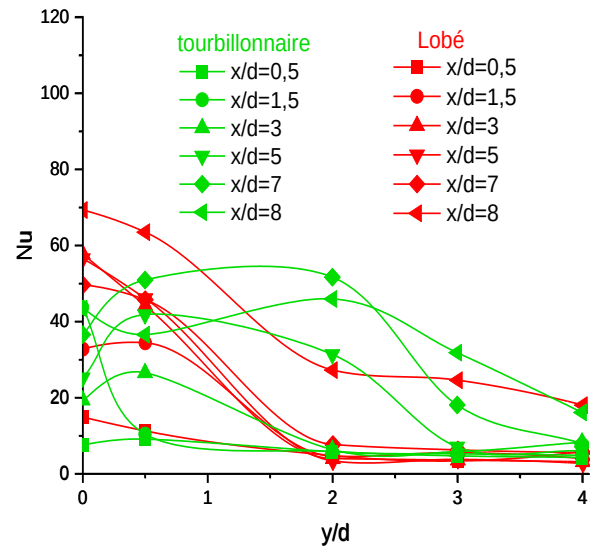


Figure (IV.41) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=0.5$

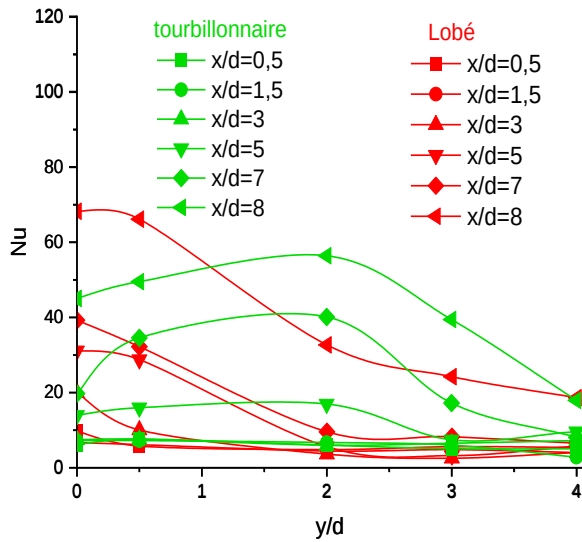


Figure (IV.42) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=1$

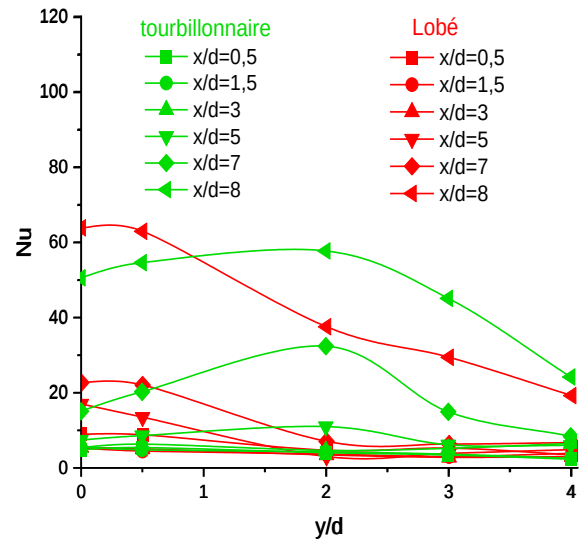


Figure (IV.43) : Evaluation du nombre de Nusselt entre les deux configurations à $h/d=8$ et $r/d=1.5$

Les figures IV.40 – IV.43 illustrent l'évolution de la distribution radiale du nombre de Nusselt à $h/d = 8$ pour différentes positions de r/d . On observe que les valeurs sont élevées au centre puis diminuent progressivement en s'éloignant radialement, où les courbes se rapprochent et les écarts entre les deux configurations deviennent faibles, ce qui indique une atténuation de l'effet de la turbulence sur le transfert thermique loin du centre

IV.2.4.5. Comparaison de la distribution de la vites axial entre les deux configurations à $h/d=8$

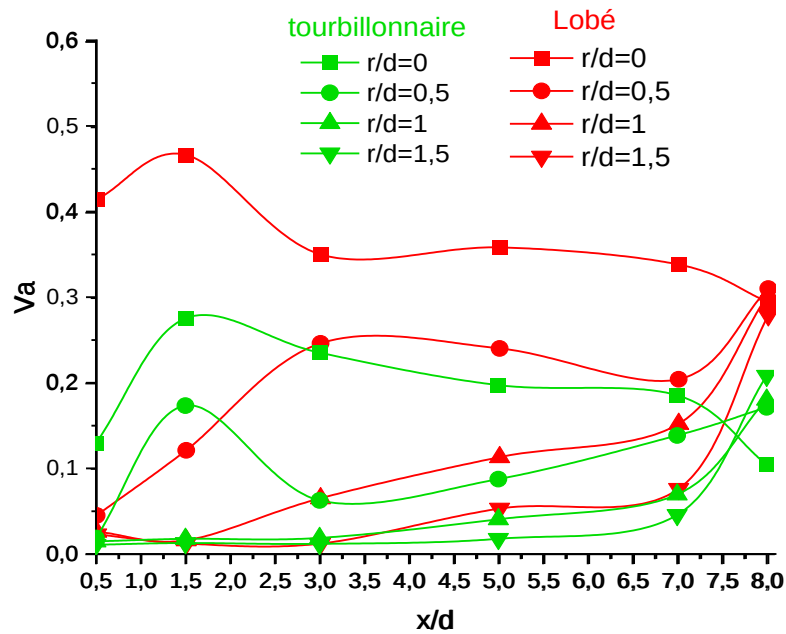


Figure (IV.44) : Comparaison de la distribution de la vitesse axial entre les deux configurations à $h/d=8$

La figure IV.44 montre l'évolution de la distribution axiale de la vitesse à $h/d = 8$ pour différentes positions de r/d . On observe que les valeurs dans la configuration lobée restent généralement plus élevées et plus stables le long de l'axe, tandis que la configuration tourbillonnaire présente une variation plus marquée avec des pics et des creux locaux, en particulier près du centre, ce qui traduit une différence nette dans le comportement de l'écoulement entre les deux configurations.

Conclusion

Conclusion

Ce travail a porté sur une étude expérimentale approfondie du comportement d'un jet d'air chaud lors de son impact sur un obstacle cylindrique, en utilisant deux diffuseurs différents : le diffuseur tourbillonnaire et le diffuseur lobé. Cette étude s'inscrit dans une démarche visant à proposer des solutions innovantes pour améliorer le transfert de chaleur et la distribution de l'écoulement dans les applications thermiques et industrielles, où le jet joue un rôle essentiel dans les procédés de refroidissement, de chauffage et de contrôle thermique.

Les analyses expérimentales ont montré que le diffuseur tourbillonnaire présente une plus grande capacité à concentrer les grandeurs axiales dans les zones proches de la sortie (x/d petit), où des valeurs plus élevées ont été enregistrées pour la température axiale T_a , la vitesse axiale V_a , ainsi que pour le nombre de Nusselt axial Nu au centre ($r/d = 0$). Cette caractéristique rend le tourbillonnaire particulièrement adapté aux applications nécessitant un transfert thermique intense et localisé, telles que le refroidissement sélectif des composants électroniques ou le refroidissement localisé dans les procédés métallurgiques.

En revanche, le diffuseur lobé s'est distingué par une meilleure aptitude à l'expansion radiale, avec des effets s'étendant sur les lignes latérales ($r/d = 0.5$ et 1) et atteignant des positions verticales plus éloignées ($y/d = 2-3$). Bien que les valeurs maximales de T_a et Nu soient inférieures à celles obtenues avec le tourbillonnaire, le lobé a permis une distribution plus homogène et plus étendue de la chaleur, ce qui le rend plus efficace dans les applications nécessitant un transfert thermique uniforme sur une large surface, comme dans les systèmes de refroidissement ou de chauffage surfacique à grande échelle.

L'étude a également montré que les différences entre les deux diffuseurs s'atténuent progressivement avec l'augmentation de la distance entre la sortie et l'obstacle (h/d grand). Aux grandes hauteurs ($h/d = 6$ et 8), le tourbillonnaire perd son avantage axial, tandis que les profils thermiques et dynamiques du lobé deviennent plus plats et plus faibles, entraînant un rapprochement des comportements et une diminution générale de l'efficacité du transfert thermique.

Conclusion

Ainsi, le choix du type de diffuseur dépend de la nature de l'application :

Si l'objectif est d'obtenir un transfert thermique puissant et direct dans une zone restreinte, le diffuseur tourbillonnaire est le plus approprié.

Si l'objectif est d'obtenir une distribution thermique homogène couvrant une large surface, le diffuseur lobé est le choix le plus avantageux.

Enfin, ce mémoire a permis d'approfondir la compréhension de l'impact de la géométrie du diffuseur sur les caractéristiques du jet et sur son effet thermique lors de l'interaction avec un obstacle cylindrique. Les résultats obtenus ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement de systèmes de refroidissement et de chauffage plus performants, apportant ainsi une contribution à la fois scientifique et pratique dans le domaine du génie thermique et de ses applications industrielles.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Zaaraoui Abdelkader, Tahar Abbas Miloud ; Modélisation numérique d'un multi-jet turbulent libre, mémoire magistère, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie 2009.
- [2] GICQUEL, L., Simulation numérique des grandes Echelles de jets impactants. Rapport de stage de fin d'études au sein du département CFD du CERFACS, Francis SHUM-KIVANPromotion 2013.
- [3] Rivière Nicolas, "Etude expérimentale d'une injection turbulente: application au jet impactant une surface libre", Thèse de Docteur, Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, Université de Bordeaux I, 2 avril 2008
- [4] Dimotakis P.E, Brown G.L., "The mixing at high Reynolds number", J. Fluid Mech. 76: 535-560. (1976).
- [5] PAUL E. DIMOTAKIS, RICHARD C; MIAKE-LYE, B) AND DIMITRIS A. PAPANTONIOU "Structure and dynamics of round turbulent jets", California Institute of Technology, Pasadena, California 91125 (received 2 December 1982; accepted 18 July 1983)
- [6] MAE university of Virginia – course hero
- [7] Rivière Nicolas, "Etude expérimentale d'une injection turbulente: application au jet impactant une surface libre", Thèse de Docteur, Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, Université de Bordeaux I, 2 avril 2008.
- [8] Rajaratnam.N. turbulent jet Elsevier Scientific Publishing company ;1976
- [9] RADY M., ARQUIS E., "Heat transfer enhancement of multiple impinging slat jets with symmetric exhaust ports and confinement surface protrusion", Applied Thermal Engineering, 26, 1310-1319, 2005
- [10] KHERCHI F, LABACHI Y., Amélioration de la diffusion d'air dans les locaux à usage d'habitation par l'application d'un jet d'air tourbillonnaire, Université de Bordj Bou Arreridj, 2020.
- [11] PROTIC, Z. D., Novel methods for axial fan impeller geometry analysis and experimental investigations of the generated swirl turbulent flow. Thermal Science 2010, 14(1): pp. 125-139.
- [12] PRATTE, B.D., KEFFER, J. R., The swirling turbulent jet. J of engineering transactions of the J.S.M.E. 1972: pp. 739-748.
- [13] FU, S.B. E., LAUNDER, M., LESCHZINER, A., Modeling strongly swirling recirculation jet flow with Reynolds-stress Transport Closures. Sixth Symposium on Turbulent Shear Flows, Toulouse, France 1987.
- [14] DR. ZERROUT Amar Etude Expérimentale et Numérique d'un Système de Jets Tourbillonnaires Multiples Impactant 2016

- [15] Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N., “Swirl flows”, London, Abacus Press, 1984
- [16] Huang Y., Yang V. “Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion”, Progress in Energy and Combustion Science, 35, pp. 293-304. 2009.
- [17] Braikia M., Khelil A., Loukarfi L., Naji H., “Improvement of thermal homogenization using multiple swirling jets”, Thermal Science, 16, 239-250. 2012.
- [18] COURS DE TRANSFERTS THERMIQUES Philippe Marty 2012-2013
- [19] PNGTree, methods of heat transfer isolated learning elementary vector, publié le 15 juin 2022.
- [20] DR. ZERROUT Amar Etude Expérimentale et Numérique d’un Système de Jets Tourbillonnaires Multiples Impactant 2016
- [21] Roux S., Brizzi L.E., Dorignac E., “Dynamique d’un jet rond impactant une paroi plane contraint par un forçage acoustique”, Laboratoire d’Etudes Thermiques, ENSMA, Université de Poitiers, 19eme Congrès Français de Mécanique, Marseille, 24-28 Aout 2009
- [22] Roux S., “Contribution expérimentale à l’aérothermique d’un jet en impact forcé acoustiquement”, Thèse de Docteur, Ecole Nationale Supérieure d’Ingénieurs de Poitiers, Aout 2006.
- [23] Goldstein R.J., Franchett M.E., “Heat transfer from a flat surface to an oblique impinging jet”, ASME Journal of Heat Transfer, 110:84–90, 1988.
- [24] Benhacine A., “Contribution à l’étude des jets impactant turbulents présentant une courbure des lignes de courant plus ou moins faible”, Thèse de Doctorat en Sciences en génie mécanique, Université Mentouri
- [25] Nemdili S. “Investigation numérique de l’écoulement turbulent et du transfert de chaleur autour d’un élément cubique avec jet impactant”, Thèse de Doctorat en Science, Option Energétique, Université des Sciences et Technologie, Mohammed Boudiaf, Oran 2015.
- [26] Zakaria Ghrab, Fabien Candelier, Philippe Caminat et Philippe Bournot : “Etude d’un jet impactant une plaque chauffée : décollement de la couche limite thermique et cinématique”. UNIMECA – IM2, 60 rue Joliot Curie, Technopôle de Château Gombert, 13 013 Marseille.
- [27] P. Marty, Le Refroidissement par Jets Fluides: Bilan des Recherches et Applications Récentes, Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique, 2001, pp. 193-200.