

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Présenté Par

➤ Rouabah Chafik

➤ Rouabah Zakaria

Intitulé

Étude expérimentale dynamique des jets d'air lobés : Amélioration de la diffusion d'air dans les locaux à usage d'habitation

Soutenu le : 03/07 /2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. AISSA OUALID</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BENNIA ABDEREZAK</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. HAMMIMID SABER</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.BENHADOUGA ELSADIK</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur Dr. A. BENNIA qui sans sa méthodologie, ses orientations et ses conseils précieux, ses bonnes explications qui nous ont éclairé le chemin de la recherche, ce travail n'aurait pas été accompli.

Nos remerciement s'adresse également a Mr Benmakhlouf pour son aide et son soutien .

Nous tenons par la même à remercier le jury de sa présence pour évaluer et participer à la conclusion de notre modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études. Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À mes parents :

À ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

À la mémoire de mon père رحمه الله, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

À mes sœurs « Asma, Soumia, Safia, Maroua, Khaoula »

À mon frère « Zakaria »

À mes nièces « Meriem, Hadjer »

À mes neveux « Adam, Imed, Islem, Anes, Imrane »

À mes amis «Anis et Imed Eddine»

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis merci

Chafik

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À mes parents :

À ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

À la mémoire de mon père رحمه الله, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

À mes sœurs « Asma, Soumia, Safia, Maroua, Khaoula »

À mon frère « Chafik »

À mes nièces « Meriem, Hadjer »

À mes neveux « Adam, Imed, Islem, Anes, Imrane »

À mes amis « Anis et Imed Eddine »

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis merci

Zakaria

Abstract

This work consists in studying the improvement of air homogenization in a living room by free lobed air jets. The various passive control solutions presented in our bibliographic study can be adapted to improve air distribution in residential premises. In order to improve the diffusion of air in the occupied zone at a lower cost, by a passive means of control. Two models of diffusers were tested; the lobed diffuser with 5 lobes and the lobed diffuser with 6 lobes. Axial and radial velocity profiles are also presented in this work. The dynamic study of this type of jet highlighted the interest and the role of the inclination, the number of lobes and hollows and the type of diffuser in the homogenization and the mixing efficiency of the flow air.

Résumé

Ce travail consiste à étudier l'amélioration de l'homogénéisation de l'air dans une pièce d'habitation par des jets d'air lobés libre. Les diverses solutions de contrôle passif présentées dans notre étude bibliographique peuvent être adaptées à l'amélioration de la diffusion de l'air dans les locaux à usage d'habitation. Afin d'améliorer la diffusion de l'air dans la zone d'occupation à moindre coût, par un moyen passif de contrôle. On a testé deux modèles de diffuseurs ; le diffuseur lobé à 5 lobes et le diffuseur lobé à 6 lobes. Les profils axiaux et radiaux de la vitesse sont également présentés dans ce travail. L'étude dynamique de ce type de jet mis en évidence l'intérêt et le rôle de l'inclinaison, le nombre des lobes et des creux et le type de diffuseur dans l'homogénéisation et l'efficacité de mélange de l'écoulement d'air.

ملخص

يتكون هذا العمل من دراسة تحسين تجانس الهواء في غرفة المعيشة بواسطة نفاثات هوائية حرة مفصصه بتكلفة أقل. يمكن تكييف مختلف حلول التحكم السلبي المقدمة في دراستنا الببليوغرافية لتحسين توزيع الهواء في المباني السكنية. من أجل تحسين انتشار الهواء في المنطقة المحتملة بتكلفة أقل ، عن طريق وسيلة تحكم سلبية. اختبار نموذجين من الناشر الفصوص مع 5 فصوص والناشر الفصوص مع 6 فصوص. يتم أيضًا عرض ملفات تعريف السرعة المحورية والشعاعية في هذا العمل. الدراسة الديناميكية لهذا النوع من الطائرات النفاثة سلطت الضوء على الاهتمام ودور الميل وعدد الفصوص والحفر ونوع الناشر في التجانس وكفاءة الخلط للهواء المتدفق.

Table des matières

Introduction General	1
Chapitre I : Etude Bibliographique	
I.1 Introduction	5
I.2 Diffusion d'air.....	5
I.2.1 Diffusion d'air par mélange	5
I.2.2 Diffusion d'air par déplacement	6
I.3 Choix des unités terminales de diffusion d'air	7
I.3.1 Bouches de pulsion	7
I.3.2 Contrôle de mélange des jets asymétriques	8
I.3.3 Diffuseurs munis de lobes	10
I.3.4 Débit demandé	12
I.3.4.a Production acoustique	12
I.3.5 Vitesse résiduelle en zone d'occupation	13
I.3.6 Portée	14
I.3.7 Différence de température dans la zone d'occupation	15
I.4 Jets axisymétriques	15
I.4.1 Jets turbulents simples et les jets multiples	17
I.4.1.a Jet simple	17
I.4.1.b Nombre de Reynolds	18
I.4.1.c Rapport des vitesses	18
I.4.1.d Rapport des flux de quantité de masse et de mouvement	19
I.4.1.e Flottabilité et le nombre de Froude	19
I.5 Structures tourbillonnaires	20
I.5.a Structures primaires	22
I.5.b Structures secondaires	23

I.6 Evolution des instabilités de kelvin Helmholtz	24
I.6.a Séparation de la couche limite	26
I. 7 Conclusion	27
Chapitre II :Modèle physique et formulation mathématique	
II.1 Introduction	29
II.2 Grandeurs influençant le développement du jet simple	29
II.3 Caractéristiques des jets	30
II.4 Tourbillonnement (Swirl)	31
II.4.1 Nombre de tourbillonnement	31
II.5 Equations du modèle mathématique.....	33
II.6 Equations gouvernantes dimensionnelles	33
II.6.1 Equation de continuité	33
II.6.1.1 Equations de quantité de mouvement (ou équations de Navier- Stokes) ..	34
II.6.1.2 Equation de l'énergie	34
II.6.2 Equations gouvernantes adimensionnelles	35
II.6.2.1 Equation de continuité	35
II.6.2.2 Equations de quantité de mouvement	35
II.6.2.3 Equation de l'énergie	36
II.6.3 Equations et contraintes de Reynolds	36
II.7 Conclusion	37
Chapitre III :Résultas et discussion	
III.1 Introduction	40
III.2 Banc d'essai et conditions expérimentales	40
III.3 Résultats expérimentaux	43
III.4 Conclusion	51
Conclusion Générale	53
Références Bibliographiques	

Table des Tableaux

Tableau I 1 : Différentes stratégies de contrôle des écoulements.	9
Tableau I. 2 : Caractéristiques des buses explorées par Yuan.	11
Tableau I.3 : Grandeurs à respecter dans le choix des unités terminales de diffusion d'air.	15
Tableau III. 1 : Appareils de mesure.....	41

Table des figures

Figure I.1: Diffusion d'air par mélange.	6
Figure I.2: Diffusion d'air par déplacement.	6
Figure I.3: Unité terminale de diffusion.	7
Figure I.4: La variation de la masse colinique.	8
Figure I.5: Buses explorées par Yuan.	10
Figure I. 6 : Caractéristiques géométriques des buses explorées par Yuan.	11
Figure I. 7 : Buse lobée circulaire de référence explorée par Hu et al.	14
Figure I. 8 : Schéma d'un jet libre turbulent.	16
Figure I. 9 : Schéma d'un jet libre turbulent selon Simpson.	17
Figure I. 10 : Effet du nombre de Froude sur les jets d'après Schetz.	20
Figure I. 11 : Visualisations des tourbillons longitudinaux. D'après Bernal et Roschko.	21
Figure I. 12 : Visualisations des structures tourbillonnaires dans un jet rond à nombre de Reynolds $Re_D = 5500$:a) structures primaires et b) structures secondaires. D'après Liepmann et Gharib.	22
Figure I. 13 : Modes instables observés dans un jet rond : (a) mode $m = 1$. (b) mode $m = 0$ variqueux et (c) mode $m = 1$ sinueux. D'après Drobniak.	23
Figure I. 14 : a) Schématisation du mécanisme d'expulsion par une couche de mélange. b) Schématisation du mécanisme d'expulsion par jets latéraux (side-jet) résultant des paires de tourbillons longitudinaux (Streamwise vortice) entre deux anneaux de tourbillons (Vortex ring).	24
Figure I. 15 : Visualisation des zones caractéristiques du jet.	25
Figure I. 16 : Différentes instabilités agissant sur un jet.	26
Figure I. 17 : Schéma d'un diffuseur où il y a séparation de la couche limite.	26
Figure III. 1 Schéma descriptif du banc d'essai.	41
Figure III. 2: (a) Schéma descriptif d'une buse lobée à 6 lobes, (b) Géométrie du plan de soufflage (YZ).	42
Figure III. 3: (a) Schéma descriptif d'une buse lobée à 5 lobes, (b) Géométrie du plan de soufflage (YZ).	42
Figure III.4: Profil de vitesse axial d'un jet d'air lobé à 6 lobes.	43
Figure III. 5: Profils de vitesse radiale d'un jet d'air avec 6 lobes.	45
Figure III.6: Profil de vitesse axial d'un jet d'air lobé à 5 lobes.	47
Figure III.7: Profils de vitesse radiale d'un jet d'air avec 5 lobes.	49

Liste des abréviations

UTD	Unités Terminales de Diffusion
UTE	Unités Terminales d'extraction
C_{ij}	Terme convectif
C_p	Chaleur massique a pression constante (J/Kg. °C)
C_{1e},C_{2e},C_μ,C_θ,C₁ et C₂	Constante de turbulence
D_e	Diamètre équivalent
F_r	Nombre de froude
g_i	La composante du vecteur de gravité dans la direction i th (m /s ²)
G_k	Terme de production de l'énergie cinétique
G_x	Poussée axiale (kg.m ² /s ²)
G_θ	Moment angulaire (kg.m ² /s ²)
H	Hauteur de lobe
J_f	Flux massique a travers la masse f
K	Energie cinétique turbulente (m ² /s ²)
L	Longueur de lobe (m)
P	Pression dans une section du jet (P _a)
P_{ij}	Terme de production des contraintes de Reynolds
PP	Plan principal
R_e	Nombre de Reynolds
r/D	Direction radiale adimensionnelle
S	Nombre de Swirl
S_{ij}	Tenseur du taux de déformation
SP	Plan secondaire
S_c,S_d,S_u	Distances entre les faces des cellules (mm)
S_Φ	Terme source
T_a	Température ambiante (°C)
T_i	Température dans différents points du jet (°C)
T_{max}	Température de soufflage (°C)
T_r	Température réduite
U_i	Vitesse dans différents points du jet (m/s)

U_r	Vitesse réduite
U_0	Vitesse moyenne à la sortie de diffuseur (m/s)
X/D	Coordonnée axiale adimensionnelle
x,y,z	Coordonnées cartésiennes (m)

Symboles grecs :

α	L'inverse du nombre de Prandtl effectif
α_k et α_ε	L'inverse du nombre de Prandtl effectif associés à k et ε
α_0 et α_s	Constante de tourbillonnement
β	Le coefficient de dilatation thermique (K^{-1})
δ_{ij}	Delta de Kroneker
Γ_ϕ	Coefficient de diffusion de ϕ
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (m^2/s^3)
ε_{ij}	Tenseur de dissipation
ε_p (m^2/s^3)	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente au point P
Θ_{int}	Angle intérieur des lobes ($^\circ$)
Θ_{ext}	Angle extérieur des lobes ($^\circ$)
κ	Constante de Von Karman
λ	Conductivité thermique du fluide ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
μ	Viscosité dynamique ($kg/m.s$)
ν	Viscosité cinématique (m^2/s)
ν_t	Viscosité cinématique turbulente (m^2/s)
ν	Viscosité cinématique (m^2/s)
ρ	Masse volumique du fluide (kg/m^3)
ρ_e	Masse volumique du fluide environnant (kg/m^3)
ρ_0	Masse volumique du jet (kg/m^3)
ρ_e	Masse volumique du fluide environnant (kg/m^3)
σ_k et σ_ε	Nombres de Prandtl turbulent associés à k et ε respectivement

Étude expérimentale dynamique des jets d'air lobés : Amélioration de
la diffusion d'air dans les locaux a usage d'habitation

Introduction Générale

Introduction Générale

La compréhension des mécanismes fondamentaux qui gouvernent la dynamique des écoulements compressibles est une nécessité pour l'évolution et la promotion des systèmes d'injections, notamment en aéronautique, génie chimique, sidérurgie [1].

Les écoulements de type jet sont fréquemment rencontrés dans différentes applications et notamment dans les secteurs industriels tels que le refroidissement, la climatisation, le séchage, la combustion.... Cependant, on continue à caractériser leurs propriétés empiriquement (transport de masse, de quantité de mouvement, d'énergie thermique...) sans connaître parfaitement les mécanismes responsables de ces propriétés. Des modèles élaborés, sont en conséquence, développés. De plus, une maîtrise de leur comportement dynamique et thermique permettrait une amélioration de leurs caractéristiques [2].

L'étude des jets libres axisymétriques est très importante pour la compréhension de la phénoménologie des écoulements cisailés, tant du point de vue analytique que du point de vue expérimental. En effet dans les processus technologiques, on doit réserver la nature laminaire du jet pour des considérations de contrôle ou induire de la turbulence pour des transports Vigoureux [3].

Dans ce travail, nous présentons une étude expérimentale d'un jet lobé à diffuseur muni de lobes, appliqué au confort dans les locaux à usage d'habitation. L'objectif visé est l'amélioration de l'efficacité de la diffusion de l'air dans la zone d'occupation à moindre coût, par un moyen passif de contrôle de l'écoulement moteur de la ventilation.

Notre mémoire comporte trois chapitres. L'étude bibliographique qui fait l'objet du premier chapitre. Un deuxième chapitre donne les équations mathématiques.

Enfin le troisième chapitre présente les résultats obtenus et leurs interprétations.

Étude expérimentale dynamique des jets d'air lobés : Amélioration de
la diffusion d'air dans les locaux a usage d'habitation

Chapitre I

Etude Bibliographique

Plan du chapitre

I.1 Introduction

I.2 Diffusion d'air

I.2.1 Diffusion d'air par mélange

I.2.2 Diffusion d'air par déplacement

I.3 Choix des unités terminales de diffusion d'air

I.3.1 Bouches de pulsion

I.3.2 Contrôle de mélange des jets asymétriques

I.3.3 Diffuseurs munis de lobes

I.3.4 Débit demandé

I.3.4.a Production acoustique

I.3.5 Vitesse résiduelle en zone d'occupation

I.3.6 Portée

I.3.7 Différence de température dans la zone d'occupation

I.4 Jets axisymétriques

I.4.1 Jets turbulents simples et les jets multiples

I.4.1.a Jet simple

I.4.1.b Nombre de Reynolds

I.4.1.c Rapport des vitesses

I.4.1.d Rapport des flux de quantité de masse et de mouvement

I.4.1.e Flottabilité et le nombre de Froude

I.5 Structures tourbillonnaires

I.5.a Structures primaires

I.5.b Structures secondaires

I.6 Evolution des instabilités de Kelvin Helmholtz

I.6.a Séparation de la couche limite

I.7 Conclusion

I.1 Introduction :

Le jet libre trouve son application dans divers domaines, comme l'aérodynamique des véhicules aériens, marins ou terrestres, les transferts thermiques et massiques dans les moteurs et les propulseurs et notamment les processus de mélange et de séparation en génie des procédés.

L'étude des jets libres axisymétriques est très importante pour la compréhension de la phénoménologie des écoulements cisailés, tant du point de vue analytique que du point de vue expérimental. En effet dans les processus technologiques, on doit réserver la nature laminaire du jet pour des considérations de contrôle ou induire de la turbulence pour des transports vigoureux [1].

Ce chapitre expose donc une étude bibliographique sur les jets lobés et sur les différents paramètres géométriques qui peuvent influencer l'écoulement d'air.

I.2 Diffusion d'air:

La manière, par laquelle l'air introduit dans une enceinte circule et atteint la zone occupée, dépend non seulement de la forme de unités terminales de diffusion, mais aussi de sa situation par rapport aux parois du local, des courants de convection créés par les apports calorifiques internes positifs, et des apports extérieurs positifs ou négatifs selon la saison. On peut distinguer 2 méthodes principales de distribution de l'air, universellement connues sous le nom de ventilation par mélange et ventilation par déplacement. Ces 2 méthodes peuvent coexister et être affectées par le déplacement de l'air provoqué par l'effet thermique [1].

I.2.1 Diffusion d'air par mélange :

La diffusion d'air par mélange est le type le plus couramment employé. Elle peut se réaliser de plusieurs façons ; néanmoins dans tous les cas, L'air est introduit à une vitesse suffisante pour se mélanger avec l'air du local et atteindre la zone occupée. Cette distribution est relativement stable avec des petits débits et peu sensible aux sources de chaleur. On obtient un certain effet de déplacement en situant les unités de soufflage et d'extraction sur des côtés opposés. Avec cette distribution, la concentration de polluants et la température sont uniformes dans l'enceinte [2].

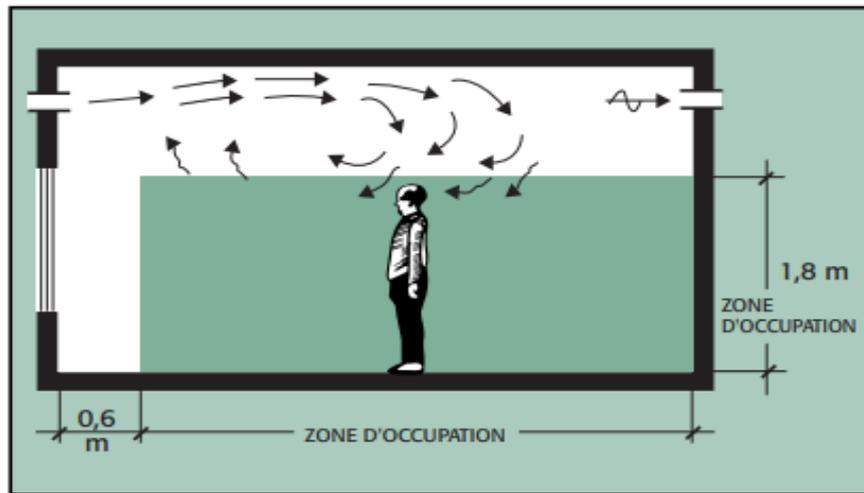


Figure I.1: Diffusion d'air par mélange.

I.2.2 Diffusion d'air par déplacement:

La distribution par déplacement se caractérise par un mouvement de flux d'air quasi unidirectionnel. L'air est introduit en quantité suffisamment importante pour alimenter le courant convectif à basse vitesse (0,2 - 0,6 m/s) et à une température légèrement inférieure à la température ambiante (0 - 6°C).

Au contact des sources chaudes, L'air va se réchauffer et s'élever, de la zone occupée évacuant calories et polluants. Il en résulte un gradient de température dans le sens du mouvement de l'air, et une concentration des polluants à l'extraction [3].

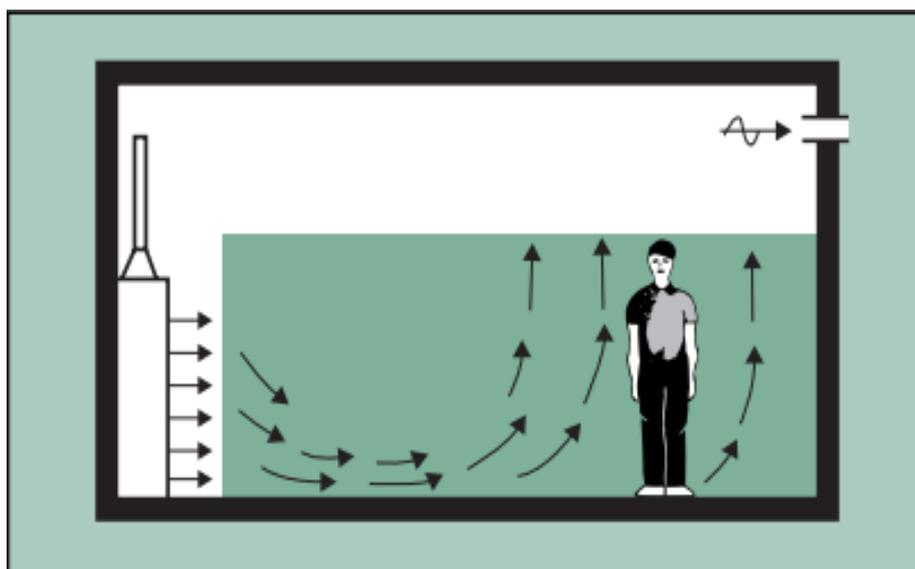


Figure I.2: Diffusion d'air par déplacement.

I.3 Choix des unités terminales de diffusion d'air :

On entend par unités terminales les appareils qui sont destinés à traiter le local par apport d'air (froid, chaud, neutre) ou par surface rayonnante : ce sont les bouches et diffuseurs mais aussi les appareils tels que ventilo-convecteurs, pompes à chaleur réversibles, etc... [4].

On peut résumer la qualité d'une installation de diffusion d'air en 3 phrases :

- On se sent bien (qualité d'air et confort thermique) ;
- On n'entend rien (confort acoustique) ;
- On ne voit rien (intégration architecturale).

Cela se traduit par une série de critères à respecter tant pour diffusion d'air traité (systèmes de climatisation) que pour la diffusion d'air hygiénique.

I.3.1 Bouches de pulsion :

Le choix des bouches de pulsion et de leur position va fortement conditionner le confort dans le local. Il est donc important de ne pas choisir au hasard (comme prendre une bouche de telle taille parce que celle-ci correspond à l'ouverture existante dans le faux plafond...). La diffusion de l'air est complexe. L'idéal est donc de se référer aux spécialistes en la matière (bureau d'études, fabricant,...ect). Alors que la vitesse résiduelle de l'air (vitesse au point 1) augmente lorsque la distance entre deux diffuseurs plafonniers à distribution radiale diminue, c'est parfois l'inverse avec des diffuseurs hélicoïdaux [5].

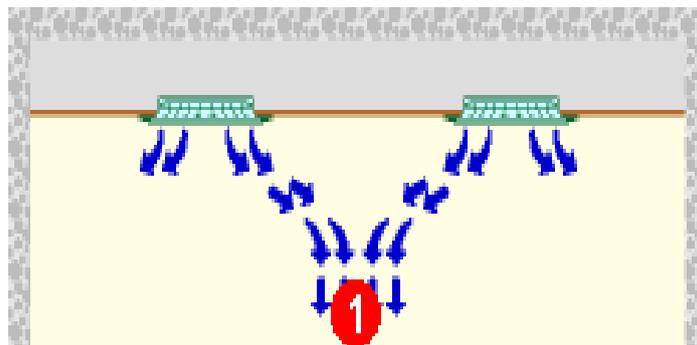


Figure I.3: Unité terminale de diffusion.

Un jet d'air horizontal est dévié vers le haut s'il est chaud et vers le bas s'il est froid. De même, un jet vertical vers le bas est freiné s'il est chaud ...

Ceci montre la difficulté de choisir une bouche qui doit fonctionner aussi bien en chaud qu'en froid : la direction du jet ou la vitesse de l'air doit pouvoir être modifiée en fonction de la saison, vers le bas en hiver, vers le haut en été [6].

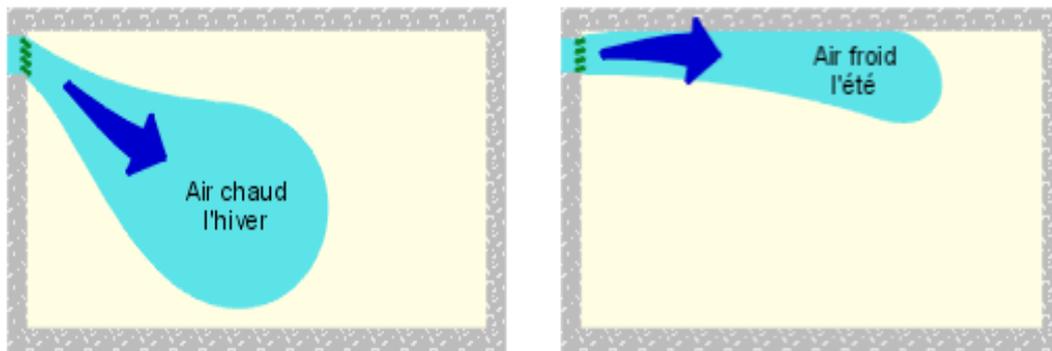


Figure I.4: La variation de la masse colinique.

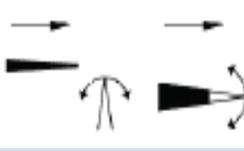
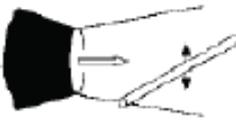
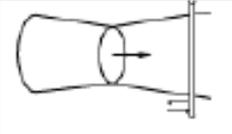
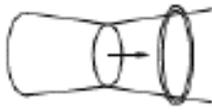
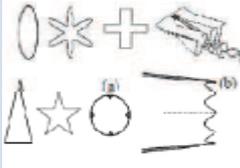
La vitesse de l'air à la sortie des diffuseurs plafonniers, liée à leur taille doit avoir une valeur minimum d'environ 2 m/s. Si ce n'est pas le cas, l'air froid ne profitera pas de l'effet Coanda et chutera verticalement, provoquant un courant d'air.

I.3.2 Contrôle de mélange des jets asymétriques :

Les méthodes de contrôle du mélange des jets sont classées en deux types :

- Méthodes Actives : pour lesquelles on fournit de l'énergie à l'écoulement. Utilisent généralement l'excitation acoustique ou mécanique contrôlée au soufflage, ce qui favorise dans certaines conditions, l'amplification des instabilités et l'apparition de grosses structures tourbillonnaires fortement énergétiques et génératrices de mélange [7].
- Méthodes passives : n'utilisant pas un rapport d'énergie extérieure. Yu et Gutmark ont proposé d'exciter l'instabilité azimutale de Kelvin- Helmholtz grâce à une cavité résonante placée en bordure de la lèvre d'un jet supersonique qui permet pour certaines géométries de doubler le taux d'expansion [7].

Tableau I.1 : Différentes stratégies de contrôle des écoulements.

Contrôle actif	Haut parleur (excitation acoustique)		Zaman et Hussain [31] Zaman [27] Lai [26] Lin et al [30]
	Volets vibrants (excitation mécanique)		Wiltse et al [25] Parekh et al [22] Suzuki et al [28]
	Jets secondaires (excitation mécanique)		Davis [16] Denis [13] Collin [32]
Contrôle Passif	Cavité (mise en résonance)		Yu et al [35]
	Corde (mise en résonance)		Vandsburger et Ding [23]
	Obstacle rigide longitudinal («screech »)		Raman et Rice [11]
	Obstacle rigide annulaire		Spazzini et al [17]
	Buses asymétriques		Zaman [27] Hu et al [35] Nastase et Meslem [15]

I.3.3 Diffuseurs munis de lobes :

Yuan est parmi les premiers qui se sont intéressés à l'effet des buses lobées circulaires des différentes formes et à nombres des lobes variables.

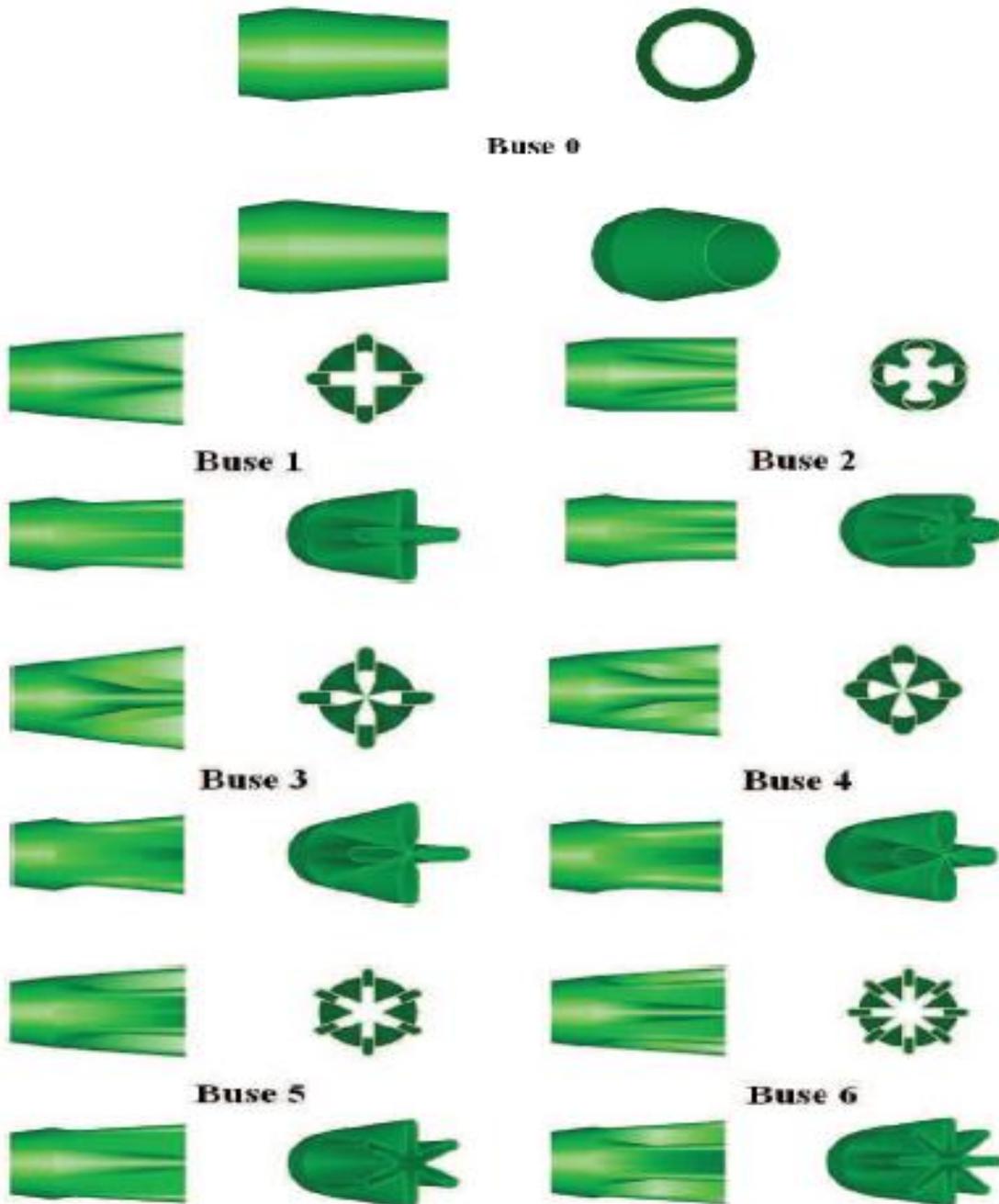


Figure I.5: Buses explorées par Yuan.

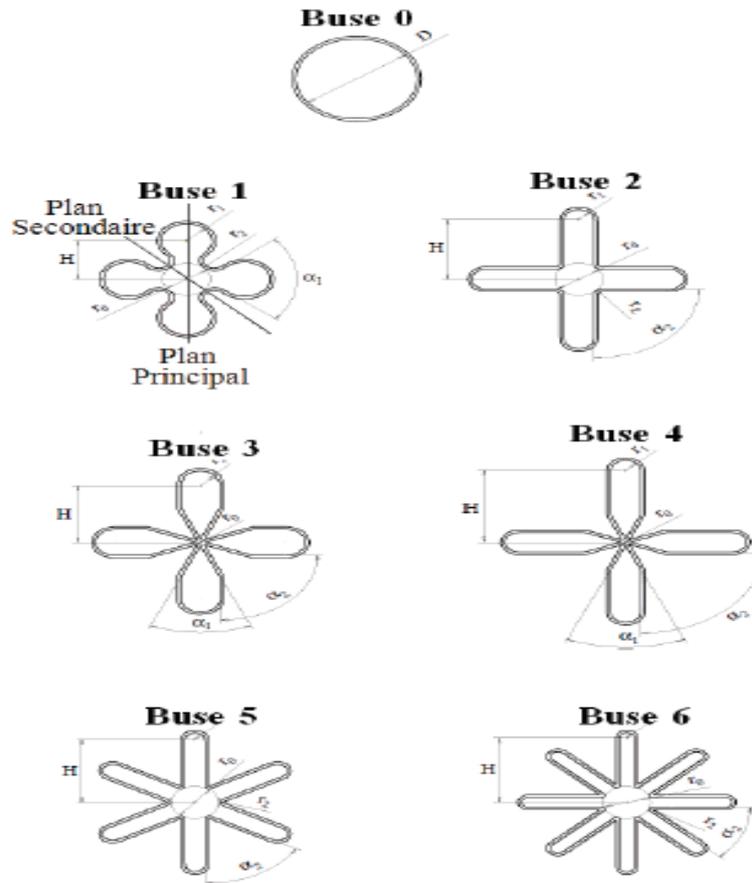


Figure I. 6 : Caractéristiques géométriques des buses explorées par Yuan.

Tableau I. 2 : Caractéristiques des buses explorées par Yuan.

N° Buse	Nb des lobes	Diamètre équivalent D_e (mm)	Hauteur des lobes H(mm)	Rapport H/D_e	r_0 (mm)	r_1 (mm)	r_2 (mm)	$\alpha_1(^{\circ})$	$\alpha_2(^{\circ})$	$\alpha_{ext}(^{\circ})$	$\alpha_{int}(^{\circ})$
Buse0	0	16.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Buse1	4	16.0	7.7	0.48	3.2	3.4	2.0	90	-	3.1	1.7
Buse2	4	16.0	12.0	0.75	3.2	2.0	1.0	-	90	8.3	5.6
Buse3	4	16.0	14.1	0.88	0.7	2.0	0.0	36	90	8.3	8.5
Buse4	4	16.0	11.4	0.71	0.7	2.6	0.0	36	90	12.2	5.6
Buse5	6	16.0	12.6	0.79	3.2	1.3	0.6	-	60	8.3	5.5
Buse6	8	16.0	13.0	0.81	3.2	1.0	0.4	-	45	8.3	5.6

Pour tous les essais réalisés dans la chambre cylindrique de mélange (par Yuan) le rapport des vitesses des deux écoulements parallèles U_{0ext}/U_{0int} est de 0.35 ($U_{0int}/U_{0ext} = 2.86$). Le nombre de Reynolds initial Re_{0int} de l'écoulement central est égale à 20000, soit une vitesse de soufflage de l'ordre de 20 m/s. En plus du confinement et du caractère double flux de

l'écoulement étudié, le nombre de Reynolds initial est trop élevé pour l'application de la diffusion d'air dans les locaux à usage d'habitation [8].

Cette première analyse a permis de mettre en évidence l'importance de la forme des lobes sur le pouvoir de mélange et d'orienter l'étude sur deux autres paramètres géométriques en conservant la forme droite du lobe, trouvée avantageuse. La buse 2 a été donc sélectionnée comme référence pour la caractéristique des écoulements lobés issus des buses 3, 4, 5 et 6.

L'analyse s'est appuyée sur des champs dynamiques obtenus conjointement par anémométrie à fil chaud et par simulation CFD.

Il est montré en particulier, par comparaison des buses 2, 3, et 4, que l'obturation centrale en joignant les lobes au centre de la buse (buse 3 et 4), intensifie le champ dynamique transversal, qui révèle des valeurs importantes du module de la vitesse radiale. L'auteur observe également une circulation plus intense à proximité de la sortie. Toutefois, le champ rotationnel transversal instantané et moyen, est beaucoup moins intense et moins organisé que dans l'écoulement de la buse 2, en particulier aux niveaux des creux des lobes. Ainsi l'obturation centrale crée à la sortie, une dépression importante non favorable à l'apparition des structures tourbillonnaires observées dans les creux de la buse 2. Par ailleurs, l'observation des vitesses dans les plans longitudinaux des buses 3 et 4 met en évidence une décroissance très rapide du champ dynamique.

Quant à l'augmentation de la largeur du lobe (passage de la buse 3 à la buse 4), celle-ci n'a pas d'effet sensible sur le champ dynamique. Concernant l'augmentation du nombre de lobes (passage de la buse 2 aux buses 5 et 6), cela a pour conséquence de diminuer à section constante, la largeur du lobe. Yuan montre que cela produit un blocage de la circulation tourbillonnaire probablement défavorable à l'entraînement [8].

I.3.4 Débit demandé :

En fonction de la pression dont on dispose en amont du diffuseur, on peut estimer le débit fourni par la bouche à partir des abaques des fabricants [2].

I.3.4.a Production acoustique :

Les grilles de distribution génèrent des bruits de sifflement provenant essentiellement de la vitesse d'air au travers de celles-ci. Ce bruit dépend de 4 paramètres :

- Le débit d'air aspiré ou rejeté,

- La section efficace de passage de l'air,
- La géométrie de la buse, et son type,
- La présence éventuelle d'un registre de réglage de débit.

A priori, on choisira la bouche qui présente la puissance acoustique la plus faible pour le débit désiré, sachant cependant que la qualité acoustique de la bouche (annoncée par le constructeur) ne garantit pas le niveau sonore à lui seul. En effet, c'est parfois le bruit du ventilateur et des turbulences liées aux coudes du réseau que l'on entend au travers de la bouche. Un calcul complet de l'acoustique de l'installation doit alors être fait pour s'assurer qu'un silencieux ne doit pas être inséré. Notons également que les grilles peuvent aussi jouer le rôle d'atténuateur du niveau sonore (principalement des basses fréquences) provenant des gaines, lorsqu'elles sont correctement dimensionnées. Il y a réflexion des ondes sur les ailettes [10].

I.3.5 Vitesse résiduelle en zone d'occupation :

La zone d'occupation est souvent représentée par la surface du local dans laquelle on a soustrait une bande de 50 cm le long des murs intérieurs et de 1 m le long des murs extérieurs, ce sur une hauteur de 1,8 m. Cette hauteur peut être plus faible si de toute façon les occupants sont toujours assis (dans un auditoire, ...). Dans cette zone, la vitesse de l'air ne peut dépasser 0,2 m/s (0,28 dans les locaux de passage) et le long des murs, à 1,8 m, elle ne peut dépasser 0,4 m/s. Lorsque le taux de renouvellement d'air nécessaire dans un local est important ou lorsque la hauteur sous plafond est faible ($< 2,5$ m), il n'est plus possible de trouver des diffuseurs plafonniers à distribution radiale dont la vitesse d'air dans la zone d'occupation soit inférieure à 0,2 m/s [2].

La figure I.7 montre l'unique buse lobée considérée par les auteurs et la buse circulaire prise de référence.

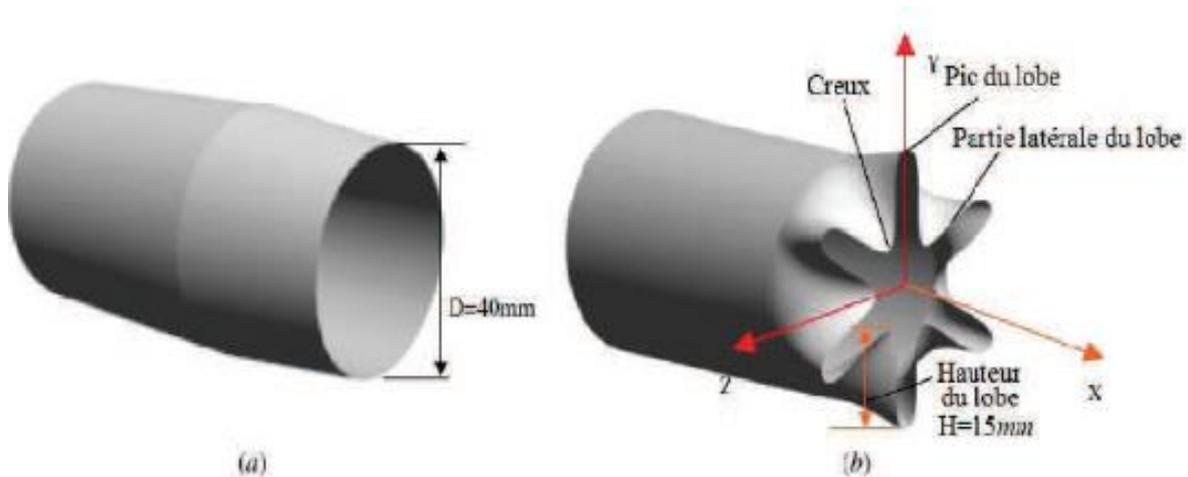


Figure I. 7 : Buse lobée circulaire de référence explorée par Hu et al.

La longueur des lobes l , est égale à 6 mm et la hauteur H , est de 23 mm. Les angles entrant et sortant des lobes sont respectivement $\theta_{\text{int}}=22^\circ$ et $\theta_{\text{ext}}=14^\circ$. Le diamètre équivalent est de $D_e=40$ mm égal au diamètre de la buse circulaire. Les auteurs ne précisent pas si la géométrie considérée est issue d'une étude paramétrique préalable ou si le choix géométrique est arbitraire.

Il est important de signaler que l'aspect manquant pour nos applications dans ces travaux, c'est l'analyse du comportement du jet lobé qui est loin de sa source. En effet, les auteurs ont limité l'investigation de l'écoulement lobé à une distance axiale de l'ordre de trois diamètres équivalents de la buse. Le jet lobé est analysé qualitativement dans un premier temps à l'aide de visualisations réalisées dans un canal d'eau de dimensions $0.6 \times 0.6 \times 1.0$ m. Un traceur fluorescent (rhodamine B) est prémixé à l'eau du jet. A l'aide d'une pompe, le jet d'eau coloré est injecté dans le canal et visualisé à l'aide d'un laser Yag pulsé avec une fréquence de 10 Hz et une énergie de 200 mJ par pulsation. Une caméra CDD est utilisée pour capter les images. Il est noté que pour ces essais, le nombre de Reynolds initial, basé sur le diamètre équivalent de la buse et la vitesse centrale de soufflage, est $Re_{0C}=3000$ ($U_{0C}=1.2$ m/s) [6].

I.3.6 Portée :

La portée est la longueur du jet pour laquelle on obtient une vitesse résiduelle donnée (généralement de l'ordre de 0,2 à 0,25 m/s). Lorsque l'on pulse de l'air froid le long du

plafond au moyen de grilles murales ou de diffuseurs plafonniers, il faut que la portée couvre au moins 80 % de la zone à traiter tout en ne dépassant pas cette dernière [9].

I.3.7 Différence de température dans la zone d'occupation :

Lorsque l'air pulsé rentre dans la zone d'occupation, la différence de température entre le jet d'air pulsé et l'air ambiant ne peut être trop importante, sous peine de ressentir des variations d'ambiance thermique dans le local [7].

Dans la zone d'occupation, la différence de température entre l'air pulsé et l'air ambiant ne peut dépasser :

- 1,5°C avec de l'air pulsé chaud
- 1°C avec de l'air froid

En résumé :

Tableau I. 3 : Grandeurs à respecter dans le choix des unités terminales de diffusion d'air.

Grandeurs à respecter	Où ?	Combien ?
Débit	zone d'occupation	selon les besoins
Puissance acoustique	au niveau la bouche	max : 45 dB(A)
Vitesse de l'air	zone d'occupation (à 1,8 m de haut)	max : 0,2 m/s
	le long des murs (à 1,8 m de haut)	max : 0,4 m/s
Écart de température dans l'air ambiant	zone d'occupation	max : + 1,5°C (chauffage)
	zone d'occupation	max : - 1°C (en refroidissement)

I.4 Jets axisymétriques :

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 périphérie. Fondse et al distinguent quatre régions (figure I.8):

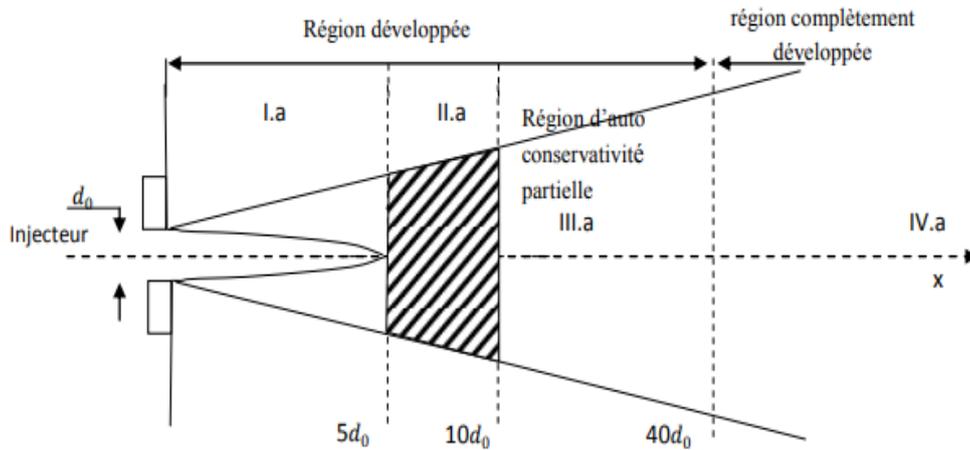


Figure I. 8 : Schéma d'un jet libre turbulent.

La région Ia ($x \leq 5d_0$) comprend une zone de détente très courte, suivie d'un noyau potentiel conique dans le quel la vitesse est égale à V_0 entouré d'une couche annulaire turbulente.

Dans cette partie, le profil de vitesse s'établit à une certaine distance de l'injecteur; La région II.a ($5.d_0 < x < 10 d_0$) est une zone intermédiaire [6].

La région III.a, qui s'étend de $10 d_0$ à $40d_0$ est dite "d'auto- conservativité partielle" : le profil de vitesse moyenne est auto-conservatif alors que l'intensité de turbulence axiale ne l'est pas. Une propriété est dite auto-conservative si sa valeur normée dépend d'une grandeur géométrique unique. Pour un jet hétérogène, un changement de variable prenant en compte l'évolution de la masse volumique du mélange permet de se ramener au cas précédent [6].

Dans la région IVa, au-delà de $40 d_0$, l'écoulement est pleinement établi.

La vitesse et l'intensité de turbulence sont auto-conservatives.

Davies propose des limites différentes pour les régions précédemment définies:

- Ia : $0 < x < 6,2 . d_0$;
- II.a : $6,2 d_0 < x < 8 d_0$;
- III.a : $8 . d_0 < x < 100 . d_0$;
- IV.a : Région terminale où les composantes de vitesse tendent vers 0.

Simpson donne en figure, une description qui complète la précédente :

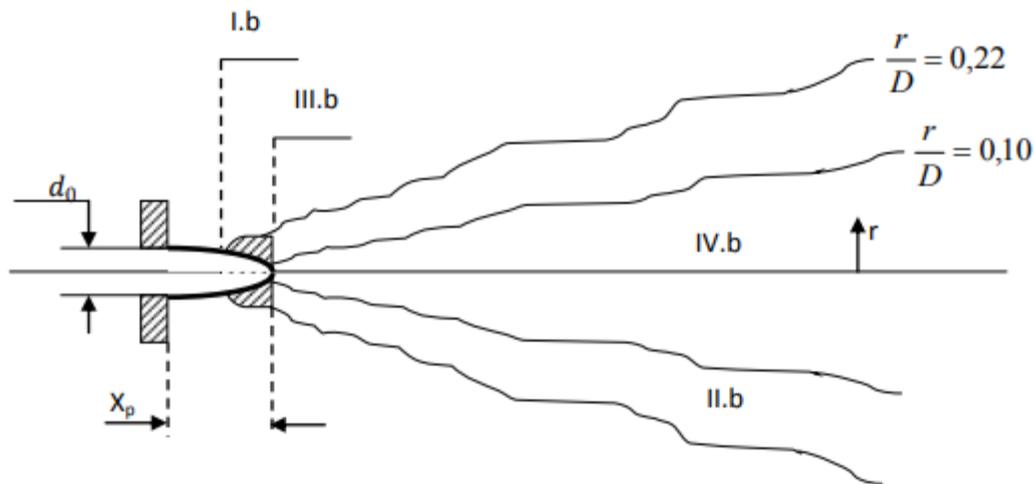


Figure I. 9 : Schéma d'un jet libre turbulent selon Simpson.

Quatre régions peuvent être définies :

- La région I.b est appelée noyau potentiel ;
- La région II.b est une zone d'intermittence où l'écoulement est turbulent ou non turbulent ;
- La région III.b est une zone de mélange du jet et du fluide extérieur. Elle est représentée avec un fort gradient de vitesse et une augmentation d'intensité de turbulence;
- La région IV.b c'est l'écoulement est totalement turbulent, il est différent par rapport à la région II.b [3].

I.4.1 Jets turbulents simples et les jets multiples :

I.4.1.a Jet simple :

La compréhension du mélange entre plusieurs jets tourbillonnaires nécessite d'abord une bonne connaissance du comportement d'un jet unique

Un jet est connu comme étant le mouvement d'un fluide s'échappant soudainement d'un milieu statique. Pour un jet avec absence d'obstacles, on distingue deux cas de conditions aux limites [4]:

- Jet confiné : l'effet de paroi est pris en considération.
- Jet libre : débouchant à l'air libre où l'effet de paroi est négligeable (les parois sont suffisamment éloignées pour ne pas influencer l'écoulement).

Les grandeurs influençant le développement du jet simple [4] :

- Les forces d'inertie.
- Les forces de viscosité.
- Les forces de gravité.

I.4.1.b Nombre de Reynolds :

Ce nombre représente le rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses. Ce nombre adimensionnel est défini à partir de la vitesse de sortie U_0 , de la viscosité cinématique du fluide (ν) et du diamètre de l'injecteur (d_0) [7].

$$Re = \frac{U_0 d_0}{\nu} \quad (I.1)$$

Ce rapport permet de caractériser le type d'écoulement (laminaire ou turbulent). Il faut toutefois noter que la transition entre le régime laminaire et le régime turbulent dépend fortement des propriétés géométriques de l'injecteur [7].

I.4.1.c Rapport des vitesses :

Dans de nombreux cas pratiques, l'injecteur est situé au centre d'un autre écoulement. Les deux configurations les plus utilisées dans ce cas sont le co-courant et le coaxial. Dans le premier cas, les gaz environnants sont injectés à faible vitesse sur une large surface, tandis que dans le deuxième la surface d'injection est faible et la vitesse élevée. Il est courant de définir le rapport des vitesses du fluide environnant U_e et du jet U_0 [9].

$$M = \frac{U_e}{U_0} \quad (I.2)$$

Selon la valeur de ce nombre M , les mécanismes de formation des instabilités sont différents. On peut distinguer trois régimes différents :

- $M < 1$: La région initiale du jet est fortement modifiée par les structures à grandes échelles de formes annulaires qui se forment dans la couche de mélange entre les deux écoulements.

- $M > 1$: La région centrale du jet est également modifiée mais le sens de rotation des tourbillons est inversé par rapport au cas précédent.
- $M = 1$: Les instabilités qui se développent ne sont plus dues à une couche de mélange annulaire mais au sillage des couches de mélange se développant contre les parois du tube.

Dans le cas de milieux en combustion, les instabilités se composent d'une allée périodique de type vortex qui interagissent et forment ensuite de la turbulence [9].

I.4.1.d Rapport des flux de quantité de masse et de mouvement :

Un des inconvénients majeurs du rapport M est son inadéquation dans le cas où les deux écoulements n'ont pas la même masse volumique. Il est alors fréquent d'introduire les rapports RM (flux de masse par unité de surface) et RI (flux de quantité de mouvement par unité de surface) définis ci-dessous où ρ_0 et ρ_e sont les masses volumiques du jet et de l'écoulement environnant :

$$RM = \frac{\rho_0 U_0}{\rho_e U_e} \quad (I.3)$$

$$RI = \frac{\rho_0 U_0^2}{\rho_e U_e^2} \quad (I.4)$$

L'utilisation de l'un ou de l'autre comme paramètre régissant le développement des jets est encore flou puisque certains utilisent le RI comme un descripteur universel de l'écoulement et d'autres le RM [7].

I.4.1.e Flottabilité et le nombre de Froude :

Le nombre de Froude exprime le rapport des forces d'inertie à celles dues à la gravité. Les forces d'inertie se déduisent du flux de quantité de mouvement en sortie du jet et sont données par :

$$J = 2\pi \int_0^{\infty} \rho U(U - U_0) r dr \quad (I.5)$$

Les forces de flottabilités peuvent être calculées à partir de :

$$W = 2\pi g \int_0^{\infty} \rho U (\rho_0 - \rho) U r dr \quad (I.6)$$

Le nombre de Froude en sortie du jet est alors :

$$Fr = \frac{J_0 U_0}{W_0 d_0} = U_0^2 \frac{1}{g d} \frac{\rho_0}{\rho_e - \rho_0} \quad (I.7)$$

Il est possible de classer les jets en trois catégories selon la valeur de ρ_0 et ρ_e . La Figure rappelle le comportement des jets en fonction du nombre de Froude [4].

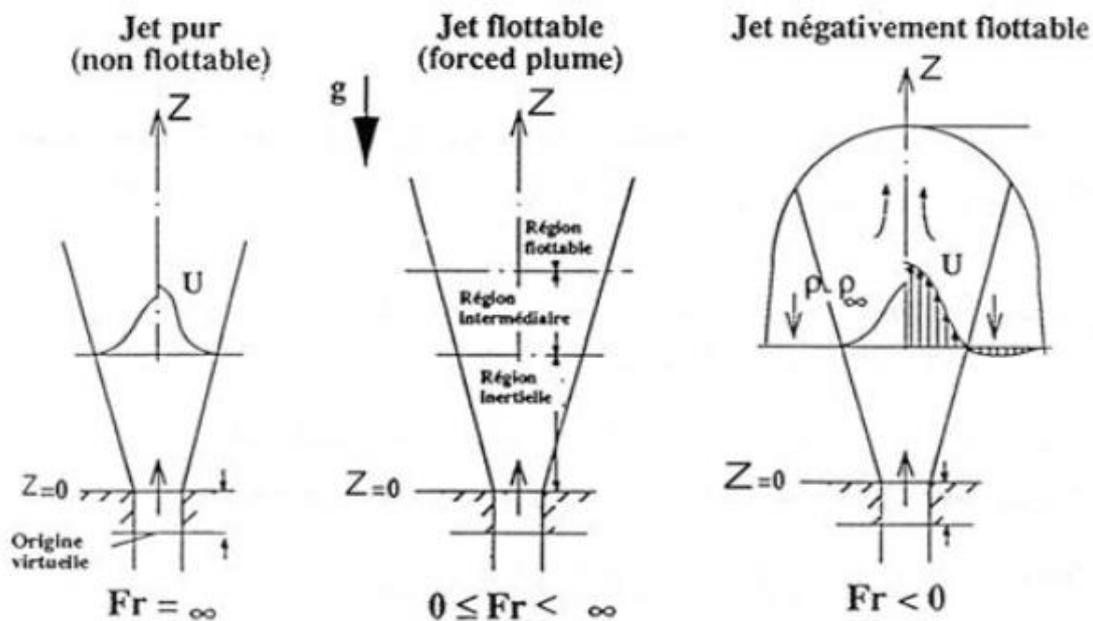


Figure I. 10 : Effet du nombre de Froude sur les jets d'après Schetz.

Selon la valeur du nombre de Froude, on définit trois types de jets :

- Les jets purs: $Fr = \infty$
- Les jets flottables: $0 \leq Fr < \infty$
- Les jets négativement flottables: $Fr < 0$

I.5 Structures tourbillonnaires :

La première mise en évidence expérimentale de l'existence de grosses structures tourbillonnaires quasi-bidimensionnelles, orientées dans la direction de l'envergure, au sein d'une couche de mélange, est due à Brown et Roshko.

Ces structures, appelées tourbillon de Kelvin-Helmholtz, apparaissent pour différents nombres de Reynolds et persistent même loin en aval. A cause de leurs caractéristiques de concentration de vorticité, de formes reconnaissables et imprédictibilités quant à leurs localisations, ces structures tourbillonnaires présentent toutes les caractéristiques pour être identifiées comme de structures cohérentes [5].

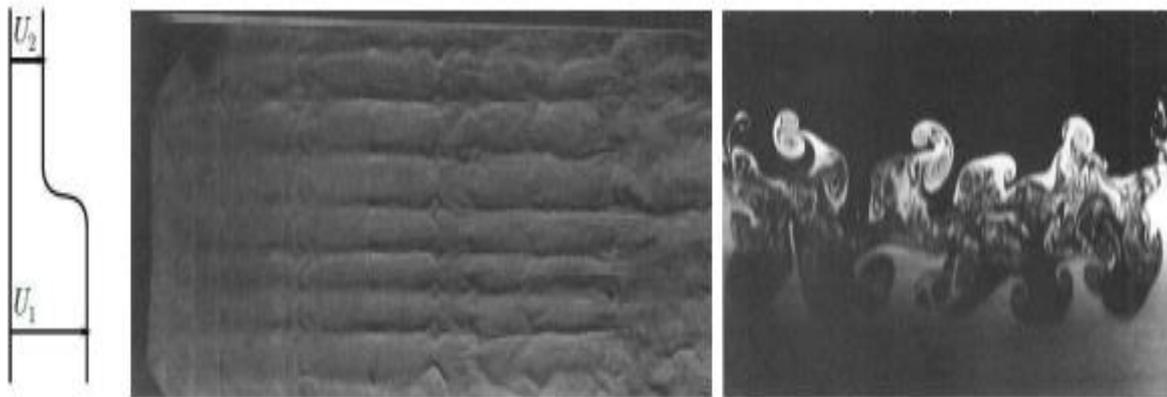


Figure I. 11 : Visualisations des tourbillons longitudinaux. D’après Bernal et Roschko.

L’intérêt de leur détection est évident dans le sens où elles influent sur les propriétés physiques de l’écoulement, notamment en aéronautique. Les structures cohérentes affectent directement l’aérodynamique interne et externe des engins spatiaux. On cite en particulier, le mélange, le bruit, les vibrations, le transfert thermique, la traînée, la portance... De plus, la connaissance et la compréhension de leur dynamique, de leur morphologie et de la manière dont elles interagissent avec l’écoulement environnant est un point essentiel pour contrôler et promouvoir l’efficacité des systèmes [5].

Deux principaux types d’organisation existent :

- Une structuration dite primaire, correspondant à des tourbillons anneaux non loin du bord de fuite de la buse.
- Une structuration secondaire, constituée de tourbillons contrarotatifs d’axes longitudinaux [2].

Ces deux types d’organisation sont schématisés sur la figure suivante.

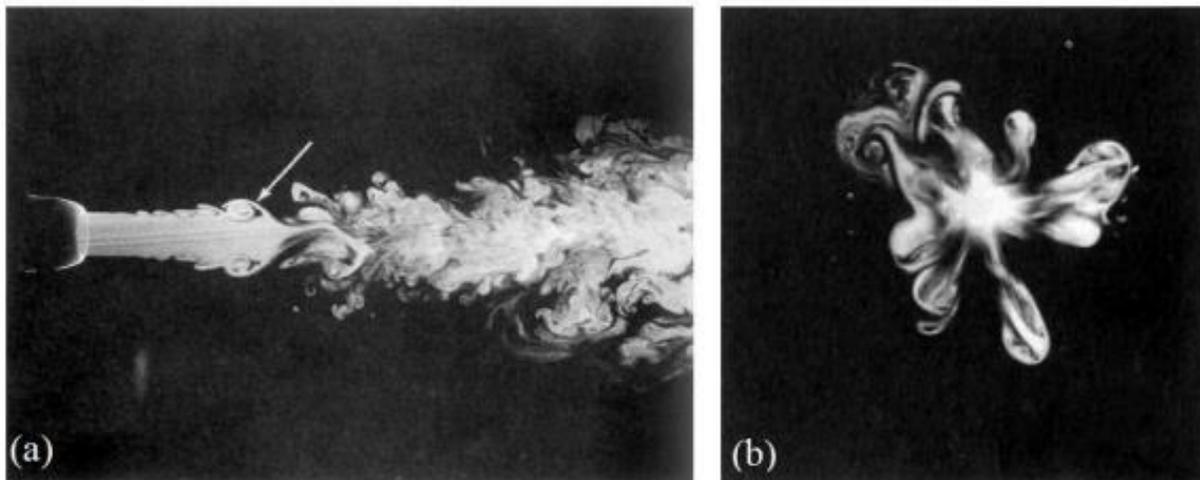


Figure I. 12 : Visualisations des structures tourbillonnaires dans un jet rond à nombre de Reynolds $ReD = 5500$:a) structures primaires et b) structures secondaires. D'après Liepmann et Gharib.

I .5.a Structures primaires :

Les structures primaires sont issues d'une instabilité appelée instabilité de Kelvin-Helmholtz qui se créent lorsqu'il existe dans le champ d'écoulement un cisaillement entre des couches fluides. L'exemple le plus simple est celui d'un écoulement dans lequel la vitesse est toujours parallèle à une direction, avec variation progressive dans la direction perpendiculaire ; le cas d'une marche ou un écoulement parallèle à un fluide au repos est aussi valable. Il est facile de voir qualitativement pourquoi l'instabilité se développe, si l'on se place dans un système d'axes tels que les vitesses sont égales et de signe opposé de part et d'autre de la ligne de discontinuité. La région de la couche cisailée initiale d'un jet rond est très similaire à une couche de mélange et par conséquent les instabilités sont analogues. L'instabilité de Kelvin-Helmholtz causée par la différence de vitesses de part et d'autre de la couche cisailée, résulte d'une instabilité non-visqueuse et qui est liée à la présence d'un point d'inflexion sur le profil de vitesse. Le mécanisme de développement de celles-ci se résume comme suit [5] :

- Une petite oscillation sur la ligne de courant séparatrice réduit l'espace entre deux lignes de courant d'un côté de la séparation et l'augmente de l'autre.
- Par continuité, cette diminution d'espace s'accompagne d'une accélération de l'écoulement. Il y a donc une diminution de pression dans cette région qui trouble les lignes de courant augmentant ainsi l'oscillation initiale. Le mécanisme opposé se produit dans la région où les lignes de courant sont plus espacées.

• Finalement, les instabilités initiales s'enroulent formant une suite de tourbillons primaires de Kelvin Helmholtz.

La forme géométrique circulaire de la buse de sortie engendre des tourbillons axisymétriques sous forme d'anneaux. La distance fondamentale séparant deux anneaux de tourbillons consécutifs est définie par la longueur d'onde de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz. D'anciennes études théoriques basées sur l'analyse de stabilité linéaire [1] ont permis de dégager les caractéristiques de ces anneaux. Cette théorie consiste à linéariser les équations de Navier-Stokes et étudier l'évolution d'une perturbation que l'on superpose à un profil de vitesse donné. Elle n'est valable qu'au début de la transition mais a l'avantage d'identifier précisément le rôle joué par les paramètres de l'écoulement. Une fois formés, deux anneaux primaires de Kelevin-Helmholtz consécutifs s'enroulent autour l'un de l'autre par induction mutuelle similairement aux couches de mélanges planes [5].

Un tel mécanisme de cascade tourbillonnaire peut conduire à un appariement conduisant à un anneau plus grand. L'organisation spatiale est ainsi modifiée tout au long du cône de potentiel : La taille et la distance séparant les seconds anneaux doublent de longueur d'onde.

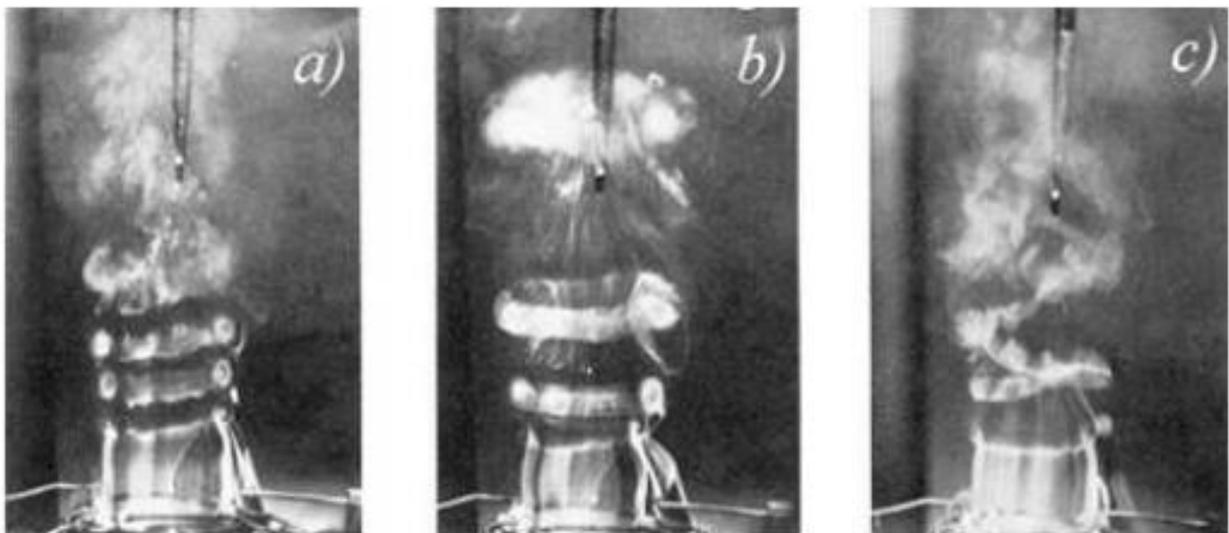


Figure I. 13 : Modes instables observés dans un jet rond : (a) mode $m=1$. (b) mode $m=0$ variqueux et (c) mode $m=1$ sinueux. D'après Drobniak.

I.5.b Structures secondaires :

Comme a été mentionné ci-dessus, la formation d'anneaux de tourbillons qui s'apparient ou non pour former de plus gros anneaux est la structure principale résultant de l'amplification des instabilités primaires du jet. L'étude théorique par l'analyse de stabilité linéaire des

caractéristiques de ces anneaux tourbillonnaires a fait l'objet de beaucoup de recherches à l'échelle internationale ; on peut citer notamment Batchelor et Gill. Il a été montré qu'après la fin du cône de potentiel, les anneaux de tourbillons axisymétriques ($m = 0$) ou hélicoïdaux ($m = 1$), commencent à subir une instabilité azimutale en n vague 3 dans la zone proche de la transition 4. L'étape suivante du mécanisme interactionnel entre tourbillons engendre la formation de plusieurs paires de tourbillons longitudinaux qui relie l'extérieur de l'anneau amont avec celui de l'intérieur aval donnant ainsi le signal de la transition vers la turbulence développée. Ces tourbillons longitudinaux résultent de l'étirement des tourbillons primaires dû à une petite portion de vorticité existant dans la région stagnante entre deux anneaux consécutifs (appelée aussi tresse ou braid dans la littérature anglo-saxonne), qui s'intensifient sous l'action du champ d'étirement et se concentrent en paires de tourbillons contra-rotatifs. Ce mécanisme est analogue à celui étudié par Corcos et Lin, Rogers et Moser dans les couches de mélange planes [10].

Une caractéristique de celui-ci est la production de petits jets latéraux intense schématisés sur la figure suivante. La flèche blanche indique le sens de l'écoulement. D'après Brancher et al [5].

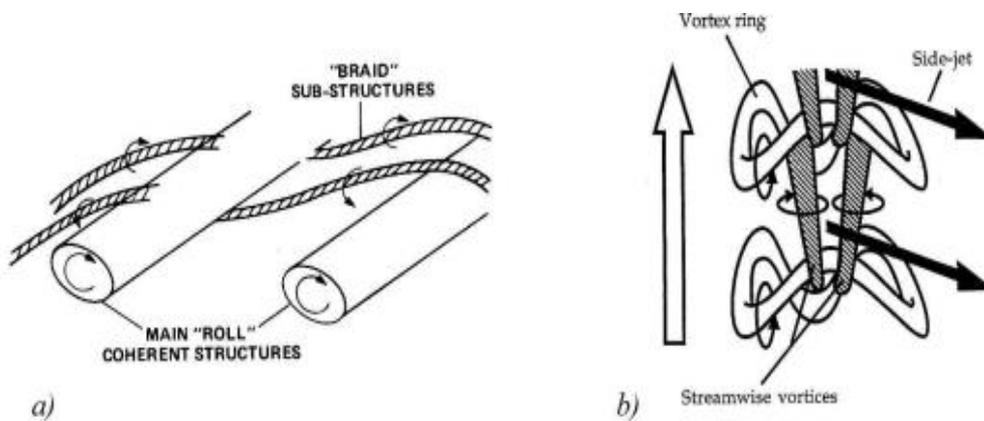


Figure I. 14 : a) Schématisation du mécanisme d'expulsion par une couche de mélange. b) Schématisation du mécanisme d'expulsion par jets latéraux (side-jet) résultant des paires de tourbillons longitudinaux (Streamwise vortice) entre deux anneaux de tourbillons (Vortex ring).

I.6 Evolution des instabilités de kelvin Helmholtz :

Ces instabilités apparaissent pour des nombres de Reynolds supérieurs à 300, les effets non visqueux prédominent sur les effets visqueux. L'instabilité primaire de Kelvin– Helmholtz apparaît lorsqu'il y a un cisaillement entre deux couches de fluide de même viscosité mais de vitesses différentes. Ce phénomène est visible en frontière du jet à la sortie de la buse. Les

tourbillons formés entraînent le fluide ambiant à l'intérieur du jet, il y a alors un rétrécissement du jet.

Des anneaux tourbillonnaires apparaissent dans la zone de mélange. Au cours de leur évolution le long de l'axe du jet, ils ont tendance à se regrouper et à se reformer en augmentant leurs diamètres. Ces tourbillons observés dans le sillage conduisent alors à un élargissement du jet.

L'acquisition des images à une fréquence de 220 Hz a permis de suivre l'évolution temporelle des instabilités de Kelvin-Helmholtz symétriques.

Une séquence d'images successives acquises pour un nombre de Reynolds $Re = 1700$ est présentée sur la figure ci-dessous [2] :

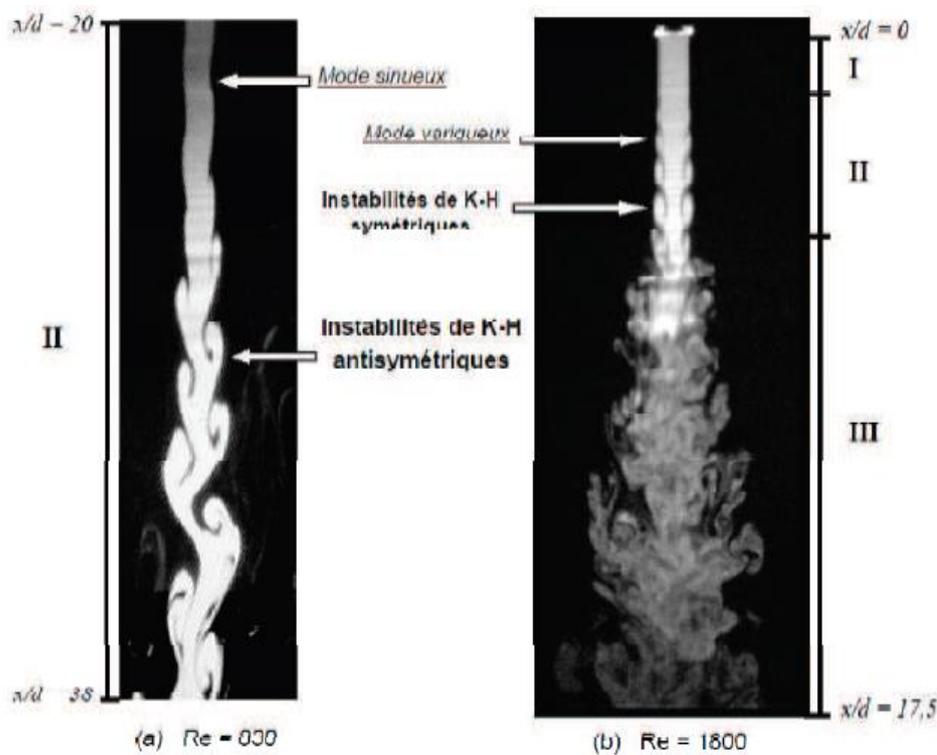


Figure I. 15 : Visualisation des zones caractéristiques du jet.

Lorsqu'un jet débouche dans une atmosphère en mouvement ou non, des interactions entre les deux fluides vont apparaître et engendrer la création de structures cohérentes comme le montre la figure suivante :

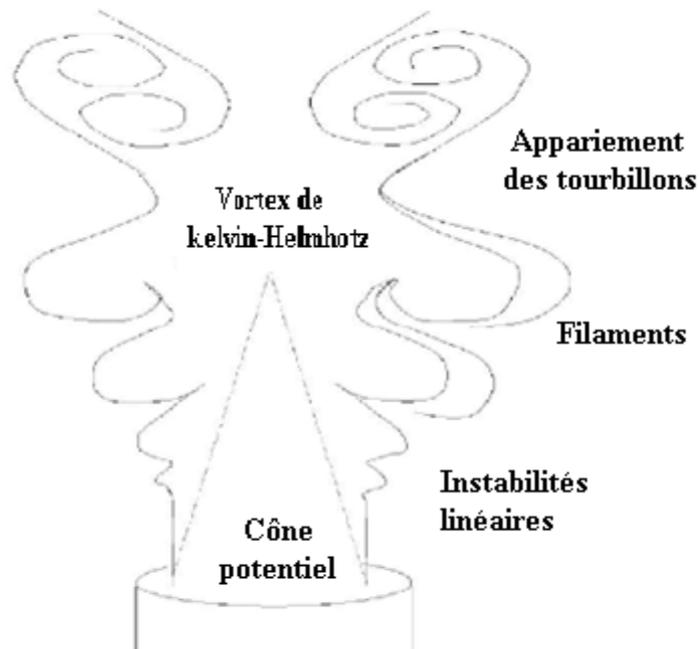


Figure I. 16 : Différentes instabilités agissant sur un jet.

I.6.a Séparation de la couche limite :

La séparation de la couche limite est un phénomène qui affecte de façon fondamentale la performance des diffuseurs. En effet, un décollement de la couche limite a pour effet de créer des zones de recirculation dans le fluide, diminuant ainsi l'aire de passage effective. Il en résulte que le fluide traversant le diffuseur n'est pas beaucoup ralenti. Par conséquent, il conserve une bonne partie de son énergie cinétique. La baisse de pression en amont est alors limitée : le diffuseur ne joue pas efficacement son rôle. Cette situation est illustrée dans la figure ci-dessous :

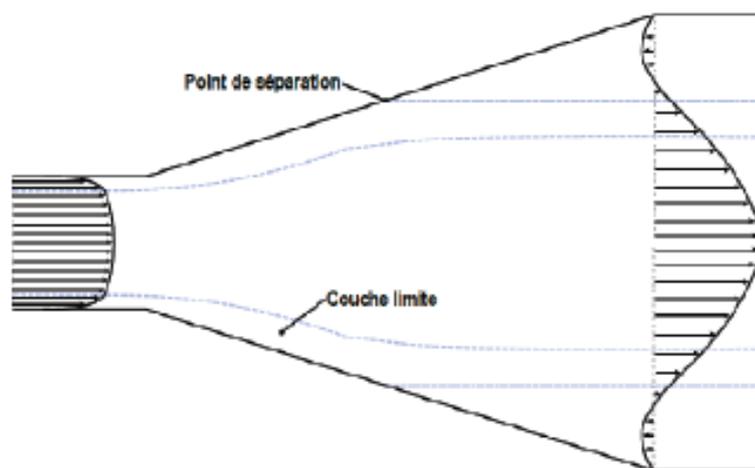


Figure I. 17 : Schéma d'un diffuseur où il y a séparation de la couche limite.

Ce phénomène est complexe, particulièrement lorsque des écoulements tridimensionnels sont considérés. Certaines caractéristiques fondamentales d'un écoulement de couche limite peuvent toutefois être exposées en 2-D.

La couche limite est définie comme la région dans laquelle la variation normale de vitesse est suffisamment rapide pour que la force de cisaillement visqueuse à laquelle elle donne lieu soit de l'ordre de grandeur de la force d'inertie. Toutefois, il convient de noter que cette définition s'applique particulièrement bien en aérodynamique externe, où l'écoulement loin de la paroi est potentiel. Ce n'est pas le cas pour l'écoulement dans un diffuseur de turbine hydraulique. En effet, dans l'aspirateur, on retrouve des zones où la force de cisaillement visqueuse est importante au cœur de l'écoulement. À la paroi, la condition de non-glissement contraint le fluide à être immobile. Il en résulte un déficit de quantité de mouvement près de la paroi. Dans cette zone, l'écoulement devient alors très sensible aux forces en présence [7].

La diffusion visqueuse aura pour effet d'enlever de la quantité de mouvement à l'écoulement extérieur afin d'alimenter la zone près de la paroi. De même, mais généralement de façon beaucoup plus importante, les fluctuations turbulentes transporteront aussi de la quantité de mouvement vers la paroi. C'est pourquoi une couche limite où les mouvements turbulents sont intenses a une plus grande résistance au décollement qu'une couche limite laminaire ou qu'une couche limite où la turbulence est faible [8].

I. 7 Conclusion :

Cette étude bibliographique a permis de mieux comprendre la structure et les caractéristiques des jets lobés. La nature du système de soufflage générant le tourbillonnement, l'inclinaison et le nombre des lobes et des creux, la température de l'air soufflé sont autant des paramètres qui influencent la forme du jet, les profils de vitesse, de température et d'intensité de turbulence.

Étude expérimentale dynamique des jets d'air lobés : Amélioration de la diffusion d'air dans les locaux a usage d'habitation

Chapitre II

Modèle physique et formulation mathématique

Plan du chapitre

II.1 Introduction

II.2 Grandeurs influençant le développement du jet simple

II.3 Caractéristiques des jets

II.4 Tourbillonnement (Swirl)

II.4.1 Nombre de tourbillonnement

II.5 Equations du modèle mathématique

II.6 Equations gouvernantes dimensionnelles

II.6.1 Equation de continuité

II.6.1.1 Equations de quantité de mouvement (ou équations de Navier- Stokes)

II.6.1.2 Equation de l'énergie

II.6.2 Equations gouvernantes adimensionnelles

II.6.2.1 Equation de continuité

II.6.2.2 Equations de quantité de mouvement

II.6.2.3 Equation de l'énergie

II.6.3 Equations et contraintes de Reynolds

II.7 Conclusion

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons le problème physique sous forme d'équations mathématiques. La formulation mathématique, sous sa forme des équations gouvernantes adimensionnelles et dimensionnelles sont basées sur l'équation de continuité, l'équation d'énergie et les équations de mouvement qui sont décrites par les équations de Navier et Stocks.

II.2 Grandeurs influençant le développement du jet simple :

L'étude des jets simples est en général abordée par le biais des valeurs qui se conservent tout au long du développement du jet. Celui-ci résulte de l'interaction entre trois forces qui sont rappelées dans les équations suivantes [36] :

$$\text{Les forces d'inertie : } \frac{\rho_0 \cdot v_0^2}{d_0} \quad (\text{II. 1})$$

$$\text{Les forces de viscosité : } \frac{\mu \cdot U_0}{d_0^2} \quad (\text{II. 2})$$

$$\text{Les forces de gravité : } |\rho_0 - \rho_e| \cdot g \quad (\text{II.3})$$

Où : ρ_0 et ρ_e sont les masses volumiques du jet et de fluide environnant.

A partir de ces différentes forces, il est possible d'obtenir des grandeurs adimensionnelles caractérisant des jets simples. Parmi ces paramètres nous pouvons citer :

- **Nombre de Reynolds :**

Le nombre de Reynolds représente le rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses. Ce nombre adimensionnel est défini à partir de la vitesse de sortie U_0 , de la viscosité cinématique du fluide (ν) et du diamètre de diffuseur (d_0) [37].

Le régime d'écoulement d'un fluide peut être laminaire ou turbulent. Le passage d'un régime à un autre est caractérisé par le nombre de Reynolds [38].

$$Re = \frac{U_0 \cdot d_0}{\nu} \quad (\text{II.4})$$

II.3 Caractéristiques des jets :

Le nombre de Reynolds permet de caractériser le type d'écoulement (laminaire ou turbulent). Il faut toutefois noter que la transition entre le régime laminaire et le régime turbulent dépend fortement des propriétés géométriques de l'injecteur.

Les jets sont caractérisés par :

- L'épaisseur de la buse (épaisseur pour un jet plan et diamètre pour un jet circulaire).
- Le profil de vitesse du jet à la sortie de la buse. Il sera uniforme, si on utilise un convergent correctement profilé. Dans le cas contraire, le développement d'une couche limite sur la paroi interne de la buse engendrera un profil de vitesse parabolique.
- Le régime d'écoulement ; On a trois différents régimes d'écoulement :
 - **Écoulement laminaire [Re < 1800]** : Dans ce type d'écoulement, les lignes de courants sont parallèles entre elles, les forces d'inertie sont faibles devant les forces de viscosités, l'écoulement peut être laminaire stable (pour de très faibles nombre de Reynolds Re < 300), ou instable comme nous le verrons plus loin.
 - **Écoulement transitoire [2000 < Re < 2300]** : On ne peut pas déterminer l'état de l'écoulement, les forces d'inertie et les forces de viscosité sont du même ordre.
 - **Écoulement turbulent [Re > 2300]** : Les forces d'inertie deviennent importantes devant les forces de viscosité et la turbulence se développe dans l'écoulement.

II.4 Tourbillonnement (Swirl) :

II.4.1 Nombre de tourbillonnement :

Le jet tourbillonnaire considéré est différent du jet classique en raison de l'existence d'une composante de vitesse tangentielle. Pour réaliser ce type de flux, on peut soit utiliser la roue de ventilateur axial pour générer un écoulement tourbillonnaire turbulent ou utiliser les systèmes mécaniques tourbillonnants [39].

L'application d'une composante de vitesse tangentielle à l'écoulement (W) fournit une rotation au fluide d'écoulement, qui est indiqué par un nombre de swirl (S). Ce nombre est défini comme le rapport du flux de quantité de mouvement tangentielle au produit du flux de quantité de mouvement axial et un rayon caractéristique [40].

L'expression exacte du nombre de Swirl dépend de la géométrie du diffuseur et des profils d'écoulement. D'après Gupta et al [40], et pour un type unique de l'élément diffuseur avec un dispositif à ailette, le nombre de Swirl peut être défini comme suit:

$$G_{\phi} = \int_{R_h}^{R_n} UW r^2 dr \quad (\text{II.5})$$

$$G_x = \int_{R_h}^{R_n} R_n U^2 r dr \quad (\text{II.6})$$

$$S = \frac{G_{\phi}}{R_n G_x} \quad (\text{II.7})$$

Donc :

$$S = \frac{\int_{R_h}^{R_n} UW r^2 dr}{\int_{R_h}^{R_n} R_n U^2 r dr} \quad (\text{II.8})$$

Où r est la position radiale, W la vitesse tangentielle, G_{ϕ} le flux de quantité de mouvement tangentielle, G_x le flux de quantité de mouvement axial et R un rayon caractéristique. R_n et R_h sont le rayon du conduit cylindrique et celui du

support d'ailettes (moyeu), respectivement. Il est important de noter ici que si les vitesses axiale et tangentielle sont supposées uniformes et les ailettes sont très minces, le nombre de swirl peut être écrit comme [46] :

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - \left(\frac{R_h}{R_n}\right)^3}{1 - \left(\frac{R_h}{R_n}\right)^2} \right] \operatorname{tg}(\alpha) \quad (\text{II.9})$$

Dans la majorité des cas : $S \geq 0.6$ et dessous de cette valeur le Swirl n'est pas intéressant.

D'après Amal [41] plus le nombre de Swirl (S) augment, plus les composantes de la vitesse.

Et W tendent vers 0 la vitesse tangentielle W diminuent rapidement que la vitesse axiale U.

La mesure de l'intensité du nombre de Swirl a des différentes ouvertures des angles d'ailettes placées à l'origine de soulage d'un jet tourbillonnant, il note que pour des angles de 30° , 45° , 60° et 65° correspondent respectivement les nombres de Swirl 0.22, 0.36, 0.61 et 0.68 et signale que seulement les deux derniers nombres provoquent le phénomène de recirculation contrairement aux autres nombres [42].

➤ **Phénomène de recirculation:**

La torsion d'un jet génère un vortex qui s'ouvre dans une atmosphère immobile. Une région appelée région de recirculation, qui est mise en évidence par la formation de bulles ovales Des deux côtés de l'axe longitudinal de l'avion. En raison de la symétrie de la révolution, les bulles y sont de même taille et pression Il reste bien en dessous de la pression atmosphérique [42].

Zone de recirculation de mise au point, cela dépend de l'accélération du vortex. En fait, plus le vortex est fort, plus la surface est grande et le recyclage devient important [42].

II.5 Equations du modèle mathématique:

La formulation mathématique des phénomènes de la convection est basée sur des équations qui relient les différents paramètres: pression, température et vitesse [43].

Ces équations qui gouvernent l'écoulement d'un fluide sont établies à partir des principes d'équilibre et de conservation. Les trois principes fondamentaux sont [44] :

- Principe de conservation de la masse (équation de continuité).
- Principe de conservation de l'énergie (équation de Navier-Stokes).
- Principe d'équilibre entre la variation de la quantité du mouvement et les forces

Agissantes sur une particule (équation d'énergie).

II.6 Equations gouvernantes dimensionnelles :

Ce présent traite les équations mathématiques sur lesquelles est basé ce travail.

La formulation mathématique de l'état d'air d'un jet tourbillonnaire en régime stationnaire simple, repose sur les équations liant les différents paramètres de l'écoulement. Pour pouvoir expliciter clairement chaque terme, on exprimera les équations décrivant les principes de conservation de la masse, de quantité de mouvement et de l'énergie. Donc l'expression mathématique des équations gouvernantes régissant le phénomène de jet tourbillonnaire, s'écrit, sous forme dimensionnelle, comme suit [41] :

II.6.1 Equation de continuité :

Elle déduite du principe de conservation de masse pour un volume de contrôle matériel. Puisque l'air est considéré comme étant un fluide incompressible.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot U) = 0 \quad (\text{II.10})$$

Où :

U : Le vecteur de vitesse.

Qui, après simplification devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.11})$$

II.6.1.1 Equations de quantité de mouvement (ou équations de Navier- Stokes) :

D'après la deuxième loi fondamentale de la dynamique, le taux temporaire de changement de quantité de mouvement d'une particule fluide est égal à la somme des forces extérieures sur cette particule [8]. Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide et son mouvement et les causes qui le produisent [44].

$$\rho \frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[U \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{U_i U_j} \right] \quad (\text{II.12})$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g \beta (T - T_c) \quad (\text{II.13})$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + u \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.14})$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + u \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.15})$$

II.6.1.2 Equation de l'énergie :

L'équation de conservation d'énergie est comme suivie [44]:

$$\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p U_i T \right] \quad (\text{II.16})$$

$$\frac{D}{Dt} (\rho c_p T) = \Delta(\lambda T) + q + \beta T \frac{DP}{Dt} u \Phi \quad (\text{II.17})$$

Avec

$\frac{D}{Dt} (\rho c_p T)$: La variation totale d'énergie.

$\Delta(\lambda T)$: La variation d'énergie par conduction.

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

Qui après simplification devient :

$$\rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.18})$$

II.6.2 Equations gouvernantes adimensionnelles :

La forme adimensionnelle des équations gouvernantes est utilisée dans le but de généraliser les résultats obtenus, elle permet aussi d'avoir une meilleure interprétation des résultats en faisant apparaître certains groupements adimensionnels, qui seront des paramètres de contrôle de problème étudié. Il y a lieu de préciser que la résolution numérique des équations gouvernantes précédentes est réalisée moyennant le logiciel Fluent qui traite les équations sous leur forme dimensionnelle. Donc cette mise sous forme adimensionnelle va permettre une meilleure discussion des résultats et une meilleure compréhension des données de calculs à travers les valeurs des nombres et groupements adimensionnels, qui sont plus parlantes que les valeurs des grandeurs elles même. Afin de ramener les équations précédentes à une forme adimensionnelle [42], au lieu d'utiliser les coordonnées (x, y, z) et les composantes (u, v, w) de la vitesse et de la pression (p) [44], il est nécessaire de définir les changements de variable suivants [45]:

$$Y = \frac{y}{H}, X = \frac{x}{L}, U = \frac{u}{\frac{vH}{L^2}}, V = \frac{v}{\frac{v}{L}}, \theta = \frac{T-T_c}{T_h-T_c}, P = \frac{P}{\rho_0 \left(\frac{v}{L}\right)^2} \quad (\text{II.20})$$

II.6.2.1 Equation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.21})$$

II.6.2.2 Equations de quantité de mouvement :

Selon X:

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Ar^2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (\text{II.22})$$

Selon Y :

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{Ar^2} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{Gr}{Ar} \theta + \frac{1}{Ar^2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (\text{II.23})$$

II.6.2.3 Equation de l'énergie :

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{Pr} \left[\frac{1}{Ar^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] \quad (\text{II.24})$$

II.6.3 Equations et contraintes de Reynolds :

Pour résoudre ce système, une approche statique est utilisée. Comme les grandeurs u_i et p sont des variables aléatoires, il faudrait résoudre le système des équations (II- 15et II- 16) à tout instant. C'est ce qu'on fait effectivement dans les simulations directes de la turbulence. On est donc en train de travailler sur des équations moyennées. Les règles de Reynolds suivantes s'appliquent à l'opérateur moyen. Étant donné les fonctions f et g :

$$f = \bar{f} + f' \quad (\text{II.25})$$

\bar{f} : La partie moyenne (d'ensemble).

f' : La partie fluctuante.

$$g = \bar{g} + g' \quad (\text{II.26})$$

\bar{g} : La partie moyenne (d'ensemble).

g' : La partie fluctuante.

L'équation de continuité donne en prenant la moyenne, et puis par différence :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{Equation du champ moyen}) \quad (\text{II.27})$$

L'écoulement moyen et la turbulence sont tous les deux séparément incompressibles.

La Moyenne de l'équation de Navier-Stokes (II-13) s'écrit :

$$\bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \overline{U_i U_j} \right) \quad (\text{II.28})$$

$\overline{U_i U_j}$: Terme de Reynolds.

- **Problème de la fermeture :**

Comme on vient de le voir, la décomposition de Reynolds a permis d'écrire un certain nombre d'équations pour les inconnues du problème. Cependant, on introduit à chaque étape des inconnues supplémentaires. Il s'agit alors de fermer le problème en introduisant des modèles pour les inconnues supplémentaires [46].

La différence entre les équations de Navier-Stokes et celles de Reynolds est en fait essentielle, parce que les contraintes $-\overline{U_i U_j}$ sont des inconnues supplémentaires et que l'on ne dispose a priori que du même nombre d'équations [42].

Dans un problème laminaire, on a 4 fonctions inconnues : U_1, U_2, U_3, P et quatre équations: L'équation de continuité et les trois équations de Navier-Stokes. Pour un problème turbulent, on dispose du même nombre d'équations, les équations de Reynolds remplaçant celles de Navier-Stokes, mais en plus des fonctions inconnues de l'écoulement moyen U_1, U_2, U_3 et P , on a les 6 fonctions inconnues du tenseur de Reynolds $-\overline{U_i U_j}$. Donc dans le cas général, on a 10 fonctions inconnues, mais seulement 4 équations. On dit que le système n'est pas fermé. Pour pouvoir résoudre ce système, il faut trouver des équations supplémentaires en nombre suffisant, c'est le problème dit de la fermeture du système [44].

II.7 Conclusion :

A la fin de ce chapitre, nous aboutissons au modèle mathématique. Ce dernier est alors constitué d'un système d'équations complété par des conditions aux limites. Les équations de bilan sont donc connues mais :

- La résolution analytique de ces équations de bilan n'est pratiquement jamais réalisable.
- Les non-linéarités visibles dans les équations sont principalement à l'origine des difficultés pour obtenir une solution analytique.

Étude expérimentale dynamique des jets d'air lobés : Amélioration de
la diffusion d'air dans les locaux a usage d'habitation

Chapitre III

Résultats et Discussion

Plan du chapitre

III.1 Introduction

III.2 Banc d'essai et conditions expérimentales

III.3 Résultats expérimentaux

III.4 Conclusion

III.1 Introduction :

Ce travail consiste à étudier l'amélioration de l'homogénéisation de l'air dans une pièce d'habitation par des jets d'air lobés libre. Les diverses solutions de contrôle passif présentées dans notre étude bibliographique peuvent être adaptées à l'amélioration de la diffusion de l'air dans les locaux à usage d'habitation. L'étude analytique des jets a permis de mieux connaître les propriétés déterminantes des jets lobés.

On s'attache à mesurer expérimentalement les valeurs de vitesse dans un milieu libre (non confiné) pour deux configurations de jet simple lobé (à 5 et à 6 lobes).

Dans ce travail, nous présentons une étude expérimentale des jets lobés. Afin d'améliorer la diffusion de l'air dans la zone d'occupation à moindre coût, par un moyen passif de contrôle. On a testé deux modèles de diffuseurs ; le diffuseur lobé à 5 lobes et le diffuseur lobé à 6 lobes. Les profils axiaux et radiaux de la vitesse sont également présentés dans ce travail.

III.2 Banc d'essai et conditions expérimentales :

Le montage expérimental mis en œuvre est essentiellement conçu pour générer des jets d'air issus de diffuseurs lobés. Les expériences ont été réalisées dans un local de dimensions 3,0m de longueur, 2,5m de largeur et 2.5m de hauteur. Ces dimensions permettent de réaliser au mieux des essais dans des conditions de jet vertical libre à forces de poussées défavorables. Le local a été isolé du milieu extérieur lors des expériences.

L'installation réalisée est composée d'un châssis sur lequel est fixé le dispositif de soufflage (voir Figure III.1). Ce dernier comporte un diffuseur de soufflage d'air dirigé du haut vers le bas. Les vitesses de l'écoulement sont mesurées par un thermo-anémomètre multifonctionnel. La sonde est supportée par des tiges guidées verticalement et horizontalement pour balayer le maximum d'espace. La marge d'erreur est de l'ordre de ± 0.5 K pour la sonde thermique BENNIA et al [4][30]. Les dispositifs expérimentaux de mesures en mode libre sont représentés sur la Figure III.1. La température ambiante T_a est relevée lors des mesures de température T_i et U_i dans différents points du jet.

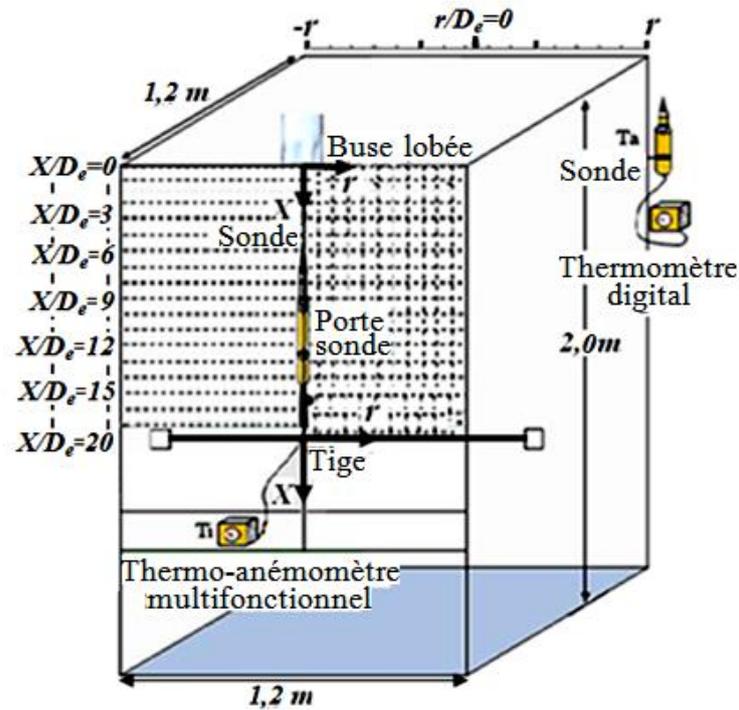


Figure III. 1 Schéma descriptif du banc d'essai.

Tableau III. 1:Appareils de mesure.

Appareil de mesure	Modèle
Système de compteur de ventilation multi-paramètres	TSI VELOCICALC PLUS 8386-M-GB (précision de $\pm 3\%$ de la lecture)
Multi-thermomètre	Outils généraux DKP300MA Alarme numérique thermomètre étanche (précision de $\pm 0.1^\circ\text{C}$)

La Figure III.2 montre la buse lobée qui est composée de 6 lobes. Les creux sont inclinés de 22° vers l'intérieur. La buse est de 0.052 m de diamètre équivalent et de 0.090 m de longueur. Les lobes ont des ouvertures plus évasées, une largeur de 0.008 à 0.01 m et une hauteur de 0.001 m. La température initiale du jet d'air au niveau de l'orifice de soufflage est de 323,3 K et la vitesse axiale initiale est de $7.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

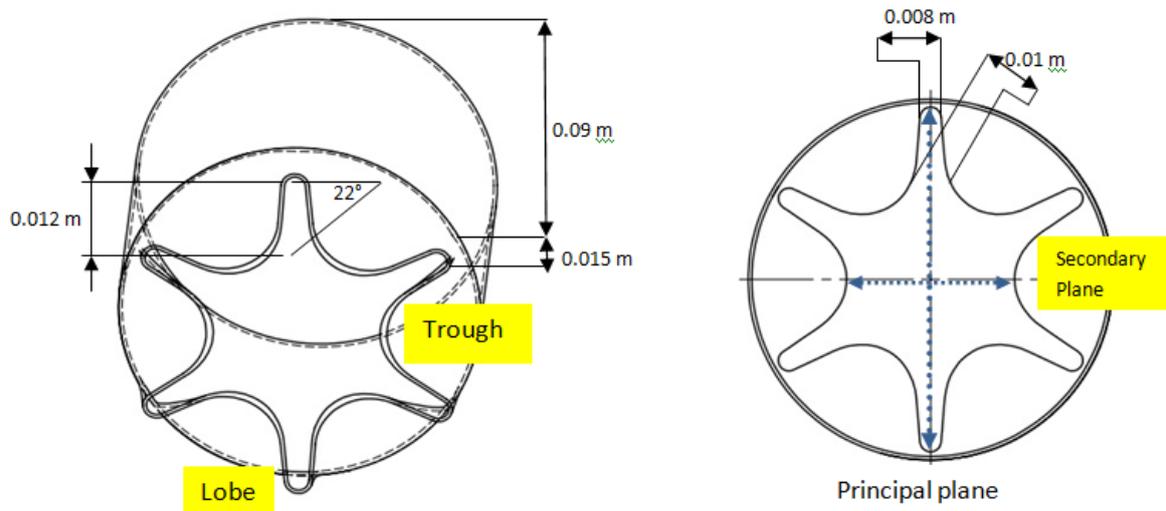


Figure III. 2: Schéma descriptif d'une buse lobée à 6 lobes, et géométrie du plan de soufflage (YZ).

La Figure III.3 présente un diffuseur lobé avec 5 lobes. Les creux sont inclinés de 22° vers l'intérieur. La buse est de 0.052m de diamètre équivalent et de 0.09m de longueur. Les lobes a une largeur de 0.008 à 0.01m et une hauteur de 0.015m . La température initiale du jet d'air au niveau de l'orifice de soufflage est de $(323,3\text{ K})$ et la vitesse axiale initiale est de $7.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

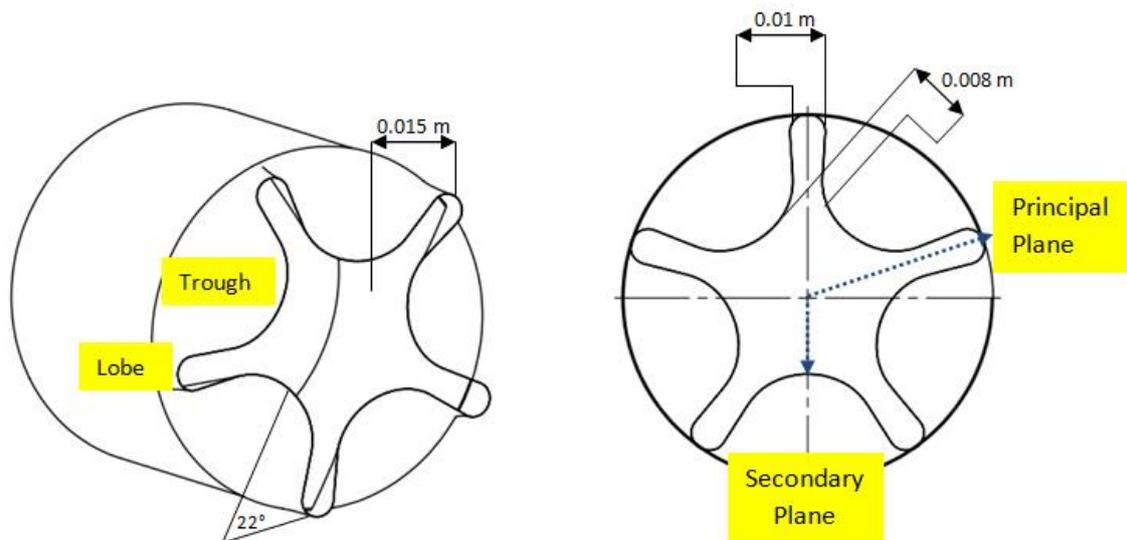


Figure III. 3: Schéma descriptif d'une buse lobée à 5 lobes, et géométrie du plan de soufflage (YZ).

III.3 Résultats expérimentaux :

Dans cette partie nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus par référence à la vitesse maximale à la sortie de l'orifice de soufflage et à la vitesse dans différents points du jet grâce à l'expression adimensionnelle (U_r) qui représente la vitesse réduite ($U_r = \frac{U_i}{U_{max}}$).

Les distances radiales et axiales sont données par référence au diamètre équivalent de la buse de soufflage sous forme adimensionnelle $r/D_e=0$ à 7 et $x/D_e=1$ à 20 .

III.3.1 Profil expérimental de la vitesse axiale d'un jet d'air libre à 6 lobes :

Le profil de vitesse réduite (U_r) d'un jet d'air lobé avec 6 lobes est présenté dans la figure suivante :

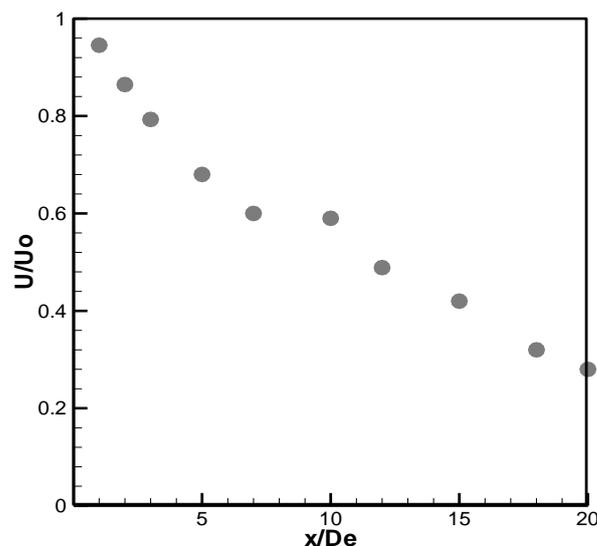


Figure III. 4: Profil de vitesse axial d'un jet d'air lobé à 6 lobes.

La Figure III.4 montre la répartition de la vitesse réduite (U_r) dans la direction axiale sur une distance de 20 diamètres équivalents pour un jet d'air lobé avec 6 lobes. Elle présente une courbe d'allure gaussienne dans l'intégralité du jet et prendre en considération que la stabilisation de la vitesse apparaît lorsque l'on s'éloigne de l'orifice de soufflage.

On remarque que la vitesse est atteint son maximum près de l'orifice de soufflage $1D_e$, puis la vitesse se diminue rapidement jusqu'à $7D_e$, pour atteindre presque 60% de sa valeur initiale

de la vitesse. De la station axiale $7D_e$ et jusqu'à $10D_e$, la vitesse est presque linéaire (reste 60% de la valeur initial de la vitesse).

Entre la station axiale $10 D_e$ et $18 D_e$, on observe une deuxième pente beaucoup moins accentué que la première pour atteindre presque 32% de la valeur initial de la vitesse.

Au-delà de 18 diamètres équivalents, l'intensité de la vitesse s'affaiblit et se régularise le long de l'écoulement.

Ce résultat permet de quantifier l'importance de l'inclinaison des creux et des lobes par rapport au plan de soufflage et de l'ouverture la plus évasée des lobes.

Cette diminution rapide de la vitesse axiale est physiquement compréhensible, ce qui traduit par un transfert de l'énergie dynamique vers les directions radiales.

D'après la Figure III.4 on constate que l'inclinaison des creux et des lobes et le nombre des lobes joue un rôle très important dans l'amélioration de la diffusion d'air. Les champs d'écoulement de turbulence ont été induits par les creux et les lobes de diffuseur. On constate également que la variation des paramètres de turbulence est influencée par l'angle et le nombre des lobes et des creux. On note que ce type de jet améliore de manière significative l'homogénéisation de l'écoulement par rapport à un jet classique (jet circulaire).

III.3.1.1 Profils expérimentaux des vitesses radiales d'un jet d'air libre à 6 lobes :

La Figure III.5 montre les profils des vitesses dans les directions radiales et dans les plans principal (PP) et secondaire (SP) pour un jet lobé avec 6 lobes en mode libre toujours.

III.3.1.1.a Plans principal et secondaire :

Les mesures de la vitesse radiale ont été effectuées pour différentes stations ($x/D_e=1, 5$ et 15), et est reportée sur la Figure suivante.

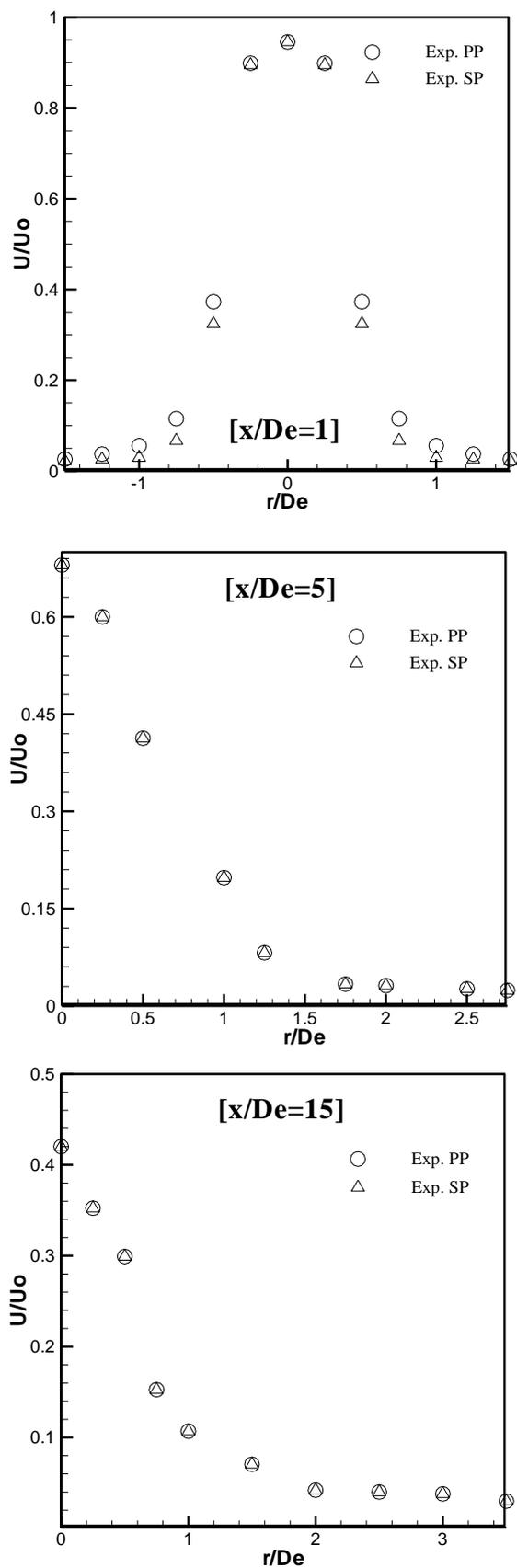


Figure III. 5: Profils de vitesse radiale d'un jet d'air avec 6 lobes.

Tout d'abord, les mesures relevées des vitesses radiales, ont été faits sur la totalité du jet. Les résultats obtenus confirmant que l'écoulement est axisymétrique indiquant une égale capacité de transfert dans toutes les directions radiales.

Dans le plan de symétrie de la configuration étudiée (Figure III.5), on constate que la vitesse décroît rapidement dans la direction radiale d'une valeur maximale proche de l'axe du jet à une valeur minimale.

- Pour la station $x/D_e=1$, et entre la position $r/D_e=0$ et $r/D_e=1$, on remarque que la vitesse diminue rapidement, pour atteindre presque 10% de la vitesse initiale au point $r/D_e=1$. Lorsque on s'éloigne du point $r/D_e=1$, on observe une faible diminution, presque la vitesse reste stable. Pour cette station, on remarque clairement l'influence du plan principal sur l'épanouissement radial des vitesses. On remarque également, une légère décroissance de la vitesse dans le cas du plan secondaire. Cette différence peut s'expliquer par l'influence des creux et d'ouverture plus évasée des lobes.

Pour la station $x/D_e=5$, et la position $r/D_e=0$ jusqu'à $r/D_e=1.25$, la vitesse radiale décroît rapidement pour atteindre presque 7% de sa valeur initiale. Au-delà de $1,25D_e$ et jusqu'à $1,75D_e$, on observe une deuxième pente beaucoup moins accentuée que la première. Entre la station $r/D_e=1.75$ et 2.75 , l'évolution de la vitesse radiale est diminuée progressivement et linéairement pour atteindre sa valeur minimale, on peut dire que, la vitesse est presque stable dans cette zone.

A partir à la station $x=5$ diamètres équivalents, l'écoulement n'est pas influencé par la forme géométrique des lobes et des creux. Le jet se présente comme un jet classique (circulaire) et c'est pourquoi les profils des vitesses sont identiques et ont le même épanouissement dans la direction radial pour les deux plans principal et secondaire.

- Pour la station $x/D_e=15$, on remarque que la vitesse diminue rapidement entre le point $r/D_e=0$ et $1D_e$, pour atteindre une valeur de 10% de sa valeur initiale. Entre la station $r/D_e=1$ et $2D_e$, la vitesse commence à diminuer progressivement (la pente de la vitesse dans cette zone est beaucoup moins accentuée que la pente dans première l'intervalle $[r/D_e=0$ et $1D_e]$) pour atteindre sa valeur minimale (presque 4% de sa

valeur initiale). A partir de $r/D_e = 2$, l'intensité de la vitesse s'affaiblit et se régularise de long de l'écoulement, pour atteindre sa valeur minimale, 4% de sa valeur initiale de la vitesse.

La diminution de la vitesse dans la direction axiale est physiquement compréhensible, ce qui explique le transfert de l'énergie cinétique dans la direction. La diminution de la vitesse radiale est due à l'effet du mélange de l'environnement avec le jet. L'analyse des profils axiaux et radiaux des vitesses mis à l'évidence l'importance et le rôle que jouent l'inclinaison et le nombre des lobes et des creux et les types de jet dans la performance de mélange de l'écoulement d'air.

III.3.2 Profil expérimental de la vitesse axiale d'un jet d'air libre à 5 lobes :

Le profil de vitesse réduite (U_r) d'un jet d'air lobé à 5 lobes (voir Figure III.6), est présenté dans la Figure suivante :

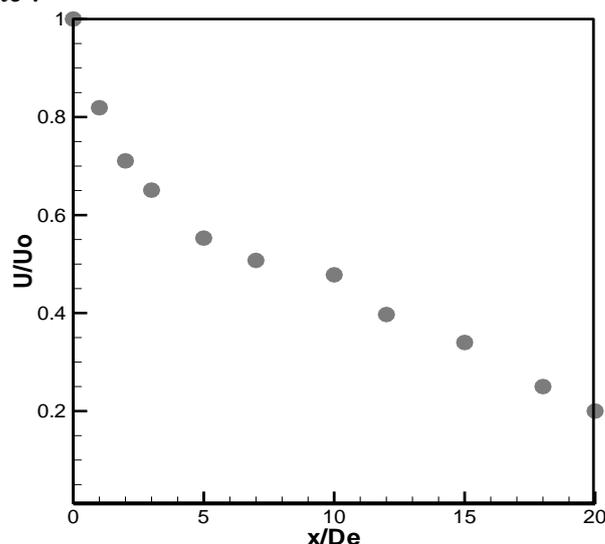


Figure III.6: Profil de vitesse axial d'un jet d'air lobé à 5 lobes.

III.3.2.1 Profils expérimentaux des vitesses radiales d'un jet d'air à 5 lobes en mode libre :

La Figure III.6 présente la distribution de la vitesse moyenne réduite (U_r) dans une direction axiale de 20 diamètres équivalents pour un jet d'air lobé avec 5 lobes. Cette courbe des vitesses présente une courbe d'allure gaussienne dans l'intégralité du jet. La stabilisation de la vitesse apparaît lorsque l'on s'éloigne de l'orifice de soufflage.

On observe que la vitesse est atteinte son maximum près de l'orifice de soufflage $0D_e$, puis la vitesse se décroît rapidement jusqu'à $5D_e$, pour atteindre presque 55% de sa valeur initiale.

De la station axiale $5D_e$ et jusqu'à $10D_e$, la diminution de la vitesse est faible, la courbe dans ce stade est presque linéaire.

Entre la station axiale $10 D_e$ et $20 D_e$, on remarque une deuxième pente beaucoup moins accentué que la première pour atteindre presque 20% de la valeur initial de la vitesse.

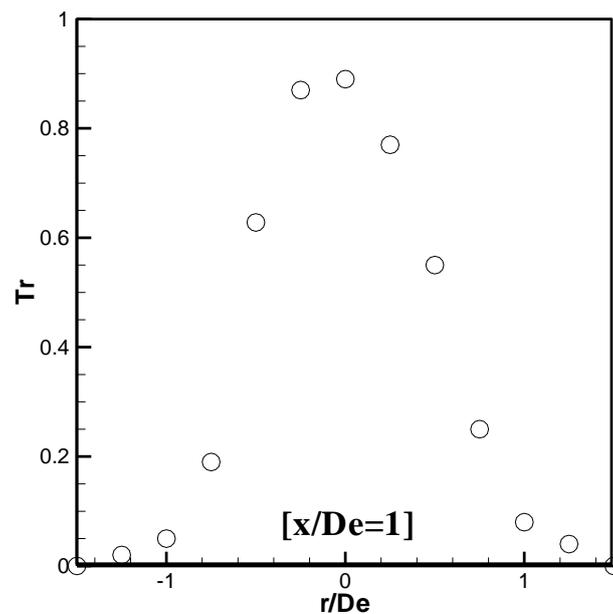
Les résultats obtenus permettent de quantifier le rôle et l'importance de l'inclinaison des creux et des lobes par rapport le plan de soufflage, l'ouverture la plus évasée des lobes et le nombre des lobes.

Cette diminution rapide de la vitesse dans la direction axiale est physiquement compréhensible, ce qui traduit par un transfert de l'énergie cinétique vers la direction radiale.

D'après la Figure III.6 on peut dire que l'amélioration de la diffusion d'air est dépend fortement de l'inclinaison des creux et des lobes et du nombre des lobes. On constate que ce type de jet améliore de manière significative l'homogénéisation de l'écoulement par rapport à un jet classique (jet circulaire).

III.3.2.1.a Plans principal et secondaire :

Les profils de vitesses radiales pour les différentes stations ($X/D_e=1, 5, \text{ et } 15$) et dans les plans principal et secondaire pour un jet d'air à 5 lobé sont présentés dans les figures suivantes :



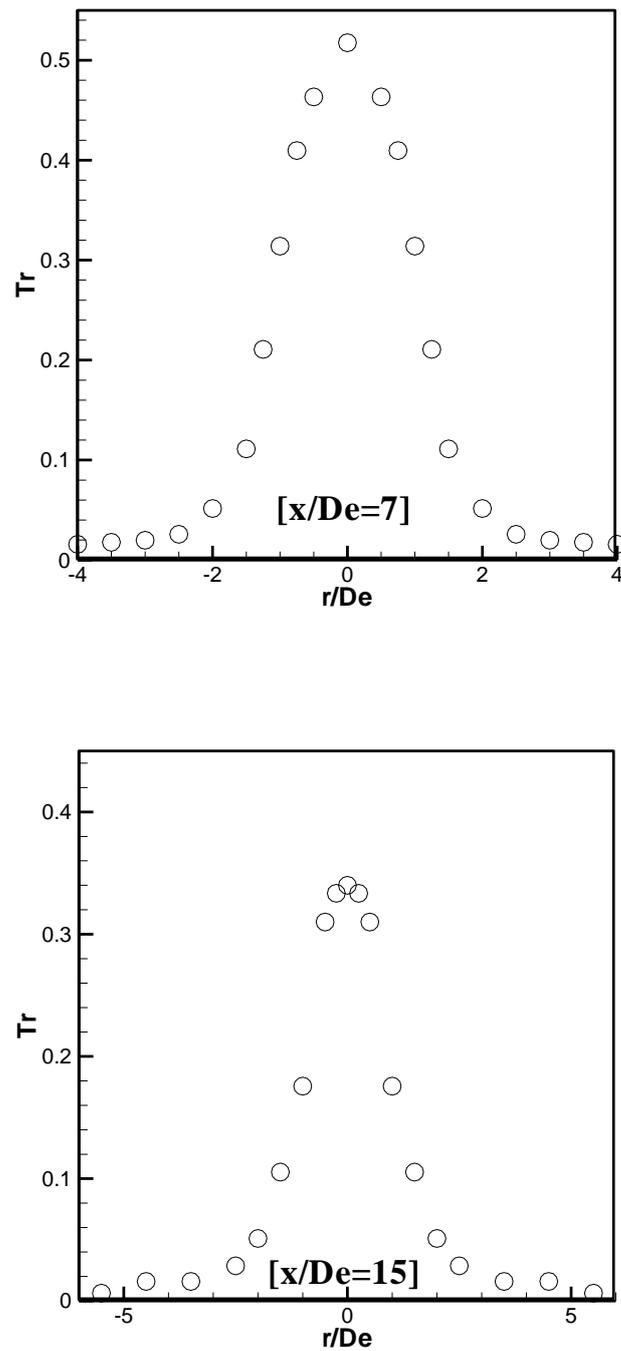


Figure III.7: Profils de vitesse radiale d'un jet d'air avec 5 lobes.

Pour la Figure III.7, on constate que la vitesse diminue rapidement dans la direction radiale d'une valeur maximale proche de l'axe du jet à une valeur minimale loin de l'axe du jet.

- Pour la station $x/D_e=1$, et dans la zone $r/D_e=-0$ et $r/D_e =+1$, on observe que la vitesse diminue de façon remarquable et très rapidement, pour atteindre presque 8% de la vitesse

initial. Au-delà de $r/D_e = +1$ jusqu'à un $r/D_e = +1,5$, la vitesse commence à régulariser pour atteindre sa valeur minimale de sa valeur initiale.

- Pour la station $x/D_e = 1$, et dans la zone $r/D_e = -0$ et $r/D_e = -0,25$, il y a une légère diminution de la vitesse, puis la vitesse décroît rapidement jusqu'à un $r/D_e = -1$. Au-delà de $r/D_e = -1$, la stabilisation de la vitesse est apparue de façon significative.
- Pour cette station, on remarque clairement l'influence du plan principal sur l'épanouissement radial des vitesses. Cette différence est causée par l'antisymétrie de ce type de jet (puisque le creux est en face de lobe).
- Pour la station $x/D_e = 7$, le jet apparaît comme un jet axisymétrique, indiquant une égale capacité de transfert d'énergie cinétique dans toute la direction radiale de l'écoulement. De $r/D_e = 0$ jusqu'à $r/D_e = 1,5$ la vitesse radiale diminue rapidement jusqu'à un 12% de la valeur initiale de la vitesse. À partir de $r/D_e = 1,5$ et jusqu'à $r/D_e = 2$, on remarque une deuxième pente beaucoup moins accentuée que la première pour atteindre presque 8% de la valeur initiale de la vitesse, puis la vitesse se stabilise et se régularise de long de la direction radiale d'écoulement, pour atteindre sa valeur minimale de la vitesse.
- Pour la station $x/D_e = 15$, on remarque que le jet est symétrique et la vitesse diminue rapidement entre le point $r/D_e = 0$ et $2,5D_e$, pour atteindre une valeur de 3% de sa valeur initiale, puis la stabilisation et la régularisation de la vitesse est commencée à apparaître, tel que la vitesse devient constante entre le point $r/D_e = 3,5$ et $7D_e$.

À partir de la station $x = 7D_e$, le jet n'est pas influencé par la forme géométrique du diffuseur. Il se présente comme un jet classique (circulaire) et c'est pourquoi les profils des vitesses sont identiques et ont le même étalement dans la direction radiale pour les deux plans principal et secondaire.

La décroissance de la vitesse dans la direction axiale est due à l'impact du mélange du jet avec l'environnement et est également justifiée par le transfert de l'énergie cinétique dans la direction radiale. L'étude des profils axiaux et radiaux des vitesses met en évidence l'intérêt et le rôle de l'inclinaison, le nombre de lobes et des creux et le type de jet dans l'efficacité de mélange de l'écoulement d'air.

III.4 Conclusion :

Durant tout ce chapitre, nous avons fait une étude expérimentale d'un jet d'air lobé utilisé pour plusieurs applications comme le chauffage, ventilation et climatisation (système CVC). On a examiné dans cette étude les profils expérimentaux des vitesses dans les 2 directions radiale et axiale d'un jet d'air à 5 lobes et à 6 lobes. Basé sur l'analyse de leurs profils de vitesse axiale et radiale, on constate que :

- Pour le cas du jet lobé avec 6lobes, a partir à la station $x=5$ diamètres équivalents, l'écoulement n'est pas influencé par la forme géométrique des lobes et des creux. Le jet se présente comme un jet classique (circulaire) et c'est pourquoi les profils des vitesses sont identiques et ont le même épanouissement dans la direction radial pour les deux plans principal et secondaire.
- Pour le cas du jet lobé avec 5lobes, a partir à la station $x=7 D_e$, le jet n'est pas influencé par la forme géométrique du diffuseur. Il se présente comme un jet classique (circulaire) et c'est pourquoi les profils des vitesses sont identiques et ont le même étalement dans la direction radial pour les deux plans principal et secondaire.

L'étude des profils axiaux et radiaux des vitesses mis en évidence l'intérêt et le rôle de l'inclinaison, le nombre des lobes et des creux et le type de jet dans l'efficacité de mélange de l'écoulement d'air.

Étude expérimentale dynamique des jets d'air lobés : Amélioration de la
diffusion d'air dans les locaux a usage d'habitation

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Notre travail représente l'un des sujets de projet de fin d'étude (mémoire master 2-ELM) qui se base sur des recherches sur les jets d'air lobés. Ce mémoire présente une étude expérimentale d'un jet d'air lobé (avec 5 et avec 6 lobes) utilisé pour plusieurs applications comme le chauffage, ventilation et climatisation (système CVC).

Notre travail touche de façon générale, l'exploitation du contrôle passif des écoulements et l'application de ces derniers à la ventilation des locaux à usage d'habitation.

De manière générale, on a examiné dans cette étude les profils expérimentaux des vitesses dans les deux directions radiale et axiale respectivement d'un jet d'air à 5 lobes et jet d'air à 6 lobes.

Basé sur l'analyse des profils de vitesse axiale et radiale de cet écoulement, on peut constater que :

- Pour le cas du jet lobé avec 6 lobes, à partir à la station $x=5$ diamètres équivalents, l'écoulement n'est pas influencé par la forme géométrique du diffuseur (forme géométrique des lobes et des creux). Ce jet se présente comme un jet classique (circulaire) et c'est pourquoi les profils des vitesses sont identiques et ont le même épanouissement dans la direction radial pour les deux plans principal et secondaire.
- Pour le cas du jet lobé avec 5 lobes, à partir à la station $x=7 D_e$, le jet n'est pas influencé par la forme géométrique du diffuseur. Il se présente comme un jet circulaire (classique) et c'est pourquoi les profils des vitesses sont identiques et ont le même étalement dans la direction radial pour les deux plans (principal et secondaire).

L'étude dynamique de ce type de jet mis en évidence l'intérêt et le rôle de l'inclinaison, le nombre des lobes et des creux et le type de diffuseur dans l'homogénéisation et l'efficacité de mélange de l'écoulement d'air.

**Étude expérimentale dynamique des jets d'air lobés : Amélioration
de la diffusion d'air dans les locaux a usage d'habitation**

Références

Bibliographiques

Références

- [1] Roudane mohamed, Etude experimentale et numerique d'un multi jet tourbillonnaire confine et chauffe, mars 2014.
- [2] ISO standard 7730 - Ambiances thermiques modérées détermination des indices pmv et ppd et spécification des conditions de confort thermique.
- [3] Julien dubois. étude expérimentale de jets libres, compressibles ou en présence d'un obstacle, janvier 2011
- [4] Abderezak bennia, larbi loukarfi, khelil ali, jet a diffuseurs munis de lobes ,2017.
- [5] Kadir hadjer, simulation numérique de l'influence de la géométrie sur l'écoulement issu d'un diffuseur tourbillonnaire, juin 2016.
- [6] Bennouar rachid, étude d'un jet libre, comparaison des modèles k- ϵ et sst avec des résultats expérimentaux ou numériques, 2009.
- [7] Riadh ouzani, simulations numériques de jets coaxiaux compressibles, décembre 2015.
- [8] Abderazak bennia, samir rahal, la convection naturelle dans une cavité simulant un thermosiphon, 2014.
- [9] Djedjig souhila, impact d'un jet d'air sur une surface circulaire chauffée, juin 2011.
- [10] Joël pagé, contribution à l'étude des jets turbulents axisymétriques à masse volumique variable, octobre 2007.
- [11] H. jouhara, o. martinet, and a.j. robinson, « experimental study of small diameter thermosyphons charged with water, fc-84, fc-77 & fc-3283 », 5th european thermal-sciences conference, the netherlands, (2008).
- [12] C. benseghir, étude de la convection naturelle dans une cavité ayant une paroi ailetée, mémoire magister, université de batna (2008).
- [13] G. de vahl davis, « natural convection of air in a square cavity, a bench mark solution ». int. j. numer. methods fluids, vol. 3, pp. 249-264 (1983).
- [14] E.k. lakhali et m. hasnaoui, convection naturelle dans une cavité carrée chauffée périodiquement par le bas, revue générale de thermique, vol .27, pp.480- 485 (1995).
- [15] I. ishihara , t. fukui, r. matsumoto, « natural convection in a vertical rectangular enclosure with symmetrically localized heating and cooling zones », international journal of heat and fluid flow, vol.23, pp. 366–372 (2002)

- [16] D. Japikse, « advances in thermosyphon technology», in: *adv. heat transfer* 9, academic press, london, p. 47, (1973).
- [17] F.j bayley, g.s.h. lock, «heat transfer characteristics of the closed thermosyphon», *j. heat transfer*. vol. 87, pp 30–40, (1965).
- [18] N. ibrir, étude de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire contenant du métal liquide, mémoire de magister, université de batna (2006).
- [19] F. wolff, c. beckermann and r. viskanta, «natural convection of liquid metals in vertical cavities», *experimental thermal and fluid science*, vol.1, pp. 83- 91 (1988).
- [20] R. viskanta, d. m. kim and c. gau, «three-dimensional natural convection heat transfer of liquid metal in cavity», *int. j. heat mass transfer*, vol. 29, pp. 475- 485(1986).
- [21] M. bourich, m. hasnaoui and a. amahnid, «double-diffusive natural convection in a porous enclosure partially heated from below and differentially salted». *int. j. heat fluid flow*, vol.25(6), pp.1034-1046 (2004).
- [22] S. paolucci, d.r. chenoweth, «natural convection in shallow enclosures with differentially heated end walls». *j. heat transfer*, vol. 110, pp. 625-634 (1988).
- [23] M. j. stewart and f. weinberg, «fluid flow in liquid metals i. theoretical analysis», *j. crystal growth*, vol.12, pp. 217-227 (1972).
- [24] S. wakashima and t.s. saitoh, «benchmark solution for natural convection in cubic cavity using the high order time space method». *international journal of heat and mass transfer*, vol.47, pp.853-864, (2004).
- [25] A. valencia, r.l. frederick, «heat transfer in square cavities with partially active vertical walls». *int. j. heat mass transfer*, vol. 32, pp. 1567–1574 (1989).
- [26] Q.-h. deng, g.-f. tang, y. li, « a combined temperature scale for analyzing natural convection in rectangular enclosures with discrete wall heat sources». *int. j.heat mass transfer*, vol. 45, pp. 3437– 3446 (2002).
- [27] D.w. crunkleton, t. j. anderson, «a numerical study of flow and thermal fields in tilted rayleigh–bénard convection», *international communications in heat and mass transfer*, vol.33, pp. 24-29, (2006).
- [28] E. stalio , d. angeli, g.s. barozzi, «numerical simulation of forced convection over a periodic series of rectangular cavities at low prandtl number», *international journal of heat and fluid flow*.vol. 32, pp.1014–1023, (2011).
- [29] S. wakashima and t.s. saitoh, «benchmark solution for natural convection in cubic cavity using the high order time space method». *international journal of heat and mass transfer*, vol.47, pp.853-864, (2004).

- [30] A. nag, a. sarker and v. m. k. satri, «natural convection in a differentially heated square cavity with a horizontal partition plate on the hot wall», *comput. methods appl. mech. eng.* vol.110, pp.143-156, (1993).
- [31] E. k. lakhal, m. hasnaoui, e. bilgen and p. vasseur, «natural convection in inclined rectangular enclosures with perfectly conducting fins attached on the heated wall», *heat mass transfer*, vol.32, pp. 365-373, (1997).
- [32] S. h. tasnim and m. r. collins, «numerical analysis of heat transfer in square cavity with baffle on the hot wall», *int. comm. heat transfer*, vol. 31 (no. 5), pp.639-650, (2004).
- [33] S. a. nada «natural convection heat transfer in horizontal and vertical closed narrow enclosures with heated rectangular finned base plate». *international journal of heat and mass transfer*, vol.50, pp. 667-679, (2007).
- [34] E. arquis and m. rady, «study of natural convection heat transfer in a finned horizontal fluid layer», *international journal of thermal sciences*, vol. 44, pp.43-52, (2005).
- [35] N. yucel and h. turkoglu, «numerical analysis of lamina natural convection in enclosures with fins attached to an active wall», *heat and mass transfer*, vol. 33, pp. 307-314, (1998)
- [36] 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.
- [37] Braikia, m., loukarfi, l., khelil, a., *homogénéisation des ambiances par jets tourbillonnaires multiples*, éditions universitaires européennes, 2012.
- [38] Aouchiche a., haddadi a., *etude numerique du refroidissement d'une plaque chauffée par un jet l'impactant dans un canal*, université de tizi-ouzou, 2016.
- [39] Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N. *Swirl Flows*. Abacus Press 1984, London.
- [40] Huang, y., yang, v., *dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion*, *progress in energy and combustion science*, 2009, 35: pp. 293-364.
- [41] Amal, m., *contribution à l'étude du swirling jet avec ou sans sillage pour le chauffage de grands bâtiments*, thèse de doctorat 3ème cycle, université de valenciennes, france 1987.
- [42] 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 arréridj, 2020.

[43] Guechi fairouz., étude d'un écoulement à surface libre dû à un jet avec effet de la tasse de thé en présence de la gravité, université de setif, 2007.

[44] Ghadbane abdelouahab., étude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluide dans un échangeur de chaleur, université de m'sila, 2019.

[45] Kadir h., simulation numérique de l'influence de la géométrie sur l'écoulement issu d'un diffuseur tourbillonnaire, université de bouira, juin 2016.

[46] Pratte, b.d., keffer, j. r., the swirling turbulent jet. j of engineering transactions of the generated swirl turbulent flow. thermal science 2010, 14(1): pp. 125-139.