



Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

Thème

Etude expérimental dynamique d'un jet d'air tourbillonnaire :
Amélioration de la diffusion d'air dans les immeubles
résidentiels

Présenté par : -RADJOUH Abdelghani

-MECHETA Rachid

Devant le jury:

Président	: Dr zaoui fares	Université de Bordj Bou Arreridj
Examineur 1	: Dr. Maglaoui Issame	Université de Bordj Bou Arreridj
Examineur 1	: Dr Benhadouga seddik	Université de Bordj Bou Arreridj
Rapporteur	: Dr. Bennia Abderezak	Université de Bordj Bou Arreridj

Remerciements

Avant tout, nous remercions **Allah** le tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à remercier nos parents ainsi que toutes nos familles Pour leurs encouragements et leurs soutiens de tous les instants.

Nous tenons à remercier notre encadreur, Dr Bennia Abderezak, enseignant à l'université de Bordj Bou Arreridj pour avoir proposé et dirigé ce travail, pour sa disponibilité, ses remarques constructives et son temps consacré aux corrections.

Nos remerciements vont également aux membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui Me sont chers.

À mes chers parents, qui se sont sacrifiés pour m'offrir un climat idéal de travail et qui n'ont Jamais cessé de me témoigner leurs affections et de m'apporter leurs soutient depuis Toujours, que le Bon Dieu les garde et les protège.

À mes très chers frères et ma grande famille.

À tous mes chers amis.

À tous mes amis de l'université de bordj Bou Arreridj. Surtouts
Spécialité Electromécanique.

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités et recherches bibliographiques	
I.1 Introduction	3
I.2 Diffusion d'air	3
I.2.1 Critères de confort	4
I.2.2 Types de diffusions	5
I.2.3 Critères de choix du diffuseur	8
I.3 Aperçu général sur les jets	8
I.4 Profils Gaussiens	9
I.5 Structure du jet libre axisymétrique	10
I.6 Différentes types de l'instabilité du jet	11
I.7 Techniques de génération de tourbillonnement (Swirl)	13
I.7.1 Intensité de tourbillonnement	14
I.7.2 Description du jet tourbillonnaire	15
I.7.3 Influence de l'inclinaison des ailettes	17
I.7.4 Influence du tourbillonnement	20
I.8 Contrôle des jets	21
I.9. Analyse de quelques travaux antérieurs	22
I.10 Conclusion	23
Chapitre II : Modèle physique et formulation mathématique	
II.1 Introduction	24
II.2 Grandeurs influençant le développement du jet simple	24
II.3 Caractéristiques des jets	25
II.4 Tourbillonnement (Swirl)	25

Sommaire

II.4.1 Nombre de tourbillonnement	25
II.5 Equations du modèle mathématique	27
II.6 Equations gouvernantes dimensionnelles	27
II.6.1 Equation de continuité	28
II.6.1.1 Equations de quantité de mouvement (ou équations de Navier- Stokes)	28
II.6.1.2 Equation de l'énergie	28
II.6.2 Equations gouvernantes adimensionnelles	29
II.6.2.1 Equation de continuité	29
II.6.2.2 Equations de quantité de mouvement	30
II.6.2.3 Equation de l'énergie	30
II.6.3 Equations et contraintes de Reynolds	30
II.7 Conclusion	31
 Chapitre III : Résultats et discussion	
III.1 Introduction	33
III.2 Banc d'essai et conditions expérimentales	33
III.3 Résultats expérimentaux	36
III.3.1 Profil expérimental de la vitesse axiale d'un jet tourbillonnaire	36
III.3.2 Profils expérimentaux des vitesses radiales d'un jet d'air tourbillonnaire	37
III.6 Conclusion	40

Chapitre I: Généralités et recherches bibliographiques

Liste des figures

Figure. I.1: Système de diffusion par mélange [4]	5
Figure. I.2: Système de diffusion tourbillonnaire [4]	6
Figure. I.3: Système de diffusion par gaine textile [4]	6
Figure. I.4: Système de diffusion par flux laminaire [4]	7
Figure I.5 : Système de diffusion par déplacement d'air [4]	8
Figure I.6 : Angles d'expansion d'un jet	9
Figure. I.7: Allure de profils gaussiens [1]	10
Figure. I.8: Schéma représentative de la structure du jet libre [16]	11
Figure. I.9: Les différentes instabilités agissant sur un jet [21]	12
Figure. I.10: Représentation du jet tourbillonnant [48]	16
Figure. I.11: Représentation du jet tourbillonnant en coordonnées cylindriques	16
Figure. I.12: Profils de températures axiales pour différentes inclinaisons α d'ailettes [50]	18
Figure. I.13: Profils de températures et de vitesses radiales d'un jet simple tourbillonnaire Pour $\alpha = 30^\circ$ à la station $x/D = 2$ [50]	18
Figure. I.14: Profils de températures et de vitesses radiales d'un jet simple tourbillonnaire Pour $\alpha = 60^\circ$ à la station $x/D = 2$	19
Figure. I.15: Profils de températures et de vitesses radiales à la station $x/D = 1$ pour Différentes inclinaisons d'ailettes	20

Chapitre III : Résultats et discussion

Liste des figures

Figure. III.1: Schéma descriptif du banc d'essai	34
Figure. III.2 : (a) Photographie d'une buse lobée, (b) Géométrie du plan de soufflage (YZ)	35
Figure. III.3: Profil de vitesse axial d'un jet d'air tourbillonnaire	36
Figure. III.4: Profils de vitesse radiale d'un jet tourbillonnaire	38

Liste des tableaux

Chapitre I: Généralités et recherches bibliographiques

Liste des tableaux

Tableau I.1: Différentes stratégies de contrôle des écoulements [53, 54] **22**

Chapitre III : Résultats et discussion

Liste des tableaux

Table. III.1: Appareils de mesure **35**

Nomenclature et abréviation

U_0 Vitesse initiale d'un diffuseur de soufflage [m/s].

Re Nombre de Reynolds [-].

D_e Diamètre équivalent [mm].

f Partie moyenne (d'ensemble) [-].

f' Partie fluctuante.

g Partie moyenne (d'ensemble) [-].

g' Partie fluctuante [-].

$U_i U_j$ Terme de Reynolds [-].

τ_{ij} Viscosité turbulente sous-maille [-].

τ_{kk} Partie isotropie [-].

S_{ij} Tenseur [-].

L_s Echelle de mélange [-].

k Constante de Von-Karman [-].

d Distance a la paroi solide la plus proche [-].

C_s Constante de Smagorinski [-].

k_{sgs} Energie cinétique à l'échelle de la sous-maille [-].

U_r Vitesse réduit [-].

ν Viscosité cinématique du fluide [m²/s].

Abréviation:

RSM: Reynolds stress model.

LES : Large eddy simulation.

LES/S-L : Model de smagorinski-lilly.

LES/WALE: Model de wall-adapting local eddy-viscosity.

LES/K-ET: Model de dynamic kinetic energy subgrid-scale.

RANS: Reynolds average Navier Stokes.

DNS : Direct numerical simulation.

RMSE : Erreur quadratique moyenne.

CVC : Chauffage, ventilation et climatisation.

Introduction Générale

Lors de la réduction des besoins énergétiques de l'immeuble, la bonne répartition spatiale des faibles débits d'air neuf à injecter dans les pièces de vie pose problème. Si le problème du mélange de l'air injecté à l'air ambiant n'est pas efficacement résolu, on constatera une forte dégradation de la qualité de l'air et du confort thermique [1].

Un intérêt important est donné à l'amélioration du processus de mélange des écoulements turbulents aux moyens de structures tourbillonnaires générées et intensifiées artificiellement, pour ses aspects fondamentaux et pratiques. On conçoit que le processus de mélange est intimement lié à la transition de la turbulence [1, 2] et que la géométrie et les perturbations initiales de l'écoulement conditionnent fortement sa génération ainsi que sa transition [1, 3]. En ce qui concerne les applications, elles sont nombreuses : Poussée des réacteurs d'avions, dispersion des polluants, ventilation, chauffage et climatisation dans les locaux à usage d'habitation [1, 2].

L'objectif des travaux menés au **LEPTIAB** (Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-ressources et Bâtiment) et au **LCEMSM** (Laboratoire Contrôle Essai Mesure et Simulation Mécanique) depuis 2003 sur le contrôle passif des jets, est de transposer l'idée du « diffuseur asymétrique » des domaines de l'aéronautique, l'aérospatial et la combustion à celui de la diffusion de l'air du bâtiment [3, 4]. Une solution technologique qui permet l'amélioration de la diffusion d'air dans les locaux à usage d'habitation a été proposée dans le cadre des projets CNEPRU ; projet-1 « sous le numéro : J03007201400110, intitulé : Caractérisation des jets turbulents dans les diffuseurs à ailettes lobés"» et projet-2 «sous le numéro : A11N01UN020120190002, intitulé : Etude du comportement dynamique et thermique des jets impactant issus des diffuseurs a géométries variables appliqués a l'amélioration de la ventilation des bâtiments », projet coordonné par le **LCEMSM** département de génie mécanique, université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie. Il s'agit d'un diffuseur de type lobé basé sur le contrôle passif du mélange du jet d'air à l'air ambiant.

L'optimisation géométrique visée est réalisable par la seule voie expérimentale. Notre, objectif visé est l'amélioration de l'efficacité de la diffusion de l'air dans la

Introduction Générale

zone d'occupation à moindre coût, par un moyen passif de contrôle de l'écoulement moteur de la ventilation.

Notre étude est présentée en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les jets tourbillonnaires et sur les différents paramètres géométriques qui peuvent influencer la dynamique de flux de jet et de l'air ambiant.

Le deuxième chapitre présente le modèle physique et mathématique basé sur les équations qui régissent le phénomène de turbulence.

Le troisième chapitre introduit l'étude expérimentale pour une configuration de jet simple tourbillonnaires dans un milieu libre (non confiné).

Enfin, une conclusion générale regroupe les principaux résultats obtenus.

Chapitre I :

Généralités et recherches

Bibliographiques

I.1 Introduction.

I.2 Diffusion d'air.

I.3 Aperçu général sur les jets.

I.4 Profils Gaussiens.

I.5 Structure du jet libre axisymétrique.

I.6 Différentes types de l'instabilité du jet.

I.7 Techniques de génération de tourbillonnement.

I.8 Contrôle des jets.

I.9 Analyse de quelques travaux antérieurs.

I.10 Conclusion.

I.1 Introduction

La diffusion d'air dans des locaux est habituellement assurée par des diffuseurs qui sont disposés au plusieurs point d'un local qui assurent une bonne homogénéisation de l'air. Les diffuseurs se sont des dispositifs de diffusion d'air basé sur les jets tourbillonnaires [5].

Les jets tourbillonnaires interviennent dans une large variété de dispositifs industriels pour leur capacité à procurer de forts taux de mélange dans des configurations multiples pour des applications diverses, à savoir, moteurs de fusées, moteurs diesel, turbine à gaz, brûleurs, dispersion de polluants, refroidissement, systèmes de ventilation et de climatisation [5].

Nous présentons dans ce chapitre une étude bibliographique sur les jets tourbillonnaires et sur les différents paramètres géométriques qui peuvent influencer la dynamique de l'écoulement d'air. Les mécanismes de génération de la turbulence et plus particulièrement le swirl sont commentés tant du point de vue théorique que des méthodes de contrôle de mélanges dans les jets [5].

Cela permet l'amélioration de l'homogénéisation des jets, en vue de leur exploitation dans le domaine de traitement d'air (Chauffage, Ventilation, et Conditionnement d'Air : HVAC) [6].

Le soufflage par des buses, a géométrie tourbillonnaire, qui génèrent de grosse structures tourbillonnaires génératrices de mélange et l'un des meilleurs moyens passifs de mise en œuvre pratique dans le contrôle des jets d'air. Ces diffuseurs permettraient d'obtenir une forte induction ce qui conduit à une amélioration du confort thermique, conduisant ainsi aune économie d'énergie [6].

I.2 Diffusion d'air :

La diffusion d'air est l'art d'introduire de l'air de façon confortable et efficace dans la zone d'occupation. Elle est l'élément terminal et essentiel d'une installation aéraulique dans les bâtiments tertiaires. Elle est également l'élément qui permet d'obtenir et de garantir le confort à l'occupant. Une diffusion d'air mal calculée ne pourra pas garantir les critères de confort dans la zone d'occupation [7].

I.2.1 Critères de confort :

Les critères de confort à obtenir dans la zone d'occupation sont :

- Absence de stratification ;
- Absence de courant d'air ;
- Un bon niveau sonore ;
- Une bonne qualité d'air.

a- Stratification :

Lorsque l'air n'est plus en mouvement et qu'il n'est pas suffisamment brassé, des couches d'air à différentes températures se forment sur toute la hauteur d'un local (de plus en plus chaud en fonction de la hauteur). Il apparaît donc une forte sensation d'inconfort (Difficulté de respiration) et c'est un risque important sur l'hygiène car l'air neuf n'est plus mélangé [7].

b- Courant d'air :

C'est l'inconfort le plus connu. La vitesse résiduelle dans la zone d'occupation est trop élevée. L'échange thermique avec l'occupant augmente et celui-ci ressent vite une sensation de froid. Il peut être provoqué par des phénomènes de "douches froides" et par des phénomènes dues à la rencontre de la veine d'air soufflée mal maîtrisée avec la convection naturelle des parois [7].

c- Niveau sonore :

C'est le niveau de bruit des équipements entendu par l'auditeur. Celui-ci est défini par des recommandations et des réglementations en fonction des locaux. La diffusion choisie ne devra pas régénérer plus de bruit que les équipements et être inférieure aux exigences [7].

d- Qualité d'air :

La diffusion d'air contribue à une meilleure qualité d'air dans les locaux par son efficacité de brassage. Plus le taux de brassage de l'air dans un local est important,

plus la qualité d'air est bonne. En effet, l'élévation du taux de brassage diminue le taux de concentration des polluants [7].

I.2.2 Types de diffusions :

Il existe cinq grands types de diffusion :

- La diffusion par mélange ;
- La diffusion par flux tourbillonnaire ;
- La diffusion par gaine textile ;
- La diffusion par déplacement d'air ;
- La diffusion par flux laminaire.

a- Diffusion par mélange :

C'est la plus utilisée dans les locaux tertiaires. Elle consiste à amener de l'air dans le local, puis grâce à un bon taux d'induction (capacité de l'air primaire soufflé à entraîner l'air secondaire du local) à le mélanger le plus vite possible à l'air ambiant et atteindre la zone d'occupation, avec une vitesse résiduelle et un niveau sonore confortable pour être homogène en température et en polluants [7].

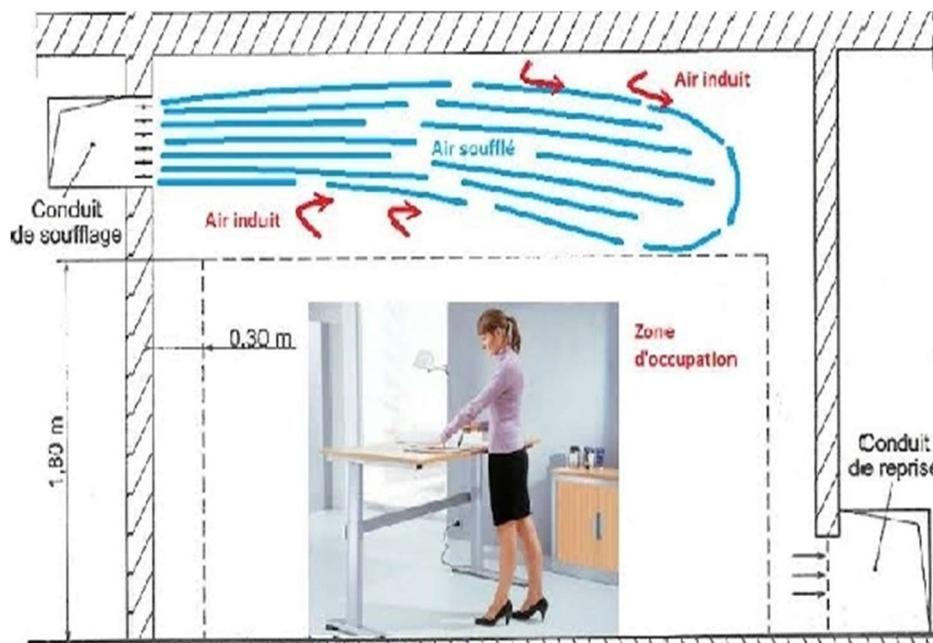


Figure. I.1: Système de diffusion par mélange [4].

b- Diffusion par flux tourbillonnaire :

C'est une extension de la diffusion par mélange, elle nous vient des pays germains et elle consiste par effet tourbillonnaire à augmenter le taux d'induction. Ce type de diffusion est souvent utilisé pour les locaux de grandes hauteurs et pour les locaux avec des contraintes architecturales et d'équipements importants [7].

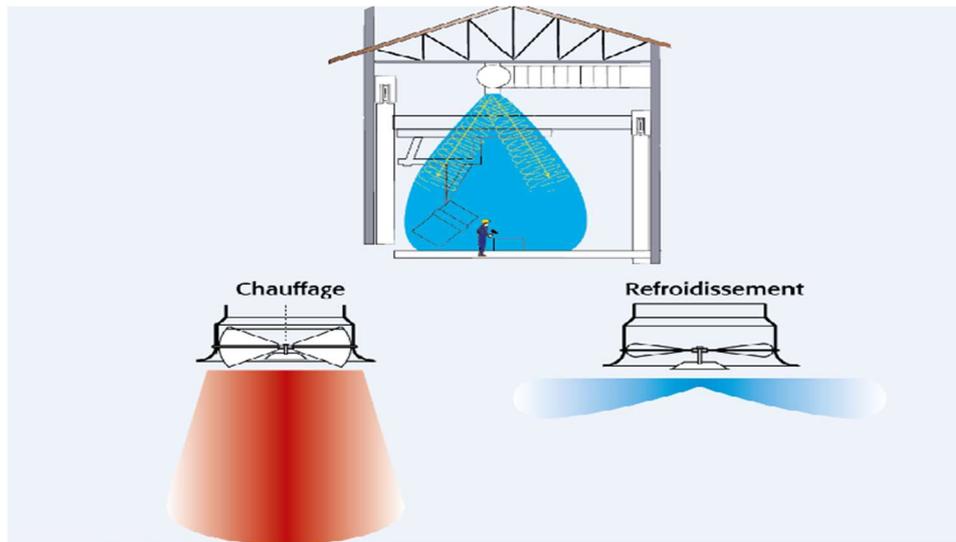


Figure. I.2: Système de diffusion tourbillonnaire [4].

c- Diffusion par gaine textile :

Ne sera pas développée ici, car elle concerne plutôt les locaux industriels [7].

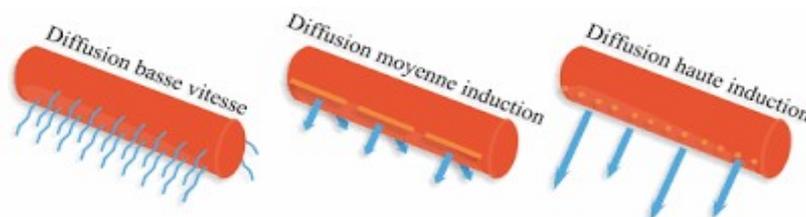
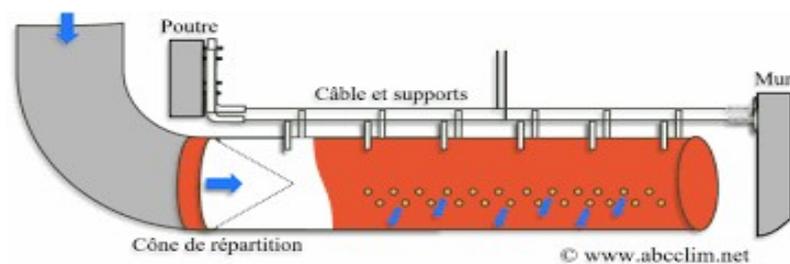


Figure. I.3: Système de diffusion par gaine textile [4].

d- Diffusion par flux laminaire :

Peut s'écouler dans deux sens : horizontal ou vertical.

Le principe du **flux** d'air unidirectionnel (ou **laminaire**) en salle blanche est associé au déplacement de l'air soufflé selon des lignes parallèles et une vitesse uniforme comprise entre 0.30 et 0.45 m. s⁻¹[7].



Figure. I.4: Système de diffusion par flux laminaire [4].

e- Diffusion par déplacement d'air :

Fonctionne sur le principe de l'effet de cheminée. Un air froid ou isotherme est soufflé en partie basse du local à basse vitesse ($v < 0,25$ m/s) et dès que celui-ci rencontre une source chaude (Machine ou occupants) par effet de convection naturelle, il s'élève pour être ensuite aspiré par l'extraction. Longtemps cantonné à l'industrie pour des difficultés d'intégration architecturale, il est aujourd'hui de plus en plus utilisé pour les grands volumes tertiaires et de loisirs grâce au système de buses qui permettent une directivité de la veine d'air et donc le libre choix de leurs emplacements architecturaux [7].

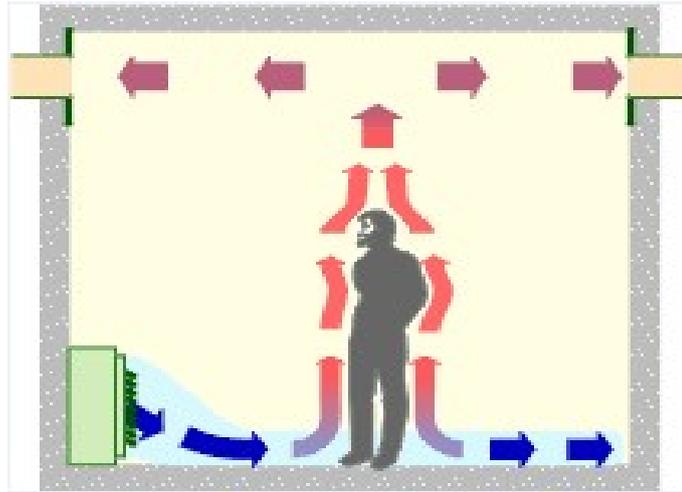


Figure I.5 : Système de diffusion par déplacement d'air [4].

I.2.3 Critères de choix du diffuseur :

Pour choisir le type de diffuseurs et de réseaux de mélange, des critères de base doivent être respectés et retenus pour le confort.

Ces critères sont les suivants :

- Détermination du débit d'air ;
- Déterminer la vitesse d'écoulement ;
- Déterminer l'efficacité dans la diffusion de l'air dans la salle ;
- Contrôle de la pression, à condition qu'elle soit faible pour plus de confort ;
- Contrôlez le niveau sonore en le réduisant à zéro.

Le choix du diffuseur devra être fait de façon à satisfaire ces exigences. Par conséquent doit être déterminé les paramètres du diffuseur utilisé pour remplir les conditions du cahier de charge [8].

I.3 Aperçu général sur les jets:

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 [9]:

- **Jet confiné** : existence d'effet paroi.
- **Jet libre** : débouchant à l'air libre ou bien les parois sont suffisamment éloignées.

Le jet libre fait partie de la classe des écoulements cisailés libres classiques au même titre que les sillages et les vagues. On parle de jet dès lors qu'il y a injection d'un fluide via un orifice ou une buse. La turbulence de l'écoulement provient de celle injectée en amont du jet et est aussi générée par les gradients de vitesse [10].

I.4 Profils Gaussiens :

Deux approches différentes sont abordées par les auteurs [11,12] ayant étudié les profils transversaux des jets: la plupart des auteurs traite les grandeurs caractéristiques en termes de profils gaussiens, d'autres en termes de profils plats. Le plus souvent, les profils transversaux de vitesse et de concentration sont considérés comme gaussiens. De façon générale, le profil transversal de vitesse moyenne dans un jet s'exprime selon :

$$\frac{U_x}{U_m} = \exp\left(-\ln 2 \frac{y^2}{b^2}\right) \quad (\text{I.1})$$

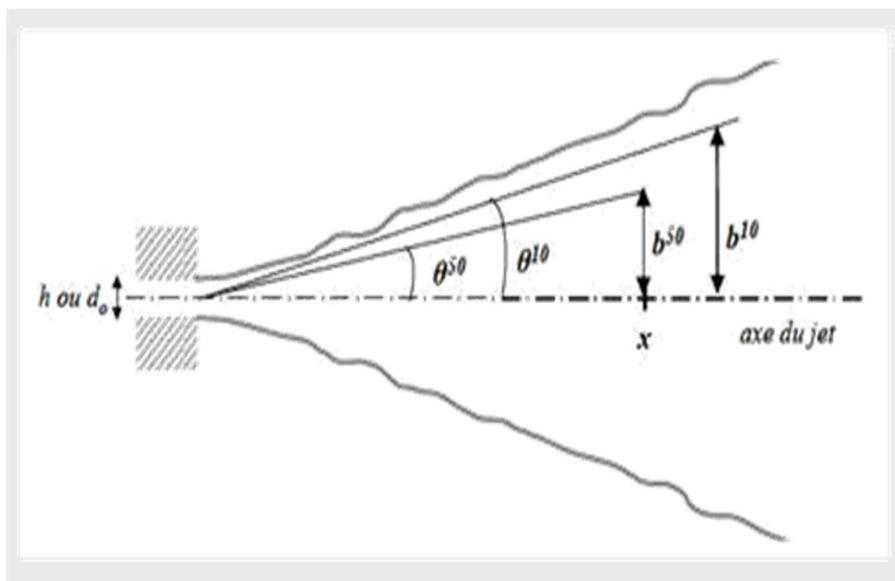


Figure I.6 : Angles d'expansion d'un jet

Un exemple de profils transversaux gaussiens est présenté sur la Figure (I.7).

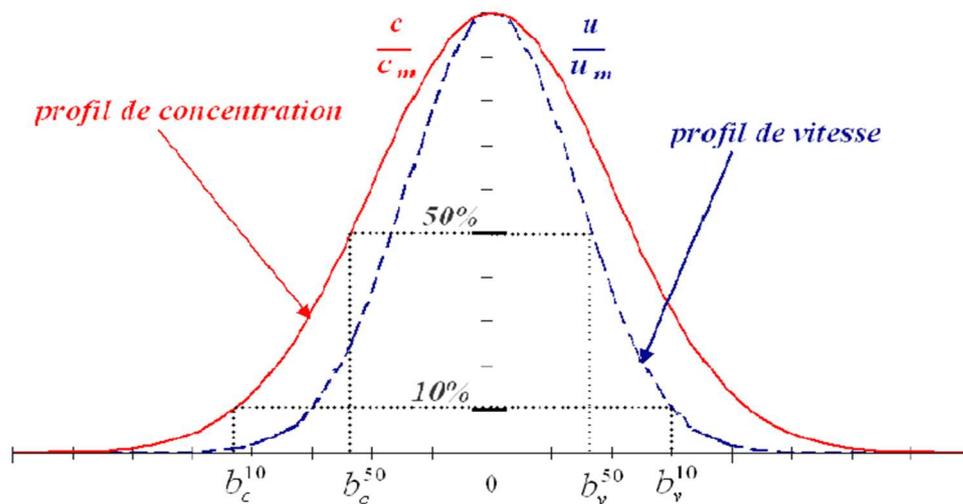


Figure. I.7: Allure de profils gaussiens [1].

I.5 Structure du jet libre axisymétrique :

Une décomposition classique proposée pour le jet libre est de distinguer trois zones (Figure I.8) [13].

- **La zone de corps potentiel :** Elle se caractérise par une vitesse en sortie de buse conservée sur l'axe central du jet à l'intérieur de ce qui s'appelle alors le corps potentiel [13].

L'air environnant est entraîné par le jet et réduit ainsi progressivement la vitesse dans le jet jusqu'à atteindre la ligne centrale. L'entraînement de l'air environnant crée une région de mélange et de fort cisaillement. La longueur du corps potentiel est généralement évaluée entre 4 et 7 fois le diamètre pneumatique, mais ce résultat dépend fortement des profils de vitesse et des taux de turbulence en sortie diffuseur. La géométrie du diffuseur influence nécessairement ces deux paramètres. Par exemple, pour un jet issu d'un tube long circulaire, la longueur du corps potentiel est de l'ordre de 4,5 à 5 fois le diamètre pneumatique [14].

- **La zone de transition** : Cette zone commence lorsque les couches de mélange se rejoignent au centre du jet. On observe alors une baisse de la vitesse axiale due aux fortes contraintes de cisaillement dans cette zone [13].
- **La zone développée** : Les profils de vitesse sont désormais auto semblables et peuvent donc être déduits des profils amont par similitude. D'efférents auteurs placent le début de cette zone à partir de 8 fois jusqu'à 20 fois le diamètre du diffuseur [13].

La turbulence dans le jet a deux origines qui sont la turbulence initiale en sortie de buse, et la turbulence générée par les contraintes de cisaillement dans la couche de mélange entre l'air environnant et le jet. Ainsi Cornaro et al. [15] ainsi que Popiel et al. [16] ont observé des structures tourbillonnaires cohérentes en bordure de jet. Ces structures n'apparaissent que pour une couche limite fine et laminaire à l'injection. Seules des traces de ces structures sont observées lorsque la couche limite à l'injection devient turbulente. De plus, le jet devient instable à partir d'environ 1,5 fois le diamètre hydraulique et un phénomène de battement du jet commence à apparaître. [14]

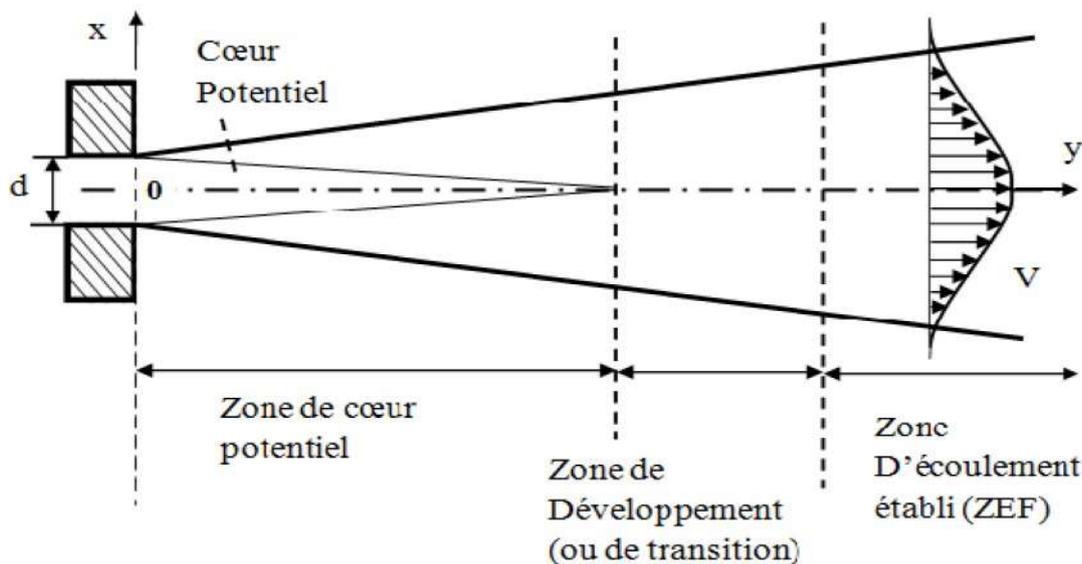


Figure. I.8: Schéma représentative de la structure du jet libre [16].

Le système de coordonnées lié au jet est défini comme sur la Figure (I.5) : L'origine 0 est fixée au centre de la sortie du jet. Les directions radiale et axiale sont notées respectivement x et y . Dans le plan (xy) , les composantes associées de la vitesse seront notées U et V .

Dans le cœur potentiel d'un jet de direction principale y , la vitesse sur l'axe $V(y)$ reste constante et égale à la vitesse de sortie de jet $V(0)$, notée dans la suite plus simplement V_0 . Cette zone est limitée latéralement par la couche de mélange qui se développe à sa périphérie.

Expérimentalement, la longueur du cône potentiel est définie comme la distance où la vitesse mesurée sur l'axe central, reste au moins égale à 95% ou à 99% de la vitesse en sortie de l'orifice V_0 . Comme la longueur du noyau potentiel dépend fortement des conditions initiales (profil initial de la vitesse, turbulence en entrée, type de diffuseur). Cette zone s'étend de 3 à 7 D_e [17].

La turbulence dans le jet a deux origines qui sont la turbulence initiale en sortie de la buse, et la turbulence générée par les contraintes de cisaillement dans la couche de mélange entre l'air environnant et le jet.

I.6 Différentes types de l'instabilité 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 1.6 [6] :

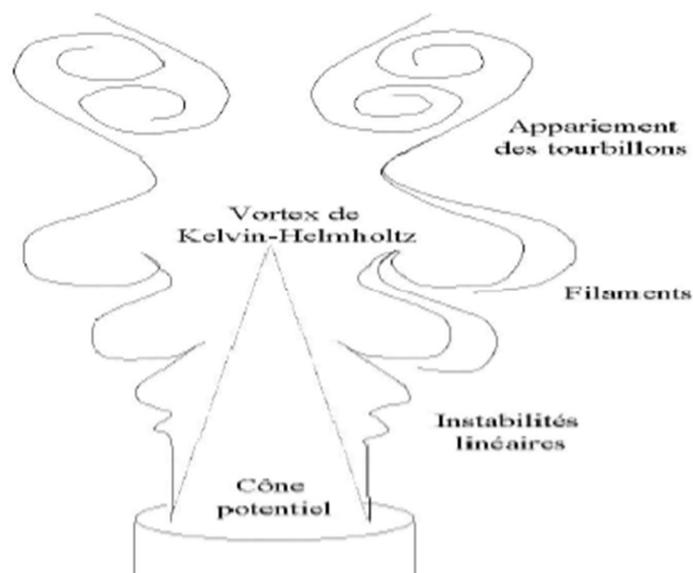


Figure. I.9: Les différentes instabilités agissant sur un jet [21].

Au départ, ces structures sont bidimensionnelles et prennent la forme d'allées vortex. L'instabilité annulaire de Helmholtz Kelvin voit son ampleur éloigner-vous de la seringue qui l'accompagne créez des structures tridimensionnels (3D) précises qui entourent l'instabilité annulaire.

Une zone apparait ou ces différentes structures s'emboitent entre eux. Yule [18] a montré que ces fusions peuvent inclure deux fichiers ou plus. Mais ce n'est pas un passage obligé car le vortex peut bien s'étirer par la suite désintégrer. Lors de la dernière fusion, les anneaux impliqués sont supérieurs au diamètre local de l'avion, qui fait éclater ces anneaux dans les coques tailles beaucoup plus petites. Du fait de ces récentes fusion, il n'y aura pas de diminution de la concentration cela ne se fait pas de manière monotone mais par étape. Cependant, parce que les fusions ne se produisent pas systématiquement au même endroit, la baisse moyenne sera continue. En plus de ces instabilités de type bidimensionnel, des instabilités tridimensionnelles vont se développer à partir du diffuseur. Ces structures hélicoïdales se déplacent le long d'un jet au hasard. En raison de son caractère tridimensionnelle. Il est très difficile de la remarque et distinguer. Le taux de croissance de ces instabilités étant plus faible que celui des instabilités bidimensionnelles, leur effet sur l'écoulement ne deviendra prépondérant que pour des hauteurs plus importantes [19].

Les structures tridimensionnelles vont avoir tendance à se développer plus rapidement pour des écoulements à fort nombre de Reynolds alors que dans le même temps, les structures bidimensionnelles vont devenir plus difficiles à observer et ne pourront se développer que sur des distances de plus en plus faibles.

I.7 Techniques de génération de tourbillonnement :

Il existe plusieurs manières de générer du swirl dans un écoulement [20, 21] :

- Ailettes ajustables venant dévier tangentiellement l'écoulement axial. L'intensité du tourbillonnement dépend alors directement de l'angle que forment les ailettes avec la direction longitudinale. Plus exactement, le nombre de swirl est directement proportionnel à la tangente de cet angle [20] et ce, Quel que soit le nombre de Reynolds du flux, sauf pour des valeurs très faibles pour ce nombre ($Re \leq 600$) où un terme correctif fonctionne pour Re [22]. A noter que ce type d'appareil génère un vortex

d'intensité forcément limitée (par conception d'ailette) et qu'il conduit à des pertes de charge importantes, d'autant plus que le nombre de tourbillons est important [23]. Toutefois, de par sa simplicité, c'est ce dispositif qui est généralement utilisé dans l'industrie (notamment dans les turbines à gaz) et pour de très nombreuses études sur les écoulements swirlés à titre indicatif [24, 25].

- Mise en rotation d'un tube [26] ou d'une plaque [27]. Cependant, le swirl généré est très faible. Ce type d'appareil est plutôt destiné l'étude de l'effondrement tourbillonnaire ("vortex breakdown"), qui est un exemple de la région de recirculation des écoulements swirlés est une des représentations Tube de rotation [28].
- Rotation autour de l'axe longitudinal d'une plaque perforée avec des trous [29]. Il s'agit d'une méthode qui produit une répartition homogène de l'effet vortex sur toute la section plane qui permet également d'atteindre des valeurs élevées pour ce nombre.
- Soufflage accidentel sur la paroi du tube en présence d'un écoulement axial. L'intensité du vortex est alors déterminée par le rapport entre le débit injecté tangentiellement et celui du débit injecté axialement [30, 31].

Mentionner la portée limitée de « l'universalité » du nombre circulaire. En fait, la façon dont le vortex est créé semble avoir une influence majeure sur la façon dont le flux est affecté (Farokhi et al. [21], Leuckel et Fricker [20], Sheen et al. [22]).

I.7.1 Intensité de tourbillonnement :

L'émergence d'une zone de recirculation dans l'écoulement principal a été déduite en raison de la valeur de l'intensité du vortex, se trouvant dans le champ à haute vitesse. La taille et la position de cette zone de recyclage varient avec l'intensité du swirl (Beér et Chigier [37], Leuckel et Fricker [32], Sheen et al. [22]).

La littérature a accepté la classification des courants de Foucault en général selon le nombre de tourbillons. Si bien qu'en même temps il a été mis en garde contre l'absence d'un tel classement. En fait, on retrouve une complémentarité entre les courants, avec la présence du même nombre de tourbillons et une distribution de tourbillons complètement différente (Panda et McLaughlin [33]). Sachant que la raison de l'instabilité de la source centrifuge est le vortex de

la couche de mélange (**Martin et Meiburg [34]**). Et donc il ne prend pas en compte (**Sheen et al. [22]**, **Billant et al. [35]**). Avec d'autres définitions du nombre de tourbillons, on peut décrire les flux turbulents en les séparant en deux catégories comme suit :

Les écoulements à swirl faible ($S < 0.6$) et les écoulements à swirl fort ($S \geq 0.6$).

➤ **Écoulements faiblement tourbillonnants ($S < 0.6$) :**

Pour des écoulements à faible nombre de swirl, il n'apparaît aucune zone de recirculation. Le swirl induit une augmentation de l'entraînement du fluide ambiant au repos et une diminution de la vitesse axiale de l'écoulement. Les profils de vitesse d'un écoulement faiblement tourbillonnant restent gaussiens jusqu'à environ $S < 0.6$ (**Chigier et Chervinsky [43]**). Le degré d'ouverture du jet ainsi que le flux de masse entraînée augmentent alors continûment avec le nombre de swirl.

➤ **Écoulements fortement tourbillonnants ($S \geq 0.6$) :**

A partir de $S = 0.6$ environ, les gradients de pressions longitudinaux ne sont plus suffisants pour compenser l'énergie cinétique des particules fluides si bien qu'apparaît une zone de recirculation toroïdale dans l'écoulement. **Benjamin [37]** suggère que cette zone de recirculation est la représentation d'une transition d'un écoulement supercritique à un écoulement subcritique, par analogie avec les ondes de chocs ou encore les ressauts hydrauliques. **Sarpkaya [38]**, **Escudier et Keller [39]** confirmeront plus tard cette hypothèse.

Une des caractéristiques importantes de cette zone de recirculation est que son centre se rapproche du nez de la buse (ou de l'injecteur) et que sa taille augmente à mesure que le nombre de swirl de l'écoulement augmente.

I.7.2 Description du jet tourbillonnaire :

Le jet vortex est le plus couramment utilisé pour obtenir les débits souhaités. De sorte qu'il diffère du jet traditionnel car il a une composante de vitesse tangentielle.

Avec on peut utiliser la roue de ventilateur axiale pour générer un écoulement turbulent ou utiliser des systèmes de vortex mécaniques [40].

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 [5, 41].

Selon Prate et Keffer [42], la description d'un jet tourbillonnaire (swirling jet) est schématisée comme suit (Figures I.7 et I.8):

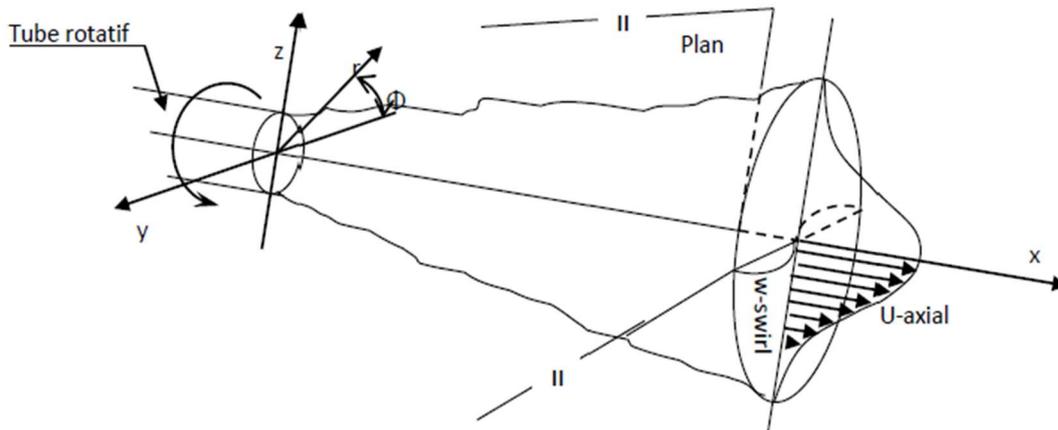


Figure. I.10: Représentation du jet tourbillonnant [48].

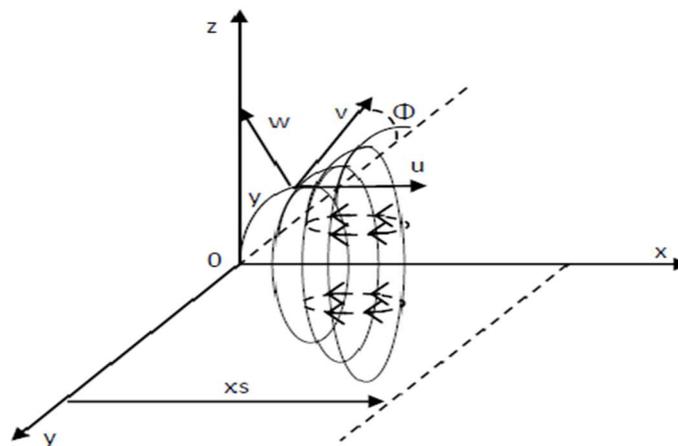


Figure. I.11: Représentation du jet tourbillonnant en coordonnées cylindriques

x : Coordonnée axiale ; U : Composante de la vitesse moyenne axiale.

r : Coordonnée radiale ; V : Composante de la vitesse moyenne radiale.

ϕ : Coordonnée tangentielle ; W : Composante de la vitesse moyenne tangentielle.

I.7.3 Influence de l'inclinaison des ailettes :

Les résultats de l'étude théorique et expérimentale des caractéristiques moyennes d'un écoulement des flux tourbillonnaire issu d'un diffuseur conique a été obtenus par **Benišek et al. [43]**. Les champs d'écoulement de turbulence ont été induites par l'ailette d'un ventilateur axial. Ils ont constaté que la variation des paramètres de turbulence est influencée par l'angle d'ouverture des ailettes de la turbine et les vitesses de rotation [5].

En définissant α comme l'angle d'inclinaison compris entre l'ailette et le support d'ailette fixé sur l'orifice de soufflage et tel que $\alpha = 0^\circ$ correspond au jet libre circulaire classique, a mis en évidence les résultats suivants [41] :

- Plus l'inclinaison des ailettes augmentent et plus vite la vitesse axiale décroît. Il y a absence du cône laminaire pour le jet libre tourbillonnaire.
- L'inclinaison des ailettes provoque de fortes turbulences à l'origine du jet. Au-delà de $x/D = 3$, l'intensité s'affaiblit et se régularise de long de l'écoulement quel que soit l'inclinaison α , comparativement au jet libre circulaire classique.
- Pour $\alpha = 60^\circ$, le jet est radial et les vitesses radiales sont plus étalées que pour $\alpha = 30^\circ$, cas du jet axial.
- Quand l'inclinaison des ailettes augmente, plus vite la similitude des profils est retrouvée, et cela d'autant plus que l'on s'éloigne de l'origine de soufflage.
- La vitesse tangentielle tend à disparaître très vite ($x/D \approx 3$) lorsque l'inclinaison est grande ($\alpha = 60^\circ$).

Les profils de vitesse et de température d'un jet d'air tourbillonnaire obtenus par **Braikia [44]**, sont illustrés dans les figures ci-dessous sous formes adimensionnelles.

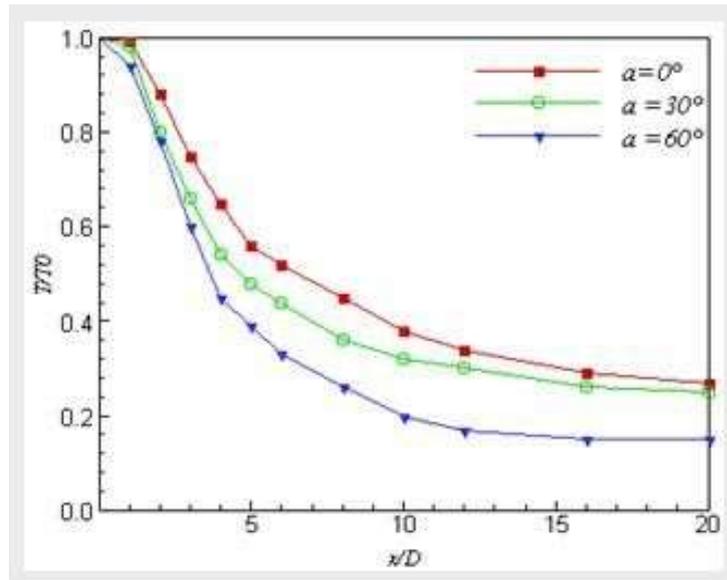


Figure. I.12: Profils de températures axiales pour différentes inclinaisons α d'ailettes [50].

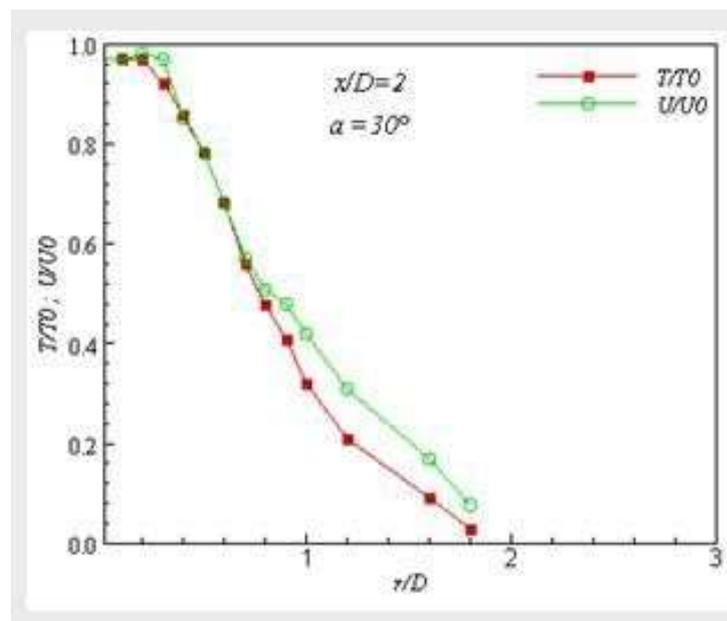


Figure. I.13: Profils de températures et de vitesses radiales d'un jet simple tourbillonnaire
Pour $\alpha = 30^\circ$ à la station $x/D = 2$ [50].

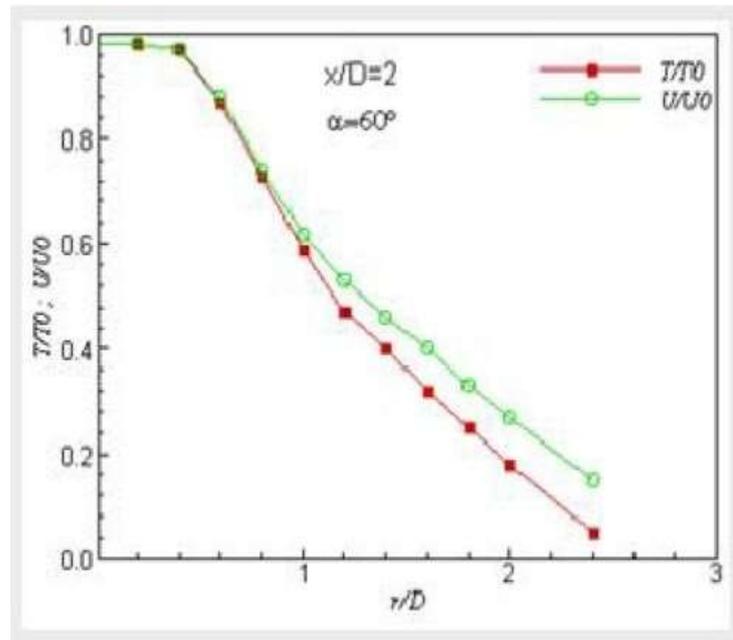


Figure. I.14: Profils de températures et de vitesses radiales d'un jet simple tourbillonnaire
Pour $\alpha = 60^\circ$ à la station $x/D = 2$.

Les profils de températures radiales, près de l'orifice de soufflage, pour différents angles d'inclinaison d'ailettes (α) présentés en Figure (I.12)

- Pour l'angle de 60° , on retrouve une diminution rapide de la température qui fait la diffusion thermique est plus importante par rapport aux autres résultats étudiés, soit $\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 30^\circ$ degrés.
- Être montre, un relation inverse entre la vitesse axiale de l'écoulement et l'angle des ailettes, telle que l'inclinaison des ailettes, augmente plus vite la vitesse axiale décroît. Ce qui est justifié par l'absence du cône laminaire pour le jet libre tourbillonnaire.
- Pour $\alpha = 60^\circ$, il a été observé que les vitesses planes radiales générées par cette méthode sont plus réparties $\alpha = 30^\circ$. Au fur et à mesure que l'inclinaison des ailettes augmente, la Similitude des caractéristiques se trouve plus rapidement, et cela augmente d'autant plus que l'on s'éloigne de la source de la bouffée.

On note une relation proportionnelle, que la pente de la vitesse initiale améliore significativement l'homogénéité thermique de l'écoulement, plus la pente est grande, plus la proportion d'homogénéité est grande.

Choisissez l'angle d'inclinaison des ailerons $\alpha = 60^\circ$ a été retenu pour la suite de ce travail car c'est le meilleur.

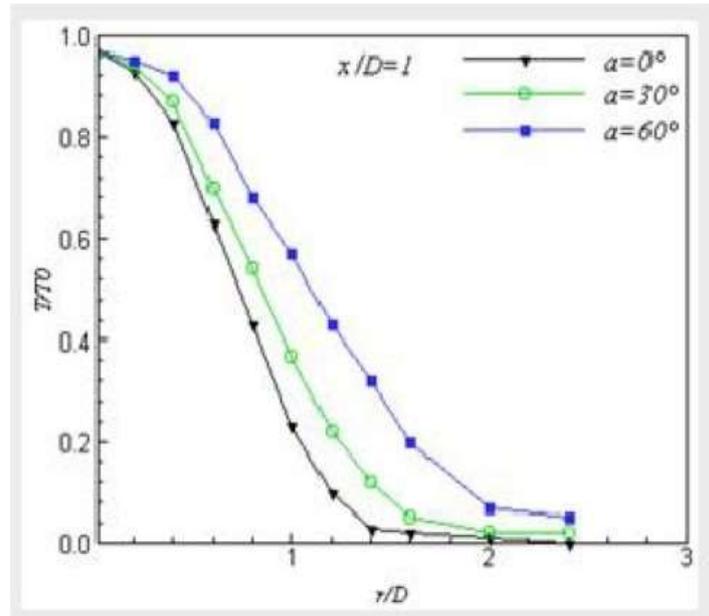


Figure. I.15: Profils de températures et de vitesses radiales à la station $x/D = 1$ pour différentes inclinaisons d'ailettes.

I.7.4 Influence du tourbillonnement :

Le tourbillonnement joue un rôle principal. Il favorise l'axisymétrie de l'écoulement, augmente le débit d'entraînement, les contraintes tangentielles à la paroi et diminue les pressions statiques axiales à la paroi [41].

L'inclinaison des ailettes module l'importance du nombre de tourbillonnement qui est maximum pour une inclinaison d'ailettes de 60° . Lorsque l'inclinaison des ailettes augmente, la vitesse et la température axiale diminuent, le jet s'épanouit pour devenir radial. La similitude des profils des vitesses et retrouvée [41]. Montrent qu'avec l'accroissement de cet angle, il y a une augmentation du débit d'écoulement de recirculation et des valeurs du maximum de vitesse axiale dans le jet. Les paramètres individuels du générateur de tourbillonnement, exercent un effet significatif sur la structure de l'écoulement dans la section initiale du jet [41].

Selon AMAL [4] les vitesses radiales augmentent dans le jet tourbillonnaire qui s'étale mieux que le jet classique. L'épanouissement du jet croît avec le nombre de tourbillonnement. Cette croissance est linéaire avec la distance le long de l'écoulement. Elle est plus importante pour le jet issu d'orifices rectangulaires que pour un jet simple ou multiple issu d'orifices circulaire, au-delà de 20 diamètres, le long de l'écoulement [41]

En étudiant des jets plans, montrent que dans une section, lorsque le nombre de jets augmente, les vitesses et les intensités de turbulence axiales diminuent. Dans une configuration de seize jets tourbillonnaires entourant un jet central, simulant l'injection de l'oxygène dans les brûleurs, **Heitor et al. [39]** montrent que le tourbillonnement atténue la structure tridimensionnelle typique au jet multiple.

I.8 Contrôle des jets :

Le contrôle du mélange des jets est classé en deux types : les méthodes dites actives pour lesquelles on fournit de l'énergie à l'écoulement, et les méthodes dites passives, n'utilisant pas un apport d'énergie extérieure.

Le but du contrôle d'un écoulement de type jet diffère suivant l'application industrielle attenante. On peut ainsi contrôler un jet pour améliorer le mélange en sortie d'un injecteur, mais aussi pour le faire diriger afin d'éloigner des zones critiques [5].

➤ **Les méthodes dites actives :**

Utilisent généralement l'excitation acoustique [45], ou contrôlée du jet au soufflage, qui favorise dans certaines conditions, l'amplification des instabilités et l'apparition de grosses structures tourbillonnaires fortement énergétiques et génératrices de mélange.

➤ **Les méthodes dites passives :**

Comme l'obstacle rigide annulaire proposé par **Spazzini et al. [46]** dans le cadre d'une application de ventilation individuelle permet d'allonger le noyau potentiel d'un jet circulaire de très faible Reynolds initial ($Re_0 = 640$). L'anneau de diamètre légèrement inférieur au diamètre du diffuseur, placé à une distance de $0,5D_e$ de celle-ci, ralentit l'épanouissement de la couche de mélange et augmente la longueur du noyau potentiel du jet circulaire. Ce contrôle passif n'est pas destiné à améliorer le mélange du jet circulaire mais à contrôler sa vitesse et sa trajectoire [41].

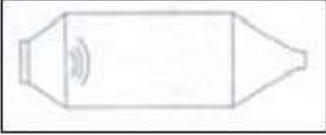
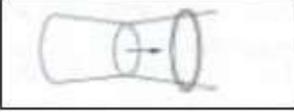
Contrôle passif	Excitation Acoustique		Zaman et Hussain [51]
Contrôle actif	Obstacle rigide Annulaire		Spazzini et al[52]

Tableau I.1: Différentes stratégies de contrôle des écoulements [53, 54].

I.9 Analyse de quelques travaux antérieurs :

Une multitude de travaux concernant les jets a été réalisée. Libres ou impactant, avec ou sans chauffage, ils font intervenir des phénomènes assez complexes de mécanique des fluides et de transferts thermiques. Il est important de comprendre toutes les caractéristiques d'un tel écoulement avant de réaliser n'importe quelle étude.

Les jets tourbillonnaires ont été largement utilisés dans les systèmes de combustion, car ils améliorent le mélange entre le combustible et le comburant [49,50] et stabilise la flamme. Ils sont aussi utilisés actuellement dans le système CVC.

Amal [50] montre que le jet tourbillonnaire présente l'avantage de s'épanouir plus rapidement qu'un jet libre axisymétrique et d'autant plus que la composante tangentielle de la vitesse est importante. Ce type de jet avec sillage permet d'accroître encore la diffusion latérale d'air froid ou chaud.

L'effet de différents paramètres sur le développement de l'écoulement derrière les ailettes d'un générateur de tourbillonnement a été largement étudié expérimentalement et numériquement par :

Les travaux de Thundil Karuppa Raj et Ganesan. [51], présentent les caractéristiques principales du champ d'écoulement généré par le générateur de tourbillonnement. L'originalité de cette étude est d'obtenir un meilleur angle des ailettes à l'aide des modèles de turbulence appropriés pour générer un tourbillonnement à la fois faible et fort.

Ahmadvand et al. [52] ont étudié expérimentalement et numériquement l'influence de l'inclinaison des ailettes sur l'augmentation de transfert de chaleur et l'écoulement

du fluide turbulent. Leur étude a été réalisée pour trois angles d'ailettes : 30, 45 et 60 avec la condition de flux de chaleur uniforme de l'air qui est utilisé comme fluide de travail. Ces auteurs ont confirmé que l'utilisation des ailettes conduit à un transfert de chaleur plus élevé par rapport à ceux obtenus à partir de tubes lisses, aussi, les gains de performances thermiques s'améliorent d'autant plus que l'angle d'inclinaison soit élevé et diminuent lorsque le nombre de Reynolds croit.

Volchkov et col [35] utilisent l'anémométrie laser pour leurs mesures dans un jet tourbillonnaire issu d'une chambre à vortex. Leurs mesures montrent l'évolution du nombre de swirl en fonction de l'angle d'orientation des ailettes. Ce nombre croit linéairement avec l'ouverture de ces ailettes lorsque $\alpha \leq 60$. Au-delà de cette valeur, il y a décroissance. Avec l'accroissement de cet angle, il y a une augmentation du débit d'écoulement de recirculation et des valeurs du maximum de vitesse axiale dans le jet périphérique ainsi que du moment du flux de quantité de mouvement. Les paramètres individuels du générateur de swirl exercent un effet significatif sur la structure de l'écoulement dans la section initiale du jet. Aussi, le nombre de swirl est en fonction de l'inclinaison des ailettes.

I.10 Conclusion :

Cette étude bibliographique a permis de mieux comprendre la structure et les caractéristiques des jets tourbillonnaires. La majeure partie des travaux cités concerne les écoulements homogènes. La nature du système de soufflage générant le tourbillonnement, l'inclinaison des ailettes, la température de l'air soufflé sont autant des paramètres qui influencent la géométrie du jet, les profils de vitesse, de température, d'intensité de turbulence.

Chapitre II:

Modèle physique et formulation Mathématique

II.1 Introduction.

II.2 Grandeurs influençant le développement du jet simple.

II.3 Caractéristiques des jets.

II.4 Tourbillonnement (Swirl).

II.5 Equations du modèle mathématique.

II.6 Equations gouvernantes dimensionnelles.

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 [53] :

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

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

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

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) [11].

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 [14].

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

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 [54].

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 [55].

L'expression exacte du nombre de Swirl dépend de la géométrie du diffuseur et des profils d'écoulement. D'après Gupta et al. [55], et pour un type unique de l'élément diffuseur avec un dispositif à ailette, le nombre de Swirl peut être défini comme suit:

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

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

$$S = \frac{G_{\phi}}{R^* G_x} \quad (II.7)$$

Donc :

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

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 [56] :

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

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

D'après Amal [57] plus le nombre de Swirl (S) augment, plus les composantes de la vitesse 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 [5].

➤ **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 [5].

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 [5].

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 [58].

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 [59] :

- 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 [6] :

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 [60]. 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 [61].

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

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

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

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

II.6.1.2 Equation de l'énergie :

L'équation de conservation d'énergie est comme suivie [61]:

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

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

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 [62], au lieu d'utiliser les coordonnées (x, y, z) et les composantes (u, v, w) de la vitesse et de la pression (p) [61], il est nécessaire de définir les changements de variable suivants [62]:

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

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:

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

Selon Y :

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

II.6.2.3 Equation de l'énergie :

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

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-15 et 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 :

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

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

f' : La partie fluctuante.

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

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

g' : La partie fluctuante.

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

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

L'écoulement moyen et la turbulence sont tous les deux séparément incompressibles. La Moyenne de l'équation de Navier-Stokes (II-13) s'écrit :

$$\bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \bar{U}_i \bar{U}_j \right) \quad (\text{II.8})$$

$\bar{U}_i \bar{U}_j$: 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 [41].

La différence entre les équations de Navier-Stokes et celles de Reynolds est en fait essentielle, parce que les contraintes $-\bar{U}_i \bar{U}_j$ sont des inconnues supplémentaires et que l'on ne dispose a priori que du même nombre d'équations [5].

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 $-\bar{U}_i \bar{U}_j$. 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 [64].

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.

Chapitre III:

Résultats et

Discussion

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 un jet d'air tourbillonnaire 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 habitables. Certaines solutions sont plus esthétiques que d'autres. L'étude analytique des jets a permis de mieux connaître les propriétés déterminantes de ce type de jet.

On s'attache à mesurer expérimentalement les valeurs de vitesse dans un milieu libre (non confiné) pour une configuration de jet simple tourbillonnaire.

Afin d'améliorer les prévisions des modèles de turbulence, on a utilisé la méthode des volumes finis sous Fluent, par lequel on a testé trois modèles de turbulences LES/SL, LES/WALE et le modèle de LES/K-ET en vue d'opter pour le modèle le plus adéquat à ce type d'écoulement.

Dans ce travail, nous présentons les profils axiaux et radiaux de la vitesse et également les différentes étapes qui ont été nécessaires pour obtenir une prédiction convenable de l'écoulement.

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 tourbillonnaire. 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 et chaud à forces de poussées défavorables. Le local a été isolé du milieu extérieur lors des expériences.

L'installation réalisée et composée d'un châssis sur lequel est fixé le dispositif de soufflage (voir Figure IV 1). Ce dernier comporte un diffuseur de soufflage d'air chaud dirigé du haut vers le bas. Les températures et 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 [65]. Les dispositifs expérimentaux de mesures en mode libre sont représentés sur la Figure IV.1. La température ambiante T_a est relevée lors des mesures de température T_i et U_i dans différents points du jet.

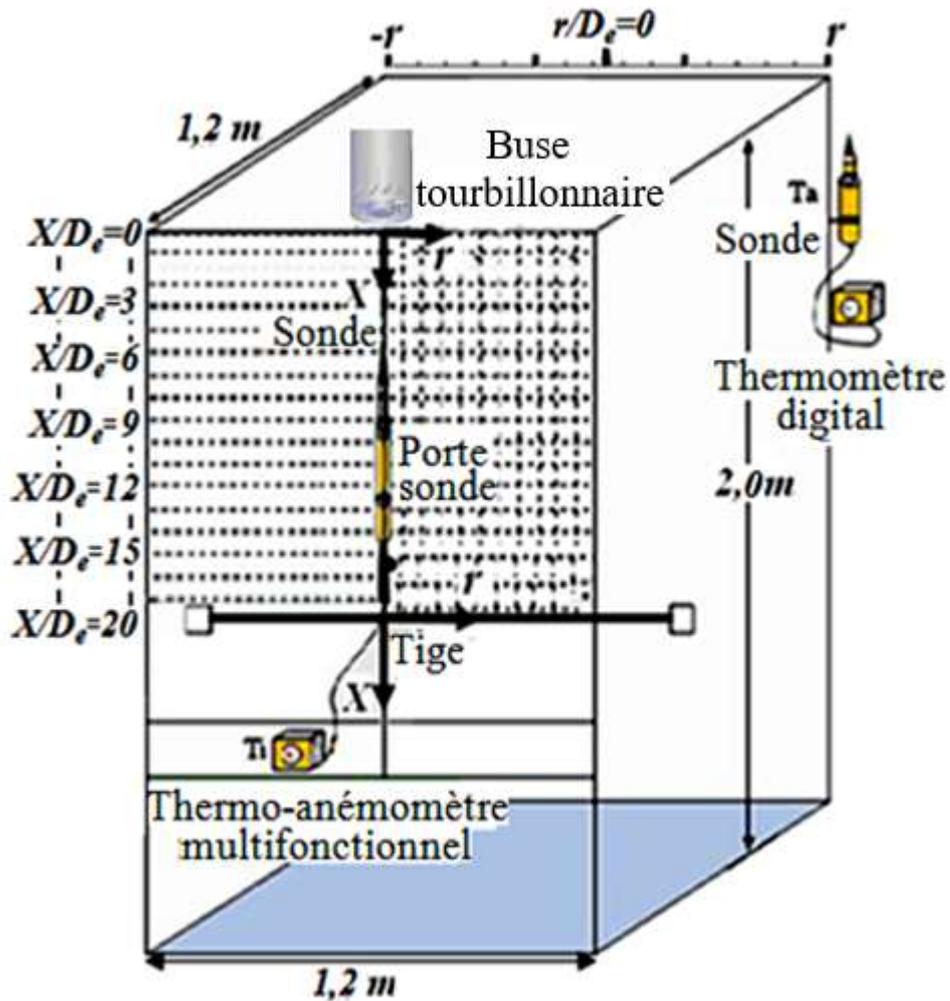


Figure. III.1: Schéma descriptif du banc d'essai.

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 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)

Table. III.1: Appareils de mesure.

La Figure 2 présente un diffuseur tourbillonnaire de soufflage placé à la sortie du conduit cylindrique de l'appareil de soufflage est composé de onze ailettes en aluminium disposées sur un support en aluminium aussi et de diamètre $d=0.022\text{m}$. Les ailettes sont orientées d'un angle de 30° avec l'axe du jet et 60° avec le plan de l'orifice de soufflage pour avoir le tourbillonnement. Ces dernières sont reliées à un obstacle fixe (support d'ailettes), derrière lequel se développe une zone de recirculation dont la longueur dépend du diamètre de dispositif de soufflage D (pour notre cas le diamètre de la conduite cylindrique est $D=0.052\text{m}$).

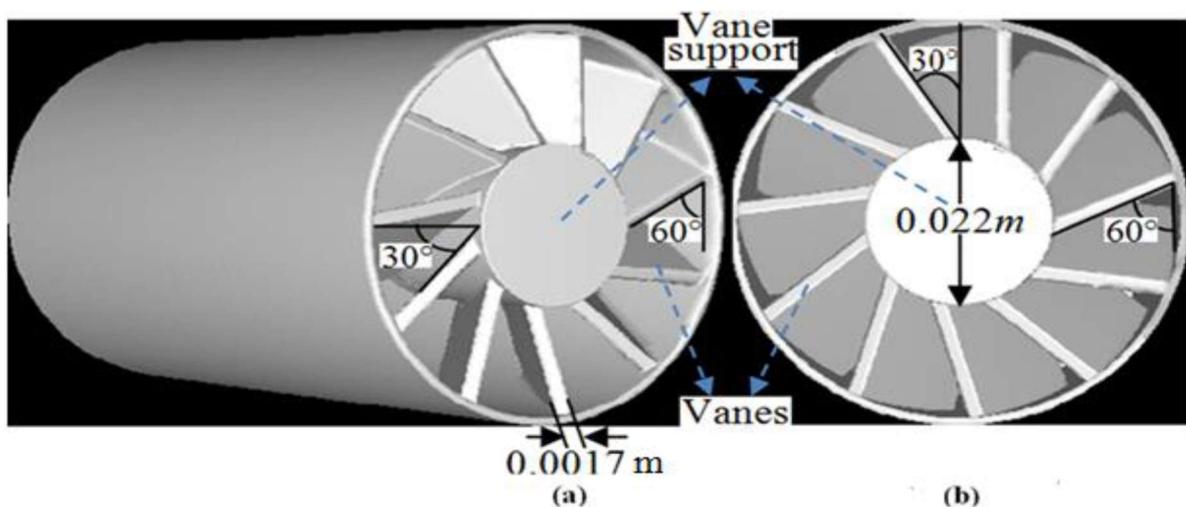


Figure. III.2 : (a) Photographie d'une buse lobée, (b) Géométrie du plan de soufflage (YZ).

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 tourbillonnaire

Le profil de vitesse réduite (T_r) d'un jet d'air tourbillonnaire, est présenté ci-dessous (voir Figure 2).

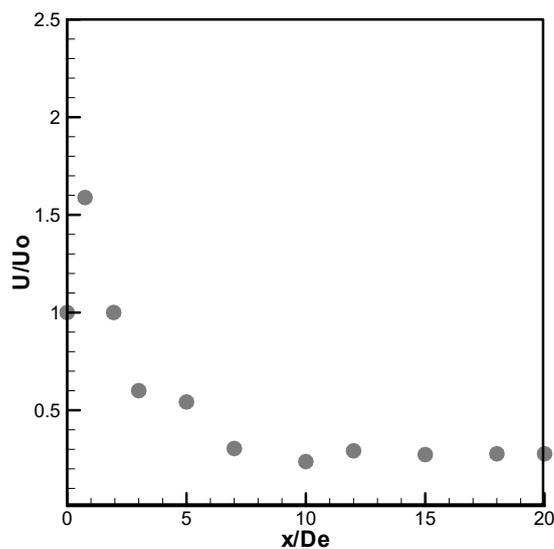


Figure. III.3: Profil de vitesse axiale d'un jet d'air tourbillonnaire.

La Figure 3 présente la distribution de la vitesse réduite (U_r) dans la direction axiale sur une distance de 20 diamètres équivalents pour un jet tourbillonnaire simple. Le profil de distribution de vitesse axiale, présente une courbe d'allure gaussienne dans l'intégralité du jet et met en évidence que la stabilité de la vitesse apparaît lorsque l'on s'éloigne de l'orifice de soufflage.

De la station axiale $x/D_e=0$ à $x/D_e=1$, on remarque que la vitesse augmente pour atteindre son maximum près du point $x/D_e =1$, cette augmentation de la vitesse est due à la conception du générateur de l'air, puisque les ailettes sont reliées à un obstacle fixe (support d'ailettes), derrière lequel se développe une zone de recirculation dont la longueur dépend du diamètre de dispositif de soufflage D_e (D_e désignant le diamètre de l'origine du soufflage). Puis la vitesse commence à décroître rapidement jusqu'à $3D_e$ de l'axe de soufflage, pour atteindre presque 60% de sa valeur initiale.

Entre la station $3 D_e$ et $5 D_e$, on observe une deuxième pente moins accentuée que la première (presque 50% de sa valeur initiale), puis la vitesse axiale subit une décroissance très rapide jusqu'à $10D_e$ de l'axe de soufflage, pour atteindre presque 20% de sa valeur initiale.

Au-delà de $x/D_e=10$ jusqu'à $x/D_e =20$, l'intensité s'affaiblit et se régularise de long de l'écoulement.

La diminution rapide de la vitesse axiale se traduit par un transfert de l'énergie cinétique vers la direction radiale. De ce fait, on peut déduire que l'écoulement s'élargit dans la direction radiale. Ce résultat permet de quantifier l'importance relative de l'inclinaison et de nombre des ailettes. Les champs d'écoulement de turbulence ont été induites par les ailettes de diffuseur. On constate que la variation des paramètres de turbulence est influencée par l'angle et le nombre des ailettes et les vitesses de rotation. On note que ce type de jet améliore de manière significative l'homogénéisation de l'écoulement.

III.3.2 Profils expérimentaux des vitesses radiales d'un jet d'air tourbillonnaire

Les mesures de profils de vitesse radiales ont été effectuées pour différentes stations ($x/D_e=3, 5, 7$ et 10), et sont reportées sur la Figure suivante.

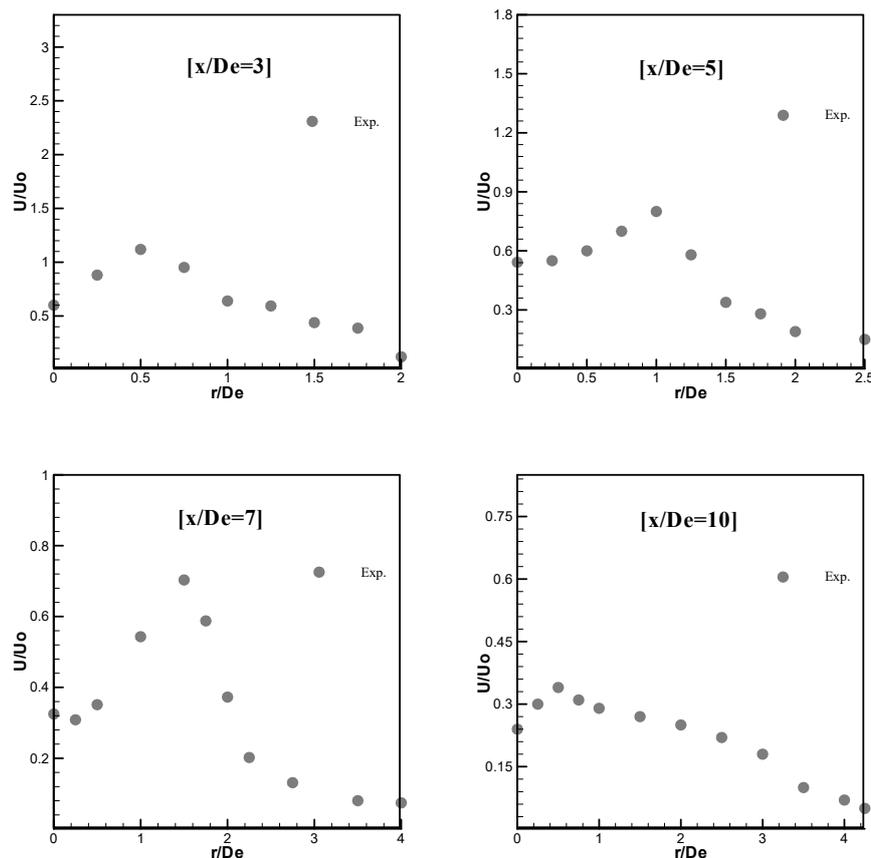


Figure. III.4: Profils de vitesse radiale d'un jet tourbillonnaire.

Premièrement, les mesures relevées pour la configuration du jet libre tourbillonnaire, ont été faits sur la totalité du jet. Les résultats obtenus montrent 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.4), on remarque :

- Pour la station $x/De=3$, et entre la position $r/De=0$ jusqu'à $r/De=0.5$, on remarque une augmentation de vitesse, tel que son maximum est près du point $r/De=0.5$, cette augmentation de la vitesse est due à la forme géométrique du diffuseur tourbillonnaire (support d'ailettes). Lorsque l'on s'éloigne du point $r/De=0.5$, on observe une décroissance de la vitesse. Cette diminution de la vitesse radiale est significative entre le point $r/De=0.5$ et $r/De=1$. Au-delà de $r/De=1$ jusqu'à $r/De=1.25$, on note que la vitesse diminue de façon linéaire. Entre la station $r/De=1.25$ et 1.75 , on observe une deuxième pente beaucoup moins accentuée que la

première, puis la vitesse subit une diminution rapide jusqu'à $2D_e$ de l'axe de jet, pour atteindre presque 10% de sa valeur initiale.

- Pour la station $x/D_e = 5$, et la position $r/D_e = 0$ jusqu'à $r/D_e = 0.25$, l'évolution de la vitesse radiale est augmentée progressivement et linéairement, donc, la vitesse dans cette zone est presque stable. A partir du point $r/D_e=0.25$, on constate que la vitesse augmente remarquablement pour atteindre son maximum près du point $r/D_e = 1$, cette augmentation de la vitesse est toujours due à la conception spécifique du diffuseur tourbillonnaire. Au-delà de $r/D_e=1$ jusqu'à $r/D_e = 1.5$, la vitesse radiale commence rapidement à décroître, pour atteindre presque 36% de sa valeur initiale. Une deuxième pente de vitesse est remarquée entre $r/D_e = 1.5$ et $r/D_e = 2$, mais moins accentuée que la première, puis le profil de la vitesse tend à s'aplatir puisque la vitesse se stabilise dans cette région et atteindre sa valeur minimale (presque 15% de sa valeur initiale).
- Pour la station $x/D_e=7$, on observe que la vitesse presque la même dans l'intervalle $[0-0.25]$, puis elle augmente très rapidement jusqu'à une valeur maximale (70% de sa valeur initiale) proche de $r/D_e = 1.50$. Cette augmentation de vitesse est due à la conception du diffuseur tourbillonnaire, car la périphérie de l'orifice de soufflage a une vitesse plus grande que son centre, donc c'est la raison pour laquelle la vitesse au centre du jet était faible. Juste après le point $r/D_e = 1.50$, la vitesse décroît rapidement et de façon significative jusqu'à $r/D_e = 2.3$, ce qui est justifié par l'absence du cône laminaire. Au-delà de $r/D_e=2.3$ jusqu'à $r/D_e = 3.5$, on remarque également une diminution de vitesse, mais moins accentuée par rapport la diminution dans l'intervalle $[1.5-2.3]$. A partir de $r/D_e = 3.5$, l'intensité de la vitesse s'affaiblit et se régularise de long de l'écoulement, pour atteindre sa valeur minimale, presque 6% de sa valeur initiale.
- Pour la station $x/D_e = 10$, on constate que la vitesse augmente rapidement entre le point $r/D_e = 0$ et 0.5 , pour atteindre sa valeur maximale (36% de sa valeur initiale), puis elle commence à diminuer progressivement jusqu'à $r/D_e = 3$. De la position $r/D_e = 3$ jusqu'à $r/D_e = 3.5$, la vitesse est diminuée, sachant que sa

stabilité est commencée juste après le point $r/D_e = 3.5$, pour prendre une valeur minimale 4% de sa valeur initiale.

La diminution de la vitesse dans la direction axiale est physiquement compréhensible, ce qui traduit par un transfert de l'énergie cinétique dans la direction radiale comme le montre les profils de la vitesse radiale (voir figure III.4). La diminution de la vitesse la direction radiale est due à l'effet du mélange de l'environnement avec le jet. L'analyse des profils axiaux et radiaux des vitesses mis a en évidence l'importance et le rôle que jouent l'inclinaison et le nombre des ailettes et le type de jet dans la performance de mélange de l'écoulement d'air. Le jet tourbillonnaire assure une relative régularité des profils, donc une importante homogénéisation d'air.

III.4 Conclusion

Basé sur l'analyse des profils de vitesse axiale et radiale, on a expliqué dans cet étude l'importance du nombre d'ailettes, le nombre de Reynolds, les vitesses initiales et la géométrie de l'écoulement qui sont influencent fortement les écoulements tourbillonnaires. Le jet tourbillonnaire (swirling jet), améliore bien la désertification dynamique de l'écoulement d'air. On constate également que le jet tourbillonnaire à angle d'inclinaison 60° assurent un meilleur épanouissement des vitesses radiales par rapport au jet classique. Donc, le jet tourbillonnaire vu son avantage du point de vue épanouissement serait plutôt adapté pour traite de grands espaces.

Conclusion Générale

Le soufflage par des diffuseurs, a géométrie tourbillonnaire, qui génèrent de grosse structures tourbillonnaires génératrices de mélange et l'un des meilleurs moyens passifs de mise en œuvre pratique dans le contrôle des jets d'air. Le type de jet tourbillonnaire, permet d'obtenir une forte induction ce qui conduit à une amélioration de la diffusion d'air pour assurer un bon confort, conduisant ainsi à une économie d'énergie.

Les jets tourbillonnaires sont intéressants car ils incorporent les caractéristiques des écoulements rotatifs et circulaires droits ; d'où l'avantage qu'ils procurent dans le séchage et la climatisation. Le jet libre a fait l'objet de nombreuses études et l'analyse des résultats obtenus a permis d'établir les éléments d'appréciations de base qui expliquent le comportement de ce type de jet. Tout au long de ce chapitre, nous avons fait une étude expérimentale d'un jet tourbillonnaire utilisé pour plusieurs applications comme le chauffage, ventilation et climatisation (système CVC).

Basé sur l'analyse des profils de vitesse axiale et radiale, on a expliqué dans cet étude l'importance du nombre d'ailettes, le nombre de Reynolds, les vitesses initiales et la géométrie de l'écoulement qui sont influencent fortement les écoulements tourbillonnaires. Le jet tourbillonnaire (swirling jet), améliore bien la désertification dynamique de l'écoulement d'air. On constate également que le jet tourbillonnaire à angle d'inclinaison 60° assurent un meilleur épanouissement des vitesses radiales par rapport au jet classique. Donc, le jet tourbillonnaire vu son avantage du point de vue épanouissement serait plutôt adapté pour traite de grands espaces.

Référence bibliographique

- [1] BENNIA A., LOUKARFI L., KHELIL A., MOHAMEDI S., BRAIKIA M., NAJI H., “Contribution to the Experimental and Numerical dynamic Study of a Turbulent Jet Issued from lobed Diffuser”, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2016, 9(6): p 2957-2967.
- [2] BENNIA A., LOUKARFI L., KHELIL A., MOHAMEDI S., BRAIKIA M., NAJI H., “Experimental and Numerical Investigation of a turbulent lobed diffuser jet: Application to residential comfort“, *Mechanics & Industry*, 2018.
- [3] Hu, H. Kobayashi, T. Taniguchi, N., A. “study on a lobed jet mixing flow by using stereoscopic particle image velocimetry technique“, *Physics of Fluids*, 2001. 13: p 342.
- [4] Dia, A., Simulation de jets d’air lobes pour l’optimisation des Unités Terminales de Diffusion d’Air, université de la rochelle, *Doctorat en sciences*, 2012.
- [5] KHERCHI F, LABACHI Y., Amélioration de la diffusion d’air dans les locaux à usage d’habitation par l’application d’un jet d’air tourbillonnaire, Université de Bordj Bou Arreridj, 2020.
- [6] ROUDANE, M., Etude expérimentale et numérique d’un multi jet tourbillonnaire confiné et chauffé, Éditions Université Mohamed Boudiaf d’Oran, Doctorat en science, 2014.
- [7] www.france.air.com. Services réglementation règles de l’art en diffusion. La diffusion par type.
- [8] www.sagicofigm.com. Climatisation. Diffuseurs 2012.
- [9] Zaaraoui Abdelkader, Tahar Abbas Miloud ; Modélisation numérique d’un multi-jet turbulent libre, mémoire magistère, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie 2009.
- [10] GICQUEL, L., Simulation numérique des grandes Echelles de jets impactants. Rapport de stage de fin d’études au sein du département CFD du CERFACS, Francis SHUM-KIVAN-Promotion 2013.
- [11] BRAIKIA, M., LOUKARFI, L., KHELIL, A., Homogénéisation des ambiances par jets tourbillonnaires multiples, Éditions Universitaires Européennes, 2012.
- [12] ABRAMOVICH, G. N., The theory of turbulent jets, The MIT press, Cambridge, 1963.

Référence bibliographique

- [13] **Daniel Thibault** : “ Etude du refroidissement par impact de jets à travers une paroi mince et avec un écoulement cisailant amont : application aux aubes de turbines”. Engineering Sciences. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d’Aérotechnique Poitiers, 2009.
- [14] **AOUCHICHE A., HADDADI A.**, ETUDE NUMERIQUE DU REFROIDISSEMENT D’UNE PLAQUE CHAUFFEE PAR UN JET L’IMPACTANT DANS UN CANAL, Université de Tizi-Ouzou, 2016.
- [15] **C.Cornaro, A. Fleischer, et R. Goldstein**: “Flow visualization of around jet impinging on cylindrical surfaces,” Exp. Thermal and Fluid Science, vol. 20, no. 2, p. 66–78, 1999.
- [16] **C. Popiel et L. Boguslawski**: “Flow structure of the free round turbulent jet in the initial region,” J. Fluid Mech., vol. 90, p. 531–539, 1979.
- [17] **RIVIERE, N.**, Etude expérimentale d’une injection turbulente: application au jet impactant une surface libre, Thèse de Docteur, Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l’Ingénieur, Université de Bordeaux I, 2 avril 2008.
- [18] **YULE, A.J.**, Large-scale structure in the mixing layer of a round jet. Journal of Fluids Mechanics, 1978, 89 (3): pp. 413-432.
- [19] **HUERRE, H.**, Perturbed free shear layers. Annual Review of Fluid Mechanics, 1984, 16:pp. 365-424.
- [20] **BEER, J., CHIGIER, M., N, A.**, Swirling Flow in Combustion Aerodynamics. Edition Krieger Malabar, Florid 1972: pp.100-146.
- [21] **FAROKHI, S., TAGHAVI, R., RICE, E. J.**, Effect of initial swirl distribution on the evolution of a turbulent jet. AIAA Journal 1989, 27: pp. 700-706.
- [22] **SHEEN, H. J., CHEN, W. J., JENG, S. Y., HUANG, T. L.**, Correlation of swirl number for a radial type swirl generator, Experimental thermal and fluid science 1996, 12: pp.444-451.
- [23] **MATHUR, M. L., MACCALLUM, N. R. L.**, Swirling air jets issuing from vane swirls. Part I: free jets. Journal of the Institute of Fuel 1967, 40: pp. 214-225.

- [24] **ATESHKADI, A., MCDONELL, V. G., SAMUELSEN, G. S.**, Effect of hardware geometry on gas and drop behavior in a radial mixer spray. Twenty-Seventh Symposium International on Combustion 1985, the Combustion Institute, 1985-1992.
- [25] **BRODA, J. C., SEO, S., SANTORA, R. J., SHIRHATTIKAR, G., YANG, V.**, An experimental study of combustion dynamics of a premixed swirl injector. Twenty-Seventh Symposium International on Combustion 1998, the Combustion Institute, 1985-1992.
- [26] **ROSE, W. G.**, A swirling round turbulent jet. *Journal of Applied Mechanics* 1962, 29:pp. 615-625.
- [27] **LOPEZ J. M.**, Axisymmetric vortex breakdown. Part1: Confined swirling flow, *J. Fluid Mech.* 1990, 221: pp. 553-552.
- [28] **LUCCA-NEGRO, O., O'DOHERTY, T.**, Vortex Breakdown: a review. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2001, 27: pp. 431-481.
- [29] **SHI, R. X., CHEHROUDI, B.**, Velocity Characteristics of a confined highly turbulent swirling flow near a swirl plate. *J. of Fluid Eng.* 1994, 16: pp. 685-693.
- [30] **CHIGIER, N. A., BEER, J. M.**, Velocity and static pressure distributions in swirling airjets issuing from annular and divergent nozzles. *Journal of Basic Engineering* 1964: pp. 788-796.
- [31] **STEPHENS, J., ACHARYA, S., GUTMARK, E. J.**, An experimental study: Swirl stabilized spray combustion with active forcing. 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno 1999: pp. 99-330.
- [32] **Leuckel W., Fricker N.** The characteristics of swirl-stabilized natural gas flames. Part I: Different flame types and their relation to flow and mixing pattern. *Journal of the Institute of Fuel* 1976, 103-112.
- [33] **Panda J., McLaughlin D. K.** Experiments on the instabilities of a swirling jet. *Phys. Fluids* 1994, 6, 263-276.
- [34] **Martin J. E., Meiburg E.** Nonlinear axisymmetric and three-dimensional vorticity dynamics in a swirling jet model. *Phys. Fluids* 1996, 8, 1917-1928.

- [35] **Billant P., Chomaz J. M., Huerre P.** Experimental study of vortex breakdown in swirling jets. *J. Fluid Mech.* 1998, 376, 183-219.
- [36] **CHIGIER, N. A., CHERVINSKY, A.,** Experimental investigation of swirl vortex motioning jets. *Journal of Applied Mechanics* 1967: pp. 443-451.
- [37] **BENJAMIN, T. B.,** Theory of the vortex breakdown phenomenon. *J. Fluid Mech.* 1962, 14: pp. 593-629.
- [38] **SARPKAYA, T.,** on stationary and travelling vortex breakdowns. *J. Fluid Mech.* 1971, 45: pp. 545-559.
- [39] **ESCUDIER, M. P., KELLER, J. J.,** Recirculation in swirling flow: a manifestation of vortex breakdown. *AIAA Journal* 1985, 23: pp 111-116.
- [40] **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.
- [41] **PRATTE, B.D., KEFFER, J. R.,** The swirling turbulent jet. *J of engineering transactions of the J.S.M.E.* 1972: pp. 739-748.
- [42] **FU, S.B. E., LAUNDER, M., LESCHZINER, A.,** Modeling strongly swirling recirculation jet flow with Reynolds-stress Transport Closures. *Sixth Symposium on Turbulent Shear Flows, Toulouse, France* 1987.
- [43] **BRAIKIA, M., LOUKARFI, L., KHELIL, A.,** Homogénéisation des ambiances par jets tourbillonnaires multiples, *Éditions Universitaires Européennes*, 2012.
- [44] **ZAMAN, K. B. M. Q., HUSSAIN, A. K. M. F.,** Vortex pairing in a circular jet un decontrolled excitation. Part 1 General jet response. *J. Fluid Mech* 1980, 101: pp 449-491.
- [45] **SPAZZINI, P.G., TODDLE, V., SANDBURG, M.,** Passive control of a free jet. In *Room Vent, 8th International Conference on air distribution in rooms.* Copenhagen, Denmark, 2002.
- [46] **DIA, A.,** Simulation de jets d'air lobés pour l'optimisation des Unités Terminales de Diffusion d'Air, *Université de La Rochelle. Doctorat en sciences*, 2012.
- [47] **NASTASE, I.,** Analyse des jets lobés en vue de leur intégration dans les Unités Terminales de Diffusion d'air, *Université de La Rochelle*, 2007.

- [48] **VOLCHKOV, E.P.**, An experimental study of the flow stabilization in a channel with a swirled periphery jet, *Intentional Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43: pp. 375-386.
- [49] **JEBAMANI, D. R., KUMAR, T.M. N.**, Studies on variable swirl intake system for diesel engine using computational fluid dynamics, *Thermal Science*, 2008, 12 (1) : pp. 25-32.
- [50] **HUANG, Y., YANG, V.**, Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35: pp. 293-364.
- [51] **SLIMANI Mouhamed** : "Modélisation numérique d'un multi-jet turbulent liber", Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- [52] **BENNIA, A., LOUKARFI, A., KHELIL, A., MOUHAMADI, S., BRAIKIA, M., NAJI, H.**, Experimental and numerical investigation of a turbulent lobed diffuser jet: application to residential comfort, *mechanics & industry*, 2018, 19 (1): pp.104-115.
- [53] **Protić Z. D.** Novel methods for axial fan impeller geometry analysis and experimental investigations of the generated swirl turbulent flow. *Thermal Science* 2010, 14(1), 125-139.
- [54] **Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N.** Swirl Flows. Abacus Press 1984, London.
- [55] **Huang Y., Yang V.** Dynamics and Stability of Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustion. *Progress in Energy and Combustion Science* 2009, 35(4), 293-364.
- [56] **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.
- [57] **ABDEDDAIM Amel.**, Gestion des échanges thermiques des éléments électroniques, Mémoire de master, Université de Biskra, 2019.
- [58] **GUECHI Fairouz.**, Etude 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.
- [59] **GHADBANE Abdelouahab.**, Etude numérique de l'écoulement avec transfert de chaleur d'un nanofluide dans un échangeur de chaleur, Université de M'sila, 2019.
- [60] **BENNIA, A., RAHAL, S.**, La convection naturelle dans une cavité simulant un thermosiphon, Editions, Universitaires Europeennes, saarbrücken (Allemagne), 2014: pp.1-124.

Référence bibliographique

[62] **Kadir H.**, Simulation numérique de l'influence de la géométrie sur l'écoulement issu d'un diffuseur tourbillonnaire, Université de Bouira, Juin 2016.

[63] **BENNIA, A., LOUKARFI, A., KHELIL, A., MOUHAMADI, S., BRAIKIA, M., NAJI, H.**, Experimental and numerical investigation of a turbulent lobed diffuser jet: application to residential comfort, *Mechanics & Industry*, 2018, 19 (1): p 104-115.

[64] **A BENNIA., H FELLOUAH., KHELIL A., LOUKARFI L., NAJI H.**, “Experimental and large-eddy simulations of lobed and swirling turbulent thermal jets for HVAC’s Applications’’, *Journal of applied Fluid Mechanics*, 2020 13(1): p 103-117.

[65] **A BENNIA., L LOUKARFI., A KHELIL., S MOUHAMADI., M MBRAIKIA., NAJI H.**, Experimental and numerical investigation of a turbulent lobed diffuser jet: application to residential comfort, *Mechanics & Industry*, 2018, 19 (1): p 104-115.

Résumé

Dans ce travail on a présenté une étude expérimentale d'un jet tourbillonnaire utilisé pour plusieurs applications comme le chauffage, ventilation et climatisation (système CVC). Basé sur l'analyse des profils de vitesse axiale et radiale, on a expliqué dans cet étude l'importance de ce type de jet « tourbillonnaire » dans le système CVC. Le jet tourbillonnaire (swirling jet), améliore bien la désertification de l'écoulement d'air. On constate également que le jet tourbillonnaire à angle d'inclinaison 60° assurent un meilleur épanouissement des vitesses radiales par rapport au jet classique. Donc, le jet tourbillonnaire vu son avantage du point de vue épanouissement serait plutôt adapté pour traite de grands espaces.

Mots clés : jet tourbillonnaire, condition de confort, habitat, homogénéisation thermique, Simulation numérique.

ملخص

قدمنا في هذه المذكرة بدراسة تجريبية لتدفق الهواء عبر ناشر دوامي (دوراني) بغرض تحسين انتشار الهواء داخل المباني السكنية وكذا وسائل النقل. ومن خلال هذه الدراسة يمكن القول أن استعمال ناشر الهواء الدوامي (الدوراني) في المباني السكنية وحتى وسائل النقل بغرض التسخين أو التبريد أعطى نتائج جد مرضية من حيث تجانس الهواء داخل الغرفة وبذلك توفير الراحة الحرارية للأشخاص.

الكلمات المفتاحية :

ناشر الهواء الدوامي (الدوراني). الراحة الحرارية. التجانس الحراري. المحاكات العددية.