

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE 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 Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par

➤ **BOURIA MOHAMMED AMOKRANE**

➤ **BACHA MOHAMED**

Intitulé

***Étude numérique dynamique d'un jet d'air tourbillonnaire :
Amélioration de la diffusion d'air dans les immeubles résidentiels***

Soutenu le : 25/06/2022

Devant le Jury composé de :

| <i>Nom & Prénom</i> | <i>Grade</i> | <i>Qualité</i> | <i>Etablissement</i> |
|-----------------------------|--------------|------------------|----------------------|
| <i>Dr. ZAOUI FARES</i> | <i>MCB</i> | <i>Président</i> | <i>Univ-BBA</i> |
| <i>Dr. BENNIA ABDERAZAK</i> | <i>MCA</i> | <i>Encadreur</i> | <i>Univ-BBA</i> |
| <i>Dr. REFFAS ABDERAHIM</i> | <i>MCA</i> | <i>Examineur</i> | <i>Univ-BBA</i> |
| <i>Dr. MEGHLAOU I ISSAM</i> | <i>MCB</i> | <i>Examineur</i> | <i>Univ-BBA</i> |

Année universitaire :2021- 2022

Remerciement

*Dans le cadre de ce travail, nous remercions Dieu Tout Puissant qui nous a permis de réaliser ce mémoire et de le compléter. Nous remercions également le Professeur **BENNIA Abderezak** qui nous a apporté tout son soutien pour mener à bien ce travail sans oublier les membres du jury et nous remercions également tous les professeurs qui nous ont soutenus tout au long de ce travail notre parcours en trois études.*

Dédicaces

Nous dédions ce travail aux deux personnes les plus chères au monde qui sont nos parents, que Dieu les préserve, et à nos frères et sœurs, et à tous nos amis proches et camarades de classe.

Résumé :

Ce mémoire concerne une étude numérique du jet d'air tourbillonnaire simple, appliqué au confort thermique dans les locaux à usage d'habitation. L'objectif visé dans ce travail est l'amélioration de l'efficacité de la diffusion d'air dans la zone d'occupation à moindre coût, par un moyen passif de contrôle. Afin d'améliorer les prévisions des modèles de turbulence, on a testé deux modèles de turbulences : le modèle de Smagorinski-Lilly (LES/S-L) et le modèle de Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (LES/WALE) en vue d'opter pour le modèle le plus adéquat relatif à ce type d'écoulement. Les résultats obtenus avec le modèle de turbulence (LES/S-L), est en bon accord avec les résultats expérimentaux. Elles montrent l'intérêt de la caractérisation de ce type de jet pour son application aux systèmes de CVC (chauffage, ventilation et Climatisation).

Mot clé : Jet tourbillonnaire, systèmes de CVC, confort, qualité d'air.

Aspect :

This thesis concerns a numerical study of the simple swirling air jet, applied to thermal comfort in residential premises. The objective of this work is to improve the efficiency of air diffusion in the occupied zone at a lower cost, by a passive means of control. Two turbulence models were tested to improve the predictions of the turbulence models: the Smagorinski-Lilly (LES/S-L) model and the Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (LES/WALE) model to choose the most appropriate model for this type of flow. The results obtained with the turbulence model (LES/S-L), agree with the experimental results. They show interest in the characterization of this type of jet for its application to HVAC systems (heating, ventilation, and air conditioning).

Keyword: swirling –jet, HVAC system, comfort.

ملخص

تطرقنا في هذه المذكرة لدراسة عددية لتدفق الهواء عبر ناشر دوامي (دوراني) وهذا من أجل تحسين إنتشار الهواء داخل الأماكن الإستعمال اليومي. أثبتت النتائج العددية أن نوع رصد الدوامات (LES/S-L) يتفق جيدا مع النتائج التجريبية. بينت النتائج التي توصلنا إليها في هذا العمل أن إستخدام ناشر الهواء الدوامي (دوراني) في الأماكن ذات الإستعمال اليومي سواء لغرض التسخين أو التبريد أعطى نتائج جد مرضية من حيث تجانس الهواء وإنتشاره داخل الأماكن المغلقة.

الكلمات المفتاحية: ناشر الهواء الدوامي (دوراني).

Liste Figures

| | |
|---|----|
| Figure I-1 Système de diffusion par mélange. | 7 |
| Figure I-2 Système de diffusion par déplacement d'air. | 8 |
| Figure I-3 Angles d'expansion d'un jet | 11 |
| Figure I-4 Allure de profils gaussiens | 12 |
| Figure I-5 Schéma représentative de la structure du jet libre | 13 |
| Figure I-6 Différentes instabilités agissant sur un jet | 15 |
| Figure I-7 Représentation du jet tourbillonnant | 21 |
| Figure I-8 Représentation du jet tourbillonnant en coordonnées cylindriques | 21 |
| Figure II-1 Niveau de modélisation du spectre de la turbulence associé à différentes approches de modélisation de la turbulence | 27 |
| Figure II-2 : Exemples de modèle de turbulence RANS | 28 |
| Figure III-1 Schéma descriptif du banc d'essai | 39 |
| Figure III-2 Schéma du mode de génération de tourbillonnement | 41 |
| Figure III-3 Domaine de calcul et contrainte de fonctionnement. | 42 |
| Figure III-4 Type de maillage utilisé par le code Fluent | 45 |
| Figure III-5 Les différentes formes géométriques des mailles 3D utilisées par Fluent ... | 47 |
| Figure III-6 Maillage du domaine étudié | 47 |
| Figure III-7 Comparaison des profils expérimentaux et numériques de vitesse axiale. ... | 49 |
| Figure III-8 Comparaison des profils expérimentaux et numériques de la vitesse radiale pour la station $X/D_e = 3$ | 50 |
| Figure III-9 Comparaison des profils expérimentaux et numériques de la vitesse radiale pour la station $X/D_e = 10$ | 50 |

Liste Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau II-1 Différentes stratégies de contrôle des écoulements | 23 |
| Tableau III-1 Appareils de mesure..... | 40 |
| Tableau III-2 Propriétés physiques de l'air..... | 48 |

Abréviations

| Symboles | Désignation |
|-------------|--|
| U_0 | Vitesse initiale d'un diffuseur de soufflage [m/s]. |
| Re | Nombre de Reynolds [-] |
| De | 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 [-]. |
| U_r | Vitesse réduit [-]. |
| ν | Viscosité cinématique du fluide [m ² /s]. |
| RSM | Reynolds stress model. |
| LES | Large Eddy simulation |
| LES/S-L | Model de smagorinski-lilly. |
| LES/WALE | Model de wall-adapting local eddy-viscosity. |

Abréviations

| | |
|------|--|
| RANS | Reynolds average Navier Stokes. |
| DNS | Direct numerical simulation. |
| RMSE | Erreur quadratique moyenne. |
| CVC | Chauffage, ventilation et climatisation. |

Sommaire

Contents

| | |
|---|----|
| I. Introduction générale : | 1 |
| I. Généralités et recherches bibliographiques : | 4 |
| I.1 Introduction : | 4 |
| I.2 Diffusion d'air : | 5 |
| I.2.1 Critères de confort : | 5 |
| I.2.2 Types de diffusions : | 6 |
| I.2.3 Critères de choix du diffuseur : | 8 |
| I.3 Aperçu général sur les jets : | 9 |
| I.3.1 Grandeurs influençant le développement du jet simple : | 9 |
| I.3.2 Caractéristiques des jets : | 10 |
| I.4 Profils Gaussiens : | 11 |
| I.5 Structure du jet libre axisymétrique : | 12 |
| I.6 Différents types de l'instabilité du jet : | 14 |
| I.7 Tourbillonnement (swirl) : | 15 |
| I.7.1 Nombre de tourbillonnement (swirl) : | 15 |
| I.7.2 Techniques de génération du tourbillonnement : | 16 |
| I.7.3 Influence du tourbillonnement : | 21 |
| I.8 Contrôle des jets : | 22 |
| I.9 Analyse de quelques travaux antérieurs : | 23 |
| I.10 Conclusion : | 25 |
| II. Modèle physique et formulation mathématique : | 26 |
| II.1 Introduction : | 26 |
| II.2 Les méthodes numériques de discrétisation les plus utilisées : | 26 |
| II.3 Simulation Numérique en Mécanique des Fluides : | 26 |
| II.3.1 RANS : | 27 |
| II.3.2 LES : | 28 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| II.3.DNS : | 28 |
| II.4.Équations du modèle mathématique : | 30 |
| II.4.1.Équations gouvernantes dimensionnelles : | 30 |
| II.4.2.Équations gouvernantes adimensionnelles : | 31 |
| II.4.2.1.Équation de continuité : | 32 |
| II.4.2.2.Équations de quantité de mouvement : | 32 |
| II.4.3.Équations et contraintes de Reynolds : | 32 |
| II.5.Simulation des Grandes Echelles : | 34 |
| II.5.1.Modèles sous-maille : | 34 |
| II.5.2.Modèle de Smagorinski-Lilly (LES/ S-L) : | 35 |
| II.5.3.Modèle de Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (LES/WALE): | 36 |
| II.6.Conclusion : | 36 |
| III.Résultats et discussions : | 38 |
| III.1.Introduction : | 38 |
| III.2.Banc d'essai et conditions expérimentales : | 38 |
| III.3.Résultats numériques : | 41 |
| III.3.1.Conditions aux limites : | 42 |
| III.3.2.Maillage : | 44 |
| III.3.3.Hypothèses fondamentales et simplificatrices : | 47 |
| III.3.4.Validation des résultats : | 48 |
| III.4.Sources d'erreur numérique : | 51 |
| III.5.Conclusion : | 52 |
| IV.Conclusion Générale : | 53 |

Sommaire

Introduction Générale

I. Introduction générale :

La qualité de l'air intérieur des locaux à usage d'habitation est une question de confort pour les personnes. Le confort dans un environnement intérieur peut avoir un impact important et direct sur la concentration, la performance et la santé des occupants. Pour cela, les ingénieurs travaillent au développement de systèmes CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation) plus efficaces qui permettent de fournir une bonne qualité de l'air pour obtenir une atmosphère appropriée [1].

Cependant, le fonctionnement des équipements de conditionnement et de ventilation d'air peut induire certaines nuisances comme l'effet de souffle des climatiseurs usuels, qui peut être tellement désagréable, qu'au-delà d'un seuil de vitesse de soufflage, l'occupant peut avoir des maux de tête et donc serait dans une situation pour le moins "inconfortable". Ces insuffisances ont permis d'utiliser un jet d'air tourbillonnaire dans l'ambiance et issu d'un diffuseur à pales orientables, réalisant ainsi un flux d'air pluridirectionnel. L'analyse des études antérieures a permis de retenir les avantages obtenus grâce à ce type de diffuseur pour la diffusion d'air, l'homogénéisation et la qualité du mélange de l'ambiance traitée [2].

L'objectif des travaux menés au LCEMSM (Laboratoire Contrôle Essai Mesure et Simulation Mécanique) depuis 2013 sur le contrôle passif des jets, est de rechercher des moyens efficaces permettant l'amélioration de l'auto-induction des jets en vue de leur intégration dans les unités terminales de diffusion des appareils de traitement d'air.

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 « sous le

numéro : J0201/03/02/03 intitulé : Méthodes et Modes de Soufflage Tourbillonnaire Multi jets en Modes Libres et confiné appliqué au confort thermique et à la qualité de mélange, sous le numéro : J0300720060019 intitulé : Etude expérimentale et numérique du multi-jet à fort taux de tourbillonnement, et sous le numéro : J03007201400110 intitulé : Caractérisation des jets turbulents dans les diffuseurs à ailettes lobés », projets coordonnés par le LCEMSM département de génie mécanique, université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie. Il s'agit d'un diffuseur de type tourbillonnaire basé sur le contrôle passif du mélange du jet d'air à l'air ambiant [6].

L'optimisation géométrique visée n'est pas réalisable par la seule partie expérimentale pour des caractères onéreux de la démarche. Ce fait nous conduit dans le cadre de notre travail à s'intéresser à la prédiction dynamique d'un jet tourbillonnaire libre ou en interaction par le calcul numérique aux moyens de code de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics), utilisant la résolution des équations de Navier-Stokes. Ainsi, les résultats expérimentaux obtenus ont été confirmés grâce au logiciel "Ansys-Fluent", basé sur la méthode des volumes finis [6].

L'objectif visé de notre travail est l'amélioration de l'homogénéisation de l'air dans une pièce d'habitation à moindre coût, par un jet tourbillonnaire libre.

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 numérique pour une configuration de jet simple tourbillonnaire dans un milieu libre (non confiné).

Chapitre I

Généralités et recherches bibliographique

I. Généralités et recherches bibliographiques :

I.1 Introduction :

La diffusion de l'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 ce sont des dispositifs de diffusion d'air basé sur les jets tourbillonnaires. [5]

Les jets tourbillonnaires sont utilisés depuis longtemps dans les domaines de l'aéronautique et de la combustion, mais maintenant les jets d'air issus de diffuseurs tourbillonnaires se mélangent mieux l'air ambiant par rapport aux diffuseurs classiques utilisés en ventilation, chauffage et climatisation des locaux. [5]

Cette étude porte donc sur des formes de systèmes de diffuseurs et sur les tourbillons d'air génères afin d'optimiser la diffusion d'air. L'idée est de mettre au point des systèmes de soufflage rendant les jets d'air tourbillonnaires plus efficaces en termes de mélange. Ces systèmes devraient permettre une stabilité du jet et une répartition spatiale optimale de la charge froide de rafraîchissement. Ils offriront également la possibilité d'une climatisation à basse température, ce qui permettra une réduction des débits de soufflage et par conséquent une réduction de la consommation énergétique. La réduction du débit conduira également à un gain de confort thermique. Le bon choix de diffuseur permet de contrôler la stabilité du jet au soufflage et conduit à une meilleure diffusion d'air introduit dans une chambre. En climatisation, un jet d'air froid plus stable permet d'avoir une climatisation basse température, donc plus économe en énergie, ce qui induit aussi une réduction de la taille des appareils et du réseau de distribution d'air et aussi une meilleure préservation de l'environnement [2]

Nous présentons dans ce chapitre une étude bibliographique sur les jets tourbillonnaires et sur les différents paramètres géométriques qui peuvent influencer l'écoulement d'air. Elle permettra dégager la configuration recherchée, pour une bonne homogénéisation de l'air ambiant [5].

I.2 Diffusion d'air :

La nécessité de recourir à des simulations numériques en mécanique des fluides est aujourd'hui présente dans divers domaines d'applications (automobile, aéronautique, thermique par exemple) pour un certain Nombre de raisons.

Tout d'abord, la simulation numérique permet de comprendre les phénomènes mis en jeu dans l'écoulement : ainsi l'accès à certaines informations est possible (calcul d'écoulement) et donc de visualiser en 3D. Elle donne le test d'impact de nombreux paramètres sans qu'il soit nécessaire de reconstruire l'ensemble du banc expérimental. On conçoit évidemment qu'il est plus aisé, par exemple, de modifier un maillage de turbine à gaz plutôt que de faire construire de nouvelles pièces. Les simulations numériques peuvent également permettre d'observer les comportements d'un écoulement dans une géométrie à plus grande échelle (scaling up) sans pour autant nécessiter la construction de pilotes encombrants [15].

Il existe trois types de simulation numérique en Mécanique des Fluides : RANS (Reynolds Average Navier Stokes), LES (Large Eddy Simulation) et DNS (Direct Numerical Simulation).

I.2.1 Critères de confort :

Le confort est aussi lié à la perception des occupants, aux ressentis nés de l'ambiance et de l'environnement dans lesquels ils vivent. Suivant ces définitions, on peut lui attribuer quatre critères :

- 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 [8].

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 [8].

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 [9].

d - Qualité d'air :

C'est l'intérieur d'un local affecte la santé humaine et par conséquent elle affecte son travail et son efficacité, la diffusion d'air contribue à une meilleure qualité d'air dans les locaux par son efficacité de brassage. La qualité d'air intérieur est néanmoins régie par une norme européenne EN 13779 qui s'attache à imposer un environnement intérieur confortable et sain en utilisant des systèmes de diffusion d'air très efficaces qui permettent de contribuer à une meilleure qualité d'air dans les locaux par son efficacité et de réduire la pollution à la place des personnes [9].

I.2.2 Types de diffusions :

Les types de diffusion les plus importants sont :

-  La diffusion par mélange ;
-  La diffusion par déplacement d'air.

A - Diffusion par mélange :

La diffusion d'air par mélange est le type de diffusion utilisé le plus couramment. L'air est introduit à une vitesse suffisante dans le local pour se mélanger avec l'air ambiant et

atteindre la zone d'occupation, avec une vitesse résiduelle et un niveau sonore confortable. Avec cette méthode, la température et la concentration des polluants sont uniformes dans le local. Un effet de déplacement est obtenu lorsque les unités de soufflage et d'extraction sont situées à l'opposé. Les charges thermiques ont une grande influence sur la circulation d'air et il faut donc choisir l'emplacement et le type d'UTD (unité terminale de diffusion) en conséquence.

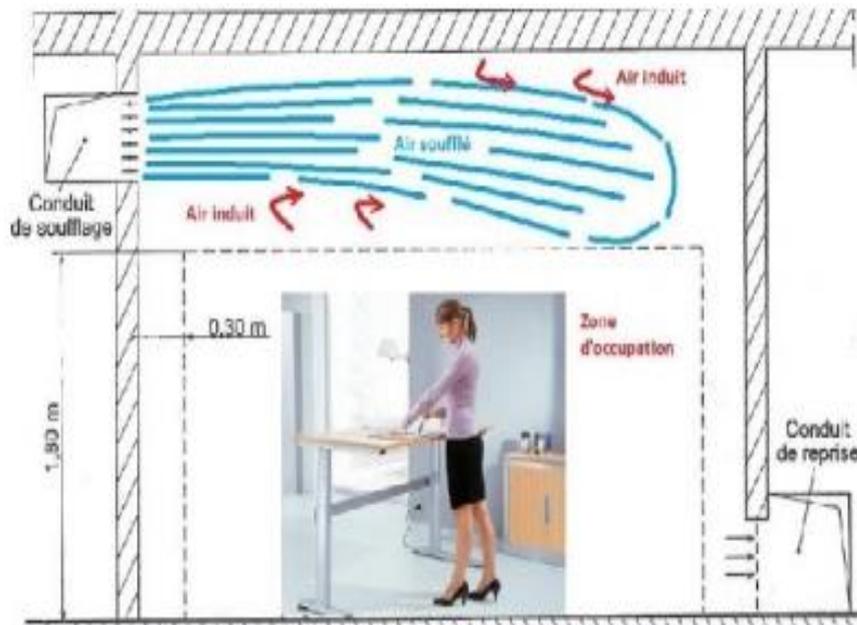


Figure I-1 Système de diffusion par mélange [5].

b - Diffusion par déplacement d'air :

Le système de diffusion par déplacement d'air repose sur la loi suivante (simple) : “l'air chaud, plus léger que l'air froid (ou ambiant) a tendance à s'élever”. L'air frais (ou rafraîchi) est diffusé à hauteur du sol, dans la zone d'occupation. Au contact de sources chaudes (personnes, machines), il se réchauffe et monte en partie haute du local. La diffusion d'air est effectuée directement dans la zone à traiter À faible vitesse (0,2 à 0,4 m/s), À une température légèrement inférieure à la température ambiante.

Seuls les apports thermiques dans la zone d'occupation (0 à 2 m) sont traités, ce qui permet de réduire le débit et la puissance froide à mettre en œuvre pour la climatisation d'un local par rapport à une solution traditionnelle. Il est possible également d'utiliser le froid libéré.

Le confort de ce système est très important : la faible vitesse de sortie d'air permet d'obtenir une faible vitesse d'air résiduelle et un faible niveau acoustique dans la zone d'occupation.

D'autre part, la diffusion par déplacement d'air permet d'obtenir une meilleure qualité d'air et de dépolluer plus facilement une zone que par une méthode traditionnelle. Les polluants sont évacués en partie haute du local et ne traversent qu'une seule fois la zone d'occupation avant d'être rejetés vers l'extérieur.

Le système d'orientation de la veine d'air intégré dans les diffuseurs à déplacement permet de les intégrer à des éléments décoratifs qui ne sont pas forcément dans l'axe.

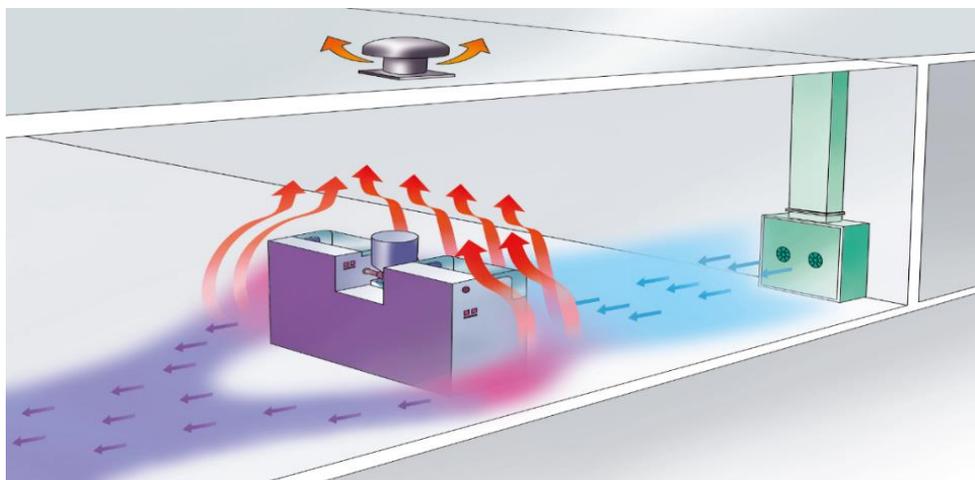


Figure I-2 Système de diffusion par déplacement d'air [30].

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 charge. Ceci peut cependant ne pas être suffisant à cause de bruits éventuels engendrés dans l'installation : par ex. Ventilateur registres fermés partiellement, variations de section des conduits trop brusques.... etc [15].

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 cisailles libres classiques au même titre que les sillages et les vagues. On parle de jet des 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 [13].

I.3.1 Grandeurs influençant le développement du jet simple :

L'étude des jets simples est en général abordée par le biais de 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 [11] :

$$\text{Les forces d'inertie :} \quad \frac{\mathbf{r}_0 * U_0^2}{\mathbf{d}_0} \quad (\text{I.1})$$

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

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

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

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) [2].

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

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.

I.3.2 Caractéristiques des jets :

Les jets sont caractérisés par :

A- L'épaisseur de la buse (épaisseur pour un jet plan et diamètre pour un jet rond) ;

B- Le profil de vitesse du jet à la sortie de buse. Il sera uniforme, si on utilise un Convergent correctement profiler. Dans le cas contraire, le développement d'une Couche limite sur la paroi interne de la buse engendrera un profil de vitesse Parabolique.

C- Le régime d'écoulement. On a trois différents régimes d'écoulement :

➤ Ecoulement 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 faible nombre de Reynolds $Re < 300$), ou instable comme nous le verrons plus loin.

- Ecoulement transitoire : $1800 < R_e < 2300$: On ne peut pas déterminer l'état de L'écoulement, les forces d'inertie et les forces de viscosité sont du même ordre.
- Ecoulement turbulent : $R_e > 2300$: Les forces d'inertie deviennent importantes devant Les forces de viscosité et la turbulence se développe dans l'écoulement.

I.4 Profils Gaussiens :

Deux approches différentes sont abordées par les auteurs [2, 15] 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. Un exemple de profils transversaux gaussiens est présenté sur (la Figure 4). Se dit d'un phénomène aléatoire, dont la répartition, faite au hasard, obéit à la loi statistique de Laplace-Gauss. (Cette répartition est représentée par une courbe en cloche).

$$\frac{U_x}{U_m} = \exp\left(-\ln 2 \frac{y^2}{b_v^2}\right) \quad (I.5)$$

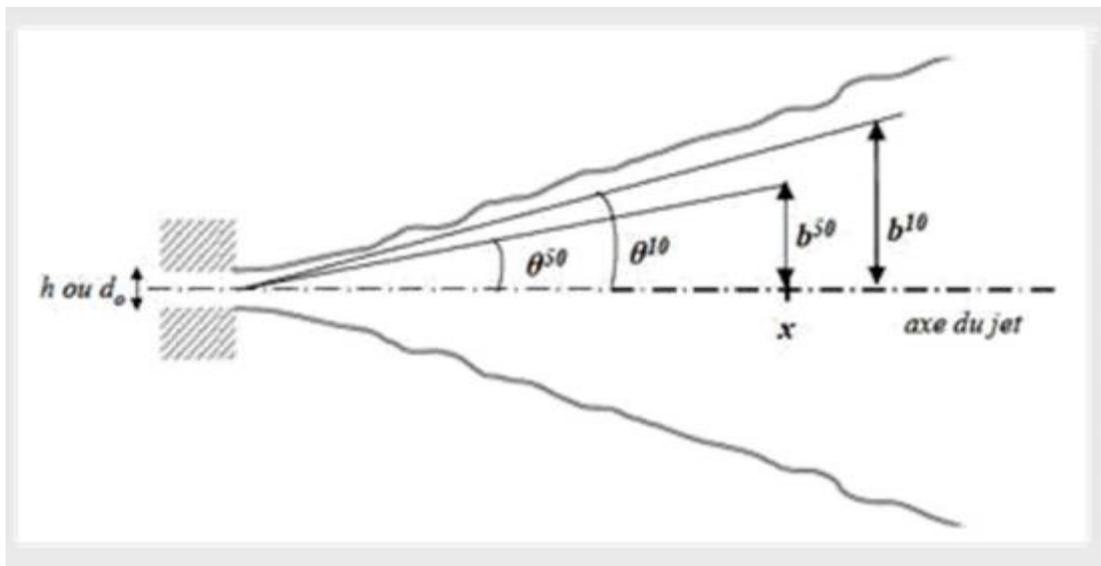


Figure I-3 Angles d'expansion d'un jet

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

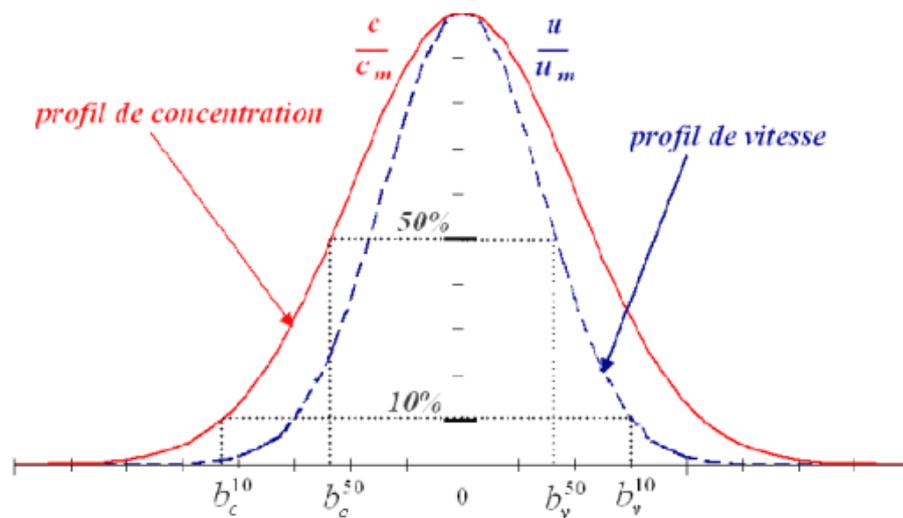


Figure I-4 Allure de profils gaussiens [16].

I.5 Structure du jet libre axisymétrique

Proposée pour le jet libre est Une décomposition classique de distinguer trois zones (Figure I.5) [15].

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 [17]. 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 [18].

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 [17].

La zone développée : Les profils de vitesse sont désormais auto semblable 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 [17]. 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. 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 limité 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 . 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 [18]. 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.

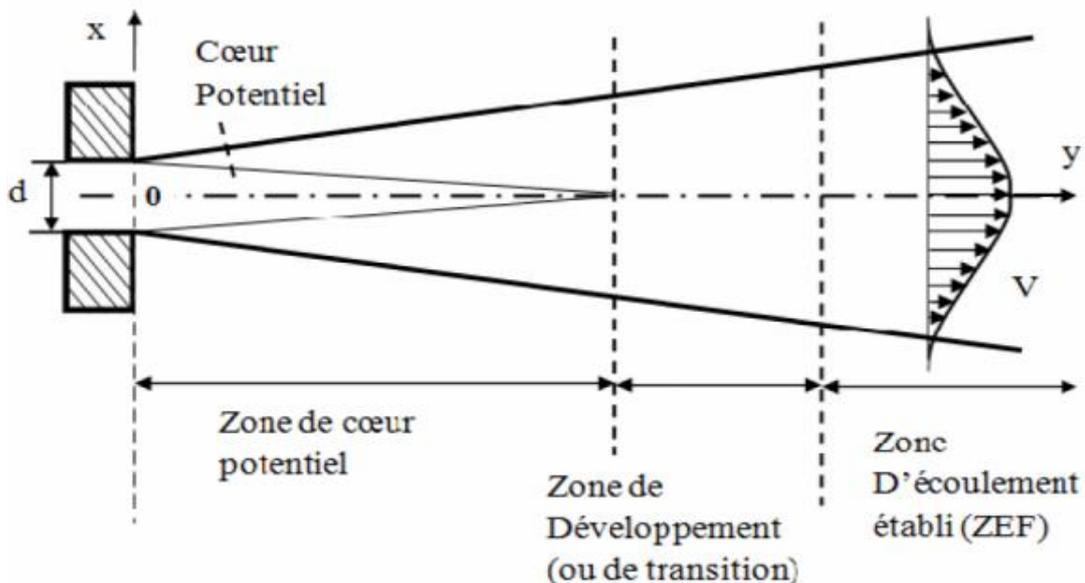


Figure I-5 Schéma représentative de la structure du jet libre [26]

Instabilités absolue et convective : modes globaux avant d'étudier les principaux résultats sur les instabilités des écoulements cisailés libres, il convient de clarifier les notions,

qui vont être très utilisées dans ce travail, telles que celles d'instabilité convective, absolue, de mode global amorti ou auto-entretenu et à mesure qu'elles s'éloignent de l'injecteur, ce qui s'accompagne de la création de fines structures tridimensionnelles qui vont s'enrouler autour des instabilités toroïdales. Il apparaît ensuite une zone dans laquelle ces différentes structures s'appareillent entre elles. Yu le [43] a montré que ces fusions peuvent impliquer deux enroulements ou plus, mais qu'elles ne sont pas un passage obligé puisque le vortex peut très bien s'étirer puis se désintégrer. Lors de la dernière fusion, les anneaux impliqués ont une taille supérieure au diamètre local du jet, ce qui va engendrer un éclatement de ces anneaux en des structures de tailles bien inférieures. Dans un premier temps, ces structures sont bidimensionnelles et prennent la forme tourbillonnaire. Ces instabilités de type Kelvin-Helmholtz voient leur taille augmenter au fur et à mesure. Dans la zone d'écoulement pleinement établi (ZEF), le profil de vitesse est complètement développé et l'écoulement contient un spectre continu d'échelles tourbillonnaires. De grands tourbillons côtoient les petites structures, dont la plus petite dimension est donnée par l'échelle de Kolmogorov [44]. 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 [45]. Ainsi que Popiel et Boguslawski [46]. 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 équivalent et un phénomène de battement du jet commence à apparaître [47].

I.6 Différents 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 [3] :

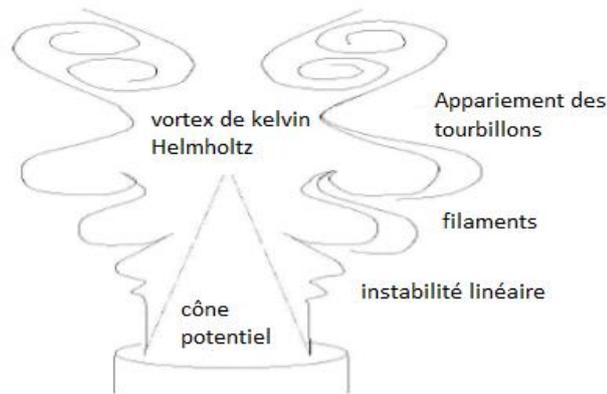


Figure I-6 Différentes instabilités agissant sur un jet [41]

Dans un premier temps, ces structures sont bidimensionnelles et prennent la forme tourbillonnaire. Ces instabilités de type Kelvin-Helmholtz voient leur taille augmenter au fur et à mesure de ces dernières fusions, la décroissance de la concentration ne va pas se faire de manière monotone mais par paliers. Cependant, comme les fusions n'ont pas lieu systématiquement au même endroit, la décroissance moyenne sera continue. En plus de ces instabilités de type bidimensionnel, des instabilités tridimensionnelles vont se développer à partir de l'injecteur. Ces structures hélicoïdales se déplacent le long du jet de manière aléatoire et sont en raison de leur caractère tridimensionnel très difficiles à observer et à caractériser. 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 (H_0 et Huerre [39]). 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 les distances de plus en plus faibles.

I.7 Tourbillonnement (swirl) :

I.7.1 Nombre de tourbillonnement (swirl) :

Le tourbillonnement est caractérisé par un nombre sans dimension appelé le nombre de Swirl (S) qui est le rapport du flux de quantité de mouvement tangentielle au produit du flux de

quantité de mouvement axial et un rayon caractéristique. Le nombre de Swirl (S) est calculé par l'expression suivante :

$$S = \frac{G_{\phi}}{R^* G_x} \quad (I.5)$$

$$G_{\phi} = \int_{R_h}^{R_n} U W r^2 dr \quad (I.6)$$

$$G_x = \int_{R_h}^{R_n} R_n U^2 r dr \quad (I.7)$$

➤ **Phénomène de recirculation :**

L'évolution d'un jet tourbillonnant débouchant dans une atmosphère au repos donne naissance une zone appelée zone de recirculation, qui est manifestée par la formation des bulles elliptiques de part et d'autre de l'axe longitudinal du jet. A cause de la symétrie de révolution, les bulles sont de même taille et la pression qui y règne reste largement inférieure à la pression atmosphérique. Le foyer de la zone de recirculation dépend de l'accélération du tourbillonnant. En effet, plus le tourbillonnant est fort, plus la zone de recirculation devient importante [6].

I.7.2 Techniques de génération du tourbillonnement :

Il existe plusieurs manières de générer le tourbillonnement dans un écoulement (Beér et Chigier [31], Farokhi et al [32]) :

Ailettes ajustables déviant tangentiellement l'écoulement axial. L'intensité du swirl 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 (Beér et Chigier [31]) et ce quel que soit le nombre de Reynolds Re de l'écoulement, excepté pour les très faibles valeurs de ce nombre ($Re \leq 600$) où un terme correctif fonction de Re est à apporter (Sheen et al [33]). On notera que ce type de dispositif génère un swirl d'une intensité nécessairement limitée (par la conception des ailettes) et qu'il introduit des pertes de charge importantes et ce d'autant plus que le nombre de swirl est grand (Mathur et Maccallum [34]). 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 tourbillonnaires (Ateshkadi et al [35], Broda et al [36] par exemple).

Mise en rotation d'un tube (Rose [37]) ou d'une plaque (Lopez [38]). Le swirl ainsi généré est toutefois très faible. Ce genre de dispositif est plutôt destiné à l'étude de l'éclatement tourbillonnaire ("vortex breakdown ») dont la zone de recirculation des écoulements tourbillonnaires est une des représentations (Lucca-Negro et O'Doherty [39]).

Rotation autour de l'axe longitudinal d'une plaque percée de trous (Shi et Chehroudi [40]). C'est une méthode qui produit une répartition homogène de l'effet de tourbillonnement dans toute la section du jet et qui permet en outre d'atteindre des valeurs élevées de ce nombre.

Soufflage tangentiel sur la paroi d'un tube en présence d'un écoulement axial. L'intensité du tourbillonnement est alors déterminée par le rapport entre le débit injecté de manière tangentiel et celui injecté de manière axiale (Chigier et Beér [41], Stephens et al [42]).

Rappelons la portée limitée de "l'universalité" du nombre de swirl. En effet, il semble que la façon dont le swirl est généré ait une influence non négligeable sur la manière dont l'écoulement sera affecté (Farokhi et al [32], Leuckel et Fricker [43], Sheen et al [33]).

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

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 swirl restent gaussiens jusqu'à environ $S < 0.5$ (Chigier et Chervinsky [44]). Le degré d'ouverture du jet ainsi que le flux de masse entraînée augmentent alors continûment avec le nombre de swirl.

➤ **Écoulements fortement tourbillonnaires ($S > 0.6$) :**

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 [45] 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 [46] et Escudier et Keller [47] 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.

La compréhension des effets de turbulence, en particulier sur le taux d'entraînement de l'air et sur la stratification de la température très importante pour l'efficacité du processus de conditionnement d'air. Cependant, à notre connaissance, ces effets ont été à peine étudiés, et par conséquent la fusion de plusieurs jets tourbillonnaire devient intéressante à étudier [76].

Des études sur les jets simples tourbillonnaires montrent qu'ils se développent plus rapidement que les jets sans tourbillonnement. Près de l'origine de soufflage, les profils sont caractérisés par des irrégularités en raison de la géométrie de tourbillonnaire et les conditions de soufflage.

Selon la littérature disponible, il n'y pas de recherche de pointe qui se fait sur le jet simple tourbillonnaires destinés à améliorer les conditions de confort. La plupart des travaux qui traitent les simples jets tourbillonnaires dans diverses conditions géométriques, dynamiques et thermiques sont destinées à l'amélioration de la combustion. Les jets tourbillonnaires ont été largement utilisés dans les systèmes de combustion, car ils améliorent le mélange entre le comburant et le combustible (Volchkov et al [48] et Khelil et al [49]).

Pratiquement, ils apparaissent dans les chambres de combustion et dans les brûleurs résidentiels : commerciaux où la turbulence contribue à améliorer le mélange et stabilise la flamme. Ils sont également utilisés dans les brûleurs industriels, dans les stations centrales électriques ou dans les chambres de combustion des turbines à gaz pour assurer une meilleure stabilité, à haute intensité turbulence et avec des flammes courtes assurant un large développement radial et un bon mélange (Huang et al [50]). Par conséquent, il convient de souligner l'importance de la compréhension de l'effet de turbulence sur le transfert de chaleur et le comportement de l'écoulement induit.

Lee et al [51] ont évalué l'influence des facteurs comme la ventilation de cavité, la pente de la toiture, l'intensité du rayonnement solaire, la taille et la forme de cavité, les profils de paroi, l'étude de l'écoulement d'air et la distribution de température dans la cavité, pour améliorer l'effet de refroidissement de la ventilation dans la cavité du toit. Ils ont utilisé un thermo-anémomètre pour mesurer la vitesse d'air avec une haute précision. Nakod et al [52] ont effectué une enquête expérimentale pour étudier l'effet des surfaces et les surfaces avec générateurs de tourbillonnement sur le coefficient de transfert de chaleur local entre le jet d'air impactant circulaire et le point d'impact. Ils ont constaté que l'augmentation du transfert de chaleur dans le cas d'une seule rangée de six générateurs de tourbillons est de 110% par rapport à la configuration représentant seul générateur de tourbillons. Ils ont conclu que la configuration optimale des générateurs de tourbillonnement, c'est celle qui est composée d'une seule rangée de six générateurs de tourbillonnement. Felli et al [53] ont étudié expérimentalement la dynamique d'un jet tourbillonnaire impactant généré par des ailettes inclinées. Ils ont observé que la paroi des ailettes modifie la forme du jet tourbillonnaire provoquant son épanouissement vers l'extérieur et génèrent une zone de recirculation autour du support d'ailettes dans lequel le tourbillon se déroule avant de se décomposer contre la surface d'ailette. 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 : Thundil Karuppa Raj et Ganesan [54] ce travail présente 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. Il se trouve que pour un tourbillonnement faible, le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard est suffisant, alors que pour les forts tourbillonnements le modèle de turbulence RSM est le plus approprié.

Ahmadvand et al [55] 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. Georges et al [56] ont mené une étude systématique numérique pour les injections à jet unique et multiple dans un écoulement principal en utilisant le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard qui est disponible dans le code CFD FLUENT. Akililu et al [57] ont simulé numériquement le processus de mélange des flux turbulents à l'intérieur d'un pipeline à partir de jets uniques et multiples transvasant en utilisant le modèle de turbulence $k-\varepsilon$. Ils ont constaté que les jets multiples assurent un meilleur mélange. Leurs résultats numériques montrent que pour les jets simples et doubles, les résultats obtenus sont en bon accord avec les données expérimentales existantes. Wanget al [58] ont étudié l'écoulement d'un fluide et les caractéristiques de mélange d'un jet en trois dimensions, la turbulence confinée des jets opposés dans un mélangeur en ligne, et ce, en utilisant le modèle de turbulence k Standard. Ils ont obtenu un bon accord avec les résultats expérimentaux.

Kucukgokoglanl et al [59] ont présenté la performance des trois différents modèles de turbulence pour la prédiction des écoulements tourbillonnaires d'un four à deux brûleurs en contre rotation. Les modèles numériques utilisés sont le $k-\varepsilon$ standard, le modèle $k-\varepsilon$ (RNG) et le modèle $k-\varepsilon$ utilisé. Il convient de noter que le modèle $k-\varepsilon$ standard et le modèle RNG soit bien établis dans la prédiction des modèles de turbulence isothermes des écoulements tourbillonnaires, qui ont été comparés avec succès aux résultats expérimentaux. Ces auteurs ont constaté que les contours des profils de vitesse et les schémas de l'écoulement par le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ en générale sont en bon accord avec les modèles $k-\varepsilon$ (RNG) et $k-\varepsilon$ standard, Ils notent alors que le champ de l'écoulement dans le four a été prédit avec précision. Yongson et al [60] ont analysé le système de climatisation pour une chambre simple en utilisant code CFD. Ils ont étudié plusieurs paramètres comme la température et la vitesse pour déterminer la meilleure position pour le souffleur du conditionnement de l'air et aussi la zone qui est appropriée pour le confort de l'occupant. Selon leurs résultats numériques, ces auteurs affirment que le modèle RSM peut avoir une solution indépendante du maillage par rapport au modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard. Bien que la simulation utilisant le modèle de turbulence RSM prenne plus de temps par rapport à celle du modèle $k-\varepsilon$, l'indépendance de la solution du maillage est plus importante.

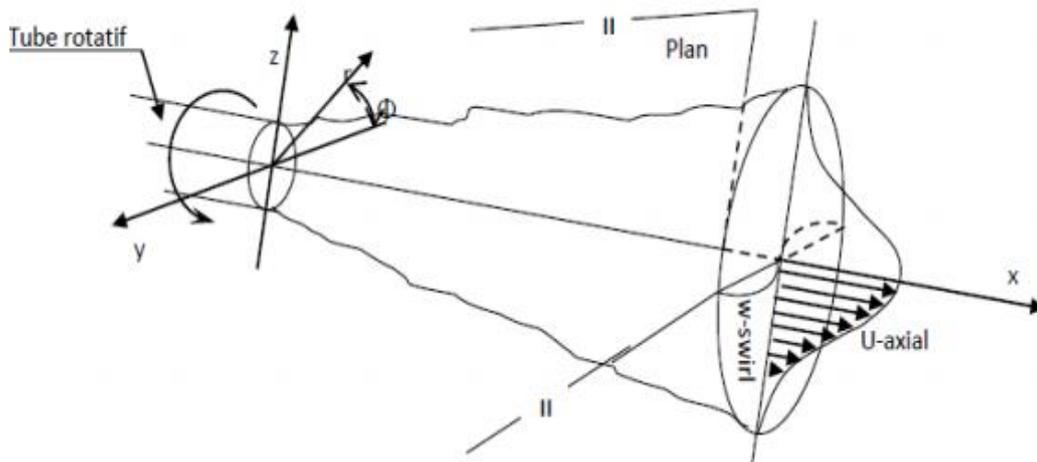


Figure I-7 Représentation du jet tourbillonnant [62].

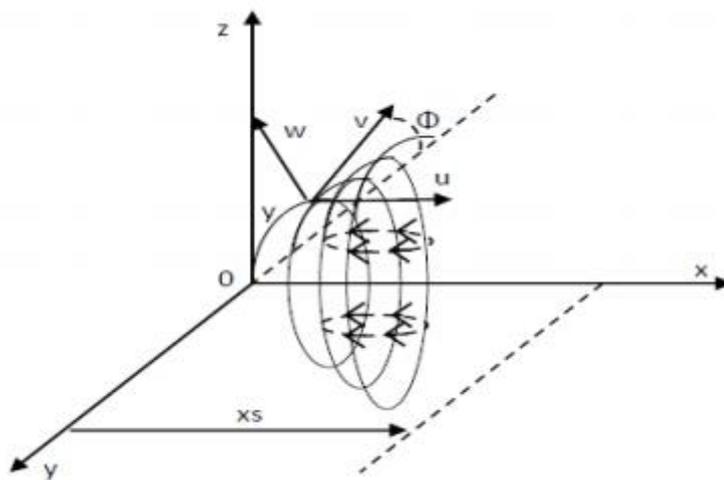


Figure I-8 Représentation du jet tourbillonnant en coordonnées cylindriques [77].

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 du tourbillonnement :

Le vortex est l'un des facteurs les plus importants dans ce type d'avion, il joue un rôle majeur. Parce qu'il coordonne l'axe d'écoulement et augmente le taux de traînée et les

pressions tangentielles sur le mur et réduit les contraintes axiales statiques sur le mur et le vortex affecte les paramètres de transfert en augmentant les contraintes de cisaillement qui améliorent le transfert de la chaleur de combustion et peuvent retarder le mélange et améliorer son homogénéité en réduisant les vitesses et en augmentant l'intensité des turbulences [3]. Ainsi, Raslan [40] obtient un mélange carburant-air amélioré avec un indice d'octane inférieur à des taux de compression plus élevés. Le vortex augmente également la longueur de la flamme dans les brûleurs en augmentant la surface d'écoulement anisotrope. La pente des ailettes modifie l'importance du nombre de vortex et l'inclinaison maximale des ailettes est de 60° , lorsque le pas des ailettes augmente, la vitesse axiale et la température diminue et le flux se dilate pour devenir radial. Une similitude avec les profils de vitesse est trouvée.

Volchkov et al. [48] ont montré qu'avec une augmentation de cet angle, il y a une augmentation du débit de recirculation et des valeurs maximales de vitesse axiale dans l'écoulement. Les paramètres individuels du générateur de vortex ont un effet Important sur la structure de l'écoulement dans la première section du plan. Selon Amal [62], les températures radiales augmentent dans le jet vortex Mieux que les avions conventionnels. La propagation du plan augmente avec le nombre de tourbillons. Cette croissance est une croissance linéaire avec la distance le long du flux. Elle est plus grande pour un plan d'ouvertures rectangulaires que pour un plan simple ou multiple Émergeant d'orifices circulaires, dépassant 20 de diamètre, le long du flux[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.[59] montrent que le tourbillonnement atténue la structure tridimensionnelle typique au jet multiple.

I.8 Contrôle des jets :

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. Il existe deux grandes catégories dans le contrôle d'écoulements des jets, en particulier on a le contrôle passif et le contrôle actif. Le contrôle passif consiste à affecter la dynamique de l'écoulement en

modifiant la géométrie de l'injecteur et/ou de la chambre de combustion, alors que le contrôle actif repose sur un apport extérieur d'énergie [63].

Les méthodes dites passives comme l'obstacle rigide annulaire proposé par Spazzini et al [64]. 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.

Tableau 1 Différentes stratégies de contrôle des écoulements [73, 74]

| | | | |
|--------------------|---------------------------|--|----------------------|
| Le contrôle Passif | Excitation Acoustique |  | Zamanet Hussain [72] |
| Le contrôle actif | Obstacle rigide Annulaire |  | spazzini et al [64] |

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 [65,66] et stabilise la flamme. Ils sont aussi utilisés actuellement dans le système CVC.

Amal [66] 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. [67], 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. [69] 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 [71] 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 d'un jet tourbillonnaire. 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 III

Modèle

physique et

formulations

mathématiques

II. Modèle physique et formulations mathématiques :

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les équations gouvernantes. On a utilisé la méthode des volumes finis sous Fluent. Afin d'améliorer les prévisions des modèles de turbulence, on a testé trois modèles de turbulences, le modèle de Smagorinski-Lilly (LES/S-L), le modèle de *Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity* (LES/ WALE) et le modèle de Dynamic Kinetic Energy Subgrid-Scale (LES/K-ET) en vue d'opter pour le modèle le plus adéquat relatif à ce type d'écoulement (jet tourbillonnaire) [71].

II.2 Les méthodes numériques de discrétisation les plus utilisées :

Les équations de conservation d'un phénomène physique sont résolues en utilisant une méthode numérique bien définie. Ce qui permet de développer des moyens de résolution de ces équations. A cette étape, le concept de déconstruction des équations différentielles intervient également pour dériver un système d'équations algébriques non linéaires, et ces équations décrivent les propriétés séparées du fluide en chaque nœud du domaine étudié [70].

Il existe plusieurs méthodes numériques d'estimation, la plus largement utilisée être sont :

- La méthode des éléments finis ;
- La méthode des différences finies ;
- La méthode des volumes finis.

II.3 Simulation Numérique en Mécanique des Fluides :

La nécessité de recourir à des simulations numériques en mécanique des fluides est aujourd'hui présente dans divers domaines d'applications (automobile, aéronautique, thermique par exemple) pour un certain Nombre de raisons.

Tout d'abord, la simulation numérique permet de comprendre les phénomènes mis en jeu dans l'écoulement : ainsi l'accès à certaines informations est possible (calcul d'écoulement) et donc de visualiser en 3D. Elle donne le test d'impact de nombreux paramètres sans qu'il soit nécessaire de reconstruire l'ensemble du banc expérimental. On conçoit évidemment qu'il est

plus aisé, par exemple, de modifier un maillage de turbine à gaz plutôt que de faire construire de nouvelles pièces. Les simulations numériques peuvent également permettre d'observer les comportements d'un écoulement dans une géométrie à plus grande échelle (scaling up) sans pour autant nécessiter la construction de pilotes encombrants [71].

Il existe trois types de simulation numérique en Mécanique des Fluides : RANS (Reynolds Average Navier Stokes), LES (Large Eddy Simulation) et DNS (Direct Numerical Simulation).

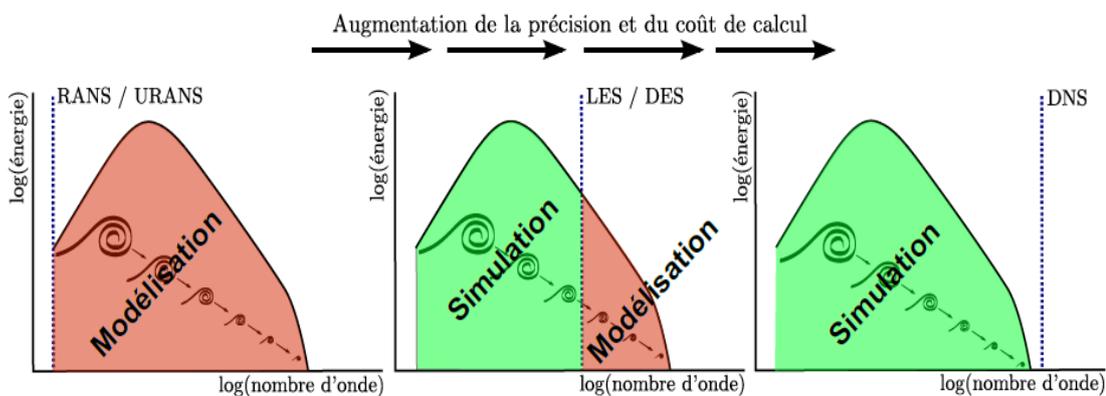


Figure II-1 Niveau de modélisation du spectre de la turbulence associé à différentes approches de modélisation de la turbulence [71].

II.3.1 RANS :

Les simulations RANS (**Reynolds Average Navier Stokes**) résolvent les équations de Navier-Stokes moyennées. En d'autres termes, la turbulence est ici entièrement modélisée. De ce fait, les résultats obtenus ne sont pas toujours représentatifs de la réalité, surtout si les configurations simulées sont complexes (en situation réactive notamment). Toutefois ce type de simulation permet d'obtenir un bon ordre de grandeur de l'écoulement moyen aussi bien en termes de vitesse que de température ou de pression. C'est pour cela que beaucoup des codes industriels actuellement sur le marché sont basés sur ce principe. Le coût de calcul est en effet relativement faible, ce qui permet de simuler des configurations très complexes sur des maillages raffinés.

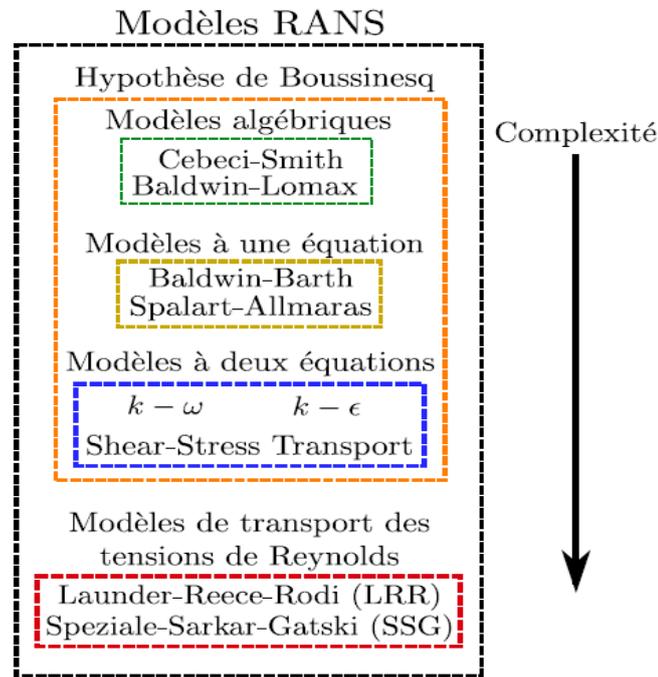


Figure II-2 : Exemples de modèle de turbulence RANS [71].

II.3.2 LES :

Les simulations LES (*Large Eddy Simulation*) résolvent les équations de Navier-Stokes filtrées spatialement : seules les petites structures sont modélisées alors que toutes les autres sont calculées. En pratique, le filtrage spatial est imposé par le maillage : seules les structures plus grosses que le maillage sera traité [71]. Par ailleurs, des modèles, dits modèles de sous-maille, sont introduits pour simuler la turbulence des petites échelles. Avec ce genre de simulation, il est possible d'obtenir des grandeurs moyennes mais également des grandeurs fluctuantes, ce qui fait l'intérêt de là LES en comparaison aux simulations RANS. Les coûts de calcul, certes plus importants que pour des simulations RANS, restent raisonnables et autorisent la simulation de géométries complexes sur des maillages raffinés.

II.3.3 DNS :

Les simulations DNS (Direct Numerical Simulation) se situent complètement à l'opposé des simulations RANS [71]. Ici, les équations de Navier-Stokes sont entièrement résolues : la turbulence est calculée et non plus modélisée. Ces simulations sont donc des plus précises mais ont un coût de calcul beaucoup trop élevé pour qu'il soit envisageable (du moins à ce

jour) de simuler une configuration industrielle en DNS. En effet, le nombre de points nécessaire pour réaliser une DNS est directement lié au nombre de Reynolds de l'écoulement ($N \cong Re^{9/4}$, si la distance entre deux points voisins du maillage est de l'ordre de l'échelle de Kolmogorov).

Dans notre cas, le nombre de Reynolds est aux alentours de 18330 et 3.9 milliards de points seraient alors nécessaires. Les simulations de type DNS sont donc limitées à des calculs "académiques" de type boîte cubique de petit côté, ou bien à des écoulements à faible nombre de Reynolds. Les résultats obtenus avec ce genre de simulations sont par ailleurs très utiles pour créer des modèles qui seront ensuite utilisés en LES ou en RANS [71].

RANS : les équations de Navier-Stokes sont moyennées et ensuite résolues en mode stationnaire -> variables moyennes, calcul économique (temps et espace de stockage)

DNS : les équations de Navier-Stokes sont résolues en instationnaire. Les résultats sont ensuite moyennés -> variables moyennes et instantanées, calcul très coûteux.

LES : les équations de Navier-Stokes sont filtrées, résolus en régime non stationnaire. Les résultats sont ensuite moyennés variables moyennes et instantanées, calcul coûteux.

Dans la LES, les grands tourbillons sont traités directement, tandis que l'effet des petits tourbillons est modélisé. En termes des échelles résolues, la simulation des grandes échelles (LES) est classée entre la DNS et le RANS. Les motivations de là LES peuvent être résumées comme suit :

- La quantité de mouvement, la masse, l'énergie et les autres scalaires passifs sont transportés essentiellement par les grands tourbillons.
- Les grands tourbillons sont plus dépendants des problèmes simulés et sont influencés par la géométrie du domaine de calcul et des conditions aux limites.
- Les petits tourbillons sont moins dépendants de la géométrie. Ils ont tendance à être plus isotropes, et sont par conséquent plus universels.
- La chance de trouver un modèle de turbulence universel est beaucoup plus élevée pour les petits tourbillons qu'elle ne l'est pour les grands.

II.4 Equations du modèle mathématique :

II.4.1 Equations gouvernantes dimensionnelles :

Les équations régissant l'écoulement sont les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie.

II.4.1.1 Equation de continuité :

C'est l'équation, qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante [39].

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

Dans notre cas l'air est considéré comme incompressible puisque l'écoulement est lent (Mach<0.3). L'effet de l'écoulement sur le fluide ne modifie pas sa masse volumique. Ainsi l'écoulement est stationnaire.

Où : U : Le vecteur de vitesse.

Qui, après simplification devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{II-2})$$

II.4.1.2 Equations de quantité de mouvement (ou équations de Navier- Stokes) :

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 [59]. Le mouvement des fluides newtoniens peut être décrit à l'aide d'équations différentielles partielles de second ordre. Ces relations, non-linéaires, portent le nom d'équations de Navier-Stokes.

$$\rho \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{U_i U_j} \right] \quad (\text{II-3})$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g \beta (T - T_c) \quad (\text{II-4})$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \quad (\text{II-5})$$

$$\rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \quad (\text{II-6})$$

II.4.1.3 Equation de l'énergie :

L'expression mathématique de l'équation de conservation d'énergie est comme suit [59] :

$$\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p u_i T' \right] \quad (\text{II-7})$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T) = \Delta(\lambda T) + q + \beta T \frac{DP}{Dt} + \mu \phi \quad (\text{II-8})$$

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 :

$$\rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II-9})$$

La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable.

II.4.2 Equations gouvernantes adimensionnelles :

Afin de convertir des équations de variables dimensionnelles en variables sans dimension, permettant de les normaliser par rapport à certaines quantités distinctes. Cela permet de définir les conditions d'écoulement avec un nombre limité de paramètres pour rendre la solution plus générale. La formulation en variables adimensionnelles est importante pour simplifier les équations qui régissent l'écoulement et pour guider les expériences à réaliser [71].

Pour construire des équations sans dimension, au lieu d'utiliser les coordonnées (x, y, z) et les propriétés (u, v, w) de la vitesse et de la pression (p), nous utiliserons de nouvelles variables sans dimension à partir de la définition suivante dans la méthode qui utilisée. [59]

$$Y = \frac{y}{H}, X = \frac{x}{L}, U = \frac{u}{vH/L^2}, V = \frac{v}{v/L}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, P = \frac{p}{\rho_0 \left(\frac{v}{l}\right)^2} \quad (\text{II.10})$$

Les équations adimensionnelles deviennent alors :

II.4.2.1 Equation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (\text{II -11})$$

II.4.2.2 Equations de quantité de mouvement :

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Ar^2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (\text{II-12})$$

Suivant Y :

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{Ar^2} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{Gr}{Ar} \theta + \frac{1}{Ar^2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (\text{II-13})$$

II.4.2.3 Equation de l'énergie :

$$U \frac{\partial \theta}{\partial x} + V \frac{\partial \theta}{\partial y} + W \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{Pr} \left[\frac{1}{Ar^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] \quad (\text{II-14})$$

II.4.3 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 (II- 1 et II- 3) à tout instant. C'est ce qu'on fait effectivement dans les simulations directes de la turbulence. Mais de telles simulations ne peuvent être envisagées et pour longtemps encore.

Des équations moyennées seront utilisées. Les règles suivantes s'appliquent à l'opérateur moyen. Étant données les fonctions f et g :

$$f = \overline{f} + f' \quad (\text{II.15})$$

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

f' : La partie fluctuante.

$$g = \overline{g} + g' \quad (\text{II-16})$$

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

g' : La partie fluctuante.

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

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{Equation du champ moyen}) \quad (\text{II-17})$$

L'écoulement moyen et la turbulence sont tous les deux séparément incompressibles. La moyenne de l'équation de Navier-Stokes (II-3) s'écrit :

$$\overline{U}_j \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (\text{II-18})$$

Terme de Reynolds

$\overline{u_i u_j}$: Terme de Reynolds

Ce sont les équations de Reynolds. Elles ne diffèrent des équations de Navier-Stokes que par les termes $\overline{u_i u_j}$, regroupés dans le membre droit avec les contraintes. D'où leurs noms de contraintes de Reynolds.

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.

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 [71].

Pour cela, beaucoup de chercheurs se sont investis dans ce domaine et plusieurs contributions de modèles de résolution ont été proposées. Parmi ces modèles on peut citer les trois modèles les plus utilisés qui sont le modèle de Smagorinski-Lilly (LES/S-L), le modèle de Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (LES/ WALE) et le modèle de Dynamic Kinetic Energy Subgrid-Scale (LES/K-ET).

II.5 Simulation des Grandes Echelles :

- **1963** : Smagorinski à proposer le premier modèle LES ;
- **1967** : Lilly, un autre météorologiste qui a collaboré avec Smagorinski, a travaillé sur le modèle et a le mérite de proposer une valeur pour la constante de Smagorinski ;
- **1970 et 1972** : Deardorff, un autre météorologiste a réalisé la première LES pour une application industrielle (écoulement dans un canal plan) ;
- **1975** : Schumann, a appliqué un nouveau type de modèle sous maille basé sur l'équation de transport de l'énergie cinétique pour simuler l'écoulement turbulent en canal plan et en espace annulaire ;
- **1976** : Kraichnan, un autre physicien a développé le concept de la viscosité turbulente spectrale. Une direction suivie récemment par Lesieur pour développer le modèle sous maille de la fonction de structure dans l'espace spectrale (Métais and Lesieur, 1992) [71].

II.5.1 Modèles sous-maille :

Par analogie à la méthode RANS, on utilisera l'approximation de Boussinesq qui consiste à remplacer les contraintes sous-maille par :

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \overline{S_{ij}} \quad (\text{II-19})$$

Avec :

τ_{ij} : Représente la viscosité turbulente sous-maille.

τ_{kk} : Partie isotropie qui ne sera pas modéliser mais rajoutée a la pression statique filtrée.

$\overline{S_{ij}}$: Tenseur calculé à partir des valeurs filtrées connues.

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (\text{II-20})$$

II.5.2 Modèle de Smagorinski-Lilly (LES/ S-L) :

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (\text{II-21})$$

Où

L_s : Représente l'échelle de mélange sous-maille calculée par $L_s = \min(kd, C_s \Delta)$.

K : Constante de Von-Karman.

d : Distance a la paroi solide la plus proche.

C_s : Constante de Smagorinski.

Δ : Taille du filtre généralement prise égale à $\Delta = V^{1/3}$, où V correspond au volume géométrique du volume de contrôle.

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (\text{II-22})$$

Lilly à proposer une valeur de 0.23 pour la constante C_s , valable pour une turbulence homogène et isotrope. Cette constante n'est pas universelle et il se trouve qu'elle a besoin d'être réduite dans certaines régions (grandes fluctuations en présence de couche cisailées) du domaine de calcul. C'est la principale faiblesse du modèle. Beaucoup de travaux conseillent une valeur de l'ordre de 0.1 permettant une bonne solution pour une grande majorité de cas [6].

II.5.2.1 Modèle Dynamic Smagorinsky-Lilly :

- La version dynamique du modèle de Smagorinski (Germano) (Lilly), propose de calculer la constante C_s automatiquement à partir des échelles résolues [71].

- Le but étant d'éviter à l'utilisateur de choisir cette constante.

- Le principe étant d'appliquer deux filtres, l'un de taille double que l'autre et comparer les deux résultats. Enfin, en admettant que la différence des deux résultats n'est autre que l'effet des échelles sous maille existantes entre les deux filtres, le modèle calcule la constante de calibration C_s .

- Cette constante prendra des valeurs différentes en temps et en espace et pour éviter des éventuelles instabilités il faudra limiter sa variation entre 0 et 0.23.

II.5.3 Modèle de Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (LES/WALE):

Dans ce modèle la viscosité turbulente sous-maille est donné par :

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\overline{S_{ij} S_{ij}})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (\text{II-23})$$

Où :

$$L_s = \min \left(kd, C_w V^{1/3} \right) \quad (\text{II-24})$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\overline{g_{ij}^2} + \overline{g_{ij}^2}) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{g_{kk}^2} \quad (\text{II-25})$$

$$\overline{g_{ij}} = \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \quad (\text{II-26})$$

Ce modèle consiste également en une constante qui prend également la valeur = 0,325, ce qui devrait être bon pour une large gamme de types de flux. Ce modèle prédit un bon comportement près de la paroi et surtout donne une valeur nulle de la viscosité turbulente du sous-réseau dans les régions laminaires de l'écoulement, ce qui n'est pas le cas du modèle de Smagorinski dynamic.

II.6 Conclusion :

Le modèle mathématique est constitué d'un système d'équations complété par des conditions aux limites. Les équations de bilan sont donc connues [59], avec les remarques suivantes :

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

Donc, l'utilisation des méthodes numériques s'avère indispensable pour la résolution du système d'équations obtenu. Dans notre étude, on a utilisé le code CFD FLUENT (v 6.3.26), basé sur la méthode des volumes finis, pour résoudre les différentes équations.

Chapitre III

Résultats et discussions

III. Résultats et discussions :

III.1 Introduction :

Ce travail consiste à étudier l'amélioration de la diffusion de l'air, la diffusion de l'air dans les locaux habitables 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 l'homogénéisation de la diffusion de l'air dans une pièce d'habitation. L'étude analytique des jets a permis de mieux connaître les propriétés déterminantes de ce type d'écoulement.

On a mesuré expérimentalement les valeurs de vitesse dans la direction axiale et radiale dans un milieu non confiné (libre) pour une configuration de jet tourbillonnaire simple.

Afin d'améliorer les prévisions des modèles de turbulence, on a utilisé la méthode des volumes finis à l'aide du logiciel (ANSYS-FLUENT), par lequel on a testé deux modèles de turbulences LES/S-L et LES/WALE en vue d'opter pour le modèle le plus adéquat à ce type d'écoulement.

Dans ce travail, nous présenterons les différentes étapes nécessaires pour obtenir une prédiction convenable de l'écoulement qui permettront de découvrir les profils axiaux et radiaux de la vitesse 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

Chapitre : III Résultats et discussions

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 est 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 [BENNIA et al]. 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.

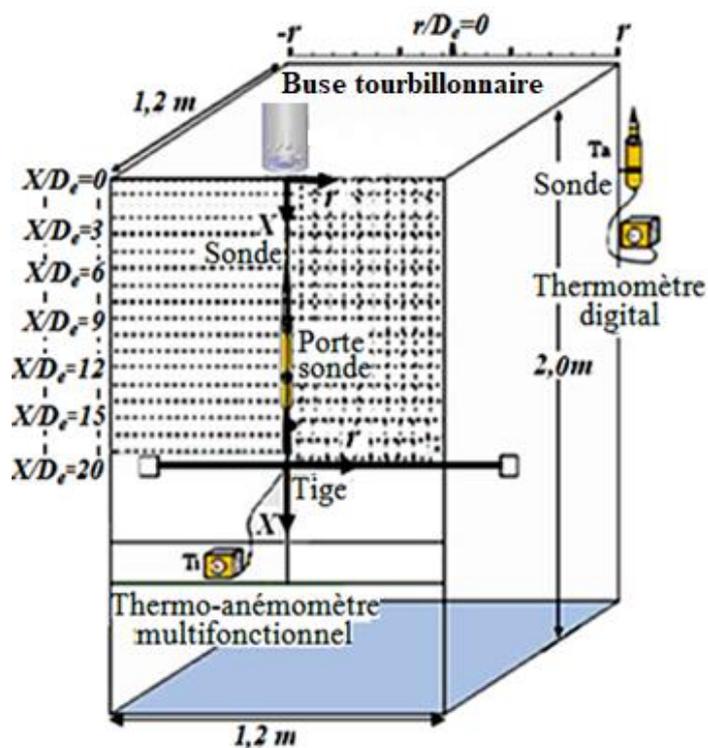


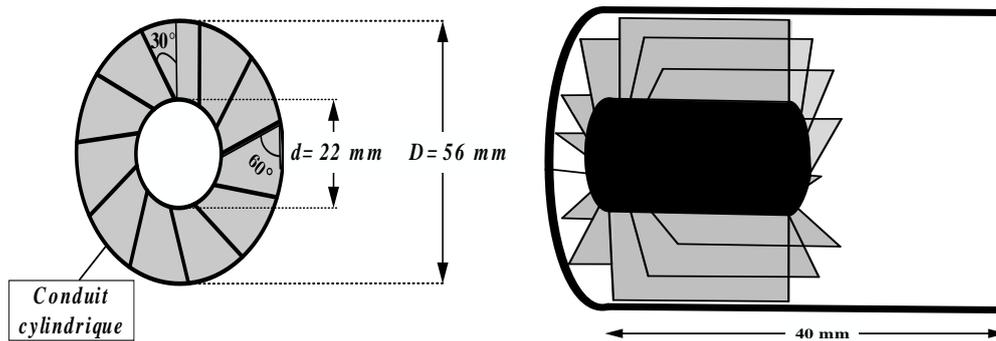
Figure III-1 Schéma descriptif du banc d'essai.

Chapitre : III Résultats et discussions

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 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 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 $D=0.052\text{m}$).



Générateur de tourbillonnement

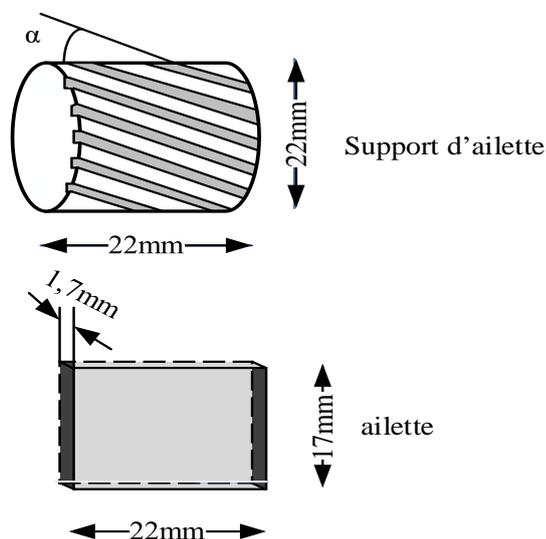


Figure III-2 Schéma du mode de génération de tourbillonnement

III.3 Résultats numériques :

Dans cette partie nous présenterons les résultats 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 ($U_r = \frac{U_i}{U_{max}}$).

Chapitre : III Résultats et discussions

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 5 et $x/D_e=1$ à 20.

On a configuré la géométrie du cas étudié, et la génération de son maillage. L'incorporation des conditions aux limites ont été élaborées avec le code de calcul Ansys-Fleunt.

III.3.1 Conditions aux limites :

Il existe plusieurs variantes, pour chaque type de condition aux limites. Donc on a présenté les conditions aux limites du domaine selon la nature de la limite considérée. En outre, pour le cas étudié, les conditions aux limites sont schématisées dans la Figure IV.5 ci-dessous. Les dimensions du local sont très grandes par rapport à celles de la zone de diffusion d'air. Il faut définir les conditions aux limites, pour résoudre toutes les équations aux dérivées partielles considérées.

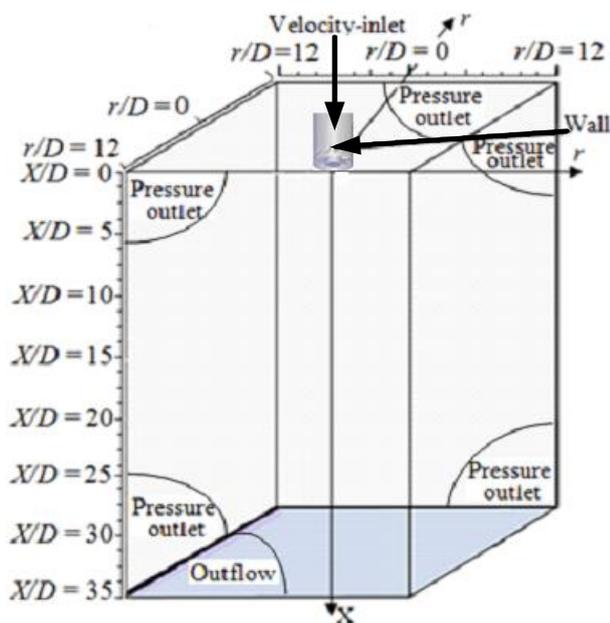


Figure III-3 Domaine de calcul et contrainte de fonctionnement.

Chapitre : III Résultats et discussions

➤ **Entrée de fluide**

Elle est de type "**velocity inlet**". On a imposé une vitesse absolue du fluide, ainsi que les caractéristiques de la turbulence en fixant l'intensité de turbulence I_{tur} et une dimension caractéristique L_{tur} , sur la base de calcul du nombre de Reynolds (R_e) de l'air.

➤ **Parois latérales et la paroi haute**

Les parois latérales ainsi que la paroi haute sont modélisées par une condition de type "**pressure outlet**" qui permet de prendre en compte les propriétés d'une entrée de fluide par le plan de sortie du domaine, dans laquelle on impose simplement la pression statique dans le plan de sortie. On y fixe également les valeurs des propriétés scalaires (température et grandeurs de turbulence) du fluide potentiellement entrant dans le domaine par cette limite.

➤ **Paroi basse**

La paroi basse est modélisée par une condition de type "**Outflow**" où l'écoulement est complètement développé.

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence « operating conditions ».

Fluent aussi prend par défaut la valeur de la pression atmosphérique comme pression de référence.

A l'entrée, il suffit d'imposer les valeurs de vitesses nécessaires, de la température et de l'intensité de turbulence.

Les conditions initiales pour les modèles de turbulence LES/S-L, LES/ WALE et LES/K-ET sont comme suivantes :

Chapitre : III Résultats et discussions

- Vitesse d'entrée : 7.7 (m/s) ;
- Température d'entrée : 323.3(K) ;
- Intensité de turbulence : 5 (%) ;
- Nombre de Reynolds : $R_{eynolds} = 18330$;
- Pression : Standard ;
- Les facteurs de relaxation : Pression = 0.3, Densité = 0.9, Energie = 0.9, Moment = 0.6.

Body forces = 0.9, Turbulent kinetic Energy = 0.7, Specific Dissipation Rate = 0.7, Turbulent.

Viscosity = 0.9.

- Critère de convergence : Energie = 10^{-6} , Autres paramètres = 10^{-3} .

III.3.2 Maillage :

La génération d'une bonne qualité de maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD pour faire un calcul précis, vu l'influence des paramètres sur la solution calculée.

Pour les applications en climatisation et en chauffage des locaux habitable (CVC), la technique de génération de maillage peut être résumée sous la forme suivante :

- La géométrie doit être préparée au préalable, avec la définition de tous les composants, diffuseur et local sous forme de données numériques, fichier maillage qu'on peut importer sous Gambit.
- La géométrie qui représente les différents domaines est décomposée en sous domaines « maillables ».
- Maillages des sous-domaines.

Chapitre : III Résultats et discussions

La réduction du temps nécessaire à la génération du maillage est un critère très important de réussite de la conception de la géométrie étudiée et un indice d'une meilleure utilisation des outils CFD

III.3.2.1 Types de maillage :

La figure ci-dessous représente les différents types de maillages (2D ou 3D) utilisés par Fluent :

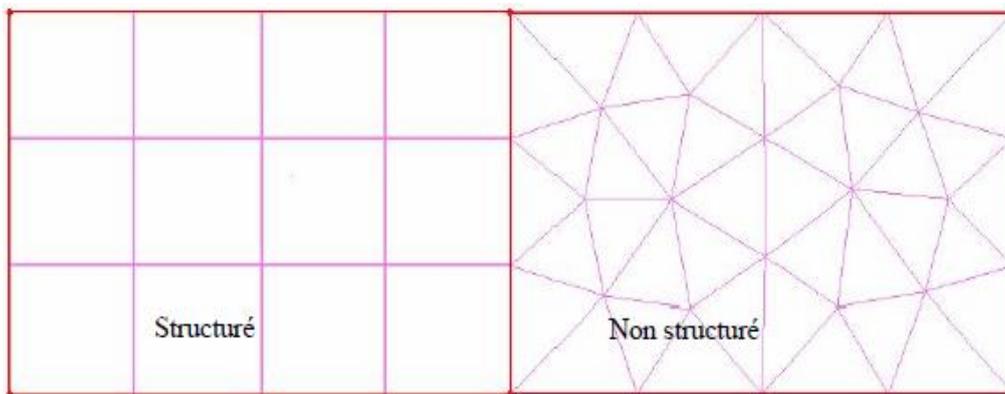


Figure III-4 Type de maillage utilisé par le code Fluent [75]

a. Maillage non structuré (tri/tétra)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement, sans aucune contrainte quant à leur disposition.

Ses avantages :

Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.

Les algorithmes de génération des mailles (Tétra) sont très automatisés.

Chapitre : III Résultats et discussions

Ses inconvénients :

- Très grand nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importantes si l'on compare avec le maillage structuré.

b. Maillage structuré (quadra/hexa)

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie multi bloc. Il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre et présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numérique car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients :

- Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

c. Maillage hybride

Ce maillage est généré par un mélange d'éléments de différents types (triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D). Cette caractéristique lui permet de rassembler les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré [60].

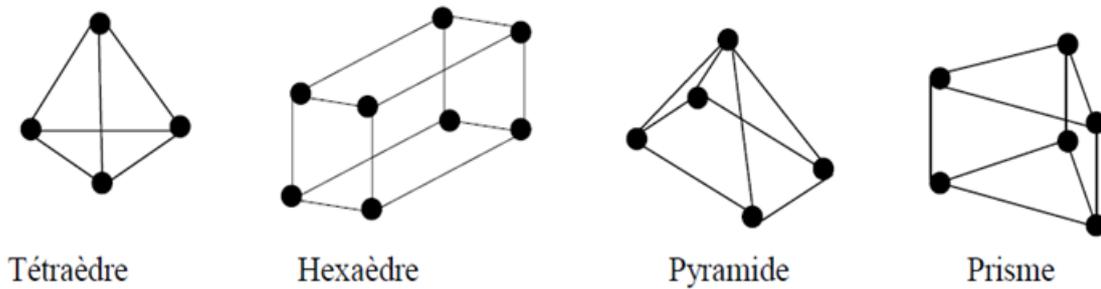


Figure III-5 Les différentes formes géométriques des mailles 3D utilisées par Fluent [3].

On a choisi le maillage tétraédrique. Les mailles proches de l’orifice de soufflage sont des tétraèdres et également les mailles du reste du domaine sont des tétraèdres. Près de l’orifice de soufflage, il est nécessaire d’avoir des mailles les plus petits possibles pour bien modéliser l’écoulement à cet endroit.

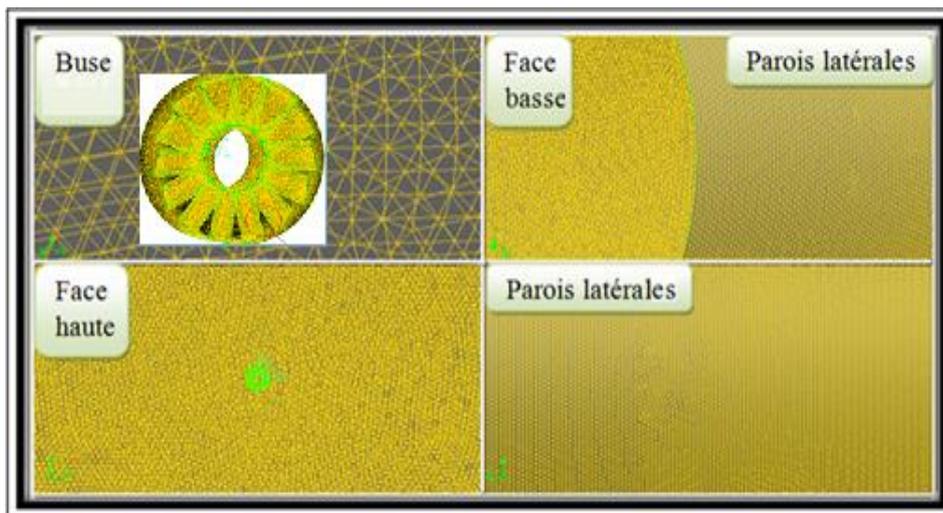


Figure III-6 Maillage du domaine étudié (III-2)

III.3.3 Hypothèses fondamentales et simplificatrices :

On peut obtenir le modèle général qui permet de décrire le mouvement d’un fluide par l’application des bilans de masse, de quantité de mouvement et d’énergie, effectués sur le fluide.

Chapitre : III Résultats et discussions

Nous vous présentons quelques hypothèses adoptées :

- Fluide Newtonien ;
- Fluide incompressible et tridimensionnel ;
- Ecoulement axisymétrique ;
- Ecoulement stationnaire ;
- Forces extérieures négligeables ;
- Pas d'échange de chaleur et de masse aux frontières du domaine physique.

Tableau III-2 Propriétés physiques de l'air.

| <i>Propriétés physiques du fluide</i> | Masse volumique ρ (kg/m ³) | Chaleur spécifique C_p (J/kg.K) | Conductivité thermique λ (W/m.K) | Viscosité dynamique μ (kg/m.s) | Coefficient de dilatation linéaire β (K ⁻¹) |
|---|---|---|--|--|---|
| <i>Air</i> | 1.225 | 1006.63 | 0.0242 | $1.789 \cdot 10^{-5}$ | $3331 \cdot 10^{-6}$ |

III.3.4 Validation des résultats :

III.3.4.1 Profils de vitesse axiale réduite pour un jet d'air tourbillonnaire en mode libre :

La Figure 11 montre une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux relatifs à la vitesse réduite (U_r) au niveau des différentes stations. Sachant que les résultats numériques sont obtenus en testant deux modèles de turbulence : LES/S-L et LES/ WALE.

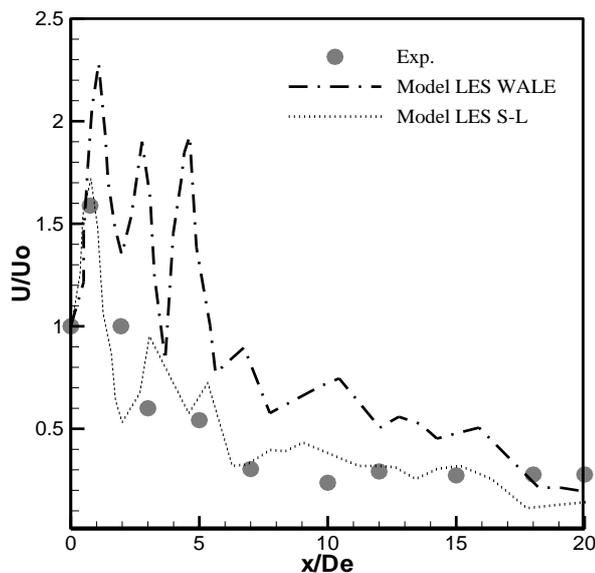


Figure III-7 Comparaison des profils expérimentaux et numériques de vitesse axiale.

La Figure 7 montre que les vitesses prédites par le modèle de turbulence LES/S-L conviennent à celle de l'expérience. Tous les modèles de turbulence ne permettent pas de prédire simultanément la variation axiale de la vitesse (U_r), dans tout le domaine exploré.

Après avoir comparé les résultats obtenus à l'aide de modèles LES/SL et LES/WALE et les résultats expérimentaux dans la direction axiale, on constate que les vitesses axiales adimensionnelles moyennes prédites par le modèle LES/K-SL sont en assez bon accord avec les données expérimentales et validées correctement et de façon satisfaisante.

III.3.4.2 Profils de vitesse radiale réduite pour un jet d'air tourbillonnaire en mode libre :

Les Figures suivantes présentent les profils de vitesse radiale prédits par les modèles de turbulence, LES/S-L et LES/WALE, comparés avec des résultats expérimentaux mesurés aux stations ($x/D_e = 3$ et 10).

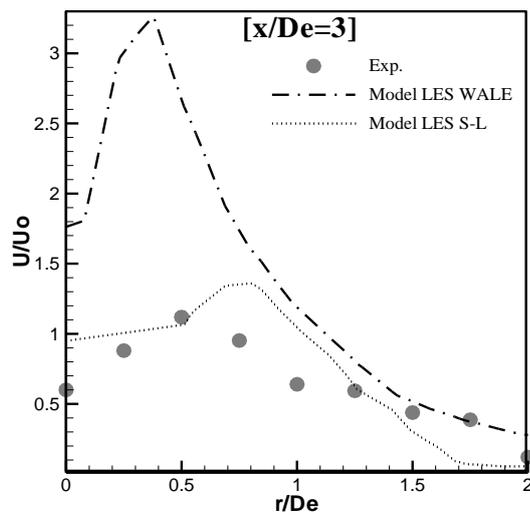


Figure III-8 Comparaison des profils expérimentaux et numériques de la vitesse radiale pour la station $X/De=3$.

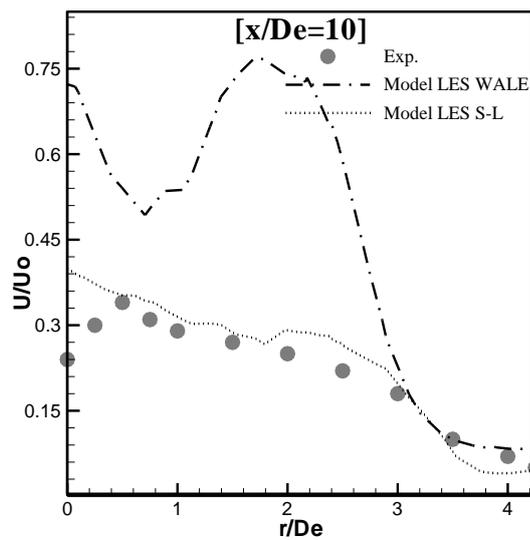


Figure III-9 Comparaison des profils expérimentaux et numériques de la vitesse radiale pour la station $X/De=10$.

Les profils de vitesse radiale réduits sont illustrés dans la Figure 8-9 et comparés aux valeurs expérimentales à $x/D_e=3$ et 10.

Le modèle LES / S-L donne une forme similaire présentant un certain écart avec les valeurs expérimentales. Le modèle de turbulence LES / WALE, prévoit des évolutions

Chapitre : III Résultats et discussions

insatisfaisantes des grandeurs dynamiques. Encore, Tous les modèles de turbulence ne peuvent pas prédire en même temps l'évolution de la vitesse radiale (U_r) dans tout le domaine d'écoulement.

Alors, le modèle LES/S-L donne des résultats proches à ceux obtenus de l'expérience et prédit de façon satisfaisante l'évolution des vitesses radiales et axiales du jet.

Pour les vitesses radiales adimensionnelles moyennes, les résultats de l'expérimentation et ceux des prédictions numériques ont été pareils d'une façon satisfaisante comme le montre la Figure 8 et la Figure 9, le modèle LES/S-L sous-estime bien les résultats expérimentaux.

Les résultats numériques (Figures III.7, III.8 et III.9) montrent que la vitesse axiale prédite par le modèle de turbulence LES/S-L est en général en bon accord avec les données expérimentales et donne une bonne concordance avec les résultats expérimentaux dans la direction dans la direction radiale également.

III.4 Sources d'erreur numérique :

Les sources d'erreurs suivantes sont généralement observées :

- 1) Les erreurs dues au modèle, qu'on peut contrôler par un choix convenable du modèle mathématique ;
- 2) Les erreurs sur les données, qui peuvent être réduites en améliorant la précision des mesures ;
- 3) Les erreurs d'arrondi introduites par l'ordinateur au cours de la résolution effective du problème ;
- 4) Les erreurs du point 3 constituent l'erreur numérique.

Chapitre : III Résultats et discussions

Une méthode numérique est convergente si cette erreur peut être rendue arbitrairement petite quand on augmente le volume de calcul. Naturellement, la convergence est le but principal, mais en tenant compte de la précision, la fiabilité et l'efficacité.

III.5 Conclusion :

Tout au long de ce chapitre, nous avons réalisé une étude expérimentale et numérique d'un jet tourbillonnaire adapté dans plusieurs systèmes comme le système CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation).

Basé sur l'analyse des profils de vitesse axiale et radiale, on a trouvé que les performances de mélange du jet d'air tourbillonnaire comptent sur le nombre et l'angle d'inclinaison d'ailettes.

Pour effectuer des simulations numériques. On a utilisé deux modèles de turbulence LES/S-L et LES/WALE. Le modèle le plus étudié LES/S-L montre une cohérence entre les résultats numériques de la vitesse et les résultats expérimentaux contrairement à ce que le modèle LES/WALE montrait.

Les deux modèles ne peuvent pas prédire simultanément l'évolution dynamique dans toutes les directions du domaine d'écoulement. Il a été prouvé que le modèle LES/S-L est le plus efficace pour ce type de jet (tourbillonnaire).

Conclusion Générale

IV. Conclusion Générale :

Dans ce mémoire, nous avons présenté une étude expérimentale et numérique d'un jet d'air libre à diffuseur tourbillonnaire appliqués au confort des pièces d'habitation afin d'améliorer 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.

L'amélioration des paramètres tels que la géométrie du diffuseur de soufflage d'air, le nombre et l'angle d'inclinaison des ailettes, permettent d'améliorer la qualité de l'air et l'efficacité d'homogénéisation caractérisée par une grande zone de recirculation centrale, à l'intérieur de cette zone, les lignes de courants se déplacent radialement pour élargir la distribution des vitesses moyenne suivant l'axe de jet tourbillonnaire.

Les résultats numériques sont obtenus à l'aide d'un code commercial qui s'appelle Ansys-FLUENT qui se base sur la méthode des volumes fins.

L'analyse des profils axiaux et radiaux des vitesses mis a en évidence l'importance et le rôle que jouent le nombre et l'angle d'inclinaison des ailettes de diffuseur dans la performance de mélange de l'écoulement d'air.

Afin d'améliorer les prévisions des modèles de turbulence, on a testé deux modèles de turbulences : le modèle de Smagorinski-Lilly (LES/S-L) et le modèle de Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (LES/WALE) en vue d'opter pour le modèle le plus adéquat relatif à ce type d'écoulement. Les résultats obtenus avec le modèle de turbulence (LES/S-L), est en bon accord avec les résultats expérimentaux. Elles montrent l'intérêt de la caractérisation de ce type de jet pour son application aux systèmes de CVC (chauffage, ventilation et Climatisation).

Références bibliographiques

- [1] S. HAI NE, "Elaboration d'une stratégie de ventilation pour l'élimination efficace des bioaérosols dans une unité de bronchoscopie", Éditions Université du Québec, Rapport de mémoire, 06 juin 2014.
- [2] M. BRAIKIA, L. LOUKARFI, et A. KHELIL, "Homogénéisation des ambiances par jets tourbillonnaires multiples", Éditions Universitaires Européennes, 2012.
- [3] M. ROUDANE, "Etude expérimentale et numérique d'un multi jet tourbillonnaire confiné et chauffé", Éditions Université Mohamed Boudhiah d'Oran, Doctorat en science, 2014.
- [4] H. Hu, T. Kobayashi, N. Taniguchi, A. "study on a lobed jet mixing flow by using stereoscopic particle image velocimetry technique", Physics of Fluids, 2001. 13 : p342.
- [5] A. Dia, "Simulation de jets d'air lobes pour l'optimisation des Unités Terminales de Diffusion d'Air", université de la rochelle, Doctorat en sciences, 2012.
- [6] F. KHERCHI et Y. LABACHI, "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, Master ELM ,2021.
- [7] A. BENNIA et A. KHELIL, "jet a diffuseurs munis de lobes", Edition, Universitaire Européennes, Saarbrücken (Allmagne),2017, P.1-188.
- [8] M. BRAIKIA, L. LOUKARFI et A. KHELIL, "Homogénéisation des ambiances par jets tourbillonnaires multiples", Éditions Universitaires Européennes, 2012.EFFECT.
- [9] www.france.air.com.Services réglementation règles de l'art en diffusion. La diffusion par type.
- [10] <https://www.france-air.com>, "regles-de-lart-en-diffusion".
- [11] www.sagicofim.com.Climatisation. Diffuseurs 2012.
- [12] A. Zaaraoui et T. A. Miloud, "Modélisation numérique d'un multi-jet turbulent libre, mémoire magistère", Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie 2009.
- [13] L. GICQUEL, "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.
- [14] A. BENNIA, A. LOUKARFI, A. KHELIL, S. MOUHAMADI, M. BRAIKIA et H. NAJI, "Experimental and numerical investigation of a turbulent lobed diffuser jet: application to residential comfort, mechanics & industry", 2018, 19 (1): pp.104-115.
- [15] G. N. ABRAMOVICH, "The theory of turbulent jets", The MIT press, Cambridge, 1963.
- [16] A. BENNIA, L. LOUKARFI, A. KHELIL, S. MOHAMEDI, M. BRAIKIA, H. NAJI, "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.FIGURE ALURE
-

Références bibliographiques

- [17] D. 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.
- [18] A. AOUCHICHE, et A. HADDADI, "Etude Numérique Du Refroidissement D'une Plaque Chauffée Par Un Jet L'Impactant Dans Un Canal", Université de Tizi-Ouzou, 2016.
- [19] 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.
- [20] 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. FIGURE
- [21] E.P. VOLCHKOV, "An experimental study of the flow stabilization in a channel with a swirled periphery jet", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43: pp. 375-386. FIGURE
- [22] [https://tel.archives-ouvertes.fr > document](https://tel.archives-ouvertes.fr/document).
- [23] A.J. YULE, "Large scale structure in the mixing layer of a round jet. *Journal of Fluids Mechanics*", 1978, 89 (3) : pp. 413-432.
- [24] N. RIVIERE, "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.
- [25] C. CORNARO, A. FLEISCHER, et R. GOLDSTEIN, "Flow visualization of around jet impinging on cylindrical surfaces", *Exp. Thermal and Fluid Science* 1999, 20 (2): pp. 66–78.
- [26] C. POPIEL, et L. BOGUSLAWSKI, "Flow structure of the free round turbulent jet in the initial region", *J. Fluid Mech* 1979, 90: pp. 531–539.
- [27] T. DANIEL, "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.
- [28] S. FAROKHI, R. TAGHAVI, et E.J. RICE, "Effect of initial swirl distribution on the evolution of a turbulent jet", *AIAA Journal* 1989, 27: pp. 700-706. FIGURE.
- [29] H. HUERRE, "Perturbed free shear layers". *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1984, 16.
- [30] <http://www.france-air.com>.
- [31] J. BEÉR, et N. CHIGIER, " Swirling Flows ", in *Combustion Aerodynamics* edited by Krieger, Malabar, Florida, 1972, 100-146.
- [32] S. FAROKHI, R. TAGHAVI, E. J. RICE, "Effect of initial swirl distribution on the evolution of a turbulent jet", *A.I.A.A Journal*, 1989, 27, 700-706.
-

Références bibliographiques

- [33] H. J. SHEEN, W. J. CHEN, S. Y. JENG, et T. L. HUANG, "Correlation of swirl number for a radial-type swirl generator", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996, 12, 444-451.
- [34] M. L. MATHUR, N. MACCALLUM, (1967): " Swirling air jets issuing from vane swirl", Part1: Free jets, *Journal of the Institute of Fuel*, 214, 214-225.
- [35] A. ATESHKADI, V. MC DONELL, et G.S. SAMUELSEN, (1998): " Effect of hardware geometry on gas and drop behaviour in a radial mixer spray", *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1985-1992.
- [36] J. BRODA, S. SEO, R. SANTORA, G. SHIRHATTIKAR, et V. YANG, "An experimental study of combustion dynamics of a premixed swirl injector", *TwentySeventh Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1985- 1992.
- [37] W. G. ROSE, (1962), "A swirling round turbulent jet", *Journal of Applied Mechanics*, 29, 615- 625.
- [38] J. M. LOPEZ, (1990), "Axisymmetric vortex breakdown ", Part1. Confined swirling flow, *J. Fluid Mech*, 221, 553-552.
- [39] O. LUCCA-NEGRO, T. O'DOHERTY, (2001), " Vortex Breakdown: a review ", *Prog. Energy. Combust. Sci*, 27, 431-481.
- [40] R. SHI, et B. CHEHROUDI, (1994), "Velocity Characteristics of a confined highlyturbulent swirling flow near a swirl plate", *J. of Fluid Eng*, 16, 685-693.
- [41] N.A. CHIGIER, J.M. BEÉR, (1964): "Velocity and static-pressure distributions in swirling air jets issuing from annular and divergent nozzles", *Journal of Basic Engineering*, 788-796. Références bibliographiques 105
- [42] J. STEPHENS, S. ACHARYA, E.J. GUTMARK, (1999), "An experimental study: Swirl-stabilized spray combustion with active forcing", *37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno, NV, AIAA*, 99-0330.
- [43] W. LEUCKEL, et N. FRICKER, (1976), "The characteristics of swirl-stabilized natural gas flames", Part I: Different flame types and their relation to flow and mixing patterns, *Journal of the Institute of Fuel*, +103-112
- [44] N.A. CHIGIER, et A. CHERVINSKY, (1967), "Experimental investigation of swirl vortex motion in Jets", *Journal of Applied Mechanics*, 443-451.
- [45] T.B. BENJAMIN, (1962), "Theory of the vortex breakdown phenomenon", *J. Fluid Mech*, 14.
- [46] T. SARPKAYA, (1971), " On stationary and travelling vortex breakdowns", *J. Fluid Mech*, 45, 545-559.
- [47] M.P. ESCUDIER, et J.J. KELLER, (1985), "Recirculation in swirling flow: a manifestation of vortex breakdown", *A.I.A.A Journal*, 23, 111-116.
- [48] P. VOLCHKOVE, V.P. LEBEDEV, V.I. TEREKHOV, et E. SHISHKINN, (2000), "An experimental study of the flow stabilization in a channel with a swirled periphery jet", *Intentional Journal of Heat and Mass Transfer*, 43:375-386.
-

Références bibliographiques

- [49] A. KHELIL, H. NAJI, L. LOUKARFI, et G. MOMPEAN, (2009), "Prediction of a high swirled natural gas diffusion flame using a PDF model", *Fuel*, 88(2):374-381.
- [50] Y. HUANG, et V. YANG, (2009), "Dynamics and stability of lean-premixed swirlstabilized combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, 35:293-364.
- [51] D.H. LEE, S.Y. WON, Y.T. KIM, et Y. S. Chung, (2002) "Turbulent heat transfer from a flat surface to a swirling round impinging jet", *International Journal Heat and Masse Transfer*, 45:223-227.
- [52] P.M. NAKOD, S.V. PRABHU, et R.P. VEDULA, (2008), "Heat transfer augmentation between impinging circular air jet and flat plate using finned surfaces and vortex generators", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32:1168-1187.
- [53] M. FELLI, M. FALCHI, et F.G.A. PEREIRA, (2009), "Distance effect on the behavior of an impinging swirling jet by PIV and flow visualizations", *Experiments in Fluids*, 48:197-209.
- [54] R. THUNDIL KARUPPA RAJ, et V. GANESAN, (2008), "Study on the effect of various parameters on flow development behind vane swirlers", *International Journal of Thermal Sciences*, 47:1204-1225.
- [55] M. Ahmadvand, A.F. Najafi, et S. Shahidinejad, (2010), "An experimental study and CFD analysis towards heat transfer and fluid flow characteristic of decaying swirl pipe flow generated by axial vanes", *Meccanica*, 45:111-129.
- [56] A.T.G. GIORGES, L.J. FORNEY, et X.D. WANG, (2001), "Numerical study of multijet mixing", *Chemical Engineering Research and Design*, 79:515-521.
- [57] T.G. AKLILU, L. J. FORNEY, et W. XIAODONG, (2001), "Numerical study of multijet mixing", *Chemical Engineering Research and Design*, 79(5):515-522.
- [58] S. J. WANG, et A. MUJUMDAR, (2007), "Flow and mixing characteristics of multiple and multi-set opposing jets", *Chemical Engineering and processing*, 46:703-712.
- [59] S. KUCUKGOKOGLAN, A. AROUSSI, S. J. PICKERING, (2001), "CFD simulations of two co-rotating burner flows", *The 6 th Asian symposium on visualization*, 176:1-6.
- [60] Ooi. YONGSONO, A.I. DRUDDINI, Z.A. ZAINAL, et P. A. ASWATHA NARAYANAPA, (2007), "Airflow analysis in an air conditioning room", *Building and environment*, 42:1531-1537.
- [61] W. RUSLAN, " Turbulence intensity of swirling jet air motion combustion chamber for internal combustion engine", Ph. D. Thesis, Faculty of the Institute Technology of Bundung, 1992.
- [62] E. P. VOLSHKOV, M. MATOVICH, S. OKA, S. YU. SPOTAR, I. A. CHOKHAR, "Use of a laser Doppler anemometer to study turbulent swirled jets", *Heat Transfer-Soviet Research*, 1991, 23 (4): pp. 470-502.
- [63] GAD-EL-HAK, M., ANDREW, P., *Introduction to Flow Control*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, 53: pp. 1-107.
-

Références bibliographiques

- [64] P. G SPAZZINI, V. TODDLE, V. SANDBURG, M. Passive control of a free jet. In RoomVent, 8 th International Conference on air distribution in rooms. Copenhagen, Denmark, 2002.
- [65] D. R JEBAMANI, 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.
- [65][66] Y HUANG, V. YANG, Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion, Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35: pp. 293-364.
- [67] SLIMANI Mouhamed : "Modélisation numérique d'un multi-jet turbulent libre", Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- [68] A. 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.
- [69] P. Billant, J. M. Chomaz , Huerre P. Experimental study of vortex breakdown in swirling jets. J. Fluid Mech. 1998, 376, 183-219.
- [70] A. BENNIA, S. RAHAL, la convection naturelle dans une cavité simulant un thermosiphon, *éditions universitaires europeennes*, saarbr_cken (allemagne), 2014.
- [71] A. BENNIA, A. LOUKARFI, A. KHELIL, S. MOUHAMADI, M. BRAIKIA, H. NAJI, Experimental and numerical investigation of a turbulent lobed diffuser jet: application to residential comfort, mechanics & industry, 2018, 19 (1): pp.104-115.
- [72] K. B. M. Q. ZAMAN, A. K. M. F. HUSSAIN, Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation. Part 1 General jet response. J. Fluid Mech 1980, 101: pp 449-491.
- [73] A. DIA, Simulation de jets d'air lobés pour l'optimisation des Unités Terminales de Diffusion d'Air, Université de La Rochelle. Doctorat en sciences, 2012.
- [74] I. NASTASE, Analyse des jets lobés en vue de leur intégration dans les Unités Terminales de Diffusion d'air, Université de La Rochelle, 2007.
- [75] REVEILLON, J., Simulation et modélisation numérique, Cours de l'université de Rouen (France), 2003.
- [76] en vue de l'amélioration du transfert de chaleur par l'interaction des jets tourbillonnaires multiples impingent : Application aux systèmes de climatisation des locaux administratifs. 2022
- [77] A. RADJOUH, R. MECHETA, Etude expérimentale dynamique d'un jet d'air tourbillonnaire : Amélioration de la diffusion d'air dans les immeubles résidentiels, mémoire master 2, Université de Bordj Bou Arreridj Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj 2021
-