



Simulation de jets d'air lobés pour l'optimisation des Unités Terminales de Diffusion d'Air

Aliou Dia

► **To cite this version:**

Aliou Dia. Simulation de jets d'air lobés pour l'optimisation des Unités Terminales de Diffusion d'Air. Autre. Université de La Rochelle, 2012. Français. <NNT : 2012LAROS360>. <tel-00818414>

HAL Id: tel-00818414

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00818414>

Submitted on 26 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

présentée devant

L'Université de La Rochelle

UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'Ingénieur

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

Spécialité: GENIE CIVIL

Ecole doctorale de La Rochelle

par

Aliou DIA

le 20 mars 2012

Simulation de jets d'air lobés pour l'optimisation des Unités
Terminales de Diffusion d'Air

Jury :

F. Allard	Professeur, Université de La Rochelle, France	Examineur
E. Antczak	Professeur, Université d'Artois, France	Rapporteur
C. Beghein	Maître de Conférences, Université de La Rochelle, France	Co-encadrant
P. Deroubaix	Ingénieur ADEME, France	Invité
A. Meslem	Maître de Conférences, Université de La Rochelle, France	Directeur
J. Miriel	Professeur, Université de Rennes 1, France	Rapporteur
P.J. Vialle	Dr. Ingénieur, CIAT Laboratoire, Culoz, France	Examineur

RESUME

La thèse traite de la simulation numérique de jets d'air lobés pour l'optimisation des Unités Terminales de Diffusion de l'Air pour le bâtiment. Il est présenté tout d'abord une analyse bibliographique exhaustive sur les jets d'air et sur les moyens passifs de leur contrôle. Vient ensuite un exposé des principes de la modélisation des écoulements turbulents. Sur la base des précédents éléments, nous abordons la phase de simulation et d'analyse de jets d'air lobés en trois parties. La première partie traite de la simulation d'un jet d'air libre à très faible nombre de Reynolds (Reynolds 800) en régime instationnaire. Dans cette étude, nous avons présenté plusieurs cas tests de simulation d'un jet d'orifice en forme de croix que nous avons confrontés à des résultats expérimentaux. Du point de vue quantitatif, la simulation du quart du jet a permis d'obtenir des caractéristiques globales assez satisfaisantes. Pour détecter d'une façon significative l'instationnarité du jet, il a été nécessaire de simuler la totalité du jet, mais ceci a été fait au détriment du nombre de mailles dans le domaine de calcul, ce qui conduit par conséquent à des résultats quantitativement inappropriés. La deuxième partie simule le même jet d'air mais en régime turbulent (Reynolds 3000). Sept modèles de turbulence ont été confrontés à des résultats expérimentaux. Nous montrons la pertinence du modèle RSM (Reynolds Stress Model) pour la prédiction de l'écoulement. La dernière partie est dédiée à la simulation de jets d'air turbulents en interaction. Cette partie se décline en trois études successives et complémentaires. La première a pour objet de rechercher le modèle de turbulence le plus pertinent capable de reproduire les phénomènes et les grandeurs utiles à l'application visée. La conclusion est qu'aucun des modèles de turbulence évalués n'est capable de prédire l'ensemble des caractéristiques dynamiques de l'écoulement de jets lobés en interaction. Cependant, parmi ces modèles, SST $k - \omega$ apparaît nettement supérieur dans la prédiction de l'interaction des jets, de l'expansion dynamique globale et de l'entraînement de l'air ambiant lorsque l'écoulement est résolu à travers le diffuseur lobé. Sur la base des grandeurs dynamiques pertinentes identifiées et dont la prédiction par le modèle SST $k - \omega$ est jugée satisfaisante, nous entreprenons dans la suite une analyse de l'influence de la géométrie du lobe sur la capacité d'induction de l'écoulement. Un lobe de forme arrondie est alors trouvé plus avantageux qu'un lobe à angles droits. Enfin, la dernière étude s'intéresse à l'effet de la disposition et de l'espacement des orifices lobés sur les grandeurs globales de l'écoulement. Une solution géométrique permettant l'augmentation de la transparence de l'Unité Terminale de Diffusion de l'Air lobée est alors proposée. Elle devra être testée expérimentalement en conditions réelles, dans la cellule test échelle 1 thermiquement gardée nouvellement construite au LEPTIAB.

ABSTRACT

The thesis deals with the numerical simulation of lobed air jets for the optimization of Air Diffusion Terminal Units for buildings. First is presented a comprehensive literature review of the air jets and of the passive means of flow control. The manuscript continues with the principles of modeling of turbulent flows. Based on the previous considerations, we discuss the simulation and analysis of the air lobed jets following three parts. The first part deals with the simulation of an air jet at very low Reynolds number (Reynolds 800) in the unsteady regime. In this study, we presented several test cases of simulation for a cross-shaped orifice jet that we have confronted with experimental results.

From the quantitative point of view, the simulation of a quarter of the jet's section has yielded reasonably good results for the global characteristics of the flow. In order to detect in a significant way the unsteadiness of the jet, it was necessary to simulate the entire jet, but this was done at the expense of the number of cells in the computational domain, which consequently led to inappropriate quantitative results.

In the second part we simulated the same air flow but in the turbulent regime (Reynolds 3000). Seven turbulence models have been confronted with experimental results. We show the relevance of the RSM turbulence model (Reynolds Stress Model) for predicting the flow.

The last part is dedicated to the simulation of turbulent air jet in interaction. This part is divided into three successive and complementary studies. The first one was dedicated to find which turbulence model can reproduce most relevant phenomena and variables to the concerned application. The conclusion is that none of the turbulence models was able to predict all the dynamic features of the lobed jet flows in interaction. However, of these models, SST $k - \omega$ appears to be significantly better for the prediction of the interaction of the jets, the global dynamical expansion and the entrainment of the ambient air when the flow is numerically resolved through the lobed diffuser. On the basis of relevant dynamic quantities well predicted by the SST $k - \omega$ turbulence model, we undertake in the following part an analysis of the influence of the geometry of the lobe on the ability of the flow to entrain. A rounded lobe is then found to be more advantageous than a lobe with right angles. The final study examines the effect of the arrangement and spacing of the lobed orifices on the global quantities of the flow. A geometric solution allowing to increase the transparency of the lobed Air Diffusion Terminal Unit is then proposed. This solution should be tested experimentally in real conditions, in the new full scale model room constructed at LEPTIAB.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été mené au sein du Laboratoire LEPTIAB de l'Université de la Rochelle.

J'aimerais exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ma thèse :

Mesdames Beghein Wehli Claudine et Amina Meslem, Maîtres de Conférences au Département Génie Civil, pour leur sollicitude constante quant à l'encadrement de ces travaux de thèse;

Messieurs Francis Allard, directeur du LEPTIAB et Aziz Hamdouni, directeur de l'école doctorale

Le corps professoral du Département Génie civil, Génie mécanique, Génie industriel pour ma formation, ainsi qu'à tous les doctorants pour leur soutien moral et leur sympathique compagnie à la recherche du savoir.

Messieurs Jean Pierre Vialle (Ingénieur de la CIAT) et Pierre Deroubaix (Ingénieur de l'ADEME) pour leur suivi régulier de mes travaux de thèse.

Je tiens à remercier les rapporteurs, Monsieur Jacques MIRIEL – Professeur, Directeur de l'IUT de Rennes, Université de Rennes 1, et Monsieur Emmanuel ANTCZAK, Professeur à l'Université d'Artois, d'avoir accepté d'être rapporteurs de mes travaux de thèse.

Je remercie également l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et la CIAT (Compagnie Industrielle d'aérodynamique et Thermique) qui m'ont permis de mener à bien mon travail de doctorat, par leur financement.

SOMMAIRE / TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	10
CHAPITRE 1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	13
1.1 INTRODUCTION	13
1.2 JETS AXISYMETRIQUES OU PLANS	14
1.2.1 Description générale.....	14
1.2.2 Structures tourbillonnaires	19
1.3 JETS A CONTROLE PASSIF	22
1.3.1 Introduction.....	22
1.3.2 Jet elliptique.....	28
1.3.3 Jet lobé d'orifice	36
1.4 Conclusion	58
CHAPITRE 2. METHODOLOGIE	61
2.1 EQUATIONS DE DEPART.....	61
2.2 DECOMPOSITION DE REYNOLDS, OBTENTION DES EQUATIONS DE L'ECOLEMENT MOYEN	62
2.3 MODELES BASES SUR UNE VISCOSITE TURBULENTE	63
2.3.1 MODELES LINEAIRES.....	64
2.3.1.1 Modèle $k-\varepsilon$ standard à haut nombre de Reynolds	64
2.3.1.2 Modèle $k-\varepsilon$ à bas nombre de Reynolds de turbulence	66
2.3.1.3 Modèle $k-\varepsilon$ réalisable [(Shih et al. 1995)]	71
2.3.1.4 Modèle $k-\omega$ de [(Wilcox 1993)].....	72
2.3.1.5 Modèle $SSTk-\omega$ de [(Menter 1993)]	73
2.3.1.6 Modèle à bas nombre de Reynolds de [(Durbin 1993)] : modèle $k-\varepsilon-v^2$ ou modèle v^2-f	74
2.3.1.7 Problèmes et éventuelles corrections :	75
2.3.2 MODELES NON LINEAIRES	79
2.3.2.1 Exemple du modèle quadratique de [(Lien et al. 1996)]	79
2.3.2.2 Exemple de modèle cubique de [(Lien et al. 1996)]	80
2.4 MODELES AVEC DES EQUATIONS DE TRANSPORT POUR LES TENSIONS DE REYNOLDS (OU RSM : REYNOLDS STRESS MODELS)	81
2.4.1 EQUATIONS DE TRANSPORT POUR LES TENSIONS DE REYNOLDS.....	81
2.4.2 MODELE DE FERMETURE POUR UN ECOULEMENT A HAUT NOMBRE DE REYNOLDS.....	82
2.4.2.1 Tenseur de dissipation	82
2.4.2.2 Terme de diffusion.....	82

2.4.2.3	<i>Corrélation pression –déformation</i>	83
2.4.2.3.1	Rôle de Π_{ij}	83
2.4.2.3.2	Modèle linéaire :.....	85
2.4.2.3.3	Modèle quadratique de [(Speziale et al. 1991)]	87
2.4.3	Modèles de fermeture pour un écoulement à bas nombre de Reynolds.....	88
2.5	LOIS DE PAROI.....	89
2.5.1	Méthode standard des lois de paroi.....	89
2.5.2	Version améliorée de la méthode des lois de paroi	90
2.5.3	Modèle de loi paroi implanté dans Star-CCM+	92
2.6	SIMULATION DES GRANDES ECHELLES : (OULES (LARGE EDDY SIMULATION))	92
2.6.1	Principe de la simulation des Grandes Echelles	92
2.6.2	Modèle de Smagorinsky	95
2.6.3	Modèle dynamique	96
2.6.4	Modèles implémentés dans Star-CCM+	97
2.7	RESOLUTION NUMERIQUE DES EQUATIONS AVEC LE LOGICIEL STAR-CCM+	98
2.7.1	Approximation des flux de diffusion	98
2.7.2	Approximation des flux de convection	99
2.7.2.1	Schéma centré	99
2.7.2.2	Schéma upwind à l'ordre 2	100
2.7.5	Intégration temporelle	100
2.7.6	Résolution des équations de continuité et de conservation des quantités de mouvement, couplage pression-vitesse	101
2.7.6.2	Principe de l'algorithme SIMPLE	103
2.8	Conclusion	107
CHAPITRE 3. ETUDE NUMERIQUE D'UN JET D'ORIFICE EN REGIME INSTATIONNAIRE.....		108
3.1	Premier cas test : profil de vitesse uniforme imposé au niveau de l'orifice.....	109
3.1.1	Analyse des résultats et comparaison aux mesures	111
3.1.2	Conclusion	112
3.2	DEUXIEME CAS TEST : DOMAINE AVEC OBSTACLE.....	113
3.2.1	Comparaison aux mesures	115
3.3	TROISIEME CAS TEST : AMELIORATION DE LA RESOLUTION SPATIO-TEMPORELLE	123
3.3.1	Analyse des résultats numériques	125
3.3.2	Conclusion	134
3.4	QUATRIEME CAS TEST : PERTURBATION SINUSOÏDALE.....	134
3.4.1	Analyse des résultats obtenus	135
3.4.2	Conclusion	143
3.5	PERTURBATION SINUSOÏDALE ET RESOLUTION SPATIO-TEMPORELLE BASEE SUR LE CRITERE DE KOLMOGOROV	144
3.6	INFLUENCE DES CONDITIONS AUX LIMITES.....	144
3.6.1	Analyse des résultats.....	145

3.6.2 Conclusion	148
CHAPITRE 4. MODELISATION NUMERIQUE D'UN JET D'ORIFICE CROIX FAIBLEMENT TURBULENT	149
4.1 Introduction.....	149
4.3 Domaine de calcul	152
4.4 Modèles de turbulence utilisés.....	155
4.5 Résultats obtenus	156
4.6 Conclusions.....	189
CHAPITRE 5. ETUDE NUMERIQUE PAR MODELES RANS DE JETS D'ORIFICE CROIX COALESCENTS	190
RESUME.....	190
5.1 INTRODUCTION	191
5.2 OUTILS ET METHODES	197
5.2.1 Campagne expérimentale.....	197
5.2.1.1 Dispositif de soufflage et géométrie des orifices	197
5.2.1.2 Techniques de mesure	199
5.3 SIMULATION DES JETS COALESCENTS.....	201
5.3.1 Equations résolues.....	201
5.3.2 Détails du calcul	202
5.3.4 Conclusion	225
5.4 INFLUENCE DE LA FORME DES LOBES : LOBE DROIT ET LOBE ARRONDI.....	227
5.4.1 Analyse des résultats.....	230
5.4.2 Conclusion	240
5.5 Influence de la disposition relative et de l'espacement des orifices.....	241
5.5.1 Position du problème	241
5.5.2 Analyse des résultats.....	244
5.5.3 Conclusion	264
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	269
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	273

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En France, le bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques avec 43 % de l'énergie finale totale et 1,1 tonne d'équivalent pétrole consommée annuellement par chaque Français [(ADEME 2009)]. Le bâtiment produit également 23% des émissions nationales de CO₂. Il constitue donc un immense gisement d'économies d'énergie et de réduction des gaz à effet de serre. C'est la raison pour laquelle le Grenelle de l'Environnement a préconisé une réduction de la consommation énergétique de 38% d'ici à 2020 pour les bâtiments existants, et une rupture technologique sur le bâtiment neuf visant à généraliser les bâtiments à énergie positive en 2020 avec, d'ici 5 ans, au moins un tiers des bâtiments neufs à basse consommation ou à énergie positive [(Grenelle 2007)]. L'objectif primaire des Bâtiments à Basse Consommation (BBC) est évidemment la réduction de la consommation énergétique et la réduction des émissions de CO₂.

L'enveloppe du bâtiment est assimilable à une interface solide entre deux milieux fluides où les personnes évoluent : le milieu urbain qui joue un rôle de source ou de puits énergétique pour l'intérieur du bâtiment dont on cherche à contrôler la consommation, ou mieux, à annuler celle-ci en rendant le bâtiment énergétiquement autonome ou producteur d'énergie. Des travaux de recherche ont été soutenus par l'ADEME et l'ANR pour minimiser l'effet « puits » et augmenter l'effet « source » de l'environnement extérieur vis-à-vis du bâtiment. Les bâtiments deviennent isolés, étanches et équipés de systèmes de captage des énergies dites « gratuites » ou « renouvelables » disponibles dans le milieu extérieur. Les systèmes de stockage, de gestion et de distribution de l'énergie sont également optimisés pour répondre aux besoins d'énergie dont les périodes de consommation sont souvent en déphasage par rapport aux périodes de sa production. La compréhension et la modélisation des couplages entre le milieu extérieur, l'enveloppe du bâtiment et l'environnement intérieur, siège de la consommation énergétique, est également un enjeu important dans une perspective systémique des objectifs de durabilité. Le but est de faire coïncider une consommation énergétique sobre et un confort maximal de l'utilisateur.

La réduction importante des besoins énergétiques du bâtiment et son étanchéité pose le problème crucial de la bonne répartition spatiale des faibles débits d'air neuf à injecter dans les pièces de vie. La qualité de l'air et le confort thermique seront fortement dégradés si le problème du mélange de l'air injecté à l'air ambiant n'est pas efficacement résolu.

Une solution technologique finalisée typique qui permet une amélioration conséquente de l'induction du jet a été proposée dans le cadre du projet ANR-PREBAT 2005 « INDUBAT », projet coordonné par le LEPTIAB en partenariat avec la CIAT, Compagnie Industrielle d'Application Thermique. Il s'agit d'un diffuseur innovant de type panneau perforé à haute induction basé sur le contrôle passif du mélange du jet d'air à l'air ambiant. Ceci est obtenu, par l'utilisation de géométries lobées intégrées dans la conception du diffuseur d'air. L'exploration et la mise en situation de cette solution innovante a été conduite exclusivement par voie expérimentale. Si les résultats sont probants et prometteurs, il n'en demeure pas moins la nécessité d'une optimisation géométrique visant une induction optimale pour un taux de perforation maximal. En effet, le besoin exprimé par notre partenaire industriel consiste à augmenter le taux de perforation du diffuseur pour réduire sa perte de charge. Il s'en suit donc le besoin de minimiser l'espacement inter-trous tout en conservant la dynamique particulière du jet lobé élémentaire à l'origine de la performance d'induction constatée en proche soufflage du diffuseur. Il est également possible d'optimiser la géométrie de la perforation lobée élémentaire du diffuseur, toujours dans le but d'améliorer sa performance globale. L'optimisation géométrique ainsi visée n'est pas réalisable par la seule voie expérimentale en raison de la multiplicité des solutions et du caractère onéreux de la démarche. Ce fait nous conduit dans le cadre de nos travaux de thèse à s'intéresser à la prédiction du comportement du jet lobé libre ou en interaction par le calcul numérique aux moyens de codes de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) utilisant la résolution des équations de Navier-Stokes.

Ainsi, avec des codes de calcul CFD (Star-CD et Star-CCM+), nous avons calculé plusieurs types d'écoulements, en effectuant des validations par rapport à des expérimentations réalisées au LEPTIAB. Après cette nécessaire phase de validation, nous avons effectué des études paramétriques dans un but d'optimisation de l'auto-induction des jets lobés dans des conditions compatibles avec l'application visée.

Ainsi, ce mémoire est organisé en cinq chapitres.

Dans un premier temps, nous présentons une étude bibliographique à deux volets. Le premier volet (Chapitre 1) porte sur les connaissances de la physique des jets d'air turbulents. Le deuxième volet (Chapitre 2) présente la modélisation des écoulements turbulents par les modèles de type RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), ainsi que les méthodes de discrétisations implémentées dans les deux codes de calcul utilisés.

Le troisième chapitre, présente l'étude numérique en régime instationnaire d'un jet d'orifice en forme de croix à faible nombre de Reynolds. Toutes les étapes d'optimisation du domaine et du maillage de ce dernier, nécessaires à l'obtention de résultats en accord avec les données de références, sont présentées.

Le quatrième chapitre présente les simulations des jets turbulents à l'aide de modèles de turbulence RANS à deux équations, ou à l'aide d'un modèle plus élaboré à six équations. Nous présenterons également un calcul LES (Large Eddy Simulation).

Enfin le cinquième et dernier chapitre traite de jets lobés coalescents en régime turbulent à l'aide de modèles RANS. Cet écoulement représente une configuration simplifiée des phénomènes locaux se produisant dans un écoulement à jets parallèles multiples issus d'un panneau perforé. Nous cherchons dans un premier temps à reproduire le phénomène d'interaction entre les deux jets mitoyens. Nous faisons ensuite une étude paramétrique en fonction de l'espacement inter-trous, la disposition relative des trous et la forme des lobes.

Enfin, nous concluons ce mémoire en présentant les perspectives immédiates de la recherche menée.