

Analyse de jets d'air en interaction en vue de leur intégration dans les Unités Terminales de Diffusion d'Air

Amina Meslem¹, Ilinca Nastase² et Olivier Martin¹

¹ LEPTIAB – Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-industrie et Bâtiment

Université de La Rochelle : Av. Michel Crépeau, Pôle Sciences et Technologies, 17000, La Rochelle

amina.meslem@univ-lr.fr

² UTCB – Université Technique de Construction de Bucarest, Faculté d'Équipement Technique
66, Av. Pache Protopopescu, 021414, Bucarest

RESUME. L'analyse de l'écoulement moyen résultant de deux jets d'air coalescents ou d'un linéaire de jets parallèles est proposée pour deux géométries d'orifice de soufflage, un orifice lobé en forme de croix et un orifice circulaire de référence. Les résultats montrent que pour un même débit et une même section de soufflage, la géométrie lobée par rapport à la géométrie circulaire, conduit à un écoulement global plus homogène et à un meilleur brassage avec l'air ambiant. La portée est également plus importante, ce qui permet dans une optique d'économie d'énergie dans le domaine du traitement d'air du bâtiment, de réduire les débits soufflés sans avoir à faire des concessions sur les aspects de confort.

MOTS-CLÉS: Jets d'air, jets coalescents, mélange, conditionnement d'air, bâtiment

ABSTRACT. Mean field analysis for two coalescent air jets and for a row of multiple jets is proposed in the case of two exit geometries, a lobed cross-shaped orifice and a baseline circular orifice. It is showed that for the same exit area and volumetric flow rate, the lobed geometry yields more homogenous global flows and increased mixing with the ambient air than the circular geometry. For the lobed geometry the jet's throw is larger, which allows for HVAC applications to reduce the supply volumetric flow rates. This is important as for the energy savings within the buildings applications.

KEYWORDS: Air jets, twin jets, mixing, air-conditioning, building

1. INTRODUCTION

L'objectif fixé par les pouvoirs publics européens de réduire la consommation énergétique de 20% à l'horizon 2020, pose dans le domaine du bâtiment, deux types de problèmes : la maîtrise de l'enveloppe d'une part, et la maîtrise de l'air en tant que vecteur énergétique d'autre part. Les faibles puissances et les faibles débits d'air neuf qui seront injectés dans les enceintes par le « vecteur air » doivent être réparties uniformément dans l'espace à traiter, une condition essentielle à la réussite de la politique énergétique fixée par l'Europe. La maîtrise du « vecteur air » revient à contrôler les jets de traitement d'air et leur mélange à l'air ambiant à traiter. Le contrôle de ces écoulements peut être réalisé à l'aide de moyens passifs intégrés dans la conception des Unités Terminales de Diffusion d'air (Nastase 2007). Nous proposons d'y intégrer, en particulier, des géométries dites lobées utilisées à ce jour en sortie des éjecteurs ou des injecteurs dans les domaines de l'aéronautique et de la combustion.

Cette étude fait partie d'un programme de recherche (Projet INUBAT ANR-Prebat 2005) visant le développement d'Unités Terminales de Diffusion d'air innovantes pour le bâtiment, qui permettront d'allier efficacité énergétique et confort thermique. Le diffuseur innovant recherché, doit permettre une forte induction de l'air ambiant, en particulier dans la région initiale du jet, ce qui conduira à une stabilité de l'écoulement et à une meilleure répartition de la puissance injectée. La haute induction rendra possible des fonctionnements à des écarts de températures supérieurs à ceux pratiqués aujourd'hui en modes de climatisation et de chauffage. Il s'en suivra, à charges internes constantes, une réduction des débits de soufflage et par conséquent une réduction de la consommation électrique du ventilateur. On rendra ainsi possible une économie d'énergie à charge interne et à niveau de confort thermique constants, tout en réduisant le coût de conception et d'installation.

La performance de mélange d'une unité de diffusion d'air de type panneau perforé dépend à la fois de la performance de mélange du jet élémentaire isolé que nous avons étudié précédemment (Nastase, Meslem et al. 2008), et de l'interaction de celui-ci avec des jets mitoyens, objet de la présente étude. Nous considérons ainsi une perforation lobée en forme de croix, comparée à une perforation axisymétrique de référence, et ce dans deux configurations : jets coalescents et linéaire de jets.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les deux géométries considérées sont respectivement axisymétrique (Figure 1a et b) et lobée en forme de croix (Figure 1c et d). Le jet élémentaire rond ou croix (Nastase, Meslem et al. 2008) représente une référence pour la présente étude. Le comportement de jets coalescents est comparé au jet élémentaire de même géométrie. De la même manière et pour chaque type de géométrie, l'écoulement issu d'un linéaire de 53 jets est analysé.

Les orifices sont usinés dans une tôle d'aluminium d'épaisseur 1.5mm. Le nombre de Reynolds initial basé sur le diamètre équivalent de l'orifice, $D_e = \sqrt{4A_{\text{eff_orifice}}/\pi}$, et la vitesse maximale au soufflage, U_{m0} , est donné pour tous les cas dans le Tableau 1.

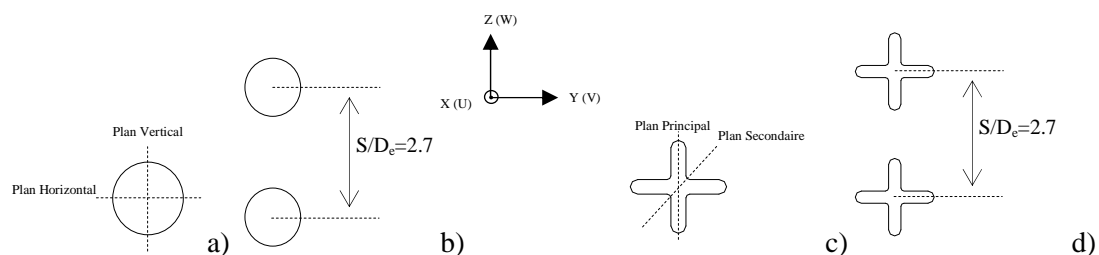


Figure 1: a) Orifice rond ; b) Paire d'orifices ronds ; c) Orifice croix; d) Paire d'orifices croix

Dans la présente étude, deux techniques de Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) ont été utilisées pour obtenir des cartographies spatiales de la vitesse. L'exploration des plans longitudinaux des écoulements étudiés est réalisée à l'aide d'un système PIV classique deux composantes, constitué d'une caméra Flow Sense 4M MKII d'une définition de 4×10^6 pixels et d'un laser Quantel BigSky de 200 mJ et de longueur d'onde 532 nm. La fréquence d'acquisition du système est de 7Hz.

Le diagnostic des plans transversaux des écoulements est réalisé à l'aide d'un système PIV stéréoscopique résolu en temps. Ce système est constitué de deux caméras Phantom V9 d'une résolution de 2×10^6 pixels et d'un laser New Wave Pegasus de 10 mJ et de longueur d'onde 527 nm. La fréquence d'acquisition du système est de 500 Hz pour une fenêtre maximale.

L'ensemencement de l'écoulement a été réalisé à l'aide d'un atomiseur générant des particules froides d'huile d'olive de diamètre compris entre 1 et 4 μm .

Tableau 1: Conditions d'essais

	Re_0	S/D_e
Jet rond	777	-
Jet croix	777	-
Jets ronds coalescents	761	2.7
Jets croix coalescents	741	2.7
Linéaire de jets ronds	745	2.7
Linéaire de jets croix	650	2.7

3. ANALYSE DES RESULTATS

Les isovaleurs de la vitesse longitudinale dans le plan transversal $X=0.5D_e$ des jets coalescents ronds ou croix, sont comparés sur la Figure 2 à celles du jet élémentaire de même géométrie à la même distance. Il est particulièrement intéressant de noter pour le jet circulaire coalescent (Figure 2b), une rupture de la symétrie de révolution. En effet, les jets deviennent elliptiques d'axes perpendiculaires et nous espérons que les travaux en cours, conduiront à la compréhension de la dynamique tourbillonnaire responsable de cette déformation. Concernant le jet croix coalescent, même si l'on observe une légère transformation de la surface de l'écoulement, les plans de symétrie sont conservés (Figure 2d). La déformation du jet coalescent au soufflage, relativement au jet élémentaire de même géométrie, est également visible sur les profils de la vitesse longitudinale donnés sur la Figure 3, à la même distance axiale.

L'observation du comportement global de chaque écoulement sur une distance axiale $X=30D_e$ (Figures 4 et 5), montre que le mélange entre les jets coalescents est plus important pour la géométrie croix. Il est à noter qu'aucune étude portant sur des jets lobés coalescents n'a été trouvée dans la littérature. Celle-ci est par ailleurs peu abondante sur les jets circulaires coalescents (Harima, Fujita et al. 2005; Yin, H-J et al. 2007; Vourous and Panidis 2008). A l'inverse, les jets plans parallèles ont été très étudiés pour des applications dans le domaine de l'aéronautique, de la combustion ou du séchage du papier (Miller and Comings 1956; Tanaka 1970; Tanaka 1974; Marsters 1977; Krothapalli, Baganoff et al. 1980; Hong and Chuang 1988; Lin and Sheu 1990; Ko and Lau 1992; Anderson and Spall 2001; Anderson, Snyder et al. 2002; Anderson, Snyder et al. 2003). Cette littérature s'accorde sur une subdivision de ces écoulements en trois régions: une région de convergence, une région de fusion et une région de mélange. Dans la région de convergence il se produit une dépression qui se traduit par une vitesse centrale U_C négative dans le plan de symétrie $Y=0$ (Lin and Sheu 1990). Cependant, ce phénomène est constaté uniquement pour des jets plans. Pour des jets coalescents circulaires, en l'absence de vitesse négative, il est proposé (Vourous and Panidis 2008) de considérer la région de convergence depuis le plan de soufflage à la distance axiale où la vitesse centrale U_C atteint 10% de la vitesse maximale U_m . Dans notre cas, cette région est inexistante et on se situe, dès le soufflage, dans la deuxième région dite de fusion. Celle-ci s'étend du point $U_C/U_m=0.1$ jusqu'au point de mélange où la vitesse maximale est positionnée sur l'axe de symétrie, soit à la distance où $U_C/U_m=1$. A partir de ce point, débute la troisième région dite de mélange. La Figure 6a fournissant l'évolution axiale normalisée U_C/U_m pour les deux géométries, permet de positionner le point de mélange à $X=20D_e$ pour la géométrie croix et à $X=24D_e$ pour la géométrie circulaire, proche de la valeur de $X=25D_e$ (Figure 6b) donnée dans la littérature (Harima, Fujita et al. 2005), pour

$S/D_e = 2$ et un nombre de Reynolds initial égal à 25000 (Figure 6b). Au vu de cette comparaison, il semble que le point de mélange ne soit pas très sensible au nombre de Reynolds de soufflage.

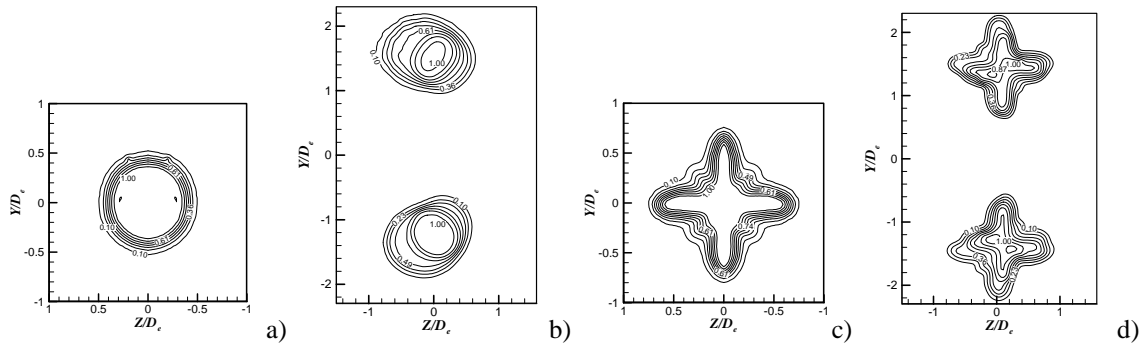


Figure 2: Isocontours de la vitesse longitudinale à $X=0.5D_e$: a) jet rond isolé, b) jets ronds coalescents, c) jet croix isolé, d) jets croix coalescents

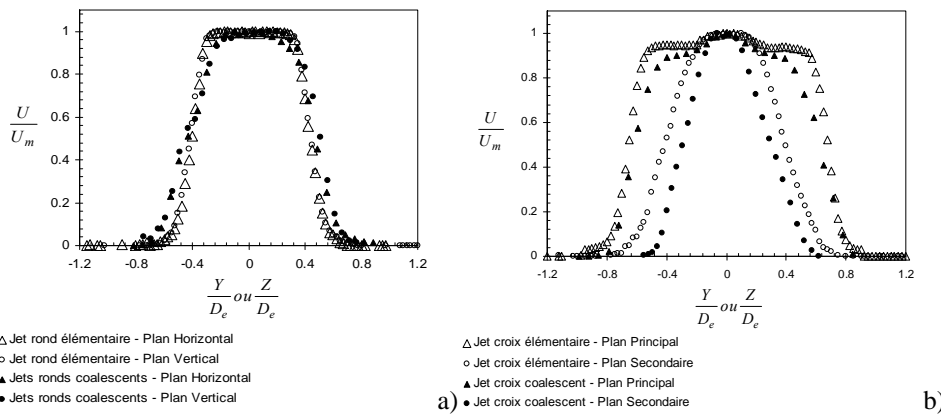


Figure 3: Profils de la vitesse U : a) jet rond libre et coalescent, b) jet croix libre et coalescent

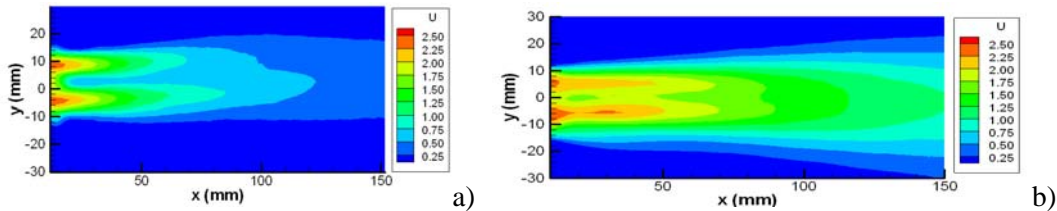


Figure 4: Isovaleurs de la vitesse U des jets coalescents, a) jets ronds, b) jets croix

Les épaisseurs dynamiques globales, $\Delta Y_{0.5ext}$ et $\Delta Y_{0.1ext}$, dont les définitions sont fournies sur la Figure 7a, ont été tracées en fonction de la distance axiale pour les deux types d'écoulements (Figure 8). Ces évolutions montrent que le meilleur mélange constaté entre les deux jets croix coalescents ne se fait pas au détriment du mélange avec l'air ambiant, l'épaisseur dynamique globale étant plus importante que celle des deux jets circulaires. La fusion dès le soufflage des jets coalescents ronds ou croix, conduit à des vitesses centrales U_C toujours supérieures à $0.1U_m$, d'où l'absence d'une épaisseur dynamique intérieure $\Delta Y_{0.1int}$. L'épaisseur intérieure $\Delta Y_{0.5int}$ est également absente pour la même raison ($U_C > 0.5U_m$), excepté à quelques positions ($4D_e \leq X \leq 8D_e$) dans les jets ronds coalescents. Ces points sont intéressants car ils mettent en évidence un phénomène qui n'a pas été reporté dans la littérature pour des jets coalescents : les deux jets initialement en fusion tendent à se séparer avant de

se rapprocher à nouveau. Ce phénomène est également visible sur l'évolution de la vitesse centrale normalisée U_c/U_m (Figures 5a) qui décroît pour $X < 6D_e$, avant d'entamer une croissance continue, au-delà de ce point, jusqu'au point de mélange. Sur la même figure, on constate l'absence de ce phénomène pour la géométrie croix, ce qui rejoint la constatation d'un meilleur mélange des jets coalescents croix relativement aux circulaires.

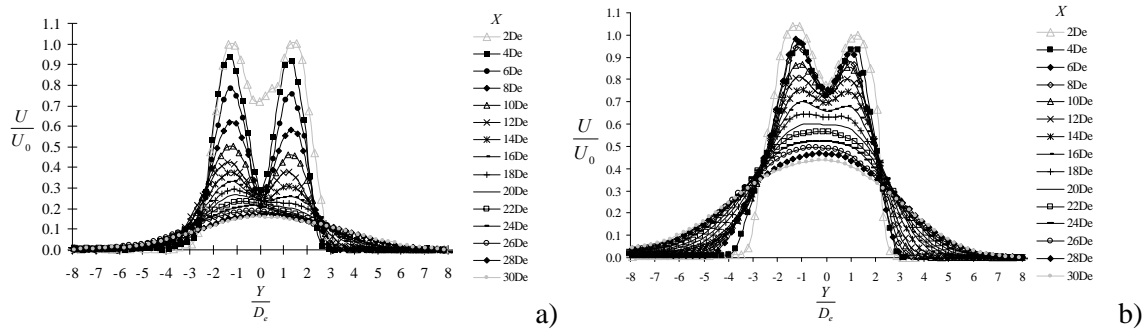


Figure 5: Profils de la vitesse longitudinale, a) jets ronds, b) jets croix

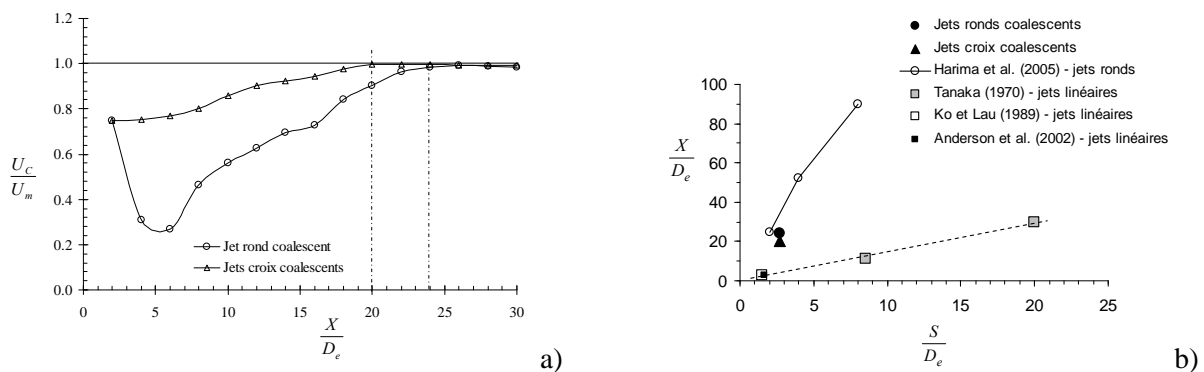


Figure 6 : a) Comparaison des évolutions axiales de la vitesse centrale normalisée ; b) Point de mélange en fonction de l'entre-axe S des jets coalescents

Afin de comparer l'expansion dynamique globale des jets coalescents à celle du jet élémentaire, nous avons superposé sur la Figure 9 la quantité $\Delta Y_{0.5\text{ext}}$ des jets coalescents (Figure 7b) et l'épaisseur dynamique « équivalente » ($2Y_{0.5} + S$) de deux jets élémentaires, chacun d'épaisseur dynamique $Y_{0.5}$ (Figure 7a), espacés de S et qui se développeraient sans interaction. Cette comparaison nous permet de constater que le « blocage » de l'expansion dynamique dans la zone d'interaction des deux jets, conduit à une expansion dynamique plus grande sur les côtés libres et ce, pour les deux géométries testées. L'expansion dynamique sur le côté libre du jet croix est par ailleurs plus importante que pour le jet circulaire en raison d'une plus forte interaction dans la zone de fusion et d'une plus forte capacité d'induction liée à la dynamique tourbillonnaire spécifique au jet croix (Nastase, Meslem et al. 2008). L'auto-induction globale de l'écoulement constitué des jets croix coalescents est également plus importante en comparaison à l'auto-induction de l'écoulement de référence constitué de deux jets circulaires (Figure 10 a et b). La confrontation à l'évolution axiale de l'auto-induction du jet élémentaire met en évidence, dans les jets coalescents, un ralentissement du processus d'induction dans la zone initiale de fusion ($X < 4D_e$). Ce ralentissement semble être

compensé par une accélération du processus d'induction au-delà de $X=4D_e$ où le débit normalisé des jets coalescents dépasse celui du jet élémentaire de même géométrie.

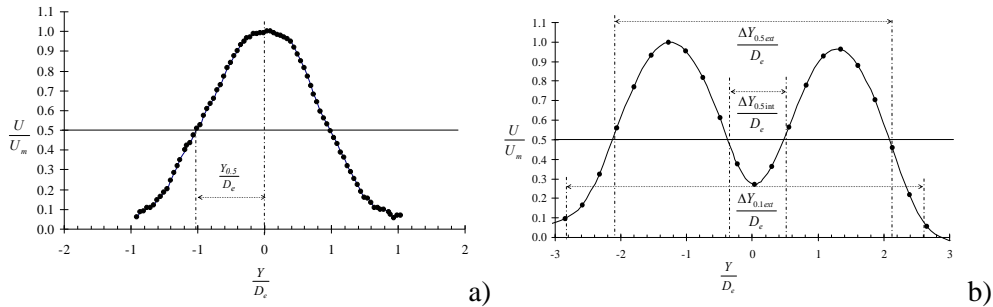


Figure 7 : Définitions des épaisseurs dynamiques, a) jet élémentaire, b) jets coalescents

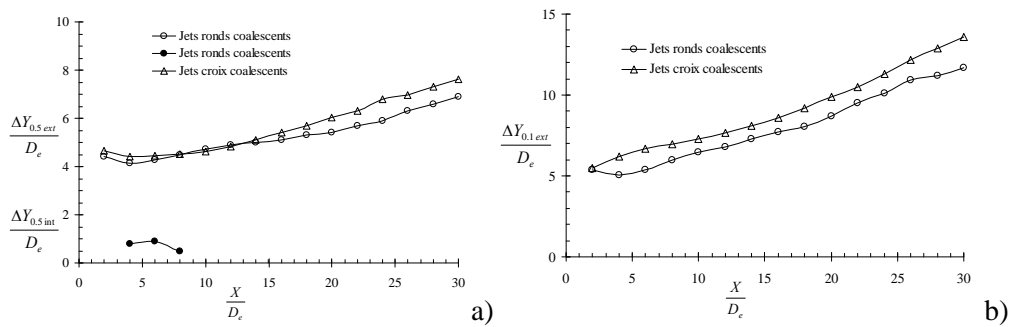


Figure 8 : Epaisseurs dynamiques des jets coalescents

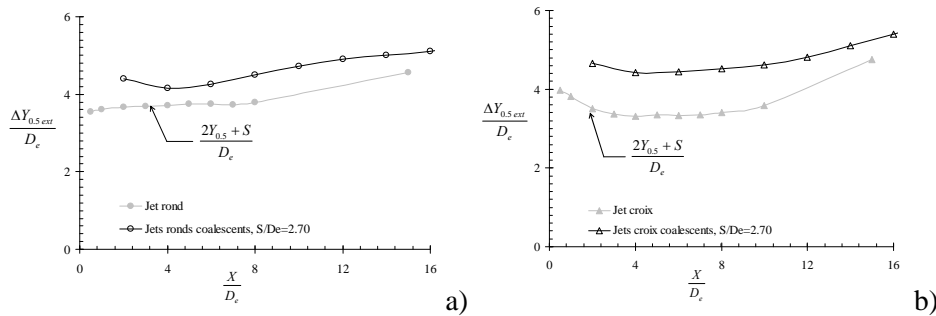


Figure 9 : Epaisseurs dynamiques du jet libre et du jet coalescent, a) jets ronds, b) jets croix

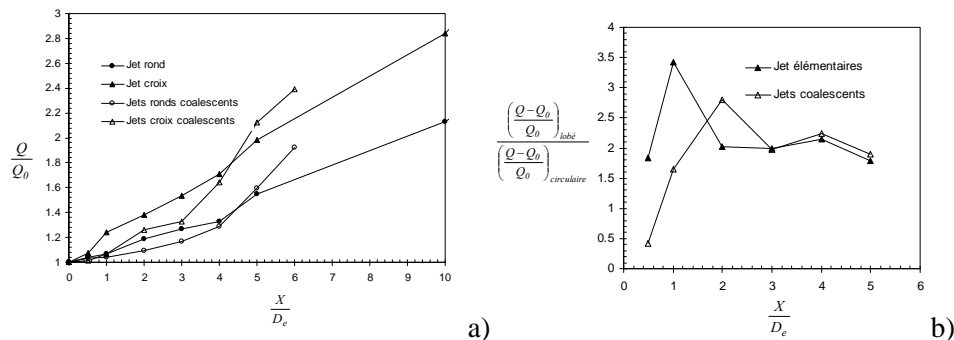


Figure 10 : a) Débits volumiques; b) Débits entraînés

Après cette analyse de l'écoulement global de deux jets coalescents ronds ou croix, nous nous intéressons ci-après à un linéaire de 53 jets parallèles issus d'une tôle perforée. Les conditions de soufflage sont décrites dans le Tableau 1 pour chaque géométrie. Les remarques faites sur les jets coalescents, quant à leurs zones de fusion, sont ici généralisables pour les écoulements issus de linéaires d'orifices. Les profils correspondants (Figures 11 a et b) montrent, en effet, un meilleur

mélange entre les jets mitoyens lorsque la géométrie est en forme de croix. La vitesse centrale U_C (Figure 11 c) extraite sur les profils aux positions indiquées sur ces derniers, montre pour chaque géométrie, une évolution axiale comparable à celle obtenue pour les jets coalescents de même géométrie. On note cependant des courbes plus proches lorsque les jets sont issus d'orifices croix.

Les décroissances axiales de la vitesse maximale dans les trois configurations (jet élémentaire, jets coalescents et linéaire de jets) sont données sur la Figure 12 pour chaque géométrie.

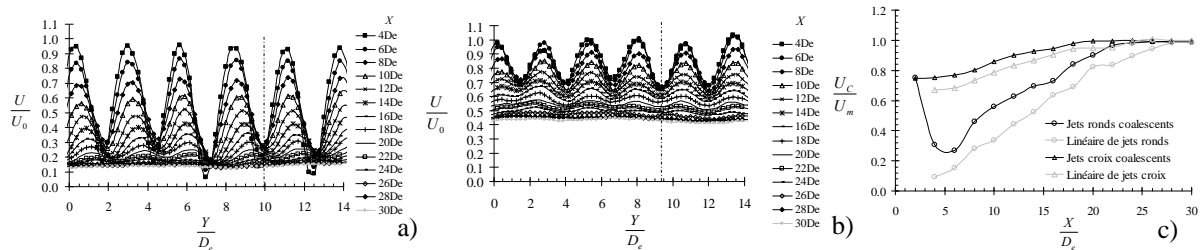


Figure 11: a) Profils d'un linéaire de jets ronds ; b) Profils d'un linéaire de jets croix ; c) Evolutions axiales de la vitesse centrale normalisée

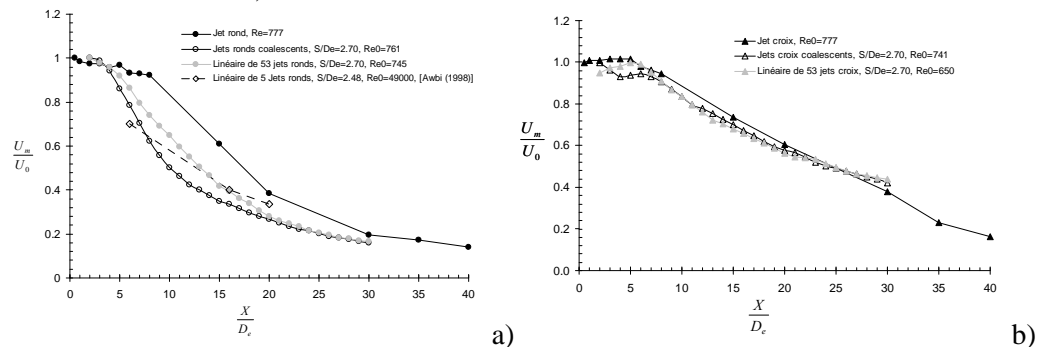


Figure 12 : Décroissance de la vitesse axiale normalisée, a) jets ronds, b) jets croix

Il est intéressant de noter sur la Figure 12a la sensibilité de la vitesse maximale du jet rond à l'interaction fluide, une sensibilité quasi absente dans le jet croix (Figure 12b), excepté dans la région initiale de fusion $X < 6D_e$. Au-delà, l'écart entre les courbes de décroissance est très faible. Celui-ci ne dépasse pas 8% comparativement à un écart, à la courbe du jet élémentaire, qui dépasse 70% pour la géométrie circulaire. Pour cette géométrie, nous avons reporté des points expérimentaux extraits de la littérature (Awbi 1991) pour un linéaire de 5 jets parallèles. Les écarts relativement faibles avec nos mesures, sont très probablement dus à la différence des nombres de Reynolds de soufflage. La Figure 12 permet également de prédire une portée plus importante pour la géométrie croix. En effet, à $30D_e$ on enregistre une vitesse maximale égale à 42% de la vitesse de soufflage pour les jets croix en interaction, à comparer à seulement 17% pour les jets ronds de référence.

4. CONCLUSIONS

L'analyse des jets croix coalescents en comparaison à des jets ronds coalescents de même nombre de Reynolds initial et de même espacement, permet les constatations suivantes :

- le brassage des jets croix est plus efficace et le point de mélange est atteint plus rapidement,
- le débit entraîné par l'écoulement global, généré par les deux orifices croix, atteint 2.8 fois le débit entraîné par l'écoulement de référence dont les jets sont circulaires. Relativement au jet élémentaire, l'auto-induction des jets coalescents est ralentie dans la zone initiale de fusion, puis accélérée au-delà de cette zone avec un dépassement du taux d'induction du jet élémentaire de référence,

- un linéaire de jets croix conduit également à un écoulement global plus homogène que celui généré par des jets circulaires,
- dans les deux configurations d'écoulements (couple de jets et linéaire de jets), l'orifice croix conduit à une portée plus importante que l'orifice circulaire.

Toutes ces constatations permettent de conclure quant à l'avantage d'une intégration de l'orifice croix dans la conception des diffuseurs d'air du bâtiment.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Anderson, E. A., D. O. Snyder, et al. (2002). "Experimental investigation of periodic behaviour between parallel jets." AIAA Paper 2002-0730.
- Anderson, E. A., D. O. Snyder, et al. (2003). "Periodic flow between low aspect ratio parallel jets." *Journal of Fluids Engineering* 125: 389-392.
- Anderson, E. A. and R. A. Spall (2001). "Experimental and numerical investigation of two-dimensional parallel jets." *Journal of Fluids Engineering* 123: 401-406.
- Awbi, H. B. (1991). *Ventilation of Buildings*. London, U.K., E&FN SPON.
- Harima, T., S. Fujita, et al. (2005). Turbulent properties of twin circular free jets with various nozzle spacing. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*, Elsevier.
- Hong, Z. C. and S. H. Chuang (1988). "Kinetic theory approach to twin plane jets turbulent mixing analysis." *AIAA Journal* 26(3): 303-310.
- Ko, N. W. M. and K. K. Lau (1992). "Flow structures in initial region of two interacting parallel plane jets." *Experimental Thermal and Fluid Science* 2: 431-449.
- Krothapalli, A., D. Baganoff, et al. (1980). "Development and structure of a rectangular jet in a multiple jet configuration." *AIAA Journal* 18(8): 945-950.
- Lin, Y. F. and M. J. Sheu (1990). "Investigation of two parallel unventilated jets." *Experiments in Fluids* 10: 17-22.
- Marsters, G. F. (1977). "Interaction of Two Plane Parallel Jets." *AIAA Journal* 15(12): 1756-1762.
- Miller, D. R. and E. W. Comings (1956). "Force-momentum fields in a dual-jet flow." *Journal of Fluid Mechanics* 7(2): 237-256.
- Nastase, I. (2007). Analyse des jets lobés en vue de leur intégration dans les Unités Terminales de Diffusion d'air. Ph.D. Thesis, Université de La Rochelle.
- Nastase, I., A. Meslem, et al. (2008). "Primary and secondary vortical structures contribution in the entrainment of low Reynolds number jet flows." *Experiments in Fluids* 44(6): 1027-1033.
- Tanaka, E. (1970). "The interference of two-dimensional parallel jets (1st report, Experiments on the combined flow of dual jet)." *Bulletin of J. S. M. E.* 13(56): 272-280.
- Tanaka, E. (1974). "The interference of two-dimensional parallel jets (2nd report, Experiments on the combined flow of dual jet)." *Bulletin of J. S. M. E.* 17(109): 920-927.
- Vourous, A. and T. Panidis (2008). "Influence of a secondary, parallel, low Reynolds number, round jet on a turbulent axisymmetric jet." *Experimental Thermal and Fluid Science* To appear.
- Yin, Z.-Q., Z. H.-J, et al. (2007). "Experimental study on the flow field characteristics in the mixing region of twin jets." *Journal of Hydrodynamics* 19(3): 309-313.

REMERCIEMENTS

Cette étude est soutenue par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME).