

# Dynamique tourbillonnaire et entraînement dans la région initiale d'un jet rond et d'un jet marguerite à bas nombre de Reynolds

A. Meslem<sup>a</sup>, M. El Hassan<sup>a</sup>, I. Nastase<sup>b</sup>

a. LEPTIAB, Université de La Rochelle, Pôle Sciences et Technologie, avenue Michel Crépeau, 17042, La Rochelle, France

b. Université Technique de Construction de Bucarest, Faculté d'Équipement Technique, 66 Avenue Pache Protopopescu, 020396, Bucarest, Roumanie

## Résumé :

*L'étude présente l'influence de la dynamique tourbillonnaire sur l'induction dans la région initiale de deux jets d'air rond et lobé. L'entraînement du jet rond est modulé à la fréquence de passage des structures annulaires de Kelvin-Helmholtz. Dans le jet lobé, la géométrie introduit un cisaillement transversal qui brise les structures de Kelvin-Helmholtz en segments d'anneaux. Les discontinuités résultantes permettent alors un libre développement des structures longitudinales. Il en résulte un taux d'entraînement non corrélé au passage des structures de Kelvin-Helmholtz et de niveau plus grand.*

## Abstract :

*The present study presents the role of the vortex dynamics in the initial region entrainment of a circular and lobed jet. The circular jet entrainment is modulated at the natural frequency of the Kelvin-Helmholtz ring like vortices. In the lobed jet, the geometry introduces a transverse shear which breaks the Kelvin-Helmholtz structures into ring segments. The resulting discontinuities allow the free development of streamwise structures. As a consequence the entrainment rate is not correlated to the Kelvin-Helmholtz passing and it is superior to the one of the circular jet.*

**Mots clefs:** jet, structure de Kelvin-Helmholtz, structure longitudinale, induction

## 1 Introduction

La dynamique des jets en région initiale est étudiée par de nombreux auteurs [1-9] depuis les années 70'. La complexité du sujet est telle qu'il n'existe pas à ce jour un consensus sur le rôle des tourbillons dans le phénomène d'induction dans cette région. Dans le jet circulaire on observe deux types de structures [4]: les structures azimutales de Kelvin-Helmholtz (K-H) dites structures primaires et les structures longitudinales dites secondaires. Les structures de K-H sont annulaires, continues et se développent à la surface de cisaillement entre le jet et le fluide ambiant. Certains auteurs [4, 10] attribuent à ces tourbillons un rôle important dans le phénomène d'induction du fluide ambiant par le jet. Ce détachement tourbillonnaire génère à son tour des instabilités secondaires dont résulte le développement des structures longitudinales [4, 8-10]. Elles se développent sous forme de filaments dans la mèche entre deux anneaux successifs. Il a été montré par Liepman et Gharib [4,10] que leur nombre croît avec le nombre de Reynolds initial. Les auteurs suggèrent que les structures longitudinales atteignent un haut niveau énergétique à la fin du noyau potentiel en comparaison aux structures de K-H, et jouent un rôle prédominant dans le processus d'entraînement. Il est à noter que dans les années 60', bien avant les travaux de Liepman et Gharib [4,10] pour améliorer le mélange en sorties des éjecteurs et des injecteurs dans les domaines de l'aéronautique et de la combustion, diverses méthodes sont utilisées pour accroître la génération de ces structures secondaires [11-13]. Des arrêtes saillantes ou chevrons placés en sortie de buse sont couramment utilisés comme moyen passif de génération des structures longitudinales. La buse lobée est également utilisée pour accroître la génération des structures longitudinales au soufflage [14, 15]. Il est suggéré dans des travaux récents [15] qu'un jet lobé

en forme de marguerite à 6 lobes, ayant une double inclinaison de la frontière, représente un extraordinaire instrument de mélange dans la région du noyau potentiel. Il est constaté que le phénomène d'induction est dominé par la présence aux sommets des lobes de la buse, de 6 paires de structures longitudinales contrarotatives et dont la taille est comparable à celle du lobe. Nos précédents travaux sur une buse de même géométrie [16] ainsi que les travaux et Mao et al. [17] sur un mélangeur plan à un lobe mettent en évidence une discontinuité des structures de K-H. Il convient de rappeler qu'une ondulation sinusoïdale de la frontière d'un mélangeur n'est pas favorable au mélange [18] en comparaison à une ondulation présentant des cotés droits. En effet, les points de discontinuité des structures de K-H semblent coïncider avec les points de passage à l'infini du rayon de courbure du diffuseur [19]. On montre que les segments d'anneaux résultants se détachent à des fréquences différentes selon qu'ils naissent sur les cotés latéraux des lobes ou dans les creux des lobes de la buse [19]. De l'ensemble de ces études il se dégage une certitude : les structures longitudinales jouent un rôle essentiel dans le phénomène d'induction dans la région du noyau potentiel du jet. Dans le jet circulaire, les structures longitudinales sont générées grâce aux anneaux de K-H et de leur appariement [4, 8-10]. On peut donc leur attribuer un rôle indirect favorable à l'induction. Une question reste alors en suspens : les structures de K-H ont-ils un rôle direct dans le processus de mélange ? Comme les structures longitudinales s'épanouissent entre deux anneaux successifs et s'atténuent en présence de l'anneau [4], leur rôle est-il alors favorable ou défavorable à l'induction ? D'autre part, les moyens passifs de mélange permettent, à l'aide d'un cisaillement transversal imprimé à l'écoulement par la géométrie du diffuseur, de briser les structures de K-H en segments d'anneaux et de générer dans le même temps des structures longitudinales de grandes échelles qui s'épanouissent sans atténuation en ces lieux de discontinuités. Dans ce cas les structures de K-H conservent-elles un rôle direct ou indirect dans le processus de mélange ? Toutes ces questions ont motivé le travail de recherche présenté ici.

## 2 Dispositif expérimental et conditions d'essais

Deux diffuseurs, circulaire et lobé en forme de marguerite, de type orifices (Figure 1), sont utilisés pour générer des jets d'air à faible nombre de Reynolds choisi égal à 813 (Reynolds basé sur la vitesse au centre du jet et le diamètre équivalent de l'orifice pris égal à 10 mm). Un système de visualisation haute cadence (le système peut atteindre une fréquence de 5kHz pour une fenêtre de 512x512pixels<sup>2</sup>) composé d'un laser infrarouge de puissance 4W et d'une caméra CMOS Nanosense MKII est utilisé pour une analyse du jet s'avère une approche intéressante pour appréhender la dynamique de l'écoulement. Cette première approche est complétée par des mesures PIV haute cadence deux composantes, réalisées à l'aide d'un système LaVision composé d'une caméra Phantom V9 d'une fenêtre de 1200x1632 pixels<sup>2</sup> et d'un laser Nd : YLF NewWave Pegasus d'énergie 10mJ et de longueur d'onde 527nm. La fréquence d'acquisition est de 500Hz à pleine résolution. La calibration des images donne une résolution spatiale de 41.6µm par pixel, ce qui conduit à un champ de 50x68 mm<sup>2</sup>. A chaque acquisition 1000 couples d'images sont enregistrées.

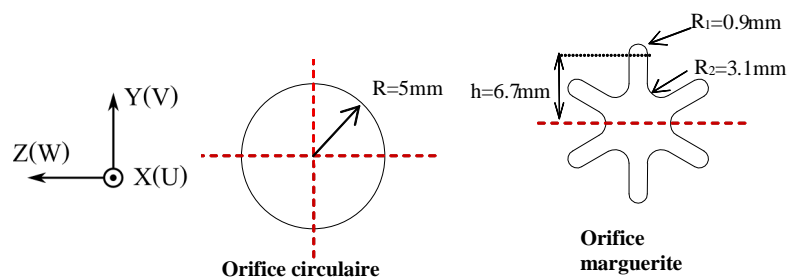


Figure 1: Définition des géométries des diffuseurs

## 3 Analyse des résultats

Sur la Figure 2 des images transversales des écoulements sont données pour trois distances axiales. A  $X=3D_e$ , on observe dans le jet circulaire une structure de K-H annulaire et continue tandis que dans le jet marguerite ce type de structure apparaît sous forme de « segments d'anneaux » séparés par des structures longitudinales très développées. On note dès le soufflage un phénomène de croisement d'axes dû au

cisaillement transversal généré par la forme lobée du diffuseur. Les séries d'images réalisées à la fréquence de 2kHz ont été traitées à l'aide d'un algorithme bas niveaux [20] et les évolutions temporelles des dimensions transversales des jets en sont extraites à la distance  $X=1D_e$  (Figure 3a et b). Les spectres de ces évolutions sont comparés aux spectres des vitesses longitudinales mesurées au fil chaud aux droits des détachements tourbillonnaires (Figure 3c et d). Pour chaque jet une même fréquence fondamentale est détectée par les deux méthodes. Sa valeur est de 80Hz pour le jet circulaire et de 140Hz pour le jet marguerite.

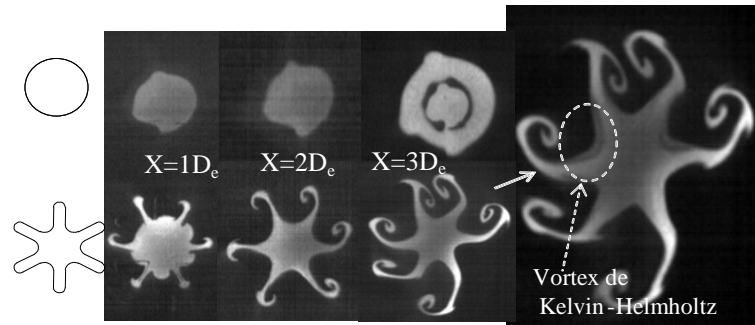


Figure 2: Images des plans transversaux des écoulements par visualisations haute cadence

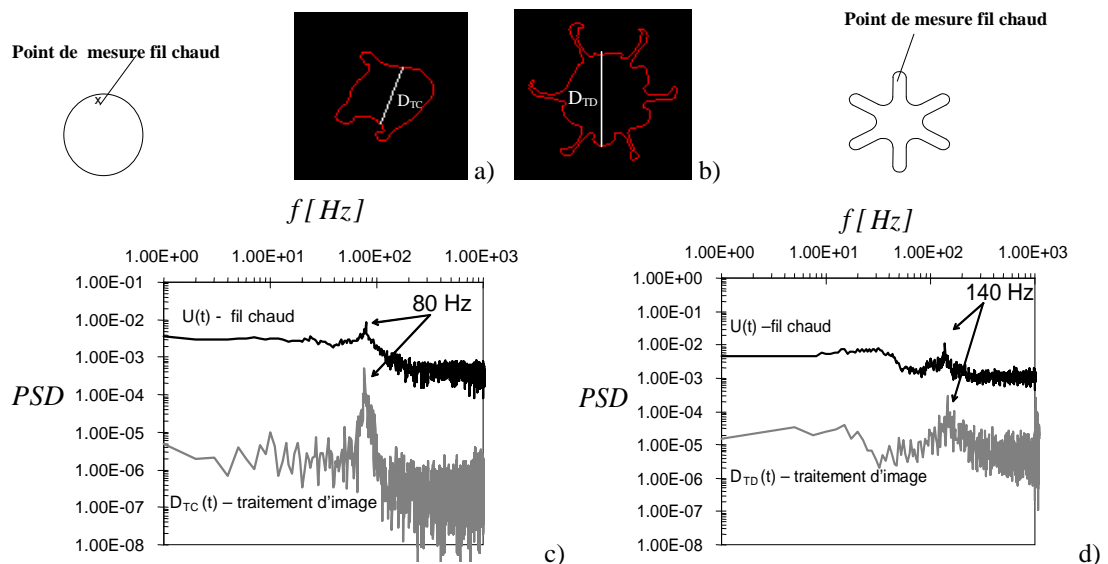
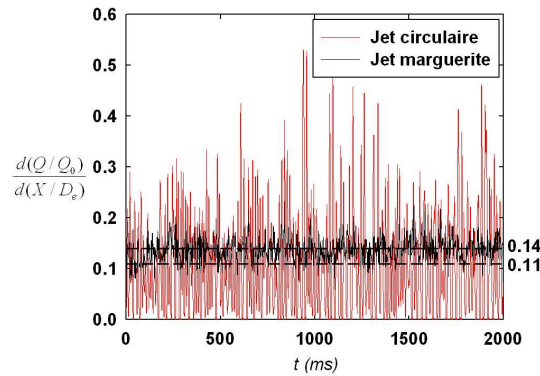
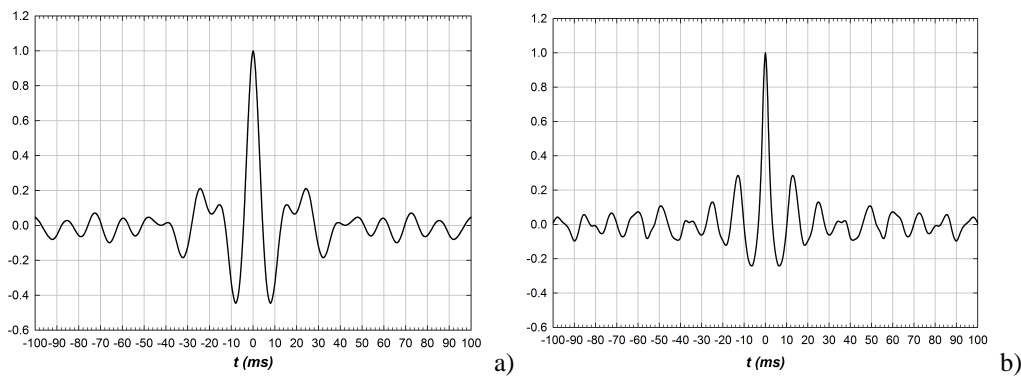
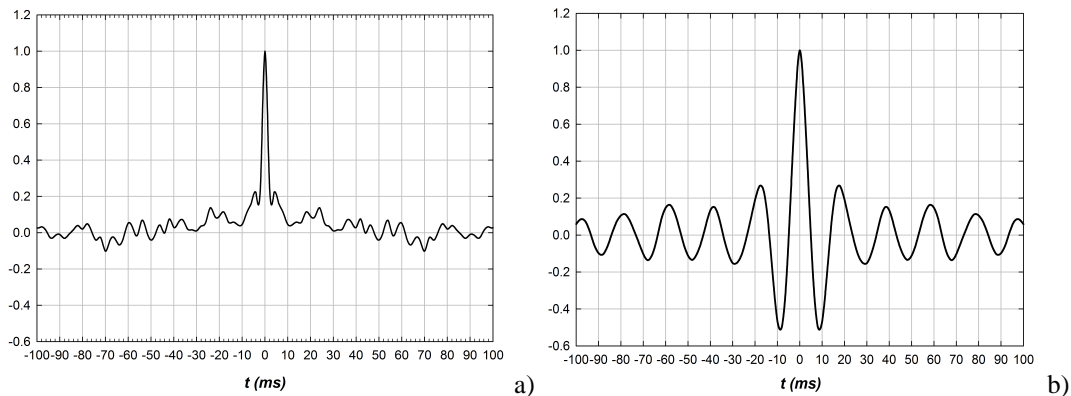


Figure 3: Contours des images à  $X=1D_e$  : a) Jet circulaire, b) Jet marguerite; Comparaison des spectres de la vitesse et de la dimension du jet: c) Jet circulaire, d) Jet marguerite

La périodicité du détachement des structures de K-H dans chacun des deux jets nous a conduits à vérifier si une même périodicité est présente dans le phénomène d'auto-induction du jet. Nous avons intégré pour cela la vitesse radiale en périphérie des champs instantanés de la vitesse à la distance axiale  $X=3D_e$ . La variation temporelle du taux d'entraînement normalisé  $d(Q/Q_0)/d(X/D_e)$  est donnée en Figure 4. Un résultat intéressant apparait : la variation du taux d'entraînement du jet rond est très intense et présente des valeurs nulles ce qui n'est guère le cas pour le jet marguerite. Les valeurs moyennes des taux d'entraînement sur la durée d'observation sont respectivement de 0.11 pour le jet circulaire et de 0.14 pour le jet marguerite. Comme le montre la Figure 5a, cette variation du taux d'entraînement se produit à la fréquence de passage des structures de K-H (Figure 3c). La dimension du jet oscille également à cette même fréquence (Figure 5b). Concernant le jet marguerite (Figure 3d et Figure 6b), si sa dimension oscille à la fréquence de passage des segments d'anneaux de K-H (fréquence égale à 55Hz à  $3D_e$ ), le taux d'entraînement n'oscille pas à cette fréquence (Figure 6a) ce qui permet d'avancer que l'entraînement du jet n'est pas contrôlé par ces structures.

Figure 4 : Variation temporelle du taux d'entraînement instantané à  $X=3D_e$ .Figure 5: a) Coefficient d'autocorrelation du taux d'entraînement du jet circulaire à  $X=3D_e$ ; b) Coefficient d'autocorrelation du diamètre  $D_{TC}$  du jet circulaire à  $X=3D_e$ .Figure 6: a) Coefficient d'autocorrelation du taux d'entraînement du jet marguerite à  $X=3D_e$ ; b) Coefficient d'autocorrelation du diamètre  $D_{TD}$  du jet marguerite à  $X=3D_e$ .

Afin de mieux cerner le lien entre structures et entraînement, nous avons isolé un cycle complet pour chaque type de jet et nous avons tracé pour ce cycle, les évolutions temporelles de la dimension et du taux d'entraînement du jet. Nous fournissons également pour ces cycles, les images PIV affectées des champs de vitesses correspondants. Pour le jet circulaire nous fournissons toutes les images de la série (Figure 7). Pour le jet marguerite, les images étant quasi identiques, nous ne présentons par souci de concision que trois champs sur les dix qui composent le cycle (Figure 8).

Liepmann et Gharib [4] ont suggéré que le passage des structures de K-H dans le jet circulaire est accompagné par une atténuation des structures longitudinales. Les résultats présentés en Figure 7 nous laissent avancer que lorsque l'anneau arrive à la position d'observation (images 3 et 4), l'induction est grandement atténuée précisément à cause de cette atténuation. Dans la phase d'éloignement de l'anneau (images 5, 6 et 7), l'induction s'intensifie. L'entraînement est maximal lorsque le diamètre du jet est minimal à savoir dans la mèche lorsque les structures longitudinales peuvent se développer. Le retard de 6ms (demi-

période de passage de la structure de K-H) que présente la distribution de l'intercorrélation entre taux d'entraînement et diamètre du jet circulaire  $D_{TC}$ , confirme ce phénomène sur la durée d'observation (2000ms).

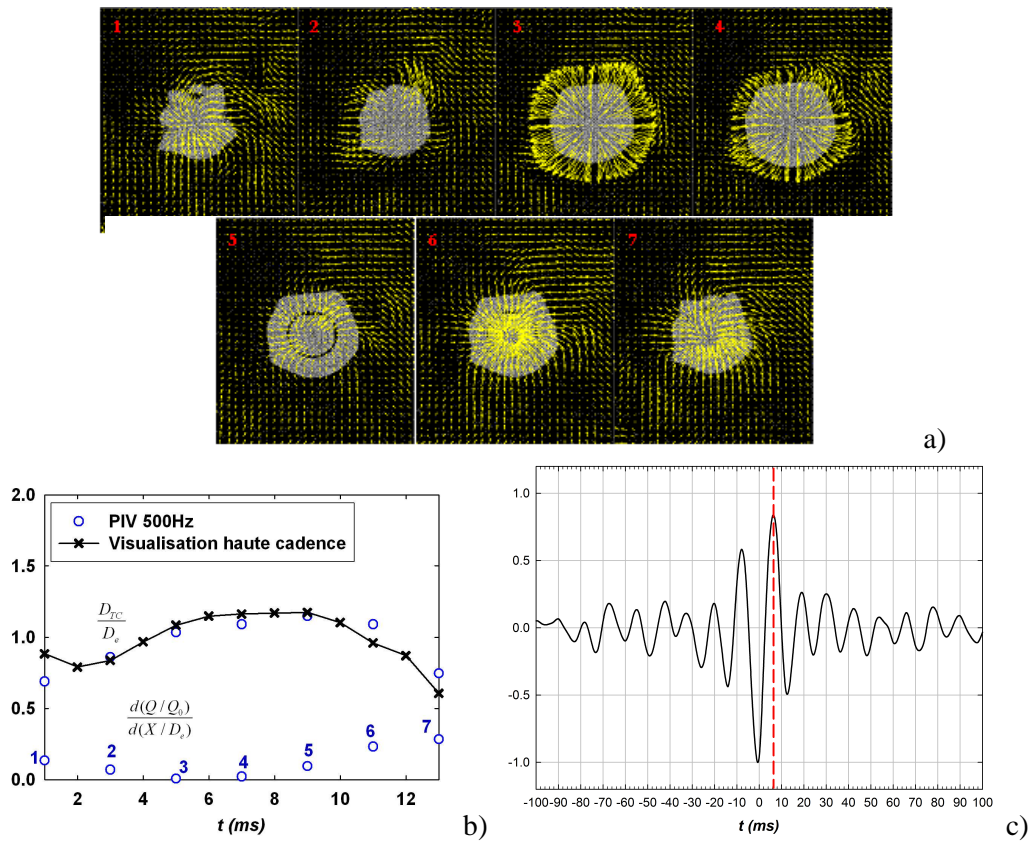


Figure 7: a) Champs de vitesses du jet circulaire à la fréquence de 500Hz ; b) Variations temporelles de la dimension et du taux d'entraînement; c) Intercorrélation entre taux d'entraînement et diamètre du jet  $D_{TC}$

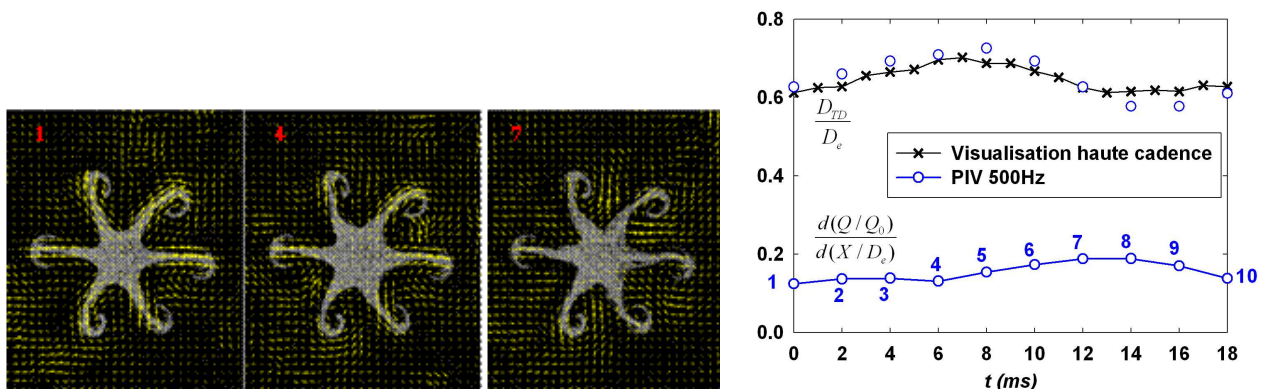


Figure 8: Champs de vitesses du jet marguerite à la fréquence de 500Hz et variations temporelles de la dimension et du taux d'entraînement

Pour le jet marguerite le taux d'entraînement varie très peu au cours du cycle (Figure 8) et ne présente aucune modulation en fréquence sur la durée d'observation (Figure 6a). On peut donc avancer que les structures de K-H n'ont pas de rôle significatif dans le phénomène d'auto-induction du jet lobé : elles ne participent pas à la génération des structures longitudinales (cette génération est induite par le cisaillement imprimé à l'écoulement par le diffuseur lobé et non par le passage des structures de K-H) et ne semblent pas non plus participer par un effet direct dans le processus d'auto-induction.

## Conclusion

La région initiale d'un jet rond et d'un jet lobé en forme de marguerite est explorée expérimentalement. Dans les deux types de jets l'induction est assurée par les structures longitudinales. Dans le jet circulaire l'induction est modulée à la fréquence de passage des structures annulaires de Kelvin-Helmholtz. Sa valeur est maximale dans la mèche où les structures longitudinales peuvent se développer et s'annule en phase d'approche de l'anneau. Dans le jet lobé l'effet des structures de Kelvin-Helmholtz est neutralisé. La génération des structures longitudinales est assurée par le cisaillement imprimé à l'écoulement par le diffuseur lobé et non par le passage des structures de Kelvin-Helmholtz. Cela conduit également à un découpage des structures de Kelvin-Helmholtz en segments d'anneaux qui permet un libre développement des structures longitudinales. Celles-ci assurent une induction continue et indépendante du passage des segments d'anneaux.

## Références

- [1] Konrad, J.H., An experimental investigation of mixing in two dimensional turbulent shear flows with applications to diffusion-limited chemical reactions. 1977, California Institute of Technology: Pasadena.
- [2] Winant, C.D. and F.K. Brownant, Vortex pairing: the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 1974. 68(2): p. 287-255.
- [3] Browand, F.K. and J. Laufer. The role of large scale structures in the initial development of circular jets. in *Proceedings of 4th symposium on the turbulence in liquids*. 1975. University of Missouri.
- [4] Liepmann, D. and M. Gharib, The role of streamwise vorticity in the near field entrainment of round jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 1992. 245: p. 642-668.
- [5] Loiseleux, T. and J.-M. Chomaz. Experimental study of secondary instability selection mechanisms in round jets. in *Colloque "Structure et dynamique de vortex "*. 1999. Rouen.
- [6] Zaman, K.B.M.Q. and A.K.M.F. Hussain, Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation. Part 1. General response. *Journal of Fluid Mechanics*, 1980. 101(3).
- [7] Hernan, M.A. and J. Jimenez, Computer analysis of a high-speed film of the plane turbulent mixing layer2. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982. 119: p. 323-345.
- [8] Widnall, S.E. and J.P. Sullivan, On the stability of vortex rings. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1973. 332(1950): p. 335-353.
- [9] Yule, A.J., Large scale structure in the mixing layer of a round jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978. 89(413): p. 413-432.
- [10] Liepmann, D., Streamwise vorticity and entrainment in the near field of a round jet. *Physics of Fluids*, 1991. 3(5): p. 1179-1185.
- [11] Zaman, K.B.M.Q., Spreading characteristics of compressible jets from nozzles of various geometries. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999. 383: p. 197-228.
- [12] Hu, H., et al. Passive control on jet mixing flows by using vortex generators. in *Proceedings of the Sixth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualisation*. 2000. Sherbrooke
- [13] Hu, H., et al., Research on the Rectangular Lobed Exhaust Ejector /Mixer Systems. *Transactions of the Japan Society of Aeronautical and Space Science*, 1999. 41(134).
- [14] Hu, H., et al., Mixing Process in a Lobed Jet Flow. *AIAA Journal*, 2002. 40(7): p. 1339-1345.
- [15] Hu, H., et al., Research on the Vortical and Turbulent Structures in the Lobed jet Flow Using Laser Induced Fluorescence and Particle Image Velocimetry Techniques. *Measurement Science and Technology*, 2000. 11: p. 698-711.
- [16] Nastase, I. and A. Meslem, Passive control of jet flows using lobed nozzle geometries. *Mécanique & Industries*, 2007. 8(2): p. 101-109.
- [17] Mao, R.H., S.C.Yu, and L.P.Chua, Kelvin-Helmholtz and streamwise vortices in the near wake of a single lobe forced mixer. *Proc.IMEchE*, 2006. 220: p. 692-698.
- [18] Skebe, S.A., D. Mc Cormick, and W.M. Presz, Parameter effects on mixer-ejector pumping performance. *AIAA Paper 88-0188*, 1998.
- [19] Nastase, I., Analyse des jets lobés en vue de leur intégration dans les Unités Terminales de Diffusion d'air. 2007, Université de La Rochelle: Ph.D. Thesis.
- [20] Nastase, I., A. Meslem, and T. Bowmans, Vortical structures analysis in jet flows using a classical 2D-PIV system and time resolved visualization image processing. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 2008. 15(4): p. 275-300.