

Structure tourbillonnaire des jets lobés et pouvoir de mélange

Ilinca Nastase & Amina Meslem

Université de La Rochelle
LEPTAB
Avenue Michel Crépeau 17042 La Rochelle Cedex 01 - FRANCE
ameslem@univ-lr.fr

Résumé :

Le contrôle passif des jets turbulents est un moyen de mélange peu coûteux qui intéresse un large domaine industriel. Il est montré qu'une buse lobée droite, permet l'amélioration du mélange du jet issu de celle-ci, par rapport à un jet circulaire de référence. Une buse lobée de même plan de soufflage et à lobes inclinés, s'avère plus performante que la précédente. L'analyse de la dynamique tourbillonnaire, montre que les structures azimutales des jets lobés ne sont pas annulaires comme dans un jet circulaire, mais discontinues en raison du cisaillement de l'écoulement transversal généré par la variation du rayon de courbure de la frontière de la buse. Il s'en suit un épanouissement des structures longitudinales aux points de discontinuités expliquant probablement le gain d'induction dans le jet lobé droit. L'inclinaison des lobes et des creux accentue le cisaillement de l'écoulement transversal et l'auto-induction des structures longitudinales en devient plus importante.

Abstract :

Passive control of the turbulent jets is a mixing enhancement economical method of wide interest in the industrial field. A lobed nozzle without lobes inclinations allows improving mixing in the generated flow compared to a reference circular jet. A second lobed nozzle, having the same exit plane geometry but with inclined lobes, turns out to be even more efficient. The lobed jets vortical dynamics analysis shows that the azimuthal structures are not annular like in the case of a circular jet, but discontinuous, due to the shear of the transverse flow induced by the curvature variation of the exit plane. The resulting streamwise structures development at the discontinuities locations is probably explaining the entrainment benefit observed in the lobed jet without inclination angles. The lobes and troughs inclinations intensify the shear of the cross flow and the streamwise structures entrainment capability is thus amplified.

Mots-clefs :

Buse lobée / jet turbulent / mélange

1 Introduction

Le contrôle des jets par des moyens passifs [Sfeir (1979), Krothapali *et al.* (1981), Quin (1994), Ho et Gutmark (1997), Zaman (1996), Hu *et al.* (1999), Hu *et al.* (2000a)], a été largement exploité pour l'amélioration de l'efficacité de la combustion et la réduction des polluants dans les chambres de mélange. Ces moyens consistent en l'utilisation de buses tridimensionnelles de géométries devenues complexes ces dernières années [Belovich et Samimy (1997), Yuan (2000)] et il est suggéré dans des travaux récents [Hu *et al.* (2000b), Hu *et al.* (2001)], que la géométrie lobée constitue un extraordinaire instrument de mélange. Si les auteurs qualifient ainsi les buses lobées en général, une seule géométrie est présentée. Il s'agit

d'une buse à six lobes inclinés de 14° vers l'extérieur de l'écoulement. Les creux des lobes sont inclinés de 22° vers l'intérieur. L'exploration réalisée sur les quatre premiers diamètres équivalents du jet, montre une forte agitation tourbillonnaire ainsi que l'existence d'une paire de structures longitudinales de grande échelle au sommet de chaque lobe qui dominent le phénomène d'intensification de mélange et d'expansion. Si ces observations sont prometteuses quant à l'efficacité de mélange du jet lobé, l'absence d'une quantification de son débit d'entraînement ne permet pas sa classification vis à vis d'un jet axisymétrique ou de jets asymétriques d'une autre géométrie. De plus, il n'est pas aisé de distinguer à travers les résultats obtenus, le rôle de l'inclinaison des lobes de celui de la forme lobée du plan d'injection. Aussi, cette étude s'inscrit dans la continuité des précédentes et s'attache à quantifier et à comparer la performance de mélange de deux jets lobés, par rapport à un jet axisymétrique de référence ayant même section et même débit de soufflage. Le premier est issu d'une buse lobée droite. Le second est issu d'une buse lobée de même plan de soufflage mais à lobes inclinés. Cette seconde buse est identique à celle proposée par Hu et al. (2000b). L'objectif étant d'identifier le rôle joué par l'inclinaison des lobes dans les phénomènes d'expansion et d'auto-induction observés par les auteurs. Une analyse de la dynamique tourbillonnaire des jets lobés précédents, permet une approche des phénomènes qui gouvernent l'amélioration du mélange dans le jet lobé.

2 Conditions d'essais

Des jets d'air issus d'une buse circulaire de référence de diamètre $D=40\text{mm}$ et de deux buses lobées, Buse lobée 1 (Figure 1a) et Buse lobée 2 (Figure 1b), de même diamètre équivalent $D_e=40\text{mm}$ et de même géométrie dans le plan d'injection (Figure 1c), ont été explorés sur une distance axiale $X=5D_e$. La largeur du lobe est de 6 mm et sa hauteur de 15 mm. La Buse lobée 2, est construite à partir d'un tube de section circulaire de 40mm de diamètre et de 76.5mm de longueur. Ce tube droit est raccordé à un tube lobé plus court ayant un angle entrant $\alpha_{in}=22^\circ$ et un angle sortant $\alpha_{ex}=14^\circ$ [Hu et al. (2000b)]. La Buse 1, dite droite, a pour angles $\alpha_{in}=0$ et $\alpha_{ex}=0$. La géométrie du plan d'injection est conservée sur une longueur de 56.3mm. Le tube lobé droit résultant, est raccordé au moyen d'un convergent lobé à un tube de section circulaire de 20.6mm de longueur. Le dispositif de soufflage comprend un ventilateur centrifuge relié à une conduite de 1m de longueur et de 40mm de diamètre. Un système Anémométrique à Laser Doppler 2D, a été utilisé pour les mesures des champs moyens de la vitesse. Le volume de mesure à l'intersection des faisceaux laser a pour dimensions $0.040 \times 0.045 \times 0.378\text{mm}$. Son déplacement a été réalisé au moyen d'un système de déplacement autonome.

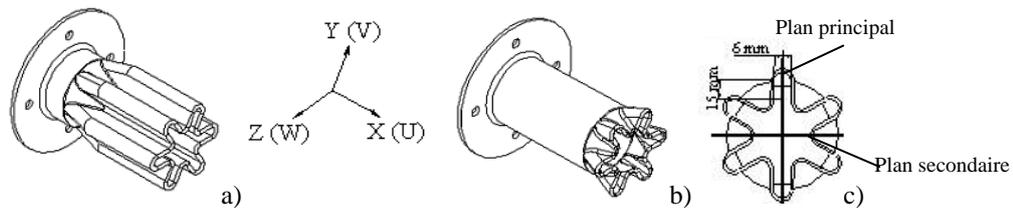


FIG. 1 – a) Buse lobée 1, b) Buse lobée 2, c) Géométrie du plan de soufflage (YZ)

Des visualisations par imagerie laser haute cadence de divers plans longitudinaux des écoulements, ont été réalisés à l'aide d'un système composé par une caméra CCD dont la fréquence d'acquisition peut atteindre 5kHz pour une fenêtre de 512×512 pixels et d'un laser de puissance 4W produisant une nappe de lumière de longueur d'onde 795nm. La détection des structures tourbillonnaires par imagerie, rendue aisée par le choix d'un faible Reynolds de soufflage, est accompagnée d'une quantification de leurs fréquences de détachements par l'enregistrement à l'aide d'un anémomètre à fil chaud, du signal de

la vitesse longitudinale $u(t)$ dans la couche de cisaillement au droit du détachement tourbillonnaire. L'ensemencement de l'écoulement, tant pour les mesures ALD que pour les visualisations laser haute cadence, est réalisé à l'aide d'un atomiseur permettant la génération de particules d'huile de paraffine froides de diamètre 3 à 5 μm .

Le Tableau 1 donne les conditions d'émission des trois jets pour les visualisations et les mesures. Comme nous pouvons le constater, les deux jets lobés sont accélérés à leur sortie. L'écart entre la vitesse moyenne de soufflage U_0 et la vitesse centrale de soufflage U_{0C} , nous amène à définir pour chaque jet, deux nombres de Reynolds de soufflage. Le premier noté Re_0 , est basé sur la vitesse moyenne de soufflage et est quasi égal pour les trois jets et le second noté Re_{0C} , est basé sur la vitesse centrale de soufflage U_{0C} et prend une valeur différente pour chaque jet.

Tableau 1 – Conditions de soufflage

	Type de buse	U_0 (m/s)	U_{0C} (m/s)	Re_0	Re_{0C}
Imagerie et mesures fil chaud	Circulaire	1.04	4.88	$2.7 \cdot 10^3$	$3.4 \cdot 10^3$
	Lobée 1	0.96	5.82	$2.5 \cdot 10^3$	$3.9 \cdot 10^3$
	Lobée 2	0.89	5.89	$2.3 \cdot 10^3$	$4.0 \cdot 10^3$
Mesures ALD	Circulaire	3.84	1.32	$9.8 \cdot 10^3$	$12.4 \cdot 10^3$
	Lobée 1	3.78	1.52	$9.6 \cdot 10^3$	$14.8 \cdot 10^3$
	Lobée 2	3.74	1.59	$9.5 \cdot 10^3$	$15.0 \cdot 10^3$

3 Résultats et analyse

La Figure 2a donne le débit entraîné par chaque jet lobé, rapporté à celui entraîné par le jet circulaire de référence. Il apparaît clairement ici l'avantage du jet lobé 2 sur le jet lobé 1. En région initiale, l'induction du jet lobé 2 atteint jusqu'à quatre fois l'induction du jet de référence alors que pour le jet lobé 1 le gain atteint au maximum 70% à $X=1D_e$. Ce résultat permet de quantifier l'importance relative de l'inclinaison des lobes par rapport à la géométrie lobée du plan de soufflage. Les décroissances des vitesses axiales données en Figure 2b s'accordent avec le résultat précédent et permet d'estimer les longueurs des noyaux potentiels respectivement à $4D_e$ pour le jet circulaire, à $3D_e$ pour le jet lobé 1 et à $2D_e$ pour le jet lobé 2.

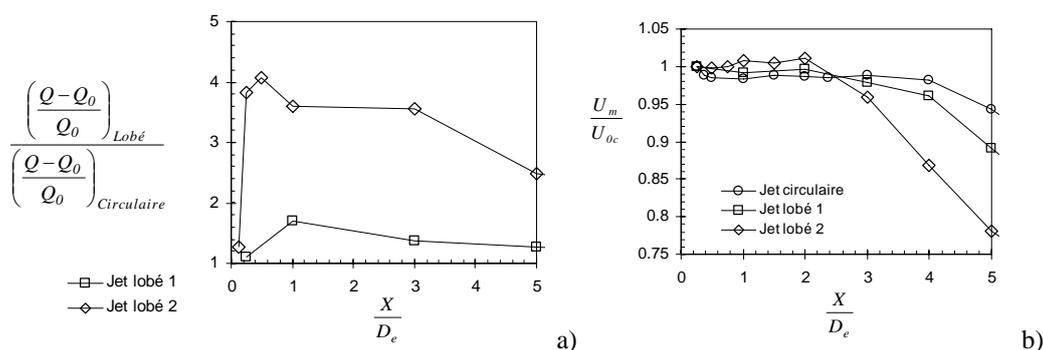


FIG. 2 – a) Débit entraîné normalisé, b) Vitesse axiale normalisée

La distribution angulaire de l'épaisseur de la quantité de mouvement dans le plan $X=0.25D_e$ (Figure 3) donne une indication sur la capacité de transfert de la quantité de mouvement dans la direction radiale. Pour le jet circulaire, la distribution est quasi axisymétrique indiquant une égale capacité de transfert dans toutes les directions. Il en résulte

une vitesse d'entraînement U_r quasi constante (Figure 4). Pour les jets lobés, l'épaisseur de la quantité de mouvement est variable selon la direction et les valeurs maximales ne sont pas situées sur les plans principaux mais aux droits des changements de direction de la vitesse radiale U_r de l'écoulement transversal, celle-ci étant positive dans les lobes et négative dans les creux, indiquant une expansion de l'écoulement aux droits des lobes et un entraînement au niveau des creux. La valeur de θ_{\max}/D_e étant de 0.09 pour le jet lobé 1 et de 0.12 pour le jet lobé 2 à comparer à 0.06 pour le jet circulaire, soit un rapport respectivement de 1.5 et 2.

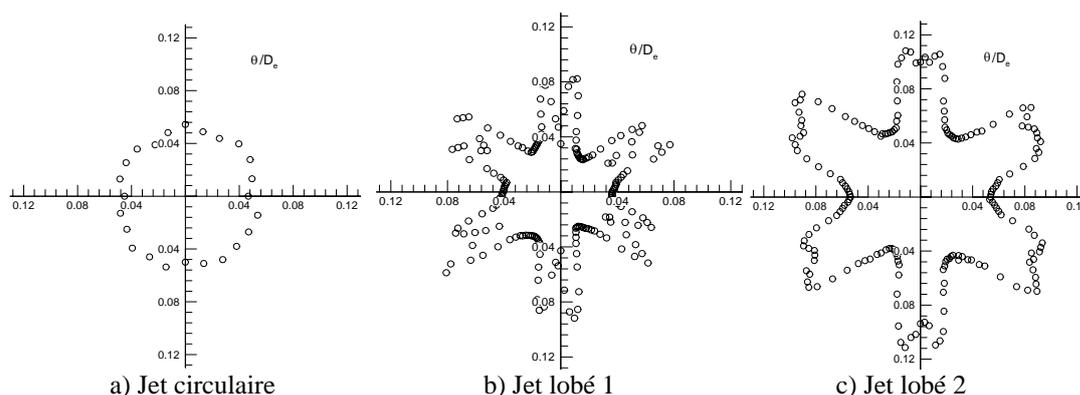


FIG. 3 – Distribution de l'épaisseur de la quantité de mouvement dans le plan (YZ) à $X=0.25D_e$

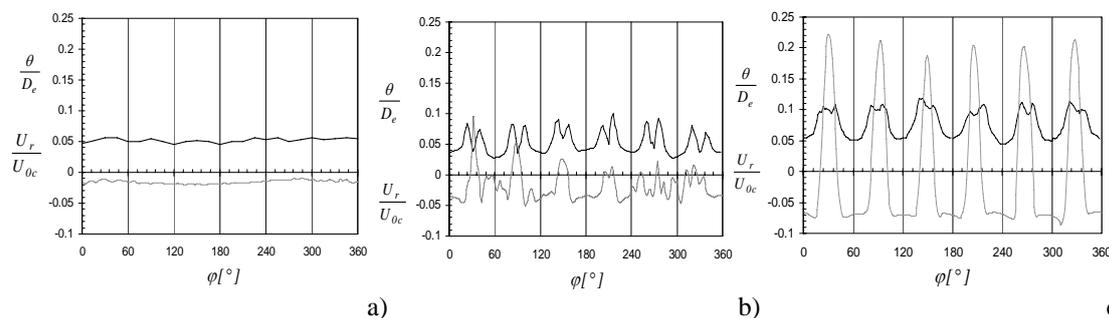


FIG. 4 – Vitesse radiale à $r=0.60D_e$ et épaisseur de la quantité de mouvement dans le plan (YZ) à $X=0.25D_e$: a) Jet Circulaire, b) Jet lobé 1, c) Jet lobé 2

Quant aux valeurs moyennes θ_{moy}/D_e , elles sont égales à 0.06 pour le jet lobé 1 et à 0.08 pour jet lobé 2 à comparer à 0.05 pour le jet circulaire. Ainsi, le fort pouvoir d'entraînement enregistré pour le jet lobé 2, s'accorde avec sa grande capacité de transfert de la quantité de mouvement. Pour tenter d'élucider les mécanismes qui gouvernent l'amélioration du mélange dans le jet lobé, des visualisations et des spectres obtenus en couches de cisaillements sont présentés. Il apparaît sur les Figures 5 et 6, que les structures azimuthales dans le jet circulaire sont annulaires et de mode impaire. La même fréquence, égale à 24Hz, est détectée en périphérie du jet. A l'inverse, dans les jets lobés, ces fréquences sont différentes au niveau des creux et dans les lobes, le rapport des fréquences étant de 1.33 pour le jet lobé 1 et de 1.37 pour le jet lobé 2. Ceci met en évidence une discontinuité des structures azimuthales dans le jet lobé. Celles qui se détachent dans les creux sont visibles dans les plans secondaires. Celles qui se détachent sur les cotés droits des lobes correspondent aux zones sombres visibles dans la région initiale du plan principal. Ces vortex sont par ailleurs parfaitement visibles sur le plan passant par un lobe (Figure 5d). La discontinuité des structures azimuthales dans le jet lobé est très

probablement due au cisaillement de son écoulement transversal (Figure 4) généré par la variation du rayon de courbure du plan lobé de la buse. Ce cisaillement est par ailleurs amplifié par la double inclinaison intérieure/extérieure de la frontière de la buse.

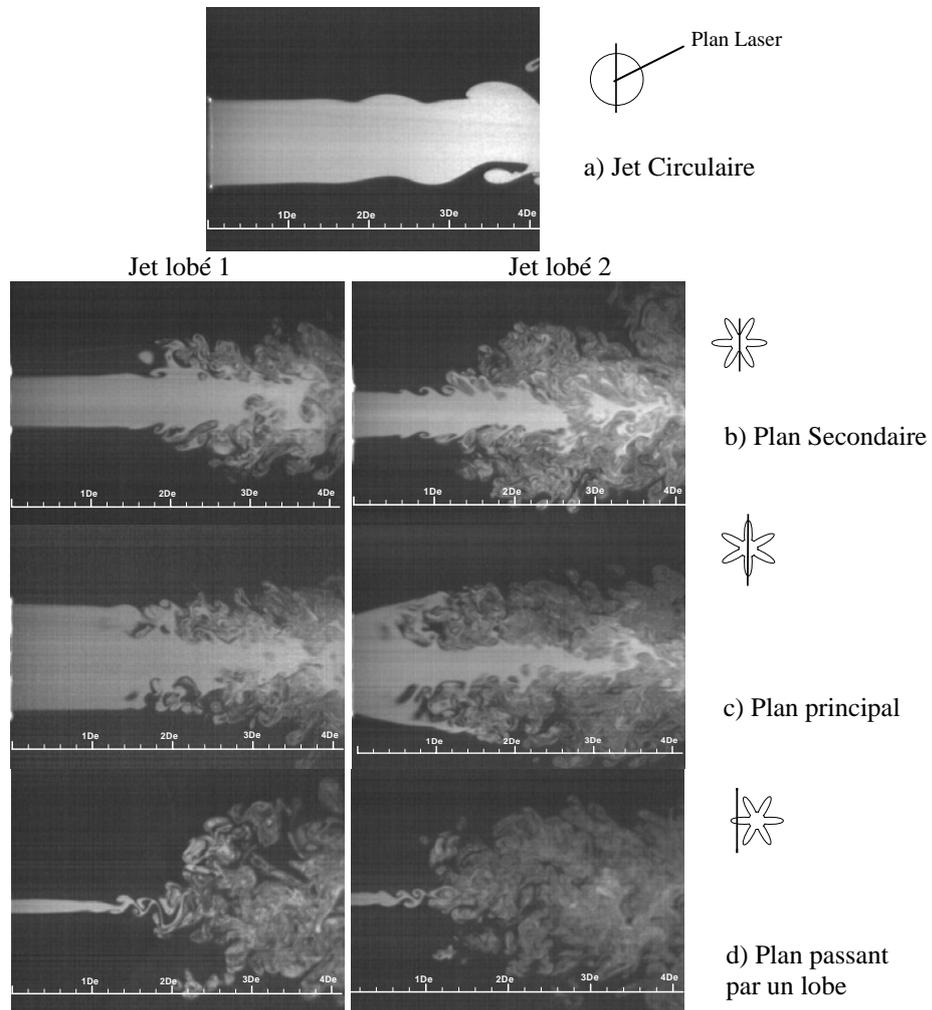


FIG. 5 – Images des écoulements dans divers plans longitudinaux

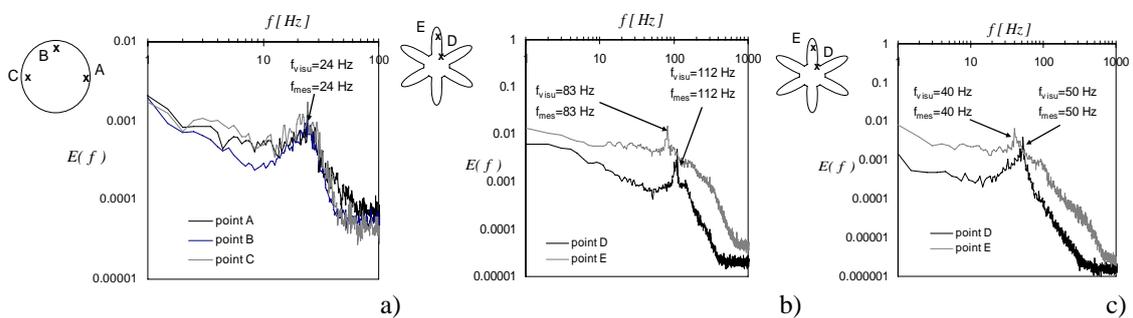


FIG. 6 – Spectres des vitesses longitudinales en couches de cisaillements à $X=0.25D_e$:
a) Jet Circulaire, b) Jet lobé 1, c) Jet lobé 2

3 Conclusions

Cette étude a permis une quantification du gain d'induction de deux jets lobés par rapport à un jet circulaire de référence de même débit et de même section de soufflage. Les deux buses lobées ayant même plan d'injection, se distinguent par la forme dans l'espace à trois dimensions : la première buse lobée est droite et la seconde présente des lobes inclinés vers l'extérieur et des creux vers l'intérieur de l'écoulement. Si le gain d'induction du jet issu de la première buse n'excède pas 70% par rapport au jet circulaire de référence, le débit entraîné par le jet issu de la seconde buse atteint jusqu'à quatre fois celui du jet circulaire. Les distributions angulaires de l'épaisseur de la quantité de mouvement et de la vitesse radiale dans le plan transversal à proximité du soufflage, indiquent une plus grande capacité de transfert de la quantité de mouvement et un plus fort cisaillement de l'écoulement transversal dans le jet lobé issu de la seconde buse.

Si les structures azimutales sont annulaires dans le jet circulaire, dans les jets lobés elles s'organisent en « segments » d'anneaux ayant des fréquences de détachement différentes dans les creux et dans les lobes. Cette discontinuité qui favorise l'épanouissement des structures longitudinales responsable du mélange, explique probablement le gain d'induction dans le jet lobé droit. Dans le jet lobé à lobes et à creux inclinés, la discontinuité des structures azimutales est couplée à une amplification du cisaillement de l'écoulement transversal. Ceci permet de conclure quant à l'importance de l'inclinaison des lobes et des creux dans la performance de mélange du jet lobé.

Références

- Belovich, V.M. & Samimy, M. 1997 Mixing processes in a coaxial geometry with a central lobed mixer-nozzle. *AIAA J.*, **35**, (1997) 838-841.
- Ho, C.M. & Gutmark, E. 1987 Vortex induction and mass entrainment in a small-aspect-ratio elliptic jet *J. Fluid Mech.* **179**, 383-405.
- Hu, H., Kobayashi, T., Wu, S. & Shen, G. 1999 Changes to the vortical and turbulent structure of jet flows due to mechanical tabs. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 213, Part C, 321-329.
- Hu, H., Saga, T., Kobayashi, T. & Taniguchi, N. 2000a Passive control on jet mixing flows by using vortex generators. *Proc. of the 6th Triennial International Symp. on Fluid Control, Meas. and Visualisation*, Sherbrooke, Canada.
- Hu, H., Kobayashi, T., Saga, T., Sagawa, S. & Taniguchi, N. 2000b Particle image velocimetry and planar laser-induced fluorescence measurements on lobed jet mixing flows. *Exp. in Fluids* (Suppl.), S141-S157.
- Hu, H., Saga, T., Kobayashi, T. & Taniguchi, N. 2001 A study on a lobed jet mixing flow by using stereoscopic particle image velocimetry technique. *Phys. of fluids*, **13**, 3425-3441.
- Krothapalli, A., Baganoff, D., & Karamchetchi, K. 1981 On the mixing of a rectangular jet. *J. Fluid Mech.* **107**, 201-220.
- Quinn, W.R. 1994 Development of a large-aspect-ratio rectangular turbulent free jet. *AIAA J.* **32**, 547-554.
- Sfeir, A.A. 1979 Investigation of three-dimensional turbulent rectangular jets. *AIAA J.* **17**, 1055-1060
- Yuan, Y. 2000 Jet fluid mixing control through manipulation of inviscid flow structures. *Ph.D. Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Zaman, K.B.M.Q. 1996 Spreading characteristics and thrust of jets from asymmetric nozzles. *AIAA Paper No 96-0200*, 1-17.