

# Contrôle par microjets impactants d'un jet à Mach 0.9 : influence du nombre de microjets sur le développement des structures tourbillonnaires générées par le contrôle.

Thomas Castelain, Jean-Christophe Béra, Nathalie Grosjean, Michel Sunyach

CNRS, UMR 5509, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, France ;  
Université de Lyon, Lyon, France ;  
Ecole Centrale de Lyon, Centre Acoustique,  
36 avenue Guy de Collongue F-69134 Ecully Cedex, France  
e-mail : thomas.castelain@ec-lyon.fr

## Résumé :

*Des essais menés en chambre anéchoïque ont permis d'effectuer la détection des structures cohérentes longitudinales induites par un système de microjets impactant un jet subsonique à haut nombre de Mach et haut nombre de Reynolds. Une analyse statistique d'acquisitions par PIV stéréoscopique a été menée en utilisant le critère topologique  $\Gamma_2$ . La localisation de ces structures dans la couche de mélange et leurs propriétés statistiques (nombre, enstrophie) sont examinées pour déterminer l'influence aérodynamique du nombre de microjets. Le nombre de microjets, qui s'est révélé présenter une valeur optimale pour la réduction du bruit, s'avère dans le même temps imposer le développement des structures dans la couche de mélange.*

## Abstract :

*Experiments on high-subsonic high-Reynolds round jet focused on the detection of coherent streamwise structures induced by a fluidic control system made of impinging microjets. Statistical analyses based on instantaneous velocity fields from Stereoscopic Particle Image Velocimetry acquisitions relied on the topological  $\Gamma_2$  criterion. Location of the streamwise structures in the jet mixing layer and their statistical properties (number, enstrophy) are examined and their dependency with the number of microjets is highlighted. The optimal number of microjets maximizing the noise reduction appears to be a specific configuration regarding the development of coherent structures induced by the control.*

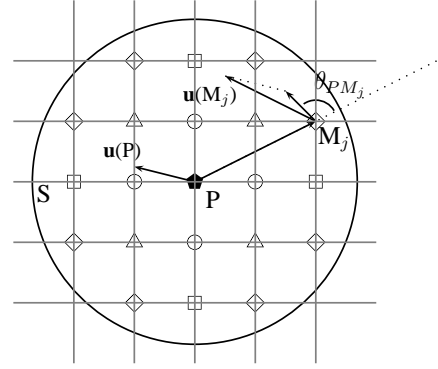
**Mots-clefs : Réduction de bruit ; contrôle d'écoulement ; fluidique ; microjet**

## 1 Introduction

Notre étude porte sur la modification des paramètres caractéristiques d'un jet à haut nombre de Mach et haut nombre de Reynolds par un système de micro-injections localisées en sortie de tuyère. Ce type de contrôle fluidique permet de réduire le niveau de turbulence dans une zone étendue de la couche de mélange [2, 3] ainsi que de réduire le bruit global du jet par une action sur les basses fréquences du spectre de bruit [1, 4]. Des mécanismes possibles traduisant l'action des microjets ont été proposés, impliquant soit la génération de structures longitudinales cohérentes [9, 12], soit une modification du profil initial de vitesse affectant la stabilité de la couche de mélange du jet [1, 2].

La génération de structures longitudinales a essentiellement été traduite par des relevés de vorticité longitudinale moyenne - au sens de la décomposition de Reynolds - [1, 8, 11], et par quelques analyses qualitatives de champs instantanés de vitesse [9, 7]. Ces approches peuvent être complétées par une analyse statistique des caractéristiques des structures cohérentes contenues dans chaque champ instantané de vitesse, ce qui suppose l'emploi d'un critère d'identification des structures. Parmi l'ensemble des critères déjà développés ( $Q_2$ ,  $\lambda_2$ , ...), la fonction  $\Gamma_2$  [6] semble particulièrement adaptée au traitement des données expérimentales. Ce critère topologique est calculé pour chaque point du champ de vitesse et repose sur l'orientation locale du champ de vitesse par rapport au point de référence. Dans le cas du traitement de résultats expérimentaux obtenus sur un maillage structuré, le calcul porte sur un ensemble discret de points entourant le point de calcul P :

$$\Gamma_2(P) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^k \sum_{j=1}^{N_n} \frac{[\mathbf{PM}_j \wedge (\mathbf{U}(M_j) - \mathbf{U}(P))]}{\|\mathbf{PM}_j\| \|\mathbf{U}(M_j) - \mathbf{U}(P)\|}$$



où  $N = \sum_{n=1}^k N_n$  est le nombre de points voisins sur lequel porte le calcul de la valeur du  $\Gamma_2$  en  $P$ ,  $k$  est le nombre de familles de points voisins (une famille de points rassemble tous les points voisins situés à une distance donnée du point de calcul  $P$ ), et  $N_n$  est le nombre de points de la famille  $n$ . Sur l'illustration précédente, on distingue quatre familles de points ( $\circ$ ,  $\square$ ,  $\triangle$  et  $\diamond$ ). L'application de ce calcul en chaque point d'un champ de vecteurs vitesses permet de définir le champ des valeurs de  $\Gamma_2$ , comprises par définition entre -1 et 1. Pour un écoulement incompressible, les zones de l'écoulement pour lesquelles  $\Gamma_2 > 2/\pi$  (en première approximation) révèlent l'existence de structures cohérentes [10], la frontière de ces structures étant définie par la valeur  $\Gamma_2 = 2/\pi$ .

Nous nous intéressons ici, à partir d'un ensemble d'acquisitions par Vélocimétrie par Images de Particules (PIV), à la caractérisation statistique des structures cohérentes longitudinales présentes dans la couche de mélange du jet principal. Le critère  $\Gamma_2$  est appliqué à chaque champ instantané avec intégration sur  $k = 3$  familles de points, et on relève la position approximative du centre des structures tourbillonnaires dans la couche de mélange du jet correspondant aux maxima locaux de  $\Gamma_2$ . Pour chaque structure détectée, l'aire caractéristique de cette structure est évaluée à partir du contour  $\Gamma_2 = 0.6$  ( $\approx 2/\pi$ ), et la circulation de la vitesse sur ce contour est estimée. Notre étude portera sur ces structures cohérentes, leur répartition azimutale dans la couche de mélange du jet principal, et l'évolution de leurs propriétés statistiques avec le nombre de microjets  $n$ .

## 2 Installation expérimentale et mesures

Les résultats présentés émanent d'expériences menées dans la chambre sourde du Centre Acoustique de l'École Centrale de Lyon. Le jet de diamètre  $D = 50$  mm, de Mach  $M_j = U_j/c_0 = 0.9$ , et de Reynolds  $Re_D = 10^6$ , est généré par un compresseur centrifuge d'une puissance électrique de 450 kW pour un débit massique maximum égal à  $1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ . Après l'étage de compression, le flux est chauffé au travers d'une série de résistances électriques de puissance totale 80 kW, de sorte que la température du jet en sortie de tuyère soit égale à la température atmosphérique.

Le système de microjets est composé de 36 injecteurs orientés vers le centre du jet (figure 1(a)). De précédentes études [3, 5] ont examiné la réduction de bruit obtenue par emploi des microjets en fonction des paramètres géométriques et aérodynamiques du système de contrôle. Dans la présente étude, le diamètre des microjets est  $d = 1$  mm, l'angle d'impact des microjets est égal à  $45^\circ$  et la distance entre la sortie de tuyère et le point d'impact des microjets sur la couche de mélange est approximativement égale à 5% du diamètre du jet principal  $D$ . Le débit massique par microjet est égal à  $3.4 \cdot 10^{-4}$  fois le débit massique du jet principal. De plus, chaque microjet peut être utilisé de manière indépendante, et le nombre  $n$  de microjets utilisés constitue le paramètre de notre étude. La figure 2 illustre les différentes configurations étudiées, pour lesquelles la répartition des microjets est axisymétrique (ou axisymétrique par paire de microjets pour le cas  $n = 24$ ).

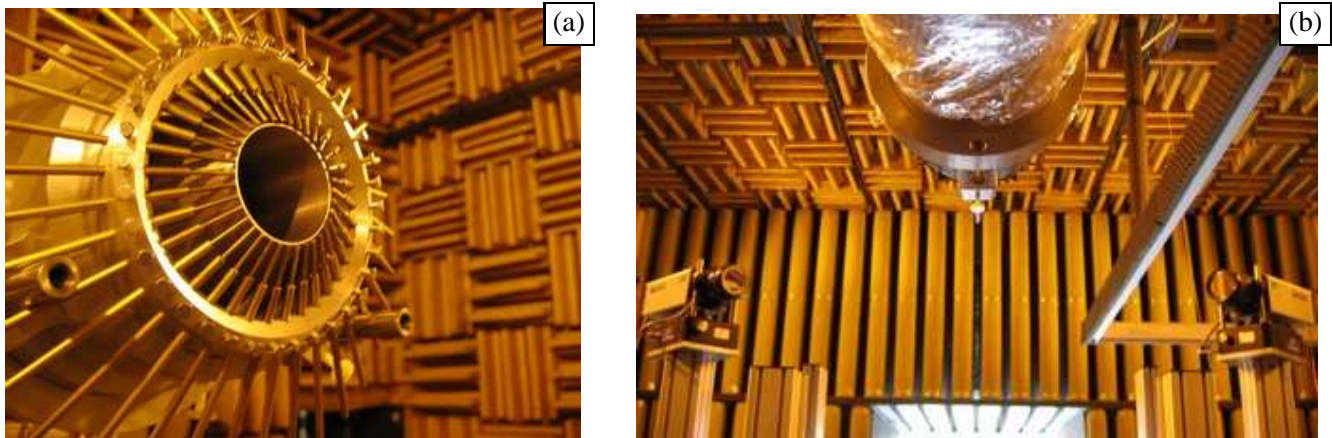


FIG. 1 – Vues du dispositif expérimental : système de microjets impactants (a) et disposition des caméras pour la réalisation des mesures SPIV de la vitesse dans un plan perpendiculaire à l’axe du jet (b).

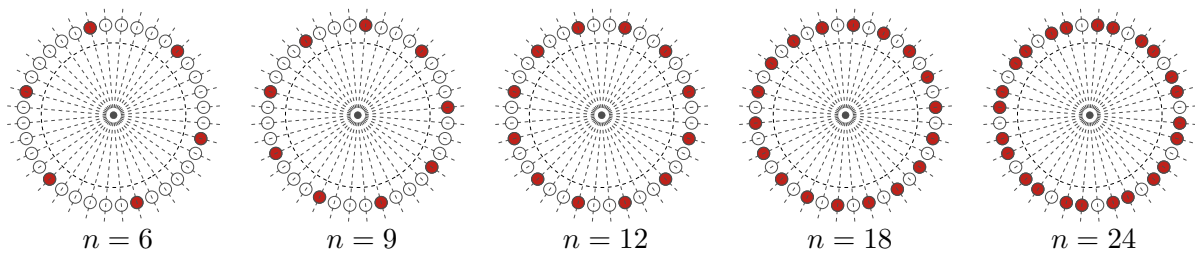


FIG. 2 – Répartition azimutale des  $n$  microjets. Chaque microjet utilisé est indiqué en rouge sur le schéma représentant les 36 microjets disponibles, répartis de manière homogène dans l’azimut du jet principal.

Des mesures aérodynamiques par Vélocimétrie par Images de Particules Stéréoscopique (SPIV) sont réalisées dans des plans perpendiculaires à l’axe du jet, pour tenir compte de l’inhomogénéité azimutale induite par l’impact des microjets sur le jet principal (figure 1(b)). La taille de la fenêtre d’interrogation finale dans le traitement des paires d’images acquises par les deux caméras placées de part et d’autre de l’axe du jet correspond approximativement à 2% du diamètre du jet principal. Pour mener à bien notre analyse, 1000 champs de vitesse instantanée ont été enregistrés pour chaque configuration.

### 3 Résultats

#### 3.1 Champs de vitesse moyenne

L’effet des microjets sur les caractéristiques moyennes du champ de vitesse a été déterminé. Le champ de vitesse axiale moyenne à  $x/D = 1$  est donné en Figure 3(a), sous la forme de contours d’isovaleurs de vitesse. On compare le jet de référence (à gauche) au jet contrôlé (à droite), où la direction d’impact des  $n = 18$  microjets utilisés (soit 9 microjets sur une demi-circonférence) est indiquée par une flèche. L’indentation du jet contrôlé est clairement liée à l’apport de quantité de mouvement des microjets, et l’on note un épaississement, inhomogène en azimuth, de la couche de mélange.

#### 3.2 Localisation des structures longitudinales

Pour chaque configuration de contrôle comme dans le cas du jet non contrôlé (dit *de référence*), les structures cohérentes longitudinales ont été relevées sur chacune des 1000 cartographies instantanées issues des mesures par SPIV. L’ensemble des positions des centres de

ces structures a été reporté sur la figure 3(b) dans le cas du jet de référence et du contrôle par  $n = 18$  microjets. La couleur utilisée pour indiquer le centre d'une structure dépend du signe de sa circulation. Dans le cas du jet de référence, les structures cohérentes sont localisées de manière privilégiée dans la couche de mélange et y apparaissent réparties de manière homogène en azimut. De plus, les structures semblent équi-réparties selon le signe de circulation. Dans le cas du jet contrôlé, on note au contraire une répartition sélective des structures selon le signe de leur circulation, de part et d'autre de l'impact des microjets. Bien entendu, ces structures demeurent quasi-exclusivement dans la couche de mélange du jet principal (selon la figure 3(a)). Une exploitation quantitative de ces résultats repose sur l'évaluation du nombre de structures contenues dans un secteur angulaire d'ouverture  $\delta\theta$  (choisie ici égale à 0.02 rad) et centré sur  $\theta \in [\pi/9 : 8\pi/9]$ , défini sur la figure 3(b). La figure 4 donne la distribution azimutale du nombre de structures contenues dans cette fenêtre de recensement pour différentes valeurs du nombre  $n$  de microjets utilisés. On constate que la répartition azimutale des structures dans le cas du jet de référence est effectivement homogène et équi-distribuée entre les structures de circulation positive et les structures de circulation négative.

Pour les configurations de contrôle impliquant un nombre modéré de microjets (typiquement  $6 \leq n \leq 12$ ), chaque impact de microjet induit deux paires de structures de circulation alternée ; un premier système de structures (indiqué par ① sur la figure 4(b)) est localisé de part et d'autre de l'impact des microjets et semble correspondre aux tourbillons contra-rotatifs alternés (*Counter-rotating Vortex Pairs* ou CVP) déjà observés sur les champs moyens de vitesse [1, 8, 9]. On note la présence d'un deuxième système de structures (②) plus éloigné de l'impact des microjets, qui semblent correspondre aux tourbillons "en fer à cheval" induits par l'impact des microjets sur la couche de mélange. Pour  $n = 18$ , on remarque la persistance des structures du type CVP, alors que le second système de structures n'est plus relevé en  $x/D = 1$ . Il apparaît donc qu'une interaction entre les structures induites par deux microjets consécutifs inhibe le développement des structures dites "en fer à cheval". Pour  $n = 36$ , on remarque que la répartition des structures ne présente plus une fréquence spatiale correspondante à celle de disposition des microjets. L'interaction entre les structures semble dans ce cas affecter également le développement des structures CVP.

### 3.3 Caractérisation intégrale des structures cohérentes

Le nombre moyen de structures cohérentes et l'énstrophie associée à la circulation moyenne  $\bar{\Gamma}$  sur le contour  $\Gamma_2 = 0.6$  et à l'aire moyenne  $\bar{A}$  délimitée par ce contour sont représentés pour différents nombres de microjets  $n$  en figure 5. En  $x/D = 1$ , le nombre total de structures cohérentes (soit la somme de la répartition azimutale correspondante donnée en figure 4) croît avec  $n$ . Cette évolution est approximativement linéaire pour  $0 \leq n \leq 12$ . L'énstrophie associée, correspondant à l'énergie de la structure "moyenne" et représentée en figure 5 par sa racine carrée  $\bar{\Gamma}/\bar{A}$ , passe par un maximum significatif en  $n = 18$ . Pour  $x/D = 3$ , le nombre de structures longitudinales présente un maximum en cette même valeur  $n = 18$ , ce qui semble indiquer l'existence d'une corrélation de cette quantité avec l'énergie moyenne des structures plus en amont (et typiquement en  $x/D = 1$ ). Il semble en effet raisonnable de penser que la persistance de structures cohérentes en aval d'une position longitudinale donnée est statistiquement favorisée si l'énergie de ces structures y est grande. De plus, l'énstrophie associée à la structure moyenne diminue jusqu'en  $x/D = 18$ , où elle devient pratiquement constante. À nouveau, l'évolution de ces propriétés est approximativement linéaire pour  $0 \leq n \leq 18$ . Ces observations sont donc cohérentes avec les conclusions de la partie 3.2 sur l'indépendance des microjets pour  $0 \leq n \leq 12$ , et les effets d'interaction entre les structures cohérentes qui inhibent leur développement pour  $n \geq 18$ . La distinction de deux comportements différents selon que  $n$  est supérieur ou inférieur à 18 se retrouve dans des études de réduction de bruit précédemment menées dans les mêmes configurations de contrôle [5].

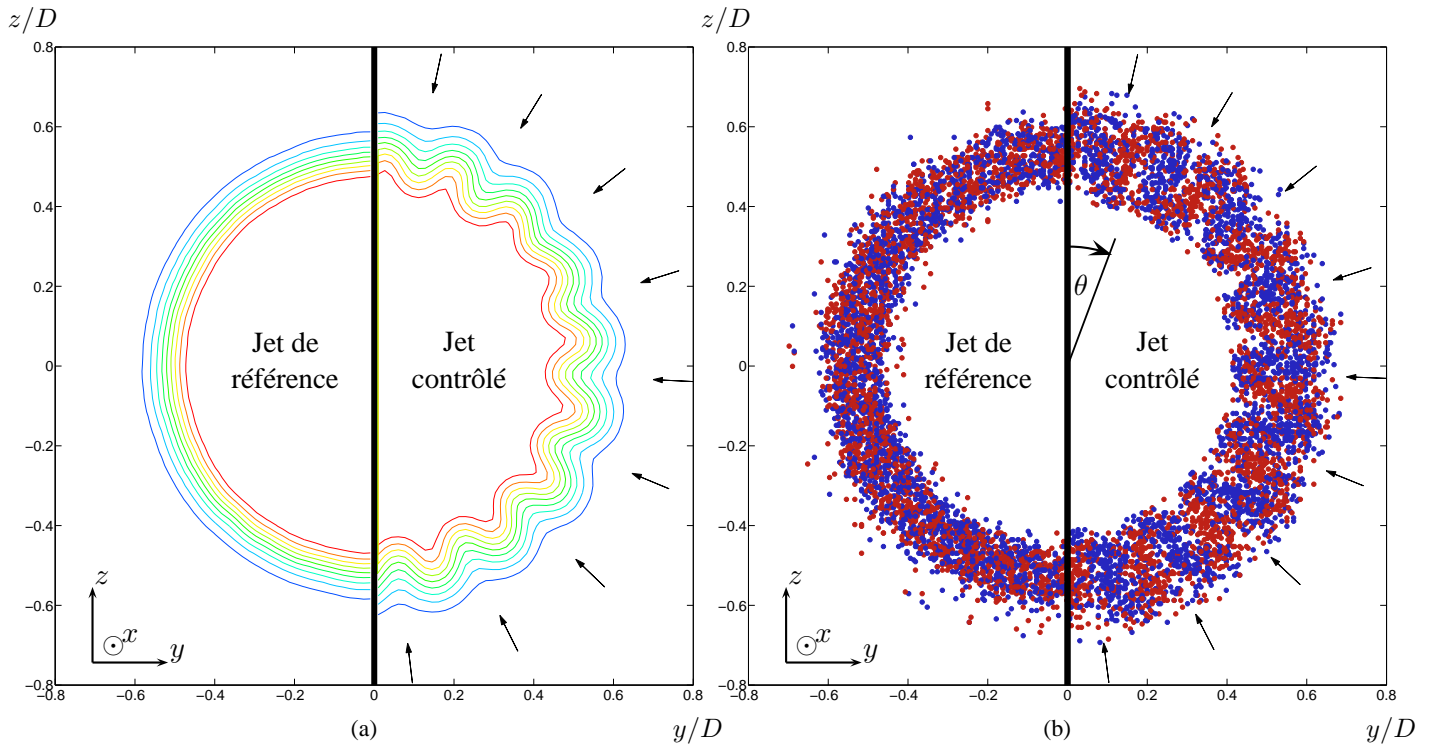


FIG. 3 – Caractérisation du jet de référence et du jet contrôlé ( $n = 18$ ). Les flèches indiquent la direction d'impact des microjets. (a) Isocontours de la vitesse axiale (de  $0.9 U_j$  à  $0.1 U_j$  par pas de  $0.1 U_j$ ) et (b) cartographies des centres des structures cohérentes tournant dans le sens direct (●) et dans le sens indirect (●). Position longitudinale :  $x/D = 1$ .

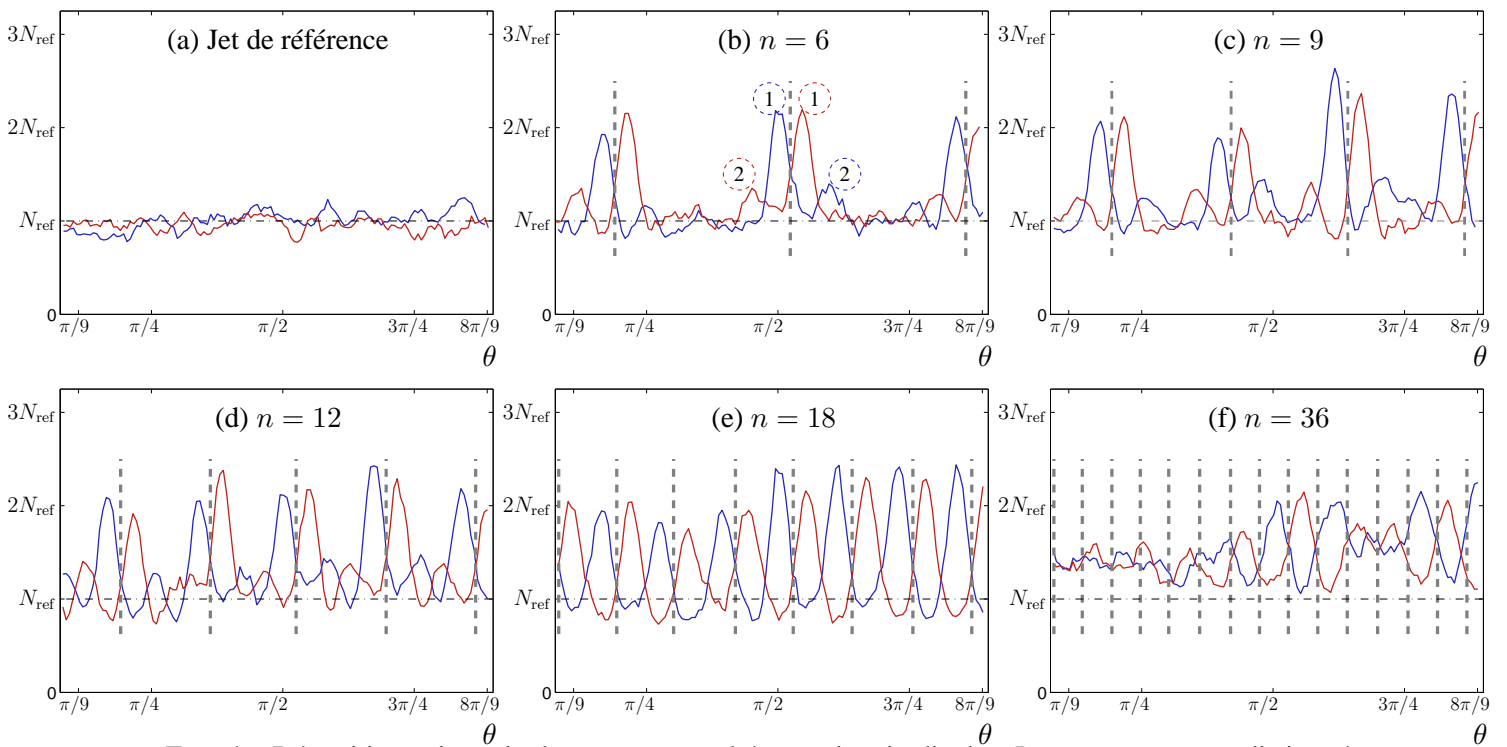


FIG. 4 – Répartition azimutale des structures cohérentes longitudinales. Les structures sont distinguées selon le signe de leur circulation, positive (-) et dans le sens indirect (-). La position d'impact des microjets est indiquée par les tracés verticaux.  $N_{\text{ref}}$  correspond au nombre de structures caractéristique du jet de référence. Position longitudinale :  $x/D = 1$ .

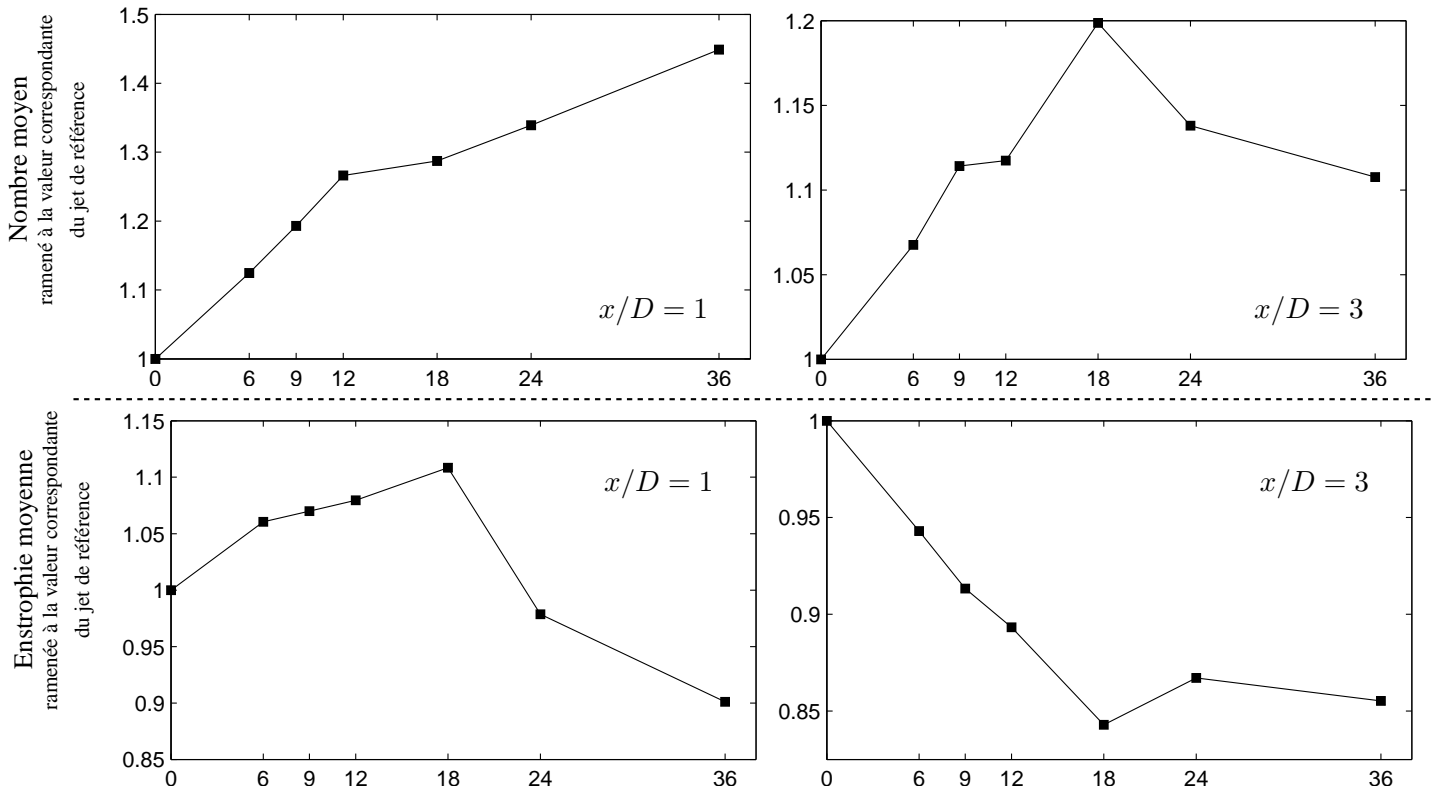


FIG. 5 – Caractéristiques intégrales des structures cohérentes : nombre moyen et entropie moyenne, ramenés aux valeurs correspondantes du jet de référence, pour  $x/D = 1$  (gauche) et  $x/D = 3$  (droite).

## 4 Conclusion

Une analyse statistique d'acquisitions par PIV stéréoscopique a été menée. L'utilisation d'un critère adapté a permis la détection des structures cohérentes longitudinales induites par un système de microjets impactants. La localisation de ces structures dans la couche de mélange et leurs propriétés statistiques (nombre, entropie) indiquent qu'il existe un nombre de microjets au delà duquel apparaissent des interactions entre structures cohérentes induites par le contrôle. Ces interactions expliquent le préjudice apporté par l'augmentation du nombre de microjets à la réduction du bruit de jet.

## Références

- [1] ALKISLAR, M., KROTHAPALLI, A., LOURENCO, L., AND BUTLER, G. The effect of streamwise vorticity on the aeroacoustics of Mach 0.9 axisymmetric jet. In *AIAA paper 2005-3045*. (2005).
- [2] ARAKERI, V., AND KROTHAPALLI, A. On the use of microjets to suppress turbulence in a Mach 0.9 axisymmetric jet. *J. Fluid Mech.* 490 (2003), 75–98.
- [3] CASTELAIN, T., BÉRA, J., SUNYACH, M., AND JUVÉ, D. Effect of microjets on a high-subsonic jet. Parametric study of far-field noise reduction. In *12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (2006).
- [4] CASTELAIN, T., DIETRICH, M., BÉRA, J., AND SUNYACH, M. Mesures acoustiques sur un jet subsonique à haut Re et Mach restreint. Effet de jets impactants sur les composantes spectrales du bruit de jet. In *17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes, France* (2005).
- [5] CASTELAIN, T. Contrôle de jet par microjets impactants. Mesure de bruit rayonné et analyse aérodynamique, In *Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon*, 2006, [http://acoustique.ec-lyon.fr/publi/castelain\\_thesis.pdf](http://acoustique.ec-lyon.fr/publi/castelain_thesis.pdf).
- [6] GRAFTIEAUX, L., MICHARD, M., AND GROSJEAN, N. Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows. *Meas. Sci. Technol.* 12 (2001), 1422–1429.
- [7] HILEMAN, J., SAMIMY, M. Effects of vortex generating tabs on noise sources in an ideally expanded mach 1.3 jet. *Int.J.Aeroacoustics* 2, 35–63 (2003).
- [8] HU, H., SAGA, T., KOBAYASHI, T., AND TANIGUCHI, N. Research on the vortical and turbulent structures in the lobed jet flow using laser induced fluorescence and particle image velocimetry techniques. *Meas. Sci. Technol.* 11 (2000), 698–711.
- [9] LOU, H., ALVI, F., SHIH, C., CHOI, J., AND ANNASWAMY, A. Active control of supersonic impinging jets : Flowfield properties and closed-loop strategies. In *AIAA paper 2002-2728*. (2002)
- [10] MICHARD, M. AND FAVELIER, T. Développement d'un critère d'identification de structures tourbillonnaires adapté aux mesures de vitesse par PIV In *9ème Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser* (2004)
- [11] REEDER, M., AND SAMIMY, M. The evolution of a jet with vortex-generating tabs : real-time visualization and quantitative measurements. *J. Fluid Mech.* 311 (1996), 73–118.
- [12] ROGERS, C., AND PAREKH, D. Mixing enhancement by and noise characteristics of streamwise vortices in an air jet. *AIAA j.* 32(3) (1994), 464–471.