

## Caractérisation d'un jet synthétique en vue de son utilisation pour le contrôle

Fethi Aloui, Maher Ben Chiekh, Sassi Ben Nasrallah, Azzedine Kourta

LESTE, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Avenue Iben El jazzar 5019 Monastir, Tunisie  
Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, allée du Professeur Camille Soula 31400 Toulouse,  
France

Email : [aloui\\_fethi@yahoo.fr](mailto:aloui_fethi@yahoo.fr)

### Résumé :

*Dans le présent travail, on a mis au point un actionneur modulable fonctionnant à l'aide d'un haut-parleur. Trois inclinaisons de la fente ont été choisies (30°, 45° et 90°). Pour chacune, plusieurs fréquences et amplitudes de la vitesse à la sortie ont été étudiées. On a fait un balayage à 2 mm de la fente. Pour chaque cas, on a obtenu les caractéristiques de l'écoulement moyen et fluctuant complété par une analyse spectrale à l'aide de l'anémométrie à fil chaud. Un effet de ralentissement a été observé pour une inclinaison de 30° par rapport à l'horizontal. Des variations importantes ont été notées quand on fait varier la fréquence. La fréquence d'excitation pilote la dynamique du jet et va sûrement avoir un effet moteur en présence de l'écoulement. L'augmentation de l'amplitude permet aux tourbillons générés de s'éloigner de la fente et d'influencer l'écoulement extérieur loin de la fente. Des mesures par Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) viennent confirmer ces constatations.*

### Abstract :

*In the present work, we put to the point an actuator that can modulated with a loudspeaker. Three inclinations of the slit have been chosen (30°, 45° and 90°). For each, several frequencies and amplitudes of the velocity to the exit have been studied. We made a sweep of 2 mm for the slit. For every case, we got features of the average flow and fluctuating completed by a spectral analysis with an anemometry of hot-wire. An effect of deceleration has been observed for a slit of 30° in comparison to the horizontal. Some important variations have been noticed when we have varied the frequency. The frequency of excitation pilots the dynamics of the jet and will certainly have a motor effect surely in presence of the extern flow. The increases of the amplitude allow vortex generated to move away from the slit and to influence the transverse flow far of the slit. Some measures by Particle Image Velocimetry (PIV) come to confirm these conclusions.*

### Mots-clefs : Jet synthétique ; décollement ; turbulence

## 1 Introduction

Le fonctionnement des actionneurs de type jet synthétique est basé sur l'alternance périodique de soufflage et d'aspiration avec un débit massique moyen nul. Ils ne nécessitent ni conduites, ni réservoirs comme un jet continu classique (Glezer et al. (2002)). Les jets synthétiques sont utiles pour la vectorisation, l'augmentation de mélange et l'élargissement des jets par interaction avec des jets secondaires du même fluide, et le contrôler le décollement de la couche limite sur des formes profilées (Smith et al. (1997,1999), L'inclinaison des jets peut avoir un effet important sur le contrôle des écoulements (McManus et al. (1997)). L'orientation tangentielle au profil et dans le sens de l'écoulement permet l'énergisation de la couche limite par apport direct de quantité de mouvement comme dans le cas des actionneurs de McCormick et al. (2000). Ainsi le présent travail a pour objectif d'étudier expérimentalement le

développement des jets synthétiques en absence d'un écoulement extérieur. Une attention particulière est portée sur l'effet de l'inclinaison.

## 2 Paramètres caractéristiques du jet synthétique

Le comportement des jets synthétiques peut être caractérisé grâce à des nombres adimensionnels (Kevin E et al):

Nombre de Reynolds (Re) basé sur épaisseur de la fente de sortie  $Re = \frac{V_{\max} e}{\nu}$

Nombre de Stokes (St) qui est défini par :  $St = \frac{f e^2}{\nu}$

Nombre de Strouhal (Str),  $Str = \frac{St}{Re} = \frac{f e}{V_{\max}}$

Longueur de décharge  $L_0/e = \frac{V_{\max}}{e} \int_0^{T/2} \sin(2\pi f t) dt = \frac{V_{\max}}{\pi f e}$

Où  $V_{\max}$  est la vitesse maximale mesurée en sortie du jet,  $e$  épaisseur de la fente, et  $f$  est la fréquence d'actionnement du jet.

## 3 Dispositif expérimental

Le jet synthétique est obtenu, par un actionneur électrodynamique (haut-parleur) placé dans une cavité munie d'une fente rectangulaire de dimension  $1 \times 100$  mm taillée dans une plaque en aluminium (FIG. 1). La fente a été inclinée d'un angle  $\alpha$  ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  et  $\alpha = 90^\circ$ ). Ces inclinaisons ont été choisies en raison des grandes différences dans le mécanisme d'interaction entre le jet synthétique et l'écoulement extérieur. L'oscillation de la membrane du haut-parleur, placée au fond d'une cavité, comprime et expulse l'air à travers la fente. L'actionneur est excité par un signal sinusoïdal de fréquence et d'amplitude réglable (la fréquence varie de 30 Hz à 350 Hz et l'amplitude peut atteindre 23 V<sub>c-c</sub>).

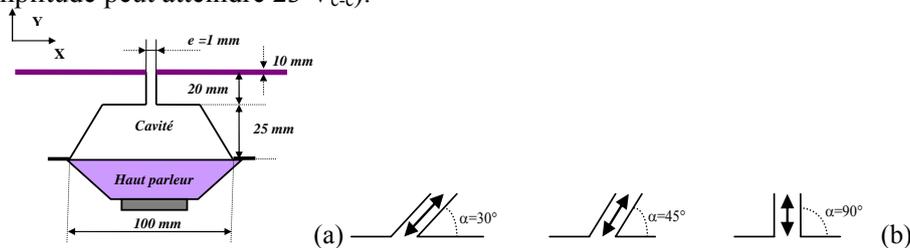


FIG. 1 – Dispositif expérimental. (a) Schéma de la cavité. (b) Différentes configurations.

Les mesures de la vitesse en un point et plus précisément à 2 mm de la buse ont été réalisées avec un anémomètre à fil chaud, opérant à température constante alors que les mesures des champs de vitesse sont réalisées par un système PIV, type Dantec. A côté des techniques conventionnelles (moyennes statistiques, lignes de courant, ...) de post-traitement des mesures expérimentales, on a utilisé le critère  $\Gamma_2$  (Graftieaux et al. (2001)), pour la détermination des structures cohérentes de l'écoulement à partir des mesures PIV.

## 4. Étude paramétrique

### 4.1 Réponse de l'actionneur

La FIG.2 montre le signal de vitesse mesuré en fonction du temps par anémométrie à fil chaud à la sortie de l'actionneur soumis à une excitation sinusoïdale d'amplitude 10 V<sub>c-c</sub> et une

fréquence 100 Hz. Ces mesures ont été réalisées pour les différentes configurations étudiées. Le fil chaud est placé à une distance de 2 mm de la fente de sortie. Pour une alimentation sinusoïdale de l'actionneur, on mesure à la sortie de la fente un écoulement sinusoïdal redressé de même fréquence que l'excitation.

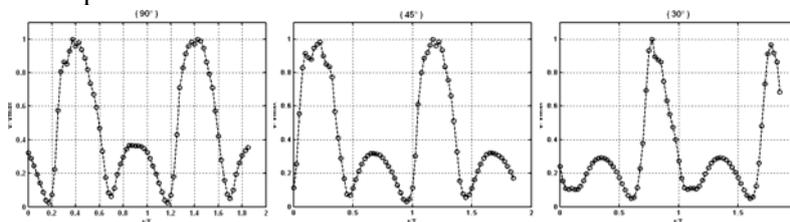


FIG. 2 – Réponse des actionneurs à une excitation sinusoïdale à 100 Hz.

#### 4.2 Effet de la tension d'alimentation

La réponse du jet à l'excitation sinusoïdale en fonction de la tension d'excitation est représentée sur la FIG.3. Il s'agit d'une fonction croissante avec une pente qui diminue au fur et à mesure que l'on fait augmenter l'amplitude. Ceci est valable pour les différentes fréquences et inclinaisons étudiées. Les vitesses générées à basses fréquences sont beaucoup plus importantes que dans le cas des hautes fréquences. En effet, le haut parleur est caractérisé en basses fréquences par un important battement de sa membrane qui lui confère une bonne efficacité pour comprimer la cavité dans laquelle elle oscille. A 30° et à 350 Hz, l'actionneur cesse de générer un écoulement pour des tensions inférieures à 5  $V_{c-c}$ . La FIG.3 montre que la vitesse obtenue pour 90° est beaucoup plus importante que 45° et 30°, cette diminution est due aux effets visqueux au bord de la fente qui augmente en diminuant l'inclinaison. Pour 30° l'écoulement devient très proche de la paroi ce qui engendre un ralentissement du jet.

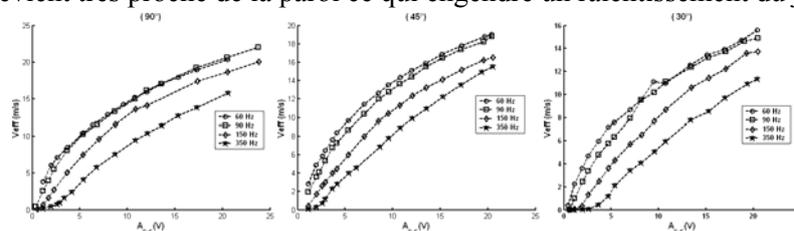


FIG. 3 – Variation de la vitesse en fonction de la tension d'alimentation de l'actionneur pour différentes fréquences.

#### 4.3 Effet de la fréquence

La FIG.4 donne l'évolution de la vitesse en fonction de la fréquence. Elle montre une très forte dépendance en fréquence de la vitesse d'injection. A tension constante, la réponse fréquentielle des actionneurs ne présente pas des résonances marquées. Elle est caractérisée par un maximum de vitesse à 60 Hz et une diminution d'efficacité de part et d'autre. La faible efficacité de l'actionneur pour les faibles fréquences est due à la limitation des moteurs électrodynamiques conçus pour l'audiophonie et donc pour des fréquences supérieures à 30 Hz. Pour les fréquences élevées (supérieures à 400 Hz) les actionneurs cessent de générer un jet synthétique et se comportent alors comme des sources acoustiques. Ceci peut être expliqué par le faible battement de la membrane qui décroît avec la fréquence et ne comprime plus suffisamment la cavité pour expulser le fluide. L'expérience montre que ce maximum est indépendant de la tension appliquée au haut parleur. Il est obtenu à 70 Hz pour  $\alpha=90^\circ$ . Pour  $\alpha=45^\circ$  et  $\alpha=30^\circ$  ce maximum est à 50 Hz pour une excitation de 4  $V_{c-c}$  et à 60 Hz pour 10  $V_{c-c}$ .

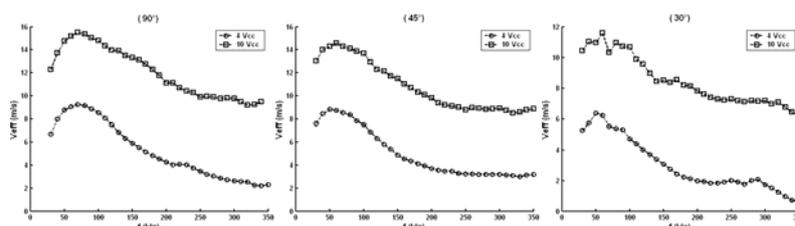


FIG. 4 – Variation de la vitesse en fonction de la fréquence pour différente tension d'alimentation.

#### 4.4 Etude adimensionnelle

Le tableau (1) indique les paramètres qui caractérisent les jets synthétiques générés par l'actionneur à 90°. En faisant varier l'amplitude, la fréquence et l'inclinaison les nombres de Reynolds se situent dans une gamme large (3.33 à 1380). A 2  $V_{c-c}$  et à 350 Hz le nombre Reynolds ne dépasse pas 50 et l'écoulement ne peut pas quitter le voisinage de l'orifice. Pour 10  $V_{c-c}$  le nombre de Reynolds est assez grand et le nombre de Strouhal est très petit  $St \ll 1$ . Les jets générés sont ainsi caractérisés par peu de pertes visqueuses et une grande directivité.

$\alpha$	A ( $V_{c-c}$ )	F (Hz)	$V_{max}$ (m/s)	$V_{eff}$ (m/s)	$L_0/e$	Re	Str	St
90°	2	60	8.76	6.19	46.49	584	0.006	4
		90	6.85	4.84	24.23	456.66	0.01	6
		150	3.16	2.23	6.70	210.66	0.04	10
		350	0.66	0.46	0.6	44	0.53	23.33
	10	60	20.70	14.63	109.87	1380	0.02	4
		90	20.33	14.37	71.93	1355	0.004	6
		150	18.19	12.86	38.62	1212	0.008	10
		350	12.30	8.69	11.19	820	0.02	23.33

Tableau (1) : regroupant les différents paramètres adimensionnels des jets synthétiques ( $\alpha=90^\circ$ )

## 5 Analyse de la dynamique de l'écoulement par PIV

### 5.1 Champs moyens

Le champ moyen de vitesse, pour les différentes configurations, montre un écoulement moyen en aval de la fente malgré l'injection purement alternative (FIG.5) ceci s'explique par la combinaison d'un soufflage unidirectionnel et d'une aspiration multidirectionnelle. Une grande particularité du jet synthétique réside dans ce très fort entraînement du fluide extérieur à la base du jet.

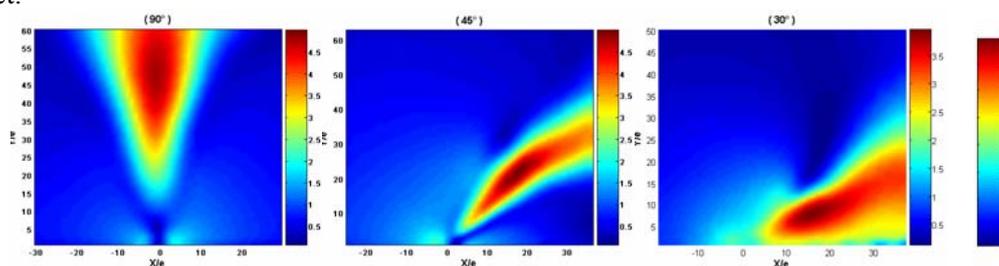


FIG. 5 – Champs moyens de vitesse pour  $f=100$  Hz et  $A=8 V_{c-c}$

### 5.2 Profils de vitesse des jets

Les profils des vitesses moyennes transversales sont représentés sur la FIG.6-a pour différentes positions  $Y/e$  ( $Y/e$  varie de 2.57 à 57.78 avec un pas de 1.8). Ces profils sont similaires à la sortie de la fente. Ceci est analogue au comportement d'un jet conventionnel. Ainsi le jet synthétique se comporte en moyenne comme un simple jet et explique son

appellation de ‘jet synthétique’. Près de la fente, on note l’existence d’une zone négative. Elle est due à l’existence des écoulements secondaires et aux effets d’entraînement du fluide environnant. A partir d’une certaine distance par rapport à la fente, on remarque la disparition complète de cette zone. Le fluide est déjà loin pour ne pas être affecté par le mouvement de rappel du fluide. La vitesse longitudinale et transversale FIG.6 (b) changent de direction durant un cycle à cause de l’aspiration. Le jet synthétique étudié ( $\alpha = 90^\circ$ ) est similaire à des jets turbulents 2D conventionnels en terme de distribution transversale des composantes moyennes de vitesse.

La distribution spectrale présente une pente approximative de  $-5/3$ . Les spectres de vitesse de la ligne centrale sont représentés sur la FIG.6 (c) (mesuré à  $Y/e = 2, 5, 10$  et  $12$ ) près du plan de sortie du jet. Le spectre est dominé par la fréquence de formation ( $f_e$ ) du jet et ses harmoniques. Les harmoniques de la fréquence de formation sont rapidement atténués avec la distance à l’orifice. L’atténuation rapide du spectre d’énergie indique une dissipation rapide à l’intérieur du jet et une réduction de l’énergie turbulente.

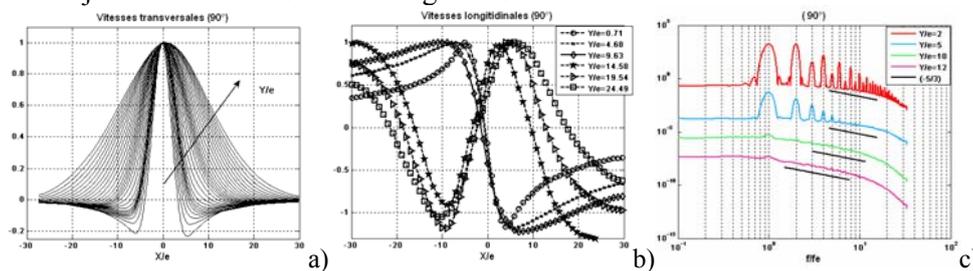


FIG. 6 – Profils des vitesses transversales, b) Profils des vitesses longitudinales pour  $f = 100$  Hz et  $A = 8 V_{c-c}$ , c) Spectre de puissance de la vitesse au centre pour différentes positions de  $Y/e$ .

### 6.3 Moyen de phase

Pour différentes phases du signal d’excitation, la visualisation du champ moyen de vitesse combiné aux cartes du critère  $\Gamma_2$  sont représentées sur la FIG.7 a1-d1 ( $\alpha = 90^\circ$ ), la FIG.7 a2-d2 ( $\alpha = 45^\circ$ ) et la FIG.7 a3-d3 ( $\alpha = 30^\circ$ ) pour une fréquence de 100 Hz et une excitation de  $8 V_{c-c}$ . Au début de la phase de soufflage (FIG.7-a1, FIG.7-a2, FIG.7-a3, le fluide est expulsé de la cavité selon l’axe du jet. Le soufflage et l’aspiration alternée favorisent la séparation des structures formées et leur advection lors de la phase suivante. Pour  $\alpha = 90^\circ$ , pendant la phase de soufflage, il se forme une couche de cisaillement entre les fluides sortant et environnant. Cette couche tourbillonnaire s’enroule pour former une paire de tourbillons contra-rotatifs de même taille (FIG.7-b1). Ces tourbillons se retrouvent à  $Y/e = 15$ , lorsque la phase d’aspiration commence (FIG.7-d1). Le début de la phase d’aspiration est clairement marqué par un point selle située en aval de la fente d’injection à  $Y/e = 3$  (FIG.7-c1). Sur la FIG.7-d1, on note la présence d’une ligne horizontale à  $Y/e = 5.5$ . Cette ligne délimite la zone inférieure où le fluide est aspiré par la fente et la zone supérieure où l’écoulement est gouverné par une paire de tourbillons contrarotatifs. Pour  $\alpha = 45^\circ$ , la FIG.7-b2 montre la formation d’une paire de tourbillons. Le début de la phase d’aspiration correspond à la FIG.7-c2. Cette phase montre la formation de deux tourbillons contra-rotatifs de tailles différentes. Celui qui tourne dans le sens de l’aiguille d’une montre a la taille la plus importante. Dans cette configuration, le fluide éjecté par la fente devient proche de la paroi. Ceci provoque l’étirement de ce tourbillon et l’augmentation de sa taille. Pour  $\alpha = 30^\circ$ , les visualisations mettent en évidence la formation d’un seul tourbillon qui tourne dans le sens trigonométrique. Le fluide devient très proche de la paroi et le frottement avec la paroi empêche la formation de l’autre tourbillon.

## 7 Conclusion et perspectives

Nous avons étudié l'effet de l'inclinaison de la fente, de l'amplitude et de la fréquence sur la formation et l'évolution des jets synthétiques en absence d'un écoulement extérieur. Les moyennes de phase indiquent la génération d'une paire de tourbillons au début de la phase de soufflage et leur advection lors de la phase suivante (dans le cas d'une inclinaison de 30° un seul tourbillon). Pour des excitations importantes et à basses fréquences, les actionneurs réalisés ont un bon fonctionnement. Ainsi les impératifs du débit pour le contrôle peuvent être respectés. La suite de l'étude consiste à implanter ce type d'actionneurs sur une plaque plane a fin de manipuler l'écoulement en agissant sur les structures cohérentes.

### Références

- Glezer. A, Amitay. M (2002). Synthetic jets. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **34**, 503–29.
- Smith BL, Glezer A. (1997). Vectoring and small-scale motions effected in free shear flows using synthetic jet actuators. *AIAA 35th Aerosp. Sci. Meet.* 97-0213
- Smith BL, Glezer A. (1999). Vectoring of a high aspect ratio rectangular air jet using a zero net-mass-flux control jet. *Bul, Am phys soc.* 39, 1894.
- McManus K, Magill J. (1997). Airfoil performance enhancement using pulsed jet separation control. *In: Proc 4th. AIAA Shear Flow Control Conferences, Snowmass Village, USA.*
- McCormick, D. C. (2000), Boundary Layer Separation Control with Directed Synthetic Jets. *AIAA Paper* . 2000-0519.
- Kevin E. Wu, Kenneth S. Breuer. Dynamics of Synthetic Jet Actuator Arrays for Flow Control. *Division of Engineering Brown University, Providence, RI 02912, USA.*
- Graftieaux L., Michard M., Grosjean N. (2001). Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows. *Meas. and Science Technology.* 1422-1429.

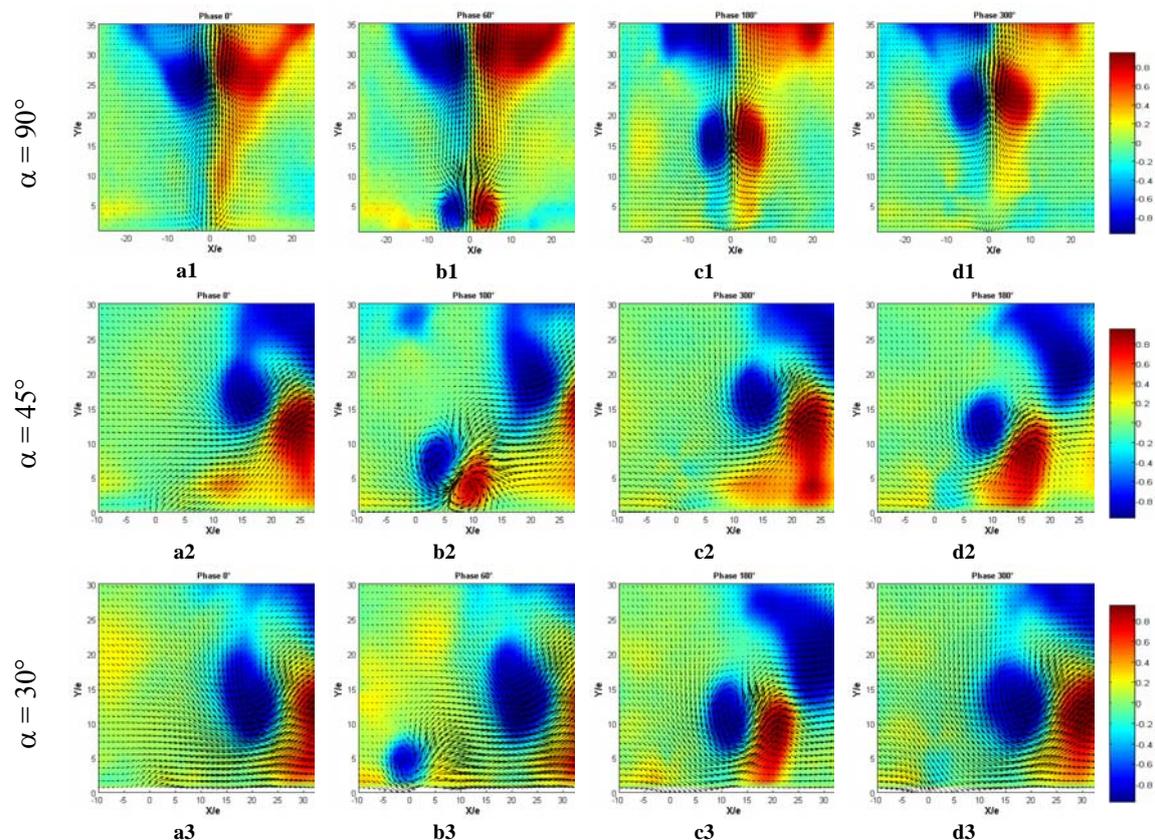


FIG. 7 – Moyennes de phases de l'évolution du jet synthétique pour différents  $\alpha$ .