

Contrôle par jet pulsé de l'écoulement dans un divergent court à grand angle

Maher BENCHIEKH^a, Jean-Christophe BERA^b, Marc MICHARD^b, Michel SUNYACH^b

^a Laboratoire d'études des systèmes thermiques et énergétiques, École nationale d'ingénieurs de Monastir, Monastir 5019, Tunisie

^b Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique, CNRS (UMR 5509 et GDR 1186), BP163, 69131 Ecully cedex, France
Courriel : Jean-Christophe.Bera@ec-lyon.fr

(Reçu le 13 avril 2000, accepté après révision le 13 juillet 2000)

Résumé.

La présente étude expérimentale porte sur le contrôle par jet pulsé pariétal de l'écoulement dans un divergent d'ouverture $2 \times 45^\circ$. Des mesures par vélocimétrie par images de particules ont été réalisées pour caractériser l'effet de ce contrôle. Le comportement de l'écoulement, qui sans contrôle est de type jet, se rapproche de celui d'un diffuseur sous l'effet des injections pulsées pariétales. Le mécanisme du contrôle procède à la fois de modes globaux créés sur le jet, et de structures tourbillonnaires oscillantes qui alimentent périodiquement les zones décollées, élargissant ainsi la surface débitante. © 2000 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

diffuseur / contrôle / jets synthétiques / VIP

Pulsed jet control of a short diffuser

Abstract.

This experimental study investigates the control of flow in a short diffuser with a $2 \times 45^\circ$ divergence angle, using wall synthetic jets. Measurements are made by particle image velocimetry. Velocity profiles, velocity fields, and vorticity maps show that the flow, initially separated as a free jet, undergoes a global excitation which creates periodic oscillating structures producing large fluid motions in the vicinity of the wall. This results in an increased mixing of the primary separated jet with the surrounding fluid. © 2000 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

diffuser / control / synthetic jets / PIV

Abridged English version

When the diffuser angles are less than $2 \times 15^\circ$, several methods of control can be used to recover a proper flow [1–3]. The present experimental investigation deals with a larger divergence angle diffuser in which the flow separates almost as a free jet at the diffuser throat. The ability of synthetic (zero-mass-net-flux) jets to increase flow discharge in this situation is investigated using Particle Image Velocimetry (PIV).

Experiments are conducted on a symmetric flat diffuser characterized by a $2 \times 45^\circ$ opening and an area ratio of 4 (*figure 1*). The incident flow is laminar with inlet velocity of 16 m/s. Two excitation slits are situated spanwise 11 mm upstream of the diverging walls. The pulsed injection of air is performed by an electro-dynamic loudspeaker. The velocity induced by these jets is purely sinusoidal (100 Hz) with 12 m/s amplitude.

Note présentée par Geneviève COMTE-BELLOT.

Figure 2 gives the mean velocity profiles in 4 cases:

- (i) In the absence of excitation, the flow appears approximately symmetrical about the position $y = -4$ mm. The slight 5° downwards asymmetry is related to one of the two stable locations of the jet axis, the jet being bistable.
- (ii) With lower-side pulsing, the jet points 10° downwards, and exhibits a 15% increase in width. The entrainment mechanism appears different on the two sides of the jet. Upwards, there is a change of the velocity profile slope in the mixing layer and an increase of the reverse flow. Downwards, the entrainment process consists merely in an exchange of flow between the inner and the outer part of the mixing layer, the slope of the velocity profile being unchanged. Consequently a significant region of low positive velocity can be seen for $-45 < y < -25$ mm.
- (iii) Under higher-side pulsing, the jet takes a quasi-symmetrical position showing a deflection of 4° compared to the uncontrolled case. Moreover, there is a 30% increase in the jet width. The entrainment process is now very large across the pulsed side of the jet.
- (iv) The double-sided pulsing re-centers the jet close to its natural uncontrolled position. The jet width is increased by 50%. The combined action of the two pulsed injections is not just a superposition of higher- and lower-side excitations, but involves a global response.

Detailed mean velocity PIV fields are given on figure 3. Flow entrainment clearly takes place in localized regions, e.g., $x = 25$ mm, $y = 10$ mm for lower-side excitation; $x = 10$ mm, $y = 18$ mm; $x = 50$ mm, $y = 18$ mm, and also $x = 25$ mm, $y = -10$ mm, for upper-side excitation. This pattern persists for the two-sided pulsing and suggests a modal structure for the flow.

Figure 4 delineates the high-vorticity zones associated with the shear layers. When the excitation is applied, these zones shorten in the axial direction, allowing the generation of new large vortex structures. These features are visible for both lower- or upper-side excitation. When the pulsing is applied on both sides, the separate effects are maintained and even strengthened. In order to investigate the time process, figure 5 represents conditional-phase-averaged vorticity fields. The data is for the lower-side of the diffuser during a full control period applied onto this side. The oscillation of a high-vorticity zone away and towards the wall is clearly visible.

In conclusion, synthetic parietal jets acting upstream from a diffuser throat can manipulate the separated central jet so as to significantly increase its mixing with the surrounding fluid. The effective flow discharge area can be improved by 50%. Both the suction and blowing phases of the synthetic jet have a role in the control process which combines different actions: flow vectoring, global jet excitation, and generation of strong vortex structures oscillating inwards or outwards from the wall.

1. Introduction

Lorsque les angles des diffuseurs sont petits, inférieurs à $2 \times 15^\circ$, plusieurs méthodes de contrôle sont possibles pour réduire les décollements. On relève principalement la génération de tourbillons longitudinaux, réalisée par des systèmes passifs, par des micro-jets modulés [1] ou par un jet synthétique — i.e. jet pulsé à débit moyen nul [2]. Par ailleurs, certaines composantes instables peuvent être supprimées par un système comprenant une boucle de contrôle [3].

La présente recherche a pour but d'étudier la possibilité de modifier par contrôle le comportement d'un divergent court à fort angle, $2 \times 45^\circ$. Pour le contrôle, on a utilisé la technique des jets synthétiques. Notre étude, basée sur des mesures par vélocimétrie par images de particules (VIP), porte plus précisément sur les mécanismes physiques qui interviennent dans le contrôle du divergent.

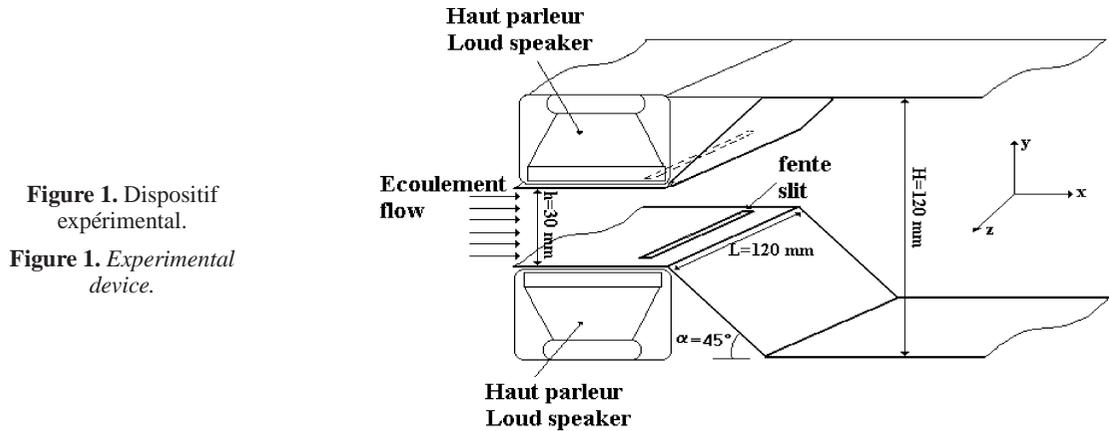


Figure 1. Dispositif expérimental.

Figure 1. Experimental device.

2. Dispositif expérimental

L'étude est menée sur un divergent plat et symétrique, d'angle d'ouverture $2 \times 45^\circ$ et de rapport d'ouverture $S_1/S_2 = H/h = 4$ (figure 1). À l'entrée du divergent, l'écoulement et les couches limites de paroi sont laminaires, et la vitesse est de $U_0 = 16$ m/s. Dans le diffuseur, l'écoulement est bistable : selon les réalisations, il se rapproche de l'une ou l'autre des deux parois latérales. Les résultats expérimentaux obtenus pour les deux états étant symétriques, on a choisi arbitrairement de retenir ici le cas de l'écoulement se rapprochant de la paroi inférieure.

Une fente d'injection de 95 mm d'envergure et de largeur $e = 2$ mm est usinée dans chacune des parois supérieure et inférieure de la veine, à 11 mm en amont de l'entrée du diffuseur. La fente est reliée par un convergent à une cavité sous-jacente étanche dont la compression est réalisée par un haut-parleur électrodynamique. Le jet de sortie à débit moyen nul est sinusoïdal (amplitude 12 m/s, fréquence 100 Hz). Selon les essais, le contrôle est exercé côté paroi inférieure, côté paroi supérieure ou simultanément des deux côtés.

Les champs instantanés de vitesse sont mesurés dans le plan de symétrie vertical du diffuseur par vélocimétrie par image de particules (VIP). Les champs moyens sont obtenus à partir de 200 champs instantanés. Les profils de vitesse à la sortie du diffuseur et les champs de vorticité bidimensionnelle sont obtenus après traitement des mesures VIP [4]. Pour les mesures synchronis es avec le contrôle, un zoom est appliqué et des moyennes de phase sont effectu es sur 200 acquisitions.

3. Profils de vitesse moyenne

En l'absence de contrôle, la figure 2 montre les profils de vitesse moyenne en sortie de diffuseur ($x = 47$ mm). Le profil appar it approximativement symétrique par rapport à l'axe $y = -4$ mm : le jet de sortie est donc dirigé vers le bas selon un angle d'environ 5° . En principe, l'écoulement dans un tel diffuseur est de type jet symétrique [5]. Toutefois, le diffuseur ne débouche pas ici sur un plenum, mais sur un conduit de section constante. Les zones de recirculation sont alors instables : l'écoulement établi est ici dirigé vers le bas et il est possible de le faire basculer vers le haut par une perturbation momentan e, induite par exemple par un volet placé en aval dans la zone de recollement du jet avec les parois. Cette dissymétrie est accompagn e d'une large zone de faible recirculation sur la bordure haute du jet ($15 < y < 45$ mm), et d'une vitesse minor e dans le cône à potentiel côté haut. Cette décroissance est associ e au flux d'entraînement du jet. Côté bas, l'effet de dissymétrie s'accompagne d'un entraînement plus faible, et donc d'une zone de vitesse négative très réduite.

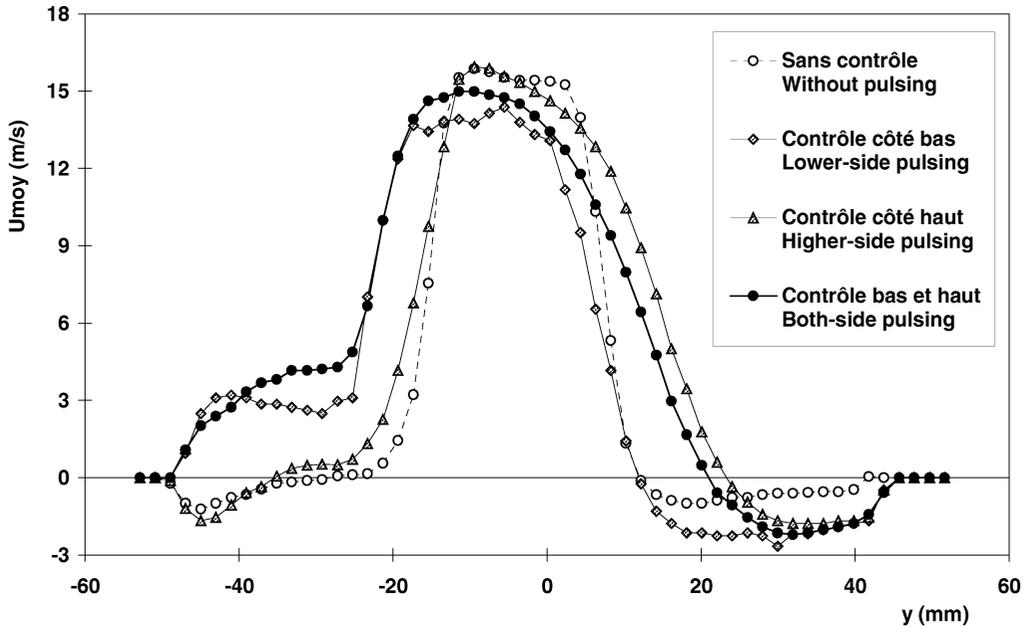


Figure 2. Profils moyens de vitesse débitante à la sortie du diffuseur.

Figure 2. Mean velocity profiles at the diffuser outlet.

Sous l'effet du contrôle côté bas, on observe une vectorisation globale du jet de 10° vers le bas. La largeur du jet progresse de 30%. Un effet d'entraînement est simultanément créé de part et d'autre du jet, mais les mécanismes y apparaissent différents :

- vers le bas, on observe une décroissance significative de la vitesse dans le cône à potentiel. Une large bosse de faible vitesse débitante positive apparaît de plus à la frontière inférieure du jet (pour $-45 < y < -25$ mm). Cet apport permet le développement du jet avant son recollement à la paroi. Le contrôle amplifie donc les échanges de fluide de part et d'autre de la zone de mélange considérée, sans que la pente du profil de vitesse ne subisse de variation significative ;
- vers le haut, l'entraînement paraît tout aussi important, avec une décroissance de la vitesse moyenne dans le cône à potentiel et un adoucissement de la pente du profil dans la zone de mélange. Cet entraînement se traduit par une augmentation du flux de recirculation, visible pour $10 < y < 45$ mm.

Le contrôle côté haut présente lui aussi des effets bien marqués. Le jet prend une position quasi centrale, enregistrant une déflexion de 4° par rapport au cas non contrôlé, tandis que la largeur du jet progresse de 35%. En première analyse, la tendance générale vers la symétrisation suggère la contribution de mécanismes assez voisins pour le développement des deux zones de mélange basse et haute :

- du côté contrôlé (haut), on observe une inflexion notable du profil de vitesse, associée à l'élargissement de la zone de mélange et à une diminution de vitesse dans le cône à potentiel. La réduction concomitante de la zone de recirculation externe se produit sans changement notable de débit par rapport au cas sans contrôle ;
- du côté bas, l'inflexion du profil est plus faible, mais il se crée une mise en vitesse du fluide à la frontière externe du jet, ce qui montre bien que le contrôle côté haut agit aussi sur la zone de mélange inférieure.

Lorsque les deux actionneurs haut et bas agissent en phase, les effets antagonistes de vectorisation se compensent, l'axe du jet se rapprochant de la position non contrôlée. Les mécanismes d'entraînement sont cependant accrus. L'inflexion du profil de vitesse dans la zone supérieure de mélange est plus marquée que

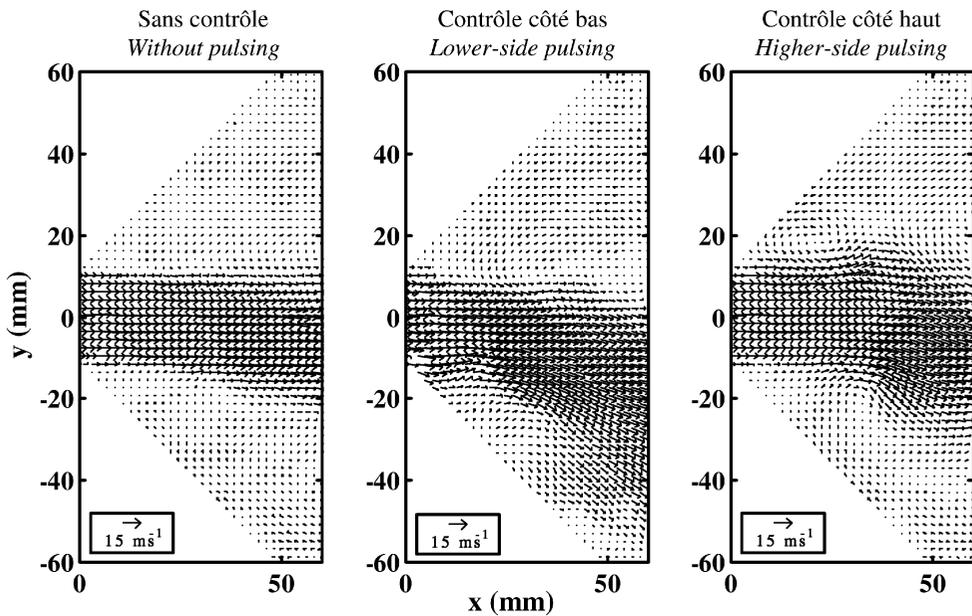


Figure 3. Champs moyens de vitesse.

Figure 3. Mean velocity fields.

dans le cas du seul contrôle haut, et la frontière inférieure du jet reste la même que dans le cas du seul contrôle bas. L'augmentation de section débitante atteint 50%. Cette additivité des deux contrôles en ce qui concerne le mélange suggère une excitation globale du jet. Pour ce qui est des écoulements latéraux, ils suivent les conditions imposées par la géométrie aux limites.

4. Champs de vitesse moyenne : excitation modale du jet

Afin de visualiser les zones d'entraînement privilégié, on examine les champs de vitesse moyenne (figure 3). On vérifie tout d'abord que le jet sans contrôle présente une expansion régulière. La recirculation du fluide nécessaire à l'alimentation du jet est peu intense et ne présente pas de structures figées dans l'espace.

Pour le jet contrôlé côté bas, on observe au contraire plusieurs zones d'entraînement, corrélées à une ondulation des lignes de courant à l'intérieur du jet. La zone la plus visible se situe vers $x = 25$ mm, $y = 10$ mm pour la zone de mélange supérieure. Dans la partie inférieure, l'écoulement est plus complexe : il y a une accélération du flux provenant de la buse, et plus en aval, l'entraînement doit impliquer des bouffées tridimensionnelles, qui sont associées, comme on le verra plus loin, à des oscillations de l'écoulement.

Pour le contrôle côté haut, l'aspect modal du contrôle s'affirme encore plus nettement. Un rapprochement des structures d'écoulement en direction de la buse est très visible côté haut, avec maintenant deux zones d'entraînement, centrées en $x = 10$ mm, $y = 18$ mm et $x = 50$ mm, $y = 18$ mm. Pour la partie basse, une zone d'entraînement apparaît autour de $x = 25$ mm, $y = -10$ mm. Abstraction faite du décalage axial entre les structures des deux couches de mélange, le champ global reste proche de celui d'un jet excité [6].

5. Champs de vorticité et mécanismes du contrôle

En l'absence de contrôle, on observe nettement les zones de forte vorticité moyenne en bordure de jet (figure 4a). Avec contrôle, ces zones se contractent en direction de la buse et se dissocient en donnant naissance à des structures plus larges qui diffusent ensuite vers l'aval. Pour le contrôle côté bas, la figure 4b

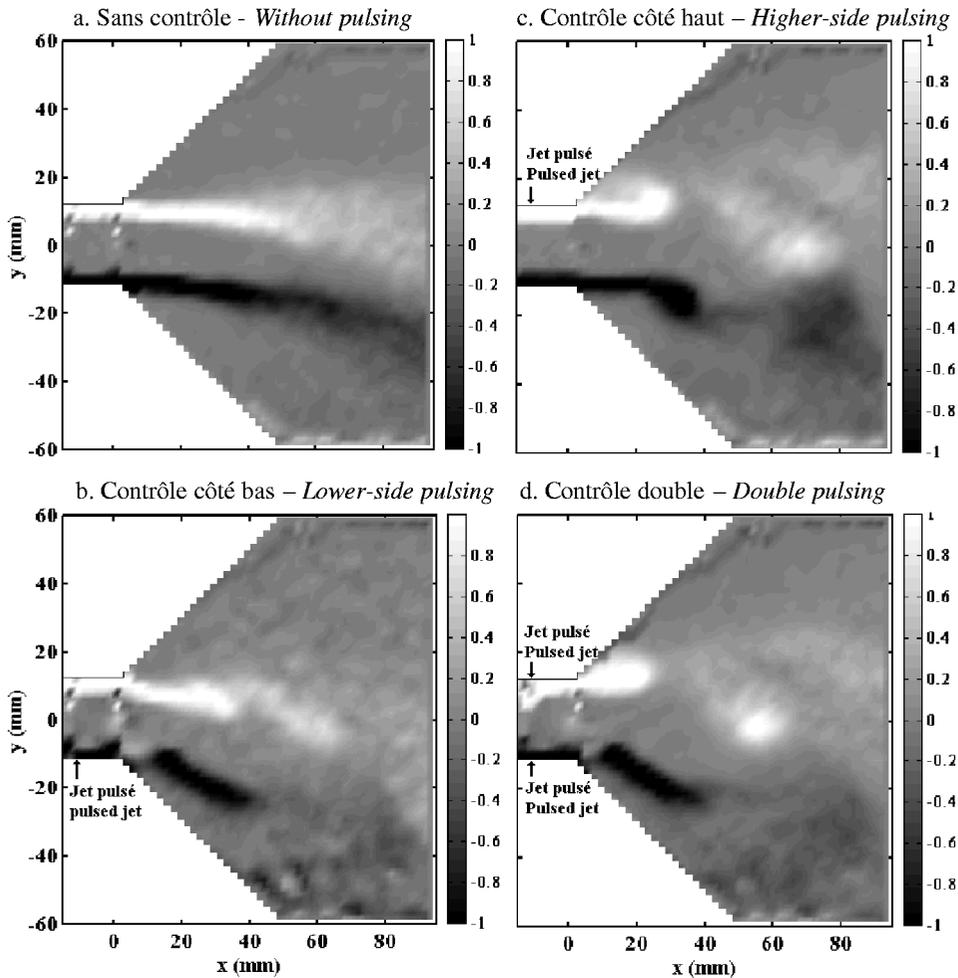


Figure 4. Champ moyen de vorticité dans le divergent avec et sans contrôle (10^3 s^{-1}).

Figure 4. Mean vorticity field in the divergent with and without pulsing (10^3 s^{-1}).

montre la vectorisation du jet vers la paroi inférieure. Le contrôle côté haut ramène le jet vers l'axe (figure 4c). Dans les deux cas, l'effet modal se retrouve avec netteté. Les zones de vorticité concentrées peuvent être associées aux entraînements et éjections intenses qui élargissent le jet. Enfin, le contrôle simultané côtés haut et bas (figure 4d) apparaît comme la superposition des deux contrôles avec des effets globaux notablement augmentés.

Les moyennes de phase au cours du cycle de pulsation permettent de préciser l'interaction du contrôle bas avec la paroi inférieure. La figure 5 montre que la structure attendue dans le prolongement de la buse se développe maintenant en oscillant en direction de la paroi. L'écart maximal avec la paroi se produit vers 80° en pleine phase d'aspiration ($0-180^\circ$). La phase de soufflage correspond ensuite au rapprochement vers la paroi puis à la formation et au détachement d'une structure à forte vorticité qui contribue à l'expansion de l'écoulement au cours de sa convection vers l'aval. La fréquence de détachement de cette structure est donc celle de l'excitation, qui est dans notre cas la fréquence de réponse optimale du système.

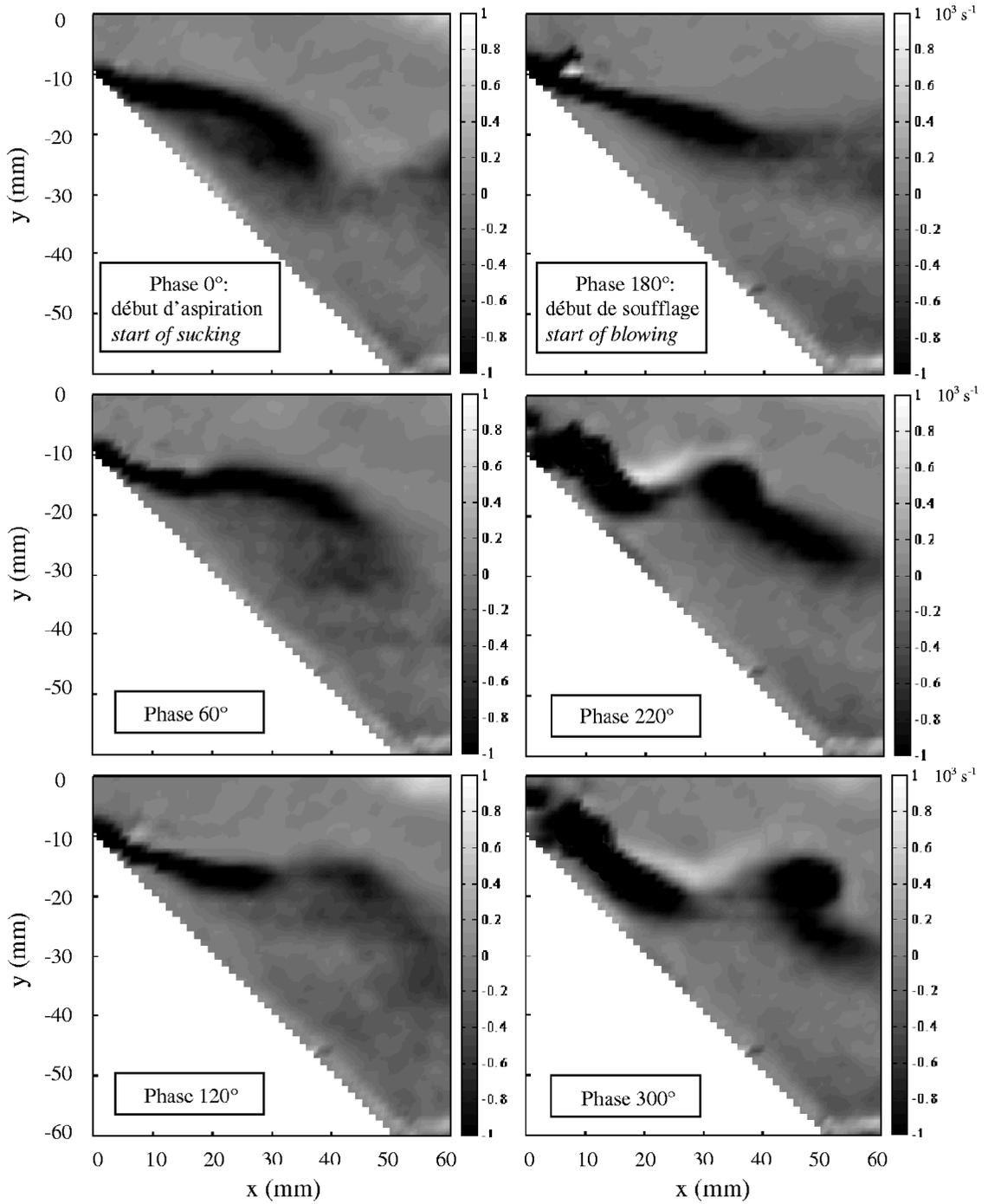


Figure 5. Champs de vorticité moyenne synchronisée, avec contrôle côte bas.

Figure 5. Synchronised mean vorticity fields with lower-side pulsing.

6. Conclusion

Le contrôle d'un divergent brusque au moyen de jets synthétiques pariétaux a permis une augmentation de 50% de la section débitante. La structure de l'écoulement contrôlé s'avère dominée par des modes, qui exercent une action globale et génèrent des zones d'entraînement privilégiées près de la buse. À ce mécanisme s'ajoute un effet de vectorisation qui élargit encore la zone de mélange du côté bas, vers lequel le jet non manipulé avait une inclinaison naturelle de 5° . Ces deux mécanismes sont mis en évidence par l'étude des effets du contrôle exercé unilatéralement sur chaque côté du jet. Le contrôle bilatéral résulte de la superposition des deux mécanismes : il est presque neutre en terme de vectorisation, alors que la largeur globale du jet s'accroît sous l'effet du mécanisme modal.

Références bibliographiques

- [1] McManus K.R., Legner H.H., Davis S.J., Pulsed vortex generator jets for active control of flow separation, AIAA Paper 94-2218, 1994.
- [2] Béra J.C., Sunyach M., Laadhari F., Visualisation de l'effet de jets synthétiques pour le contrôle de décollements, in : 7^{ème} Colloque National de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides, Saint-Louis, France, 1997.
- [3] Kwong A.H.M., Dowling A.P., Active boundary-layer control in diffusers, AIAA J. 32 (1994) 2409–2414.
- [4] Béra J.C., Michard M., Sunyach M., Comte-Bellot G., Changing lift and drag by jet oscillation : experiments on a circular cylinder with turbulent separation, Eur. J. Mech. B Fluids 19 (2000) 575–595.
- [5] Reneau L.R., Johnston J.P., Kline S.J., Performance and design of straight, two-dimensional diffusers, Trans. ASME, J. Basic Engng 89 (1967) 141–150.
- [6] Ho C.M., Huerre P., Perturbed free shear layers, Ann. Rev. Fluid Mechanics 16 (1984) 365–424.