



## Stimulation de l'élargissement d'un jet plan par contrôle fluide alternatif

Maher Ben Chiekh<sup>a</sup>, Jean-Christophe Béra<sup>b,\*</sup>, Marc Michard<sup>b</sup>, Michel Sunyach<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire d'étude des systèmes thermiques et énergétiques, École nationale d'ingénieurs de Monastir, Monastir 5019, Tunisie

<sup>b</sup> Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique, École centrale de Lyon, 69134 Ecully cedex, France

Reçu le 4 avril 2003 ; accepté le 25 avril 2003

Présenté par Geneviève Comte-Bellot

---

### Résumé

La présente étude expérimentale concerne le contrôle d'un jet plan par des injections fluidiques sinusoïdales à partir de deux actionneurs placés de part et d'autre du jet. La mesure des vitesses a été réalisée par vélocimétrie par images de particules (PIV). Nous avons pu montrer qu'un fonctionnement alternatif des deux actionneurs, avec un timing bien choisi entre les périodes d'activité, augmentait l'efficacité des jets synthétiques pour la réalisation du mélange. Par rapport à une action permanente des deux côtés du jet, l'élargissement a pu être accru d'un facteur deux. Les cartes des énergies de fluctuation mettent en évidence une importante augmentation de la zone spatiale occupée par le mélange. *Pour citer cet article : M. Ben Chiekh et al., C. R. Mecanique 331 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Alternate fluid control for stimulating plane-jet expansion.** The present experimental study reports on the efficiency of an alternate use of two actuators placed on either side of a plane jet, to increase lateral jet expansion and to enhance mixing. The investigation is carried out using particle image velocimetry (PIV). Compared to a continuous sinusoidal excitation on both sides of the plane jet, the jet widens considerably when the actuators are switched on alternately with a well chosen timing. An increase of the widening by a factor of two is achieved. The iso-intensity contours of the fluctuating velocity indicate that the high-fluctuation zone greatly spreads out. *To cite this article: M. Ben Chiekh et al., C. R. Mecanique 331 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* Mécanique des fluides ; Jet plan ; Contrôle ; Jets synthétiques ; PIV ; Mélange

*Keywords:* Fluid mechanics; Plane jet; Control; Synthetic jets; PIV; Mixing

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [Jean-Christophe.Bera@ec-lyon.fr](mailto:Jean-Christophe.Bera@ec-lyon.fr) (J.-C. Béra).

### Abridged English version

Recent experimental studies have shown the ability of synthetic jet actuators to control round or plane jets [3–8]. These actuators usually generate large-scale structures, which deviate the incoming flow, thus increasing mixing and mean jet expansion [8]. The present study investigates an alternate mode of the actuation, in order to increase further the mean jet widening.

Experiments were conducted on a rectangular jet, issued from a rectangular injector (12 cm wide, 3 cm high) with a short divergent termination ( $2 \times 45^\circ$  opening, area ratio of 4). The incoming flow was turbulent, with a mean outlet velocity of 18 m/s. A synthetic jet was implemented on each long side of the jet injector, ensuring an approximately 2D configuration for both jet and control. Each actuator generated a streamwise sinusoidal injection (100 Hz, 32 m/s), through a 0.8 mm thin slit. Particle image velocimetry measurements provided mean-velocity maps on the vertical central plane of the jet (cf. Fig. 1). Mean-velocity-fields were obtained by averaging of 200 instantaneous maps. Different control configurations were compared: without pulsing, only one actuator on, both actuators continuously on, and the two actuators alternately on (one working while the other was off). For this last configuration named ‘alternate control’, the number  $np$  of pulsing periods between consecutive switches was the studied parameter.

The mean-velocity profiles for continuous control configurations showed a significant widening of the jet by the control (Fig. 2). The greatest widening is obtained for the dual-side control, with a lateral expansion twice as important as the natural one. In the case of the single-side control, the jet deviates towards the control side with an angle of approximately  $20^\circ$ . Because the two actuators pull the fluid in opposite directions, the dual-side controlled flow is symmetrical, and the jet-side fluid does not deviate as much as in the previous case.

The mean-velocity profiles obtained for the alternate control differ from each other as a function of the alternation time period (Fig. 3). For  $np = 2$ , the profile is similar to that obtained under continuous dual-side pulsing, but with an increased mean jet widening: the jet width estimated at half the maximum velocity at  $x = 4h$  is  $3.3h$ , against  $2.7h$ . For  $np = 5$ , the profile looks approximately flat on the extended range of  $-h < y < h$ , and the jet width is further increased, up to more than  $4h$  at  $x = 4h$ . For greater values of  $np$ , the profiles are characterised by two symmetrical lobes of maximum velocity. The larger separation between the two lobes is obtained at  $np = 20$  and beyond, marking the alternation of the flow deviations between the two single-side control angles of  $+20^\circ$  and  $-20^\circ$ .

This phenomenon is illustrated by the mean velocity maps of Fig. 4. For  $np = 2$ , the fluid does not approach the divergent walls, because the jet does not have enough time to reach the stable positions given by single-side control. For  $np = 20$ , the mean flow separates into two fluxes, and the resulting field corresponds to the superposition of the two fields obtained respectively under higher-side control and lower-side control. Finally, for a critical value of  $np$  (close to 5 in the present experiment), the jet continually flaps between its two extreme positions, providing the widest expansion of the mean velocity profile, which is approximately twice as great as that obtained by continuous pulsing.

Fig. 5 shows that the velocity fluctuations are increased by the control, and especially by the critical alternate control ( $np = 5$ ) which periodically moves the flow back and forth between its two stable states. This constitutes an indication of the mixing enhancement.

## 1. Introduction

Le contrôle des écoulements, aussi bien internes qu’externes, a fait l’objet de plusieurs études récentes d’ordre expérimental ou numérique : des revues de ces principaux travaux sont fournies par Gad-el-Hak et Bushnell [1] pour différents types d’écoulement, et par Reynolds et al. [2] pour les jets. Parmi les techniques de contrôle utilisées, on cite le contrôle par jet synthétique, c’est-à-dire par une injection pulsée pariétale à débit moyen nul [3]. L’efficacité de ces actionneurs réside dans leur capacité à aspirer les couches limites amont et à générer des structures tourbillonnaires périodiques, ce qui modifie fortement les conditions aux limites régissant l’écoulement principal [4].

Les travaux expérimentaux de Parekh et al. [5], Pack et Seifert [6] et Smith et Glezer [7] montrent l'utilisation des jets synthétiques pour modifier des écoulements de jets rectangulaires ou axisymétriques. Dans une étude récente [8], Béra et al. ont analysé les mécanismes d'action de ces actionneurs dans la configuration quasi-bidimensionnelle d'un jet rectangulaire débouchant sur un divergent court et contrôlé par deux injections pariétales tangentielles s'exerçant de part et d'autre du plan du jet. Il apparaît que le contrôle aspire le fluide vers la paroi divergente du côté contrôlé, ce qui a pour effet de dévier l'écoulement. Cependant, dans le cas d'une injection bilatérale, les effets des deux actionneurs sont antagonistes, puisqu'ils aspirent le fluide en sens opposés l'un de l'autre : le jet est bien élargi, mais l'écoulement se rapproche moins des parois divergentes qu'il ne se rapproche de la paroi contrôlée lors d'un contrôle unilatéral. La présente note décrit une variante originale de ce contrôle bilatéral, ayant pour but de permettre une meilleure « sommation » des effets des deux actionneurs, afin d'améliorer encore le mélange et l'élargissement moyen du jet.

## 2. Dispositif expérimental

Le jet étudié est issu d'un canal de section rectangulaire, de largeur 12 cm et de hauteur  $h = 3$  cm, terminé par un divergent plat et symétrique d'angle d'ouverture  $2 \times 45^\circ$  et de rapport de section de 4, qui débouche en espace libre. Le divergent a pour but d'amplifier l'effet du contrôle [9]. En entrée de divergent, on a un écoulement turbulent établi de conduite à vitesse moyenne de  $U_0 = 18$  m/s, ce qui correspond à un nombre de Reynolds basé sur la hauteur  $h$  de  $3,6 \times 10^4$ . Le contrôle est réalisé par deux actionneurs de type jet synthétique, conçus sur des haut-parleurs électrodynamiques selon la technologie décrite par Béra et al. [3]. Un jet synthétique est implanté sur chacune des deux parois divergentes : l'injection alternative s'effectue dans la direction tangente à l'écoulement incident, par une fente de 95 mm d'envergure et de 0,8 mm de largeur, située juste au début de la paroi divergente (cf. Fig. 1). Le haut-parleur est alimenté par un signal sinusoïdal de fréquence  $f = 100$  Hz. En fonctionnement, la fente délivre un débit d'air sinusoïdal d'amplitude 32 m/s. Ces conditions expérimentales correspondent à un nombre de Strouhal d'excitation de  $St = 0,17$  et un débit de soufflage par rapport au débit du jet primaire de 4,2% par actionneur. Ces valeurs ont été choisies voisines des valeurs optimales de  $St = 0,2$  et 3,5% fournies par les études numériques de Freud et Moin [10].

Les mesures sont effectuées dans le plan vertical de symétrie du jet, par vélocimétrie par images de particules (cf. Fig. 1). Cette technique permet d'accéder aux champs bidimensionnels de vitesse instantanée, sur un domaine de mesure de  $140 \times 120$  mm, avec une résolution spatiale de 1,9 mm [11]. Les champs de vitesse moyenne présentés dans la suite sont obtenus en moyennant 200 réalisations.

Un système auxiliaire de pilotage automatique des deux actionneurs permet différentes configurations de contrôle, en particulier la configuration originale d'un « contrôle alterné » en actionnant alternativement le jet synthétique du haut et celui du bas à une cadence de basculement réglable. Quatre configurations de contrôle ont été étudiées : sans contrôle, contrôle unilatéral permanent (haut ou bas), contrôle bilatéral (permanent) et contrôle alterné. Dans ce dernier cas, nous nous sommes intéressés à l'influence de la cadence de basculement, en considérant des durées du contrôle alterné de chaque actionneur d'un nombre  $np = 2, 5, 10$  ou 20 périodes de pulsation du jet synthétique.

## 3. Contrôle permanent unilatéral et bilatéral

La Fig. 2 présente des profils de vitesse moyenne du jet pour les différentes configurations de contrôle. On note une légère dissymétrie entre les contrôles haut et bas, qui s'explique par les imperfections d'usinage du dispositif, et qui se manifesterait encore dans ce qui suit dans le cas du contrôle alterné. Comme principal résultat, on observe que le contrôle produit un fort élargissement du jet (assorti dans les cas de contrôle unilatéral d'une déviation de l'écoulement vers le côté contrôlé). A cet égard, on constate que le contrôle bilatéral n'assure pas la superposition

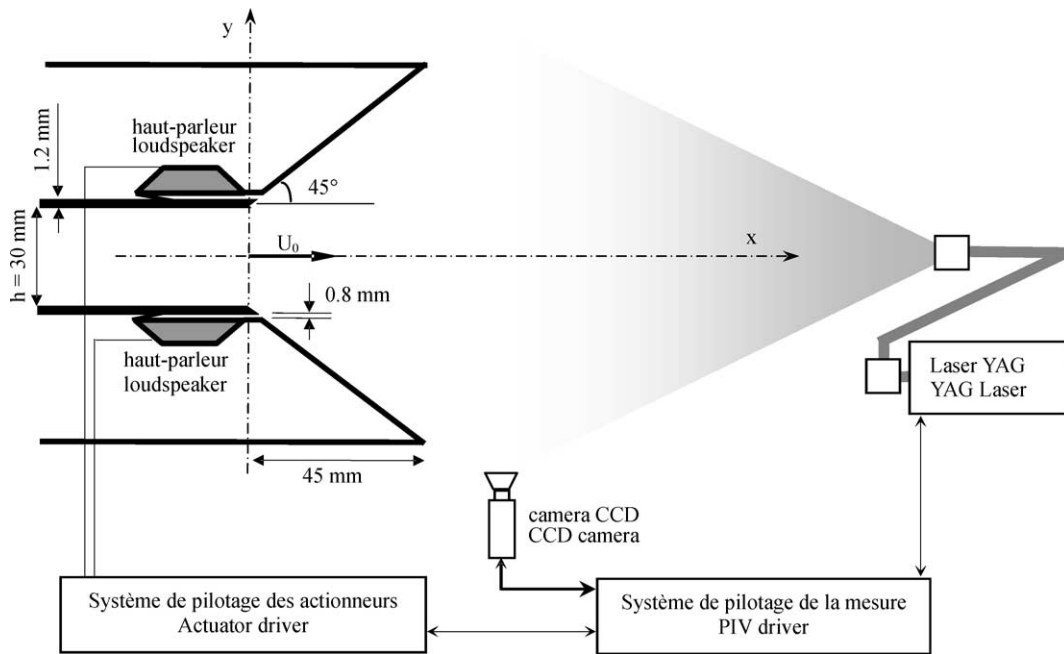


Fig. 1. Dispositif expérimental : schéma dans le plan de mesure.

Fig. 1. Experimental device: schematic view of the measurement plane.

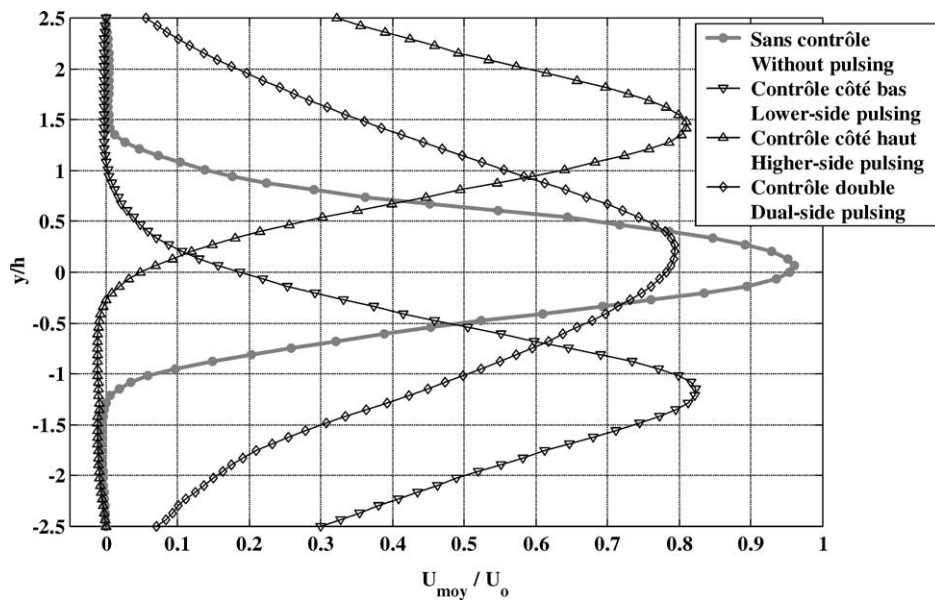


Fig. 2. Profils de vitesse moyenne longitudinal à  $x/h = 4$  pour les contrôles unilatéraux et le contrôle bilatéral permanent.

Fig. 2. Mean longitudinal velocity profiles at  $x/h = 4$  for the different configurations of continuous pulsing.

des deux contrôles unilatéraux. En effet, la Fig. 2 montre que le jet plan naturel voit sa largeur à mi-hauteur augmenter de 60% en moyenne sous l'action de l'un des contrôles unilatéraux. Cet effet d'augmentation de la section débitante est accompagné d'une réduction de près de 20% de la vitesse maximale de l'écoulement et d'un effet global de vectorisation, qui donne une déviation moyenne du jet principal d'un angle d'environ  $20^\circ$  vers la paroi du diffuseur du côté contrôlé. Sous l'action du contrôle bilatéral, l'écoulement reste symétrique ; sa section débitante est doublée par rapport à la situation non contrôlée, mais cet élargissement de section ne vaut que 90% des élargissements résultant des contrôles unilatéraux.

Lors du contrôle unilatéral, les gradients de vitesse moyenne dans la zone de cisaillement du côté non contrôlé sont réduits de  $1/3$  par rapport au cas sans contrôle. Cela s'explique par les structures périodiques d'entraînement qui prennent naissance du côté non contrôlé. Nous estimons alors à 25% l'apport de cet entraînement supplémentaire dans l'élargissement du jet. La neutralisation de cet effet dans le cas du contrôle bilatéral permet d'expliquer la non additivité des deux contrôles unilatéraux.

#### 4. Contrôle alterné

Pour optimiser l'apport du contrôle par jets synthétiques en assurant l'additivité des contrôles haut et bas, nous avons pensé à utiliser l'alternance des jets synthétiques unilatéraux : l'idée est d'appliquer le contrôle alternativement en haut et en bas. Le paramètre qui va gouverner ce contrôle alterné sera le nombre  $np$  de périodes d'excitation à réaliser avant basculement.

La Fig. 3 présente les profils de vitesse moyenne, pour les différentes valeurs de  $np$ , à la distance  $x/h = 4$ . Pour  $np = 2$ , la forme du profil est proche de celle obtenue dans le cas du contrôle double simultané. La largeur du jet à mi-hauteur apparaît cependant beaucoup plus importante ( $3,3h$  contre  $2,7h$ ) : en effet, la déviation alternée de l'écoulement se traduit en moyenne par un élargissement du jet. Pour  $np = 5$ , on obtient un profil approximativement plat sur toute une section de hauteur  $2,5h$ . La largeur du jet est encore considérablement

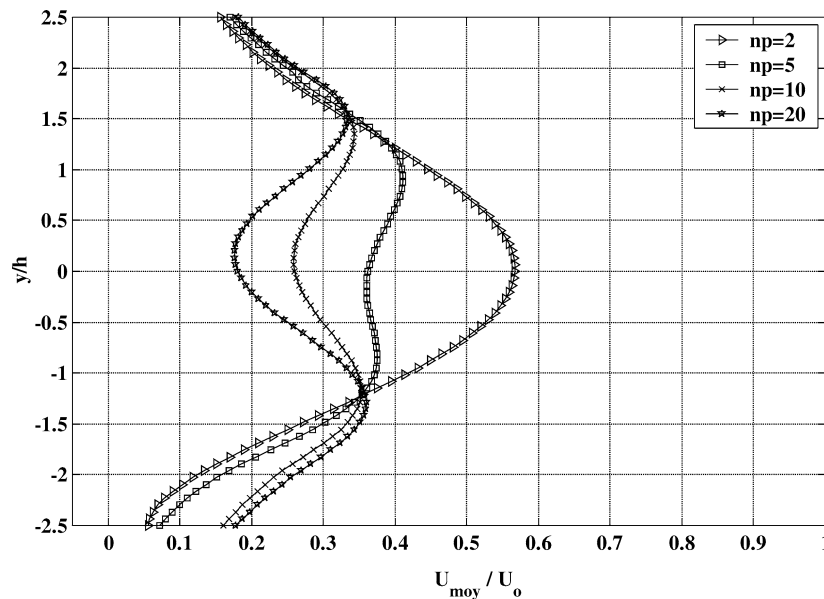


Fig. 3. Profils de vitesse moyenne longitudinale à  $x/h = 4$  dans le cas du contrôle alterné : influence de la cadence de basculement.

Fig. 3. Mean longitudinal velocity profiles at  $x/h = 4$  for the alternate control configuration: influence of the switching parameter  $np$ .

accrue : on l'évalue à plus de  $4h$ . Pour  $np$  supérieur ou égal à 5, le profil présente deux lobes symétriques, qui montrent la formation de deux jets. L'augmentation de  $np$  fait augmenter le degré de vectorisation (basé sur la valeur maximale de la vitesse débitante) et le découplage des deux jets. La vectorisation de chacun des deux jets atteint la valeur obtenue par l'application d'un contrôle unilatéral, et ce à partir de la valeur  $np = 20$ .

Cette analyse montre que si le nombre de périodes est inférieur à une certaine valeur critique, le jet entraîné côté contrôlé ne trouve pas le temps d'aller jusqu'à sa position extrême. Pour un nombre critique de périodes ( $np$  voisin de 5 dans la présente expérience), le jet oscille continuellement entre les deux positions extrêmes correspondant au

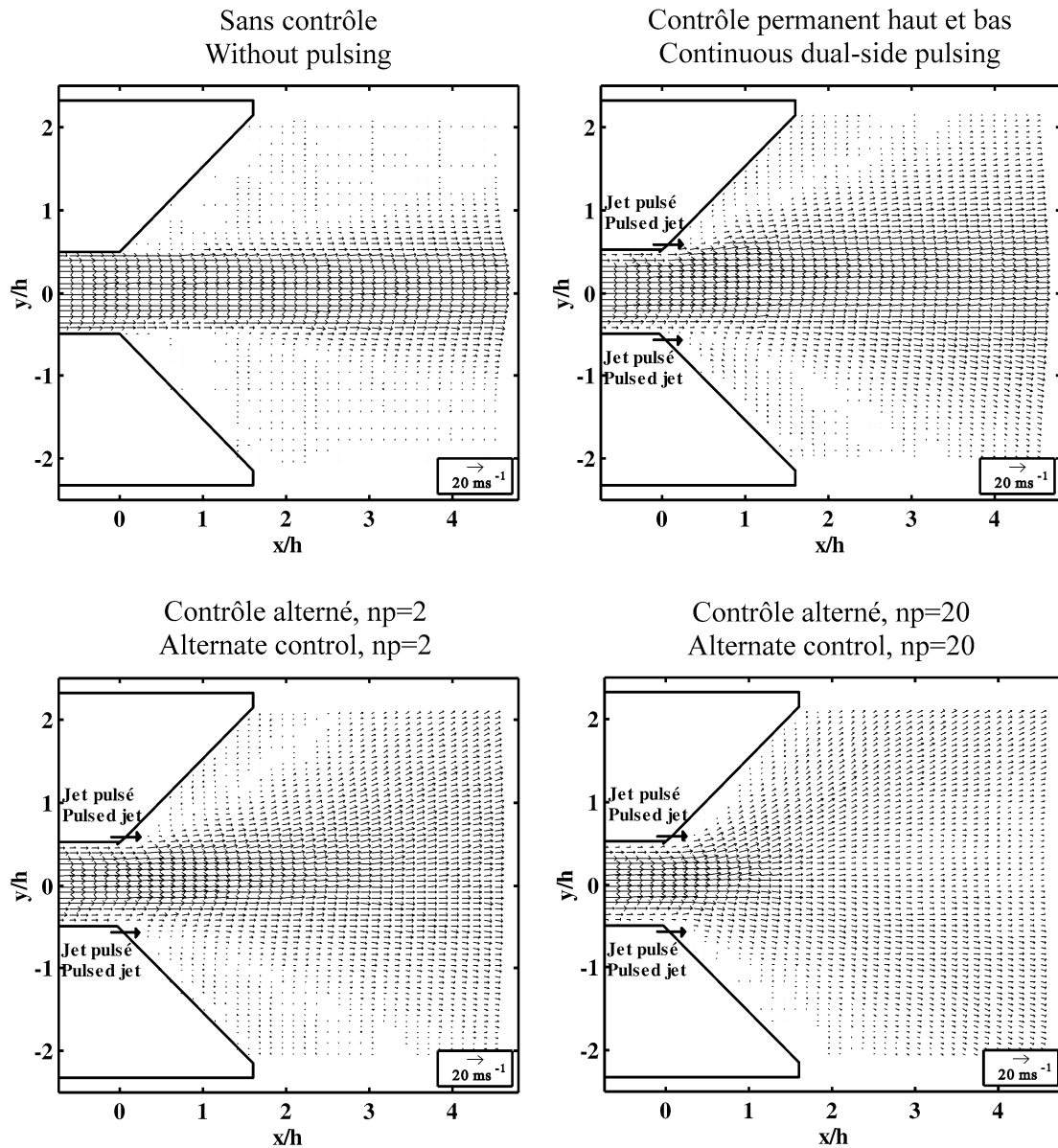


Fig. 4. Champs de vitesse moyenne pour différentes configurations de contrôle.

Fig. 4. Mean velocity fields for several control configurations.

contrôles unilatéraux. Au delà de la valeur critique, le jet a le temps de se stabiliser alternativement sur chacune des deux positions, d'où en moyenne l'apparition de deux jets vectorisés respectivement vers le haut et le bas. La Fig. 4 illustre ce phénomène en présentant les champs moyens de vitesse pour les différentes situations analysées. Pour  $np = 2$ , l'écoulement moyen reste éloigné des parois divergentes, mais l'expansion latérale du jet est fortement accrue par rapport au contrôle bilatéral permanent. Pour  $np = 20$ , le dédoublement du jet apparaît clairement : on mesure en aval un angle voisin de  $40^\circ$  entre les deux branches du jet double, ce qui correspond bien à la superposition des deux champs de contrôles unilatéraux.

Les iso-contours d'énergie cinétique fluctuante correspondant aux différents situations de contrôle sont donnés dans la Fig. 5. Le cas du contrôle-double permanent confirme, comme déjà montré dans [8], que les fluctuations de

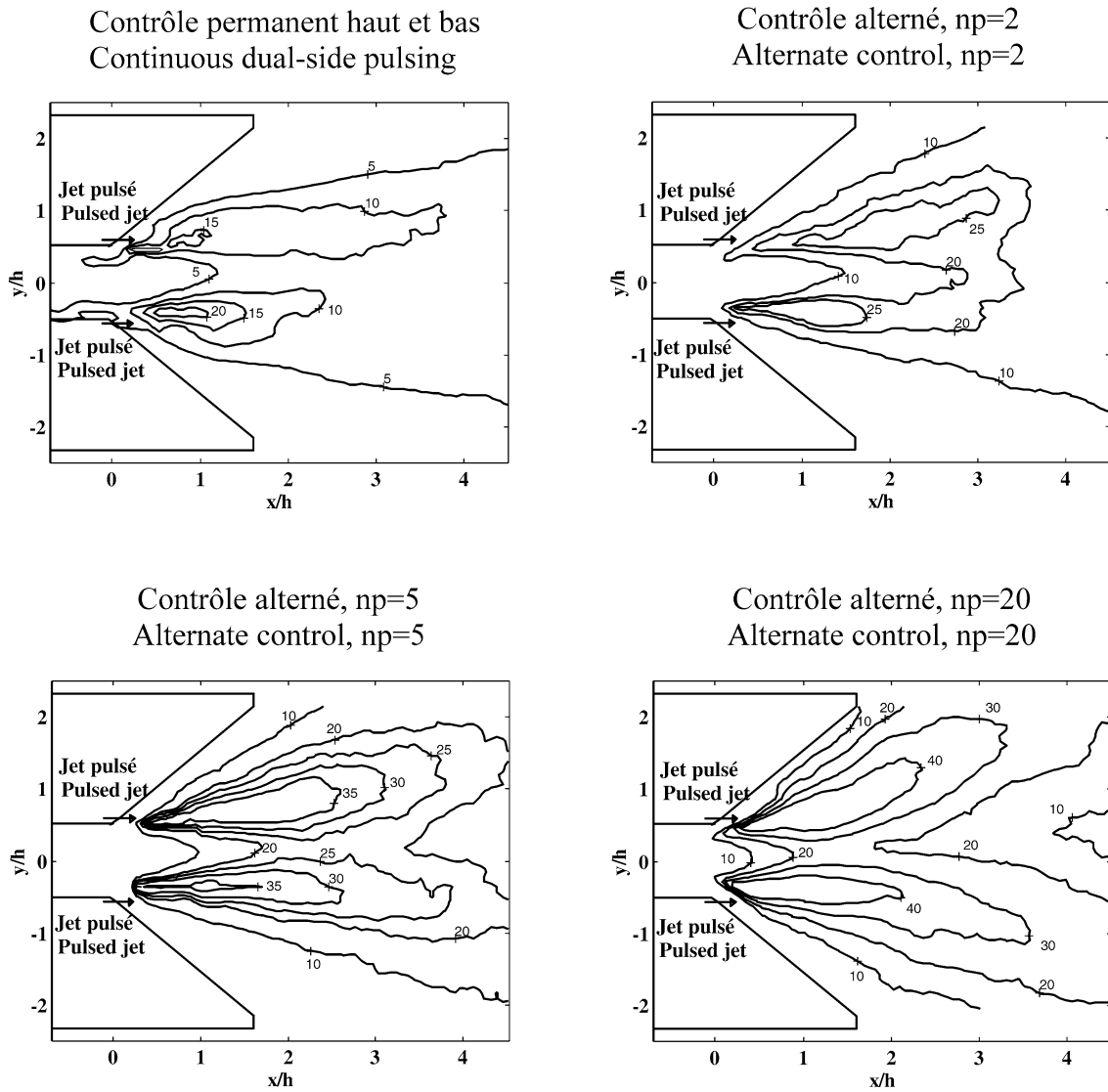


Fig. 5. Iso-contours d'énergie de fluctuations pour différentes configurations de contrôle, unité  $(m/s)^2$ .

Fig. 5. Energy of fluctuations for several control configurations, unit  $(m/s)^2$ .

vitesse sont augmentées. Le cas du contrôle-alterné  $np = 2$  indique que le basculement entre les deux états stables du jet contrôlé est générateur de fluctuations supplémentaires. Les cas du contrôle-alterné  $np = 5$  et  $np = 20$  sont également présentés et montrent que ce supplément croît avec  $np$ . Pour  $np = 20$ , on remarque que les effets des excitations unilatérales se sont découplés, ce qui conduit à deux lobes de grandes fluctuations près de chacune des parois. Pour  $np = 5$ , une bonne homogénéité des champs de fluctuations est obtenue, ce qui confirme le rôle critique de cette valeur.

## 5. Conclusion

Un contrôle par deux jets synthétiques a été mis en œuvre sur un jet rectangulaire confiné par un divergent court. Les champs de vitesse obtenus par vélocimétrie par images de particules mettent en évidence les modifications de l'écoulement engendrées par ce type de contrôle : l'effet le plus remarquable est l'augmentation du mélange associée à l'expansion du jet. Le système de contrôle alterné développé pour la présente étude, a permis d'accroître encore l'élargissement moyen de l'écoulement.

Ce système, qui permet de faire battre le jet d'une paroi à l'autre du divergent entre deux positions de forte stabilité, tire donc habilement partie de la dynamique de l'écoulement, plutôt que de le forcer sur une position centrale symétrique peu stable. L'analyse des résultats montre l'existence d'un nombre critique de périodes d'excitation avant basculement ( $np = 5$ ). Ce réglage conduit à une expansion latérale du jet près de deux fois supérieure à celle fournie par le contrôle double permanent. Pour  $np < 5$ , le jet n'a pas le temps d'atteindre ses positions d'équilibre, et pour  $np > 5$  l'écoulement aval commence à se scinder en deux jets distincts orientés respectivement vers le haut et vers le bas.

## Remerciements

Les présentes recherches entrent dans le cadre d'un programme d'échange MIRA (Région Rhône-Alpes/Gouvernorat de Monastir). Les auteurs remercient N. Grosjean et L. Graftieux pour leur soutien technique.

## Références

- [1] M. Gad-El-Hak, A. Pollard, J.P. Bonnet, *Flow Control: Fundamentals and Practices*, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [2] W.C. Reynolds, D.E. Parekh, P.J.D. Juvet, M.J.D. Lee, Bifurcating and blooming jets, *Annual Rev. Fluid Mech.* 35 (2003) 295–315.
- [3] J.C. Béra, M. Michard, N. Grosjean, G. Comte-Bellot, Flow analysis of 2D pulsed jets by particle image velocimetry, *Experiment. Fluid* 30 (5) (2001) 519–532.
- [4] J.C. Béra, M. Michard, M. Sunyach, G. Comte-Bellot, 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] D.E. Parekh, V. Kibens, A. Glezer, J.M. Wiltse, D.M. Smith, Innovative jet control: mixing enhancement experiments, AIAA Paper 96-0308, 34th Aerospace Science Meeting, Reno, NV, 1996.
- [6] L.G. Pack, A. Seifert, Periodic excitation for jet vectoring and enhanced spreading, AIAA Paper No. 99-0672, 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, 1999.
- [7] B.L. Smith, A. Glezer, Jet vectoring using synthetic jets, *J. Fluid Mech.* 458 (2002) 1–34.
- [8] J.C. Béra, M. Ben Chiekh, M. Michard, G. Comte-Bellot, M. Sunyach, Control of a plane jet by fluidic wall pulsing, *AIAA J.* 41 (5) (2003) 979–982.
- [9] M. Ben Chiekh, J.C. Béra, M. Michard, M. Sunyach, Contrôle par jet pulsé de l'écoulement dans un divergent court à grand angle – pulsed jet control of a short diffuser, *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. IIB* 328 (2000) 749–756.
- [10] J.B. Freund, P. Moin, Jet mixing enhancement by high-amplitude fluidic actuation, *AIAA J.* 38 (10) (2000) 1863–1870.
- [11] M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry, a Practical Guide*, Springer, Berlin, 1998.