

Contrôle par jet pulsé du décollement d'une couche limite turbulente

Jean-Christophe BÉRA, Geneviève COMTE-BELLOT, Michel SUNYACH

Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique, UMR CNRS 5509, université Lyon-I et École centrale de Lyon, 36, avenue de Collongue, BP 163, 69131 Écully cedex, France

E-mail : sunyach@selene.mecaflu.ec-lyon.fr

(Reçu le 30 mai 1998, accepté le 29 juin 1998)

Résumé. L'expérience est menée en soufflerie sur un cylindre dont les couches limites sont rendues turbulentes par adjonction de fils de transition, à un nombre de Reynolds subcritique de 133 000. Un contrôle par jet pulsé à débit moyen nul permet de modifier de façon très significative la distribution de pression pariétale autour du cylindre. Pour un débit fluctuant de quantité de mouvement du jet de l'ordre de $c_\mu = 0,025$, le contrôle conduit à une génération de portance de $C_L \approx 0,2$ et une augmentation de traînée d'environ 17 %. © Académie des Sciences/Elsevier, Paris

décollement de la couche limite / contrôle / jet pulsé / portance / traînée / couche limite turbulente

Pulsed jet control of the turbulent boundary layer separation

Abstract. Experiments are conducted in a wind tunnel on a cylinder at a subcritical Reynolds number of 133 000. Trip wires are used to force the transition of the cylinder's boundary layers. A zero-mass-flux jet controls the wall pressure distribution around the cylinder. For a momentum fluctuation coefficient c_μ about 0.025, the control generates lift up to $C_L \approx 0.2$ and increases the drag force by 17 %. © Académie des Sciences/Elsevier, Paris

boundary layer separation / control / pulsed jet / lift / drag / turbulent boundary layer

Abridged English Version

1. Introduction

Recent experimental studies have shown that the separation of a laminar boundary layer can be controlled by means of a pulsed wall jet [2–5]. A strong increase in lift and a significant reduction in drag can be achieved by such a control. The aim of the present study is to apply the pulsed jet technique to the separation of a turbulent boundary layer.

Note présentée par Geneviève COMTE-BELLOT.

2. Experimental set-up

The experiments are conducted in a wind tunnel on a cylinder (diameter 10 cm) perpendicular to the incident flow. The mean velocity is $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, with a turbulence coefficient below 0.4 %. Two symmetrical trip wires are used to force the transition of the cylinder boundary layers (*figure 1*).

The control is effected by a zero-mass-flux jet, pulsed through a spanwise slit in the cylinder. A slit azimuthal position of 110° is chosen as optimal in the present case [7]. The flow in the slit is sinusoidal, with an adjustable amplitude and a fixed frequency of 200 Hz. Doppler laser anemometry is used to measure the velocity of the control jet in the absence of external flow. The jet parameter considered in the study is the momentum fluctuation coefficient c_μ calculated from these measurements.

3. Results

The wall pressure distribution around the cylinder is measured with and without control. The control strongly modifies the distribution on the controlled side (*figure 2*). Moreover, the efficiency of the pulsed jet increases with its momentum coefficient c_μ (*figure 3*): the high suction area, which characterizes the turbulent separation, progressively widens with the control amplitude.

The integration of wall pressure provides lift and form drag forces. The lift force increases with the control (*figure 4*). The efficacy of the jet is obvious from $c_\mu \approx 0.5 \%$ on, and the effect saturates for $c_\mu \approx 4 \%$ at a lift coefficient of 0.24.

The drag force also increases with the control, up to a 20 % increase for high momentum jets (*figure 5*). Opposite results were obtained on a laminar separation [3, 7], but in that case, the control oscillation forces the boundary layer transition, which by itself causes a large reduction in drag.

4. Conclusions

As indicated by the present experimental study on a cylinder, control of a turbulent boundary layer can be achieved by means of a pulsed jet. The control of a turbulent boundary layer, which requires a more energetic jet than for a laminar separation, generates lift but also increases drag.

1. Introduction

Des études expérimentales récentes ont montré qu'il était possible de contrôler le décollement d'une couche limite laminaire par une excitation oscillatoire relativement concentrée et localisée à la paroi. Cette oscillation est générée par une vibration pariétale [1], par des jets régulés au moyen d'une vanne pulsée [2] ou par des jets pulsés à débit moyen nul [3–5]. Dans les différents cas envisagés, ce contrôle a permis une forte augmentation de portance et une diminution notable de traînée, qu'il serait souhaitable de pouvoir exploiter en avionique.

Pour les couches limites laminaires considérées jusqu'ici, le contrôle a pour effet de faire transitionner la couche limite, ce qui peut expliquer la modification de l'effort global exercé par l'écoulement sur le profil. En effet, toutes choses égales par ailleurs, le décollement d'une couche limite turbulente crée

Contrôle par jet pulsé du décollement d'une couche limite turbulente

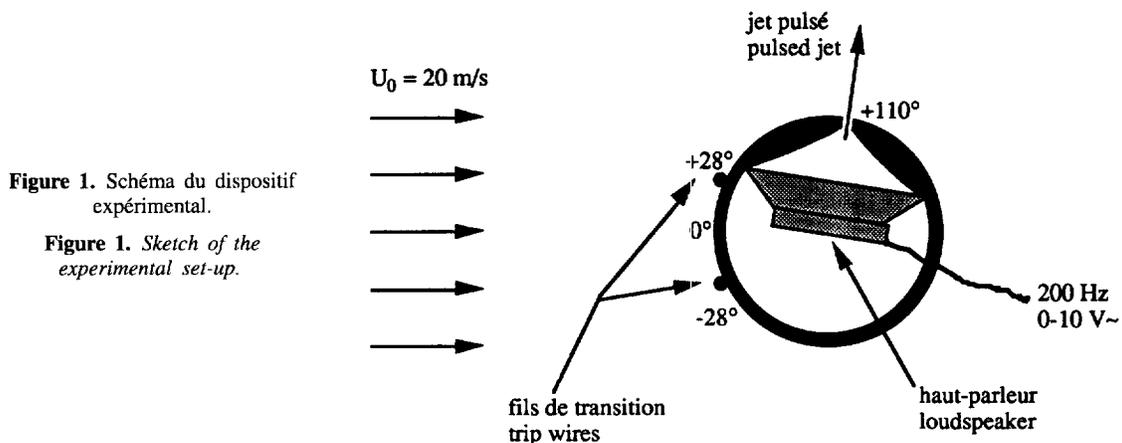
plus de portance et moins de traînée que celui d'une couche limite laminaire, comme le démontre la revue de littérature d'Achenbach relative à l'écoulement autour d'un cylindre [6].

Dans la présente recherche, nous nous intéressons au contraire au cas du décollement turbulent. On retient pour nos travaux expérimentaux la configuration type de l'écoulement autour du cylindre. Le contrôle sera assuré par un jet pulsé et l'effet du contrôle sera quantifié en fonction du débit de quantité de mouvement du jet.

2. Dispositif expérimental

2.1. Cylindre et veine d'essais

Les mesures sont réalisées sur un cylindre de diamètre $D = 10$ cm, placé dans une veine carrée de côté 40 cm. Une soufflerie à refoulement produit dans la zone d'essais un écoulement d'air de $U_0 = 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, perpendiculaire au cylindre, avec un taux de turbulence inférieur à 0,4 %. Pour assurer le déclenchement de la transition des couches limites pariétales, deux fils de diamètre 2 mm sont disposés de part et d'autre du cylindre, à $\pm 28^\circ$ du point d'arrêt (*figure 1*).



2.2. Jet pulsé de contrôle

Le contrôle oscillatoire est réalisé par un jet pulsé à débit moyen nul, normal à la paroi du cylindre, issu d'une fente de 10 cm d'envergure et de largeur $l = 1,7 \text{ mm}$, située à $+110^\circ$ du point d'arrêt. L'angle de 110° correspond approximativement à l'azimut optimal pour le cas traité [7]. Le jet oscillant est engendré par les fluctuations de pression imposées par un haut-parleur électrodynamique relié à l'orifice par un court pavillon. Le haut-parleur est alimenté par un signal électrique sinusoïdal de fréquence 200 Hz et de tension ajustable. Ce système permet de créer dans la fente un écoulement sinusoïdal dont on peut régler l'amplitude.

2.3. Systèmes de mesures

Les fluctuations de vitesse du jet pulsé (u_j) sont mesurées à 1 mm au-dessus de la fente par anémométrie laser Doppler à une composante, en l'absence d'écoulement extérieur. Le paramètre considéré dans l'étude sera le coefficient de débit fluctuant de quantité de mouvement :

$$c_\mu = \frac{l u_j^2}{\frac{D}{2} U_0^2}$$

Le cylindre est équipé sur sa circonférence centrale de 71 prises de pression statique (une prise tous les 5°). Un système de scani-valve et un manomètre différentiel, pilotés par un micro-ordinateur, fournissent la répartition de pression pariétale autour du cylindre. On en déduit par intégration les coefficients de portance (C_L) et de traînée de forme (C_D). Le point d'arrêt, qui est pris comme référence des angles, s'avère rester fixe dans la discrétisation spatiale considérée, pour toutes les amplitudes de contrôle envisagées.

3. Résultats

3.1. Distribution de pression pariétale

On vérifie tout d'abord sur la distribution de pression pariétale autour du cylindre (figure 2, courbes a et b) que la présence des fils de transition conduit bien à une séparation de couche limite turbulente, avec une forte aspiration au voisinage de $\theta = \pm 90^\circ$ et une dépression réduite en aval. La légère dissymétrie observée peut s'expliquer par l'état métastable de deux décollements parfaitement symétriques des couches limites extrados et intrados.

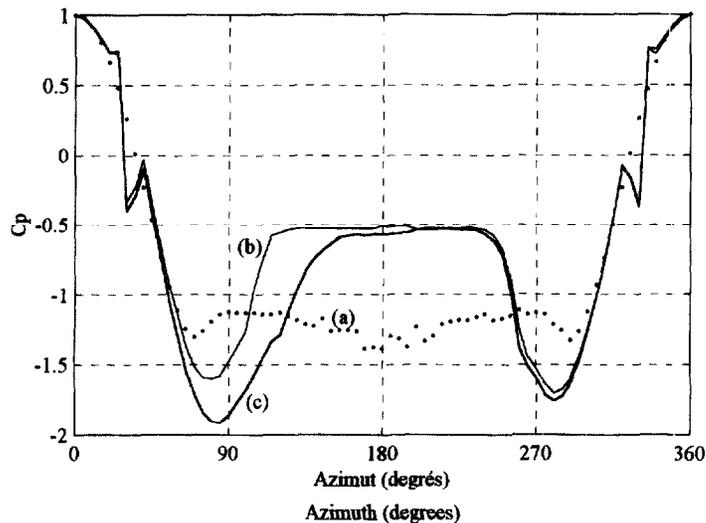


Figure 2. Distributions de pression pariétale : (a)... sans fils de transition (sans contrôle), (b) — avec fils de transition à $\pm 28^\circ$ (sans contrôle) et (c) — avec fils de transition et fort jet pulsé de contrôle ($c_\mu \approx 4\%$).

Figure 2. Wall pressure distribution: (a)... without trip-wire (without control), (b) — with both trip-wires at $\pm 28^\circ$ (without control) and (c) — with both trip-wires and with control pulsed jet ($c_\mu \approx 4\%$).

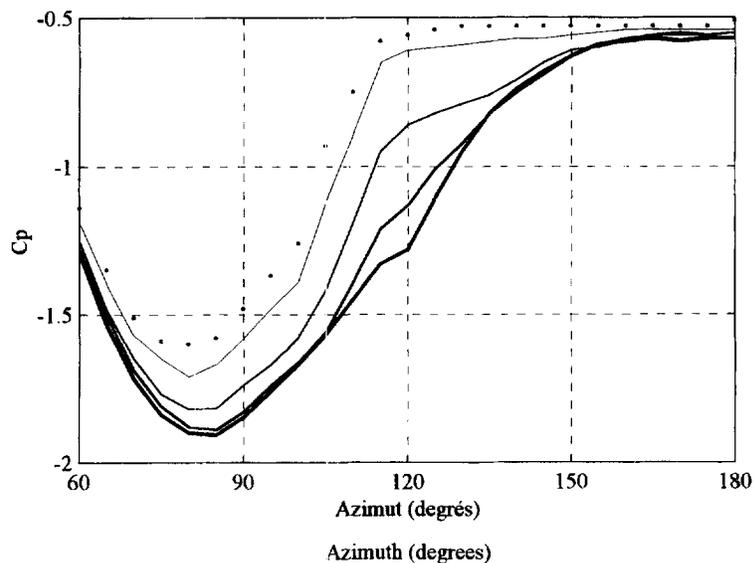
Contrôle par jet pulsé du décollement d'une couche limite turbulente

Le contrôle modifie notablement la distribution de pression, qui devient fortement dissymétrique (*figure 2*, courbes b et c). En effet, l'action du jet pulsé se manifeste essentiellement du côté du cylindre où il est appliqué, entre les azimuts 60° et 180° , tandis que le côté non contrôlé n'est que très sensiblement affecté.

La *figure 3* montre que cet effet augmente avec le débit de quantité de mouvement c_μ du jet pulsé. On observe ainsi une augmentation progressive de l'aspiration dans la zone de forte suction extrados, avec une aspiration maximale mesurée passant de $C_p \approx -1,6$ en l'absence de contrôle, à $C_p \approx -1,9$ pour l'amplitude maximale du contrôle. Corrélativement, cette zone de suction, qui s'étend naturellement de 50° à 110° , s'élargit progressivement vers l'aval jusqu'à l'azimut de 150° . Cet élargissement semble atteindre une valeur limite aux forts niveaux de contrôle : en effet, quand on passe de $c_\mu = 2\%$ à $c_\mu = 4\%$, l'effet d'aspiration supplémentaire reste limité au voisinage du jet, légèrement en aval de 110° .

Figure 3. Distributions de pression pariétale pour différentes intensités du jet de contrôle (dorénavant toujours avec fils de transition) : ... sans contrôle ($c_\mu = 0$), — avec contrôle : pour des courbes d'épaisseur croissante, c_μ est égal respectivement à 0,5, 1, 2 et 4 %.

Figure 3. Wall pressure distributions for several control jet intensities (now, always with trip-wires): ... without control ($c_\mu = 0$), — with control: for an increasing line width, c_μ equals 0.5, 1, 2 and 4 %, respectively.



3.2. Portance

La *figure 4* représente l'évolution du coefficient de portance C_L du cylindre, en fonction du coefficient c_μ du jet pulsé de contrôle. En l'absence de contrôle ($c_\mu = 0$), C_L est voisin de zéro car le profil est symétrique. L'efficacité du contrôle se manifeste nettement dès $c_\mu \approx 0,5\%$. On observe ensuite une augmentation progressive de la portance, que l'on peut suivre jusqu'à $c_\mu \approx 2\%$. Aux plus fortes valeurs de c_μ , de l'ordre de 2–4 %, une saturation du coefficient C_L s'installe à une valeur d'environ 0,25.

Ces chiffres sont à comparer aux résultats obtenus dans la littérature pour le contrôle du décollement laminaire sur un cylindre : le coefficient de portance peut alors atteindre des valeurs de 0,5 [3], tandis que l'efficacité des jets pulsés se manifeste pour des coefficients c_μ d'environ 0,1 % [4]. Dans ce cas, le déclenchement de la transition de la couche limite laminaire (sous l'effet du contrôle) modifie en soi considérablement le mécanisme de décollement. Ce phénomène n'intervient pas bien entendu dans la présente étude où les couches limites sont déjà transitionnées avant contrôle.

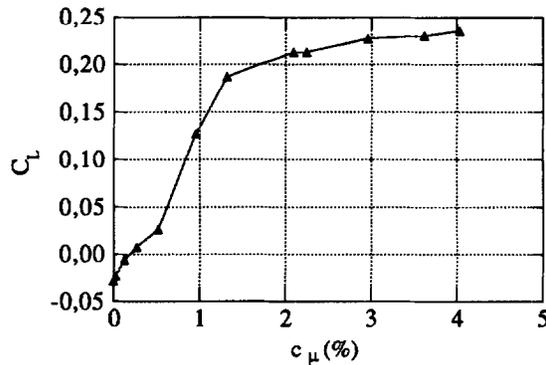


Figure 4. Coefficient de portance en fonction du coefficient de quantité de mouvement c_μ .

Figure 4. Lift coefficient as a function of the momentum coefficient c_μ .

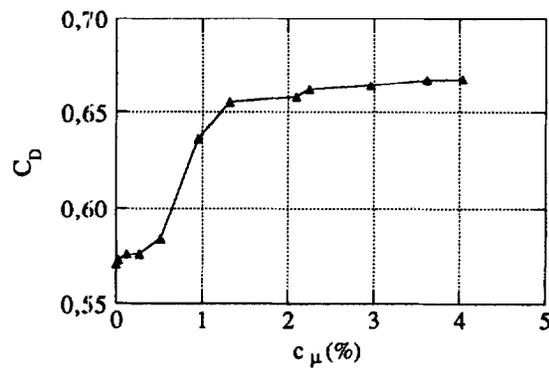


Figure 5. Coefficient de traînée en fonction du coefficient de quantité de mouvement c_μ .

Figure 5. Drag coefficient as a function of the momentum coefficient c_μ .

3.3. Traînée

Les variations du coefficient de traînée C_D en fonction de c_μ sont indiquées sur la figure 5. On observe avec le contrôle une augmentation significative de la traînée, qui atteint 17 % aux fortes valeurs de c_μ (> 3 %). La traînée évolue approximativement de la même façon que la portance avec, notamment, une saturation du coefficient C_D pour les c_μ élevés.

Les travaux antérieurs portant sur le décollement laminaire avaient, au contraire, mis en évidence une diminution légère, mais significative, de la traînée sous l'action de l'actionneur pariétal [3, 7]. Cependant, il est légitime de penser que, dans le cas laminaire, l'effet de transition de la couche limite, qui réduit notablement la traînée de forme, est prépondérant.

4. Conclusion

La présente étude expérimentale montre, dans le cas d'un cylindre, qu'il est possible par un jet pulsé de contrôler le décollement d'une couche limite transitionnée. L'énergie (c_μ) du jet nécessaire à un contrôle efficace semble cependant supérieure à celle requise pour une couche limite laminaire. Par ailleurs, si, dans les expériences réalisées, le contrôle agit très favorablement sur la portance, il augmente aussi de façon significative la traînée de forme. Une optimisation de la dimension et de l'orientation du jet pulsé est maintenant envisagée, afin de minimiser l'énergie du contrôle et de moduler la génération de traînée.

Remerciements. Ces travaux ont bénéficié du soutien de l'État (DSA – SPAÉ).

Références bibliographiques

- [1] Wojciechowski J., Szuster T., Pietrucha J., Étude expérimentale de la réduction de traînée d'un profil laminaire à l'aide d'actionneurs piézoélectriques, C. R. Acad. Sci., Paris, série IIb 326 (1998) 85–90.
- [2] Seifert A., Bachar T., Koss D., Shepshelovich M., Wagnanski I., Oscillatory blowing : a tool to delay boundary-layer separation, AIAA J. 31 (11) (1993) 2052–2060.

Contrôle par jet pulsé du décollement d'une couche limite turbulente

- [3] Amitay M., Honohan A., Trautman M., Glezer A., Modification of the aerodynamic characteristics of bluff bodies using fluidic actuators, 28th AIAA Fluid Dynamics Conf., Snowmass Village, CO, USA, juin 1997.
- [4] Béra J.-C., Sulliman Y., Faure T., Nicot C., Sunyach M., Contrôle par jet synthétique pariétal de l'échappement tourbillonnaire autour d'un cylindre, 13^e congrès français de mécanique, minicolloque de mécanique des fluides active, Poitiers, France, septembre 1997, pp. 56–59.
- [5] Béra J.-C., Sunyach M., Laadhari F., Visualisation de l'effet des jets synthétiques pour le contrôle de décollement, 7^e colloque national de visualisation et de traitement d'images en mécanique des fluides Visu97, Saint-Louis, France, juin 1997.
- [6] Achenbach E., Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re = 5 \cdot 10^6$, J. Fluid Mech. 34 (1968) 625–639.
- [7] Béra J.-C., Sunyach M., Control of boundary layer separation by jet oscillation, 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf., Toulouse, France, Session 33, juin 1998, Paper No. 98–2373.