

## Contrôle actif dual d'écoulement turbulent

Olivier Doche & Sedat Tardu

L.E.G.I.  
1025, rue de la Piscine, 38041 Grenoble  
sedat.tardu@hmg.inpg.fr

### Résumé :

*Un contrôle actif de type dual, reposant sur l'interaction entre deux schémas de contrôle (boucle ouverte par soufflage localisé en espace et périodique en temps + boucle fermée), est ici étudié dans un canal turbulent. Deux types de contrôle par asservissement seront analysés, Ad-Hoc et suboptimal en présence d'un soufflage sinusoïdal en temps et localisé sur la paroi inférieure. On montre alors qu'une stratégie de contrôle duale, formée d'une manipulation sinusoïdale et suboptimale, peut s'avérer être une méthode de contrôle efficace afin de réduire la contrainte pariétale turbulente et améliorer la contrôlabilité du système.*

### Abstract :

*A dual active control strategy, based on the interaction of two control schemes (open loop control by a localized and time periodical blowing through a spanwise slot and a closed loop control) is analysed in a turbulent channel flow. Two types of feedback control are investigated, Ad-Hoc and suboptimal, coupled with a temporal sinusoidal blowing located on the lower wall. We show that a dual active control strategy, combining the sinusoidal and suboptimal control, can be an efficient control method in order to reduce the turbulent wall shear stress and to increase the controllability of the near wall turbulence.*

### Mots-clefs :

**contrôle actif dual ; contrôle suboptimal ; écoulement turbulent**

### 1 Introduction

La turbulence de proche paroi est très délicate à contrôler du fait de l'apparition aléatoire des entités qui la composent. En effet, les structures quasi-longitudinales, qui représentent la composante cohérente de la turbulence, sont à l'origine d'une augmentation de 80% de la contrainte turbulente (comparée à la couche limite de Blasius). Par un processus de régénération auto-entretenu, ces vortex se créent de manière très intermittente à la fois en temps et en espace. On propose ici une méthode de contrôle permettant de contourner ce problème en forçant l'organisation de la turbulence de proche paroi de manière à la rendre plus prédictible et, de ce fait, mieux contrôlable. Si  $S[\omega]$  est le spectre de puissance d'un processus stochastique ( $\omega$  est la pulsation), il peut être décomposé en deux parties distinctes :

$$S[\omega] = S_\alpha[\omega] + S_\beta[\omega] \quad (1)$$

où  $S_\alpha[\omega]$  représente la composante régulière (imprédictible) et  $S_\beta[\omega]$  la composante prédictible du processus. Ce résultat est connu sous le nom de décomposition de Wold. La composante  $S_\alpha[\omega]$  est une portion continue du spectre où aucune fréquence particulière ne peut être dégagée. A l'inverse,  $S_\beta[\omega]$  peut être composé d'une ou plusieurs raies spectrales, c'est à dire :

$$S_\beta[\omega] = \sum_i \beta_i \delta(\omega - \omega_i) \quad (2)$$

Dans le cas de la turbulence de proche paroi,  $S_\alpha[\omega]$  devrait prédominer sur  $S_\beta[\omega]$  car à l'inverse d'une allée de Von Karman par exemple, il n'existe pas de fréquence privilégiée propre à l'apparition des structures. L'idée générale est donc d'appliquer une excitation locale en espace (injection de  $S_\beta[\omega]$  dans le système) pour tenter d'améliorer la prédictibilité et de ce fait la contrôlabilité (figure 1). L'objectif est donc de filtrer  $S_\alpha[\omega]$  afin d'accentuer la composante prédictible  $S_\beta[\omega]$  afin d'améliorer l'efficacité d'un contrôle actif par asservissement de type *ad-hoc* ou suboptimal, positionné plus loin à l'aval.

Pour être en mesure d'agir efficacement sur la turbulence de proche paroi, il est nécessaire de recourir à l'utilisation de tableaux de MEMS d'une densité trop importante pour être aujourd'hui techniquement réalisable. Avec un écoulement plus prédictible, c'est à dire exhibant des raies spectrales plus prononcées, on pourra cibler notre action et envisager une approche analogue à celle utilisée pour contrôler les allées de von Karman. Ainsi, au lieu de recouvrir intégralement la paroi d'un jeu de capteurs/actionneurs, on pourra jouer sur la position ou la densité des MEMS de manière à rendre le contrôle plus efficace et/ou plus facile à mettre en oeuvre expérimentalement.

## 2 Formulation du problème et description du code de calcul

Dans cette étude, on filtre la composante régulière par application d'un soufflage périodique (sinusoïdal) dans l'optique de donner plus de poids au processus prédictible (déterministe).

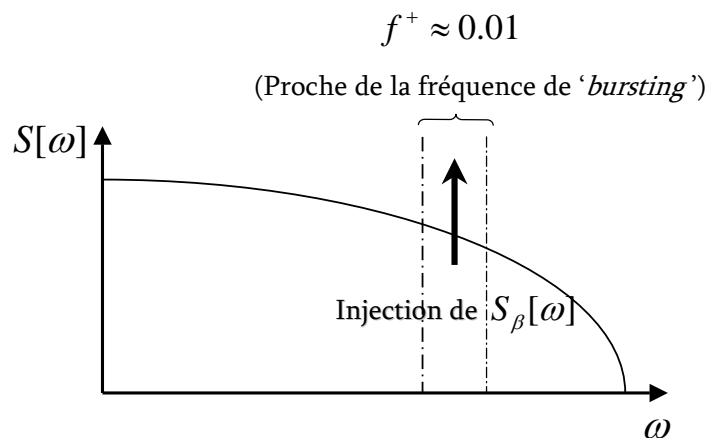


FIG. 1 – Processus stochastique (turbulence de proche paroi) forcé par un soufflage sinusoïdal en temps et dont la fréquence est proche de la fréquence d'éjection.

La figure 1 expose le cas où la turbulence de proche paroi est soumise à une excitation sinusoïdale pure, c'est à dire une seule raie spectrale. La fréquence de soufflage est choisie de façon à être proche de la fréquence d'éjection (ou *bursting*) de manière à influencer principalement sur la production d'énergie cinétique turbulente. Un contrôle en boucle fermée (*Ad-Hoc* ou suboptimal) est ensuite employé afin de profiter de l'organisation induite par l'excitation instationnaire.

La figure 2 illustre comment ces deux types de manipulations sont agencées sur la paroi inférieure du canal turbulent. Sur la première portion du canal, de  $x^+ = 0$  (section d'entrée) à  $x^+ = 170$ , aucun contrôle n'est appliqué. De  $x^+ = 170$  à  $x^+ = 340$ , on impose une excitation sinusoïdale à travers une fente. La taille de la fente choisie dans la direction longitudinale est de  $L_x^+ = 170$ , la sévérité moyenne est fixée à  $\bar{\beta} = 0.006$  avec une fréquence de soufflage

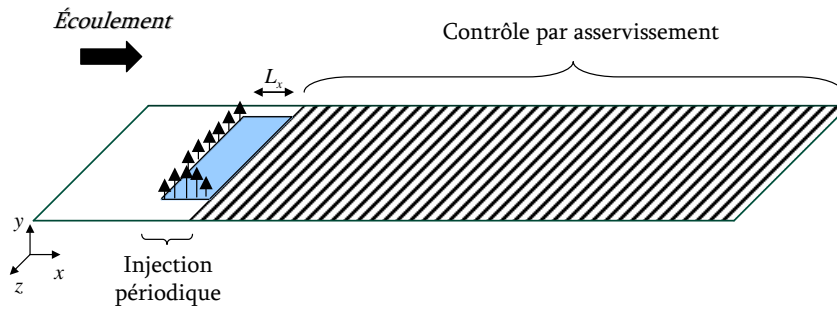


FIG. 2 – Schéma d'application d'un contrôle dual à un écoulement en canal

de  $f^+ = 0.018$  soit très proche de la fréquence de *bursting*. On précise que le paramètre  $\beta$  représente le rapport entre le débit injecté à travers la fente et celui de l'écoulement sur la demi-hauteur du canal. Le reste de la paroi inférieure du canal est soumis à un contrôle par asservissement de type *Ad-Hoc* ou Suboptimal.

Le code numérique utilisé est une Simulation Numérique Directe. Les équations de Navier-Stokes et la condition d'incompressibilité, discrétisées par différences finies d'ordre deux, sont résolues par la méthode du *Pas Fractionné* (Kim *et al.* (1985)). L'avancement temporel est assuré par un schéma de *Runge-Kutta* au troisième ordre et les termes linéaires sont calculés par la méthode de *Crank-Nicholson*. Des conditions périodiques sont appliquées dans les directions homogènes de l'écoulement, c'est à dire dans la direction transversale et longitudinale. La taille la boîte de calcul est de  $(4\pi \times 2 \times 1.33\pi)$  avec un maillage de  $(513 \times 129 \times 129)$  dans les directions respectives ( $x, y$  et  $z$ ) (longitudinale, normale et transverse). Le nombre de Reynolds, basée sur la vitesse au centre du canal, est fixée à  $Re = 4200$  et le pas de temps correspond à  $\Delta t^+ = 0.1$ . Le symbole + indique que la variable est adimensionnée par rapport aux échelles internes, c'est à dire en utilisant la vitesse de frottement  $u_\tau = \sqrt{\tau/\rho}$  ( $\tau$  est la contrainte pariétale) et la viscosité  $\nu$ . Les quantités  $(\bar{\quad})$  sont moyennées en temps.

### 3 Résultats

#### 3.1 Soufflage sinusoïdal + Contrôle *Ad-Hoc*

Le contrôle *Ad-Hoc* (Choi *et al.* (1994)) consiste à placer, à l'intérieur d'un écoulement turbulent en canal, un plan horizontal de détection (parallèle à la paroi). Si, sur ce plan, on mesure une fluctuation de vitesse (par exemple positive) alors on applique instantanément son opposé (c'est à dire une fluctuation négative) à même la paroi. Cette loi de contrôle peut donner naissance à deux stratégies pertinentes. La première, *Ad-Hoc v*, ne détecte et n'agit que sur les vitesses normales à la paroi. La seconde, *Ad-Hoc w*, ne se base quant à elle que sur les fluctuations de vitesse transverse. Dans le cas d'une manipulation de type *v*, la réduction de contrainte pariétale est de 20% alors qu'elle peut atteindre 26% pour le type *w*.

La figure 3 montre comment évolue temporellement la contrainte en paroi, moyennée sur toute la portion du canal à l'aval de la fente, lorsqu'on applique un contrôle *Ad-Hoc* (*v* ou *w*) et lorsqu'on le combine à un soufflage sinusoïdal (contrôle dual). Elle est adimensionnée par rapport à son homologue dans le cas non manipulé  $\bar{\tau}_{CLS}$ . Pour les deux types de manipulation, on ne remarque pas de différences nettes entre les valeurs moyennées en temps.

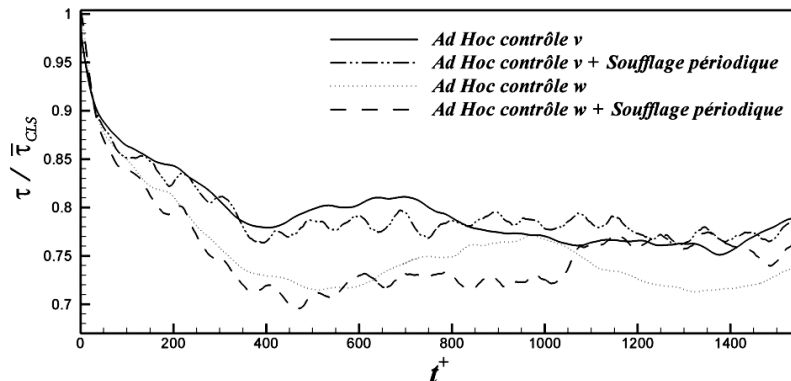


FIG. 3 – Évolution de la contrainte pariétale pour un contrôle Ad-Hoc, type  $v$  et  $w$ , associé ou non à une injection instationnaire

### 3.2 Soufflage sinusoïdal + Contrôle Suboptimal

Le contrôle suboptimal (Bewley *et al.* (2001)) est un contrôle prédictif intégrant une recherche itérative temporelle basée sur la sensibilité de Navier-Stokes à une perturbation en paroi. L'objectif est de minimiser une fonction de coût, établie à un pas de temps ultérieur ( $t + \Delta t$ ), et définie par :

$$J(\phi) = \frac{k}{2\Gamma} \iint_{x_2=0} \phi^2 dx_1 dx_3 + \frac{1}{\Gamma} \iint_{x_2=0} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} dx_1 dx_3 \quad (3)$$

où  $\phi(x_1, x_3)$  est une distribution spatiale de vitesses pariétales représentant l'emplacement des points d'aspirations ou de soufflages. La quantité  $\Gamma$  est la surface de la paroi sur laquelle est appliquée le contrôle. Les variables  $x_1(u_1)$ ,  $x_2(u_2)$  et  $x_3(u_3)$  représentent respectivement les directions (et la vitesse correspondante) longitudinale, normale et transversale de l'écoulement. Du fait de sa recherche itérative temporelle, cette procédure de contrôle présente donc une faculté d'adaptation bien supérieure à celle du contrôle Ad-Hoc. La figure 4 montre comment est affectée temporellement la contrainte lorsque l'écoulement est soumis à différents types de manipulations : Sinusoïdal, Suboptimal et Dual.

Plusieurs points intéressants peuvent être dégagés de l'analyse de la figure 4. Tout d'abord, l'injection sinusoïdale seule ne provoque pas une importante modification du comportement de la contrainte et mène seulement à 2% de réduction de traînée. Le contrôle suboptimal est évidemment plus efficace et engendre une diminution du frottement proche de 9%. Le contrôle dual quant à lui, réagit d'une manière surprenante. On remarque que la moyenne temporelle de la contrainte est sensiblement affectée et présente une réduction approximative de 15%, soit environ deux fois plus que dans le cas du contrôle suboptimal seul. On peut également remarquer que la réduction de la traînée peut atteindre localement des valeurs aussi importantes que 20%. De plus, les variations temporelles de la contrainte sont très régulières et présentent une périodicité marquée de forme sinusoïdale. Il est important de souligner que la période de ces oscillations est égale à celle de l'injection à travers la fente. Les figures 5 et 6 présentent respectivement la moyenne de phase des contraintes en plusieurs positions à l'aval de la fente pour l'injection sinusoïdale et pour le contrôle dual. Sur la figure 5 on constate qu'aucune périodicité ne peut être distinguée sur une distance supérieure à  $x^+ = 800$  à l'aval de la fente.

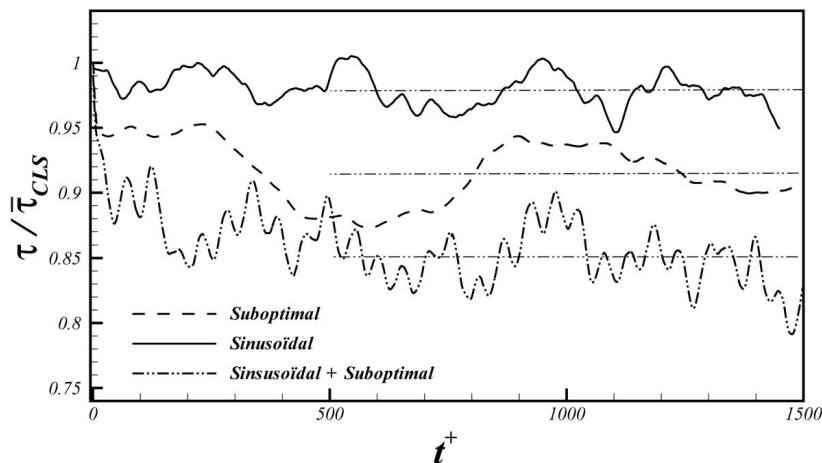


FIG. 4 – Évolution de la contrainte pariétale pour un contrôle dual basé sur un schéma suboptimal

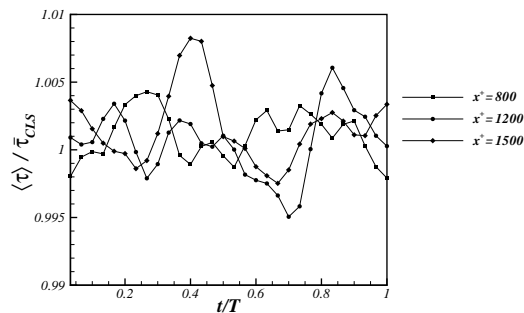


FIG. 5 – Moyennes de phase de la contrainte pariétale pour un soufflage *sinusoïdal* à différentes distances du bord aval de la fente

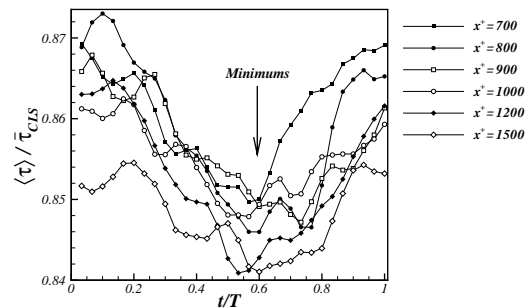


FIG. 6 – Moyennes de phase de la contrainte pariétale pour un contrôle *dual* à différentes distances du bord aval de la fente

En revanche, sur la figure 6, des oscillations importantes de la contrainte sont observées sur une distance  $x^+ = 700$  après la fente et jusqu'à la fin du canal. Pour chaque position, les amplitudes varient entre 1.5% et 2.5%. Mieux encore, les oscillations sont en phase et les minimums sont localisés en  $t/T = 0.6$ , c'est à dire à la fin de la décélération de l'injection sinusoïdale.

#### 4 Discussion

Les résultats précédents ont montré que l'application d'un contrôle dual composé d'une injection sinusoïdale et d'un contrôle de type suboptimal permet d'améliorer significativement la réduction de la traînée turbulente. Le choix du schéma en boucle fermée semble toutefois avoir une importance considérable. En effet, l'application d'un contrôle par asservissement de type Ad-Hoc n'engendre aucune diminution de contrainte turbulente. La hauteur du plan de détection est ici fixée à  $y^+ = 10$  comme lors des travaux de Choi *et al.* (1994). Cette distance est optimale et correspond à la région où les structures sont créées et interagissent le plus fortement avec la paroi. Dans ce cas, une partie de la loi de contrôle (la hauteur du plan de détection) est établie à l'avance et n'est pas modifiée durant l'évolution du système dynamique. Le contrôle de type Ad-Hoc présente donc une faible capacité d'adaptation aux modifications spatiales et/ou temporelles de l'écoulement et explique donc l'absence de réduction de contrainte constatée

lors application d'un contrôle dual. A l'inverse, le contrôle suboptimal est un schéma prédictif formulé directement à partir des équations de Navier Stokes ; il présente la capacité de réagir instantanément aux modifications structurelles de l'écoulement. Comme il évolue sur une période identique à celle imposée par le soufflage à travers la fente et que sa distribution spatiale est aussi dépendante de l'état de l'injection, on peut en conclure que le contrôle suboptimal s'est adapté à la fois en espace et en temps à une action instationnaire localisée.

Il est alors intéressant de mettre en parallèle notre méthode de contrôle dual et les méthodes utilisées pour contrôler les systèmes chaotiques. L'objectif est alors d'attendre qu'un système chaotique évolue vers une orbite périodique identifiée préalablement et de la stabiliser (synchroniser) par l'application de perturbations identifiées en temps réel. Or, les travaux de Mirus *et al.* (1999) indiquent que l'application d'une simple perturbation *sinusoïdale* peut permettre de stabiliser une ou plusieurs orbites périodiques instables. Dans le cas du contrôle dual, la fréquence du soufflage sinusoïdal imposée est proche de celle de *bursting*. Cette excitation pourrait être provoquer la stabilisation d'une ou plusieurs orbites liées au mécanisme de formation des structures cohérentes. Le système n'est évidemment pas dans un état de synchronisation complète car les variables de la turbulence de proche paroi ne présentent pas toutes une périodicité marquée. Cependant, la propagation de la périodicité constatée sur la contrainte pariétale peut laisser penser à l'apparition d'un phénomène de synchronisation de phase avec le soufflage. Ainsi, le contrôle suboptimal agirait comme un régulateur/correcteur permettant de conserver l'orbite dans son état stable et provoquant la propagation de la périodicité sur tout le domaine de contrôle.

## 5 Conclusions

Un contrôle dual, composé d'une injection sinusoïdale et d'un contrôle suboptimal, se révèle être une approche permettant une réduction sensible de la contrainte pariétale. En effet, on obtient dans ce cas 15% de réduction de frottement contre 11% si on cumule les réductions engendrées par les deux contrôles non combinés. L'efficacité du contrôle est donc augmentée approximativement de 30%. L'obtention de ce gain semble être fortement liée à la nature du contrôle par asservissement qui doit présenter une bonne capacité d'adaptation aux modifications spatiales et temporelles de l'écoulement. De prochains résultats permettront de conclure sur la sensibilité du contrôle dual à une modification de la fréquence d'injection et de la forme temporelle du soufflage.

## Références

- Bewley, T., Moin, P., Temam, R. 2001 Dns-based predictive control of turbulence : an optimal benchmark for feedback algorithms *J. Fluid Mech.* **447** 179-225
- Choi, H., Moin, P., Kim, J. 1994 Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows. *J. Fluid Mech.* **262** 75-110
- Kim, J., Moin, P. 1985 Application of fractionnal-step method to incompressible Navier-Stokes equation *J. Comp. Phys.* **59** 308-323
- Mirus, K., Sprott, J. 1999 ontrolling chaos in low- and high-dimensional systems with periodic parametric perturbations *Physical Reviews E* **59(5)** 5313-5324