



**HAL**  
open science

## Contrôle dual de la traînée turbulente. Approche expérimentale et numérique

Olivier Doche, Sedat F. Tardu

► **To cite this version:**

Olivier Doche, Sedat F. Tardu. Contrôle dual de la traînée turbulente. Approche expérimentale et numérique. 17e Congrès Français de Mécanique (CFM) 2005, Aug 2005, Troyes, France. hal-00262059

**HAL Id: hal-00262059**

**<https://hal.science/hal-00262059v1>**

Submitted on 27 Apr 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

# Contrôle dual de la traînée turbulente : approche expérimentale et numérique

Olivier Doche & Sedat Tardu

Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (L.E.G.I.)  
BP 53 38041 Grenoble  
sedat.tardu@hmg.inpg.fr

## Résumé :

*Ce papier traite d'une stratégie de contrôle dual dans le but de réduire la contrainte pariétale d'une couche limite turbulente. On propose l'interaction de deux schémas de contrôle, un schéma en boucle ouverte par soufflage localisé, temporellement périodique, suivi d'un schéma en boucle fermée de type suboptimal. L'idée principale est d'organiser la turbulence par une excitation oscillante de manière à la rendre plus prédictible et de ce fait plus contrôlable. L'impact de ces deux types de contrôle devra être étudié séparément avant de coupler leurs effets dans le but d'obtenir une meilleure diminution du frottement tout en rendant l'approche expérimentale envisageable. On confronte ici deux types de soufflages instationnaires, le premier présente une évolution temporelle sinusoidale alors que le second est à caractère dissymétrique. Dans ce dernier cas, la vitesse d'injection subit une forte accélération suivie par une phase de faible décélération.*

## Abstract :

*This paper deals with the concept of a dual control strategy to reduce the drag of a turbulent boundary layer. Two kinds of control will interact, an open loop control by a localized and time peridiodical blowing through a spanwise slot and a closed loop control like suboptimal scheme. The main goal is to lead the turbulence to a more predictable and controlable state by application of an oscillating blowing. We propose to investigate firstly the single actuation before coupling them to obtain a better drag reduction and practical feasibility. We compare two types of non stationary injections, the first has a sinusoidal temporal waveform, while the second presents a dissymetrical temporal evolution. The latter alternates high acceleration and weak deceleration of the velocity injection.*

## Mots-clefs :

**Contrôle dual ; réduction de frottement ; soufflage instationnaire ; contrôle suboptimal**

## 1 Introduction

On sait maintenant que le contrôle suboptimal est une stratégie de contrôle efficace. Son application, dans une optique de diminution de la contrainte turbulente pariétale a été intensément étudiée durant les dernières décennies. La littérature sur ce sujet est désormais assez vaste et le lecteur pourra consulter entre autres les travaux effectués par *Bewley*, [1] pour plus de précisions. Si on sait que l'utilisation d'un tel procédé peut mener à des réductions de traînée proche de 25%, la principale difficulté rencontrée reste son application dans un cadre expérimental. En effet, le principal désavantage réside dans la nécessité de disposer d'une densité surfacique de MEMS beaucoup trop importante pour être applicable ; on peut montrer que la distance séparant chaque micro-actionneur ( et micro-capteur ) doit être de l'ordre de 5 unités pariétales, soit l'équivalent de l'épaisseur de la sous couche visqueuse.

Pour remédier à cela, on propose ici un contrôle de type dual dont la principale caractéristique repose sur l'interaction entre deux types de contrôles : un soufflage instationnaire, localisé

en espace et périodique en temps ( contrôle en boucle ouverte ) suivit d'un contrôle suboptimal ( contrôle en boucle fermée ).

De précédentes études, [2], ont mis en évidence la réponse de la turbulence de proche paroi à un soufflage localisée et sinusoïdale en temps. Avec une sévérité faible et une grande fréquence d'oscillation, cette excitation provoque l'apparition d'une zone relaminarisée sur une distance de 50 unités pariétales après la fente. La présence de cette zone de faible contrainte pariétale provient de la création d'une nappe de vorticité positive qui dilue la vorticité négative prédominante près de la paroi. Mais cette zone est instable et la nappe de vorticité positive s'enroule. Il en résulte la création d'un vortex transversal à l'origine d'une augmentation importante de la traînée si on la compare à l'état non manipulé. Il est important de souligner que la phase relaminarisée apparaît lors de l'accélération du soufflage et que la création systématique du vortex transversal correspond à sa décélération.

Même si ces résultats sont très concluant dans une optique de contrôlabilité de la turbulence, la direction de recherche s'est orientée vers la dépendance de ce mécanisme à la forme temporelle du soufflage. Une injection dissymétrique se composant d'une forte accélération et suivie d'une faible décélération a été étudiée. Cette forme temporelle est en phase avec l'idée générale qu'une faible décélération a tendance à moins déstabiliser l'écoulement évitant donc l'enroulement de la nappe de vorticité positive en un vortex transversal.

Du fait du caractère cyclo-stationnaire de l'injection, une quantité turbulente peut s'exprimer de la forme :

$$q(\vec{x}, t) = \bar{q}(\vec{x}) + \tilde{q}(\vec{x}, t/T) + q'(\vec{x}, t)$$

où  $\bar{q}$  représente la moyenne temporelle,  $\tilde{q}$  la moyenne oscillante,  $q'$  les fluctuations et  $T$  la période d'oscillation du soufflage.

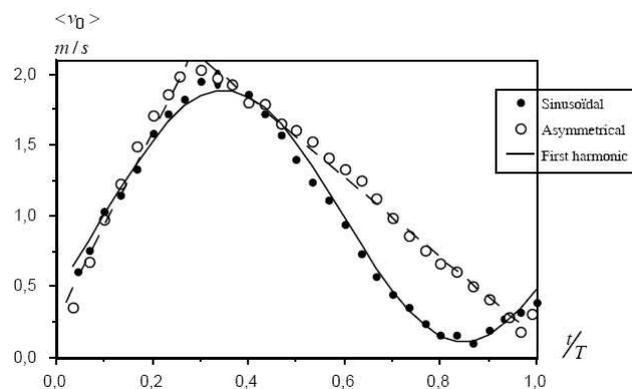


FIG. 1 – Moyenne de phase de la vitesse d'injection. Les deux études, sinusoïdale et dissymétrique, comportent la même période d'oscillation  $T=28\text{ms}$ .

## 2  tude expérimentale

### 2.1 Dispositif expérimental

L'intégralité des mesures a été effectuée dans la soufflerie basse vitesse du L.E.G.I. Un dispositif externe ( pulseur ), spécialement conçu pour cette expérimentation, permet l'application d'un soufflage dissymétrique à une couche limite turbulente développée. Ce dispositif est relié à une fente transversale dont la largeur est de  $0.6\text{ mm}$  et la longueur de  $10\text{ cm}$ , positionnée sur

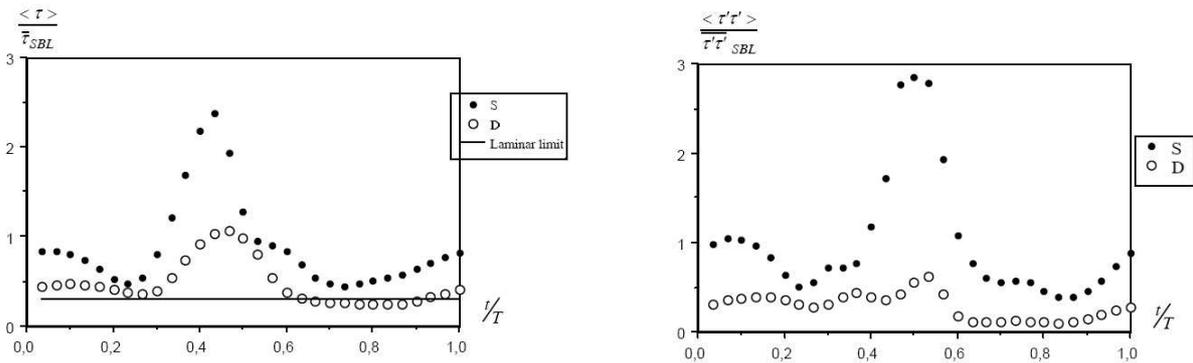


FIG. 2 – Moyenne de phase ( à gauche ) et intensité turbulente ( à droite ) de la contrainte pariétale dans le cas  $S$  et  $D$ . Les résultats sont présentés en  $x^+ = 112$  après la fente

la paroi inférieure de la soufflerie. Les paramètres de l'étude restent identiques à ceux utilisés par *Tardu*, dans les études précédentes, [2], et le nombre de Reynolds basée sur l'épaisseur de la couche limite est fixée à  $Re = 8000$ . Le paramètre de sévérité, noté  $\Theta = \frac{v_0 \cdot L_x}{\int_0^\infty u dy} = 0.006$ , défini comme le rapport du débit d'injection et du débit dans la couche limite, reste significativement faible. Dans les deux études, la période d'oscillation est fixée à  $28ms$ , correspondant à une fréquence  $f^+ = 0.0134$  unités pariétales. Il faut souligner que cette fréquence doit être supérieure à un seuil critique car elle conditionne l'épaisseur de confinement de la couche de vortacité positive ( épaisseur de la couche de Stokes ) et donc sa déstabilisation potentielle en un vortex transversale. La figure 1 présente la moyenne de phase de la vitesse imposée dans les deux types d'expérimentation : Sinusoïdale ( $S$ ) et Dissymétrique ( $D$ ). La phase d'accélération est similaire dans les deux cas alors que la décélération est approximativement 0.4 fois plus faible lors de l'injection dissymétrique. Les deux études sont effectuées *in situ* et dans les mêmes conditions expérimentales.

## 2.2 Résultats expérimentaux

La figure 2 ( à gauche ) compare les moyennes de phases de la contrainte pariétale,  $S$  et  $D$  adimensionnalisées par la contrainte moyenne dans un cas non manipulé (  $\bar{\tau}_{SBL}$  ). Ces deux études sont présentées à une distance  $x^+ = 112$  après la fente. Le pic de contrainte situé à  $t/T = 0.4$  dans le cas sinusoïdal provient de la création du vortex transversale comme explicité précédemment. La réaction de la turbulence de proche paroi est différente lors du soufflage dissymétrique, on constate non seulement une diminution drastique de ce pic mais aussi de la globalité des contraintes. La phase relaminarisée s'étend maintenant sur 70% de la période d'oscillation. Le rapport des contraintes moyennées temporellement s'élève à  $\frac{\bar{\tau}_D}{\bar{\tau}_S} = 0.5$ , traduisant le fait que le soufflage dissymétrique est deux fois plus efficace en terme de réduction de traînée.

La présence du vortex transversal est associée à une augmentation drastique des fluctuations turbulentes comme le montre la figure 2 ( à droite ) dans le cas sinusoïdal. La valeur du pic  $\langle \tau' \tau' \rangle_S$  est 3 fois supérieure au cas non manipulé. Lors de l'injection dissymétrique l'activité turbulente est quasiment supprimée, confirmant ainsi qu'il n'y a pas de création systématique de structures pénalisantes pour la contrainte pariétale.

Les résultats obtenus lors d'une injection sinusoïdale sont identiques à ceux obtenus par *Tardu* [2], certifiant la bonne répétabilité des résultats.

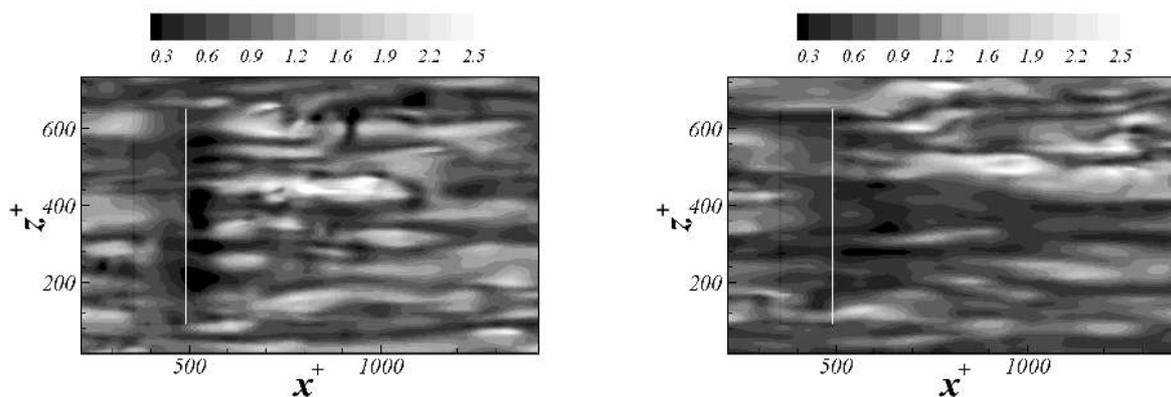


FIG. 3 – Distribution de la contrainte sur la paroi inférieure du canal. Le cas sinusoïdal est présenté sur l'image de gauche et la cas dissymétrique sur l'image droite. L'écoulement transite de la gauche vers la droite. Les valeurs de la contrainte sont adimensionnalisées par  $\bar{\tau}_{SBL}$  sur les deux images

### 3 Simulation numérique

#### 3.1 Étude numérique des deux types de soufflage

##### 3.1.1 Description du code DNS

Les bases du code de simulation numérique directe (*D.N.S.*) utilisé ont été développées par *Orlandi*, [3]. La discrétisation des équations de Navier Stokes est de type différence fini et la résolution fait appel à la méthode du *Pas Fractionnel*. Les termes non linéaires sont résolus explicitement par un schéma d'*Adams – Bashforth*. Des conditions périodiques sont appliquées dans les directions homogènes de l'écoulement, c'est à dire dans la direction transversale et longitudinale. De ce fait, l'utilisation d'une *FFT* dans ces directions permet d'augmenter la rapidité du calcul.

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  $(x, y, z)$ . Le nombre de Reynolds au centre du canal est fixé à  $Re = 4200$ . Les différents types de soufflage sont appliqués simplement comme des conditions limites évoluant de manière temporelle.

Les deux types d'injections sont étudiées en parallèles, c'est à dire que les calculs évoluent à partir d'un champs initial commun. Ceci présente l'avantage de pouvoir comparer à chaque étape du calcul, les évolutions dépendant directement du type de soufflage imposé.

Les différentes images présentées ci après ont été sélectionnées sur un échantillon de 30000 itérations temporelles, représentant 40 périodes de soufflages. Le temps CPU utilisé pour cette étude est approximativement de 300 heures sur un IBM quadri-Pro à 1.45Ghz.

##### 3.1.2 Résultats numériques

La figure 3 présentent la distribution instantanée des contraintes pariétales sur la paroi inférieure. L'écoulement transite de la gauche vers la droite. Ces deux images ont été choisies car elles présentent la plus importante zone relaminarisée après la fente.

Le cas sinusoïdal présente des zones de faibles contraintes concentrées juste après la fin de la fente. La valeur est en général plus intense que dans le cas dissymétrique mais ne s'étend pas dans la direction longitudinale de l'écoulement. De plus, ces zones relaminarisées laissent

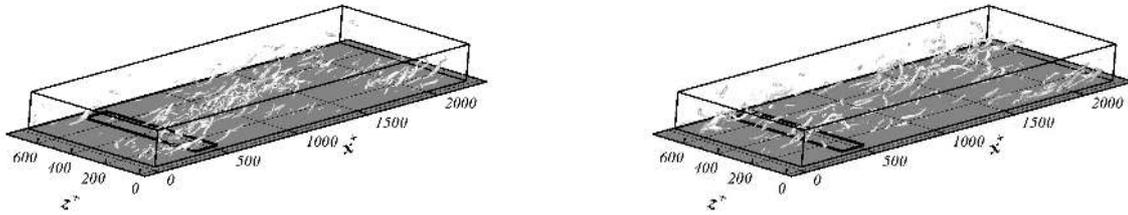


FIG. 4 – Détection de structures par la méthode des  $\lambda_2$ . Le cas sinusoïdal est présenté sur l'image de gauche et la cas dissymétrique sur l'image droite.

rapidement la place à des zones de hautes contraintes en  $x^+ \approx 100$  après la fente résultant de déstabilisations localisées de la nappe de vorticité positive. En revanche dans le cas dissymétrique, les zones de faibles contraintes sont beaucoup plus étendues atteignant 200 à 300 unités pariétales après la fente.

Une détection de vortex de type  $\lambda_2$ , a été mise en place pour rendre compte de l'impact des différents types de soufflages sur la population des structures quasi longitudinales. Les figures présentées sur la figure 4 résultent d'une détection de structure par la méthode des  $\lambda_2$ . Les deux champs sont présentés au même instant du calcul. Cette méthode constitue une première observation de la modification de l'activité turbulente suite aux différents soufflages. On constate que cette activité turbulente est fortement diminuée dans le cas dissymétrique, la population des structures a grandement diminuée, ce qui est en accord avec les résultats expérimentaux. Cependant, l'étude numérique du soufflage sinusoïdal ne révèle pas la présence d'un vortex transversal. Deux explications principales peuvent être avancées, la première concerne la résolution spatiale trop faible de la boite de calculs empêchant une résolution précise de la forme du jet de soufflage. La seconde concerne la différence entre le nombre de Reynolds expérimental et numérique.

### 3.2 Formulation du contrôle suboptimal

Le contrôle suboptimal a pour but d'établir à chaque itération temporelle du calcul, une distribution optimale d'aspiration et soufflage à la paroi en chaque point du maillage. Cette approche diffère du concept de contrôle optimal par le fait qu'il n'y a pas ici de notion d'horizon de prédiction. La formulation du problème d'optimisation nécessite la définition d'une fonction de c ut propre à l'objectif du contrôle. Soit  $J(\phi)$  cette fonction :

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

où  $\phi(x_1, x_3)$  est une distribution spatiale de vitesse à la paroi représentant l'emplacement des points d'aspiration et de soufflage et  $k$  le c ut du contrôle. La quantité  $\Gamma$  est la surface de la paroi contrôlée. Le différentiel de Fréchet permet de mesurer la sensibilité de Navier-Stokes à une distribution  $\phi$  quelconque. En introduisant la perturbation linéarisée d'une fonction  $\xi$ , notée  $\tilde{\xi}$ , provoquée par l'application d'une distribution arbitraire  $\tilde{\phi}$ , le différentiel de Fréchet est défini de la manière suivante :

$$\tilde{\xi}(\phi; \tilde{\phi}) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\xi(\phi + \epsilon \tilde{\phi}) - \xi(\phi)}{\epsilon} = \iint_{\Gamma^{\pm}} \frac{D\xi(\phi)}{D\phi} \tilde{\phi} dx_1 dx_3$$

Le système obtenu ne peut être résolu aisément, c'est pourquoi on utilise une formulation adjointe qui donne accès au gradient de la fonction de coût par application de conditions limites judicieuses. On obtient ainsi :

$$\frac{DJ(\phi)}{D\phi} = \frac{k}{\Gamma} \phi - \frac{\beta_1}{\beta_2 \Gamma} \pi$$

où  $\pi$  est l'analogie de la pression, résultant de la résolution du problème adjoint et  $\beta_{1,2}$  sont des constantes. L'étape suivante concerne la recherche de minimum de la fonction  $J(\phi)$  par l'intermédiaire de son gradient déterminé précédemment. Pour ce faire, des méthodes de recherche classique des optimum peuvent être utilisées comme la méthode de la Pente Raide ou du Gradient Conjugué. L'algorithme général de recherche du minima s'écrit :

$$\phi^{k+1} = \phi^k - \alpha^k g^k$$

où  $g^k$  est le gradient de la fonction de coût et  $\alpha^k$ , un paramètre de recherche spatiale dépendant de la méthode itérative choisie. Il est à noter que ces méthodes donnent accès à des minimum locaux et non globaux de la fonction  $J$ , rendant le résultat de la recherche itérative dépendant de la première distribution  $\phi$  à tester.

#### 4 Conclusions

On a présenté les résultats numériques et expérimentaux concernant l'impact de deux différents types de soufflages, sinusoïdal et dissymétrique, sur le comportement de la contrainte pariétale. Même si l'apparition du vortex transversal n'est pas vérifié numériquement, les résultats numériques restent cohérent avec les conclusions des études expérimentales. Le soufflage dissymétrique s'étend beaucoup plus dans la direction de l'écoulement, contrairement au cas sinusoïdal qui provoque l'apparition de zones de fortes contraintes. Le soufflage dissymétrique est donc beaucoup plus avantageux en terme de réduction de frottement. Une étude statistique de l'expérimentation numérique s'avère nécessaire afin de consolider les résultats et quantifier les différentes observations.

#### Références

- [1] T. Bewley, P. Moin, and R. Temam. Dns-based predictive control of turbulence : an optimal benchmark for feedback algorithms. *J. Fluid Mech.*, 447 :179–225, 2001.
- [2] S. Tardu. Active control of near-wall turbulence by local oscillating blowing. *J. Fluid Mech.*, 439 :217–253, 2001.
- [3] P. Orlandi. Fluid flow phenomena : A numerical toolkit. Kluwer Academic Publishers, 2002.