

Contrôle actif par Simulation aux Grandes Echelles d'un écoulement de canal turbulent

Ali El Shrif[†], Laurent Cordier[‡] & Salaheddine Skali Lami[†]

[†] LEMTA, UMR 7563, 2, avenue de la forêt de Haye, BP160 54504 Vandoeuvre les Nancy

[‡] LEA, UMR 6609, 43, rue de l'Aérodrome, 86036 Poitiers cedex
ali.elshrif@ensem.inpl-nancy.fr

Résumé :

Dans cette étude, nous analysons en terme de réduction de traînée moyenne et d'efficacité énergétique l'influence de la position du plan de détection et du nombre de Reynolds sur une stratégie de contrôle par opposition. Il s'avère que pour un nombre de Reynolds fixé, la position du plan de détection associée au maximum de réduction de traînée semble correspondre aux régions de production de la turbulence. Nos résultats confirment que la réduction de traînée diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds et que l'efficacité énergétique est maximale pour une position du plan de détection différente de celle correspondant au maximum de réduction de traînée.

Abstract :

In this study, we analyze for an opposition control strategy the influence of the sensing plane location and the Reynolds number in terms of mean drag reduction and energetic efficiency. It proves that for a given Reynolds number, the location of the sensing plane associated to the maximum of drag reduction seems to correspond to the areas of turbulence production. Our results confirm that the drag reduction decreases with the increase of the Reynolds number and that the energetic efficiency is maximum for a position of the detection plane different from that corresponding to the maximum of drag reduction.

Mots-clefs :

contrôle d'écoulement ; contrôle par opposition ; canal turbulent ; simulation SGE

1 Introduction

Formellement, l'application du contrôle optimal aux équations de Navier-Stokes ne pose pas de problème majeur (Bewley *et al.*, 2001, par exemple). Pour un écoulement tridimensionnel en régime turbulent, la difficulté provient du fait que le système optimal (équations d'état, équations adjointes, conditions d'optimalité), associé au problème d'optimisation sous contraintes, ne peut être résolu que de manière itérative ce qui s'accompagne d'un coût de calcul prohibitif (CPU et mémoire). Une stratégie consiste à remplacer dans certaines phases du processus d'optimisation, le modèle détaillé de l'écoulement obtenu traditionnellement par Simulation Numérique Directe (SND) par des modèles approchés. Contrairement au cas du cylindre (Bergmann *et al.*, 2005), où nous avons considéré un modèle réduit POD, nous avons choisi dans le cas du canal plan turbulent étudié ici (voir figure 1) une Simulation aux Grandes Echelles (SGE). Afin de qualifier la capacité de nos codes à reproduire la dynamique contrôlée de l'écoulement de canal, nous avons réalisé une étude de forçage de l'écoulement à l'aide d'une loi de contrôle déterminée de manière heuristique. Dans cette communication, nous considérons le contrôle par opposition proposé par Choi *et al.* (1994). Le principe, représenté sur la figure 2, consiste à imposer aux parois de manière instationnaire la vitesse opposée à celle détectée au cœur du canal à une distance $y_d^+ = y_d u_\tau / \nu$ de la paroi, où $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ est la vitesse de frottement à

la paroi. Cette action a pour effet de neutraliser l'évolution des tourbillons longitudinaux. Le cycle de production de la turbulence est alors interrompu et la force de traînée aux parois est ainsi réduite. Naturellement, la position du plan de détection joue un rôle important dans ce type de contrôle. Par la suite, ce rôle sera analysé pour différentes valeurs du nombre de Reynolds $Re_\tau = u_\tau \delta / \nu = 80, 100, 180, 360$, où δ est la demi-hauteur du canal. Par ailleurs, nous étudierons l'influence du nombre de Reynolds sur l'efficacité énergétique de la méthode de contrôle, en quantifiant le rapport de la puissance économisée par la réduction de traînée sur la puissance nécessaire au contrôle.

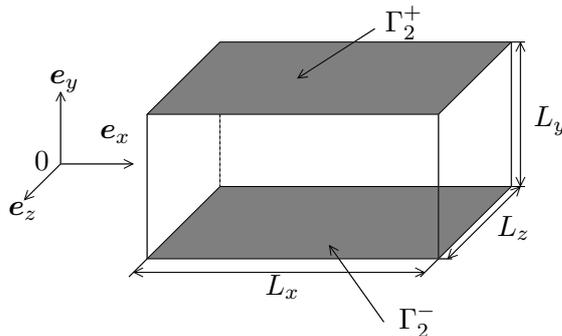


FIG. 1 – Géométrie du canal turbulent.

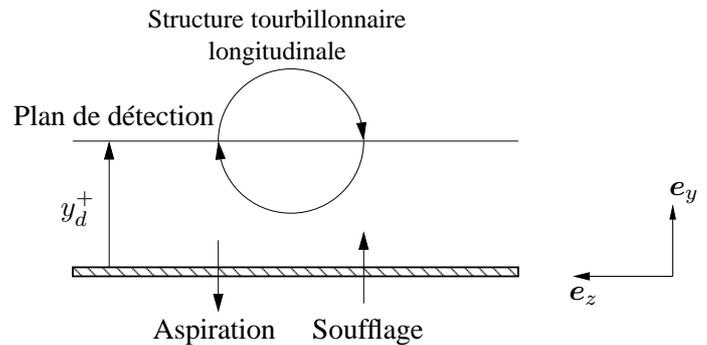


FIG. 2 – Principe schématique du contrôle par opposition.

2 Méthodes Numériques

Dans cette étude, un modèle de Smagorinsky avec une procédure dynamique proposée par Lilly (1992) est utilisé pour les simulations aux grandes échelles. Les équations de quantité de mouvement filtrées sont résolues sous forme adimensionnée avec des méthodes numériques classiques (Chang, 2000; Bewley *et al.*, 2001). L'écoulement est supposé périodique dans les directions longitudinale e_x et transversale e_z . Le maillage est à pas constant dans ces directions, et à pas non constant dans la direction normale e_y (maillage en tangente hyperbolique). Une grille décalée est utilisée pour discrétiser en espace les variables d'état. Les dérivées spatiales sont évaluées par une méthode de différence finie d'ordre 2. Les équations de Navier-Stokes filtrées sont discrétisées en temps par un schéma mixte Runge-Kutta d'ordre 3 (termes explicites) / Crank-Nicholson (termes implicites). L'objectif étant d'utiliser ce code pour des applications liées au contrôle d'écoulement, tous les termes convectifs et diffusifs faisant intervenir des dérivées dans la direction normale à la paroi sont ici traités de manière implicite. La condition d'incompressibilité est imposée par une méthode à pas fractionnaire pour laquelle une équation de Poisson est résolue à chaque sous-pas de temps par méthode spectrale. Enfin, toutes les simulations numériques sont réalisées à débit constant.

3 Résultats de simulations SGE pour l'écoulement non contrôlé

Afin de valider notre code de simulation numérique en écoulement non contrôlé, nous comparons pour $Re_\tau = 180$ nos statistiques à celles obtenues dans les simulations numériques directes de Moser *et al.* (1999) (noté MKM 99 par la suite). Le tableau 1 donne pour chaque nombre de Reynolds les grandeurs caractéristiques des simulations : les nombres de Reynolds définies sur les vitesses moyenne et au centre du canal (Re_m et Re_c), les dimensions du domaine (L_x, L_y, L_z), les nombres de points de maillage (N_x, N_y, N_z) et enfin les résolutions en unité

de paroi dans chacune des directions (Δ_x^+ , $\Delta_{y_w}^+$, Δ_z^+). Les tailles de domaine dans les directions longitudinale et transversale ont été ajustées de manière à ce que les champs de vitesse soient décorrélés dans le domaine de calcul. Le profil de vitesse moyenne obtenu par SGE est comparé

TAB. 1 – Grandeurs caractéristiques des simulations.

	Re_τ	Re_m	Re_c	L_x	L_y	L_z	N_x	N_y	N_z	Δ_x^+	$\Delta_{y_w}^+$	Δ_z^+
S_1	80	2612.1	1655.2	8π	2	3π	64	65	64	31.4	0.11	11.8
S_2	100	3030.5	1819	4π	2	$\frac{4}{3}\pi$	64	65	64	19.6	0.14	6.54
S_3	180	5600.2	3214.1	4π	2	$\frac{4}{3}\pi$	64	65	64	35.3	0.25	11.7
S_4	360	12115.9	6834.2	2π	2	$\frac{4}{3}\pi$	64	97	64	35.3	0.326	13.25
MKM 99	180	–	3300	4π	2	$\frac{4}{3}\pi$	128	129	128	17.5	0.05	5.8

avec le profil moyen de référence sur la figure 3(a). On constate qu'il y a un bon accord général dans la zone de sous-couche visqueuse et dans la région logarithmique. Par ailleurs, les profils de déviations standards des composantes de vitesse longitudinale, normale et transversale sont représentées respectivement sur les figures 3(b), 3(c) et 3(d) où ils sont comparés avec les profils de référence. De manière similaire à des études antérieures (Chang, 2000, par exemple), on observe que le profil de la vitesse longitudinale est légèrement sur-évalué alors que les profils des autres composantes sont sous-évaluées. En première approximation, on peut cependant considérer que les résultats obtenus par SGE sont en bon accord avec ceux obtenus par SND pour un maillage beaucoup plus important.

4 Contrôle par opposition

L'objectif de cette section est d'évaluer en terme de réduction de traînée moyenne et d'efficacité énergétique l'influence de la position du plan de détection y_d^+ et du nombre de Reynolds Re_τ sur le contrôle par opposition. La figure 4 représente les résultats d'une étude de l'influence de la position du plan de détection sur le frottement à la paroi pour $Re_\tau = 180$. On constate qu'en fonction de la position du plan de détection l'efficacité du contrôle par opposition varie. L'évolution du frottement moyen en temps $\langle \tau_w \rangle_T$ avec la position de détection (voir figure 5) est semblable à celle déterminée par Chang *et al.* (2002) dans une étude similaire réalisée par SGE. En effet, on constate que la traînée diminue avec l'augmentation de la valeur de la position du plan de détection et cela jusqu'à une position limite à partir de laquelle le frottement à la paroi augmente considérablement. On retrouve également en parfait accord avec les résultats de Hammond *et al.* (1998) que la position "optimale" du plan de détection (27% de réduction de traînée) correspond à $y_d^+ = 15, 6$. D'un point de vue physique, l'action du contrôle par opposition peut être vue comme l'introduction d'un mur virtuel situé à une hauteur moitié par rapport à la position du plan de détection (figure 6). A la surface de ce mur virtuel, les fluctuations de la vitesse normale sont presque nulles, ce qui empêche le transfert vertical des structures énergétiques de l'écoulement vers la paroi.

Par ailleurs, la position du plan de détection associée au maximum de réduction de traînée semble correspondre aux régions de production de la turbulence. En effet, on constate sur la figure 5 que la position du plan de détection se décale progressivement vers les parois lorsque le nombre de Reynolds augmente. Or, Fischer *et al.* (2001) ont mis en évidence, à partir de bilans énergétiques obtenus par simulations numériques directes d'un écoulement de canal pour des nombres de Reynolds compris entre 100 et 400, que le pic de production de la turbulence se décalait vers les parois lorsque le nombre de Reynolds augmentait.

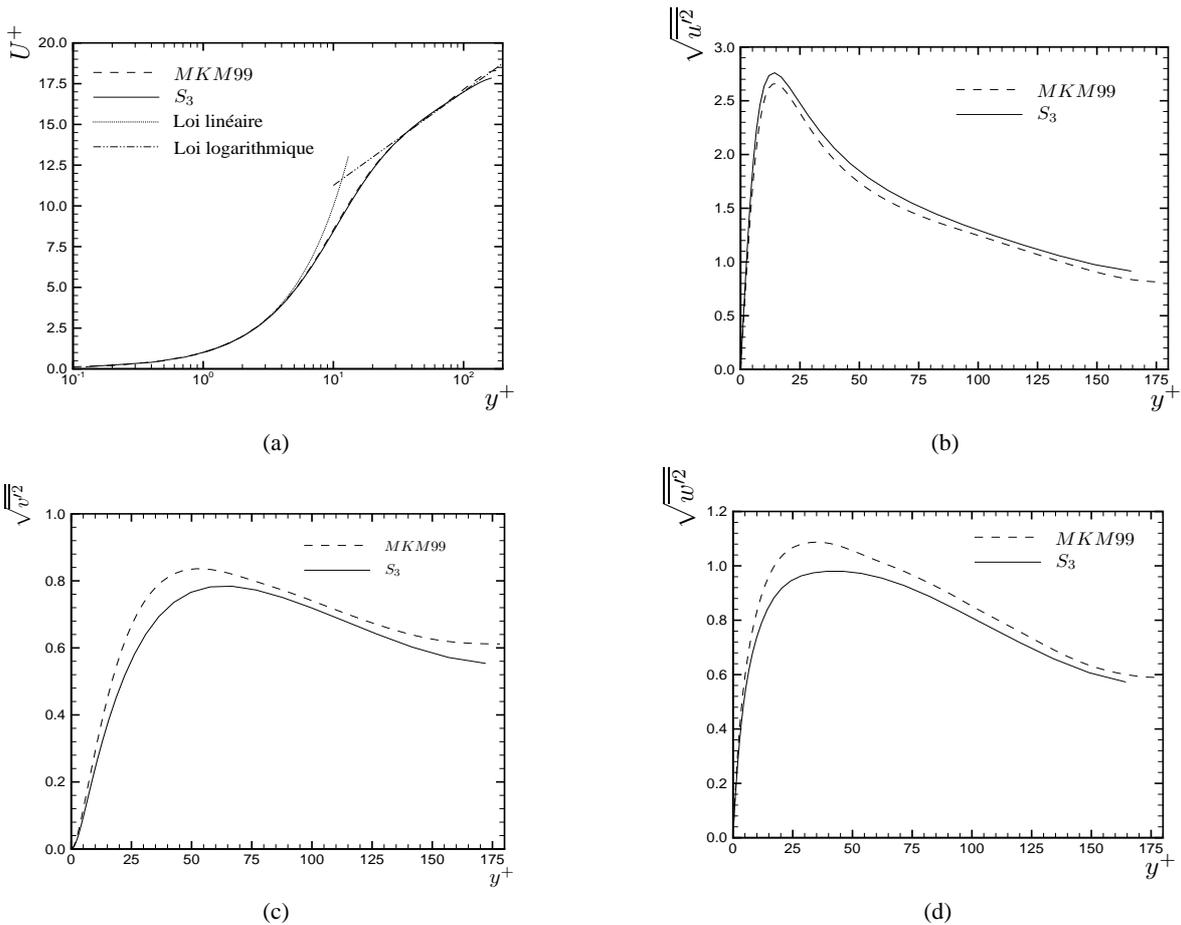


FIG. 3 – Comparaisons pour $Re_\tau = 180$ de résultats issus de SGE avec ceux obtenus par Moser *et al.* (1999). (a) Vitesse moyenne en unité de paroi. (b), (c) et (d) déviations standards des composantes de vitesses axiale, normale et transversale.

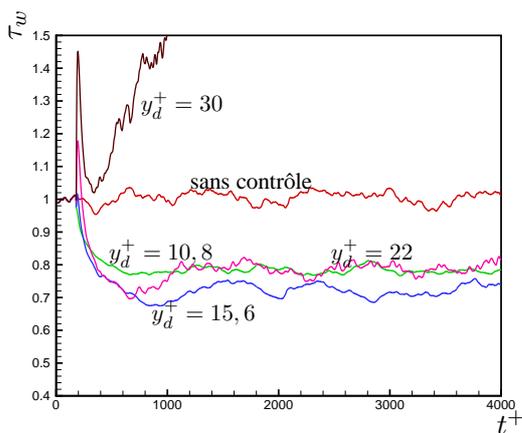


FIG. 4 – Evolution temporelle pour $Re_\tau = 180$ du frottement à la paroi pour différentes positions du plan de détection.

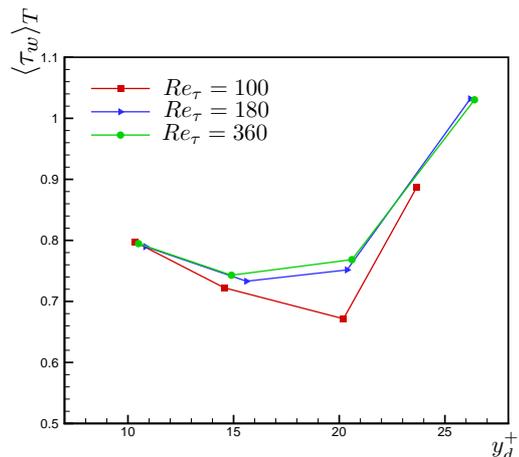


FIG. 5 – Frottement temporel moyen à la paroi en fonction de la position du plan de détection pour différentes valeurs du nombre de Reynolds.

L'évolution temporelle de la traînée est représentée sur la figure 7 pour le plan de détection

associé au maximum de réduction de traînée. Pour $Re_\tau = 80$, le contrôle a réussi à relaminariser l'écoulement. Jusqu'à 48% de réduction de traînée est ainsi obtenu. Pour les valeurs plus grandes du nombre de Reynolds, le contrôle n'a pu parvenir à relaminariser l'écoulement. Cependant, on obtient encore des réductions significatives de traînée moyenne : 32% de réduction pour $Re_\tau = 100$, 27% pour $Re_\tau = 180$, et encore 25% pour $Re_\tau = 360$. L'influence des effets visqueux est donc claire. Lorsque le nombre de Reynolds augmente l'efficacité du contrôle par opposition diminue.

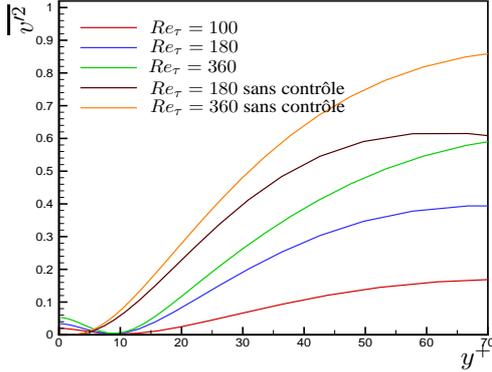


FIG. 6 – Fluctuations de la vitesse normale pour différents nombres de Reynolds. Le maximum de réduction de traînée est représenté.

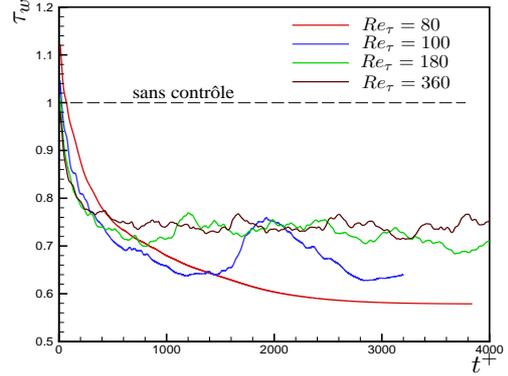


FIG. 7 – Evolution temporelle du frottement à la paroi pour différents nombres de Reynolds. Le maximum de réduction de traînée est représenté.

Pour que la stratégie de contrôle soit utilisable en pratique, il faut que la puissance nécessaire au contrôle \mathcal{P}_Φ soit plus faible que la puissance économisée par la réduction de traînée \mathcal{P}_D . Or, la puissance dépensée pour le contrôle peut être évaluée (Bewley *et al.*, 2001) par la relation :

$$\mathcal{P}_\Phi = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \int_{\Gamma_2^\pm} \left(|\Phi| \frac{\Phi^2}{2} + |\Phi p| \right) d\Gamma dt$$

où Γ_2^\pm représente les parois du canal et où $\Phi = -n_2 \cdot u_2$ détermine le contrôle appliqué à la paroi (n_2 définissant la normale unité orientée vers l'extérieur du domaine).

Quant à elle, la puissance préservée par l'action du contrôle peut être évaluée (Choi *et al.*, 1994) par la relation :

$$\mathcal{P}_D = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[(-P_{,x}^{noc} + P_{,x}^{oppc}) \int_{\Omega} u_1 d\Omega \right] dt$$

où $P_{,x}^{noc}$ et $P_{,x}^{oppc}$ représentent respectivement les gradients de pression longitudinaux pour l'écoulement non contrôlé et contrôlé par opposition.

Une mesure de l'efficacité énergétique de la procédure est donc donnée par le rapport $\mathcal{P}_D/\mathcal{P}_\Phi$. Ce rapport est représenté sur la figure 8 pour différentes valeurs de nombres de Reynolds et de positions du plan de détection. Conformément aux études précédentes, on constate que l'efficacité énergétique est maximale pour une position du plan de détection différente de celle correspondant au maximum de réduction de traînée obtenue à la figure 5.

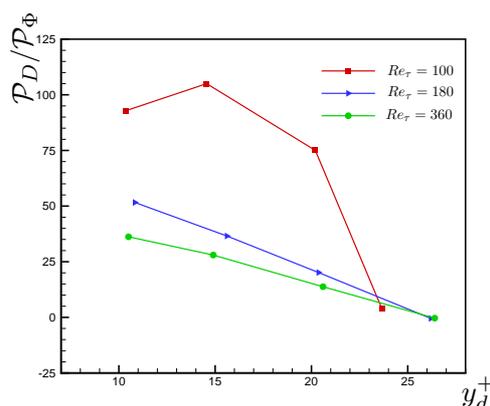


FIG. 8 – Efficacité énergétique pour différents nombres de Reynolds en fonction de la position du plan de détection.

5 Conclusions

Dans ce travail, on a analysé en terme de réduction de traînée moyenne et d'efficacité énergétique l'influence de la position du plan de détection y_d^+ et du nombre de Reynolds Re_τ sur une stratégie de contrôle par opposition. Il s'avère que pour un nombre de Reynolds fixé, la position du plan de détection associée au maximum de réduction de traînée semble correspondre aux régions de production de la turbulence. Par ailleurs, nos résultats confirment que la réduction de traînée diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. En effet, pour $Re_\tau = 80$ la réduction de traînée est égale à 48% et l'écoulement est relaminarisé alors que pour $Re_\tau = 360$ la réduction de traînée n'est que de 25%. Enfin, on constate que l'efficacité énergétique est maximale pour une position du plan de détection différente de celle correspondant au maximum de réduction de traînée.

Références

- M. BERGMANN, L. CORDIER et J.-P. BRANCHER : Optimal rotary control of the cylinder wake using POD Reduced Order Model. *Phys. Fluids*, 17(9):097101 :1–21, 2005.
- T. R. BEWLEY, P. MOIN et R. TEMAM : DNS-based predictive control of turbulence : an optimal benchmark for feedback algorithms. *J. Fluid Mech.*, 447:179–225, 2001.
- Y. CHANG : *Approximate models for optimal control of turbulent channel flow*. Thèse de doctorat, université de Rice, 2000.
- Y. CHANG, S. S. COLLIS et S. RAMAKRISHNAN : Viscous effects in control of near-wall turbulence. *Phys. Fluids*, 14(11):4069–4080, 2002.
- H. CHOI, P. MOIN et J. KIM : Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows. *J. Fluid Mech.*, 262:75–110, 1994.
- M. FISCHER, J. JOVANOVIĆ et F. DURST : Reynolds number effects in the near-wall region of turbulent channel flows. *Phys. Fluids*, 13(6):1755–1767, 2001.
- E. P. HAMMOND, T. R. BEWLEY et P. MOIN : Observed mechanisms for turbulence attenuation and enhancement in opposition-controlled wall-bounded flows. *Phys. Fluids*, 10(9):2421–2423, 1998.
- D. LILLY : A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. *Phys. Fluids A*, 4:633–635, 1992.
- R. D. MOSER, J. KIM et N. N. MANSOUR : Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau = 590$. *Phys. Fluids*, 11(4):943–945, 1999.