

UTILISATION DE LA SIMULATION NUMERIQUE POUR L'ETUDE DE LA REDUCTION DU NIVEAU SONORE PRODUIT PAR UN ECOULEMENT AFFLEURANT UNE CAVITE

Xavier Gloerfelt[†], Olivier Marsden[‡], et Christophe Bailly[‡]

[†] Laboratoire de Simulation Numérique en Mécanique des Fluides
ENSAM, 151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris

[‡] Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique
UMR CNRS 5509 & Ecole Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully.

INTRODUCTION

Lorsqu'un écoulement affleure une cavité, des oscillations autoentretenues de forte amplitude apparaissent. L'analyse du phénomène montre qu'il s'agit d'un couplage aéroacoustique : les structures tourbillonnaires qui se forment dans la couche cisailée entre les deux coins de la cavité impactent le bord aval de la cavité générant des ondes de pression. Ces ondes rétroagissent sur l'écoulement conduisant à une résonance entre la formation des tourbillons au coin amont et l'émission acoustique lors de l'impact sur le coin aval. La suppression de ces oscillations constitue un défi important pour les techniques de contrôle modernes dans la mesure où une faible variation des conditions initiales peut rendre caduque un système de contrôle précédemment réglé et peut même conduire à un renforcement des oscillations.

D'un point de vue simulation numérique, l'écoulement sur une cavité est une configuration très intéressante car elle allie une simplicité géométrique à une grande richesse des phénomènes physiques mis en jeu. C'est pourquoi cet écoulement est devenu un cas test très populaire ces dernières années pour appréhender la capacité des codes à capter ces phénomènes fortement instationnaires et sensibles au traitement numérique choisi. L'enjeu est également pratique car il s'agit d'une configuration représentative de nombreuses applications (train d'atterrissage des avions, toit ouvrant d'une voiture,

...). La simulation directe des équations de Navier-Stokes compressibles instationnaires a permis d'obtenir simultanément les champs acoustique et aérodynamique [1, 2] afin d'étudier les mécanismes générant les oscillations. Cette analyse peut permettre de développer et de tester des stratégies de contrôle adaptées.

De nombreuses études se sont intéressées au contrôle des oscillations d'un écoulement affleurant une cavité. Les premières d'entre elles ont considéré un contrôle en boucle ouverte de type passif (modification géométrique) ou actif (modification de l'écoulement moyen par soufflage ou par aspiration). Une revue très complète est effectuée par Cattafesta *et al.* [3]. Une recherche de sophistication est engagée petit à petit afin d'améliorer les performances tout en réduisant le coût du contrôle. Des dispositifs "intelligents" en boucle fermée ont été testés expérimentalement [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Ils reposent sur plusieurs choix délicats. Quel actuateur? Quelle loi de contrôle? Avec ou sans *feedback*? Avec ou sans identification? Faut-il s'appuyer sur des modèles physiques? Il est intéressant de considérer comment la simulation numérique qui est un puissant outil pour analyser les phénomènes mis en jeu peut aider à répondre à ces questions. Dans une première partie, on s'efforcera de souligner quelques éléments que peut apporter la simulation. Une première étude [11] est présentée ensuite avec pour objectif l'application d'un contrôle adaptatif en temps réel dans une simulation directe tridimensionnelle du

bruit rayonné par un écoulement affleurant une cavité. Après avoir décrit le choix d'un algorithme de contrôle, les résultats sont présentés et montrent une réduction notable du niveau sonore rayonné.

INTÉRÊTS DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE

Actuateur. Si nous commençons par le problème de l'actuateur, c'est qu'en pratique il est évidemment indispensable et conditionne parfois le choix d'une stratégie de contrôle. Souvent, des modèles élaborés très efficaces en théorie se trouvent limités par les capacités de l'actuateur auquel il est associé. Si le concept d'un actuateur idéal est difficilement réalisable expérimentalement, il devient imaginable pour une simulation numérique. On pourrait alors se focaliser sur l'optimisation d'une loi de contrôle ou sur l'évaluation de techniques novatrices sans se préoccuper dans un premier temps du caractère réaliste de l'actuateur. La connaissance précise des capacités attendues pour l'actuateur peut guider son choix et sa réalisation.

Test des lois de contrôle. Dans la quasi totalité des mises en œuvre pratique, la loi de contrôle est déterminée de façon numérique par la combinaison de filtres numériques et d'algorithmes d'optimisation. Leur implémentation dans une simulation paraît donc naturelle et va permettre de tester les nombreuses combinaisons et paramètres de la théorie moderne du contrôle. On pourra aussi évaluer des modèles basés sur la physique, comme un modèle de type Rossiter pour une cavité, qui sont difficiles à transcrire dans une boîte noire électronique.

Construction de modèles réduits. L'obtention de toutes les données acoustiques et aérodynamiques lors d'une simulation directe aéroacoustique peut permettre de mettre au point des modèles d'ordre réduit, rendu nécessaire par le coût important des simulations directes. Pour le bruit de cavité, il faut par exemple reproduire précisément la dynamique tridimensionnelle

des tourbillons responsables de l'émission sonore. Rowley *et al.* [12] ont par exemple appliqué une décomposition en modes orthogonaux (POD) et une projection de Galerkin pour reproduire la dynamique d'un écoulement affleurant une cavité. La projection sur les quelques modes qui représentent l'essentiel du contenu énergétique permet de remplacer le système des équations de Navier-Stokes par un nombre réduit d'équations différentielles ordinaires. L'enjeu consiste maintenant à obtenir un modèle pouvant répondre à l'effet d'un actuateur. Se posent alors les problèmes de l'introduction de l'actuateur dans la projection et de sa fiabilité lorsque l'actuateur modifie substantiellement les propriétés de l'écoulement [13].

Utilisation des équations adjointes. Ce point de vue du contrôle plus théorique que pratique peut s'étendre à des situations de plus en plus complexes grâce à l'utilisation conjointe des simulations directes et adjointes. Le recours aux champs adjoints pour converger vers un contrôle optimal, décrit en détail par Bewley et Liu [14], a été mis en œuvre pour le système des équations PSE dans un canal plan [15], pour la DNS d'un canal plan turbulent [16] ou pour le sillage derrière un cylindre [17]. Les réductions de traînée obtenues sont impressionnantes et plus importantes qu'avec les autres techniques testées. Une telle approche doit permettre de localiser la zone où appliquer le contrôle. Le choix d'une fonction coût peut aussi guider vers la cible la plus judicieuse pour le contrôleur. Cette approche est très séduisante mais le recours itératif aux champs directs et adjoints par DNS ou LES devient vite prohibitif. Là encore, l'utilisation d'un modèle d'ordre réduit semble indispensable.

CHOIX D'UN ALGORITHME DE CONTRÔLE

Contrôle acoustique ou fluïdique. Pour réduire le rayonnement acoustique d'une cavité soumise à un écoulement, on peut essayer de contrer le bruit par de l'anti-bruit (contrôle acoustique) [18] ou bien agir sur l'écoulement

ment qui est la cause du bruit (contrôle fluide). Une tentative de contrôle acoustique par des haut-parleurs a été menée par Kestens et Nicoud [19] à partir d’une simulation des équations de Navier-Stokes 2-D et d’un algorithme de *Moindres carrés récursifs à référence filtrée* (FX-LMS). Ce type d’algorithme est robuste et efficace pour le contrôle actif acoustique [18]. Il requiert cependant une phase d’identification qui a été réalisée sans écoulement, et ne peut donc pas reproduire la dynamique de la cavité.

L’analyse physique du phénomène relie directement l’émission sonore à la déformation des structures cohérentes de la couche cisailée. Agir sur ces structures par un contrôle fluide semble donc naturel. La plupart des études sur le contrôle en boucle fermée essaient d’agir au niveau du coin amont, au point de naissance des instabilités de la couche cisailée. Une petite perturbation peut modifier considérablement l’évolution des perturbations initiales. Le Chatellier *et al.* [20] choisissent au contraire d’exciter la paroi vertical aval pour réaliser en quelque sorte de l’anti-couplage fluide-structure. Dans ce qui suit, on s’intéressera à une excitation fluide au coin amont.

Le contrôle haute fréquence. Une méthode assez radicale consiste à détruire la structuration des tourbillons en introduisant des perturbations à une fréquence beaucoup plus élevée que la fréquence caractéristique des tourbillons. Cette méthode permet des réductions significatives pour les bruits tonal et large-bande [21]. Des actuators spécifiques comme des tubes résonants à très haute fréquence ont été développés [22]. Des simulations ont tentées de reproduire ce contrôle haute fréquence avec un actuateur consistant en un cylindre fixe juste avant la séparation [23] ou avec un jet pulsé dans une LES à Mach 1.19 [24]. Le contrôle à très haute fréquence s’avère robuste et peut fonctionner avec des conditions initiales assez différentes. C’est pour l’instant le dispositif le plus efficace (et le seul) pour les applications supersoniques comme les soutes à

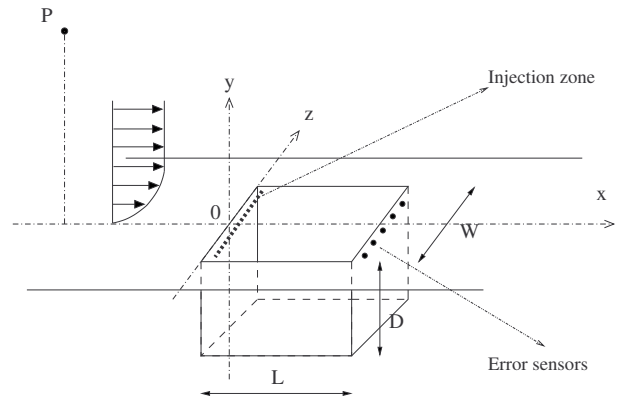


Figure 1: Schéma de la cavité étudiée. La zone d’injection est de forme gaussienne dans le plan (x, y) de demi-largeur 2Δ ($\Delta = L/100$), centrée sur $x = 2\Delta$ et $y = 0$. Dans la direction z , la forme de l’enveloppe est donnée par une fenêtre gaussienne symétrique.

bombes des avions militaires.

Par opposition, on parle parfois de contrôle *basse fréquence* pour qualifier l’excitation de la couche cisailée à des fréquences proches de celles des structures les plus énergétiques. Ce type de contrôle en boucle fermée doit permettre de réduire au maximum le coût du contrôle en utilisant une loi de contrôle adaptée.

Algorithmes feedback et identification. A-t-on besoin d’un algorithme de type *feedback* pour effectuer le contrôle actif basse fréquence en boucle fermée? Si oui, quel est l’endroit le plus adapté pour recueillir l’information nécessaire à sa mise en œuvre? Quels sont les algorithmes *feedback* les plus attractifs/efficaces? Par exemple, doit-on se contenter d’un simple *feedback* ou bien recourir à une identification préalable du système?

On a vu que pour le contrôle actif acoustique, un algorithme de type FX-LMS avec une identification permet de converger vers un contrôle quasi-optimal. Pour un écoulement au dessus d’une cavité, qui est fortement instable et non linéaire, l’utilisation d’un algorithme FX-LMS s’est avérée délicate [25]. La mise en œuvre d’un contrôle *feedback* (avec le capteur d’erreur situé après l’actuateur, voir fig. 1) n’est jamais aisée. L’absence d’information provenant de l’amont de la source secondaire oblige à prédire non pas simplement l’effet

de la propagation mais aussi la forme et la phase du signal primaire, ce qui est d'autant plus difficile que les erreurs commises lors de la prédiction sont amplifiées exponentiellement par la couche cisailée. La phase d'identification du système est particulièrement problématique car le chemin secondaire est indissociable du chemin primaire résonant : le capteur reçoit un signal en l'absence de toute excitation par le jet synthétique. Après de nombreux tests, la vitesse verticale immédiatement après l'application du jet a été utilisée comme signal d'entrée pour l'identification. On a utilisé un bruit blanc sur une bande de fréquence étroite, centrée autour de la fréquence principale des oscillations de la couche cisailée, et avec une amplitude proche de celle des fluctuations à contrôler. Cette identification a fourni des résultats acceptables mais avec des conditions fortement limitatives. Expérimentalement, cette phase d'identification est également délicate. Rowley *et al.* [8] utilise aussi un algorithme adaptatif pour calculer les coefficients d'un filtre numérique. Une différence importante dans leur étude est que le contrôleur est réglé au préalable de façon manuelle afin de stabiliser les oscillations avant l'identification. La réponse fréquentielle du système fournit la fonction de transfert recherchée. Cependant, le résultat n'est interprétable que pour un système linéaire. Cattafesta *et al.* [4] et Cabell *et al.* [6] ont utilisé une méthode des moindres carrés pour identifier une fonction de transfert discrète. 150 à 200 coefficients ont été nécessaires pour l'étude de Cabell *et al.* De plus, une faible cohérence entre le signal d'entrée et le capteur d'erreur contraigne à mener l'identification sur un long interval temporel (10 secondes), difficile à obtenir par une simulation. Plusieurs algorithmes adaptatifs ont été testés par Pillarisetti et Cattafesta [26] ou par Kegerise *et al.* [7]. Il ressort notamment que des filtres à réponse impulsionnelle infinie (IIR, *Infinite Impulse-Response*) sont plus adaptés que des filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR, *Finite Impulse-Response*) pour capter la dynamique du système.

Enfin, on peut avoir recours à la représentation d'état utilisée dans la théorie du contrôle sous la forme :

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_n + \mathbf{B}\mathbf{u}_n + \mathbf{v}_n \\ \mathbf{Y}_n = \mathbf{C}\mathbf{X}_n + \mathbf{D}\mathbf{u}_n + \mathbf{w}_n \end{cases}$$

où \mathbf{X} est le vecteur d'état, \mathbf{Y} le vecteur représentant les mesures par un ensemble de capteurs, \mathbf{u} est le vecteur de commande et \mathbf{v} et \mathbf{w} représentent les bruits sur l'état et la mesure. On peut alors utiliser des contrôleurs minimisant une norme du vecteur d'état \mathbf{X} . Le contrôleur optimal *Linéaire Quadratique Gaussien* ou H_2 ou le contrôleur robuste H_∞ sont décrits par Bewley et Liu [14]. Kegerise *et al.* [10] ont utilisé un algorithme GPC (*Generalized Predictive Control*) pour lequel la phase d'identification est basée sur l'actualisation d'un filtre de Kalman avec une méthode autorégressive. Dans le cadre d'une simulation avec des signaux temporels relativement courts, le recours à une technique autorégressive peut s'avérer particulièrement intéressant.

Algorithme de contrôle retenu. Un algorithme de type *feedback* simple s'appuyant sur une méthode LMS est apparue plus judicieuse qu'un algorithme FX-LMS compte tenu des difficultés de la phase d'identification. Pour le choix du filtre numérique, des filtres FIR et IIR ont été testés. Comme les études expérimentales [26, 7], on constate qu'un filtre IIR est intrinsèquement mieux adapté pour représenter le caractère non linéaire de l'écoulement. La longueur du filtre nécessaire est également fortement réduite : un filtre avec 10 coefficients au numérateur et 6 coefficients au dénominateur a été retenu. La phase de réactualisation de l'algorithme LMS est modifiée pour prendre en compte l'effet du dénominateur, conduisant à une version modifiée de l'algorithme LMS récursif (RLMS, *Recursive Least Mean Squares*) [27]. Un autre paramètre important pour un algorithme de type LMS est le coefficient de convergence qui résulte d'un compromis entre une réactualisation rapide et la nécessité d'un contrôle stable. Le coefficient est normalisé pour contourner la difficulté issue de la nature différente des signaux de contrôle et

d'erreur puis ajusté pour assurer la stabilité de l'algorithme.

APPLICATION AU BRUIT D'UNE CAVITÉ 3-D

Méthodes numériques pour l'aéroacoustique. Pour obtenir les champs aérodynamique et acoustique dans le même calcul, les équations de Navier-Stokes compressibles, instationnaires, écrites pour les variables conservatives sont résolues par Simulation des Grandes Echelles. Les structures cohérentes sont résolues sur le maillage alors que l'effet des petites chelles est pris en compte par un filtre sélectif. Afin de contrôler cette coupure spectrale et dans le souci de préserver les fluctuations acoustiques de faible amplitude, les dérivées spatiales et l'intégration temporelle s'appuient sur des schémas de haute précision optimisés dans l'espace des nombres d'onde. Un algorithme de Runge-Kutta à 6 étapes et des différences finies centrées sur 11 points développé par Bogey et Bailly [28] sont utilisés conjointement avec un filtre sélectif optimisé sur 11 points [28]. La condition à la paroi s'inspire de la technique du point fantôme de Tam et Dong [29], en assurant la condition d'adhérence et la nullité du gradient de pression normal à la paroi. Les conditions aux limites de non réflexion combinent une approximation en champ lointain acoustique des équations d'Euler en sphérique [29] et une technique de type zone éponge pour minimiser la pollution acoustique lors de la sortie des structures tourbillonnaires du domaine de calcul.

Définition de l'actuateur. La modélisation réaliste d'un actuateur n'est pas la priorité pour cette étude préliminaire. Les tentatives expérimentales récentes pour effectuer un contrôle adaptatif s'appuient sur des actuateurs de type lames piezoélectriques ou jets pulsés, placés juste avant ou juste après le coin amont. L'effet escompté est essentiellement un mouvement vertical imprimé dans la zone de plus grande sensibilité de la couche cisailée naissante. C'est pourquoi une forme simplifiée, consistant en une quantité de mouvement

ρv ajoutée juste après le coin amont est mise en place. Cette zone d'injection, délimitée par une enveloppe gaussienne dans les directions x et y , se situe à $L/50$ du coin dans chaque direction. Elle s'étend sur toute l'envergure W de la cavité (voir figure 1).

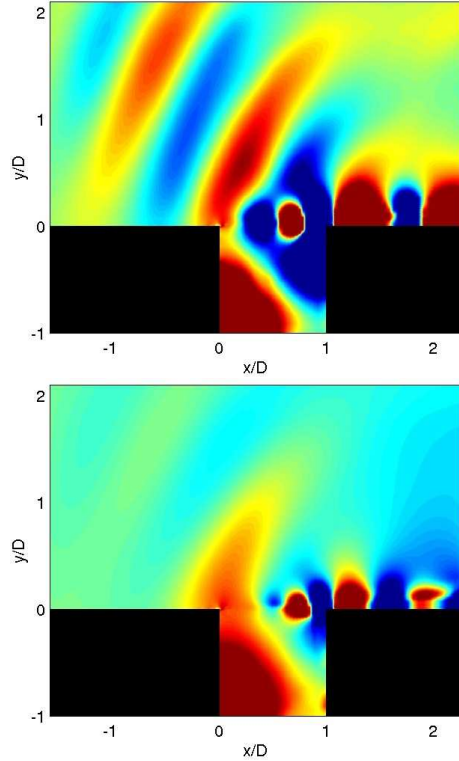


Figure 2: Champs de pression avant et pendant le contrôle, échelle de couleurs entre -200 et 200 Pa.

Paramètres physiques et numériques. On considère une cavité parallélépipédique de longueur $L = 2$ mm, de profondeur $D = L$ et d'envergure $W = 0.78L$. Le choix d'une cavité $L/D = 1$ assez profonde permet de réduire l'influence de la recirculation qui s'établit à l'intérieur de la cavité sur le développement de la couche cisailée. La couche limite incidente est laminaire avec un écoulement extérieur caractérisé par un nombre de Mach $M=0.6$. Elle est initialisée par une approximation polynomiale de la solution de Blasius sur toute la longueur du domaine et induit un rapport $L/\delta_\theta = 57$ au bord amont entre la longueur de la cavité et l'épaisseur de quantité de mouvement de la couche limite établie. Le nombre de Reynolds construit sur la profondeur D est

$Re_D = 28720$. Le maillage comporte $35 \times 89 \times 41$ points dans la cavité et $121 \times 76 \times 71$ en dehors et s'étend de $-2L$ à $3L$ en x , de $-L$ à $2L$ en y et de $-W$ à W en z .

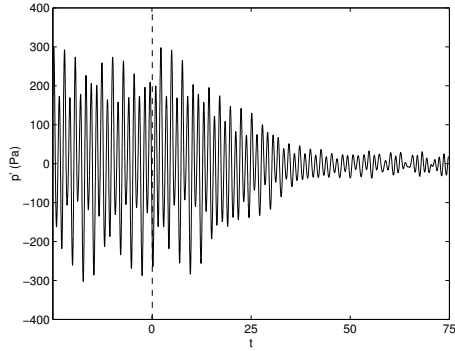


Figure 3: Evolution de la pression au point P de la figure 1 en temps adimensionnel. Le contrôle démarre à $t = 0$.

Résultats. Les champs de pression obtenus avant et après le contrôle sur la figure 2 montrent clairement une réduction substantielle du champ acoustique rayonné. La directivité reste à peu près inchangée mais le niveau sonore est réduit comme le montre l'évolution temporelle de la pression fluctuante au point P situé dans la direction principale du rayonnement (fig. 3).

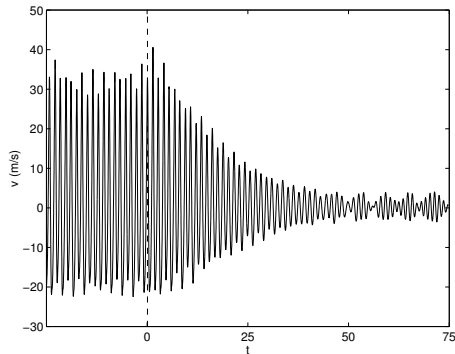


Figure 4: Evolution de la vitesse verticale près du coin aval en temps adimensionnel. Le contrôle démarre à $t = 0$.

Le premier tourbillon dans la couche cisailée, correspondant à la première région de pression négative sur la figure 2, est beaucoup moins intense après le contrôle. Cette réduction peut également se déduire du signal de vitesse enregistré près du coin aval et représenté sur la figure 4. Le bruit est lié directement à la déformation

des structures tourbillonnaires lors de l'impact sur le coin aval. La diminution de l'intensité des tourbillons se traduit par une conversion moindre d'énergie sous la forme d'ondes acoustiques. Ce résultat explique aussi la forme des spectres de pression après le contrôle. On constate sur la figure 5 que le niveau global du spectre est inférieur. Les deux premiers pics correspondant aux deux premiers modes de Rossiter sont significativement réduits. Leur persistance indique que les oscillations n'ont pas complètement disparues mais sont atténuées. On peut noter que les deux pics secondaires qui apparaissaient vers $St=1.2$ ont disparus. Ces pics correspondaient à des interactions non linéaires entre les deux premiers modes (voir [30]). La réduction de leur amplitude supprime ces interactions et réduit également fortement la présence des harmoniques, elles aussi issues d'un processus non linéaire.

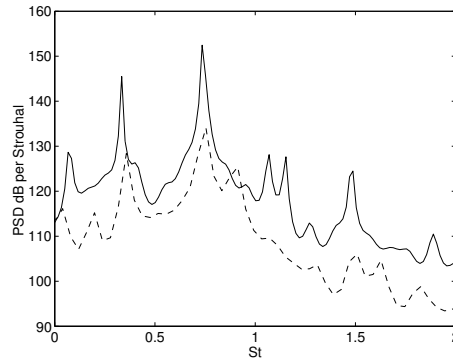


Figure 5: Spectres des fluctuations de pression au point P de la figure 1 avec (---) et sans contrôle (—). Les spectres sont calculés avec une méthode autorégressive de Burg.

La figure 6 montre la vitesse injectée par l'actuateur. On constate qu'elle converge vers une valeur finie. En effet, il a été mis en évidence que l'annulation de la vitesse verticale au niveau du coin amont peut rendre la couche cisailée sensible à une très faible perturbation déphasée par rapport au signal de contrôle, pouvant amener une divergence rapide du système. C'est pourquoi, au lieu de tendre vers un signal d'erreur nul, on introduit un facteur de fuite (*Leaky LMS*) qui évite toute annulation de l'erreur à laquelle ne saurait pas

répondre le contrôleur. Cet artifice permet d'obtenir une meilleure réactivité de l'algorithme à un changement de phase ou de fréquence dans le signal d'erreur, ainsi qu'une robustesse accrue pour le contrôleur. L'évolution de la vitesse injectée sur la figure 6 indique que le temps de réponse du système est de l'ordre de 4 périodes des oscillations de la couche cisailée.

La stabilité du contrôle est également fortement affectée par l'opération de filtrage du signal d'erreur, réalisée par un filtre IIR passe-bas avec une fréquence de coupure légèrement supérieure au deuxième mode d'oscillation dominant, et donc bien en dessous de la fréquence critique de Shannon. Sans ce filtre, le gain du contrôleur doit être diminué pour atteindre un état stable.

La réduction intégrée obtenue par la simulation avec ces paramètres atteint 12 dB (avec 20 dB de réduction pour le pic principal). L'extension à des configurations véritablement changeantes ou pour des nombres de Reynolds plus élevés permettra d'évaluer le caractère adaptatif et la robustesse de l'algorithme choisi.

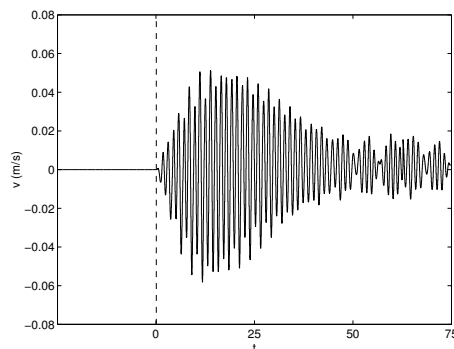


Figure 6: Evolution de la vitesse injectée en temps adimensionnalisé.

CONCLUSION

La mise en place d'un contrôle numérique des oscillations autoentretenues d'une cavité excitée par un écoulement a fait l'objet d'une première étude [11]. Des algorithmes de type *feedback* ont été testés pour des

cavités 2-D puis 3-D, en utilisant des microjets verticaux synthétiques. Cette étude a souligné le choix délicat d'un compromis entre la précision, la simplicité et la stabilité pour les filtres numériques [25]. Un simple *feedback* basé sur un filtre IIR et un algorithme RLMS avec fuite a montré que l'on pouvait obtenir une diminution de 12 dB du champ acoustique simulé. L'application aux phénomènes de rétroaction aéroacoustique nécessite un contrôle des instabilités aérodynamiques qui se développent dans l'écoulement cisailé, rendu très délicat par la coexistence éventuelle de plusieurs fréquences caractéristiques (modes des oscillations).

Un autre point crucial pour l'étude du contrôle des écoulements est l'obtention de modèles réduits afin d'obtenir des coûts de calcul réalistes, notamment pour les simulations tridimensionnelles. Une étude de la décomposition en modes orthogonaux (POD) est en cours en s'appuyant sur les développements récents en régime compressible [12]. Une des difficultés réside dans l'introduction de l'actuateur de type jet pulsé dans ce modèle d'ordre réduit.

- [1] GLOERFELT, X., BAILLY, C. & JUVÉ, D., 2003, Direct computation of the noise radiated by a subsonic cavity flow and application of integral methods, *J. Sound Vib.*, **226**(1), p. 119-146.
- [2] GLOERFELT, X., BOGEY, C. & BAILLY, C., 2003, Numerical evidence of mode switching in the flow-induced oscillations by a cavity, *Int. J. of Aeroacoustics*, **2**(2), p. 99-124.
- [3] CATTAFESTA, L.N., WILLIAMS, D.R., ROWLEY, C.W. & FARRUKH, A.S., 2003, Review of active control of flow-induced cavity resonance, *AIAA Paper 2003-3567*.
- [4] CATTAFESTA III, L.N., GARG, S. & CHOUHARI, F.L., 1997, Active control of flow-induced cavity resonance, *AIAA Paper 97-1804*.
- [5] ROWLEY, C.W., WILLIAMS, D.R., COLONIUS, T., MURRAY, R.M., MACMARTIN, D.G. & FABRIS, D., 2002, Model-based control of cavity oscillations, Part II: System identification and analysis, *AIAA Paper 2002-0972*.
- [6] CABELL, R.H., KEGERISE, M.A., COX, D.E. & GIBBS, G.P., 2002, Experimental feedback control of flow-induced cavity tones, *AIAA Paper 2002-2497*.

- [7] KEGERISE, M.A., CATTAFESTA, L.N. & HA, C., 2002, Adaptive identification and control of flow-induced cavity oscillations, *AIAA Paper 2002-3158*.
- [8] ROWLEY, C.W. & WILLIAMS, D.R., 2003, Control of forced and self-sustained oscillations in the flow past a cavity, *AIAA Paper 2003-0008*.
- [9] SAMIMY, M., DEBIASI, M., CARABELLO, E., ÖZBAY, H., EFE, M.Ö., YUAN, X., DEBONIS, J. & MYATT, J.H., 2003, Development of closed-loop control for cavity flows, *AIAA Paper 2003-4258*.
- [10] KEGERISE, M.A., CABELL, R.H. & CATTAFESTA, L.N., 2004, Real-time adaptive control of flow-induced cavity tones, *AIAA Paper 2004-0572*.
- [11] MARSDEN, O., GLOERFELT, X. & BAILLY, C., 2003, Direct noise computation of adaptive control applied to a cavity flow, *C. R. Méc., Acad. Sci. Paris*, **331**, p. 423–429.
- [12] ROWLEY, C.W., COLONIUS, T. & MURRAY, R.M., 2004, Model reduction for compressible flows using POD and Galerkin projection, *Physica D*, **189**, p. 115–129.
- [13] RAVINDRAN, S.S. Proper orthogonal decomposition in optimal control of fluids. TM 1999-209113, NASA, 1999.
- [14] BEWLEY, T.R. & LIU, S., 1998, Optimal and robust control and estimation of linear paths to transition, *J. Fluid Mech.*, **365**, p. 305–349.
- [15] AIRIAU, C., BOTTARO, A., WALTHER, S. & LEGENDRE, D., 2003, A methodology for optimal flow control : Application to the damping of Tollmien-Schlichting waves in a boundary layer, *Phys. Fluids*, **15**(5), p. 1131–1145.
- [16] BEWLEY, T.R., MOIN, P. & TEMAM, R., 2001, DNS-based predictive control of turbulence : an optimal benchmark for feedback algorithms, *J. Fluid Mech.*, **447**, p. 179–225.
- [17] BERGMANN, M., CORDIER, L. & BRANCHER, J.-P., 2003, Contrôle optimal par réduction de dynamique du sillage instationnaire d'un cylindre circulaire, *16ème Congrès Français de Mécanique*, Nice, 1-5 sept.
- [18] FRIOT, E. *Une introduction au contrôle actif du bruit*. CNRS - Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, janvier 2003.
- [19] KESTENS, T. & NICOUD, F., 1998, Active control of an unsteady flow over a rectangular cavity, *AIAA 98-2348*.
- [20] CHATELLIER, L., LAUMONIER, J. & GERVAIS, Y., 2001, Contrôle actif du couplage aéroacoustique en cavité sous écoulement affleurant, *XVème Congrès Français de Mécanique*, Nancy, 3-7 sept.
- [21] STANEK, M.J., RAMAN, G., KIBENS, V., ROSS, J.A., ODEDRA, J. & PETO, J.W., 2000, Control of cavity resonance through very high frequency forcing, *AIAA Paper 2000-1905*.
- [22] ARUNAJATESAN, S., SHIPMAN, J.D. & SINHA, N., 2003, Development and characterization of a high frequency actuator for control applications, *AIAA Paper 2003-3107*.
- [23] SINHA, N., ARUNAJATESAN, S. & SEINER, J.M., 2002, Computational and experimental investigations of cavity attenuation using high frequency control, *AIAA Paper 2002-2236*.
- [24] RIZZETTA, D.P. & VISBAL, M.R., 2003, Large-eddy simulation of supersonic cavity flowfields including flow control, *AIAA Journal*, **41**(8), p. 1452–1462.
- [25] MARSDEN, O., 2002, *Simulation numérique du contrôle d'un écoulement affleurant une cavité*, Rapport de DEA, LMFA - ECL.
- [26] PILLARISSETTI, A. & CATTAFESTA III, L.N., 2001, Adaptive identification of fluid-dynamics systems, *AIAA Paper 2001-2978*.
- [27] FEINTUCH, P.L., 1976, An adaptive recursive LMS filter, *Proc. IEEE*, **64**, p. 1622–1624.
- [28] BOGEY, C. & BAILLY, C., 2004, A family of low dispersive and low dissipative explicit schemes for noise computation, *J. Comput. Phys.*, **194**, p. 194–214.
- [29] TAM, C.K.W. & DONG, Z., 1999, Advances in numerical boundary conditions for computational aeroacoustics, *J. Comput. Acous.*, **6**(4), p. 377–402.
- [30] GLOERFELT, X., BOGEY, C. & BAILLY, C., 2003, Numerical investigation of the coexistence of multiple tones in flow-induced cavity noise, *AIAA Paper 2003-3234*.