

# Caractérisation transitoire du recollement de couches limites turbulentes massivement décollées et contrôle en boucle fermée

C. Raibaud<sup>a,d</sup>, F. Kerhervé<sup>e</sup>, C. Cuvier<sup>a,d</sup>,  
A. Polyakov<sup>b,c</sup>, J.P. Richard<sup>b,c,d</sup> et M. Stanislas<sup>a,d</sup>

---

**Abstract :** Ce travail présente les principaux résultats du projet ANR SePaCode visant à la réalisation de contrôleurs en boucle fermée robustes pour la réduction de séparation de couche limite. La bulle de séparation présente sur une rampe 2D installée dans la soufflerie de couche limite du Laboratoire de Mécanique de Lille est réduite par des actionneurs fluidiques pulsés en configuration co-rotative. La dynamique du recollement est étudiée à partir de mesures de vitesse PIV obtenues en moyenne de phases et de gain en frottement acquis avec des capteurs de films chauds placés à la paroi le long de la bulle de séparation. Le phénomène transitoire est quantifié par des temps caractéristiques et des modèles du premier ordre sont établis sur les évolutions temporelles du gain en frottement et de la longueur de séparation. À partir de ces modèles, différents contrôleurs ont été élaborés, pour répondre à des exigences de performances, en termes de précision, coût du contrôle, réduction de l'influence du bruit et des incertitudes du modèle. Enfin, les différentes collaborations entre les laboratoires du projet ont permis de comparer la dynamique des différents écoulements décollés, de leur recollement, ainsi que la comparaison des différentes stratégies de contrôle retenues.

---

La séparation de la couche limite est un phénomène néfaste qui affecte l'aérodynamisme de systèmes de transport dû à une augmentation de la traînée et d'une diminution de la portance. Des stratégies de contrôle ont été testées pour réduire ou supprimer la séparation. Le travail réalisé ici présente les principaux résultats du projet national ANR SePaCode (ANR-11-BS09-0018) obtenus notamment par le Laboratoire de Mécanique de Lille (LML) et concerne le contrôle expérimental par jets d'une couche limite turbulente séparée massivement. Une rampe 2D est installée dans la soufflerie de couche limite du LML pour créer un léger gradient de pression adverse et favoriser le décollement. 22 jets fluidiques co-rotatifs sont placés le long de l'envergure et en amont de la séparation et redistribuent l'énergie présente dans l'écoulement libre vers la région proche paroi où un déficit de vitesse est observé. Des détails du dispositif expérimental peuvent être trouvés dans [1].

La dynamique de recollement de couche limite séparée est d'abord examinée à partir de l'étude des phases transitoires du réattachement. Des mesures synchronisées de vitesse et de gain en frottement ont été réalisées pendant la

---

<sup>a</sup> CNRS FRE 3723, Laboratoire de Mécanique de Lille, 59650 Villeneuve d'Ascq, FRANCE

<sup>b</sup> Inria project-team Non-A, Parc Scientifique de la Haute-Borne, 40 avenue Halley, 59650 Villeneuve d'Ascq, FRANCE

<sup>c</sup> CNRS UMR 9189, Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille (CRISTAL), 59650 Villeneuve d'Ascq, FRANCE

<sup>d</sup> École Centrale de Lille, Boulevard Paul Langevin, Cité Scientifique, 59650 Villeneuve d'Ascq, FRANCE

<sup>e</sup> CNRS UPR 3346, Institut Pprime, CEAT, 43 rue de l'Aérodrome, F-86036 Poitiers Cedex, FRANCE

transition dans cet objectif. La vitesse est mesurée par Particule Image Velocimetry (PIV) 2D-2C dans un plan X-Y, normal à la paroi et dans la direction de l'écoulement, par moyenne de phases pendant la transition. Le gain en frottement est mesuré par des capteurs films chauds placés en aval de la ligne de séparation pour obtenir une mesure représentative en temps réel de l'état de l'écoulement pendant la transition. Une étude paramétrique a aussi été réalisée pour étudier l'influence des paramètres d'actuation des jets pulsés (ratio de vitesse VR, fréquence f, rapport cyclique DC) sur les performances de recollement.

Ces informations du régime transitoire ont permis de déterminer les temps caractéristiques de la transition (temps de montée, délais...) en superposant un modèle du premier ordre à la réponse des films chauds. Des modèles plus avancés, basés par exemple sur la longueur de séparation, sont construits pour avoir une meilleure approximation de la dynamique du fluide pendant la transition décollé-recollé. Un contrôle en boucle fermée est réalisé à partir de ces modèles. L'état du système est mesuré en temps réel par les capteurs de films chauds et le gain en friction instantané est intégré en tant qu'entrée du contrôleur. La loi de commande permet d'établir le rapport cyclique du signal pulsé en fonction des performances exigées pour le contrôleur. Une régulation classique de type PID est d'abord considérée. Puis le coût du contrôle est optimisée grâce à un contrôleur de type LQR (Linear Quadratic Regulator). L'influence du bruit des capteurs de films chauds est réduite en utilisant un filtre de Kalman pour estimer l'état interne du système, ici la longueur de séparation, et réaliser le contrôle à partir de cette estimation (contrôle LQG - Linear Quadratic Gaussian). Enfin, pour limiter l'impact des incertitudes sur le modèle et sur les conditions initiales, la robustesse du contrôle est améliorée en considérant un contrôle robuste  $\mathcal{H}_\infty$ . La robustesse de ce contrôleur est ensuite comparée à celle d'un précédent contrôleur supposé non robuste.

Le projet national ANR SePaCode a été aussi l'occasion de réaliser des projets collaboratifs avec les autres membres de l'ANR afin de mutualiser les compétences des différents laboratoires impliqués. Avec le laboratoire PRISME à Orléans, une campagne PIV Stéréoscopique rapide à 1,5 kHz synchrone avec l'acquisition de capteurs instationnaires de pression pariétal a été conduite pour la caractérisation des structures générées par des actionneurs fluidiques contra-rotatifs sur la rampe GDR 3D. Avec le laboratoire PPRIME à Poitiers, un contrôle en boucle fermée innovant basé sur des algorithmes en Machine Learning a été réalisée, notamment sur la configuration LML [2].

**[1]. Raibaud, C.,** *Caractérisation transitoire d'une couche limite turbulente décollée soumise à un contrôle et développement de contrôleurs en boucle fermée*, 2015, Thèse de doctorat. École Centrale de Lille.

**[2]. Duriez, T. and al.,** *Closed-loop control of experimental shear flows using machine learning*, 2014, 7<sup>th</sup> AIAA Flow Control Conference, Atlanta, USA.