

Contrôle d'écoulement autour d'un corps non profilé bidimensionnel en interaction avec le sol

S. Chaligné^{a,b}, T. Castelain^{a,c}, M. Michard^a, E. Jondeau^a, D. Juvé^a

- a. LMFA, École centrale de Lyon, 36, avenue Guy-de-Collongue, 69134 Écully Cedex, France
b. Volvo Group Truck Technology, Renault Trucks SAS, Cab Engineering Lyon, 99, route de Lyon, 69806 Saint-Priest Cedex, France
c. Université Lyon 1, 43 Boulevard du 11 Novembre 1918, 69622 Villeurbanne Cedex, France

Résumé :

Cette étude expérimentale porte sur l'implémentation du contrôle d'écoulement sur un corps non profilé bidimensionnel et son effet sur la force de traînée associée. Une attention particulière est portée à l'effet de la distance entre cette maquette et la paroi inférieure de la veine d'essais sur le gain apporté par le contrôle. L'évaluation de l'effet du contrôle sur la traînée est effectuée de manière indirecte par des mesures de pression pariétale. On montre que la fréquence d'actionnement et la distance au sol sont des paramètres déterminants pour l'augmentation de pression au culot de la maquette. Des mesures de vitesse par PIV à haute fréquence d'acquisition permettent de mener une approche statistique et instationnaire de l'écoulement de sillage par une description sous forme de moyennes de phase et la détermination de corrélations spatiales indiquant les échelles des structures cohérentes se développant sous l'effet du contrôle.

Abstract :

Active flow control is implemented to a two-dimensional bluff body and its effect on the drag force is experimentally studied. The influence of the ground clearance on the wake flow characteristics and on the efficiency of the control is of particular interest in this contribution. The drag force is derived in an indirect manner from static pressure measurements at the model rear end. The actuation frequency and the ground clearance are shown to be important regarding the rear end pressure and the wake flow characteristics. Velocity measurements using TR-PIV allow completing an unsteady analysis of the wake flow by a phase-averaged approach and spatial correlations illustrating the size of the coherent structures induced by the interaction between the incoming boundary layer and the jet flow.

Mots clefs : Contrôle d'écoulement ; écoulement de sillage ; Vélocimétrie par image de particules

1 Introduction

L'application du contrôle d'écoulement à des corps non profilés bidimensionnels a donné lieu à de nombreuses études. La géométrie de ces corps implique en effet la présence de zones de décollement et/ou de recollement qui peuvent être néfastes pour des applications pratiques. La mise en oeuvre du contrôle d'écoulement permet de limiter les effets indésirables liés à ces zones. Chun et al. [2] montrent ainsi que la longueur de la zone de recirculation derrière une marche descendante est affectée pour certaines gammes de fréquence d'actionnement du contrôle par jets synthétiques. Pastoor et al. [4] démontrent la possibilité de réduire la traînée d'un corps bidimensionnel de hauteur H en augmentant la pression statique au culot par l'effet du contrôle. Toutefois, l'influence de la distance au sol G sur l'efficacité du contrôle a peu été étudiée. Or, le rapport G/H joue un rôle prépondérant sur les caractéristiques du sillage. Certaines études [5] démontrent l'influence de ce rapport sur la pression statique au culot d'un cylindre carré.

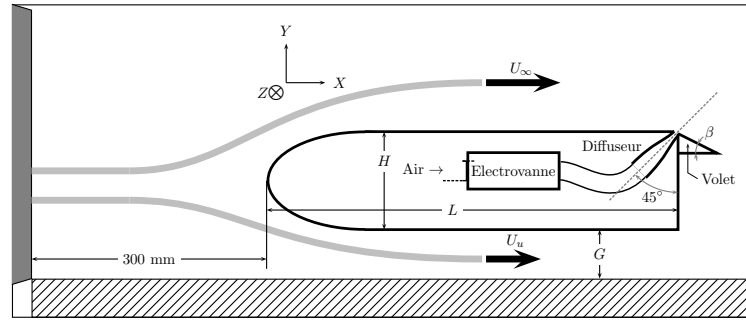


FIGURE 1 – Schéma de coupe du montage expérimental : Vue de côté.

L'objectif de cette contribution qui repose sur une étude expérimentale est d'illustrer l'intégration du contrôle d'écoulement sur un corps non profilé bidimensionnel et en particulier sur la force de traînée associée. Une attention particulière est portée à l'effet de la distance entre cette maquette et la paroi inférieure de la veine d'essais.

2 Protocole expérimental

Les essais sont réalisés au Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique dans une soufflerie à section de mesures ouverte dont l'écoulement est issu d'une veine carrée de cotés 500 mm. La vitesse de l'écoulement U_∞ est fixée à 25 m/s.

La maquette utilisée est un corps non profilé positionné à 300 mm de la sortie de veine comme illustré sur la Figure 1. Le caractère bidimensionnel de l'écoulement étudié est assuré par deux plaques latérales transparentes placées de chaque côté de la géométrie. Sa longueur L , sa largeur l et sa hauteur H sont respectivement de 605, 380 et 100 mm, résultant en un nombre de Reynolds Re_H de 175000. Trois configurations de distance au sol G sont étudiées : une configuration comparable à une marche descendante pour laquelle le rapport G/H est nul, une configuration pour laquelle G/H vaut 0.04 et une dernière où $G/H = 0.30$.

Le contrôle d'écoulement est effectué par un système de jets pulsés commandés en boucle ouverte [1] combiné à un volet incliné. Ce dernier a une longueur de 50 mm selon l'axe X et son inclinaison est de 20° par rapport à la direction de l'écoulement amont. Pour caractériser le contrôle, on définit le paramètre C_μ , coefficient de quantité de mouvement, à partir de la vitesse de jet U_j moyennée sur une période d'actionnement, de la section de sortie des jets s et de l'aire frontale S de la maquette. Dans cette étude, ce coefficient reste constant en fonction de la fréquence d'actionnement et vaut 0.06 %. On introduit également le nombre de Strouhal St_H à partir de la fréquence d'actionnement et de la hauteur de la maquette.

$$C_\mu = \frac{sU_j^2}{SU_\infty^2}; \quad St_H = \frac{FH}{U_\infty}$$

La pression pariétale est mesurée au culot de la maquette dans le plan médian et est présentée sous forme de coefficient de pression statique C_p défini ci-dessous avec ρ la densité de l'air et p_∞ la pression statique de l'écoulement amont :

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho(U_\infty)^2}$$

Des mesures de vitesse par PIV à haute fréquence d'acquisition sont également effectuées dans le sillage proche de la maquette avec un laser Quantronix Darwin Duo Nd :YLF et une caméra Phantom V12. La fréquence d'acquisition est fixée à 3125 Hz.

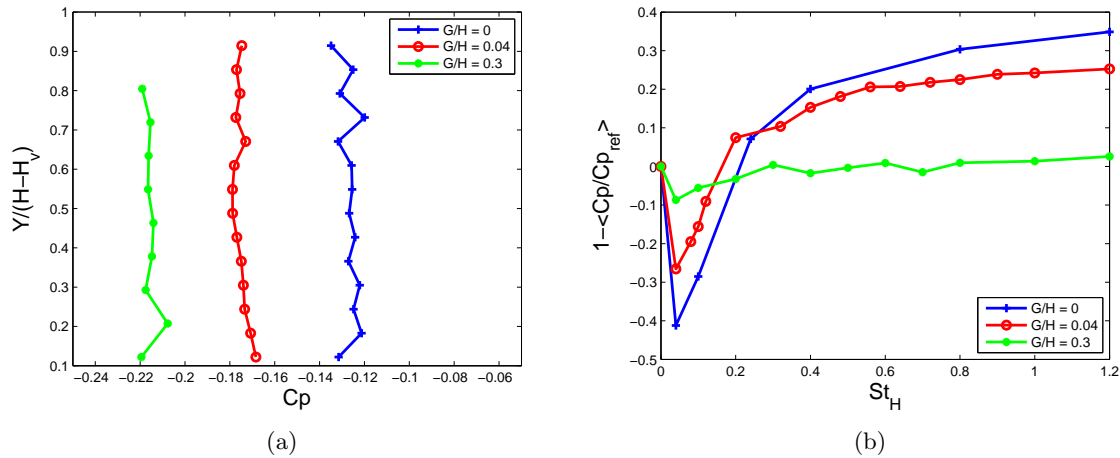


FIGURE 2 – Profils verticaux de pression au culot de la maquette pour les différentes configurations G/H (a) et évolution de la pression moyennée spatialement au culot en fonction du nombre de Strouhal d'actionnement des jets St_H (b).

3 Résultats

Pour chacune des configurations, les profils verticaux de C_p en l'absence de contrôle sont donnés Figure 2(a). Ces profils montrent tous une distribution de pression au culot uniforme sur la hauteur. Dans la suite, ces profils sont donc moyennés spatialement suivant l'axe Y pour évaluer l'influence du contrôle. On remarque également une diminution des valeurs de C_p lorsque G/H augmente et donc une augmentation de trainée. Cette tendance, également observée dans [3], est attribuée à une symétrisation progressive du sillage lorsque G/H augmente. Au delà d'une valeur critique ($G/H \geq 0.35$), il y a apparition d'un détachement tourbillonnaire alterné [5] et la pression cesse de diminuer.

La variation de C_p en fonction de St_H est illustrée Figure 2(b). Pour les différentes configurations de distance au sol, les évolutions de C_p sont similaires. En effet, on observe deux gammes de fréquence bien distinctes : une zone à faible St_H où la valeur de C_p est plus faible que dans le cas sans contrôle suivie d'une zone où les valeurs de C_p augmentent avec St_H en semblant tendre vers une asymptote. On remarque également que l'effet du contrôle sur la pression au culot diminue lorsque la distance au sol augmente et ce sur l'ensemble des fréquences d'actionnement testées. L'influence du contrôle est donc la plus importante pour la configuration $G/H = 0$ avec une augmentation de C_p de 35% pour un $St_H = 1.2$. Pour $G/H = 0.04$, les gains de C_p sont légèrement plus faibles. Enfin, pour la configuration la plus éloignée du sol, $G/H = 0.3$, l'effet du contrôle est très faible et aucune augmentation notable de C_p n'est obtenue.

Les mesures de vitesse par PIV permettent dans un premier temps d'étudier l'effet moyen du contrôle et de la distance au sol sur le sillage proche. Pour les configurations $G/H = 0$ et 0.04 , les champs de vitesse moyenne et les lignes de courant illustrés Figure 3 montrent l'influence de St_H sur la topologie des structures tourbillonnaires moyennes. Sans contrôle, la ligne de décollement se situe au niveau de l'arête formée par le toit de la maquette et le volet. L'application du contrôle permet à l'écoulement moyen de recoller jusqu'au bord de fuite du volet, ce qui a un effet de vectorisation de la couche de cisaillement supérieure, notamment pour $St_H = 0.8$. En revanche, le sillage moyen dans la configuration $G/H = 0.3$ est très peu affecté par le contrôle ce qui explique les faibles variations de C_p au culot avec St_H . La symétrie du sillage moyen est évocatrice de la présence d'un détachement tourbillonnaire périodique alterné ; des mesures complémentaires par anémométrie à fil chaud confirment l'existence de ce détachement associé à un nombre de Strouhal caractéristique de 0.36.

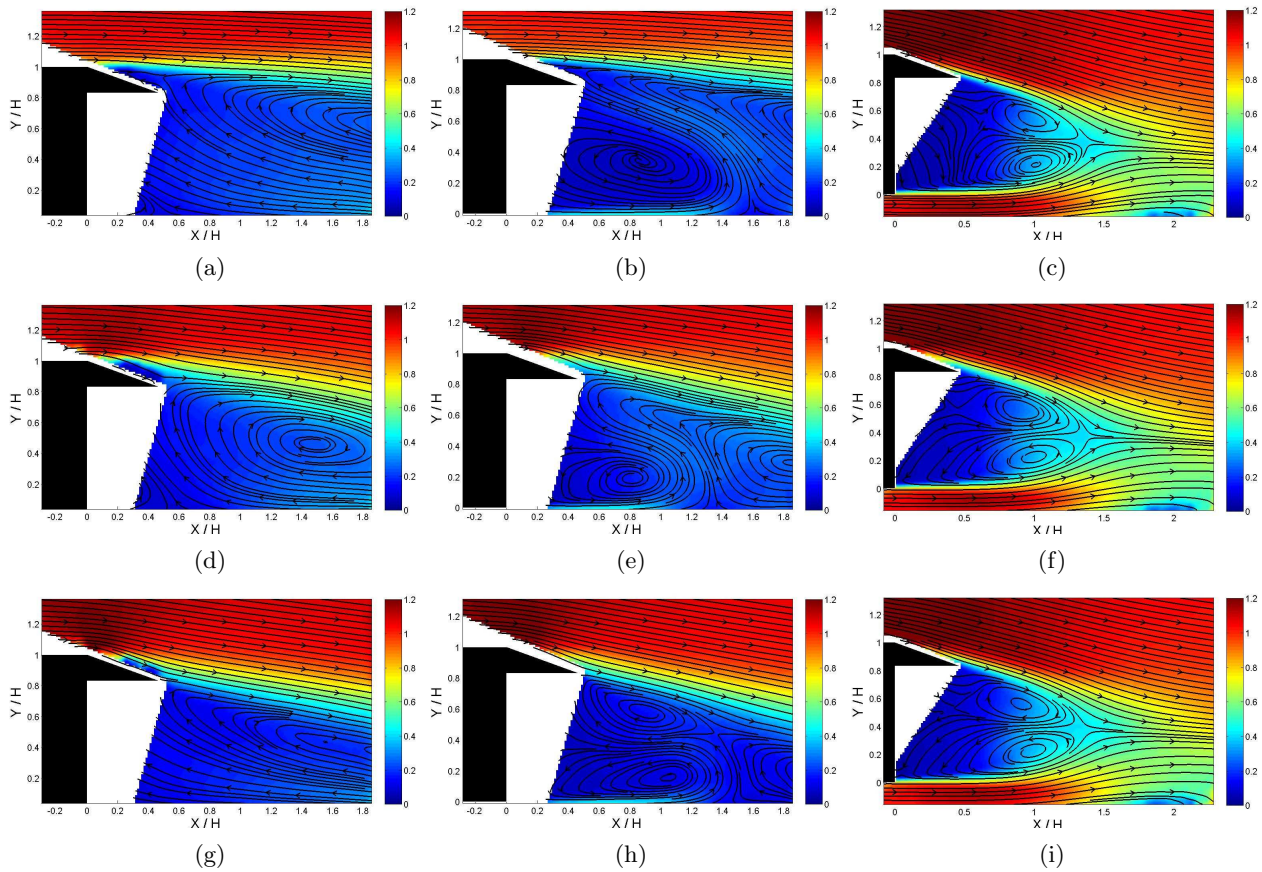


FIGURE 3 – Champs de vitesse moyenne et lignes de courant :

- Pour $G/H = 0$: sans contrôle (a), avec contrôle à $St_H = 0.1$ (d) et à $St_H = 0.8$ (g)
- Pour $G/H = 0.04$: sans contrôle (b), avec contrôle à $St_H = 0.1$ (e) et à $St_H = 0.8$ (h)
- Pour $G/H = 0.3$: sans contrôle (c), avec contrôle à $St_H = 0.1$ (f) et à $St_H = 0.8$ (i).

Pour les deux configurations proches du sol, il est difficile d'analyser les différences de C_p observées Figure 2(b) entre les cas $St_H=0.1$ et $St_H=0.8$ à l'aide des seuls champs de vitesse moyenne de la Figure 3. Des moyennes de phases des champs de vitesse ont été établies à partir des données PIV et du signal de commande des actionneurs. Une période d'actionnement est divisée en 36 phases espacées de 10° . On souhaite ainsi déterminer l'évolution, au cours d'une période d'actionnement, d'un paramètre caractéristique de l'écoulement. On définit donc le paramètre H_s comme la hauteur du sillage à une distance $x = H$ du culot. Il correspond à la distance verticale entre le sol et le point de la couche de cisaillement où la vitesse moyenne est $U_\infty/2$.

L'évolution de H_s en fonction de la phase angulaire ϕ donnée en Figure 4 laisse apparaître le caractère fortement instationnaire de la couche de cisaillement pour les cas d'actionnement à $St_H=0.1$. L'écoulement semble passer par deux états : un état où il recolle sur le volet et pour lequel la couche de cisaillement est vectorisée vers le sol et un état où la ligne de décollement prend naissance au niveau de l'arête supérieure, comme dans le cas de référence sans contrôle. De plus, ces états sont atteints deux fois par période d'actionnement. Les instants auxquels on passe d'un état à l'autre sont en moyenne distants d'une demi période, ce qui suggère que la fréquence caractéristique des perturbations dans le sillage corresponde au premier harmonique de la fréquence d'actionnement.

En revanche, pour le cas actionné à $St_H=0.8$, H_s reste faible et quasiment constant en fonction de ϕ , ce qui signifie que la hauteur de sillage reste constante au cours d'un cycle d'actionnement.

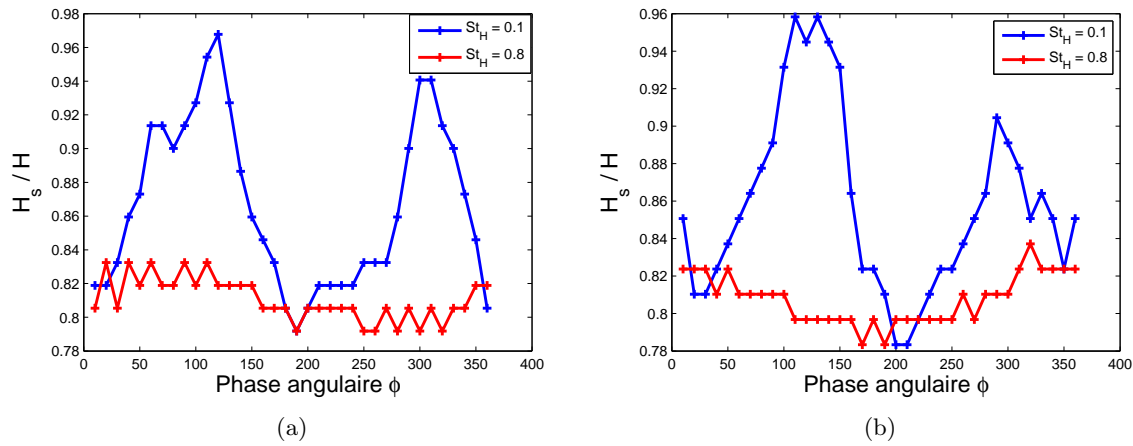


FIGURE 4 – Evolution de la hauteur de sillage H_s en fonction de la phase angulaire ϕ pour les cas $G/H = 0$ (a) et $G/H = 0.04$ (b) .

Des cartographies du coefficient de corrélation spatiale R_{vv} dans les différents cas étudiés sont données Figure 5. Ce coefficient, défini en (1), est calculé à partir de la composante verticale des fluctuations de vitesse v ; le point fixe de coordonnées \vec{x} est positionné en sortie de fente du jet :

$$R_{vv}(\vec{r}) = \frac{\langle v(\vec{x})v(\vec{x} + \vec{r}) \rangle}{\langle v^2(\vec{x}) \rangle} \quad (1)$$

Pour les configurations proches du sol, les isovalues de R_{vv} permettent d'analyser la structuration de l'écoulement de sillage sous l'effet du contrôle. Pour le cas d'actionnement $St_H = 0.1$, des valeurs de corrélation importantes sont obtenues sur une large région du sillage ce qui indique la présence de structures cohérentes de dimension similaire à la hauteur de la maquette H , à proximité du culot. Ces structures ainsi que les fluctuations importantes entrevues en Figure 4 expliquent la diminution importante de pression au culot de la maquette pour ces fréquences d'actionnement. Pour le cas où $St_H = 0.8$, les perturbations générées par le contrôle résultent en un train de structures de petite échelle principalement concentrées dans la couche de cisaillement moyenne, ce qui confirme que l'écoulement de sillage présente un comportement plus stationnaire dans ces gammes de fréquences d'actionnement. Pour la configuration $G/H = 0.3$, la présence de structures cohérentes dans le cas sans actionnement en Figure 5(c) est liée au détachement naturel de structures tourbillonnaires alternées. On constate dans ce cas que le contrôle ne permet pas de modifier les caractéristiques du sillage et ceci quelque soit la valeur de St_H . Ceci explique les faibles variations de pression au culot en fonction de St_H relevées Figure 2(b).

4 Conclusion

Cette étude expérimentale démontre l'importance de la fréquence d'actionnement et de la distance au sol lors de l'implémentation d'un système de jets pulsés sur un corps non profilé bidimensionnel. En effet, des variations de pression importantes au culot de la maquette sont mesurées selon la fréquence d'actionnement. L'influence de la distance au sol est également mise en évidence avec une diminution importante de l'effet du contrôle lorsque la distance au sol augmente. Pour des configurations où la maquette est proche du sol, des augmentations de la pression statique allant jusqu'à 35% ont été mesurées. Cette augmentation semble être due à la vectorisation de la couche de cisaillement ainsi qu'à une diminution importante des fluctuations de vitesse dans le proche sillage. En revanche, lorsque la maquette est positionnée à une distance suffisamment éloignée du sol pour qu'il existe un détachement tourbillonnaire alterné, la stratégie de contrôle utilisée ne permet pas de modifier la dynamique tourbillonnaire initialement existante dans le sillage et donc la pression au culot de la maquette.

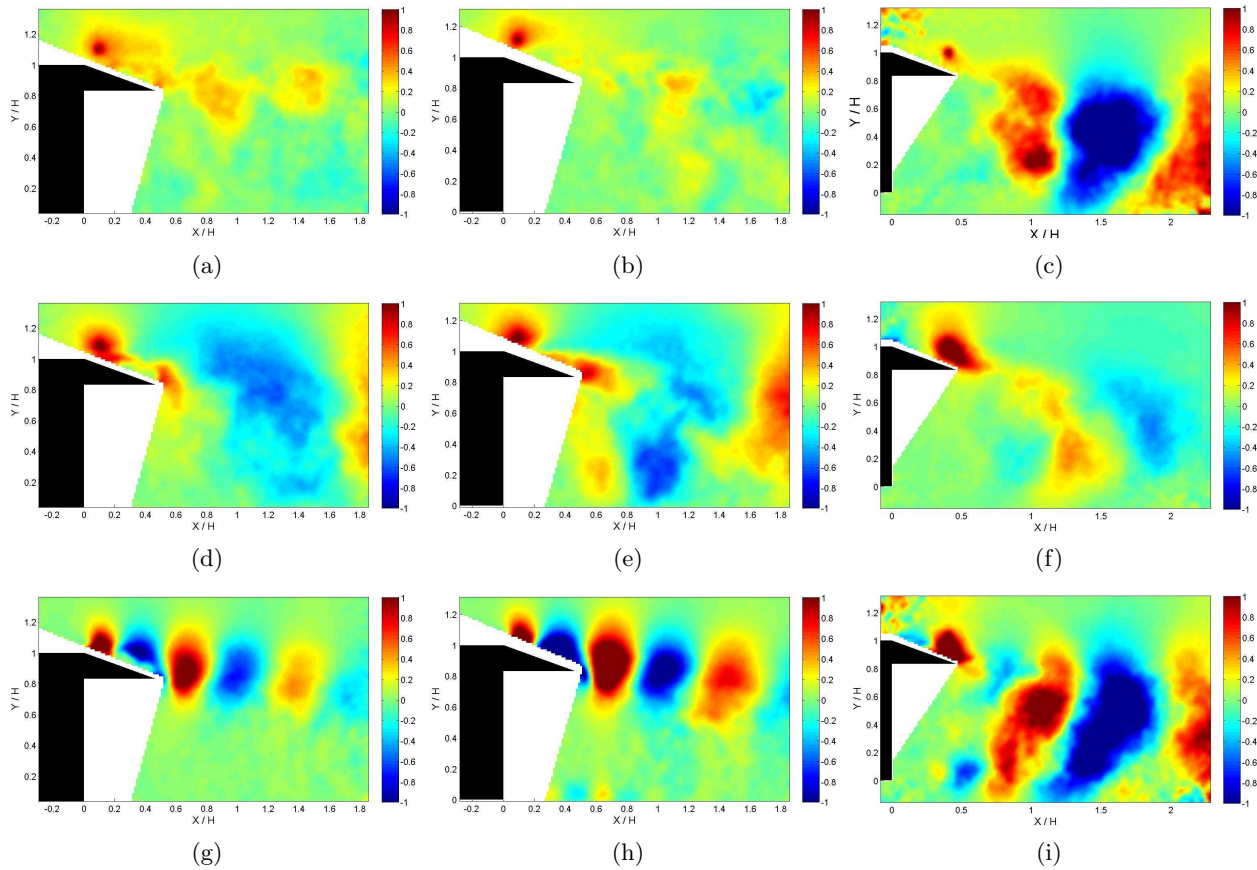


FIGURE 5 – Cartographies du coefficient de corrélation spatiale :

- Pour $G/H = 0$: sans contrôle (a), avec contrôle à $St_H = 0.1$ (d) et à $St_H = 0.8$ (g)
- Pour $G/H = 0.04$: sans contrôle (b), avec contrôle à $St_H = 0.1$ (e) et à $St_H = 0.8$ (h)
- Pour $G/H = 0.3$: sans contrôle (c), avec contrôle à $St_H = 0.1$ (f) et à $St_H = 0.8$ (i).

Remerciements

Ces travaux sont effectués dans le cadre du LabEx CeLyA de l'Université de Lyon et du programme TIGRE, financé par l'ADEME et piloté par Renault Trucks avec le soutien de l'ANRT. Nous remercions également l'équipe technique du Centre Acoustique du LMFA.

Références

- [1] Chaligné, S., Castelain, T., Michard, M., Juvé, D. 2013 Active control of the flow behind a two-dimensional bluff body in ground proximity. *C. R. Mécanique* **341** 289-297
- [2] Chun, K.B., Sung, H.J. 1996 Control of turbulent separated flow over a backward-facing step by local forcing. *Exp. in Fluids* **21** 417-426
- [3] Garry, K.P. 1996 Some effects of ground clearance and ground plane boundary layer thickness on the mean base pressure of a bluff vehicle type body. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **62** 1-10
- [4] Pastoor, M., Henning, L., Noack, B.R., King, R., Tadmor, G. 2008 Feedback shear layer control for bluff body drag reduction. *J. Fluid Mech.* **608** 191-196
- [5] Shi, L.L., Liu, Y.Z., Wan, J.J. 2010 Influence of wall proximity on characteristics of wake behind a square cylinder : PIV measurements and POD analysis. *Exp. Thermal and Fluid Science.* **64** 28-36