

Sensibilité à des perturbations de l'écoulement au contournement du pied-A d'une maquette de véhicule industriel en vue du contrôle de décollement.

R. DA MOTA^a, T. CASTELAIN^b, M. MICHARD^a, D. CHACATON^c, C. BOGEY^a

a. Univ Lyon, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon I, CNRS, LMFA, UMR 5509, 36 Avenue Guy de Collongue, F-69134, Ecully, France

b. Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon I, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, CNRS, LMFA, UMR5509, 43 bd du 11 novembre 1918, F-69100, VILLEURBANNE, France

c. Volvo Group Truck Technology, Renault Trucks SAS, Cab Engineering Lyon, 99 route de Lyon, 69806, Saint-Priest Cedex, France

corresponding author : rafaël.da-mota@ec-lyon.fr

Résumé :

Le contrôle d'un écoulement décollé en aval d'une marche montante arrondie intégrant une maquette de pied-A de poids-lourd à échelle 4 : 10^{ème} est étudié expérimentalement. Il repose sur de petites modifications de la géométrie du pied-A pour limiter le décollement derrière le pied-A. L'écoulement moyen autour de la maquette de pied-A est étudié au travers de mesures PIV-2D à un nombre de Reynolds de 1.7x10⁵ calculé sur la hauteur de la marche. On montre que l'adjonction d'un petit cylindre dans une zone du pied-A bien choisie est suffisante pour passer d'une situation non décollée à un décollement massif derrière le pied-A. Suivant la position et le diamètre du cylindre, l'effet de cette modification géométrique sur le décollement derrière la géométrie est étudié.

Abstract :

Control of a separated flow over a rounded forward facing step including a A-pillar geometry at 4:10 scale from a heavy vehicle is studied experimentally. This study presents a passive method for controlling the separation of the flow downstream of the A-pillar, by positioning small disturbing cylinders on its surface. 2D-PIV measurements have been carried out for studying the mean flow around the A-pillar for a Reynolds number equal to 1.7x10⁵ based on the step height. Slight changes of the A-pillar geometry are enough to switch from a non-separated to a massive recirculating flow downstream the A-pillar. The level of authority of the control depends on the diameter and the position of the cylinder.

Mots clefs : Contrôle passif, décollement, Pied-A, PIV.

1 Introduction

Pour réduire la traînée aérodynamique des poids-lourd la suppression des rétroviseurs latéraux est envisagée, puisqu'elle contribue à la diminution de la surface frontale du véhicule. Cependant, le retrait des rétroviseurs est susceptible d'engendrer un décollement de l'écoulement au niveau du montant vertical, appelé pied-A, qui fait la jonction entre le pare-brise et la portière du véhicule.

Vernet et al. développent une solution de contrôle de décollement autour d'un cylindre [1] et d'un pied-A à échelle 1:6^{ème} [2] en produisant un générateur de vortex au moyen d'une rangée d'actionneurs plasma. Des résultats montrent l'efficacité de cette solution pour réduire la traînée pour un nombre de Reynolds de 10^6 . Minelli et al. proposent l'utilisation des jets synthétiques localisés sur l'arrondi de pied-A [3] pour contrôler le décollement. Des visualisations par fil de laine réalisées en soufflerie sur véhicule réel montrent que pour une fréquence et une amplitude d'actionnement fixées, l'écoulement recolle sur la vitre latérale [4]. Le principal obstacle à l'intégration de ces solutions de contrôle actif sur véhicule réel est qu'elles ne sont pas rentables économiquement. Dans le cadre de ce travail, on analyse les modifications induites sur l'écoulement par la simple adjonction d'éléments passifs disposés à la surface du pied-A.

La forme de la marche montante étudiée ici est choisie en rapport à ce problème de décollement spécifique à une cabine de poids-lourd. Les travaux de cette étude portent sur une marche montante arrondie, représentée sur la figure 1, intégrant une maquette de pied-A. La géométrie présente un décrochement entre l'arrière du pied-A et la liaison charnière de la portière latérale.

Dans un premier temps, on étudie deux configurations de pied-A dont les géométries sont très proches pour étudier la sensibilité de l'écoulement au décollement en aval du pied-A. Dans un second temps le contrôle passif d'un écoulement décollé est étudié par une modification de la géométrie en amont du décollement. Enfin, l'effet de la géométrie sur l'écoulement autour du pied-A est étudié au moyen d'une étude paramétrique sur la taille et la position d'une perturbation géométrique.

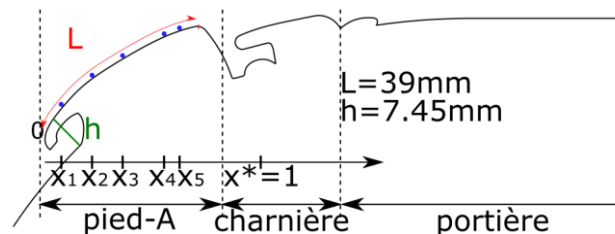


Figure 1 : Vue du pied-A et des différentes positions des perturbations.

2 Dispositif expérimental

2.1 Géométrie du pied-A

Les mesures ont été réalisées en soufflerie dans une veine d'essais semi-ouverte de section $400 \times 400 \text{ mm}^2$. La géométrie de la marche montante arrondie représentée sur la figure 2 permet de reproduire au contournement du pied-A des phénomènes aérodynamiques (écoulement potentiel) qui conditionnent le décollement de manière similaire au cas réel (accélération de l'écoulement, courbure de la paroi ...). La hauteur H de la marche montante est de $H=102 \text{ mm}$. Les mesures sont réalisées pour une vitesse incidente U_∞ de 25 m/s correspondant à un nombre de Reynolds Re_H de $170\,000$. La longueur développée du pied est de $L=39 \text{ mm}$. Le début du pied-A correspond à l'origine de repère et l'abscisse de son bord de fuite est $x_L = 0.711$, les dimensions étant par la suite normées par la longueur L .

L'effet de la modification de la géométrie de la maquette est étudié au moyen de l'ajout d'un ou plusieurs cylindres sur le pied-A. Ce cylindre peut être placé aux positions x_i du pied-A indiquées sur la figure 1, i étant un entier compris entre 1 et 5. Le diamètre, noté d_n , du cylindre est de $n \text{ mm}$ selon le cas étudié. Ainsi, on appelle la configuration $x_i d_n$, le cas d'un cylindre de diamètre $n \text{ mm}$ placé à la position x_i du pied-A. La figure 3 indique les abscisses des positions x_i pour les configurations abordées dans cet article.

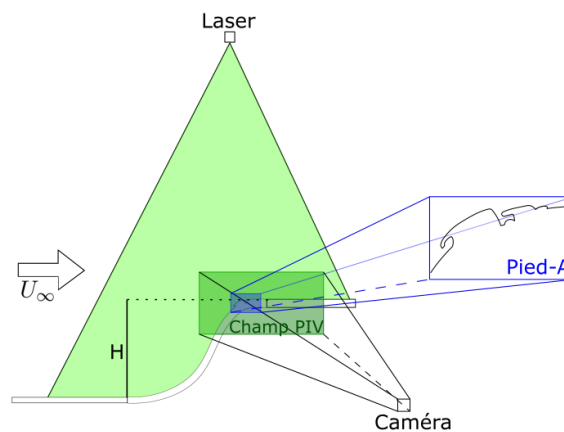


Figure 2: Montage expérimental pour la mesure PIV 2D dans la région du pied-A. La zone de mesure correspond à l'encadré vert et une vue agrandie du pied-A est présentée en bleu.

Mono cylindre			Couplage deux cylindres	
x2d2	x3d1	x5d1	x2d2	x5d1
0.1616	0.3697	0.6216	0.1736	0.6216

Figure 3 : Abscisses des modifications géométriques sur le pied-A pour les configurations étudiées.

2.2 Description de la métrologie

Des mesures PIV-2D sont réalisées dans le plan médian du montage au moyen d'une source laser double impulsion Nd :Yag de longueur d'onde 532nm. Une caméra Imager LX16M de 4920x3280 pixels est utilisée pour observer un champ dont la taille est de 210x140mm. Les résultats pour des grands champs sont obtenus avec un calcul d'intercorrélation basé sur des fenêtres d'interrogation de 32x32pixels et un recouvrement de 50%. Les champs résolus autour du pied-A sont obtenus avec des fenêtres d'intercorrélation de 12x12pixels et un même recouvrement. La résolution spatiale est de 1.37mm ou de 0.51mm selon la taille du domaine d'intercorrélation. La pression moyenne dans l'écoulement est obtenue à partir des mesures de vitesse selon l'algorithme d'Oxlade [5]. Les gradients spatiaux de la pression moyenne sont déduits des équations de Navier-Stokes pour un écoulement bidimensionnel, stationnaire et incompressible. Le champ moyen de pression est alors calculé de proche en proche à partir d'un point de référence tiré au sort et situé dans l'écoulement potentiel, en suivant un chemin d'intégration lui-même issu d'un processus stochastique. A l'issue de l'intégration des gradients de pression dans tout le domaine, le champ de pression est recalé en imposant une valeur de la pression au point de référence égale à celle déduite de l'équation de Bernoulli, les valeurs amont de pression statique et de vitesse étant mesurées par ailleurs.

Pour la suite, la norme de la vitesse, adimensionnée par la vitesse incidente U_∞ , est notée U^* et la pression moyenne est exprimée par le coefficient C_p dont l'expression est :

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2}$$

3 Champs de vitesse pour les configurations de référence

Cette partie aborde l'étude de l'écoulement autour de deux configurations de référence. La première configuration, appelée A, correspond à la marche montante avec pied-A intégré comme illustré sur la figure 2. La seconde configuration, dénommée B, correspond à la configuration A à laquelle on a ajouté un cylindre de diamètre 1mm en position x5. Cet ajout de petite dimension par rapport aux dimensions caractéristiques de la marche et du pied-A impose une modification significative à l'écoulement, qui est décrite dans cette partie.

3.1 Etude de la configuration A

L'évolution de la norme de la vitesse autour de la configuration A est représentée sur la figure 4.a. Sur cette figure le profil réel de la maquette est représenté par un trait noir et le domaine en gris correspond aux points où le champ de vitesse n'a pas été évalué. Ce domaine comprend notamment les zones d'ombres non éclairées par le laser (sous le bord d'attaque du pied-A et dans la cavité derrière le pied-A). Deux lignes d'iso-vitesse $U^*=1$ sont également représentées. La première ligne débute au bord d'attaque du pied-A et montre que l'écoulement incident au pied-A est ralenti sous l'effet de la présence de la géométrie. La seconde ligne émerge du bord de fuite du pied-A et s'étend proche de la portière horizontale. L'observation du champ de vitesse montre que l'écoulement est fortement accéléré au contournement du pied-A. La vitesse U^* croît de 1, au bord d'attaque du pied-A, à une valeur proche de 1.5, à l'arrière du pied-A. Deux lignes de courant illustrent l'absence de décollement de l'écoulement sur la partie horizontale derrière le pied-A.

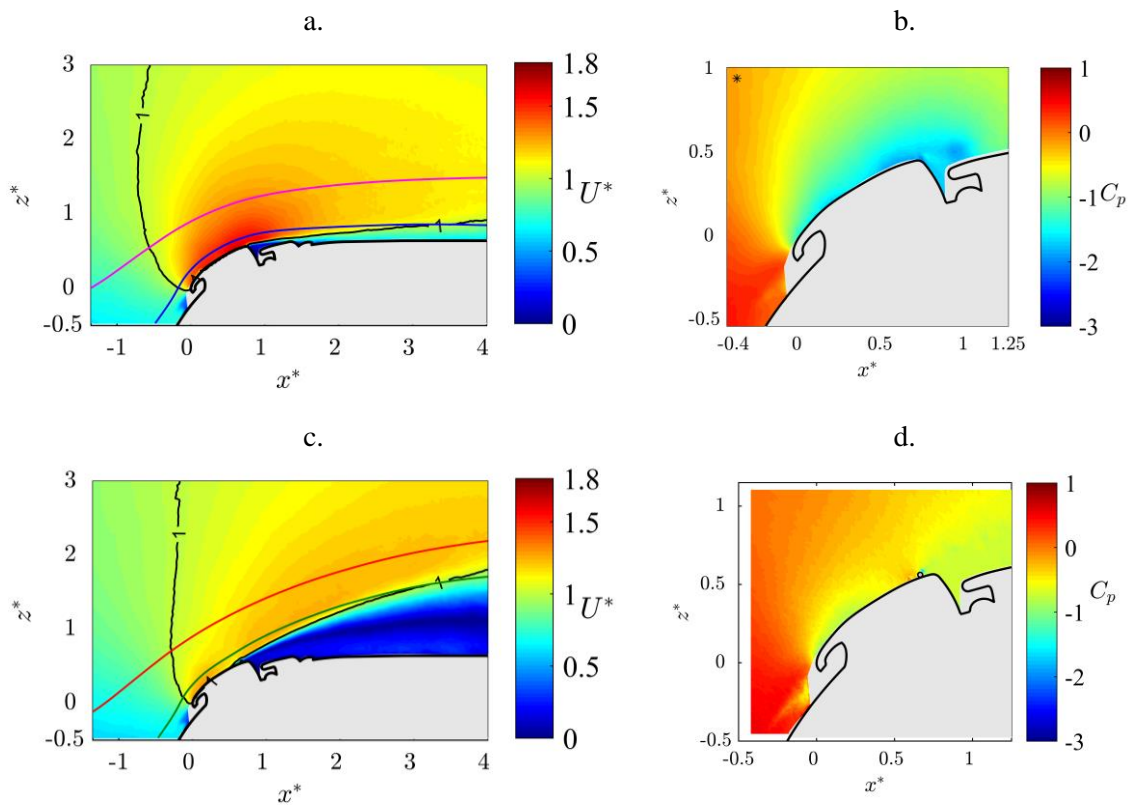


Figure 4 : Norme de la vitesse et de la pression moyennes pour la configuration A (a), (b) et la configuration B (c), (d).

Le champ de pression moyenne autour du pied-A est représenté sur la figure 4.b. Le point de référence de pression, auquel la valeur de la pression est déterminée par le calcul direct selon le théorème de Bernoulli, est représenté en haut à gauche de la cartographie. Au contournement du pied-A, le coefficient de pression C_p diminue jusqu'à l'arrière du pied-A. On observe également qu'à l'arrière du pied-A, au niveau du décroché de la géométrie, se trouve une bulle où la pression est minimale.

Le champ de vitesse représenté sur la figure 5.a montre que la région de pression minimale correspond à une petite bulle de recirculation située en aval du décrochement entre le pied-A ; l'écoulement potentiel fortement accéléré au-dessus de cette bulle permet néanmoins à l'écoulement de recoller rapidement sur la charnière. Il convient de remarquer que l'épaisseur de la couche limite à la surface du pied-A est beaucoup trop faible pour être identifiée avec la résolution spatiale utilisée ici.

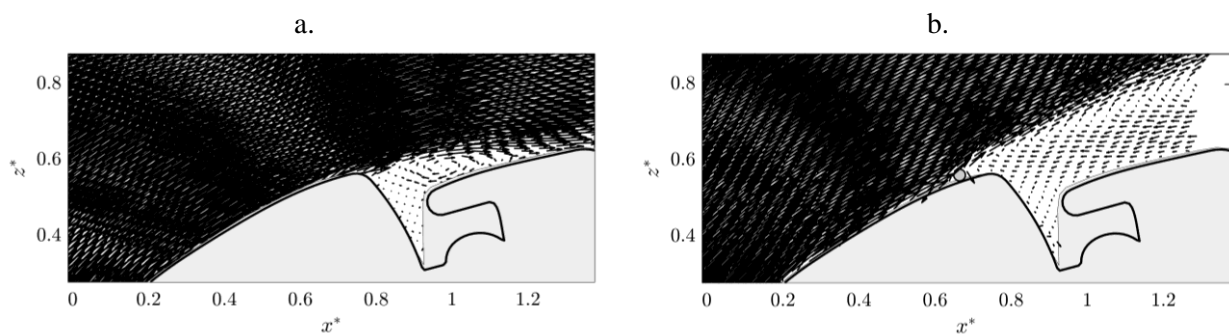


Figure 5 : Champ de vitesse à l'arrière du pied-A de la configuration A (a) et de la configuration B (b).

3.2 Etude de la configuration B

La norme de la vitesse pour la configuration B est représentée sur la figure 4.c. Un décollement massif est observé derrière le pied-A, au-dessus de la partie horizontale. La taille du champ de mesure ne permet pas d'observer le recollement de l'écoulement sur la maquette. Les deux lignes d'iso-vitesse $U^*=1$ débutent toujours aux mêmes points, au bord d'attaque et de fuite du pied-A, mais la région en survitesse qu'elles délimitent s'est rétrécie. Devant le pied-A l'écoulement incident est ralenti quasiment à la verticale du pied-A, en $x^*=0$, et à l'arrière la zone de recirculation est le lieu de faibles vitesses. On constate également que les niveaux d'accélération de l'écoulement sont moins importants autour du pied-A et même qu'au contraire la vitesse diminue au-dessus de la deuxième moitié du pied-A, en amont du décollement massif. Les lignes de courants qui sont tracées en vert et rouge passent dans le plan $x^*=0$ par les mêmes points que celles représentées sur la figure 4.a. Devant la marche la trajectoire de ces lignes de courant est peu modifiée tandis que sous l'effet du décollement celles-ci sont déviées parallèlement à la zone de recirculation derrière le pied-A.

Le champ de pression moyenne calculé pour cette configuration est représenté sur la figure 4.d. En accord avec l'observation faite sur les champs de vitesse, les gradients de pression ont beaucoup diminué et la pression s'est uniformisée autour du pied-A. On retrouve également un minimum local de pression autour de la position $x^*=0.25$ du pied-A. En aval de cette position la pression augmente jusqu'au cylindre, le gradient de pression est défavorable et c'est dans cette zone que l'écoulement présente un risque de décoller. L'observation de la pression moyenne permet d'identifier la zone à risque et d'estimer la position du décollement sur le pied-A (en aval de $x^*=0.25$).

Pour conclure sur la position du décollement massif, on représente sur la figure 5.b le champ de vitesse au voisinage du cylindre. Il est clair que le cylindre définit la position de la ligne du décollement massif qui se produit en aval du pied-A.

3.3 Comparaison des écoulements de référence.

On introduit une grandeur permettant d'évaluer l'ampleur du décollement éventuel de l'écoulement en aval du pied-A, sous la forme de la distance entre la paroi et la ligne d'iso-vitesse égale à 1, notée Δz^* . Cette grandeur pour les deux écoulements de référence est représentée sur la figure 6. La valeur de Δz^* en $x^*=4$ est quatre fois plus grande pour la configuration B que pour la configuration A.

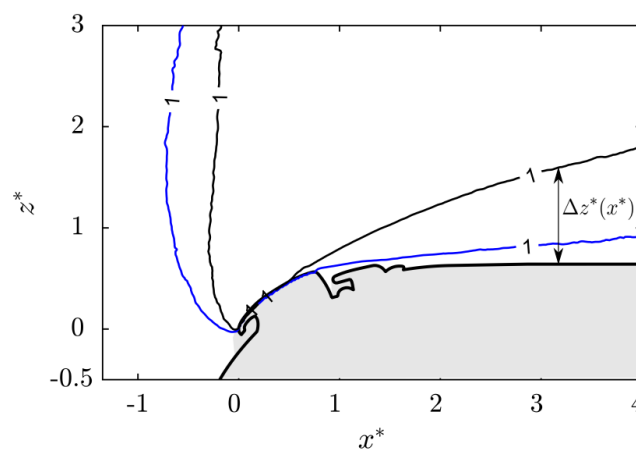


Figure 6 : Iso vitesse de $U^*=1$ pour la configuration A (en bleu) et la configuration B (en noir).

La vitesse le long des lignes de courants tracées sur les figures 4.a et 4.c est représentée sur la figure 7. L'évolution de la vitesse en amont du pied-A est peu sensible au fait que l'écoulement décolle massivement ou non. La forte accélération devant le pied-A est semblable pour les deux configurations et c'est au-dessus du pied-A que l'évolution de la vitesse est très différente selon le cas considéré. Dans la configuration A, la vitesse augmente tout le long du contournement du pied-A alors que pour la configuration B, l'accélération s'annule rapidement sur le pied-A et change même de signe. Pour ce cas la vitesse maximale est de 1.22. Pour $x^* > 1.8$, on constate une grande similarité entre les évolutions de la vitesse le long des lignes de courant passant par un point de référence donné, bien que les trajectoires soient très différentes dans les deux cas.

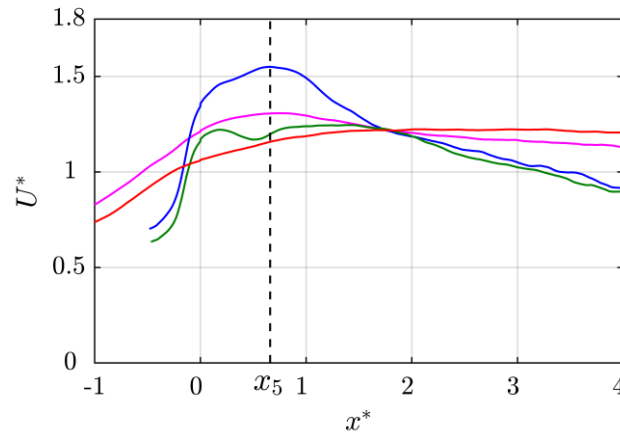


Figure 7 : Norme de la vitesse le long des lignes de courants tracées figures 4.a et 4.c. La configuration A est en bleu et rose, la configuration B est en vert et rouge. La position du cylindre x_5d1 est représentée en pointillés.

On a vu dans ce chapitre à travers l'étude de deux configurations très proches, qu'une petite modification de la géométrie pouvait donner lieu à des écoulements dont les comportements sont très différents. La question qui se pose est donc : quelles actions sont envisageables pour limiter le décollement massif dans le cas de la configuration B, en particulier en ne s'autorisant qu'à ajouter des petites modifications géométriques sur le pied-A ?

4 Contrôle du décollement par modification géométrique locale du pied-A

On étudie dans ce chapitre la configuration B, qui présente un décollement massif, à laquelle une perturbation x_2d2 a été ajoutée. Ce cas correspond donc au couplage de deux cylindres ($x_5d1 + x_2d2$) sur le pied-A. La norme de la vitesse associée à la configuration de couplage est représentée sur la figure 8.a. On retrouve pour cet écoulement des caractéristiques similaires à celui de la configuration A (figure 4.a) avec une forte accélération autour du pied-A et l'absence d'un décollement massif en aval du pied-A.

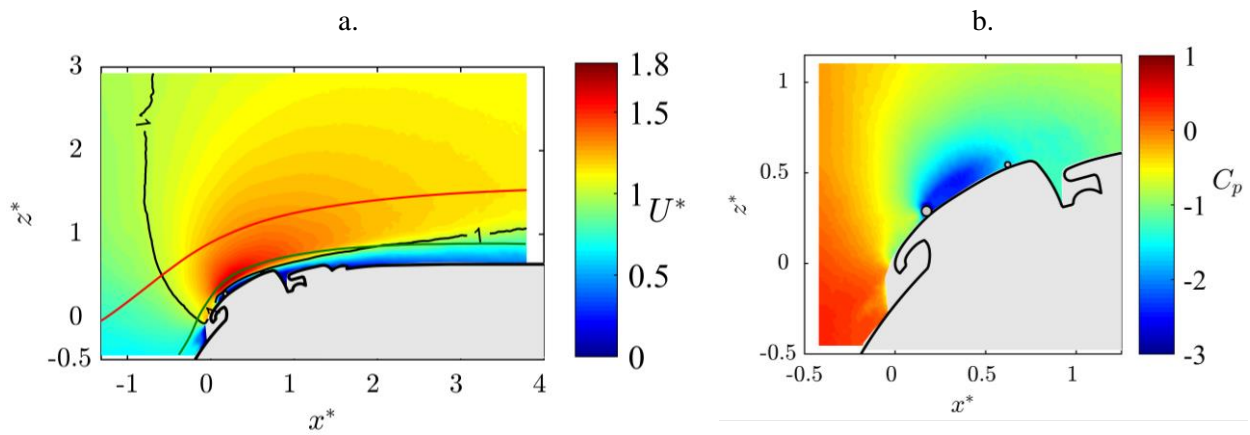


Figure 8 : Norme de la vitesse et de la pression moyennes pour la configuration de couplage (a) et (b).

La pression moyenne calculée pour cette configuration est représentée sur la figure 8.b. En présence du cylindre x2d2, la pression diminue en amont du cylindre sur la partie avant du pied-A et une bulle où la pression est minimale est observée dans le sillage de ce cylindre. Sur la partie avant du pied-A le champ de pression est proche de la figure 4.b, correspondant à la configuration A. Cependant, à partir de $x^*=0.3$ la pression augmente jusqu'au cylindre x5d1. Dans cette région le niveau gradient de pression est plus défavorable que pour la configuration B (figure 4.d) mais pour autant un décollement massif en aval du pied-A n'est pas observé.

La figure 9 montre le champ de vitesse au-dessus du pied-A. Le cylindre x2d2 fixe une bulle de recirculation dans son sillage. Sur le zoom de la figure 10 on voit que cette bulle de recirculation recolle sur le pied-A juste en amont de x5d1. La bulle de recirculation a deux effets : elle fixe une région de faible vitesse devant x5d1 et elle modifie l'angle d'incidence de l'écoulement sur l'obstacle x5d1. Par rapport au champ observé sur la figure 5.b, l'écoulement a été dévié vers l'horizontale. Dans ces conditions il n'y a plus de décollement observé sur le cylindre x5d1.

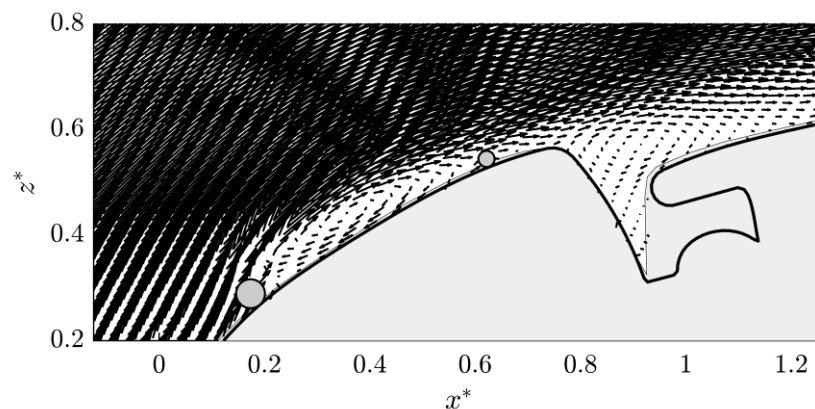


Figure 9 : Champ de vitesse autour du pied-A pour la configuration de contrôle d'un fort décollement.

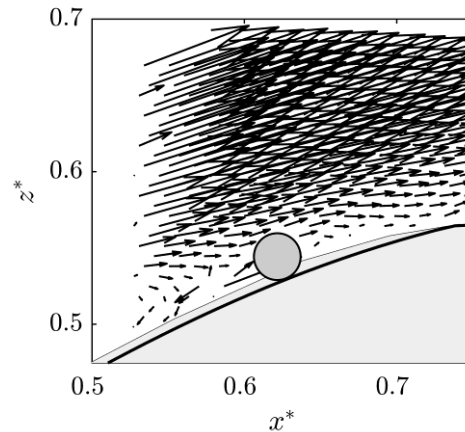


Figure 10 : Zoom de l'écoulement autour du cylindre $x5d1$ en présence du cylindre $x2d2$ en amont.

Sur la figure 11 l'iso-vitesse égale à 1 est tracée pour les différentes configurations étudiées. L'ajout de $x2d2$ supprime la zone de recirculation massive derrière le pied-A et réduit de plus de moitié Δz^* pour $x^*=4$. Le cas de couplage correspond à un cas intermédiaire entre les configurations A et B, plus proche de la configuration A. Ce résultat laisse penser qu'une grande variété de caractéristiques d'écoulement (décollé ou non) peut être obtenue en intégrant à la configuration B une petite modification géométrique, et ce selon la position et la taille de cette dernière. D'une part, une modification peut provoquer un décollement massif sur une géométrie qui n'en présentait pas (cas de la configuration B). D'autre part, l'ajout d'une nouvelle modification peut conduire à la réduction de la taille du décollement, et donc constituer une solution de contrôle passif du décollement. Les mécanismes physiques impliqués dans ce processus sont abordés dans la suite, portant sur l'intégration de différentes modifications géométriques à la configuration A.

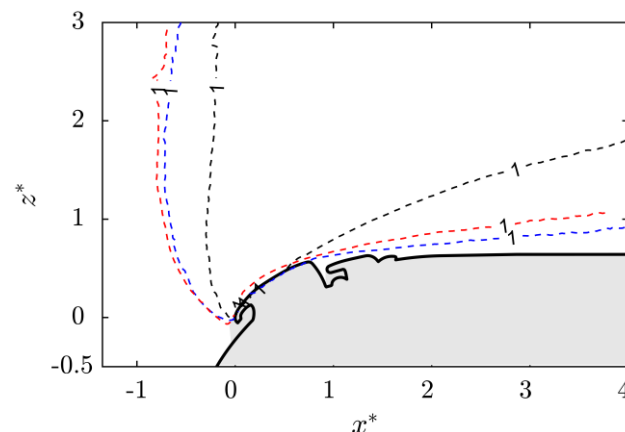


Figure 11 : Iso vitesse $U^*= 1$ pour la configuration A (bleu), la configuration B (noir) et le couplage (rouge).

5 Influence de la position et de la taille de la modification géométrique sur l'écoulement autour du pied-A.

On s'intéresse à l'effet sur l'écoulement que peut avoir l'intégration à la configuration A d'un cylindre seul, selon sa taille et sa position sur le pied-A. Différentes modifications géométriques ont été testées,

en intégrant un cylindre de diamètre allant de 1mm à 3.2mm et des positions sur le pied-A allant de x_1 à x_5 . Les résultats sont illustrés en figure 12. Ils montrent qu'il existe un compromis entre la taille et la position de la modification du pied-A pour ne pas provoquer de décollement massif. La position limite au décollement massif se déplace vers l'avant du pied-A à mesure que la taille de la modification augmente. Les configurations x_{3d1} et x_{2d2} sont les cas limites avant le décollement massif.

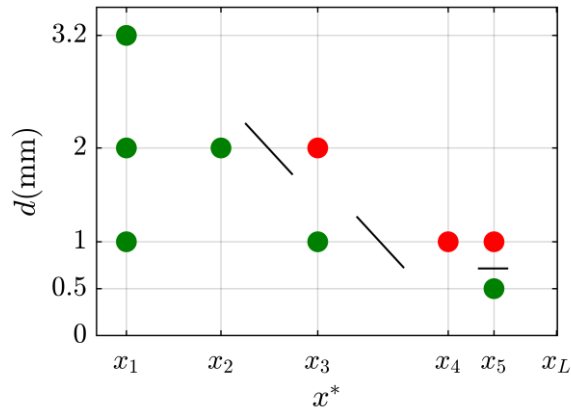


Figure 12 : Synthèse de l'étude paramétrique menée pour un cylindre seul sur la configuration A. Les cas sans décollement massif sont en vert, et avec décollement massif sont en rouge.

Les champs de vitesse autour du pied-A pour les configurations x_{3d1} et x_{2d2} sont représentés sur la figure 13. Pour x_{3d1} (figure 13.a), le nombre de Reynolds Re_d vaut 2000. Dans ces conditions, une bulle de recirculation existe probablement mais la résolution des mesures actuelles ne permet pas de l'observer. La taille de la bulle de la recirculation derrière x_{2d2} (figure 13.b) est la même que celle observée pour le cas du couplage (figure 9). Pour ces deux cas, la bulle recolle avant la fin du pied-A et on observe dans le sillage du pied-A une seconde bulle déjà observée sur la configuration A. La courbure locale du pied-A a aussi un effet sur la position du point de recollement puisque les configurations x_{4d1} et x_{5d1} présentent un décollement massif alors que la bulle de recirculation derrière x_{3d1} est si petite que l'on ne la mesure pas.

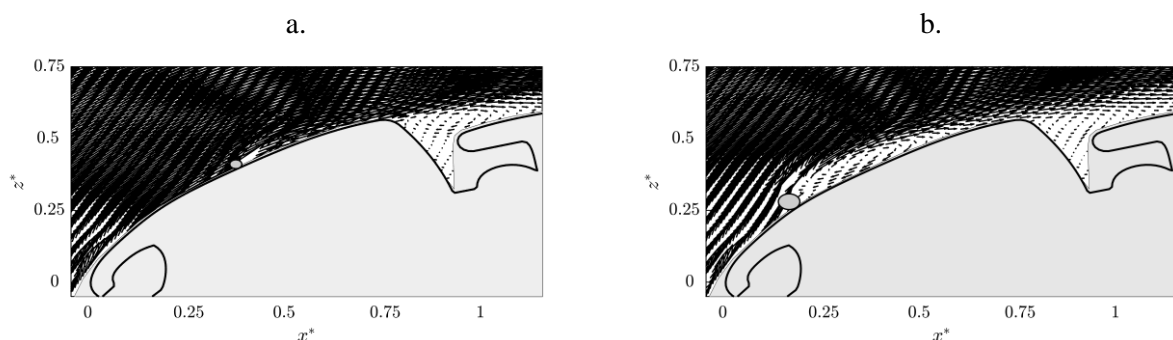


Figure 13 : Champ de vitesse pour une modification de la configuration A avec x_{3d1} (a) et x_{2d2} (b).

La vitesse le long d'une ligne de courant proche de la paroi pour les différents cas sans décollement massif considérés ici est représentée sur la figure 14. L'accélération devant le pied-A est très forte et la vitesse croît de 0.7 à 1.3 en $x^*=0$ pour tous ces cas. Par rapport à la configuration A, pour laquelle la vitesse augmente progressivement jusqu'à l'arrière du pied-A, la modification de la géométrie a pour

effet de fixer un maximum de vitesse au-dessus du cylindre. La comparaison des courbes x2d2 et x3d1, montre que la valeur de survitesse induite par l'obstacle augmente avec la taille du cylindre. De plus, la modification x2d2 seule ou couplée à la modification x5d1, correspond aux 2 courbes de la figure 14 présentant le plus de similitudes. L'ajout de x2d2 sur la configuration B, qui correspond à la solution de contrôle passif proposé dans la section 4, modifie l'écoulement autour du pied-A de telle sorte que x5d1 se retrouve masqué. La seconde perturbation n'a plus d'effet sur l'écoulement.

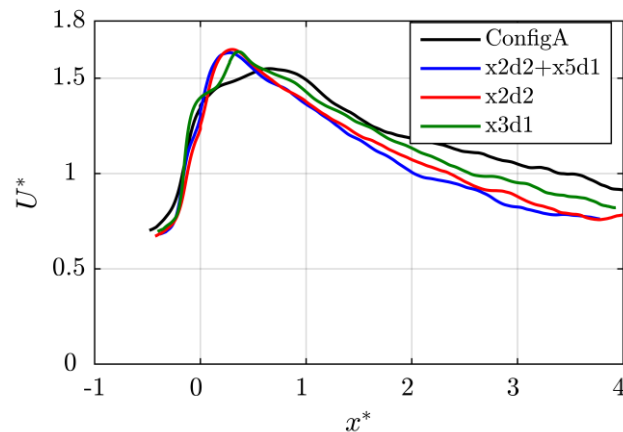


Figure 14 : Vitesse le long de la ligne de courant passant par le point (0; 0.25) – représentée en bleu sur la figure 4 pour la configuration A.

Les cartographies de vitesse et de pression pour la configuration A + x2d2 sont représentées sur la figure 15. Ces cartographies sont les mêmes que celles observées pour la configuration de couplage (figure 8). Ainsi, les champs correspondant à l'association de deux cylindres ne résultent pas du couplage de deux effets différents mais plutôt de la sélection de l'état x2d2. Les résultats de ces travaux montrent qu'il est possible de réduire un décollement massif, derrière une géométrie de pied-A, en forçant un écoulement avec un décollement plus faible par une modification géométrique en amont du décollement initial.

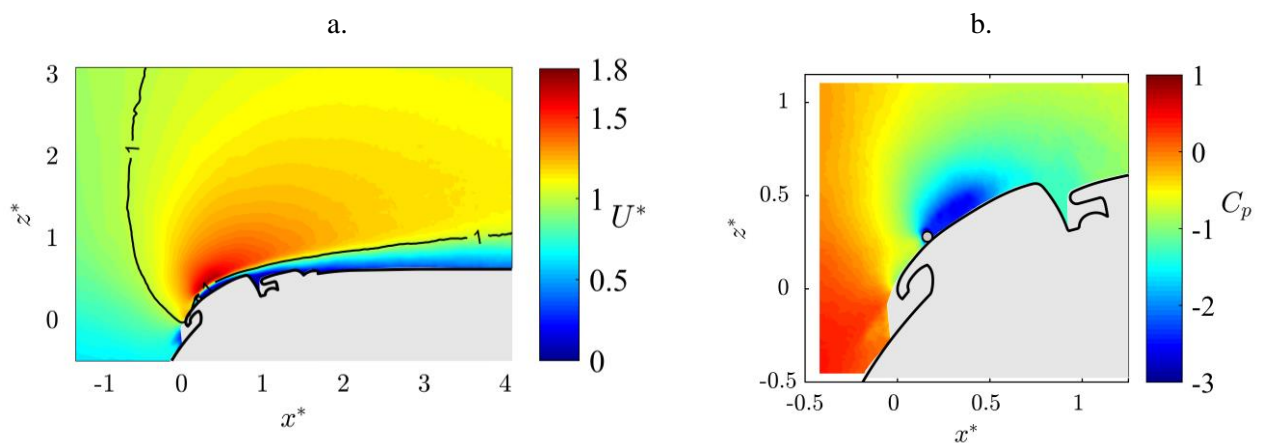


Figure 15 : Norme de la vitesse (a) et pression moyenne (b) pour la configuration A + x2d2.

6 Conclusion

Les résultats obtenus montrent qu'une très petite perturbation de la géométrie située en fin du pied-A est suffisante pour passer sur la portière d'une situation non décollée à une autre avec un décollement massif ; il est ainsi possible par une modification mineure de géométrie de couvrir le spectre des situations rencontrées en réalité suivant les conditions atmosphériques (vent latéral, turbulence externe, ...). Dans les cas où l'écoulement est massivement décollé sur la portière située en aval du pied-A, le décollement peut être atténué, voir supprimé, par simple adjonction d'un cylindre situé à la surface du pied-A. Un décollement est présent en aval du cylindre; suivant la position et le diamètre du cylindre perturbateur, ce décollement peut rester localisé sur la surface du pied-A sous la forme d'une bulle de recirculation fermée en moyenne. Les modifications induites en fin de pied-A sur l'écoulement potentiel situé au-dessus de cette bulle de recirculation, à savoir apparition de survitesses et modifications de l'inclinaison des lignes de courant, peuvent jouer dans un sens favorable pour diminuer, voir supprimer, le décollement massif sur la portière. Une compréhension approfondie des processus étudiés ici nécessite cependant d'avoir une connaissance plus complète des mécanismes en proche paroi liés à la viscosité, et donc de disposer de mesures avec une meilleure résolution spatiale. Par ailleurs, la situation étudiée ici est celle d'un décrochement important entre l'arrière du pied-A et la charnière de la portière; afin de couvrir l'étendue des configurations géométriques réelles, il convient d'analyser des configurations où la hauteur de ce décrochement est plus faible.

Remerciements

Ce travail est financé par le Fonds Unique Interministériel dans le cadre du projet Falcon n°DOS0069538/00 et a été réalisé au sein du LABEX CeLyA (ANR-10-LABX-0060) de l'Université de Lyon, dans le cadre du programme « Investissements d'Avenir » (ANR-16-IDEX-0005) de l'Etat Français, géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Nous remercions N. Grosjean et E. Jondeau pour leur contribution scientifique et technique permettant la réalisation des mesures PIV.

Références

- [1] - Vernet, Julie & Örlü, Ramis & Alfredsson, Per-Henrik. (2015). Separation control by means of plasma actuation on a half cylinder approached by a turbulent boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- [2] - Vernet, Julie & Örlü, Ramis & Söderblom, David & Elofsson, Per & Alfredsson, Per-Henrik. (2018). Plasma Streamwise Vortex Generators for Flow Separation Control on Trucks: A Proof-of-concept Experiment. *Flow, Turbulence and Combustion*.
- [3] - Minelli, Guglielmo & Adi Hartono, E & Chernoray, Valery & Hjelm, Linus & Krajnovic, Sinisa. (2017). Aerodynamic flow control for a generic truck cabin using synthetic jets. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- [4] - Minelli, Guglielmo & Adi Hartono, E & Chernoray, Valery & Hjelm, Linus & Basara, Branislav & Krajnovic, Sinisa (2018). Development of active flow control for trucks. *3rd Thermal and Fluids Engineering Conference*.
- [5] - Oxlade, Anthony. (2013). High-Frequency Pulsed Jet Forcing of an Axisymmetric Bluff Body Wake.