



HAL
open science

Contrôle aérodynamique et effet d'échelle Application au contrôle par jets pulsés sur un corps à sillage fortement décollé.

Patrick Gilliéron

► **To cite this version:**

Patrick Gilliéron. Contrôle aérodynamique et effet d'échelle Application au contrôle par jets pulsés sur un corps à sillage fortement décollé.. Congrès Français de Mécanique (CFM), Association Française de Mécanique (AFM), Aug 2013, Bordeaux, France. hal-00905205v3

HAL Id: hal-00905205

<https://hal.science/hal-00905205v3>

Submitted on 7 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Contrôle aérodynamique et effet d'échelle

Application au contrôle par jets pulsés sur un corps à sillage fortement décollé

P. GILLIÉRON

Chercheur indépendant, rdmfa.pgillieron@orange.fr

Résumé :

Les expérimentations effectuées en soufflerie pour mettre au point des solutions innovantes de contrôle des décollements aérodynamiques s'effectuent le plus souvent sur des géométries à échelle réduite. La transposition des protocoles expérimentaux et la détermination de l'efficacité énergétique des solutions identifiées sont alors rarement étudiées et analysées sur des géométries à échelle réelle. A partir d'un protocole ayant permis de réduire de 20% la traînée aérodynamique d'une maquette à sillage fortement décollé, le papier propose une transposition de ce protocole à échelle réelle associée à une analyse de ses effets sur l'efficacité énergétique.

Abstract :

The experiments realized in wind tunnel to develop innovating solutions of aerodynamic control are generally carried out on reduced scale geometries. The transposition of the experimental protocols and the determination of the energy efficiency of the identified solutions then are seldom studied and analyzed on real scale geometries. Starting from a protocol having allowed to reduce by 20% the aerodynamic drag of a simplified geometry with strongly separated wake, this paper proposes a transposition on a real scale associated with an analysis of its effects on energy efficiency.

Mots clefs : Aérodynamique, contrôle, actionneurs, jet pulsé, modélisation.

1 Introduction

Les expérimentations effectuées en soufflerie pour mettre au point des solutions innovantes de contrôle actif des décollements aérodynamiques s'effectuent le plus souvent sur des géométries à échelle réduite. Cette orientation est déterminée par la nécessité de réduire les coûts d'obtention des maquettes, les coûts de réalisation et d'implantation des actionneurs, les coûts d'instrumentation et les coûts des essais.

Les protocoles expérimentaux et l'efficacité énergétique des diverses solutions de contrôle sont alors rarement transposés et analysés sur des géométries à échelle réelle. L'absence de données quantifiées réduit ainsi l'intérêt que pourraient porter les diverses industries au contrôle actif des décollements aérodynamiques pour accroître la portance, réduire la traînée ou encore libérer la créativité du Design des contraintes aérodynamiques [1].

Les enjeux sont importants tant au niveau de la préservation des ressources énergétiques que de la pollution et du réchauffement climatique. A titre d'exemple, réduire de 10% la traînée aérodynamique d'une automobile de milieu de gamme permet de diminuer la consommation d'environ 0.5 litre sur 100 km à 130 km/h, soit à peu près de 10% sa consommation moyenne sur la même distance (5 litres pour 100 kms). En France et pour les quelques 85 milliards de kilomètres parcourus [2] chaque année sur le réseau autoroutier, cette réduction de traînée aérodynamique pourrait permettre de diminuer la consommation de produits pétroliers de 425 millions de litres soit l'équivalent d'au moins 2.6 millions de barils de pétrole [1].

Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de **fournir des ordres de grandeur ainsi que d'estimer l'efficacité du contrôle** sur des géométries à échelle réelle à partir de résultats établis sur des

maquettes à échelle réduite. Ces ordres de grandeur et l'efficacité du contrôle sont successivement établis et analysés à partir de résultats relevés sur une géométrie simplifiée de véhicule automobile à échelle réduite équipée d'une barrette de jets pulsés positionnée sur le haut de la lunette arrière. Dans les développements qui suivent et pour l'échelle i/N , les termes i et N désignent respectivement les facteurs d'échelle et de réduction.

2 La maquette

La maquette est une géométrie simplifiée inspirée du corps de Ahmed à lunette arrière inclinée d'un angle $\alpha=35^\circ$ par rapport à la direction de l'écoulement incident [3], voir la figure 1. Les longueurs L_A et l_A , l'envergure W_A , la hauteur H_A , respectivement égales à 0.731, 0.111, 0.272 et 0.202 m sont significatives d'une géométrie simplifiée de type bicorps à échelle $1/N$ où $N=6$. Les plans du pavillon et de soubassement sont horizontaux et la fin du pavillon (resp. la fin du soubassement) se raccorde au haut de la lunette arrière (resp. au bas du culot) de manière continue de part et d'autre d'une surface cylindrique de rayon égal à $2 \cdot 10^{-2}$ m [4], voir la figure 2. Ces surfaces arrondies ne sont pas représentées sur la figure 1.

La partie supérieure de la lunette arrière est équipée d'une barrette d'actionneurs de jets pulsés positionnée horizontalement et perpendiculairement à la direction de l'écoulement incident. Cette barrette apparaît sur la partie droite de la ligne fictive repérée A sur la figure 1. Les actionneurs fonctionnent en phase, sont alimentés par un réseau d'air comprimé et débouchent sur une fente unique de hauteur $e=0.5 \cdot 10^{-3}$ m située à une distance $\lambda=5 \cdot 10^{-3}$ m du haut du plan de la lunette arrière, voir la figure 2.

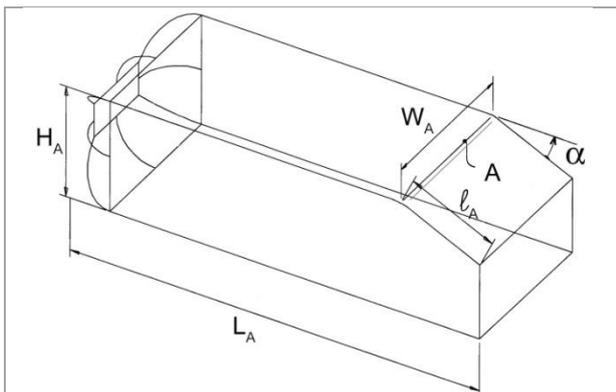


FIG. 1 – Géométrie modifiée du corps de Ahmed à échelle 0.7. La ligne A est à la jonction fictive entre la fin du pavillon et le haut de la lunette arrière [3-4].

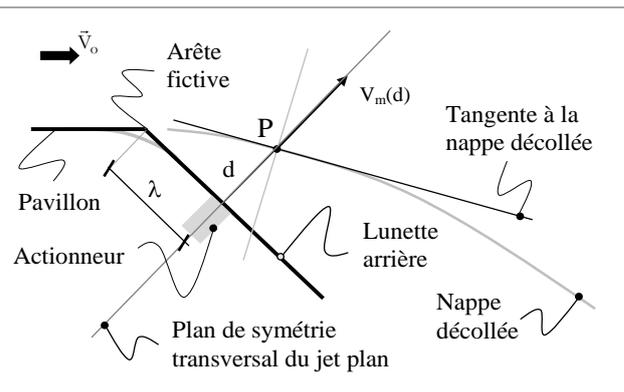


FIG. 2 – Barrette d'actionneurs située à la distance λ du haut de la lunette arrière [4-5]. $V_m(d)$ est la vitesse efficace maximale du jet à la distance d de la nappe décollée au plan de la lunette arrière.

3 Les principaux résultats

Pour la géométrie considérée et une vitesse d'écoulement infini amont V_o égale à 30 m/s, l'écoulement décolle à la fin du pavillon pour donner naissance à une nappe décollée, voir les figures 2 et 3. Un écoulement de retour apparaît sous la nappe et génère deux structures tourbillonnaires contrarotatives auxquelles sont associés deux foyers de séparation et deux points selle respectivement repérés F_1 et F_2 puis S_1 et S_2 sur la figure 5 [5]. Des cartographies PIV mettent en évidence deux structures tourbillonnaires en cornet sur les parties latérales gauche et droite de la lunette arrière [1,5], voir la figure 7. Pour une fréquence f_o et une vitesse efficace V_{eff} du jet dans le plan de sortie de l'actionneur respectivement égales à 500 Hertz et 33 m/s, la traînée aérodynamique diminue de 20% [4-5].

Ce résultat s'accompagne d'une réduction des vitesses en proche paroi (figures 5 et 6) mise en évidence par une diminution de la visualisation des lignes de frottement, d'une augmentation de la dimension verticale du sillage au dessus de la lunette arrière, d'un déplacement vers l'aval de la position moyenne des structures tourbillonnaires issues de la fin du pavillon, d'une réduction de la circulation de ces structures (figures 3 et 4) et d'une réduction des vitesses azimutales pour les

structures tourbillonnaires en cornet qui prennent naissance sur les parties latérales gauche et droite de la lunette arrière (figures 7 et 8) [5].

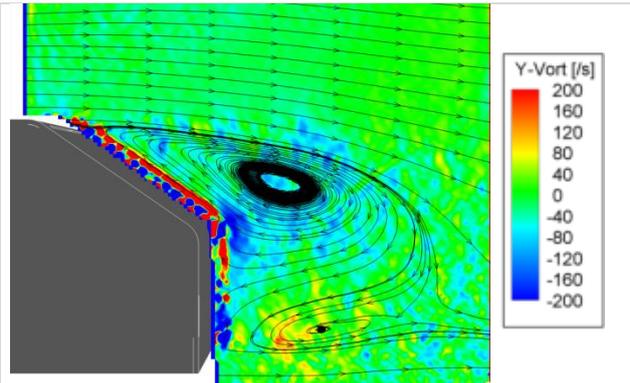
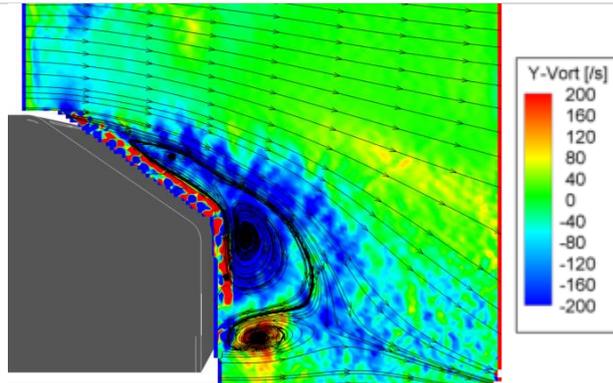


FIG. 3 – Lignes de courant et champ de vorticité suivant y, **sans** contrôle, [4-5].

FIG. 4 – Lignes de courant et champ de vorticité suivant y, **avec** contrôle, [4-5].

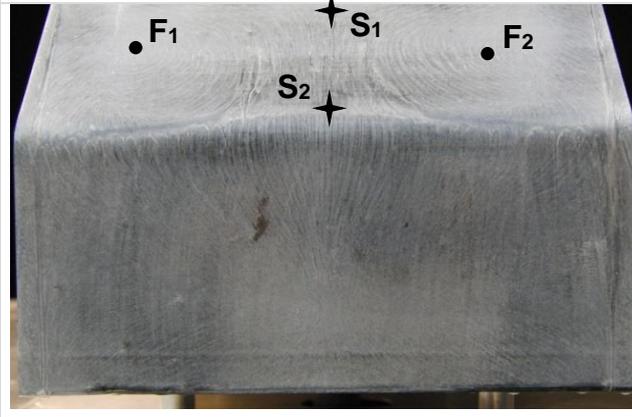
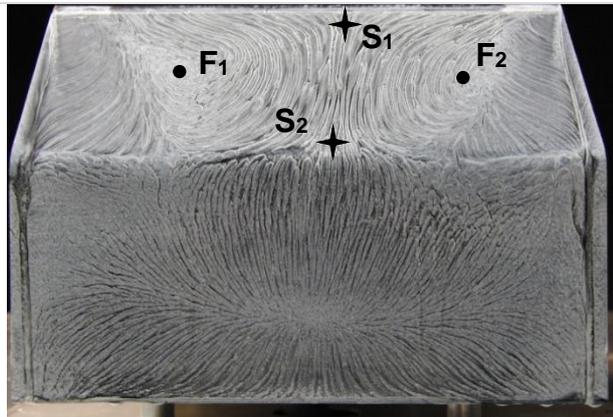


FIG. 5 - Visualisation pariétale sur la lunette arrière et le culot, configuration **sans** contrôle, [4-5].

FIG. 6 - Visualisation pariétale sur la lunette arrière et le culot, configuration **avec** contrôle, [4-5].

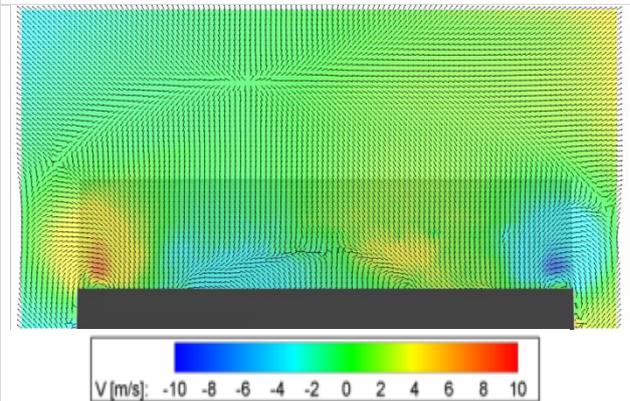
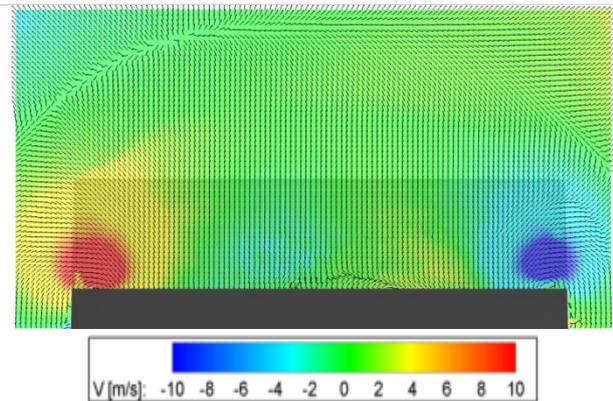


FIG. 7 – Champ de vitesse dans le plan $x=2l_A/3$, configuration **sans** contrôle, [4-5].

FIG. 8 - Champ de vitesse dans le plan $x=2l_A/3$, configuration **avec** contrôle, [4-5].

4 Ordres de grandeur pour une maquette à l'échelle N/N

L'objectif est ici d'estimer des **ordres de grandeur pour la fréquence et la vitesse efficace (valeur RMS)** dans le plan de sortie du jet pour des actionneurs positionnés sur une maquette à échelle réelle N/N (les facteurs de réduction i et d'échelle N sont égaux). Ces ordres de grandeur se déterminent à partir de visualisations et de mesures relevées sur la maquette à échelle 1/N (le facteur d'échelle i est égal à 1) pour la meilleure réduction de traînée (20%), une vitesse d'écoulement infini amont V_0 et une largeur de fente e des actionneurs indépendantes de l'échelle. Cette dernière hypothèse est imposée pour limiter l'accroissement de puissance (la puissance varie proportionnellement à la

section de sortie de l'actionneur), réduire l'impact visuel du contrôle et éliminer les risques d'entrées parasites d'insectes, d'eau, de poussières ou de déchets divers dans les actionneurs.

La fréquence f du jet pour la maquette à l'échelle N/N se détermine à partir de la fréquence f_0 du jet pour la maquette à échelle $1/N$ et du rapport des fréquences de battement de la nappe décollée pour les maquettes aux échelles N/N et $1/N$ (facteurs d'échelle N et 1) respectivement notées F et F_0 .

La vitesse efficace (RMS) du jet dans le plan de sortie de l'actionneur, désignée par la suite **vitesse de débit**, se détermine à partir de la vitesse relevée à l'intersection de l'axe du jet avec la nappe décollée de fin de pavillon, d'une équation spatiale pour la vitesse du jet et du facteur d'échelle i .

4.1 Fréquence f du jet pour la maquette à l'échelle réelle N/N - La fréquence f du jet pour la maquette à l'échelle réelle N/N s'obtient en considérant que les dimensions des sillages sans contrôle autour des maquettes aux échelles N/N et $1/N$ sont homologues dans l'espace. La fréquence du jet se détermine alors à partir de la fréquence de battement du décollement de la lunette arrière en considérant constants les rapports de la fréquence du jet sur la fréquence de battement pour chacune des deux échelles.

La fréquence de battement s'obtient à partir de la vitesse de l'écoulement infini amont V_0 et de la distance verticale h^* qui sépare les plans horizontaux qui passent par les points selles S_1 et S_2 , voir les figures 9 et 10. Cette distance, estimée sur la maquette à échelle réduite ($i=1$ et $N=6$), est proche de $0.08m$. Pour un diamètre de retournement h de la structure tourbillonnaire située sous la nappe décollée estimée¹ à 75% de la hauteur h^* et pour la vitesse d'écoulement à l'infini amont V_0 , la fréquence de battement F_0 , définie à partir du rapport de la vitesse V_0 sur la hauteur verticale h , est alors proche de 500 Hertz. Cette fréquence suggère que la réduction de traînée soit associée à des mouvements en phase de la nappe et du jet.

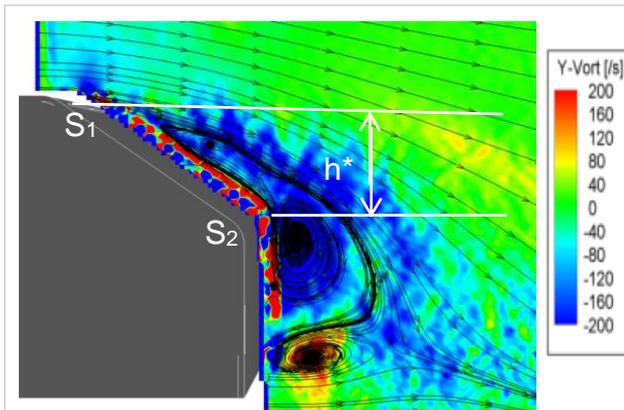


FIG. 9 – Lignes de courant et champ de vorticité **sans contrôle** [4,5]. Les traits blancs représentent les traces des deux plans horizontaux qui passent par les points selle S_1 et S_2 repérés sur les figures 5 et 10.

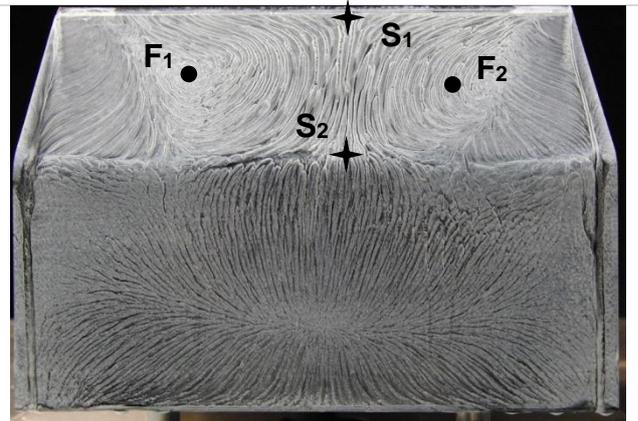


FIG. 10 – Maquette **sans contrôle**, visualisation pariétale sur la lunette arrière et le culot [5]. Les points selles S_1 et S_2 sont associés à la dimension verticale moyenne h ($h < h^*$) de la structure tourbillonnaire issue du haut de la lunette arrière.

Suivant le même calcul, pour la maquette à l'échelle N/N et la même vitesse V_0 de l'écoulement à l'infini amont, la fréquence de battement F est alors proche de 83 Hertz (N fois moins que la fréquence de battement F_0 pour la maquette à échelle $1/N$).

Si les rapports de la fréquence du jet sur la fréquence de battement pour les maquettes aux échelles N/N et $1/N$ sont constants (hypothèse), la fréquence du jet pour la maquette à échelle N/N donnée par :

$$f = F \cdot \frac{f_0}{F_0} \quad (1)$$

est également égale à 83 Hertz avec $f_0=500$ Hertz, voir le paragraphe 3. La fréquence du jet pulsé

¹ Il faut prendre en compte la hauteur de la couche limite   la paroi et le gradient vertical de vitesse entre la structure tourbillonnaire et la nappe décollée issue du haut de la lunette arrière.

pour le contrôle diminue alors avec l'augmentation de l'échelle des maquettes. Cet ordre de grandeur reste cohérent avec les caractéristiques des actionneurs disponibles aujourd'hui sur le marché [6].

4.2 Vitesse de débit du jet pour la maquette à échelle N/N - La détermination de la vitesse de débit (voir le §4 page 4) du jet nécessite de prendre en considération l'accroissement de distance entre la nappe décollée et l'actionneur d'une part et l'augmentation des dimensions longitudinale et transversale du sillage d'autre part.

Pour une même vitesse V_o de l'écoulement extérieur, la vitesse induite par le jet au point P pour la configuration à l'échelle N/N doit au moins être égale à la vitesse induite par le jet pour la configuration à l'échelle 1/N afin de garantir une influence locale identique du jet sur la nappe.

Pour cette même vitesse de l'écoulement extérieur, les vitesses normale et tangentielle au point P respectivement désignées $u(d)$ et $v(d)$ doivent enfin pouvoir influencer le sillage sur des distances transversale et longitudinale N fois plus importantes.

4.2.1 Augmentation de la distance entre l'actionneur et la nappe décollée : L'accroissement de la distance entre l'actionneur et la nappe décollée nécessite de s'intéresser à l'évolution de la vitesse du jet dans la direction perpendiculaire au plan de sortie des actionneurs. Dans les développements qui suivent, le champ instantané des vitesses est supposé parfaitement représenté par le champ généré par un jet continu. Le caractère instationnaire est ainsi supposé sans effet sur le champ de vitesse induit par le jet au-delà du plan de sortie de l'actionneur.

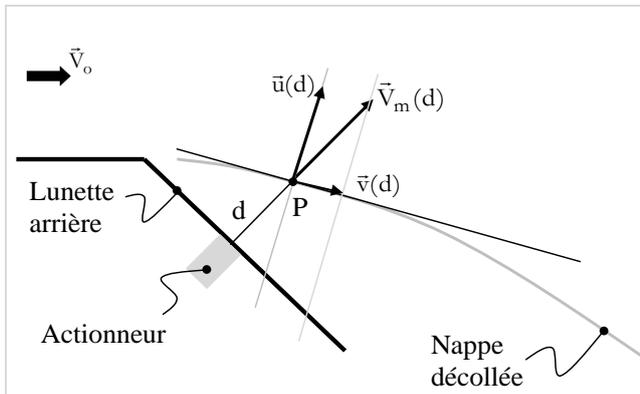


FIG. 11 - Actionneur de type jet plan positionné sur le haut de la lunette arrière [4]. Le jet est transversal et souffle perpendiculairement à la surface de la lunette arrière. La vitesse du jet sur l'axe, notée $V_m(d)$, est à la distance d du plan de la lunette arrière.

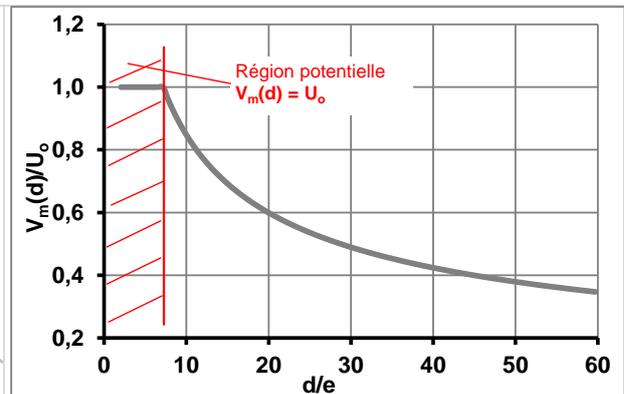


FIG. 12 – Évolution de la vitesse maximale réduite $V_m(d)/U_o$ relevée dans le plan médian perpendiculaire à la section de sortie de l'actionneur en fonction de la distance réduite d/e , d'après Abramovich (voir la théorie des jets plans [7]).

Le module de la vitesse, en dehors de la région à potentiel² des vitesses, est alors fonction du temps et de sa distance d^o par rapport au pôle³ du jet. A chaque instant, son évolution sur l'axe du jet dans le plan médian perpendiculaire à la section de sortie de l'actionneur varie en raison inverse de la racine carrée de sa distance d^o au pôle du jet telle que (Abramovich [7]) :

$$V_m(d^o) = 2,68 U_o \sqrt{\frac{e}{d^o}} \quad (2)$$

avec U_o et e , la vitesse de débit et l'épaisseur du jet dans le plan de sortie de l'actionneur (hauteur du jet plan). Le pôle du jet étant très proche de la section de sortie du jet, la distance d^o est considérée égale à la distance d qui sépare le plan de sortie du jet du point P, voir la figure 11. La loi d'évolution

² Région où la vitesse est égale à la vitesse de débit, la vitesse est transversalement constante en tout point.

³ Le pôle du jet est un point situé sur l'axe du jet légèrement en amont du plan de sortie du jet, voir les travaux d'Abramovich [7].

de la vitesse réduite $\frac{V_m(d)}{U_o}$ en fonction de la distance réduite $\frac{d}{e}$ est représentée sur la figure 12.

Quelle que soit la position de la nappe décollée, le jet intercepte la nappe en un point P situé à une distance d du plan de sortie du jet, voir la figure 11. En ce point, la vitesse du jet possède une composante normale et une composante tangentielle respectivement notées $u(d)$ et $v(d)$. La composante normale $u(d)$ tend à éloigner la nappe de la surface de la lunette arrière et par conséquent à accroître la dimension verticale du sillage. La composante tangentielle $v(d)$ tend à reporter vers l'aval les structures tourbillonnaires associées à la nappe décollée issue du pavillon [5]. Ces influences engendrent des modifications dans la cinématique tourbillonnaire de sillage et diminuent la circulation associée aux structures tourbillonnaires qui constituent le sillage [8].

Si l'épaisseur de couche limite varie linéairement⁴ en fonction du facteur d'échelle i , alors en désignant par d_1 et d_i les distances homologues respectives du plan de sortie des actionneurs à la nappe décollée pour les échelles $1/N$ et i/N puis par U_1 la vitesse de débit pour la maquette à l'échelle $1/N$, la vitesse de débit U_i^* dans le plan de sortie des actionneurs pour la maquette à l'échelle i/N est, d'après (2), donnée par :

$$U_i^* = U_1 \left(\frac{d_i}{d_1} \right)^2 = U_1 i^2 \quad \text{avec } i \in [1, N] \quad (3)$$

Dans ces conditions et lorsque la valeur du facteur d'échelle i devient égale à N , la vitesse de débit U_N^* est alors donnée par la relation⁵ :

$$U_N^* = U_1 \left(\frac{d_N}{d_1} \right)^2 = U_1 N^2 \quad (4)$$

Pour les valeurs fournies précédemment et une vitesse de débit U_1 pour la maquette à l'échelle $1/N$ (avec N facteur de réduction égal à 6) égale à 33 m/s [4-5], la vitesse de débit U_N^* dans le plan de sortie des actionneurs pour la maquette échelle N/N est égale à 81 m/s (plus de 2 fois la valeur pour la maquette à échelle $1/N$). Cette vitesse s'identifie à la vitesse déterminée pour une épaisseur de fente e^6 et un coefficient de quantité de mouvement C_μ [5] constants en fonction du facteur d'échelle i mais ne tient pas compte de l'augmentation des vitesses nécessaires pour influencer le sillage sur des distances transversale et longitudinale $N=6$ fois plus importantes.

4.2.2 Augmentation des dimensions transversale et longitudinale de la nappe : Les accroissements des dimensions transversale et longitudinale de la nappe décollée nécessitent de s'intéresser à l'influence du jet sur la longueur de l'arc balayé par la nappe dans son mouvement de part et d'autre de sa position moyenne et sur la longueur du sillage.

En considérant les domaines d'influence des composantes normale et tangentielle du jet respectivement proportionnelles à la longueur de l'arc balayé par la nappe et à la longueur du sillage relevée dans la direction de déplacement, la vitesse de débit du jet U_i au point P pour la maquette à échelle i/N doit alors être i fois plus grande que la vitesse de débit U_1 relevée au point P homologue pour la maquette à échelle $1/N$.

$$U_i = i U_1 \quad \text{avec } i \in [1, N] \quad (5)$$

⁴ Pour un écoulement turbulent, le rapport des hauteurs de couche limite δ_i / δ_1 pour les facteurs d'échelle i et 1 est égal à $i^{0.8}$ et la vitesse réelle à mettre en œuvre est légèrement inférieure à la valeur fournie par l'équation (3).

⁵ Cette relation peut-être utilisée pour estimer la vitesse maximale dans le plan de sortie d'un actionneur de jets synthétiques. Ces jets génèrent un train de structures tourbillonnaires transversales qui occupent le volume situé sous la nappe décollée issue du haut de la lunette arrière (cas du contrôle par jets synthétiques sur un corps de Ahmed à lunette arrière inclinée à 25 degrés [9]).

⁶ La largeur de la fente s'identifie à l'épaisseur e du jet dans le plan de sortie de l'actionneur.

Les considérations, hypothèses et résultats précédents permettent alors d'estimer la vitesse de débit du jet U_i dans le plan de sortie de l'actionneur pour l'écoulement homologue à l'échelle i/N par :

$$U_i = i U_1 \left(\frac{d_i}{d_1} \right)^{\frac{1}{2}} = U_1 i^{\frac{3}{2}} \quad \text{avec } i \in [1, N] \quad (6)$$

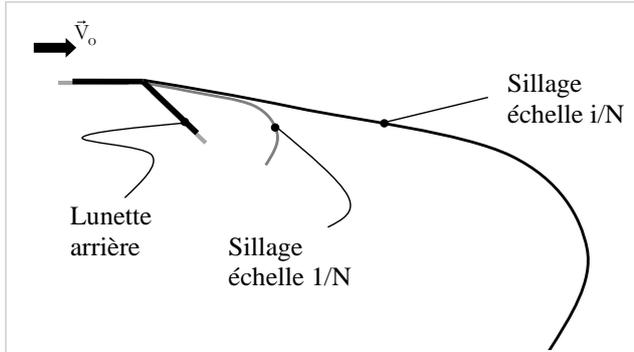


FIG. 13 – Évolutions homologues du sillage dans les directions transversale et longitudinale pour les échelles $1/N$ et i/N avec $i > 1$.

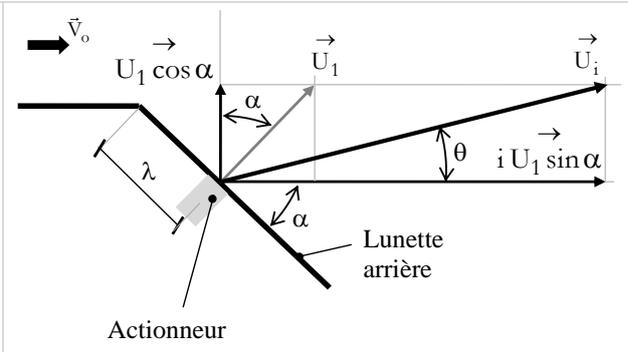


FIG. 14 - Vitesse et orientation du jet pour les échelles $1/N$ et i/N lorsque la distance λ de l'actionneur reste constante, $i > 1$.

Ces vitesses peuvent être réduites en choisissant de rapprocher la position longitudinale de la fente des actionneurs vers le haut de la lunette arrière. Pour une distance λ , de l'actionneur par rapport au haut de la lunette arrière, constante quel que soit l'indice d'échelle i (figure 14), la composante normale de la vitesse de débit à la nappe reste alors inchangée.

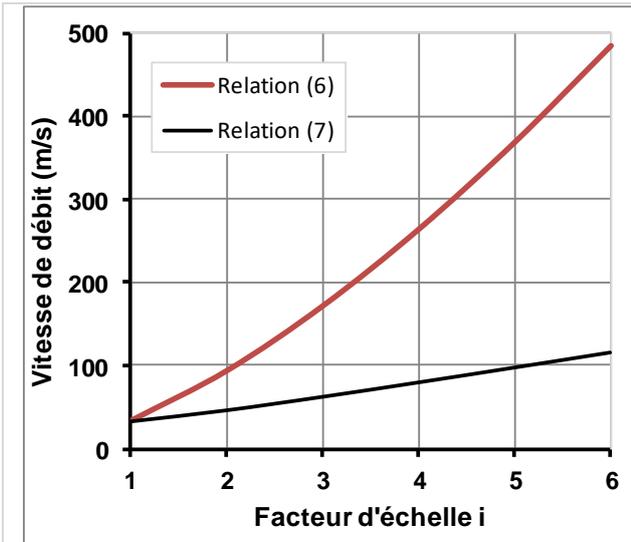


FIG. 15 – Vitesses de débit en fonction du facteur d'échelle i rapportées à la vitesse de débit pour l'échelle $1/N$ ($N=6$) pour une ligne d'actionneurs positionnée à $N\lambda$ (relation (6)) et λ (relation (7)) du haut de la lunette arrière.

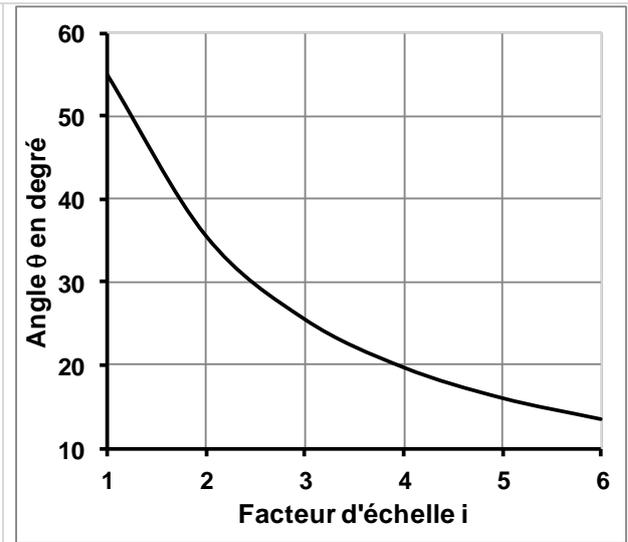


FIG. 16 - Évolutions de l'angle θ en fonction du facteur d'échelle i , de 1 à N ($N=6$), lorsque la distance λ de l'actionneur par rapport au haut de la lunette arrière reste constante, relation (8).

Dans ce cas et pour une nappe dont la position moyenne relevée pour la meilleure réduction de traînée est proche de l'horizontale [5] (voir la figure 4), la vitesse de débit dans le plan de l'actionneur devient :

$$U_i = U_1 \left[1 + (i^2 - 1) \sin^2 \alpha \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec } i \in [1, N] \quad (7)$$

avec α , l'angle d'inclinaison de la lunette arrière par rapport au plan horizontal du pavillon. A cette configuration est associée une inclinaison θ du jet par rapport au plan du pavillon donnée par (voir les figures 14 et 16) :

$$\theta = \text{Arc tan} \frac{1}{i \tan \alpha} \quad \text{avec } \alpha \neq \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

L'angle d'inclinaison θ du jet par rapport au plan du pavillon diminue (resp. augmente) lorsque le facteur d'échelle i et l'angle α augmentent (resp. diminuent). Pour un culot droit, l'angle α tend vers 90° et l'angle θ du jet par rapport au plan du pavillon tend vers zéro.

La relation (8) s'obtient enfin en considérant un plan de pavillon horizontal parallèle à la direction de l'écoulement infini amont. Si la partie avale du pavillon est inclinée vers le bas d'un angle η par rapport à la direction de l'écoulement amont, l'angle θ_o d'inclinaison du jet par rapport à la direction de l'écoulement infini amont est donnée par :

$$\theta_o = \text{Arc tan} \frac{1}{i \tan \alpha} - \eta \quad \text{avec } \eta > 0 \quad (9)$$

5 Efficacité du contrôle

La fréquence et la vitesse de débit du jet étant déterminées, l'objectif suivant consiste à estimer l'impact du facteur d'échelle i sur l'efficacité du contrôle. Cette estimation nécessite de définir puis d'identifier les impacts du facteur d'échelle i sur la puissance à mettre en œuvre pour assurer le contrôle et sur le gain de puissance aérodynamique. L'estimation s'effectue pour des géométries d'actionneurs identiques indépendantes du facteur d'échelle.

5.1 Impact sur la puissance nécessaire au contrôle - L'impact du facteur d'échelle i sur la puissance nécessaire au contrôle est analysé pour des distances λ , de l'actionneur par rapport au haut de la lunette arrière, respectivement homologues et constante lorsque le facteur d'échelle i varie de 1 à N.

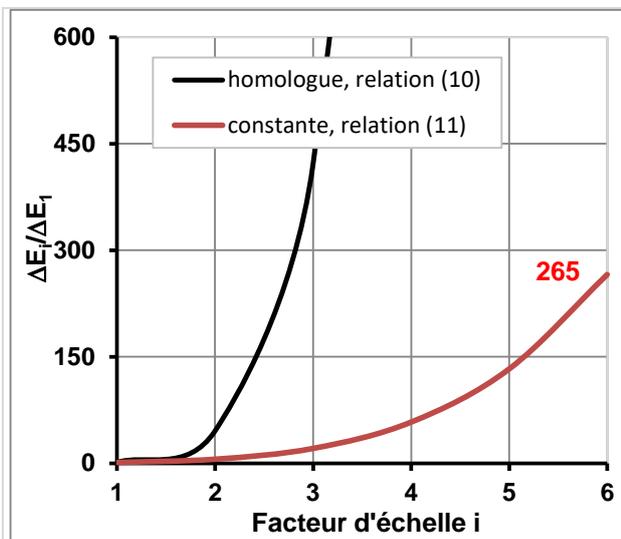


FIG. 17 – Puissances nécessaires au contrôle pour l'échelle i/N ($i=1$ et $N=6$) rapportées à la puissance nécessaire pour l'échelle $1/N$ en fonction du facteur d'échelle i (de 1 à N) pour une ligne d'actionneurs positionnée à $N\lambda$ (relation (10)) et λ (relation (11)) du haut de la lunette arrière.

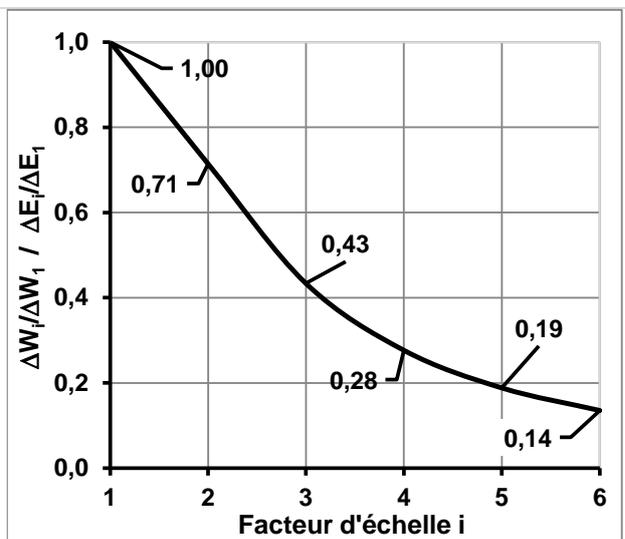


FIG. 18 - Rapports des puissances aérodynamiques gagnées aux échelles i/N et $1/N$ rapportés aux rapports des puissances nécessaires au contrôle pour les mêmes échelles i/N et $1/N$ avec $N=6$, i varie de 1 à $N=6$. Calculs effectués pour une épaisseur de fente λ constante.

5.1.1 Les distances λ sont homologues : Pour des pertes de charges identiques⁷ des actionneurs, la puissance ΔE_i nécessaire au fonctionnement des actionneurs pour la configuration à échelle i/N exprimée en fonction de la puissance ΔE_1 nécessaire pour la configuration à l'échelle $1/N$ est donnée

⁷ Les géométries étant homologues, les coefficients de pertes de charges sont identiques.

par la relation :

$$\Delta E_i = \Delta E_1 i \left(\frac{d_i}{d_1} \right)^3 = \Delta E_1 i^{\frac{11}{2}} \quad \text{avec } i \in [1, N] \quad (10)$$

La puissance nécessaire au contrôle augmente en fonction de la puissance 11/2 du facteur d'échelle i (fig. 17). Si l'épaisseur e de la fente devait suivre l'évolution d'échelle, l'exposant du facteur d'échelle i deviendrait égal à 13/2. Ces évolutions conduisent à des puissances qui peuvent devenir incompatibles avec la nécessité de réduire les dimensions et les masses des systèmes embarqués de production d'énergie.

5.1.2 La distance λ est constante : Pour des pertes de charges des actionneurs identiques, la puissance ΔE_i nécessaire au fonctionnement des actionneurs pour la configuration à l'échelle i/N exprimée en fonction de la puissance ΔE_1 est donnée par (fig. 17) :

$$\Delta E_i = \Delta E_1 i \left[1 + (i^2 - 1) \sin^2 \alpha \right]^{\frac{3}{2}} < i^4 \quad \text{avec } i \in [1, N] \quad (11)$$

5.2 Impact sur le gain de puissance aérodynamique - Pour une même variation ΔC_x du coefficient de traînée aérodynamique, les gains de puissance aérodynamique exprimés pour les échelles $1/N$ et i/N sont respectivement définis par :

$$\Delta W_1 = \frac{\rho}{2} S_o V_o^3 \Delta C_x \quad (12)$$

$$\Delta W_i = \frac{\rho}{2} S V_o^3 \Delta C_x = \frac{\rho}{2} i^2 S_o V_o^3 \Delta C_x = \Delta W_1 i^2 \quad \text{avec } i \in [1, N] \quad (13)$$

Le gain de puissance varie donc beaucoup moins vite ($2 < 11/2$ et $2 < 4$) que l'augmentation de puissance nécessaire au contrôle lorsque les distances λ entre les échelles $1/N$ et i/N sont respectivement homologue et constante.

5.3 Impact sur l'efficacité énergétique - Les résultats précédents montrent que la puissance nécessaire au contrôle augmente plus rapidement que le gain de puissance aérodynamique lorsque les dimensions de la géométrie augmentent, voir les figures 17 et 18. Les résultats obtenus en faisant varier le facteur d'échelle i de 1 à $N=6$ montrent ainsi l'intérêt de maintenir constante la distance λ entre l'actionneur et le haut de la lunette arrière, de garder constante l'épaisseur du jet ainsi que de rechercher des solutions capables de réduire les puissances nécessaires au contrôle. Ce dernier résultat confirme l'intérêt des solutions de contrôle alterné, soufflage et/ou aspiration alternés, couplées ou non à des solutions de contrôle passif [10].

Pour un véhicule automobile de maître couple $S_o=2.2 \text{ m}^2$, de coefficient de traînée aérodynamique $C_x=0.32$, qui se déplace dans un air de masse volumique $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ à la vitesse constante de 130 km/h, réduire de 20% la traînée aérodynamique permet de réduire la puissance aérodynamique d'environ 4000 watt. En considérant que la puissance à fournir pour le contrôle aérodynamique soit au plus égale au cinquième du gain de la puissance aérodynamique, alors la puissance nécessaire au contrôle pour le véhicule à échelle N/N ne doit pas dépasser 800 watt.

Sur la base de cette valeur, la courbe donnée sur la figure 17 montre alors que la puissance du contrôle proposé dans ce papier pour la maquette à l'échelle $1/N$ ($N=6$) ne doit pas excéder 3 watt ($800/265$). Cette valeur est très inférieure à la valeur nécessaire pour obtenir les résultats rappelés au paragraphe 3 et estimée à 350 watt⁸. Ce résultat suggère alors de recourir aux techniques de contrôle optimal ainsi qu'à des sources secondaires d'énergie telle la récupération d'énergie sur les gaz d'échappement (les rendements des moteurs à combustion interne sont voisins de 0.3) ou à des batteries embarquées rechargées à partir des énergies photovoltaïque, éolienne ou hydraulique lors des périodes d'arrêt du

⁸ Produit du débit volume (vitesse efficace, désignée ici vitesse de débit, par la section de sortie de la barrette d'actionneurs) par la différence de pression d'arrêt efficace de part et d'autre de l'actionneur.

véhicule.

S'agissant enfin d'améliorer l'efficacité du jet sur le débattement de la nappe et compte tenu du développement transversal du jet [7], la solution qui consiste à positionner une seconde fente en aval, parallèlement et à quelques millimètres de la fente initiale est, d'un point de vue énergétique, préférable à un élargissement de l'épaisseur de la fente.

6 Conclusion

Les influences du facteur d'échelle sur les paramètres et l'efficacité énergétique du contrôle sont analysées à partir de résultats expérimentaux relevés sur une maquette simplifiée à échelle 1/N de véhicule automobile à lunette arrière inclinée de 35 degrés. Pour cette configuration, pour une lunette arrière munie d'une barrette d'actionneurs de jets pulsés, pour une vitesse maximale de jet égale à 33 m/s et pour une fréquence pour le jet pulsé égale à 500 Hz, la traînée aérodynamique diminue de 20%.

A partir du facteur d'échelle, une analyse effectuée sur les grandeurs caractéristiques de l'écoulement permet d'accéder à un ordre de grandeur pour la fréquence des actionneurs à positionner sur la maquette à échelle réelle. Des modèles de vitesse pour le jet plan sont ensuite proposés pour estimer la vitesse de débit et son orientation dans le plan de sortie des actionneurs. Les modèles proposés permettent d'analyser l'impact du facteur d'échelle sur la puissance nécessaire au contrôle et sur le gain de puissance aérodynamique généré par le contrôle.

Quelle que soit l'épaisseur du jet dans la section de sortie des actionneurs, le gain de puissance aérodynamique induit par le contrôle augmente moins vite que l'augmentation de puissance nécessaire au contrôle lorsque les dimensions de véhicule à contrôler augmentent. L'efficacité du contrôle diminue lorsque l'échelle augmente. Ce résultat confirme l'intérêt de rechercher des solutions de contrôle pour des épaisseurs de jet faibles et indépendantes des géométries, d'optimiser l'efficacité énergétique des circuits des actionneurs ainsi que de rechercher des solutions d'alimentation en énergie indépendantes du générateur primaire d'énergie embarqué, de faible masse, d'encombrement réduit, de coût réduit, facilement disponible et sans impact sur la pollution et les émissions de gaz à effet de serre.

Les protocoles et les résultats consignés dans ce papier restent à valider par voies expérimentale et/ou numérique. L'auteur offre sa collaboration à tout laboratoire qui acceptera de tester ces protocoles et ces résultats sur la maquette du paragraphe 2 transposée à l'échelle d'un véhicule réel.

7 Références

- [1] Gilliéron P. et Kourta A.; *Aérodynamique automobile pour l'environnement, le design et la sécurité*, Editions CEPADUES, ISBN n° 978.2.36493.091.9, 2013.
- [2] Union Routière de France (URF), *L'essentiel de faits et chiffres, Route Mobilité Transports 2011*, Aide-Mémoire, contact@unionroutiere.fr, www.unionroutiere.fr, 2011.
- [3] Ahmed S.R., Ramm R. and Flatin G.; *Some salient features of the time averaged ground vehicle wake*, SAE technical paper Series 840300, 1984.
- [4] Bideaux E., Bobillier P., Fournier E., Gilliéron P., El Hajem M., Champagne JY, Gilotte P., Kourta A., *Aerodynamics for land vehicles; Flow control; Drag reduction with pulsed jets on thick body and massive flow separation*, IJAD, 2010 Indersciences Enterprises Ltd, pp 282-298, 2011.
- [5] Gilliéron P. and Kourta A.; *Aerodynamic drag control by pulsed jets on simplified car geometry*, Exp. in Fluids, volume 54, pp 14-57, January 2013.
- [6] Pernod P., Merlen A., Talbi A., Preobrazhensky, Viard R., Gimeno L. and Ducloux O.; *IEMN/LEMAC magneto-mechanical microjets and micro-hotwires and aerodynamic active flow control*, Int. J. Aerodynamics, Vol. 1, Nos. 3/4, 2011.
- [7] Abramovich, G.N. *Teoriia turbulentnykh strui*. Moscow, 1960.
- [8] Gilliéron P. and Kourta A.; *Massive separation control, Analysis of the pulsed jet actuators effects*, mi130099, EDP Sciences, Mechanics & Industry, DOI 10.1051/meca/2013085, february 2014.
- [9] Leclerc C.; *Réduction de la traînée d'un véhicule automobile simplifié à l'aide du contrôle actif par jet synthétique*, thèse de doctorat, CIFRE Renault/ IMFT, janvier 2008.

[10] Bruneau CH, Creusé E., Depeyras D., Gilliéron P. and Mortazavi I.; Coupling active and passive techniques to control the flow past the square back Ahmed body, Computers and Fluids 38, n° 10, 2010.

Évolutions de la version 1 du 17 novembre 2013 à la version 2 du 11 mai 2014

- Fin du paragraphe 4.2.2 : la relation (8) a été complétée et un texte « *L'angle d'inclinaison....* » suivi d'une relation repérée (9) ont été ajoutée.
- Paragraphe 5.1, FIG. 17 : dans la légende, la relation (9) devient la relation (10) et la relation (10) devient la relation (11).
- Paragraphe 5.1, FIG. 18 : le texte « Calculs effectués pour une épaisseur de fente λ constante » a été ajouté.
- Paragraphes 5.1.1, 5.1.2 et 5.2 : les relations repérées (9), (10), (11) et (12) deviennent respectivement les relations (10), (11), (12) et (13).

Évolutions de la version 2 du 11 mai 2014 à la version 3 du 7 mars 2023

- Paragraphe 5.1 : la légende de la FIG. 17 a été précisée.
- Paragraphe 5.1 : les légendes incluses dans la FIG. 17 ont été actualisées (10) pour (9) et (11) pour (10).
- Paragraphe 5.1 : la légende de l'ordonnée de la FIG. 18 a été corrigée (texte du rapport inversé)

Patrick Gilliéron est ingénieur en aérodynamique, docteur en mécanique et habilité à diriger des recherches (HDR). Auteur de plusieurs publications internationales, il travaille depuis plus de 30 ans sur l'analyse, la compréhension et le contrôle des écoulements et des décollements pour réduire l'impact des véhicules terrestres sur l'environnement, libérer le Design des contraintes aérodynamiques et améliorer la sécurité lors des phases transitoires. Chargé d'enseignement puis professeur associé au Conservatoire National des Arts et Métiers de 1987 à 2001, directeur de recherche associé au CNRS de 2001 à 2004, chercheur associé à l'École Polytechnique d'Orléans de 2006 à 2010, il crée et dirige un groupe de recherche en "Mécanique des Fluides et Aérodynamique" de 2002 à 2011 à la Direction de la Recherche de Renault. Il poursuit aujourd'hui ses travaux en qualité de chercheur indépendant.