



Contrôle par Nappe de Courant et Effets d'Échelles

Patrick Gilliéron

► To cite this version:

Patrick Gilliéron. Contrôle par Nappe de Courant et Effets d'Échelles. [Rapport de recherche] Indépendant. 2021. hal-03201025v1

HAL Id: hal-03201025

<https://hal.science/hal-03201025v1>

Submitted on 17 Apr 2021 (v1), last revised 25 Mar 2022 (v2)

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.

Contrôle par Nappe de Courant et Effets d'Échelles

Patrick Gilliéron

chercheur indépendant

rdmfa.pgillieron@orange.fr

Résumé : *Un modèle analytique est proposé pour estimer les vitesses et les puissances nécessaires à la production d'une nappe de courant capable d'envelopper une géométrie afin d'en réduire la traînée aérodynamique à différentes échelles. Les résultats s'obtiennent sur la base des travaux effectués sur des jets plans par Abramovich, Prandtl et Tollmien. Sauf à considérer que la nappe soit capable de réduire la traînée aérodynamique au-delà de la valeur permettant d'équilibrer la puissance du contrôle, les puissances à mettre en œuvre dépassent le potentiel des réductions des puissances aérodynamiques pouvant actuellement être obtenues. Dans l'état, les résultats confirment l'intérêt des solutions de contrôle actif capables d'interagir à très faible distance sur l'écoulement décollé.*

1. INTRODUCTION - Les expérimentations effectuées en soufflerie pour mettre au point des solutions de contrôle actif des décollements aérodynamiques sur des véhicules à culot de faible allongement s'effectuent le plus souvent sur les parties arrière de géométries à échelle réduite. Ces parties sont préférées car associées à une région fortement décollée dont la contribution sur la traînée aérodynamique peut atteindre 30% [1]. Les échelles réduites sont le plus souvent retenues 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.

L'optimisation de la contribution aérodynamique aux efforts de traînée qui s'exercent sur les avants des véhicules automobiles s'obtient généralement en soufflerie à partir d'expertises métier issues d'approches analytiques [2] et de résultats expérimentaux [3]. Les approches analytiques permettent d'améliorer la compréhension des interactions des circuits fonctionnels avec l'écoulement externe (refroidissement, climatisation) et de cibler leurs influences sur la traînée aérodynamique pour prioriser les éventuelles modifications de géométries [2-3]. Les résultats expérimentaux constituent une réserve additionnelle de solutions qui résultent d'expertises issues de contrôles passifs ou actifs effectués sur des configurations décollées.

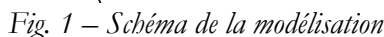
Concernant le contrôle passif, des réductions de 25 à 45% du coefficient de traînée aérodynamique relevées à partir d'éléments séparateurs transversaux positionnés en amont des faces avant de géométries simplifiées [4] suggèrent l'intérêt de déplacer une partie des boucliers avant lors des phases de roulage. Le contrôle actif constitue également une réserve de solutions lorsqu'il s'agit de contrôler un décollement en proche paroi. Des réductions de 20% du coefficient de traînée aérodynamique sont ainsi obtenues à partir d'un jet pulsé positionné sur le haut d'une lunette arrière de géométrie simplifiée [5]. Les meilleurs résultats s'obtiennent en positionnant l'actionneur à proximité immédiate de la région à contrôler pour accroître l'efficacité du contrôle et réduire les énergies à mettre en œuvre [3].

Le contrôle actif en paroi éloignée reste peu étudié pour des raisons évidentes d'efficacité énergétique. Cet article propose d'apporter un éclairage sur la faisabilité de ce type de contrôle via la création d'un flux transversal¹ d'écoulement dont l'objectif serait d'envelopper tout ou partie du véhicule à l'intérieur d'une nappe de courant telle une partie d'un demi-ovale de Rankine [6]. Des ordres de grandeur pour les vitesses et les puissances à mettre en œuvre à différentes échelles seront ainsi donnés. 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 [7].

2. LE MODÈLE – S'agissant d'influencer l'écoulement amont, la création d'un flux transversal nécessite un système d'alimentation et de contrôle qui débouche en amont de la partie avant du véhicule.

¹ Idée proposée par Constantin Chilowsky en 1914 dans le but d'augmenter la portée des obus [A-B].

Le jet plan est caractérisé par une section de sortie rectangulaire d'épaisseur $2e$ et d'envergure E unité à laquelle est associée une distribution transversale uniforme des vitesses dans le plan de sortie égale à la vitesse de débit U_o (région initiale du jet [8]). Au-delà des régions initiale et de transition [8], le module de la vitesse diminue sur l'axe du jet à partir de la vitesse de débit et s'élargit transversalement proportionnellement à la distance η [8-10].


$$U_m(\eta) = A * \frac{1}{\sqrt{\eta}} \quad avec \quad A = 2,68 U_o \sqrt{2 * e} \quad (1)$$


Contrôle par nappe de courant et effets d'échelles, P. Gilliéron, 20 mars 2021. Page 2

tabulées en fonction de l'ordonnée η adimensionnée par l'abscisse locale λ du jet [8-10] :

$$\frac{U}{U_m}(\lambda, \eta) = F\left(\frac{\lambda}{\eta}\right)$$

La composition des vitesses locales $U(\lambda, \eta)$ avec la vitesse infinie amont V_o qui permettrait d'analyser les influences du débit et de l'élargissement sur l'évolution du champ de vitesses sort du cadre de cet article et ne pourrait s'analyser qu'à partir d'expérimentations physiques et/ou de simulations numériques.

S'agissant alors d'estimer les influences de l'écoulement incident de vitesse V_o sur les trajectoires des particules fluides du jet plan en fonction de sa vitesse et de son orientation dans le plan de sortie, l'analyse s'effectue à partir de l'évolution de la vitesse maximale U_m relevée sur l'axe.

3. ÉQUATIONS DES TRAJECTOIRES DE PARTICULES – En tout point M de la trajectoire d'une particule fluide issue du plan médian transversal du jet ($\lambda=0$), la vitesse résultante est donnée par (figure 1) :

$$\begin{aligned}\vec{V}_R &= U_m \vec{\eta} + V_o \vec{x} \\ \vec{V}_R &= \left[\frac{A}{\sqrt{\eta}} * \cos \theta_o + V_o \right] \vec{x} + \frac{A}{\sqrt{\eta}} * \sin \theta_o \vec{y}\end{aligned}$$

telle que :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{A}{\sqrt{\eta}} * \cos \theta_o + V_o \quad (2) \quad \text{et} \quad \frac{dy}{dt} = \frac{A}{\sqrt{\eta}} * \sin \theta_o \quad (3)$$

En remarquant que : $y = (\eta - s_o) * \cos\left(\theta_o - \frac{\pi}{2}\right)$ avec $s_o = \|\vec{PO}\|$ (figures 1 et 2), cette dernière équation devient :

$$dy = \frac{A * \sin \theta_o}{\sqrt{y + s_o * \sin \theta_o}} * \sqrt{\sin \theta_o} * dt$$

et :

$$(y + s_o * \sin \theta_o)^{\frac{1}{2}} * dy = A * \sin \theta_o * \sqrt{\sin \theta_o} * dt$$

En choisissant de fixer l'origine des temps à la position du point O, origine du repère $(O, \vec{x}, \vec{y})$, alors :

$$y = \left[\frac{3}{2} * A * \sin \theta_o * \sqrt{\sin \theta_o} * t \right]^{\frac{2}{3}} - s_o * \sin \theta_o \quad (4)$$

De la même manière, l'équation (2) devient :

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \frac{A * \cos \theta_o}{\sqrt{y + s_o * \sin \theta_o}} * \sqrt{\sin \theta_o} + V_o \\ &= \frac{A * \cos \theta_o * \sqrt{\sin \theta_o}}{\left[\frac{3}{2} * A * (\sin \theta_o)^{\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}} * t^{-\frac{1}{3}} + V_o \\ &= B * t^{-\frac{1}{3}} + V_o\end{aligned}$$

d'où :

$$x = \frac{3}{2} * B * t^{\frac{2}{3}} + V_o * t \quad (5)$$

Les équations paramétriques (4) et (5) permettent le tracé des trajectoires en fonction de l'instant de date t. Le degré de ces équations permet difficilement d'obtenir l'équation des trajectoires $y=f(x)$ sauf lorsque le jet débouche perpendiculairement à la direction de l'écoulement infini amont. Dans ce cas, l'angle θ_o

est égal à $\pi/2$, l'équation paramétrique (5) se simplifie et l'équation de la trajectoire est donnée par :

$$y = \left[\frac{3 \cdot A \cdot x}{2 \cdot V_o} \right]^{\frac{2}{3}} - s_o \quad (6)$$

L'évolution de la vitesse maximale sur l'axe du jet n'étant valable que dans la région établie, l'instant de date t_o correspondant à la position du point Q (figure 2) se définit à partir de l'équation :

$$t_o = \frac{s'_o}{U_o}$$

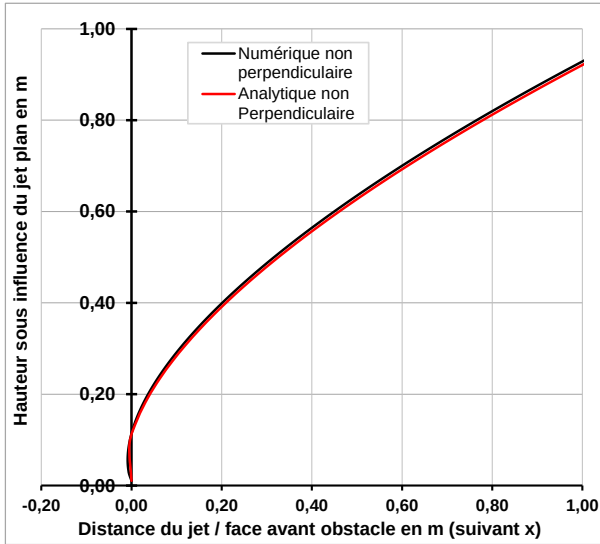


Fig. 3 – Trajectoires des particules fluides sur l'axe médian du jet relevées suivant les approches numérique (eq. 4 et 5) et analytique (eq. 6). Angle initial d'orientation du jet $\theta_o = 120^\circ$.

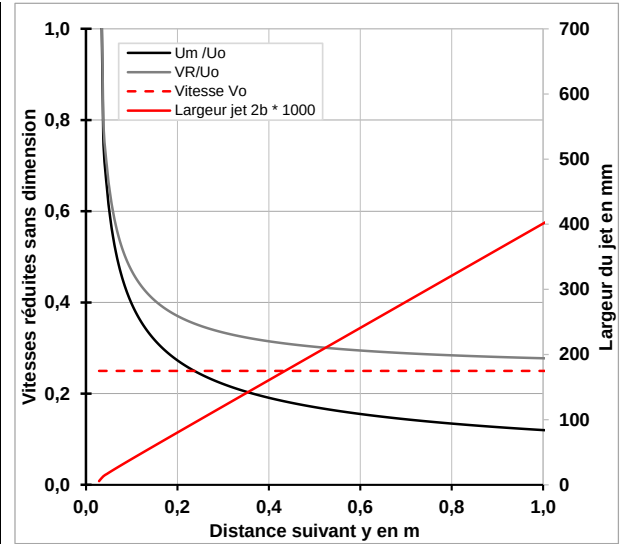


Fig. 4 – Vitesses maximale et résultante (ordonnée de gauche) et largeur transversale du jet 2b (ordonnée de droite) en fonction de la hauteur y. Angle initial d'orientation du jet $\theta_o = 90^\circ$.

Vitesse de l'écoulement amont $V_o = 30 \text{ m/s}$, vitesse de débit du jet $U_o = 120 \text{ m/s}$, $H = 0,80 \text{ m}$ et $L = 1,00 \text{ m}$.

Ces équations sont utilisées pour identifier la plus faible vitesse de débit U_o qui permette de recouvrir d'une ligne de courant la partie supérieure d'un obstacle de hauteur H placé à la distance L du jet plan. Cette approche suppose de négliger les effets d'inertie de l'écoulement amont de vitesse V_o sur la structure et l'évolution du jet. Cette vitesse étant identifiée, les puissances à mettre en œuvre pour différentes échelles sont alors estimées. Dans les développements et les applications qui suivent, la hauteur H et la distance L valent respectivement $0,8^2 \text{ m}$ et 1 m , la largeur 2e et l'envergure du jet, notée Env , valent respectivement $2 \cdot 10^{-3}$ et 1 m et la vitesse de l'écoulement amont est égale à 30 m/s . Le régime est enfin considéré permanent et les trajectoires s'identifient aux lignes de courant.

Les résultats issus des approches numériques³ et analytiques déduites des équations (4 et 5) et (6) sont reportés figure 3 pour un angle initial d'orientation $\theta_o = 120$ degrés. Sur la figure 4, sont reportées les évolutions des vitesses maximales et résultantes rapportées à la vitesse de débit U_o des particules fluides relevées sur l'axe pour $\theta_o = 90$ degrés et les évolutions des largeurs transversales du jet.

3.1 Influence de l'angle θ_o de l'axe du jet – L'augmentation de l'angle θ_o de sortie du jet permet d'accroître la hauteur de la nappe de 0 à une valeur maximale $\theta_{o_{max}}$ qui s'obtient par dérivation de l'équation (4) ou par itérations successives. Pour les conditions retenues, cette valeur, obtenue par itérations successives, est proche de 120 degrés, figure 5.

3.2 Influence de la vitesse de débit U_o – L'augmentation de la vitesse de débit permet d'accroître

² Cette valeur correspondant à la valeur moyenne de la demi hauteur d'un véhicule automobile.

³ Les valeurs numériques s'obtiennent à partir d'un développement de Taylor limité au premier ordre.

la hauteur y de la nappe qui augmente avec la distance x qui sépare l'obstacle du jet, figure 6. Pour la hauteur $H=0.8$ m à recouvrir d'une ligne de courant à 1.0 m du jet, la vitesse de débit doit au moins atteindre 90 m/s : une vitesse à laquelle est associé un débit volumique⁴ $Q_o = 648$ m³/h (10.8 m³/min).

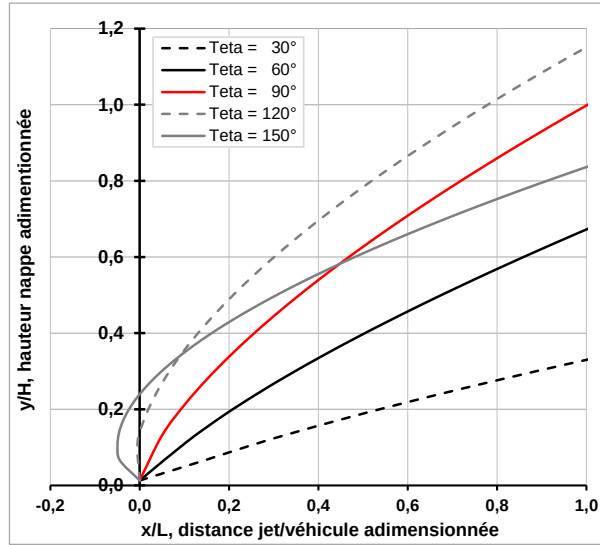


Fig. 5 – Hauteur réduite y/H en fonction de la distance réduite x/L pour une vitesse de débit 120 m/s et différents angles d'éjection du jet.

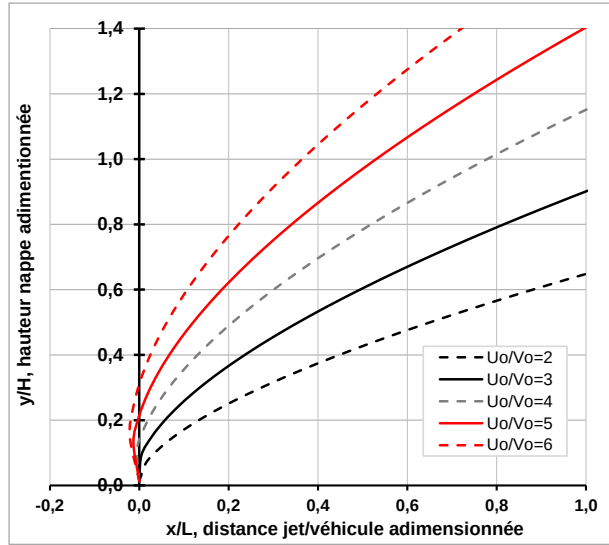


Fig. 6 – Hauteur réduite y/H en fonction de la distance réduite x/L pour différents rapports de la vitesse de débit U_o sur la vitesse de l'écoulement amont V_o .

Vitesse de l'écoulement amont $V_o = 30$ m/s, hauteur de l'obstacle $H = 0.80$ m et distance du jet à l'obstacle $L = 1.00$ m.

3.3 Influence de la hauteur H – Lorsque la hauteur de l'obstacle augmente pour une distance L donnée, la vitesse de débit et/ou l'angle d'orientation θ_o nécessaires au recouvrement doivent augmenter, figures 5 et 6.

3.4 Influence de la distance L du jet / face avant – Lorsque la distance L du jet par rapport à l'obstacle diminue, la vitesse de débit doit augmenter pour permettre de positionner la nappe à la hauteur H , figure 6. Lorsque la distance L tend vers zéro, le jet devrait s'attacher à la paroi convexe (effet Coanda) et la traînée locale de pression diminuer ; cette configuration particulière sort du cadre général de cette étude.

4. PUISSANCES POUR LE JET PLAN – S'agissant d'obtenir des ordres de grandeur pour les puissances capables de générer une nappe de courant qui contienne l'obstacle de hauteur H placé en aval à la distance L du jet pour différentes échelles, le jet est, dans les développements qui suivent, considéré perpendiculaire à la paroi. Pour cette condition et d'après l'équation (6), la hauteur H de la nappe de courant à la distance L du jet doit satisfaire la condition :

$$H \geq \left[\frac{3 * A * L}{2 * V_o} \right]^{\frac{2}{3}} - s_o$$

À cette hauteur H sont respectivement associés la vitesse de débit U_o et le débit volumique Q_o :

$$U_o \geq \frac{2 * V_o}{3 * L * 2.68 * \sqrt{2 * e}} * (H + s_o)^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

$$Q_o \geq U_o * 2e * Env$$

D'après la relation (7), si la largeur de la fente est divisée⁵ par σ alors les vitesses de débit U_o et les débits volumiques Q_o sont respectivement multipliés et divisés par $\sqrt{\sigma}$. De même, si la

⁴ Débit volumique établi sur la base d'une section d'épaisseur $2e = 2 \cdot 10^{-3}$ m et d'envergure $Env = 1$ m.

⁵ Si la largeur de la fente du plan est de 10^{-3} m ($2e$ divisé par 2), le débit volumique devient égal à 458 m³/h.

distance du jet à l'obstacle est divisée par σ , la vitesse de débit et le débit volumique sont respectivement multipliés par σ .

En choisissant de négliger les pertes d'énergie volumique du circuit interne [11] et en tenant compte de la compressibilité de l'air compte tenu du niveau des vitesses (> 100 m/s), l'énergie volumique à générer pour obtenir la vitesse U_o dans le plan de sortie du jet est donnée par :

$$\Delta P_i^c = \frac{P_o}{\eta_c} * \left[\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} * M_o^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right] \quad \text{avec} \quad M_o = \frac{U_o}{a_o}$$

avec P_o et a_o , la pression statique et la vitesse du son dans le plan de sortie du jet et η_c le rendement du compresseur (entre 0.90 et 0.95).

À cette quantité doit être ajoutée l'énergie volumique nécessaire pour équilibrer la perte d'énergie volumique ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ J/m}^3$) ΔP_i lié à l'élargissement brusque dans le plan de sortie du jet donné par :

$$\Delta P_i^e = K * \frac{\rho}{2} * U_o^2$$

avec $K=1$, le coefficient de perte de charge de l'élargissement brusque rapportée à la section de sortie où se définit la vitesse de débit U_o .

Et la puissance à mettre en œuvre pour générer la vitesse de débit U_o est par suite donnée par :

$$\Delta E = 2e * Env * U_o * (\Delta P_i^c + \Delta P_i^e)$$

$$\Delta E = 2e * Env * U_o * \left[\frac{P_o}{\eta_c} * \left[\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} * M_o^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right] + K * \frac{\rho}{2} * U_o^2 \right]$$

Il est intéressant de remarquer que **si l'épaisseur de la fente est divisée par σ , la puissance à mettre en œuvre pour le seul élargissement brusque est à multiplier par $\sigma^{\frac{1}{2}}$.**

Pour que le contrôle puisse enfin être considéré comme efficace, il est nécessaire que **la réduction de puissance aérodynamique générée par le contrôle soit supérieure à la puissance dissipée pour générer le contrôle**. Si S_M et ΔC_x désignent respectivement le maître couple et le gain de coefficient aérodynamique de traînée, alors :

$$\Delta C_x \geq \frac{2 * \Delta E}{\rho * S_M * \left(\frac{l}{N} \right)^2 * V_o^3}$$

Pour la géométrie considérée, une largeur de fente $2e=2 \cdot 10^{-3}$ m constante quelle que soit l'échelle et des facteurs d'échelle i variant de 1 à $N=6$ auxquels sont associées les échelles i/N , les vitesses de débit, les débits volumiques et les puissances associées sont reportés figures 7 et 8. Les vitesses de débit sont adaptées aux échelles pour permettre de recouvrir d'une ligne de courant l'obstacle de hauteur H placé en aval à la distance L du jet plan. En considérant les seules⁶ pertes d'énergie liées à la génération et à la sortie du jet, **la puissance nécessaire au contrôle devra au moins être compensée par une réduction équivalente de la puissance aérodynamique** et par suite s'accompagner d'une baisse du coefficient de traînée aérodynamique.

Pour un véhicule automobile de hauteur $h=2H=1.6$ m, de largeur $l=1.4$ m, de coefficient aérodynamique $C_x=0.35$ se déplaçant à la vitesse $V_o=30$ m/s, les réductions de traînée exprimées en pourcentage nécessaires pour compenser les puissances dissipées⁷ par le contrôle sont reportées figure 8. La

⁶ Les pertes liées à l'entrée du fluide vers le compresseur ne sont ici pas prises en compte.

⁷ Pour les vitesses de débit considérées (de 50 à 120 m/s), les températures et les masses volumiques d'arrêt sont respectivement comprises entre 294 et 300 K d'une part et 1.24 et 1.30 kg/m³ d'autre part.

compensation diminue avec l'augmentation du facteur d'échelle i pour tendre vers une valeur quasi constante proche de 28% à partir de $i=3$. Le rapport de la puissance nécessaire au contrôle sur la puissance aérodynamique gagnée diminue avec l'accroissement du facteur d'échelle pour tendre vers une constante indépendante de la vitesse U_o . Pour le véhicule échelle 1 ($i=N=6$) considéré ici, la puissance aérodynamique dissipée s'élève à 12965 W et la réduction du coefficient de traînée aérodynamique nécessaire à la compensation d'énergie dissipée par le contrôle doit au moins être de 28%.

Compte tenu des hypothèses retenues et de l'optimisation déjà effectuée sur l'aérodynamique des véhicules automobiles, de **telles réductions paraissent, à ce stade, difficiles à obtenir** [3], figure 8. Une utilisation localisée en proche paroi aux seules régions en surpression, tel le pied de pare-brise, pourrait au mieux être envisagée.

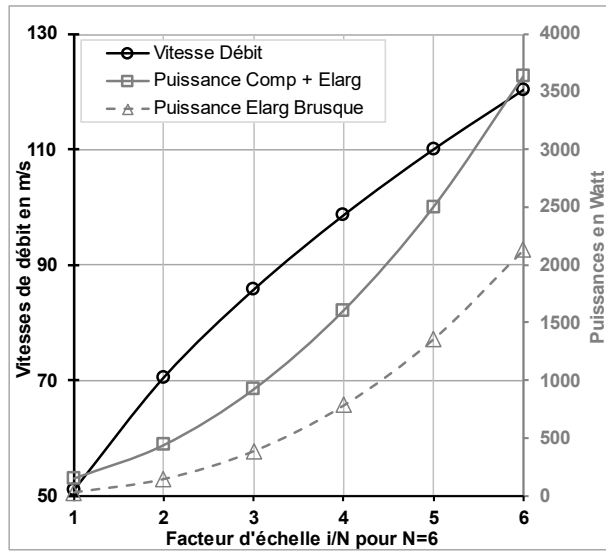


Fig. 7 – Évolutions de la vitesse de débit (ordonnée de gauche) et des puissances nécessaires pour générer le débit et compenser la perte de charge de l'élargissement brusque de sortie (ordonnée de droite) en fonction du facteur d'échelle i de 1 à $N=6$.

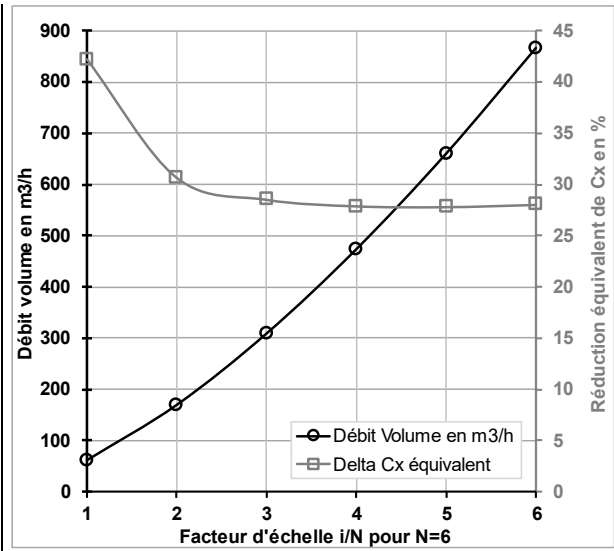


Fig. 8 – Évolutions des débits volumiques et des pourcentages minimums de réduction des coefficients aérodynamiques (ordonnées de droite) pour équilibrer les puissances du contrôle en fonction du facteur d'échelle i de 1 à $N=6$.

Vitesse de l'écoulement amont $V_o = 30 \text{ m/s}$, hauteur de l'obstacle $H = 0.80 \text{ m}$, distance du jet à l'obstacle $L = 1.00 \text{ m}$, masse volumique du fluide dans le plan de sortie 1.293 kg/m^3 et rendement du compresseur $\eta_c = 0.9$.

Une solution pour réduire la puissance à mettre en œuvre serait de réduire l'envergure de la ligne de jet en la remplaçant par une ligne circulaire de jet correctement positionnée. Cette solution nécessite cependant d'augmenter⁸ la vitesse de débit U_o pour prendre en compte l'effet d'évasement lié à l'éloignement du plan de sortie du jet et par suite la puissance du système d'alimentation du jet.

Des expérimentations en soufflerie et des simulations numériques permettraient de vérifier les tendances et les ordres de grandeur déduits des approches analytiques simplifiées présentées dans cet article.

5. CONCLUSION

Un modèle analytique est proposé pour générer une nappe de courant capable d'envelopper une géométrie placée dans un écoulement longitudinal. La géométrie est supposée d'envergure unité, le jet est plan et l'analyse s'effectue à partir de la loi d'évolution de la vitesse axiale issue des travaux d'Abramovich, Prandtl et Tollmien [8-10].

Les influences de l'angle d'orientation, de la vitesse de débit, de la hauteur H de l'obstacle et de sa distance au jet placé en amont sont analysées. La hauteur de la nappe augmente avec la vitesse de débit,

⁸ Augmentation nécessaire de la vitesse liée à l'accroissement de l'envergure du jet lorsque l'éloignement au plan de sortie du jet augmente.

l'angle d'orientation du jet et l'éloignement par rapport au plan de sortie du jet pour tendre vers une valeur limite fonction de la vitesse de débit et de l'orientation initiale du jet. Les niveaux des vitesses identifiées pour envelopper la géométrie avale d'une nappe de courant nécessitent des débits importants qui restent accessibles sans préjuger sur les possibilités d'intégration dans les véhicules.

L'analyse des effets d'échelles confirme ce résultat. La puissance nécessaire au contrôle augmente avec le carré du facteur d'échelle des géométries à contrôler pour atteindre des valeurs difficiles à compenser par des réductions des coefficients de traînée aérodynamique. Pour une géométrie échelle 1 et une hauteur $H=0.80$ m, le débit volumique du jet atteint $866 \text{ m}^3/\text{h}$ et devrait s'accompagner d'une réduction minimum de 28% du coefficient de traînée aérodynamique pour que le contrôle puisse équilibrer la perte due à la seule ouverture du jet. Sauf à considérer que la nappe soit capable de réduire la traînée aérodynamique au-delà de la valeur permettant d'équilibrer la puissance du contrôle et sans présager des impacts négatifs que pourraient engendrer le jet sur le refroidissement du moteur, la climatisation d'habitacle et le bruit, ce résultat confirme l'intérêt de **rechercher des solutions capables d'interagir à très faible distance sur l'écoulement décollé** [7] en privilégiant les protocoles basés sur des jets pulsés, synthétiques, balayants ou oscillants.

Des expérimentations en soufflerie et des simulations numériques sont à engager pour **vérifier la pertinence de l'approche analytique, les résultats et les ordres de grandeur** qui s'en déduisent.

RÉFÉRENCES

- [1] Lionel Fiabane ; Méthodes analytiques de caractérisation de structures cohérentes contribuant aux efforts aérodynamiques (thèse de doctorat en mécanique), polytechnique, 2010.
- [2] Chometon F. and Gilliéron P.; A survey of improved techniques for analysis of three-dimensional separated flows in automotive aerodynamics, SAE Congress, n°960680, pp 109-119, 11 pages, Detroit, Michigan, USA, February 26-29, 1996.
- [3] Gilliéron P. et Kourta A. ; Aérodynamique automobile pour l'environnement, de Design et la sécurité, éditions Cépaduès, ISBN 978.2.85428.969.5, réf. 969, 2011.
- [4] Gilliéron P. & Kourta A.; Aerodynamic drag reduction by vertical splitter plates, Exp in Fluids, Volume 48, Issue 1, pp 1-16, (DOI 10.1007/s00348-009-0705-7), January 2010.
- [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] Joseph Katz and Allen Plotkin, Low-Speed Aerodynamics, McGraw-Hill series in Aeronautical and Aerospace Engineering, 1991, ISBN 0.07.050446.6, chapter 3.
- [7] Gilliéron P. ; Contrôle aérodynamique et effet d'échelle, application au contrôle par jets pulsés, Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, août 2013.
- [8] Abramovich G.N.; The theory of turbulent jets, MIT Press, Massachusetts, 1963.
- [9] Tollmien, W. "Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge", ZAMM,6(6), pp.468–478(1926).
- [10] Cours d'aérodynamique B1, Conservatoire National des Arts et métiers, Maurice Ménard, 1978.
- [11] Gilliéron P. ; Modèles analytiques pour la condition limite d'un contrôle par jet pulsé. Congrès Français de Mécanique, août 2011, Besançon, France, {hal-03143874}.

OUVRAGE

- [A] Claudine Fontano ; "Deux siècles d'histoire de l'armement en France", l'obus Chilowski et la soufflerie balistique de Paul Langevin : une recherche militaire oubliée de la mobilisation scientifique (1915-1919), pp 81-109, CNRS Éditions, EAN électronique : 978.2.27112.819.5, 2005. <https://books.openedition.org/editionscnrs/33592?lang=fr>
- [B] Film CNRS, "Obus à flamme d'ogive Chilowsky", Numéro de notice 4277, noir et blanc, muet ; direction des inventions, des études et des expériences techniques ; section de cinématographie technique de la direction des inventions (Producteur) : <https://images.cnrs.fr/video/4277>

NOMENCLATURE

O	Origine du repère $(O, \vec{x}, \vec{y})$.
P	Pôle du jet, origine du repère $(P, \vec{\lambda}, \vec{\eta})$.
$(O, \vec{x}, \vec{y})$	Repère lié au plan de sortie, le point O est dans le plan de sortie du jet, les axes x et y sont respectivement perpendiculaires à l'envergure et au plan de sortie du jet plan.
$(P, \vec{\lambda}, \vec{\eta})$	Repère lié au plan de sortie, le point P, pôle du jet, est sous le plan de sortie du jet à la distance s_o , les axe λ et η sont respectivement parallèle et perpendiculaire à l'axe du jet au point P.
θ_o	Angle du jet dans le plan de sortie du jet, en degré.
α	Angle du vecteur vitesse résultant $\vec{V}_R$ par rapport à l'axe x (plan de sortie du jet).
2e	Épaisseur du jet plan, en m.
Env	Envergure du jet plan, en m.
s, s_o, s'_o	Longueurs caractéristiques du jet plan, en m.
2b	Ouverture du jet plan à partir de la région établie, en m.
$\vec{U}_o$	Vitesse de débit du jet dans le plan de sortie du jet, en m/s.
Q_o	Débit volume, en m ³ /s.
$\vec{U}_m$	Vitesse maximale sur l'axe du jet dans la région établie, en m/s.
A, B	Constantes pour un débit et une géométrie de jet fixés.
t	Temps, en s.
H	Hauteur de l'obstacle suivant l'axe y, en m.
L	Distance du milieu du jet plan à l'obstacle suivant x, en m.
N	Facteur de réduction.
i	Facteur d'échelle, de 1 à N.
ΔP_t^c	Energie volumique du compresseur pour générer la vitesse de débit U_o , en Pa.
ΔP_t^e	Perte d'énergie volumique liée à l'élargissement brusque de sortie du jet, en Pa.
P_o	Pression statique dans le plan de sortie du jet, en Pa.
a_o	Vitesse du son dans le plan de sortie du jet, en m/s.
M_o	Nombre de Mach dans la section de sortie du jet, sans dimension.
K	Coefficient de perte de charge, sans dimension.
ΔE	Puissance dissipée, en W.
S	Section de sortie du jet plan, en m ² .
S_M	Maître couple de l'obstacle placé en aval du jet plan, en m ² .
ρ	Masse volumique de l'air, en kg/m ³ .
C_x	Coefficient de traîne aérodynamique, sans dimension.
ΔC_x	Variation du coefficient de traîne aérodynamique, sans dimension.
*	Symbole pour l'opérateur de multiplication.

BREVETS

1. Means and methods to reduce drags; US 7,665,798 B2, Feb. 23, 2010, inventors Chih-Yu, Michael Jonathan and Patricia Shirley.
2. Means and methods for reducing oncoming air resistance and angle wind effects to a moving vehicle; US 3,910,623, Oct. 7, 1975, inventor Joseph E. McKeen.
3. Brevet russe sur un camion, référencé 1096155 A, date inconnue.

Remerciements : l'auteur remercie Michel Aguilar (*Xplorair Aerospace*) pour les échanges ayant donné lieu à l'élaboration de ce travail.