



HAL
open science

Modèles analytiques pour la condition limite d'un contrôle par jet pulsé

Patrick Gilliéron

► **To cite this version:**

Patrick Gilliéron. Modèles analytiques pour la condition limite d'un contrôle par jet pulsé. Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03143874

HAL Id: hal-03143874

<https://hal.science/hal-03143874>

Submitted on 17 Feb 2021

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.

Modèles analytiques pour la condition limite d'un contrôle par jet pulsé

P. GILLIERON^a

a. Chercheur indépendant, patrick.gillieron@wanadoo.fr

Résumé :

Un modèle analytique est proposé pour représenter l'évolution de la vitesse de débit en fonction du temps dans le plan de sortie d'un actionneur bidimensionnel de jet pulsé. L'actionneur est constitué d'un canal unique et différentes équations de fermeture sont proposées. La géométrie du canal situé en amont du plan de sortie de l'actionneur est constituée d'une succession de rétrécissements et d'élargissements dont les dimensions peuvent varier avec l'équation de fermeture. Les influences des équations horaires sur la vitesse efficace, le volume fluide, le débit volumique et la quantité de mouvement injectés dans l'écoulement sur la demi-période de fermeture et le coefficient de quantité de mouvement sont successivement analysées et discutées.

Abstract :

An analytical model is proposed to represent the evolution of the flow rate according to time in the exit plan for a two-dimensional pulsed jet. The actuator consists of a single channel and many closing equations are proposed. Before the exit plan, the geometry of the channel consists of a succession of contractions and widenings whose dimensions vary with the closing equation. The influences of the closing equations on effective velocity, the fluid volume, the flow rate and the momentum injected into the flow on the half-period of closing and on the momentum coefficient are successively analyzed and discussed.

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

1 Introduction

Un véhicule automobile est un corps de faible allongement qui se déplace à proximité du sol dans un écoulement naturellement turbulent. L'écoulement tridimensionnel et instationnaire décolle au niveau des entrées d'air, au niveau du soubassement, autour de la roue, dans les passages de roues, au niveau du pied de pare-brise, des montants latéraux avant et enfin au niveau de la lunette arrière et du culot. La contribution des contraintes de frottement reste faible, de l'ordre de 10 %, et la traînée aérodynamique résulte principalement de la distribution des contraintes de pression réparties sur la lunette arrière et le culot. Ces contraintes sont à l'origine de 90 % de la traînée aérodynamique globale et sont à 80 % concentrées sur les parties arrière. La traînée aérodynamique augmente de plus avec la vitesse et la puissance aérodynamique, proportionnelle au cube de la vitesse, représente alors, au-delà de 20 m.s⁻¹, une part importante de la puissance que doit délivrer le générateur d'énergie embarqué (moteur à combustion interne, électrique, pile à combustible ou hybride). La consommation et les émissions de gaz à effet de serre des véhicules automobiles ainsi que leurs impacts sur l'environnement sont alors fonctions du coefficient de traînée aérodynamique.

De nombreux travaux sont engagés pour réduire de manière significative la traînée aérodynamique des véhicules automobiles. Ces travaux portent sur le développement de systèmes passifs ou actifs de contrôle pour agir sur la position et le développement des structures décollées. Les solutions passives de contrôle développées entre 1975 et 1985 sont aujourd'hui connues et très largement maîtrisées par les ingénieries mais leur impact sur la réduction de traînée reste faible lorsqu'il faut respecter les contraintes de forme imposées par le Design et l'habitabilité. Des solutions sont donc recherchées

pour contrôler les écoulements et les décollements à partir d'orifices pariétaux qui sont utilisés pour souffler [1] et/ou aspirer [2] de l'air de manière continue ou alternée [3] afin de modifier la distribution de pression et réduire la traînée. Ces solutions nécessitent de l'énergie à prendre sur le générateur d'énergie embarqué (moteur thermique et/ou électrique) et font l'objet de nombreux travaux (voir le site GdR "Contrôle des Décollements", www.imft.fr/GDR2502).

Les solutions de contrôle alterné sont généralement préférées aux solutions d'aspiration ou de soufflage continu car les puissances temporelles moyennes à mettre en œuvre sont plus faibles. Ces solutions sont cependant associées à des processus instationnaires d'ouverture et de fermeture des orifices pariétaux des actionneurs qui ne sont généralement pas pris en compte. Ces processus peuvent influencer le résultat du contrôle ou être utilisés pour agir sur l'efficacité du contrôle. Ce papier propose des équations horaires caractéristiques pour l'ouverture et la fermeture d'orifices pariétaux associées à un contrôle par jet pulsé. Les influences de ces équations de fermeture sur les vitesses efficaces, les débits volumiques et les quantités de mouvement injectés dans l'écoulement à contrôler et relevés dans le plan de sortie de l'actionneur sont analysées et discutées.

2 Le Modèle Analytique

Le modèle analytique s'articule autour d'un actionneur de jet pulsé plan alimenté par un réservoir de grande dimension de section S_1 , (voir figure 1) L'actionneur comprend un opercule qui se déplace dans la direction x parallèlement à la paroi P . Son déplacement, fonction du temps et régi par une équation horaire, permet de faire varier continûment la section S_2 , de la section S_3 à la section nulle et inversement. Après avoir traversé la section S_2 , le fluide, issu du réservoir de grandes dimensions, débouche dans la section S_4 tangente à la paroi extérieure.

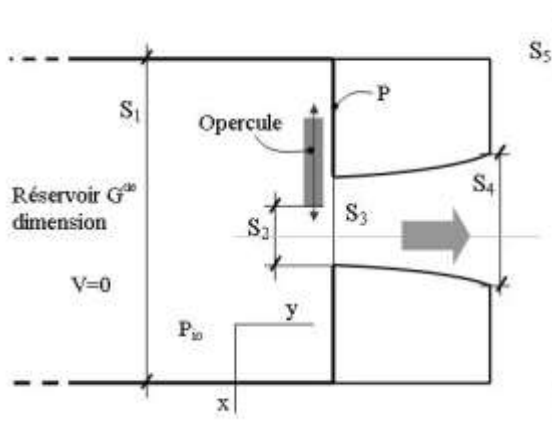


FIG. 1 – Géométrie et dimensions caractéristiques de l'actionneur de jet pulsé. La fermeture et l'ouverture de l'actionneur s'effectuent dans le plan (xoz) .

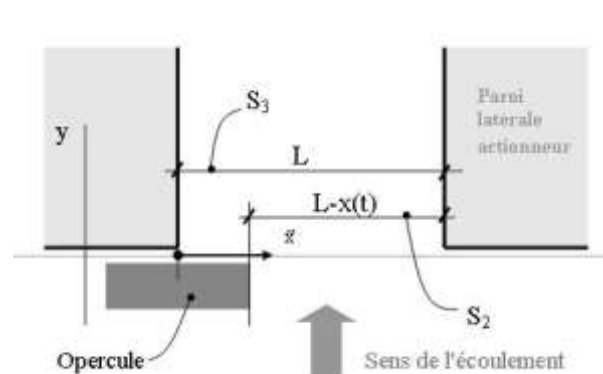


FIG. 2 – Déplacement de l'opercule devant la section S_3 . L'envergure E est parallèle à la direction z , perpendiculaire au plan du dessin.

L'évolution de la section transversale du tube de courant dans le sens de l'écoulement, du réservoir de grandes dimensions vers l'extérieur de l'actionneur, est brutale ou continue. A ces variations sont associés des rétrécissements ou des élargissements, brusques ou continus, caractéristiques de pertes de charges singulières. Dans les développements qui suivent et compte tenu des faibles dimensions de l'actionneur, les pertes de charges régulières sont négligées. La nature des pertes de charges et les coefficients de pertes de charges associés aux différentes singularités identifiées sur le trajet de l'écoulement sont respectivement reportés dans le tableau 1.

En désignant respectivement par U_{q_j} avec $j \in [1,4]$ la vitesse de débit dans la section S_j et par $\Delta P_{i,j+1}$ la perte d'énergie volumique associée au passage de la section S_j à la section S_{j+1} , alors :

$$\Delta P_{i,1,2} = \left(\frac{1}{C} - 1\right)^2 \frac{\rho}{2} U_{q_2}^2 \quad (1)$$

$$\Delta P_{1,2,3} = \left(1 - \frac{S_2}{S_3}\right)^2 \frac{\rho}{2} U_{q2}^2 \quad (2)$$

$$\Delta P_{1,3,4} \approx 0 \quad (\text{Diffuseur ou convergent plan optimal}) \quad (3)$$

$$\Delta P_{1,4,5} = \frac{\rho}{2} U_{q4}^2 = \left(\frac{S_2}{S_4}\right)^2 \frac{\rho}{2} U_{q2}^2 \quad (4)$$

$$\Delta P_{1,5} = \left[1 + \left(\frac{1}{C} - 1\right)^2 + \left(1 - \frac{S_2}{S_3}\right)^2 + \left(\frac{S_2}{S_4}\right)^2\right] \frac{\rho}{2} U_{q2}^2 \quad (5)$$

Cette dernière relation permet de déterminer la vitesse de débit U_{q2} connaissant la différence de pression $\Delta P_{1,5}$ (conditions aux limites connues, données du problème) et les différentes valeurs des sections de passage du fluide au travers de l'actionneur. Les sections S_1 , S_3 et S_4 sont connues. La section S_2 est fonction du temps et associée au processus physique de fermeture et d'ouverture de l'opercule de l'actionneur. Sa valeur est donnée par la relation :

$$S_2(t) = [L - x(t)]E \quad (6)$$

avec L la hauteur de la section S_3 , E l'envergure de la section S_2 égale à l'envergure de la section S_3 et $x(t)$, l'équation horaire de déplacement de l'opercule qui ferme la section S_3 supposée totalement ouverte à l'instant de date initial $t=0$, (voir figure 2). Le déplacement de l'opercule donné par l'équation horaire $x(t)$ peut-être rapide au début de la fermeture puis de plus en plus lent, uniforme ou encore lent au début puis de plus en plus rapide. A ces évolutions correspondent respectivement des déplacements lent puis de plus en plus rapide, uniforme puis, rapide et de plus en plus lent à la fin du processus de fermeture de l'opercule.

SENS DE L'ÉCOULEMENT	NATURE DE LA SINGULARITE	COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE
Section $S_1 \rightarrow$ section S_2	Rétrécissement brusque	$K_{S_2} = \left(\frac{1}{C} - 1\right)^2$ avec $C = 0.63 + 0.37\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^3$
Section $S_2 \rightarrow$ section S_3	Elargissement brusque	$K_{S_2} = \left(1 - \frac{S_2}{S_3}\right)^2$
Section $S_3 \rightarrow$ section S_4	Elargissement ou rétrécissement progressifs	Négligé, diffuseur ou convergent plan considéré optimal
Section $S_4 \rightarrow$ extérieur	Elargissement brusque	$K_{S_4} = \left(1 - \frac{S_4}{S_5}\right)^2$ avec $S_5 \rightarrow \infty$

TABLEAU 1 – Natures et coefficients de pertes de charges des singularités géométriques relevées dans le sens de l'écoulement de la section S_1 à la section S_5 .

En désignant par n un entier strictement positif supérieur à 1 et par f la fréquence de déplacement de l'opercule devant l'ouverture de la section S_3 , les déplacements de l'opercule peuvent être représentés par les équations horaires suivantes :

$$x(t) = \frac{L}{2} (4ft)^{\frac{1}{n}} \quad \text{pour le mouvement rapide puis de plus en plus lent} \quad (7)$$

$$x(t) = 2Lft \quad \text{pour le mouvement uniforme} \quad (8)$$

$$x(t) = \frac{L}{2} (4ft)^n \quad \text{pour le mouvement lent puis de plus en plus rapide} \quad (9)$$

Pour des fréquences supérieures à 100, les périodes restent proches de zéro et le mouvement uniforme représenté par l'équation (8) peut également représenter les mouvements harmonique, exponentiel ou

logarithmique respectivement donnés par :

$$x(t) = \frac{L}{2} \sin(2\pi f t) \text{ pour un mouvement harmonique} \quad (10)$$

$$x(t) = e^{4ft \ln(\frac{L}{2} + 1)} - 1 \text{ pour un mouvement de plus en plus rapide} \quad (11)$$

$$x(t) = \frac{L}{2L \ln(1 + \frac{1}{4f})} \ln(1+t) \text{ pour un mouvement de plus en plus lent} \quad (12)$$

Dans les développements qui suivent et à titre d'exemple, seules les équations horaires (7), (8) et (9) sont prises en compte et l'entier n est pris égal à 4.

3 Résultats et discussion

Les hypothèses et les équations précédentes sont utilisées pour modéliser les déplacements décrits au paragraphe précédent. Les dimensions de l'actionneur sont ajustées pour reproduire les ordres de grandeur des caractéristiques expérimentales décrites par [4] et la section S_3 est reliée à la section de sortie S_4 par un divergent considéré sans perte de charge. L'analyse s'effectue en comparant les valeurs des vitesses, des débits volumiques et des quantités de mouvement relevées à chaque instant et moyennées sur la demi-période associée à la durée de fermeture de la section S_3 .

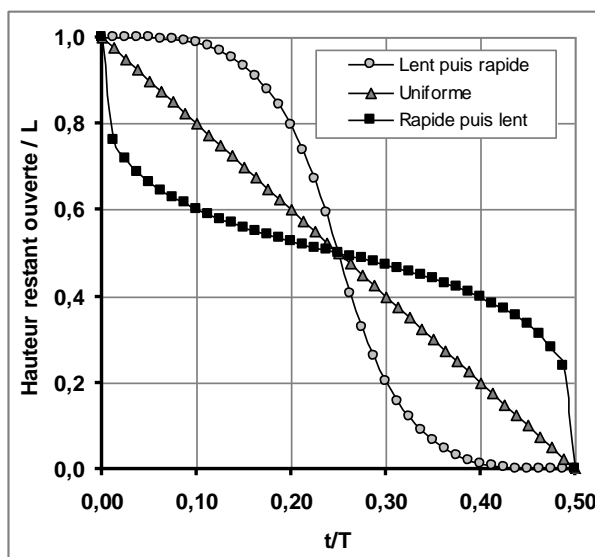


FIG. 3 – Evolution de la hauteur de la section d'ouverture S_2 rapportée à la hauteur de la section S_3 en fonction de l'instant de date t rapporté à la période d'oscillation de l'actionneur.

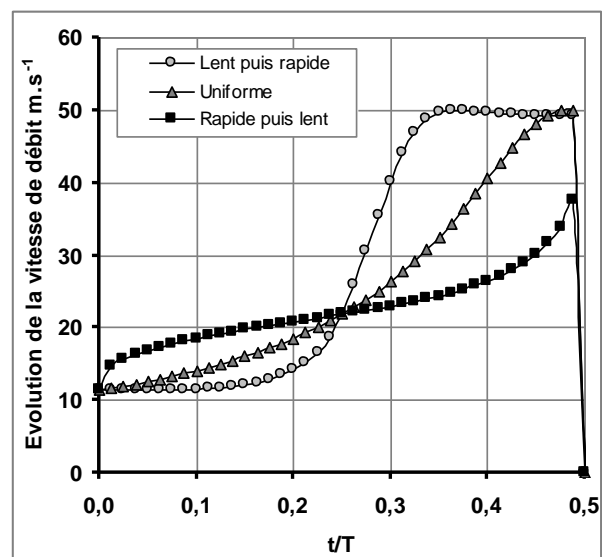


FIG. 4 – Evolution de la vitesse instantanée de débit en fonction du temps rapporté à la période d'oscillation (de l'ouverture complète jusqu'à la fermeture complète) de l'actionneur.

L'évolution de la hauteur notée $L-x(t)$ en fonction de l'instant de date t reportée figure 3 fait clairement apparaître la typologie des déplacements mentionnés au paragraphe précédent (déplacement lent puis de plus en plus rapide, uniforme, rapide puis de plus en plus lent du début de l'ouverture, processus inverses ensuite jusqu'à la fermeture complète de l'orifice). Les vitesses instantanées maximales de débit relevées pour les mouvements lent puis rapide et uniforme sont quasi identiques et proches de 49.9 m.s^{-1} , voir figure 4. La vitesse maximale pour le mouvement rapide puis lent égale à 37.5 m.s^{-1} est très inférieure à cette valeur. Ce résultat fait déjà clairement apparaître l'influence significative de l'équation horaire de fermeture sur la vitesse de débit du jet en sortie de l'actionneur.

Les influences sur les débits volumiques et les quantités de mouvement instantanés sont également caractéristiques. Les valeurs maximales des débits instantanés sont au début de la fermeture quasi identiques pour chacune des trois équations horaires mais les réductions apparaissent plus rapidement

lorsque la vitesse de déplacement de l'opercule diminue à la fin de la fermeture (pour la même durée de fermeture égale à la demi-période $T=f^{-1}$).

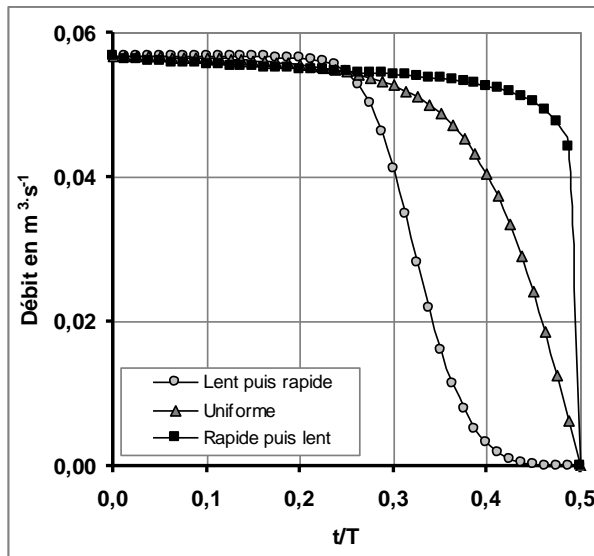


FIG. 5 – Evolution du débit en fonction du temps rapporté à la période d'oscillation de l'actionneur.

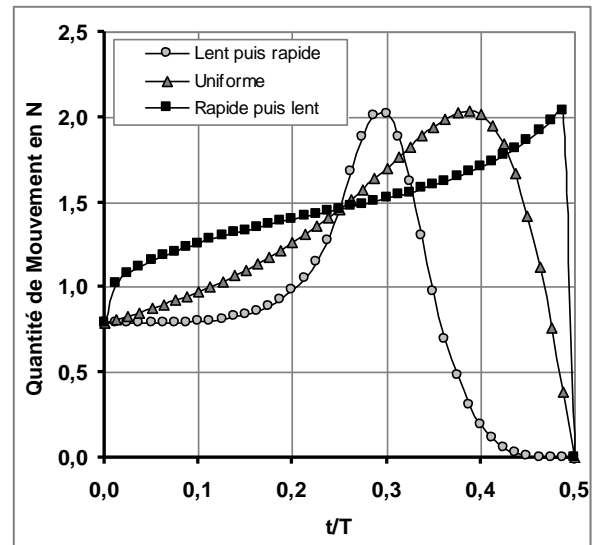


FIG. 6 – Evolution de la quantité de mouvement en fonction du temps rapporté à la période d'oscillation de l'actionneur.

Ces évolutions influencent alors les valeurs des volumes de fluide, des débits volumiques et des quantités de mouvement transmis à l'extérieur de l'actionneur sur une demi-période (fermeture ou ouverture), voir tableau 2. Pour une même durée de fermeture, le coefficient de quantité de mouvement C_{μ} , fonction de la vitesse efficace, diminue (resp. augmente) avec l'augmentation (resp. la diminution) de la vitesse de déplacement de l'opercule au début et à la fin de la fermeture.

Ces résultats montrent sans ambiguïté l'importance et l'intérêt de l'équation de fermeture des actionneurs pour les jets alternés. L'équation de fermeture peut alors devenir un outil d'aide au contrôle pour ajuster le coefficient de quantité de mouvement et le débit transmis à l'écoulement extérieur dans une perspective de contrôles en boucles ouverte ou fermée.

	Vitesse efficace, en $m.s^{-1}$	Volume fluide injecté sur une demi-période, en m^3 .	Débit moyen sur une demi-période, en $m^3.s^{-1}$.	Quantité de m^{vt} moyennée sur une demi-période, en N.	Coefficient quantité de mouvement C_{μ}
Eloignement lent puis rapide	33,2	0,000185	0,037	0,85	0,00426
Eloignement uniforme	28,6	0,000238	0,048	1,33	0,00315
Eloignement rapide puis lent	23,0	0,000266	0,053	1,46	0,00204

Tableau 2 – Caractéristiques comparées pour les 3 équations horaires de fermeture/ouverture de l'actionneur.

4 Conclusion

Une approche analytique est proposée pour représenter l'évolution de la vitesse de débit en fonction du temps dans le plan de sortie d'un actionneur bidimensionnel de jet pulsé. L'actionneur est constitué d'un canal unique et différentes équations de fermeture sont proposées. La géométrie du canal, situé en amont du plan de sortie de l'actionneur, est constituée d'une succession de rétrécissements et d'élargissements dont les dimensions peuvent varier avec l'équation de fermeture. Les influences des équations horaires sur la vitesse efficace, le volume fluide, le débit volumique et la quantité de mouvement injectés dans l'écoulement sur la demi-période de fermeture et le coefficient de quantité

de mouvement sont successivement analysées et discutées.

Les résultats montrent l'influence de l'équation horaire de fermeture sur la valeur de la vitesse de débit instantanée, sur la vitesse efficace, les valeurs moyennes de débit volumique et de quantité de mouvement. Pour une même durée de fermeture, le débit volumique moyen et la quantité de mouvement introduits dans l'écoulement extérieur diminuent lorsque la vitesse de fermeture de l'opercule décroît en début et en fin de fermeture. Le coefficient de quantité de mouvement, fonction de la vitesse efficace, augmente lorsque la vitesse de fermeture du même opercule décroît en début et en fin de fermeture.

Les résultats mis en évidence dans ce travail montrent sans ambiguïté l'intérêt de s'intéresser aux équations horaires de fermeture des actionneurs de jets alternés pour d'une part mieux contrôler les débits et les quantités de mouvement introduits dans l'écoulement à contrôler et d'autre part utiliser et adapter ces équations horaires à l'évolution des conditions extérieures lors des processus de contrôle en boucle fermée. Les modèles présentés peuvent également être utilisés dans les approches numériques pour mettre au point et/ou optimiser les protocoles de contrôle des écoulements et des décollements.

5 Références

- [1] Lehugeur B., Gilliéron P., Ivanic T., Contribution de l'éclatement tourbillonnaire à la réduction de la traînée des véhicules automobiles : Approche numérique, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (CRAS), Section Mécanique, n°334, 368-372, 2006.
- [2] Rouméas M., Gilliéron P., Kourta A., Separated flow around the rear window of a simplified car geometry, Journal of Fluids Engineering, Volume 130, Issue 2, 021101, February 2008.
- [3] Leclerc C., Levallois E., Gilliéron P., Kourta, A., Aerodynamic drag reduction by synthetic jet : a 2d numerical study around a simplified car, 3rd AIAA Flow Control Conference, San Francisco, California, 5-8 June 2006 .
- [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.