

Modélisation par termes source de générateurs de vortex pour le contrôle d'écoulement :

Validations expérimentales et optimisations

T.ROUILLON^{a,b}, F. HARAMBAT^a, C. TENAUD^b, L. MATHELIN^b et A. QUEUILLE^a

a. PSA Peugeot Citroën, 2 route de Gisy, 78943 VELIZY-VILLACOUBLAY

b. LIMSI UPR CNRS 3251, Campus Universitaire, Bt 508, B.P. 133, F-91403 ORSAY CEDEX

Résumé :

Cette étude porte sur la manipulation d'écoulement à l'aide de générateurs de tourbillons (Vortex generator ou VG). Pour limiter la taille des maillages dans nos simulations numériques RANS, la géométrie des VG n'est pas explicitement représentée: les VG sont modélisés par des termes sources incorporés aux équations de quantité de mouvement. Nous présentons ici la validation de cette modélisation par des mesures expérimentales et des simulations avec des VG maillés sur une configuration de plaque plane. Une optimisation des paramètres de forme des VG est ensuite menée suivant différentes méthodes. Ces méthodes sont ensuite analysées vis-à-vis de leur coût calcul.

Abstract:

This study deals with flow control using vortex generators (VG). To reduce the mesh size in RANS numerical simulations, the VG are not explicitly represented: they are modelled by source terms implemented in the momentum equations. On a flat plate configuration, we present the validation of this model by comparing this approach to numerical simulations with meshed VGs and experimental measurements. Finally, an optimization of the geometrical parameters of the VGs is undertaken using different optimization methods. These methods are then compared regarding their computational cost.

Mots clefs : contrôle, optimisation, simulations numériques, mesures expérimentales

1 Introduction

Les engagements environnementaux internationaux imposent aux constructeurs automobiles des contraintes sur les émissions de polluants. Par exemple, les normes CAFE (*Corporate Averaged Fuel Economy*) ciblent pour 2012 des émissions moyennes de CO₂ de 120 g/km. En 2000 la moyenne européenne était de 171 g/km et de 140 g/km en 2008, ce qui montre le caractère ambitieux de ces engagements.

Pour atteindre ces objectifs, un des leviers est la réduction de la traînée aérodynamique, qui représente 70% des pertes énergétiques en régime autoroutier (vitesse supérieure à 90 km/h) [1]. Or 80% de cette traînée totale provient de la traînée de pression induite par les décollements présents sur le véhicule (figure 1). Nous le voyons donc, vouloir réduire la traînée amène à réduire, ou contrôler, les décollements. C'est précisément le sujet de nos travaux : nous cherchons ici à réaliser du contrôle passif avec des générateurs de vortex, pour recoller l'écoulement sur la lunette arrière d'une automobile.

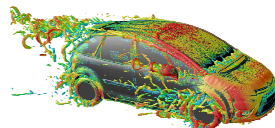


Figure 1 – Décollements autour d'un véhicule automobile. Source interne PSA.

Tout au long du pavillon, une couche limite turbulente se développe qui décolle à la jonction entre le pavillon et la lunette arrière sous l'effet d'un gradient de pression adverse. Pour réduire ce large décollement, un des moyens utilisés est d'apporter de l'énergie proche de la paroi, dans la couche limite. Ceci peut-être réalisé en utilisant des « Générateurs de Vortex », appelé dans la suite VG, qui génèrent des tourbillons (figure 2) transférant ainsi de la quantité de mouvement des couches supérieures de la couche limite vers les

zones en proche paroi. Les VG sont des petits éléments immergés dans la couche limite et placés en amont du point de décollement. Ils sont de forme trapézoïdale et sont arrangés par paires espacées d'une longueur L (voir schéma de la figure 4) afin de générer des tourbillons contrarotatifs. Notons qu'ils ont été pour la première fois utilisés dans les années 1940 par Taylor [2] pour réduire le décollement.

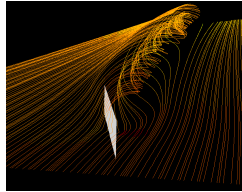


Figure 2 – Tourbillon généré par un VG

La littérature montre que des VGs avec une hauteur $h/\delta \sim 0,2$ fournissent les meilleurs résultats en terme de réduction de la zone décollée [3]. Cette faible dimension h comparée aux dimensions du corps étudié impose un maillage très fin localement qui entraîne une augmentation prohibitive du temps de calcul. De plus, de nombreuses configurations de VG doivent être simulées : la génération d'un nouveau maillage valide à chaque configuration géométrique est coûteuse en temps de réalisation. Pour contourner ce problème, des méthodes de substitution de VG existent qui consistent à remplacer les VG maillés par des termes sources incorporés aux équations de quantité de mouvement. Deux modélisations sont principalement utilisées. La plus ancienne, développée par Wendt [4], génère les tourbillons par un ajout local de vorticité. Ses paramètres sont la circulation des tourbillons et leur pic de vorticité. La seconde, développée par Bender, Anderson et Yagle (BAY model) [5] et complétée par Jir sek (jBAY model) [6], consiste à imposer une force volumique déviant l'écoulement de la même manière que les VG maillés. Dudek [7] a étudié ces deux modèles sur une configuration de conduite coudée. Il en ressort qu'en plus d'une utilisation plus aisée, le jBAY model fournit des résultats plus proches de ceux obtenus avec des VG maillés que le modèle initial. C'est ce modèle qui sera utilisé dans la suite de cette étude. Le premier objectif de cette étude est la validation de la modélisation des VG par des termes sources. Nous comparons les résultats obtenus avec le jBAY model à ceux obtenus numériquement avec des VG pleinement maillés et à des mesures expérimentales.

Nous avons vu précédemment que la couche limite devait être accélérée en amont de la singularité pour mieux résister au gradient de pression adverse et ainsi réduire le décollement. En nous plaçant dans le cas simplifié qu'est la plaque plane, nous nous concentrons sur le phénomène d'accélération. Notre second objectif est de déterminer la configuration optimale de VG. Pour cela, nous utilisons une méthode d'optimisation. Dans un premier temps, afin de choisir cette méthode, nous testons trois optimiseurs différents sur la fonction analytique de Griewank [8]   6 paramètres. Cette fonction présente de nombreux minima locaux mais un seul minimum global. Cela nous permet ainsi de déterminer a priori les performances des optimiseurs. Nous appliquons ensuite la méthode d'optimisation retenue sur notre configuration de plaque plane.

2 Modélisation par termes sources

Les simulations sont effectuées par résolutions des équations RANS en utilisant le code Volume-Fini FluentTM en 3D stationnaire avec le model de turbulence $k-\omega$ SST. La présence des VGs est obtenue par ajout de termes sources dans l'équation de quantité de mouvement représentant la force que le VG appliquerait sur l'écoulement. Ces termes sources sont appliqués dans toutes les cellules du maillage qui seraient traversées par le VG. Le jBAY model présenté ci-dessous sera utilisé pour modéliser l'effet des VGs sur l'écoulement.

2.1 Présentation du jBAY model

Le jBAY model permet d'estimer la force qu'il est nécessaire d'appliquer à chaque cellules du maillage traversées par le VG réel pour générer une déviation équivalent à celle qui aurait été induite par la présence du VG réel ( quation 1). En pratique, à chaque pas de temps du calcul, le modèle force l'écoulement à s'aligner avec le VG fictif en utilisant l'expression de la force suivante :

$$\vec{L}_i = c_{vg} S_{vg} \frac{V_i}{V_{tot}} \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) (\vec{U} \times \vec{b}) \left(\frac{\vec{U}}{|\vec{U}|} \cdot \vec{t} \right) \quad (1)$$

où S_{vg} est la surface du VG, V_i/V_{tot} le ratio entre le volume de la cellule i et le volume total des cellules avec termes sources, α l'incidence locale, ρ la masse volumique locale du fluide, U la vitesse locale de l'écoulement et le $(\vec{b}, \vec{t}, \vec{n})$ le repère unitaire local (figure 3). Les termes sources sont imposés uniquement dans les cellules enveloppant le VG simulé.

C_{vg} est une constante de calibration qui règle le forçage à chaque itération. Une constante trop faible ne permettra pas d'imposer une déviation suffisante de l'écoulement, tandis qu'une constante trop forte rendra le calcul instable. La constante de calibration est alors déterminée empiriquement en utilisant la démarche proposée par [5]. Il s'agit de calculer en fonction de C_{vg} , l'évolution de l'énergie cinétique moyenne de l'écoulement dans différents plans en aval des générateurs de vortex. La valeur de la constante doit être prise dans l'intervalle pour lequel l'évolution présente un plateau, où l'écoulement n'est donc plus dépendant de C_{vg} . Selon cette méthode, nous choisissons dans notre cas $C_{vg}=40$.

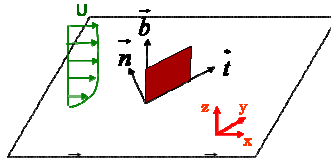


Figure 3 – Repère unitaire local du VG : $(\vec{b}, \vec{t}, \vec{n})$ où \vec{b} est parallèle au VG et normal à la plaque, \vec{t} est tangent au VG et normal à \vec{b} et \vec{n} est normal au VG. Repère absolu (x, y, z) où x est la direction longitudinale, y la direction transversale et z la direction normale à la plaque.

2.2 Comparaison termes sources et VG maillés

Pour valider la modélisation par termes sources, nous comparons dans un premier temps les résultats obtenus en utilisant le jBAY model à des calculs où les VG sont maillés. Notre cas d'étude est la plaque plane avec la configuration de VG présentée dans le tableau 1. Le profil de vitesse imposé en entrée du domaine est celui de Monkewitz *et al.* [9] avec $U_0=34 \text{ m.s}^{-1}$ dans l'écoulement potentiel (vitesse typique d'une automobile sur autoroute) et une épaisseur de couche limite $\delta=45 \text{ mm}$. Le domaine de calcul est considéré comme périodique dans la direction transversale (y). L'utilisation de termes sources a permis une diminution de 20% de la taille du maillage.

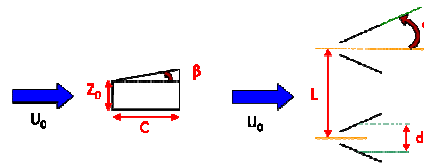


Figure 4– Paramètres de définition des VG.

α	Z_0/δ	c/δ	β	d/δ	L/δ
15°	0,3	2,1	0	0,6	2,5

Tableau 1– Configuration étudiée numériquement.

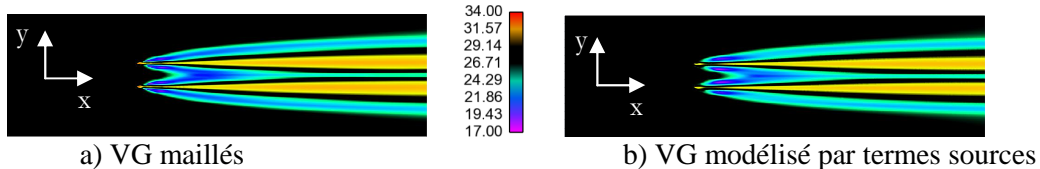


Figure 5 – Vitesse longitudinale u en m.s^{-1}

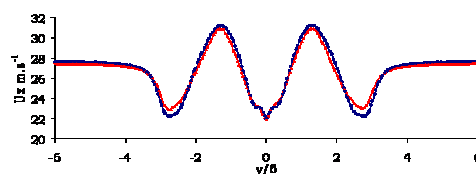


Figure 6 – Vitesse longitudinale u à $x = 10\delta$ et $z = \delta/3$: ● : VG maillés ; ▲ : VG modélisés

La figure 5 présente la vitesse longitudinale dans un plan $z = \delta/3$ et la figure 6 un profil issu de ce plan à $x = 10\delta$. La figure 7 présente l'évolution de la vorticité et la position en z du maximum de vorticité, en fonction

de x/δ . On peut remarquer que la modélisation des VG par termes sources est relativement fidèle. Les champs de vitesses des deux simulations sont sensiblement identiques. On retrouve le même développement des tourbillons ainsi que les mêmes amplitudes de vitesses. L'évolution de la vorticité est également bien prédite à la fois en intensité et en position. Les principales différences apparaissent dans la zone proche des VG. Elles proviennent de l'absence de la condition de non-glissement imposée sur les VG maillés. Cependant l'écart entre les deux simulations se réduit fortement en aval des VG. A partir de $x/\delta = 5$, l'écart relatif reste inférieur à 5% et nous considérons que la modélisation est tout à fait pertinente pour de telles distances.

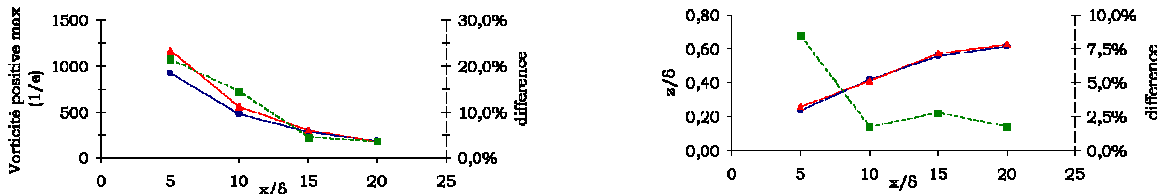


Figure 7 – Evolution de la vorticité : ● : VG maillés ; ▲ : VG modélisés ; ■ :  cart relatif en %

2.3 Validation expérimentale

Nous comparons maintenant la modélisation par termes sources à des mesures expérimentales sur plaque plane. La vitesse incidente est de 20 m.s^{-1} et l'épaisseur de couche limite au voisinage des VG est de $4,5 \text{ mm}$. Nous étudions la configuration du tableau 3. Les VG sont placés périodiquement sur l'ensemble de la largeur de la plaque à $x/\delta = 0$. Les résultats présentés sont obtenus à l'aide de plans PIV mesurés à $z = \delta/3$.

α	Z_0/δ	c/δ	β	d/δ	L/δ
15°	0,7	2,5	0	1	3

Tableau 3 – Configuration étudiée expérimentalement.

Les vitesses longitudinales expérimentales et numériques sont tracées figures 8 et 9 pour les deux configurations.

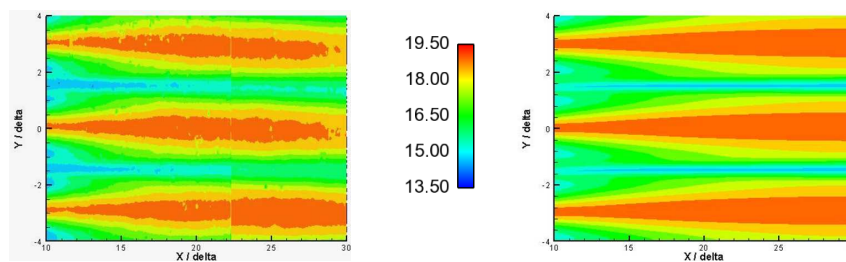


Figure 8 – Vitesse longitudinale u obtenue expérimentalement (  gauche) et numériquement (  droite).

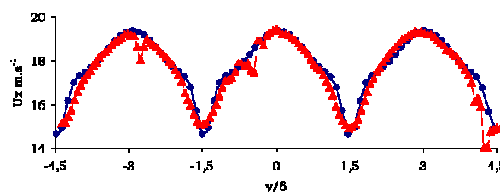


Figure 9 – Vitesse longitudinale u à $x = 20\delta$ et $z = \delta/3$: ● : mesures expérimentales ; ▲ : mesures numériques

Tout d'abord, on constate que la périodicité des tourbillons, prédite par les simulations numériques à l'aide des termes sources, ainsi que leurs tailles sont identiques à celles mesurées expérimentalement. Les différences dans l'allure des tourbillons pour x/δ supérieur à 25 proviennent d'une légère inclinaison du plan de mesure expérimental. C'  est également pour cette raison que les pics de basse vitesse sont légèrement plus intenses dans les résultats numériques que dans les résultats expérimentaux pour x supérieur 20δ . On ne retrouve pas cet écart concernant les survitesses. Il y a en moyenne moins de 5% d'écart entre les vitesses mesurées et les vitesses calculées.

A la vue des résultats présentés dans cette partie 2, on peut tout d'abord confirmer que la modélisation par termes sources des VG permet une substitution fidèle des VG maillés dans la mesure où on ne s'intéresse pas au voisinage des VGs, ce qui est le cas dans une optique de manipulation. De plus, la confrontation aux résultats expérimentaux a mis en évidence la bonne prédiction de l'écoulement à l'aide des termes sources.

On peut donc considérer comme performante l'utilisation du jBAY model pour le dimensionnement de VG.

3 Optimisation

Deux grandes familles de méthodes d'optimisation existent. La première, les méthodes globales d'optimisation (par exemple les algorithmes évolutionnaires), assure la convergence vers le minimum global, mais nécessite un grand nombre d'évaluations incompatible avec les contraintes industrielles. La seconde famille correspond aux méthodes dites locales. Elles ont certes un risque de convergence vers des minima locaux mais certaines présentent néanmoins de bons résultats pour un faible nombre d'évaluations : nous choisissons d'en comparer trois.

3.1 Etude des méthodes d'optimisation

Méthode de quasi-Newton: il s'agit d'une méthode de descente. Le passage du point n connu au point $n+1$ à évaluer nécessite deux étapes : la détermination de la plus forte pente par calcul du gradient par différence finis et le choix du pas de progression par recherche linéaire [10].

Méthodes de Simplex: En dimension n un simplexe est un ensemble de $n+1$ points. Les méthodes de simplexe sont des méthodes géométriques cherchant à remplacer les points ayant les plus mauvaises performances par des meilleurs points. L'approche de **Nelder et Mead** [11] consiste à travailler uniquement sur le plus mauvais point. L'approche de **Torczon** [12] cherche à améliorer les n plus mauvais.

Nous utilisons ces trois méthodes pour la recherche du minimum global de la fonction de Griewank (ce minimum vaut -1) (figure 10). Le tableau 4 regroupe les valeurs statistiques pour 100 initialisations aléatoires.

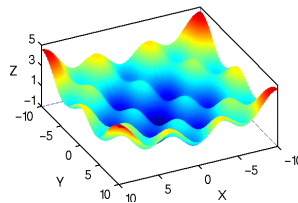


Figure 10 – Représentation de la fonction de Griewank à 2 paramètres

Optimiseur	Minimum trouvé (minimum global = -1)	Taux de convergence vers le minimum global	Valeur moyenne convergée
Quasi-Newton	-0,98	5%	0,43
Simplex Nelder-Mead	-0,99	65%	-0,87
Simplex Torczon	-0,99	85%	-0,95

Tableau 4 – Optimisation de la fonction de Griewank à 6 paramètres par trois méthodes.

On constate que l'ensemble des modèles convergent vers le minimum global. Cependant, les valeurs des taux de convergence montrent de fortes différences quant à la robustesse des méthodes. En effet la méthode Quasi-Newton ne trouve le minimum global que dans 5% des cas (valeur convergée inférieure à -0,9). Elle a beaucoup plus de mal à ressortir des bassins locaux d'attraction. Par contre les deux méthodes de simplexe présentent des taux de convergence beaucoup plus élevés et la valeur en fin d'optimisation moyennée sur les 100 cas est nettement plus faible. Elle est même proche de l'optimum. Nous nous concentrons donc sur ces méthodes. Le tableau 5, présente la valeur de la fonction obtenue après un nombre donné d'évaluations. Lors de l'optimisation d'une fonction coûteuse, nous sommes limités en nombre d'évaluations : ce critère est donc très important.

Optimiseur	Valeur de la fonction atteinte		
	-0,84	-0,88	-0,92
Simplex Nelder-Mead	500	560	925
Simplex Torczon	620	1350	2100

Tableau 5 – Optimisation de la fonction de Griewank à 6 paramètres par trois méthodes.

Nous remarquons que pour atteindre une même valeur, il peut y avoir un facteur 2,5 entre les deux méthodes en faveur de celle de Nelder-Mead. C'est donc celle-ci que nous retenons pour l'optimisation des VG dans la configuration plaque plane.

3.2 Résultats de l'optimisation

L'objectif de cette optimisation est d'accélérer l'écoulement en proche paroi. Nous choisissons alors comme fonction objectif la vitesse à $x=30\delta$ et $z=\delta/3$ moyennée dans la direction transversale y . L'optimisation est réalisée sur les 6 paramètres définissant une configuration de VG (figure 4). La figure 11 présente l'évolution du minimum de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations. Mentionnons que l'optimisation a été réalisée pour un nombre donné de 60 évaluations (15 120 h CPU).

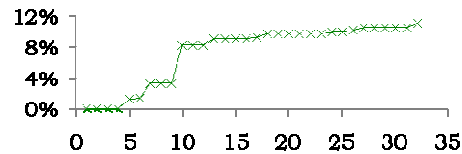


Figure 11 – Accélération de l'écoulement en fonction de nombre d'itérations

On peut noter qu'au cours des 10 premières itérations, la progression de la fonction objectif est très rapide. On accélère de plus de 8% l'écoulement avec moins de 20 évaluations. Le fait que la progression soit plus faible par la suite provient du fait que l'on se situe dans un bassin autour d'un minimum. Au bout de 33 itérations (60 évaluations), on obtient un gain de 11%.

4 Conclusion

Cette étude nous a permis de mettre en place une démarche d'optimisation des paramètres de forme des VG performante. Tout d'abord l'utilisation du jBAY model reproduit fidèlement l'influence des VG sur l'écoulement à l'aide de termes sources et nous fournit un gain important du temps de simulation en fournissant des évolutions de l'écoulement fidèles à celles obtenues avec des VGs réels. Ensuite l'évaluation de méthodes d'optimisation a montré les capacités de la méthode de Simplex Nelder-Mead à déterminer le minimum global d'une fonction présentant de nombreux minima avec un faible nombre d'évaluations. Enfin nous avons vu qu'en associant le jBAY model et la méthode de Simplex nous pouvions obtenir rapidement une optimisation aérodynamique des VG sur la configuration de la plaque plane. Cette boucle d'optimisation a été construite et validée dans un premier temps sur une configuration géométrique plane simplifiée. Notre objectif étant le contrôle d'écoulement sur véhicule, l'application de cette approche à des configurations présentant plus d'effets dynamiques 3D est en cours de réalisation.

Références

- [1] Hucho W. H., Aerodynamics of road vehicle, Cambridge University Press, 4th edition, 1998.
- [2] Taylor H. D., The elimination of diffuser separation by vortex generator, Technical report R-4015-3, United Aircraft Corporation, 1947.
- [3] Lin J. C., Review of research on low profil vortex generators to control boundary layer separation, Progress in aerospace sciences, 38, 389-420, 2002.
- [4] Wendt B. J., Initial circulation and peak vorticity behavior of vortices shed from airfoil vortex generator, Technical report NASA/CR-2001-211144, NASA Glenn Research Center, 2001.
- [5] Bender E. E., Anderson B. H. et Yagle P. J., Vortex generator modeling for Navier-Stokes codes, 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM99-6919, 1999.
- [6] Jirasek A., Vortex-generator model and its application to flow control, Jal. of Aircraft, 42(6), 1486–1491, 2005.
- [7] Dudek J. C., Modeling Vortex Generators in the Wind-US Code, 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA-2010-32, 2010.
- [8] Griewank A. O., Generalized descent for global optimization, Jal. of Optimization Theory and Applications, 34, 11-39, 1981.
- [9] Monkewitz P.A., Chauhan K.A. et Nagib H.M., Self-consistent high-Reynolds-number asymptotics for zero-pressure-gradient turbulent boundary layers, Physics of fluid, 19:115101, 2007.
- [10] Gilbert J. C., Optimisation différentiable, AF 1 252, Editions T.I., 2008.
- [11] Nelder J.A. et Mead R., A simplex method for function minimization, The Comp. Jal., 7, 308-313, 1965.
- [12] J. Dennis J. et V. Torczon, Direct search methods on parallel machines, SIAM Jal. of Opt, 1, 448-474, 1991.