

Influence des défauts des trous d'injection sur l'efficacité du refroidissement par film

A. AZZI^a, F. NEMDILI^a et B. A. JUBRAN^b

a. Laboratoire de Mécanique Appliquée, Université USTO, ORAN, ALGERIE

b. Department of Aerospace Engineering, Ryerson University, 350 Victoria Street, Toronto, Ontario, CANADA

Résumé :

La présente étude concerne un cas d'interaction entre un jet se développant perpendiculairement à un écoulement transversal avec présence d'imperfections à l'intérieur du trou d'injection. L'application directe d'une telle configuration se trouve principalement dans les systèmes de refroidissement par film appliqués aux aubes des turbines à gaz. En premier lieu une validation du modèle mathématique est effectuée à travers la comparaison des résultants numériques obtenus pour une configuration de base à ceux d'une étude expérimentale. L'étude est complétée par une investigation paramétrique incluant aussi bien l'effet de la taille de l'obstruction que sa position à l'intérieur du trou d'injection. Dans un premier temps, la structure des écoulements secondaires et les contours de l'efficacité de refroidissement sont présentés et discutés sur plusieurs plans transversaux. Ensuite, l'évolution longitudinal de l'efficacité de refroidissement ainsi que sa moyenne surfacique sont présentées et discutées pour plusieurs cas. Les résultats numériques ont montrés que l'efficacité de refroidissement diminue dangereusement avec l'augmentation de la taille de l'obstruction et qu'à partir de 50% d'obstruction la protection thermique de la surface de l'aube se trouve diminuée de plus de la moitié. D'autre part la position de l'obstruction à l'intérieur du trou d'injection a aussi un effet d'autant plus important que l'obstruction est proche de l'orifice d'injection.

Abstract:

The present paper reports a numerical investigation of jet-cross flow interaction in the presence of imperfection inside the injection hole with application to film cooling of turbine blades. Firstly, the numerical results for a basic case are compared and validated versus experimental measurements and then parametric studies are conducted. In order to understand and compare the imperfection influence on film cooling, two cases are considered: the perfect and the inner-torus cases. The predicted velocity vector field and thermal field on several transversal plans are presented and discussed. Streamwise evolution of adiabatic film cooling effectiveness and area averaged adiabatic film cooling effectiveness are plotted and discussed for both perfect and inner-torus cases. The parametric study includes an investigation of the influence of the obstruction size as well as its position into the hole. The numerical results show the dramatic and rapid decrease of the film cooling effectiveness when the obstruction is superior to 50%. For the second step, it is demonstrated that when the obstruction is close to the exit hole the thermal protection is dramatically destroyed.

Mots clefs : refroidissement par film, turbines à gaz, efficacité de refroidissement, imperfection

1 Introduction

L'interaction d'un jet avec un écoulement transversal est un modèle standard largement étudié aussi bien par des approches numériques qu'expérimentales. Les domaines d'application sont assez larges et couvrent entre autres les systèmes de refroidissement par film utilisés dans les premiers étages des turbines à gaz. Le principe consiste à injecter de l'air froid à travers des rangées de trous judicieusement aménagés dans le corps des aubes des turbines à gaz. L'air froid injecté est dévié et plaqué sur la surface de l'aube pour former un film mince de protection contre les hautes températures des gaz chauds. Il se trouve que durant le processus de perçage des trous d'injection, des imperfections inévitables peuvent subsister à l'intérieur des trous. Ces imperfections peuvent altérer considérablement le développement du jet du fluide refroidissant et par conséquent changer de façon très significative les performances du système de refroidissement.

Jovanović et al. (2006) ont conduit une étude expérimentale pour quantifier les changements dus à la présence de ces imperfections à l'intérieur du trou d'injection. La présente étude à caractère numérique se base sur celle de Jovanović et al. (2006) pour une validation du code de calcul et une extension de l'étude sur l'effet de la taille et de la position de l'obstruction à l'intérieur du trou d'injection.

2 Le modèle mathématique

Le modèle mathématique est composé des équations moyennées de Navier Stokes couplées au modèle de turbulence standard $k-\epsilon$. La méthode des volumes finis est appliquée à travers une grille de calcul structurée utilisant un stockage centrée de toutes les variables de l'écoulement. Les schémas de discrétisation sont maintenus à l'ordre deux sauf au voisinage des discontinuités où ils passent à l'ordre un pour assurer la stabilité et la consistance des calculs itératifs. Le modèle de turbulence $k-\epsilon$ de Launder et al. (1975) est appliqué via une approche loi de paroi appelée '*scalable wall function*'. Cette approche implémentée par l'équipe de développement du code CFX (Grotjans and Menter, 1998) apporte une solution pratique au problème lié à la position du premier nœud de calcul par rapport aux parois solides.

3 Le cas test

Dans leur étude expérimentale, Jovanović et al. (2006), ont testé une première configuration de trou cylindrique parfait noté (P) et une deuxième configuration munie d'une modification en forme de couronne torique pour simuler l'obstruction à l'intérieur du trou d'injection. Cette deuxième configuration est notée (IT). La Figure 1 représente les deux géométries qui seront exactement reproduites pour le présent test numérique.

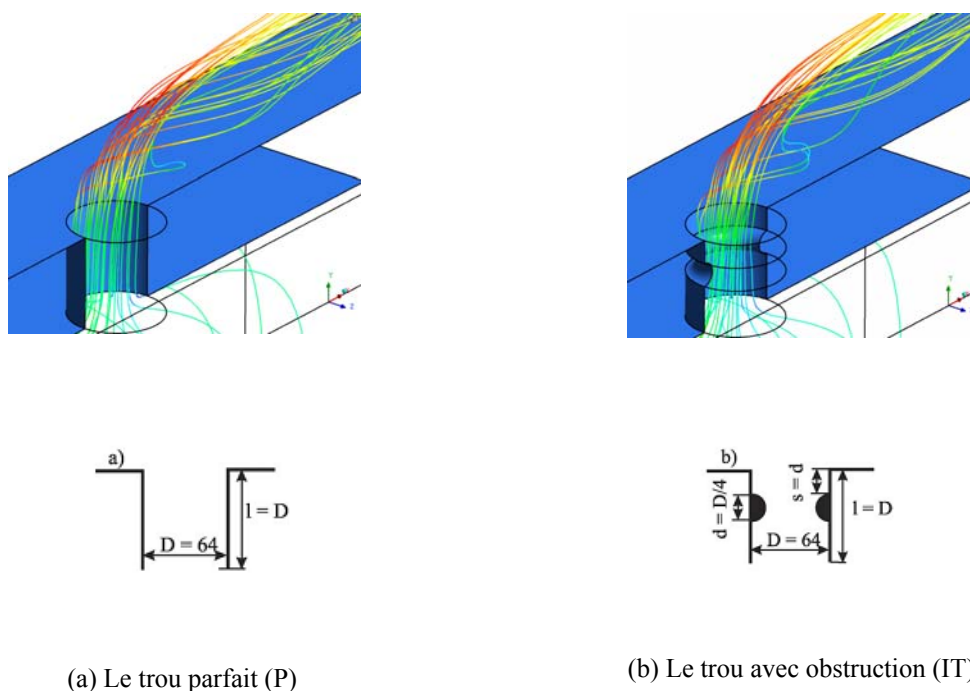


Figure 1, Géométrie des deux cas test

Le débit du fluide refroidissant est quantifié à travers le taux d'injection défini par $(VR = \rho U_c / \rho U_\infty)$ où l'indice (c) indique la masse volumique et la vitesse du jet froid et l'indice (∞) se rapporte aux conditions de l'écoulement principal. Conformément à l'étude expérimentale, trois taux d'injection sont testés. Les conditions aux limites imposées aussi bien pour l'écoulement principal que pour le jet de refroidissement sont résumées dans le tableau 1. Une condition de transfert pariétale adiabatique et une différence de 6° entre l'écoulement principal et le jet de refroidissement sont imposées. Des tests préliminaires ont conduit à adopter une grille de calcul structurée et multi-blocs d'environ un demi-million de nœuds judicieusement distribué sur l'ensemble du domaine de calcul. La distribution des nœuds de calcul est optimisée par

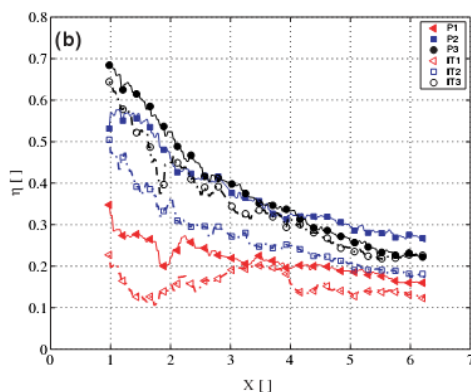
l'utilisation d'un raffinement près des parois solides et des formes en O autour et à l'intérieur des trous d'injection.

		Ecoulement principal			Jet de refroidissement		
	Taux d'injection (VR)	U (mm/s)	Energie cinétique de turbulence	Taux de dissipation	V (mm/s)	Energie cinétique de turbulence	Taux de dissipation
1	0.54	120	$Tu = 1\%$	$\mu_t / \mu = 30$	64.8	$Tu = 10\%$	$k^{3/2} / \varepsilon = 0.3D$
2	0.34	190			64.6		
3	0.20	330			66		

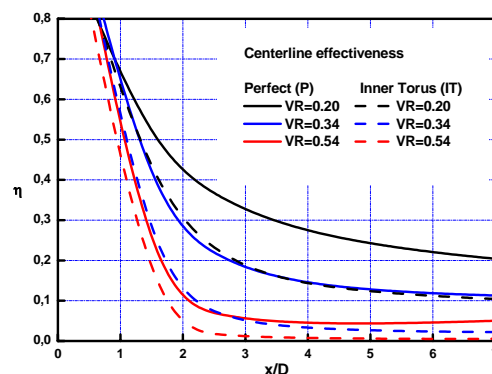
Table 1, Conditions aux limites.

4 Résultats et discussions

Pour étudier et comparer l'efficacité du processus de refroidissement, on définit une température adimensionnelle définie par $\eta = (T_\infty - T_{aw}) / (T_\infty - T_c)$ et appelée efficacité de refroidissement. L'indice ∞ indique la température de l'écoulement principal, l'indice (c) se rapporte aux conditions du jet refroidissant alors que l'indice (aw) indique la température adiabatique de la paroi à refroidir. L'efficacité de refroidissement prend la valeur un si la température est égale à celle du jet (refroidissement maximum) et zéro si elle est égale à celle de l'écoulement principale (refroidissement nul). Sur la Figure 2, on présente la distribution longitudinale de l'efficacité de refroidissement sur la ligne qui passe par le centre de l'orifice d'injection. Sur la partie gauche sont présentées les mesures effectuées par Jovanović et al., (2006) et sur celle de droite les résultats numériques issues de la présente étude. L'investigation est conduite pour trois taux d'injection différents et pour les deux configurations, parfaite (P) et celle avec l'obstruction (IT). La comparaison des résultats est assez satisfaisante aussi bien sur l'aspect qualitative que quantitative. En général, l'efficacité diminue de façon monotone en s'éloignant de l'orifice d'injection. Elle diminue aussi quand le taux d'injection augmente. Ce qui est en accord avec l'aspect physique lié au décollement du jet refroidissant quand le taux d'injection dépasse une certaine valeur critique. Pour le même taux d'injection, la présence de l'obstruction affecte le jet par une accélération additionnelle qui fait que le jet dispose de plus d'énergie cinétique. Dans ce cas, le jet décolle et va se diluer dans la couche limite au lieu de rester plaqué sur la paroi solide. Ceci se traduit par une diminution sensible de l'efficacité de refroidissement.



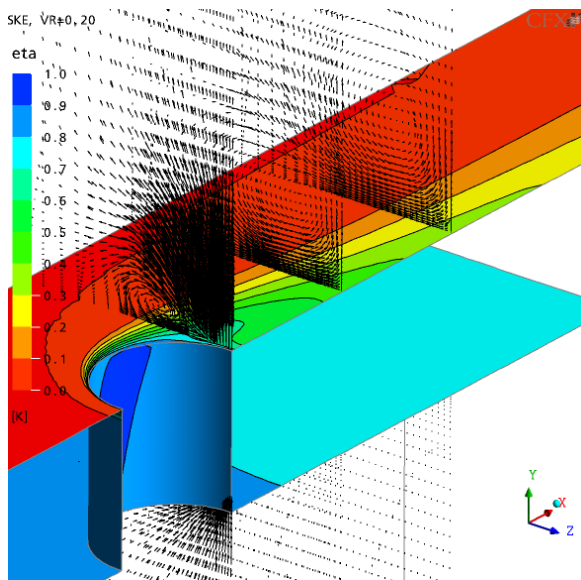
Mesures expérimentales (Jovanović et al., 2006)



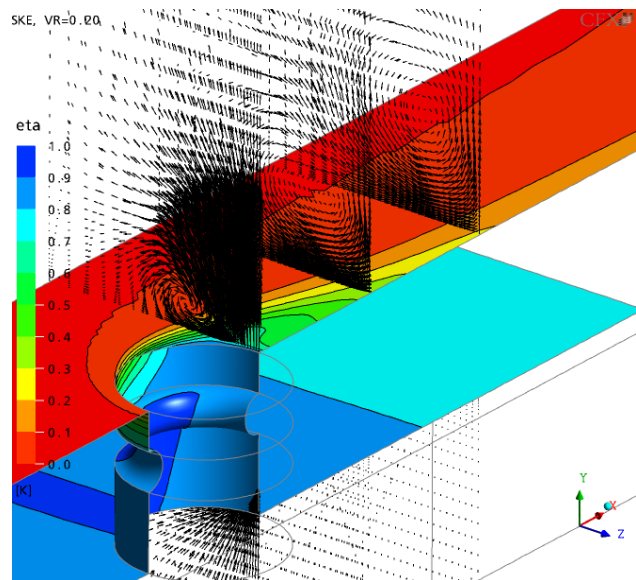
Résultats numériques de la présente étude

Figure 2, Distribution longitudinale de l'efficacité de refroidissement sur la ligne centrale passant par le centre de l'orifice d'injection

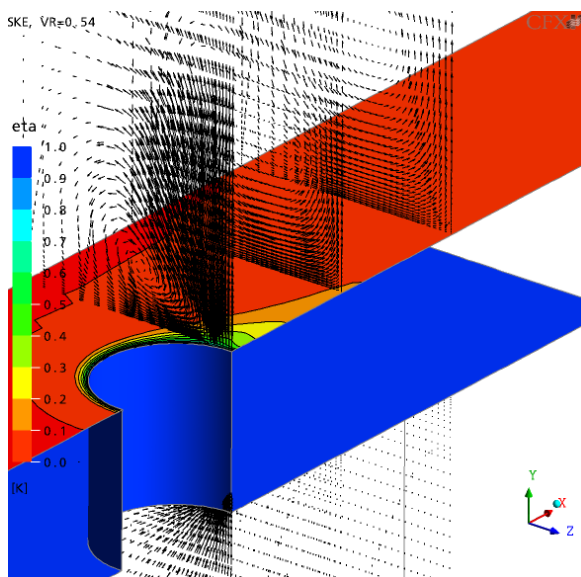
La Figure 3, représente la distribution de l'efficacité de refroidissement sur la paroi solide ainsi que le champ des écoulements secondaires sur trois plans perpendiculaires à l'écoulement principal. Les écoulements secondaires montrent très bien la formation des deux vortex contra-rotatif qui ont une intensité proportionnelle à la force du jet. La présence de l'obstruction affecte de façon significative le développement de l'écoulement ainsi que la distribution de l'efficacité. On note, pour les cas (IT) une intrusion de l'écoulement principal (chaud) à l'intérieur du trou d'injection lui même.



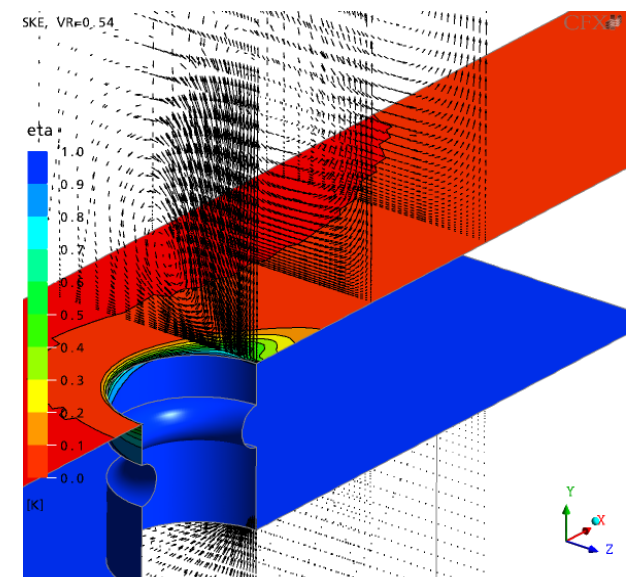
(P), VR = 0.20



(IT), VR = 0.20



(P), VR = 0.54



(IT), VR = 0.54

Figure 3, Contours de l'efficacité de refroidissement et écoulements secondaires au niveau de trois plans transversaux à l'écoulement principal,

Influence de la taille de l'obstruction:

Pour étudier l'effet de la taille de l'imperfection sur l'efficacité du refroidissement, on a gardé la même forme semi torique avec quatre niveaux d'obstruction allant de 0% (P), 23,44, 43,75 et 60,94 % (voir Figure 4). Le taux d'injection est maintenu au même niveau. Pour comparer de façon globale les différentes configurations, on a calculé une moyenne de l'efficacité de refroidissement sur toute la surface de la paroi plane. Cette nouvelle variable sera notée $\langle \eta \rangle$ et indique le niveau de protection réalisé par le jet. La Figure 5, représente les valeurs obtenues de $\langle \eta \rangle$ pour les quatre cas cités précédemment.

L'étude montre que l'efficacité de refroidissement moyenne diminue sensiblement avec l'augmentation de la taille de l'obstruction. Une obstruction d'à peu près 25% fait passer $\langle \eta \rangle$ de 0.055 à 0.045. Soit une diminution d'environ 20%. Le passage à une taille d'obstruction d'environ 50% fait diminuer $\langle \eta \rangle$ de 50%.

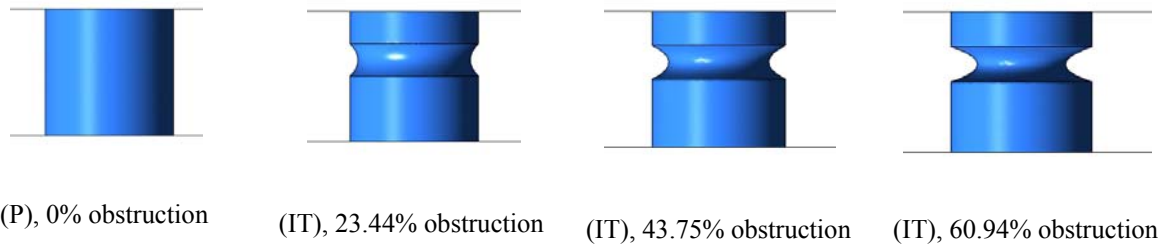


Figure 4, Les quatre géométries testées lors de l'étude de l'effet de la taille de l'obstruction

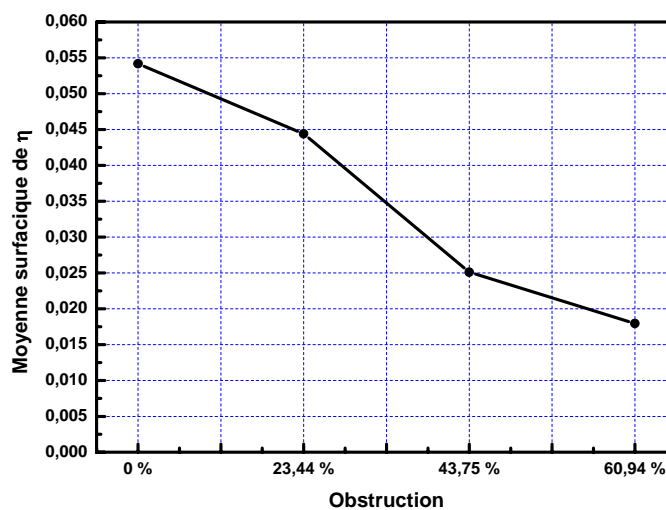


Figure 5, Efficacité de refroidissement moyenne en fonction de la taille de l'obstruction du trou

Influence de la position de l'obstruction

Pour étudier l'effet de la position de l'obstruction à l'intérieur du trou d'injection, cinq configurations géométriques ont été testées. La Figure 6 montre les cinq cas, incluant le trou parfait ainsi que quatre positions différentes notées L1, L2, L3 et L4 respectivement.

Les résultats du test montrés par la Figure 7 montrent que les situations où l'obstruction est très proche de l'orifice d'injection sont les plus défavorables. Ceci s'explique par le fait que l'éloignement de l'obstruction de l'orifice d'injection permet à l'écoulement dans le trou de se redévelopper et reprendre la forme du jet rond. Alors, que si l'obstruction est toute proche de l'orifice, l'accélération du jet est intensifiée et contribue au décollement du jet et par conséquent détériore la protection de l'aube.

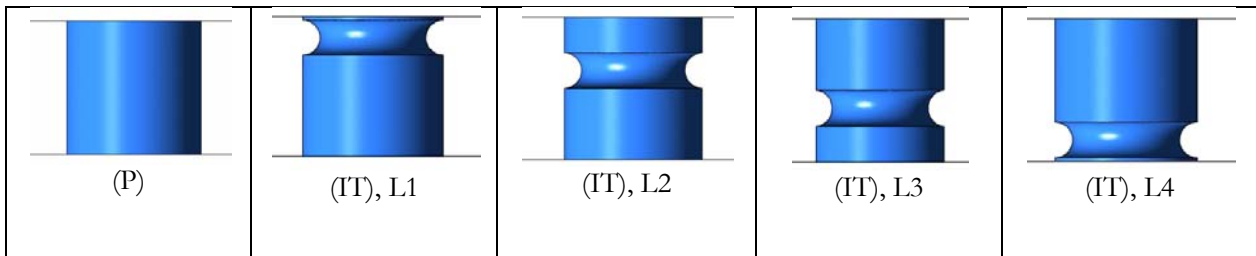


Figure 6, Les cinq géométries utilisées lors de l'étude de l'influence de la position de l'obstruction sur l'efficacité de refroidissement

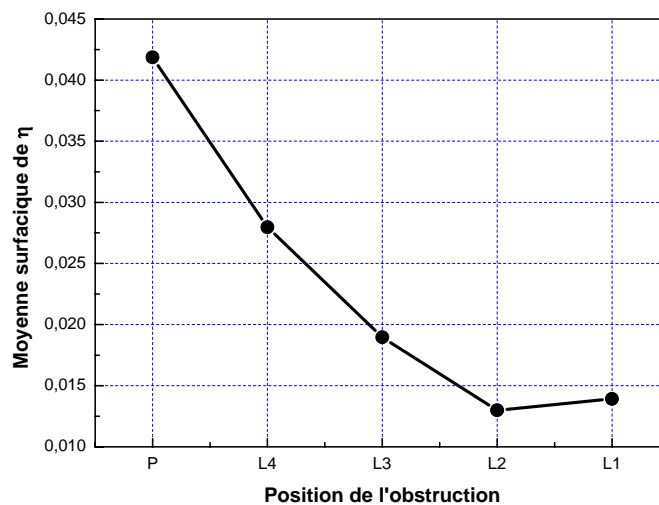


Figure 7, L'efficacité de refroidissement moyenne en fonction de la position de l'obstruction à l'intérieur du trou

5 Conclusions

Dans la présente étude un modèle numérique du refroidissement par film avec présence d'une obstruction dans le trou d'injection est validé vis à vis des mesures expérimentales publiées par Jovanović et al. (2006). Dans une deuxième étape une étude paramétrique incluant aussi bien l'effet de la taille de l'obstruction ainsi que sa position dans le trou d'injection est conduite. En tenant compte des autres paramètres géométriques et thermo aérodynamique utilisées dans cette application, il a été trouvé qu'une obstruction au dessus de 50% de l'orifice d'injection peut s'avérer très néfaste pour la protection de la surface externe de l'aube. D'autre part, les positions les plus proches de l'orifice d'injection sont très dangereuses par rapport à celles plus éloignées.

References

- [1] Jovanovic, M. B., de Lange, H. C., van Steenhoven, A. A., (2006). "Influence of Hole Imperfection on Jet Cross Flow Interaction". *Int. J. Heat and Fluid Flow*, vol.27, pp.42–53
- [2] Launder, B. E., Reece, G., and Rodi, W., 1975, "Progress in the Development of a Reynolds Stress Turbulence Closure," *J. Fluid Mech.*, **68**, pp. 537–566.
- [3] Grotjans, H., and Menter, F.R., Wall Function for Industrial Applications', Un K.D. Papailiou, editor *Computational Fluid Dynamics'98*, Volume 1, Part 2, pages 1112-1117, Chichester. ECCOMAS, John Wiley Sons, 1998.