

RANS/LES telles que la DES (Detached Eddy Simulation) ou des méthodes URANS avancées telles que la SAS (Scale Adaptive Simulation) pour capter ces phénomènes ([4],[5],[6]). Il y a néanmoins peu d'études numériques portant sur l'écoulement autour d'un barreau avec transfert de chaleur ([7]).

Cet article a pour but de faire une étude numérique d'un tel écoulement pour un nombre de Reynolds de $Re_d = 32500$ et un profil de température imposé à la paroi issu des données expérimentales. Des simulations avec les modèles $k-\omega$ SST, en approche Scale Adaptive Simulation (SAS) et Zonal Detached Eddy simulation (ZDES) sont menées. Les résultats font l'objet d'une étude statistique (grandeurs moyennes, tensions de Reynolds, flux de chaleur turbulent) pour être comparés aux expériences.

2. Démarche numérique

2.1. Paramètres et conditions de simulation

Les dimensions du domaine de calcul sont exprimées en fonction de la longueur du côté du barreau $d = 50\text{ mm}$. Deux maillages sont utilisés qui comportent respectivement 5,7 millions de cellules (maillage 1) et 25 millions de cellules (maillage 2) avec une zone de maillage en O raffinée autour du barreau afin d'éviter la propagation des raffinements de paroi dans le reste de l'écoulement.

Les caractéristiques générales du domaine sont résumées dans le tableau 1. Les conditions limites suivantes sont appliquées :

- sur les parois du barreau : une condition d'adhérence pour la vitesse et un profil moyen de température issu des données expérimentales (fig.1) appliqué dans toute la profondeur du barreau,
- un écoulement uniforme ($u_1 = U_{inf}$, $u_2 = u_3 = 0$) de température $T = T_{amb} = 295,55\text{ K}$ en entrée,
- une condition limite périodique sur les plans latéraux,
- une condition de pression en sortie,
- une condition de glissement sur les plans supérieur et inférieur en faisant l'hypothèse que les couches limite sur les parois de la soufflerie sont très minces.

	Maillage 1	Maillage 2
Diam. barreau	$d = 50\text{ mm}$	$d = 50\text{ mm}$
Dimension en x	$50d$	$50d$
Dimension en y	$11d$	$11d$
Dimension en z	$4d$	$4d$
Nb mailles en x	336	578
Nb mailles en y	200	350
Nb mailles en z	80	100
Nb mailles total	5,760,000	25,130,000

Tableau 1: Caractéristiques du domaine de calcul

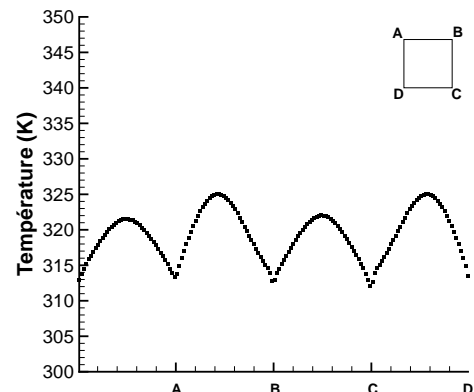


Figure 1: Profil de température imposé aux parois

Les simulations sont effectuées avec le code Navier-Stokes *elsA* [8]. Ce code est dédié à la simulation numérique d'écoulements de fluides monophasiques, compressibles, visqueux,

stationnaires ou instationnaires sur des maillages structurés multi-blocs tridimensionnels. *elsA* est développé par l'ONERA en co-opération avec le CERFACS et résout les équations de Navier-Stokes moyennées au centre des mailles. Le nombre de Mach en entrée étant faible $\mathcal{M}_{inf} = 0,027$, un préconditionnement basse-vitesse de Choi-Merkle est utilisé. Les simulations utilisent un schéma de Roe couplé au limiteur Superbee et un pas de temps de $\Delta t = 10^{-5}s$. Deux modèles de turbulence sont testés : le modèle k- ω SST de Menter [9]; le modèle SAS de Menter et al. [6] (noté SAS1) ainsi qu'une version modifiée de ce modèle (noté SAS2) développée par Benyoucef et al. [10] afin de mieux restituer les instabilités dans les couches de mélange. Enfin, la ZDES développée par Deck [11] est également testée sur ce cas d'étude.

2.2. Scale adaptative simulation

La SAS est une approche hybride RANS/LES développée par Menter et Egorov [6], inspirée du modèle $k - kL$ de Rotta. Ce modèle se distingue des autres par la présence d'un terme source supplémentaire Q_{SAS} dans l'équation de transport de la variable kL . Menter et Egorov ont modélisé ce terme par une dérivée de la vitesse au second ordre. Le modèle SAS1 est ici utilisé sous sa forme SST c'est-à-dire en transportant ω ($\omega = k^{2/3}/kL$) selon les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = P_k - \rho \beta^* k \omega + \nabla \cdot [(\mu + \mu_t \sigma_k) \nabla k] & (1a) \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \omega) = \frac{\gamma}{\nu_t} P_k + Q_{SAS} - \rho \beta \omega^2 + \nabla \cdot [(\mu + \mu_t \sigma_\omega) \nabla \omega] \\ + (1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{2\rho}{\omega} \times \nabla k \cdot \nabla \omega & (1b) \end{cases}$$

avec

$$Q_{SAS} = \max \left[\rho \zeta_2 \kappa S^2 \left(\frac{L}{L_{vK}} \right)^2 - C \frac{2\rho k}{\sigma_\phi} \max \left(\frac{\|\nabla k\|^2}{k^2}, \frac{\|\nabla \omega\|^2}{\omega^2} \right), 0 \right] \quad (2)$$

où $\zeta_2 = 3,51$, $\sigma_\phi = 2/3$, $C = 2$ et $L_{vK} = \frac{\kappa S}{\|\Delta \mathbf{u}\|}$.

Le modèle SAS2 [10] diffère quant à lui par l'expression de L_{vK} afin de mieux capturer les instabilités de Kelvin-Helmholtz dans les couches de mélange.

3. Resultats et analyse

3.1. Aspects dynamiques

La figure 2(a) représente ci-contre des iso-surfaces du critère Q ($S^2 - \Omega^2$) de l'écoulement obtenu sur le maillage 1 avec le modèle k- ω . On peut observer que ce modèle parvient à capturer les instabilités de Kelvin-Helmholtz (K-H) qui s'échappent des arêtes à l'avant du barreau mais qu'elles sont dissipées dans le sillage du barreau donnant ainsi un écoulement 2D avec de larges structures cohérentes de la taille du barreau.

La figure 2(c) montre que le modèle SAS standard de Menter (SAS1) ne restitue pas les instabilités de K-H sur le premier maillage. Cependant, les larges structures cohérentes sont déstabilisées dans le sillage et des structures plus fines sont résolues (le rapport de viscosité μ_t/μ diminue). Le nouveau modèle SAS2 capture bien les instabilités de K-H et apporte davantage de déstabilisation puisque l'écoulement devient tridimensionnel dès qu'il quitte les arêtes avant du barreau (fig.2(e)) avec des structures de plus en plus fines.

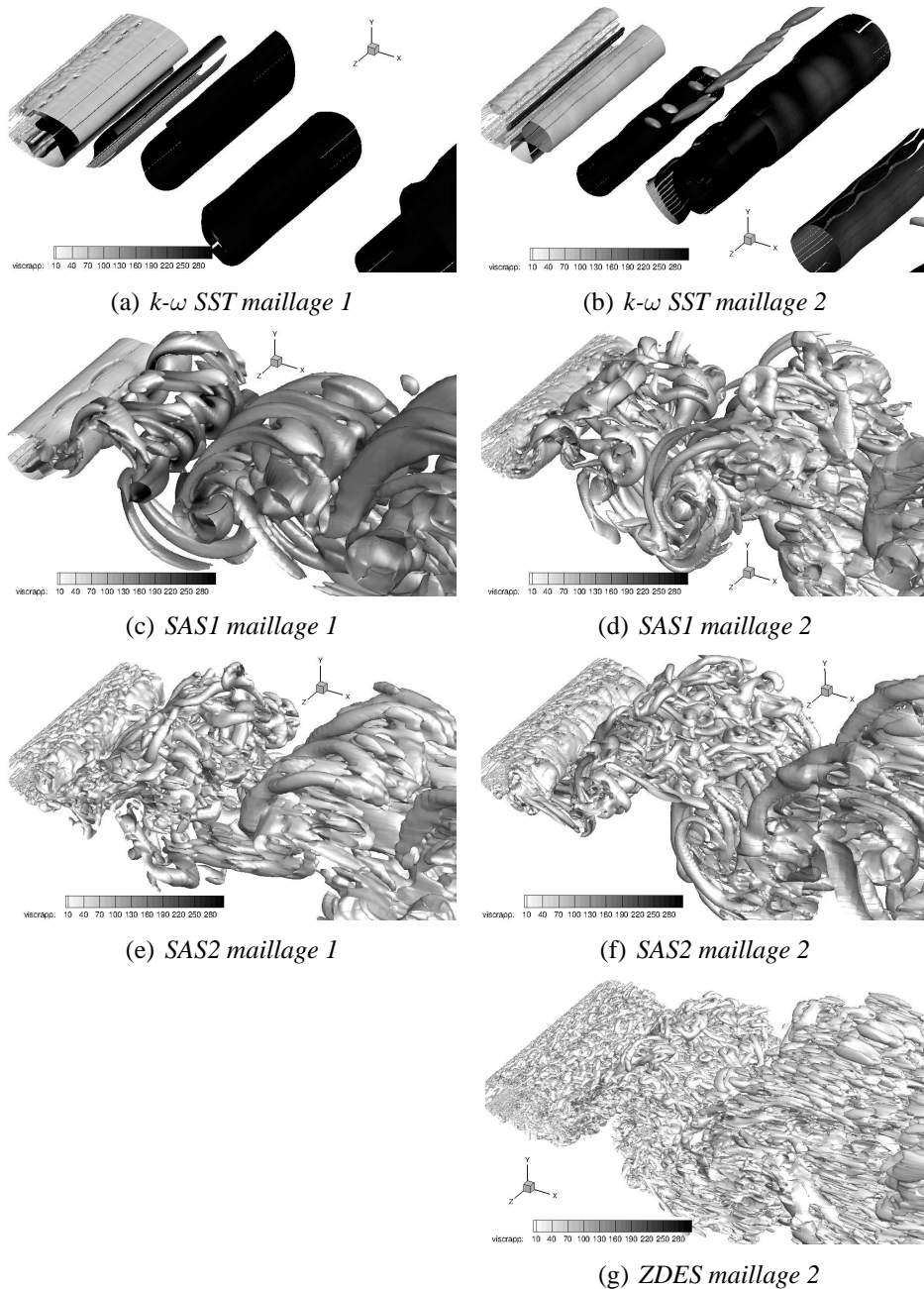


Figure 2: Iso-surfaces du critère Q ($Q=-100s^{-2}$) colorées par le rapport de viscosité μ_t/μ

Le raffinement du maillage (maillage 2) permet au modèle SAS1 de capturer les instabilités de K-H dans la couche cisailée et de développer un sillage tridimensionnel pleinement turbulent (figure 2(d)). La figure 2(b) permet de remarquer que le modèle $k-\omega$ offre un sillage un peu plus perturbé mais toujours quasiment 2D et pas encore déstabilisé. Néanmoins, le passage à un maillage plus fin n'est pas significatif pour le modèle SAS2 (figure 2(f)) étant donné que celui-ci restituait déjà une multitude de fines structures turbulentes sur le maillage 1. L'utilisation de la ZDES sur le maillage 2 permet de résoudre des structures encore plus fines (figure 2(g)), dont la taille est de l'ordre de la taille de maille, que celles capturées par les simulations en approche SAS dans le sillage fortement déstabilisé du barreau.

Sur les figures 3 et fig.4, la vitesse axiale moyenne et les valeurs rms des fluctuations de

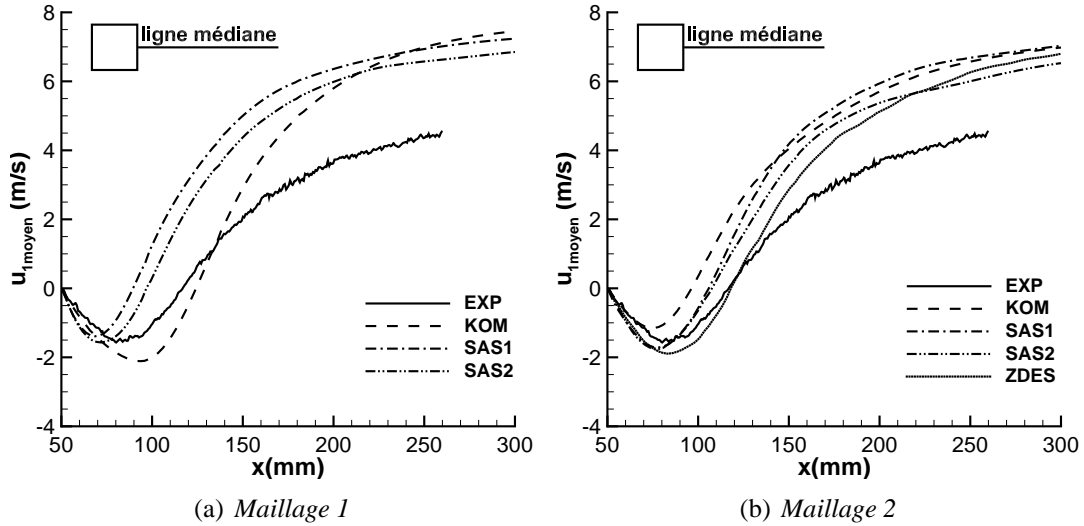


Figure 3: Vitesse moyenne axiale U_{moy} sur la ligne médiane

vitesse (moyenne sur 200,000 pas de temps) $u_p = \sqrt{u'^2}$ et $v_p = \sqrt{v'^2}$ sont comparées aux données expérimentales le long de la ligne médiane du barreau définie par : $x > d$, $y = 0$ et $z = 0$.

Les modèles SAS permettent d'avoir de meilleures prévisions de ces champs que le modèle SST, en particulier sur le niveau de vitesse négative dans la région de recirculation derrière le barreau (figure 3(a)). Dans le sillage proche, tous les modèles diffèrent fortement des données expérimentales. Ce problème déjà rencontré dans diverses études en LES et DES du barreau ([12],[5]) semble en partie lié au maillage mais également à un ensemble de paramètres, tels que la turbulence extérieure ou l'interaction des structures turbulentes avec les parois, dont les effets sont peu connus.

En effet, l'écoulement étant hautement instable, les structures se formant s'échappent jusqu'à rapidement atteindre les faces supérieure et inférieure du domaine de calcul où elles sont dissipées car le maillage n'est pas assez fin. Il est donc difficile de connaître cet effet sans raffiner énormément le maillage jusqu'aux parois. On remarque ainsi que la prévision de la vitesse axiale est améliorée sur le maillage raffiné (maillage 2), plus particulièrement dans la zone de recirculation (fig.3(b)) pour les modèles SAS. On note également que les résultats obtenus avec le modèle SAS2 dans cette région de l'écoulement sont améliorés avec le maillage 2 en s'éloignant du barreau. L'emploi de la ZDES permet quant à lui de retrouver une longueur de recirculation satisfaisante par rapport aux modèles SAS derrière le barreau. En dépit des progrès liés au raffinement du maillage, le retour au niveau de vitesse initial dans le sillage demeure insuffisamment bien reproduit. L'utilisation de schémas d'intégration différents restent à explorer afin d'améliorer cet aspect des résultats.

Les valeurs rms des fluctuations de vitesse résolues u_p et v_p obtenues avec les modèles SAS (spécialement avec le modèle SAS2) sont en bon accord avec les données expérimentales contrairement aux résultats du modèle SST (fig.4). u_p et v_p présentent un bon accord avec les données expérimentales sur le maillage raffiné (maillage 2) où les résultats du modèle SAS1 deviennent équivalents à ceux du modèle SAS2. Quant aux résultats avec le modèle SST, ils sont sensiblement améliorés jusqu'à se rapprocher de ceux des modèles SAS. Si tous trois présentent des niveaux rms v_p proches des données expérimentales près du barreau, on peut constater un

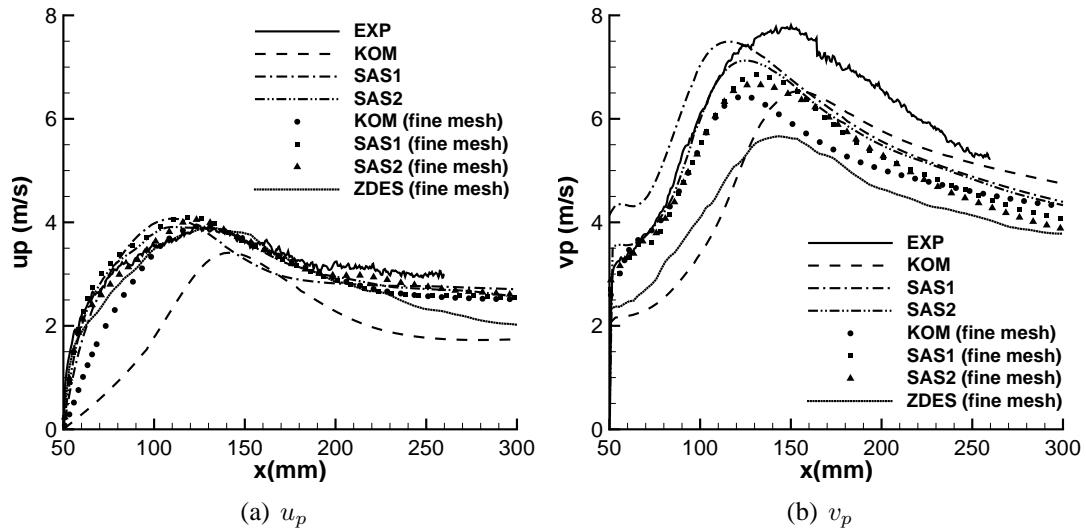


Figure 4: *Fluctuations rms de vitesse sur la ligne médiane*

certain écart quand on s'éloigne du barreau. On peut supposer que l'ajout de la partie modélisée améliorerait la correspondance des résultats avec les données expérimentales, cette partie étant plus importante pour le modèle SST que pour les résultats des simulations SAS où le rapport de viscosité μ_t/μ reste assez peu élevé dans cette zone (de 10 à 100 contre un rapport supérieur à 300 pour le modèle SST). La ZDES prédit bien la variation des niveaux rms u_p en proche paroi puis les sous-estime en s'éloignant du barreau de même qu'elle le fait de façon importante pour v_p . Le mode LES étant activé dans cette région, la partie modélisée y est faible (rapport de viscosité autour de 10) donc le fait d'ajouter la partie modélisée provenant du modèle de sous-maille modifiera peu la sous-estimation des résultats produits par la ZDES par rapport aux données expérimentales.

3.2. Comportement thermique

Le flux de chaleur normal à la paroi (fig.5) est moyenné en temps et dans la direction z sur chaque face du barreau afin d'être comparé à un calcul de conduction réalisé sur le barreau en prenant le profil de température moyen expérimental.

Le flux de chaleur pariétal est bien restitué sur la face avant et les résultats obtenus avec les approches SAS et ZDES sont meilleurs que ceux obtenus en SST sur les coins avant (A et D) ainsi que la face arrière (BC). En revanche, le flux de chaleur est surestimé près des coins arrière du barreau (B et C) probablement parce que toutes les simulations montrent des régions de recirculation trop grandes au-dessus et en-dessous du barreau par rapport aux données expérimentales PIV. De plus, le flux de chaleur normal à la paroi est trop important sur la face arrière apparemment en raison de la structure de l'écoulement en aval du barreau, notamment le fait que la zone de recirculation ne soit pas assez grande limitant ainsi la quantité de chaleur présente dans cette région. Cependant, on remarque que le modèle SAS2 permet d'avoir de meilleurs résultats quant au flux de chaleur pariétal par rapport au modèle SAS classique SAS1. De même, l'approche ZDES qui restitue correctement la zone de recirculation et déstabilise davantage l'écoulement en aval du barreau permet ici d'améliorer significativement la prévision du flux de chaleur sur la face arrière du barreau. La prévision du flux de chaleur pariétal est meilleure sur le maillage raffiné notamment sur la face arrière où nous rencontrons

le plus de difficulté.

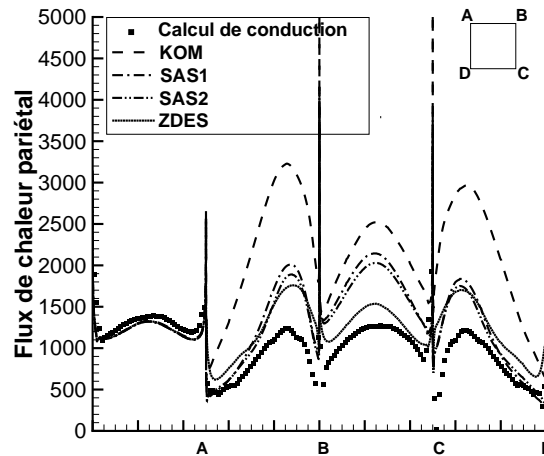


Figure 5: Flux de chaleur pariétal moyenné en temps et en espace sur le maillage 2

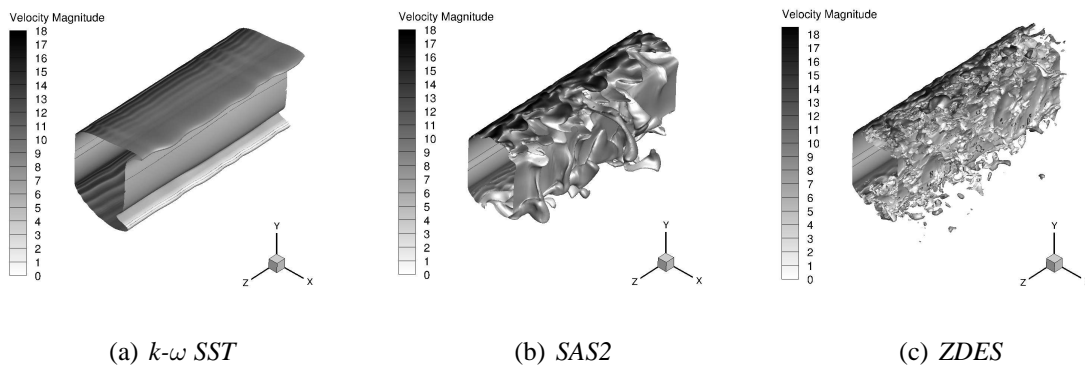


Figure 6: Iso-surfaces de température ($T = 298\text{ K}$) colorées par la norme de vitesse sur le maillage 2

Le barreau étant chauffé, l'écoulement présente des structures thermiques turbulentes. La figure 6 représente des iso-surfaces de température ($T = 298\text{ K}$) colorées par la norme de la vitesse. On peut observer sur cette figure que les structures thermiques turbulentes sont étroitement liées aux champs de vitesse puisqu'elles correspondent à des niveaux de vitesse importants. Ces structures thermiques sont davantage développées dans les simulations avec les approches SAS2 et particulièrement avec la ZDES qu'avec les modèles SST et SAS1. Les structures thermiques turbulentes observées sur les résultats des modèles SAS sont plus importantes sur le maillage 2 que sur le maillage 1 de telle façon que la température s'en retrouve davantage transportée dans l'écoulement. À cela s'ajoute que l'écoulement est amélioré dans la région de recirculation en aval du barreau sur le maillage fin. Tous ces éléments permettent d'expliquer pourquoi le flux de chaleur pariétal est mieux reproduit sur la face arrière (fig.5). En effet, il y a une quantité de chaleur plus importante dans la région de recirculation derrière le barreau ce qui abaisse le flux de chaleur sur la face arrière. Le flux de chaleur pariétal reste néanmoins trop élevé sur la face arrière et les coins arrière du barreau par rapport aux données expérimentales et reste donc à améliorer en raison d'une meilleure reproduction de l'écoulement nécessaire dans cette zone.

4. Conclusion

Les approches SAS et ZDES améliorent fortement la prévision des caractéristiques dynamiques et thermiques de l'écoulement comparé au modèle $k-\omega$ SST. Ces modèles permettent d'avoir un écoulement tridimensionnel qui développe des structures turbulentes 3D. C'est pourquoi la restitution des tensions de Reynolds et de l'écoulement moyen s'en retrouve améliorée. Les simulations SAS et ZDES présentent également des structures turbulentes thermiques s'échappant du barreau qui montrent le transport de la température dans l'écoulement.

Cependant, tous les résultats numériques affichent un flux de chaleur pariétal trop élevé sur la face et les coins arrière du barreau par rapport aux expériences. Ceci semble résulter des caractéristiques de l'écoulement et des structures formées en aval du barreau. Il est donc nécessaire d'avancer plus avant dans la compréhension des mécanismes de développement de ces structures dans la couche cisailée et le sillage proche du barreau afin d'améliorer la prévision de l'écoulement et comprendre ces phénomènes numériques.

Le modèle SAS2 permet d'obtenir sur le maillage 1 des résultats presque aussi bons que le modèle classique SAS1 sur le maillage 2. Nous pouvons donc en conclure que ce nouveau modèle permet d'avoir une qualité de résultats équivalente au modèle standard avec un moindre effort de raffinement du maillage.

La prévision de l'écoulement moyen et du flux de chaleur pariétal restant à améliorer, l'influence du schéma d'intégration spatial sur les résultats numériques, notamment l'utilisation de schémas d'ordres plus élevés est en cours de réalisation.

Références

- [1] D.A. Lyn and S. Einav and W.Rodi and J.H. Park, A Laser-Doppler Velocimetry Study of the Ensemble-Averaged Characteristics of the Turbulent Near Wake of a Square Cylinder, *J. of Fluid Mechanics*, 304 (1995) 285-319.
- [2] C. Norberg, Flow around rectangular cylinders : Pressure forces and wake frequencies, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 49 (1993) 187-196.
- [3] E.M. Sparrow and J.P. Abraham and J.C.K. Tong, Archival correlations for average heat transfer coefficients for non-circular and circular cylinders and for spheres in cross-flow, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 47 (2004) 5285-5296.
- [4] C. Brun and T. Goossens, 3D coherent vortices in the turbulent near wake of a square cylinder, *Comptes Rendus Mécanique*, 336-4 (2008) 363-369.
- [5] M.F. Barone and C.J. Roy, Evaluation of Detached Eddy Simulation for Turbulent Wake Applications, *AIAA Journal*, 44-12 (2006) 3062-3071.
- [6] F.R. Menter and Y. Egorov, The Scale-Adaptative Simulation method for unsteady turbulent flow predictions. Part 1 : Theory and model description, *Flow, Turbulence and Combustion*, 85 (2010) 113-138.
- [7] S. Wische, Large-eddy simulation study of an air flow past a heated square cylinder, *Heat Mass Transfer*, 43 (2007) 515-525.
- [8] L. Cambier and M. Gizaix, elsA : An Efficient Object-Oriented Solution to CFD Complexity, *Proc. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (Reno, Nevada, 14-17 janv. 2002).
- [9] F. Menter, Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*, 32-8 (1994) 1598-1605.
- [10] F. Benyoucef and H. Bézard and B. Aupoix and B. Michel, SAS-SST Model Assessment and Improvement, *Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'12)* (Budapest, Hungary, 4-7 sept. 2012).
- [11] S. Deck, Zonal Detached-Eddy Simulation of the flow around a high-lift configuration with deployed slat and flap, *AIAA Journal*, 43 (2005) 2372-2384.
- [12] A. Sohankar and L. Davidson and C. Norberg, Large eddy simulation on flow past a square cylinder : comparison of different subgrid-scale models, *J. of Fluids Engineering*, 122 (2000) 39-47.