

Tests et améliorations de modèles mixtes de Simulation des Grandes Échelles d'un écoulement à fort nombre de Reynolds en canal asymétriquement chauffé

Assesement and improvement of mixed models of Large Eddy Simulation in an asymmetrically heated channel flow at high Reynolds number

Martin DAVID^{1*}, Adrien TOUTANT¹, Françoise BATAILLE¹

¹Laboratoire PROMES-CNRS (UPR 8521), Université de Perpignan via Domitia, Tecnosud-Rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan - France

*(auteur correspondant : martin.david@promes.cnrs.fr)

Résumé - L'étude concerne l'évaluation et l'amélioration de modèles de Simulation des Grandes Échelles (SGE) dans des conditions de fort chauffage asymétrique d'un écoulement turbulent en canal bi-périodique caractérisé par de hauts niveaux de température. Les températures de parois du canal sont fixées à 900 K et 1300 K et le nombre de Reynolds de frottement est proche de 1000. Les SGE sont comparées aux résultats d'une Simulation Numérique Directe (SND) par des tests *a posteriori*. On s'intéresse aux modèles de turbulences couplant des approches fonctionnelle et structurale.

Mots-clés : Simulation des grandes échelles ; Turbulence ; Modélisation mixte ; Chauffage asymétrique ; Récepteurs solaires.

Abstract - This study is about the assessment and the improvement of turbulence models of Large Eddy Simulation (LES) in strongly and asymmetrically heated turbulent channel flow characterized by high temperature levels. The wall temperatures of the channel are fixed to 900K and 1300K and the friction Reynolds number is close to 1000. The flow is bi-periodical. The LES are compared to the results of a Direct Numerical Simulation (SND) thanks to *a posteriori* tests. The focus is placed on turbulence models that combine functional and structural approaches.

Keywords: Large eddy simulation; Turbulence; Mixed modeling; Asymmetrical heating; Solar receiver.

Nomenclature

C_f	coefficient de frottement	τ	tenseur sous-maille (corrélation vitesse-vitesse, conservation quantité de mouvement)
f	frottement, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$	Φ	Flux de chaleur, kW m^{-2}
L_i	taille du canal dans la direction i , m	<i>Indices et exposants</i>	
N_i	nombre de points dans la direction i	$\bar{\cdot}$	filtre volumique
<i>Symboles grecs</i>		b	bulk (débitant)
δ	demi-hauteur du canal, m	c	centre
Δ_i^+	taille de maille adimensionnée (direction i)	ch	côté chaud
μ	viscosité dynamique, Pa s	fr	côté froid
ν	viscosité cinématique, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	p	paroi
π	tenseur sous-maille (corrélation masse volumique-vitesse, conservation d'énergie)	rms	écart type
		τ	frottement

1. Introduction

Les tours solaires à concentration sont bien adaptées à la production d'électricité à grande échelle. Elles constituent une technologie prometteuse pour compléter le mixte énergétique renouvelable actuel, qui repose majoritairement sur des systèmes produisant directement de l'électricité. En effet, puisque les tours solaires fonctionnent grâce au chauffage à haute température d'un fluide caloporteur, elles peuvent avantageusement être accompagnées d'un système de stockage de la chaleur. Le récepteur solaire des centrales à tour est un élément critique car il a pour but de transférer la chaleur issue du rayonnement concentré vers le fluide caloporteur. Il est caractérisé par le chauffage asymétrique d'un écoulement fortement turbulent à des hauts niveaux de température. Dans le cas de la technologie fonctionnant à gaz sous-pression, le récepteur solaire est inclus dans un cycle de Brayton dont le rendement thermodynamique augmente avec la température. Afin d'améliorer le rendement de ce cycle, il est nécessaire de maximiser les transferts de chaleur au niveau de l'absorbeur solaire.

Étant donné, la taille métrique du récepteur solaire et la complexité de l'écoulement qui le traverse, la Simulation Numérique Directe (SND) n'est pas envisageable. En modélisant les plus petites échelles de la turbulence, la Simulation des Grandes échelles (SGE) permet de réduire drastiquement les temps de calcul et rend les simulations à l'échelle mésoscopique possibles. Il est donc question de développer des stratégies de modélisation fiables et précises permettant de donner une bonne représentation de l'écoulement. À la connaissance des auteurs, les seules SGE se rapprochant des conditions opératoires des récepteurs solaires sont celles de David *et al.* [1, 2]. Dans ces articles, un grand nombre de modèles de turbulence est évalué. Les résultats obtenus sont encourageants, mais il semble qu'une étude détaillée des modèles de turbulence mixtes soit utile. En effet, le couplage des approches fonctionnelle et structurelle est bénéfique dans de nombreux cas. Les premières études sur les modèles mixtes ont été menées dans les années 1990. Zang *et al.* [3], Salvetti et Banerjee [4] et Sarghini *et al.* [5] ont obtenu des résultats encourageants. Depuis, de nouvelles approches et façons de combiner les modèles ont été testées avec de très bons résultats. Singh *et al.* [6] ont effectué des SGE en canal plan isotherme à un nombre de Reynolds de frottement de 395 avec deux modèles mixtes constitués du modèle similarité d'échelle [7] et d'un modèle fonctionnel : soit le modèle Smagorinsky dynamique soit le modèle *dynamic global-coefficient*. Leur étude montre que les deux modèles mixtes obtiennent des résultats très proches de ceux de la SND non filtrée lorsque les tailles de filtre explicite dans les directions longitudinale et transversale sont environ quatre fois plus grandes que celles de la SND. Streher *et al.* [8] ont étudié une approche mixte composée du modèle Anisotropic Minimum Dissipation (AMD) proposé par Rozema *et al.* [9] et du modèle similarité d'échelle proposé par Bardina [7]. Les simulations ont été effectuées en canal plan isotherme pour trois nombres de Reynolds de frottement différents. Les auteurs ont, entre autres, comparé des résultats issus de la combinaison linéaire des modèles avec ceux obtenus en faisant varier la constante du modèle AMD en fonction de la hauteur du canal. De très bons résultats sont obtenus avec le modèle multi-couche.

De par les tests et améliorations des approches de modélisation mixte dans des conditions anisothermes en scalaire actif, cette étude comble un manque dans la littérature. Dans la section 2, les équations de Navier-Stokes résolues et les modèles de turbulence utilisés sont présentés. Dans la section 3, la géométrie, le maillage, les conditions aux limites et la méthode numérique sont détaillés. Dans la section 4, les résultats sont présentés et analysés.

2. Modélisation de l'écoulement

2.1. Équations de Navier-Stokes sous l'hypothèse bas nombre de Mach

Les récepteurs solaires à gaz sous-pression sont caractérisés par un grand nombre de Reynolds et des niveaux de température élevés. Néanmoins, la forte pression dans l'absorbeur solaire (10 bars) permet de conserver un nombre de Mach suffisamment faible pour appliquer l'approximation des bas nombres de Mach proposée par Paolucci [10]. Cette approche consiste à considérer la compressibilité du fluide tout en négligeant les effets acoustiques. Elle repose sur le développement des variables des équations de Navier-Stokes en série du carré du nombre de Mach et aboutit à la séparation de la pression en pression thermodynamique, P_0 , homogène dans l'espace et matérialisant la pression moyenne dans le récepteur ; et en pression mécanique, P , dépendante de la vitesse du fluide et donc de la localisation dans le domaine. Le détail des équations utilisées est donné ci-dessous :

- Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

- Equation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} = - \frac{\partial \rho U_j U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \Sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

- Equation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = - \frac{1}{\gamma P_0} \left[(\gamma - 1) \frac{\partial Q_j}{\partial x_j} + \frac{dP_0}{dt} \right], \quad (3)$$

- Loi des gaz parfaits

$$T = \frac{P_0}{\rho r}, \quad (4)$$

où Σ_{ij} est le tenseur des contraintes visqueuses et Q_j est le flux de chaleur conductif. Dans l'étude, le fluide caloporteur circulant dans le récepteur est de l'air. Il est assimilé à un fluide Newtonien respectant la loi des gaz parfaits. La capacité thermique à pression constante est prise à la moyenne des températures de parois et est considérée constante : $C_p = 1155 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. La constante spécifique de l'air, $r = 287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, est déterminée grâce à la relation de Mayer. Les propriétés du fluide varient avec la température, en particulier, la viscosité dynamique suit la loi de Sutherland [11]. La conductivité est déduite de la viscosité dynamique grâce à la relation $\lambda = \mu C_p / Pr$ en considérant le nombre de Prandtl constant. Lors des SGE, les grandes échelles de turbulence sont résolues et les échelles plus petites que le filtre sont modélisées. Le filtre de Favre, noté ($\tilde{\cdot}$), tel que $\tilde{\Phi} = \overline{\rho \Phi} / \bar{\rho}$ pour toute variable Φ est appliqué sur les équations de façon à réduire le nombre de termes non-linéaires intervenant dans les équations. Les deux termes sous-mailles, prépondérants en présence de forts gradients thermiques, identifiés par Dupuy *et al.* [12], sont modélisés. Ils sont associés à la corrélation vitesse-vitesse pour l'un et à la corrélation vitesse-masse volumique pour l'autre.

2.2. Modèles de turbulence des Simulations des Grandes Échelles

Les termes sous-mailles associés à la corrélation vitesse-vitesse, $\tau_{ij} = \widetilde{U_j U_i} - \widetilde{U_j} \widetilde{U_i}$, et à la corrélation vitesse-masse volumique, $\pi_{ij} = \widetilde{U_j / \rho} - \widetilde{U_j} / \widetilde{\rho}$, sont considérés. Les modèles de turbulence des SGE sont développés à partir des propriétés connues de l'écoulement et cherchent à reproduire les effets des petites échelles de turbulence sur les grandes. Il existe deux grandes familles de modèles : les modèles fonctionnels, qui supposent un transfert d'énergie unilatéral des grandes structures vers les petites échelles par un processus analogue à la diffusion moléculaire ; et les modèles structurels, qui visent à reconstruire la structure du tenseur sous-maille sans considération sur la physique de l'écoulement. Les modèles de turbulence mixtes ont pour but de tirer parti des avantages des deux approches de modélisation existantes : la modélisation fonctionnelle est généralement efficace pour déterminer les transferts d'énergie vers les petites échelles de turbulence. L'approche structurelle, quant à elle, donne une bonne estimation de la structure du tenseur sous-maille et permet de prendre en compte la remontée de la cascade d'énergie. Dans la suite, on étudie le modèle mixte formé par la combinaison des modèles de similarité d'échelle (Sim) [7] et AMD [9]. Différentes combinaisons linéaires des deux modèles sont évaluées. Le tenseur associé à la corrélation vitesse-vitesse est alors obtenu grâce à l'équation (5) :

$$\tau_{ij} = \alpha \tau_{ij}^{AMD} + \beta \tau_{ij}^{Sim} \quad (5)$$

où α et β sont des constantes. Le terme associé à la corrélation vitesse-masse volumique est obtenu de façon similaire. Ces combinaisons ont également été testées en appliquant une loi en tangente hyperbolique sur la constante du modèle AMD comme proposé par Streher *et al.* [8]. La fonction est donnée par l'équation (6) :

$$C_i^{AMD} = C^{AMD} + \left(0,5 + 0,5 \tanh \left(\frac{y_i - s_c}{s_f} \right) \right) (C_c - C^{AMD}) \quad (6)$$

où i est le numéro de la i^{eme} cellule dans la direction perpendiculaire aux parois, y est la distance à la paroi, $s_f = 0,00016252$, $s_c = 0,00023217$ et $C_c = 0$ (valeurs issues de Streher *et al.*). La constante du modèle AMD diminue donc lorsqu'on s'éloigne de la paroi.

3. Configuration de l'étude

Les équations de Navier-Stokes sont résolues dans un canal visant à représenter une position dans le récepteur solaire. Les directions longitudinale, x , et transversale, z , de l'écoulement sont périodiques. La taille du domaine est $L_x \times L_y \times L_z = 4\pi\delta \times 2\delta \times 4/3\pi\delta$ avec $\delta = 3 \text{ mm}$ la demi-hauteur du canal. La face irradiée, respectivement isolée, du récepteur solaire est associée à une paroi dont la température est fixée à 1300 K, respectivement 900 K, comme indiqué sur la figure 1. Ces conditions aux limites thermiques se rapprochent de celles rencontrées dans les récepteurs solaires [1]. Le frottement au niveau du contact entre le solide et le fluide est imposé de façon à obtenir un nombre de Reynolds de frottement à la paroi froide d'environ 1000. La pression thermodynamique dans le canal est de 10 bars.

Le domaine de calcul est divisé en un grand nombre de cellules dont la taille est constante dans les directions d'homogénéité et suit une loi en tangente hyperbolique dans la direction perpendiculaire aux parois. Les caractéristiques des maillages de la SND et des SGE sont présentées dans la table 1. Le maillage de la SND, respectivement des SGE, est constitué de 660 millions de cellules, respectivement 2,3 millions de cellules. Le coût de calcul de la SND est d'environ 4 millions d'heures réparties sur 2304 cœurs. Les SGE nécessitent 12 000 heures sur 48 cœurs.

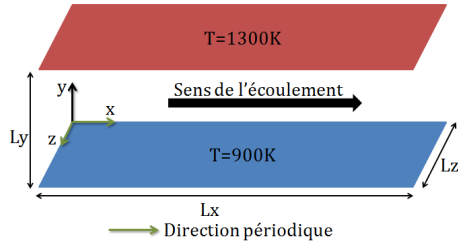


Figure 1 : Canal plan

	$N_x \times N_y \times N_z$	$\Delta_x^+ ; \Delta_y^+(0) ; \Delta_y^+(\delta) ; \Delta_z^+$
SND	$1152 \times 746 \times 768$	10,7 ; 0,4 ; 5,3 ; 5,3
SGE	$160 \times 152 \times 96$	77 ; 1,0 ; 32 ; 43

Table 1 : Caractéristiques des maillages

Les calculs sont effectués avec le code TrioCFD [13]. Les dérivées temporelles intervenant dans les équations sont approchées par un schéma Runge-Kutta d'ordre 3. Les opérateurs de convection et de diffusion sont centrés. La convection de la vitesse est estimée par un schéma d'ordre 4 et la convection de la masse est obtenue par un schéma Quick d'ordre 3. Un solveur multigrille est utilisé pour réduire le temps de résolution du calcul de la pression : la solution de l'équation de Poisson est calculée sur des maillages de plus en plus précis, en utilisant comme condition initiale le résultat du niveau de grille précédent.

4. Résultats et discussion

Dans cette section, des tests *a posteriori* des SGE sont effectués. Pour comparer rigoureusement les résultats, on ajoute à chaque fois le terme modélisé en SGE à la quantité qui lui est associée. Les quantités observées sont moyennées selon les directions d'homogénéité et intégrées temporellement de façon à obtenir la convergence des statistiques de la turbulence. On distingue les grandeurs intégrales et les profils de statistiques de premier ordre et second ordre. Les résultats de 9 SGE sont présentés dans la partie 4.1. puis les profils des statistiques de la turbulence de 6 d'entre elles sont exposés et commentés. Pour chaque simulation, on utilise la même combinaison de modèles pour la modélisation des corrélations vitesse-vitesse et vitesse-masse volumique. Les trois chiffres qui suivent le nom de chaque modèle donnent la valeur de la constante associée au modèle. Par exemple, "Sim050-AMD015" signifie que la simulation a été effectuée en prenant $C^{Sim} = 0.50$ et $C^{AMD} = 0.15$. Pour l'approche similarité d'échelle, les constantes étudiées sont les suivantes : $C^{Sim} = AC^{Sim,ref}$ où A est une constante valant successivement 1, 0.5 ou 0 et $C^{Sim,ref} = 1$. Pour le modèle AMD, les constantes étudiées sont les suivantes : $C^{AMD} = BC^{AMD,ref}$ où B est une constante valant successivement 2, 1, 0.5 ou 0 et $C^{AMD,ref} = 0.3$. La lettre X suivant le chiffre associé à la constante du modèle AMD signifie que la constante du modèle AMD varie spatialement tel qu'indiqué dans la partie 2.2.

4.1. Grandeurs intégrales

Dans cette partie, les grandeurs intégrales obtenues par les différentes SGE sont comparées à celles de la SND. La table 2 présente les résultats issus de la SND ainsi que l'écart relatif entre chaque SGE et la SND pour chaque grandeur. Les coefficients de frottement sont obtenus comme suit : $C_{f,p} = 2f_p/(\rho_p U_\tau^2)$. L'analyse des grandeurs intégrales de la SND montre que la température moyenne de fluide est inférieure à la moyenne des températures de parois du fait de la dépendance des propriétés du fluide aux variations de température. La vitesse perpendiculaire aux parois n'est pas nulle puisque la masse volumique est influencée par la température. Le coefficient de frottement est plus élevé à la paroi chaude qu'à la paroi froide car l'élévation du niveau de température du fluide induit une augmentation de sa viscosité. Enfin, les flux pariétaux sont égaux et atteignent 100 kW/m^2 et les fluctuations de ses flux sont d'environ

Simulation	U_c/U_b [-]	T_b [K]	V_c [m/s]	$C_{f,fr}$ [-]	$C_{f,ch}$ [-]	ϕ [W/m ²]	ϕ_{rms} [W/m ²]
SND	1.13	1093.4	-2.8×10^{-2}	3.9×10^{-3}	5.2×10^{-3}	$9.8 \times 10^{+4}$	$4.3 \times 10^{+4}$
Ecart relatif [%]							
AMD030	-1.7	0.5	-12.5	-13.6	-12.7	-9.8	-28.9
Sim100	0.2	0.5	-31.9	-0.4	0.0	-17.6	-32.9
Sim050-AMD015	-1.3	0.5	-19.1	-8.1	-7.2	-11.5	-29.3
Sim050-AMD030	-1.6	0.5	-17.4	-15.9	-13.8	-10.1	-31.4
Sim050-AMD030X	-0.8	0.6	-23.6	4.3	5.7	-16.3	-26.9
Sim050-AMD060	-2.2	0.6	-16.9	-24.4	-21.8	-9.6	-36.1
Sim050-AMD060X	-1.1	0.7	-22.5	1.1	3.4	-15.0	-29.2
Sim100-AMD015	-1.2	0.5	-24.3	-10.0	-8.4	-11.3	-31.6
Sim100-AMD030	-1.6	0.5	-22.6	-16.6	-14.1	-10.0	-33.4

Table 2 : Grandeurs intégrales issues de la SND et écart relatif entre SGE et SND

40 kW/m². L'étude de ces grandeurs intégrales souligne la complexité de l'écoulement étudié. Les résultats montrent que toutes les SGE effectuées sont performantes pour estimer le ratio U_c/U_b et T_b . Les coefficients de frottement pariétaux sont très bien prédits par les simulations "Sim100" ainsi que les simulations effectuées avec une constante du modèle AMD variant en fonction de la distance à la paroi. Pour les autres simulations, plus la constante du modèle AMD est grande, plus les coefficients de frottement sont sous-estimés. Les résultats concernant la vitesse perpendiculaire aux parois sont associés à ceux concernant les flux pariétaux. Les SGE sous-estiment ces grandeurs. L'augmentation de la constante du modèle AMD permet de légèrement réduire ces sous-estimations (de -11,5% pour la simulation Sim050-AMD015 à -9.6% pour la simulation Sim050-AMD060). Les fluctuations de flux sont sous-estimées de façon significative par les SGE. Lorsque C^{AMD} augmente, l'écart est accentué.

4.2. Profils des statistiques de la turbulence

Les simulations produisent des champs instantanés pour chaque grandeur. Pour tracer les graphiques présentés dans cette partie, les résultats sont moyennés selon les directions d'homogénéités et intégrés temporellement jusqu'à obtention de la convergence des statistiques de la turbulence. Les résultats sont ensuite tracés en fonction de la distance normalisée à la paroi pour chaque côté.

La figure 2 présente les profils de vitesses longitudinale et perpendiculaire aux parois ainsi que de fluctuations de vitesse et de température adimensionnés classiquement. Les profils de vitesse longitudinale sont surestimés par l'ensemble des simulations, exceptées "Sim100" et "Sim050-AMD060X". La variation spatiale de la constante permet de significativement pallier la surestimation des profils de vitesse de la simulation "Sim050-AMD060" en annulant l'effet néfaste du modèle AMD dans la partie centrale du canal. En observant le graphique exposant le profil de vitesse perpendiculaire aux parois, on retrouve la sous-estimation des profils de SND par les SGE abordée dans la partie 4.1. Contrairement au côté chaud, au côté froid, le quasi-plateau observé pour y^+ compris entre 100 et 1000 est bien reproduit par les modèles, même s'il est sous-estimé. Concernant la partie déviatrice des fluctuations de vitesse longitudinale, toutes les SGE tendent à surestimer les pics observés vers $y^+ = 15$. On note une amélioration des résultats pour la simulation effectuée avec une constante du modèle AMD variant avec la distance à la paroi ("Sim050-AMD060X"). Les profils de fluctuations de température sont globalement bien reproduits par les SGE jusqu'à $y^+ = 300$ (correspondant au début de la

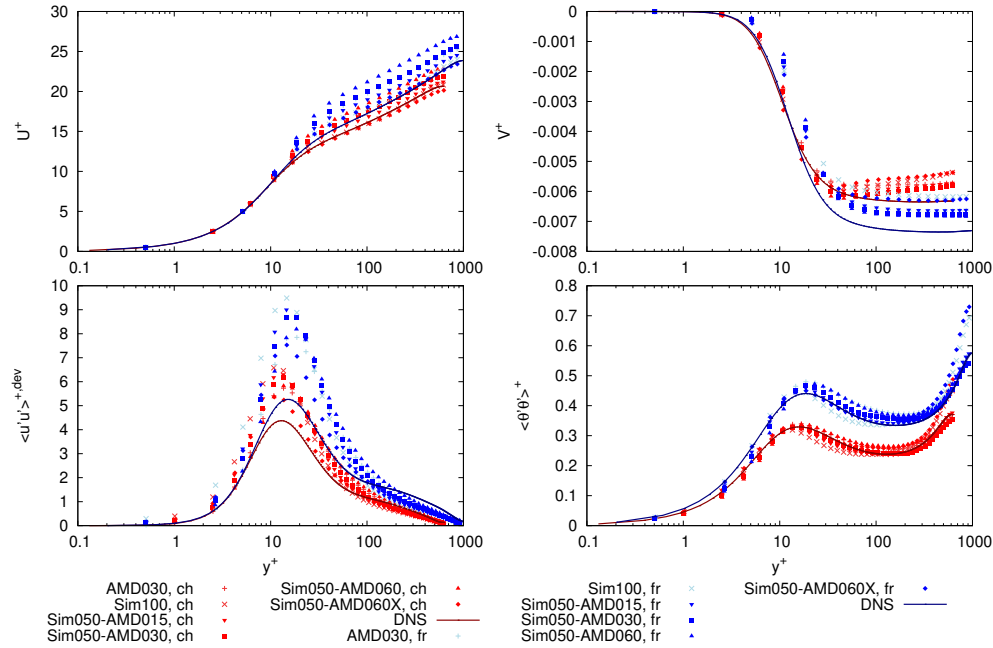


Figure 2 : Profils des statistiques de la turbulence classiquement adimensionnées

couche externe de l'écoulement) puis les simulations se divisent en deux groupes. Le premier, composé des simulations "Sim100" et "Sim050-AMD060X", s'éloigne des profils de SND alors que le second reste proche des résultats de référence. Le fait que les simulations "Sim100" et "Sim050-AMD060X" produisent des résultats similaires dans la région centrale du canal est logique puisque pour ces 2 simulations la constante du modèle AMD est nulle loin de la paroi. On retrouve ces tendances pour le profil de V^+ .

5. Conclusion

Pour cette étude, une simulation numérique directe et plusieurs simulations des grandes échelles ont été effectuées dans un canal bi-périodique asymétriquement chauffé et traversé par un écoulement fortement turbulent. Les performances des SGE ont été évaluées par des tests *a posteriori*. Ces travaux sont orientés sur l'étude des modèles de turbulence mixtes. Différentes pondérations des modèles sont analysées. On s'intéresse également à une approche visant à faire varier spatialement la constante du modèle fonctionnel.

Les résultats sur les grandeurs intégrales montrent que la température moyenne et le rapport entre les vitesses au centre du canal et moyenne sont bien prédites. La vitesse perpendiculaire aux parois, les flux et les fluctuations de flux sont sous-estimés par l'ensemble des modèles. Concernant les profils de statistiques de la turbulence, les profils de SGE reproduisent les tendances observées en SND. On note la surestimation systématique des pics de la partie déviatrice des fluctuations de vitesse. Hormis pour les profils de vitesse moyenne, il s'est avéré que les modèles testés dans cette étude souffrent de défauts similaires tels que la sous-estimation des profils de vitesse perpendiculaire aux parois ou encore la surestimation des pics de fluctuation de vitesse. Une analyse détaillée des résultats montre que l'approche de variation de la constante permet d'isoler les effets d'un modèle. Il a notamment été possible de reproduire les très bons résultats du modèle similarité d'échelle pour l'estimation des coefficients de frottement et

du profil de vitesse moyenne tout en réduisant de façon notable la surestimation des fluctuations de vitesse obtenue. Au vu des résultats obtenus, il semble que le modèle mixte multi-couche présenté en détail soit le plus performant concernant l'estimation des grandeurs dynamiques.

Combiner des modèles ayant des comportements significativement différents semble donc très prometteur. Ce sera l'objet des futurs travaux de l'équipe.

Remerciements

Ces travaux ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul du CINES au travers de l'allocation de ressources A0112A05099 attribuée par GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif). Nous remercions le CEA pour la mise à disposition de la plateforme TRUST et le développement du code de calcul TrioCFD (open source).

Références

- [1] M. David, A. Toutant, and F. Bataille, "Investigation of thermal large-eddy simulation approaches in a highly turbulent channel flow submitted to strong asymmetric heating," *Physics of Fluids*, vol. 33, no. 4, p. 045104, 2021.
- [2] M. David, A. Toutant, and F. Bataille, "Direct simulations and subgrid modeling of turbulent channel flows asymmetrically heated from both walls," *Physics of Fluids*, vol. 33, no. 8, p. 085111, 2021.
- [3] Y. Zang, R. Street, and J. Koseff, "A Dynamic Mixed Subgrid-Scale Model and Its Application to Turbulent Recirculating Flows," *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 5, p. 3186, 1993.
- [4] M. V. Salvetti and S. Banerjee, "A priori tests of a new dynamic subgrid-scale model for finite-difference large-eddy simulations," *Physics of Fluids*, vol. 7, no. 11, pp. 2831–2847, 1995.
- [5] F. Sarghini, U. Piomelli, and E. Balaras, "Scale-similar models for large-eddy simulations," *Physics of Fluids*, vol. 11, no. 6, pp. 1596–1607, 1999.
- [6] S. Singh, D. You, and S. T. Bose, "Large-eddy simulation of turbulent channel flow using explicit filtering and dynamic mixed models," *Physics of Fluids*, vol. 24, no. 8, p. 085105, 2012.
- [7] J. Bardina, J. Ferziger, and W. Reynolds, "Improved subgrid-scale models for large-eddy simulation," in *13th Fluid and Plasma Dynamics Conference*, Fluid Dynamics and Co-located Conferences, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1980.
- [8] L. B. Streher, M. H. Silvis, P. Cifani, and R. W. C. P. Verstappen, "Mixed modeling for large-eddy simulation: The single-layer and two-layer minimum-dissipation-Bardina models," *AIP Advances*, vol. 11, no. 1, p. 015002, 2021.
- [9] W. Rozema, H. J. Bae, P. Moin, and R. Verstappen, "Minimum-dissipation models for large-eddy simulation," *Physics of Fluids*, vol. 27, no. 8, p. 085107, 2015.
- [10] S. Paolucci, "Filtering of sound from the Navier-Stokes equations.," *NASA STI/Recon Technical Report N*, vol. 83, 1982.
- [11] W. Sutherland, "The viscosity of gases and molecular force," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 36, no. 223, pp. 507–531, 1893.
- [12] D. Dupuy, A. Toutant, and F. Bataille, "A priori tests of subgrid-scale models in an anisothermal turbulent channel flow at low mach number," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 145, p. 105999, 2019.
- [13] C. Calvin, O. Cueto, and P. Emonot, "An object-oriented approach to the design of fluid mechanics software," *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis - Modélisation Mathématique et Analyse Numérique*, vol. 36, no. 5, pp. 907–921, 2002.