

Etude de l'influence d'un fort gradient de température sur un écoulement turbulent à travers son effet sur la viscosité dynamique totale

Sylvain SERRA^{1,2}, Adrien TOUTANT¹, Françoise BATAILLE^{*,1}

¹ PROMES CNRS, Rambla de la thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan
Univ Perpignan Via Domitia, 66860 Perpignan

² EMDouai, EI, F-59500 Douai, France
Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

* auteur correspondant : francoise.daumas-bataille@univ-perp.fr

Résumé - Cette étude concerne la Simulation des Grandes Échelles Thermiques (SGET). Elle vise à étudier l'influence d'un gradient de température sur un écoulement turbulent dans la configuration académique d'un canal plan bi-périodique avec températures imposées aux parois. Les SGET sont réalisées pour deux intensités de turbulence ($Re_\tau = 395$ et 180) et pour trois rapports de température ($T_2/T_1 \approx 1, 04; 2$ et 5). L'influence du gradient de température sur un écoulement turbulent crée une dissymétrie des profils de vitesse et de température qui est amplifiée par l'intensité turbulente. Une différence d'évolution des profils est notée pour les écoulements faiblement turbulents soumis à de très forts gradients de température. Nous montrons qu'un phénomène de relaminarisation du côté chaud du domaine est responsable de cette différence d'évolution. En effet, une étude analytique d'un écoulement laminaire soumis à un fort gradient de température montre un décalage de la vitesse maximale du côté froid du domaine, soit l'opposé de ce qui a été remarqué pour un écoulement turbulent. Par conséquent, les évolutions d'un écoulement turbulent soumis à de très forts gradients de température sont fortement influencées par le phénomène de relaminarisation, en particulier par l'influence de la température sur la viscosité dynamique totale.

Nomenclature

Lettres latines		Symboles grecs	
C_p	Capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	\mathfrak{S}_j	Flux de chaleur sous-maille, $m.K.s^{-1}$
h	Demi hauteur du canal, $\approx 0,015m$	λ	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
P'	Pression dynamique corrigée, Pa	μ	Viscosité dynamique moléculaire, $kg.m^{-1}s^{-1}$
P_{th}	Pression thermodynamique, Pa	μ_{sm}	Viscosité dynamique sous-maille, $kg.m^{-1}s^{-1}$
T	Température, K	ρ	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
t	Temps, s	τ_{ij}	Tenseur sous-maille, $m^2.s^{-2}$
U_i	ième composante de la vitesse, $m.s^{-1}$	τ_w	contrainte de cisaillement à la paroi, Pa
U_τ	Vitesse de frottement, $m.s^{-1}$		$\tau_w = \mu_w \left. \frac{\partial \langle U \rangle}{\partial y} \right _w$
	$U_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho_w}$		
x_i	ième coordonnée, m		Indices et exposants
	Nombres sans dimension	\tilde{X}	Grandeur filtrée (au sens moyenne Favre)
		\bar{X}	Grandeur filtrée (au sens moyenne Reynolds)
Re_τ	Nombre de Reynolds pariétal	X_1	Grandeur à la paroi froide (bas)
	$Re_\tau = (U_\tau h \rho) / (\mu)$	X_2	Grandeur à la paroi chaude (haut)

1. Introduction

Cette étude entre dans le cadre du projet ANR RS-PEGASE (Récepteur solaire - Production of Electricity using GAs turbine and Solar Energy) porté par le laboratoire PROMES (UPR 8521 Perpignan-Odeillo). L'objectif de ce projet est d'optimiser le récepteur solaire d'une centrale à tour [1]. Concrètement, un écoulement turbulent d'air traverse le récepteur en captant l'énergie thermique concentrée sur le côté exposé au rayonnement solaire qui est à une température (T_2) très supérieure à la température ($T_1 = 293K$) de l'autre côté du récepteur. Afin d'optimiser le récepteur, il est indispensable de bien connaître et comprendre les phénomènes physiques créés par le fort gradient de température perpendiculaire à l'écoulement.

Pour cette étude, nous réalisons des Simulation des Grandes Echelles Thermiques, dans un canal plan bipériodique avec températures imposées aux parois [2] (voir figure 1).

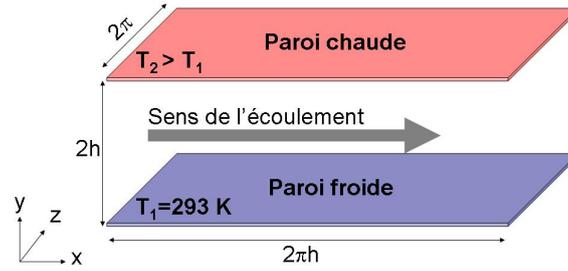


Figure 1 – Configuration du canal plan turbulent.

Dans un premiers temps, nous comparons entre elles les simulations 395-1.07, 395-2 et 395-5 qui sont obtenues pour un nombre de Reynolds turbulent de $Re_\tau = 395$ avec des rapports de température de $T_2/T_1 = 1,07$; 2 et 5, ainsi que les simulations 180-1.01, 180-2 et 180-5, obtenues pour un nombre de Reynolds turbulent de $Re_\tau = 180$ avec des rapports de température de $T_2/T_1 = 1,01$; 2 et 5. Nous nous intéressons pour ces deux séries de simulations aux profils de vitesse longitudinale et de température moyens. Dans un second temps, une étude analytique portant sur l'influence d'un fort gradient de température sur un écoulement laminaire est présentée. Enfin, nous mettons en exergue un des phénomènes physiques créés par le gradient de température.

2. Simulation des Grandes Echelles Thermique

Pour notre étude, nous utilisons les équations à faible nombre de Mach [3] qui nous permettent de prendre en compte les effets de la température sur la densité en s'affranchissant de ceux dus aux ondes acoustiques et donc des contraintes numériques qui leur sont liées. Les équations bas-Mach filtrées, en utilisant les moyennes de Favre en SGET, sont les suivantes [4] :

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{U}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{U}_i \tilde{U}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\mu} \left(\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\mu} \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{\rho} \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$C_p \left(\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{T})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{U}_j \tilde{T})}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \bar{P}_{th}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{\rho} C_p \mathcal{S}_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{P}_{th}}{\partial x_i} = 0 \quad \text{avec} \quad \bar{P}_{th} = R \bar{\rho} \tilde{T} \quad (4)$$

avec $C_p = 1005 Jkg^{-1}K^{-1}$, τ_{ij} calculé grâce au modèle WALE [5] qui est basé sur l'ajout d'un terme de viscosité sous maille, et \mathfrak{S}_j calculé grâce à des modèles introduisant une diffusivité sous-maille thermique [6] considérant un nombre de Prandtl sous-maille constant ou dynamique [7].

Les simulations ayant un rapport de température inférieur à 2 sont réalisées en considérant la viscosité et la conductivité comme constante. Pour les simulations ayant un rapport de température de 2 ou plus, la conductivité et la viscosité varient en fonction de la température à l'aide des lois de Sutherland [8] :

$$\mu = 1.461 \cdot 10^{-6} \frac{T^{1.5}}{T + 111} \quad ; \quad \lambda = \frac{\mu C_p}{Pr} = \frac{1.468 \cdot 10^{-3}}{Pr} \frac{T^{1.5}}{T + 111} \quad (5)$$

On utilise pour la simulation 395-5 un modèle sous-maille thermique dynamique alors que les autres simulations sont effectuées en considérant un nombre de Prandtl sous-maille constant, égal à 0,9 [9].

3. Influence d'un fort gradient de température sur un écoulement turbulent

3.1. Cas fortement turbulent, $Re_\tau = 395$

Dans cette partie, nous comparons les simulations turbulentes ($Re_\tau = 395$) soumises à trois gradients de température différents. Sur les figures 2(a) et 2(b) sont représentées, la vitesse longitudinale moyenne et la température moyenne, respectivement adimensionnées par la vitesse longitudinale maximale et par la relation suivante :

$$\frac{\langle T \rangle - T_1}{T_2 - T_1} \quad (6)$$

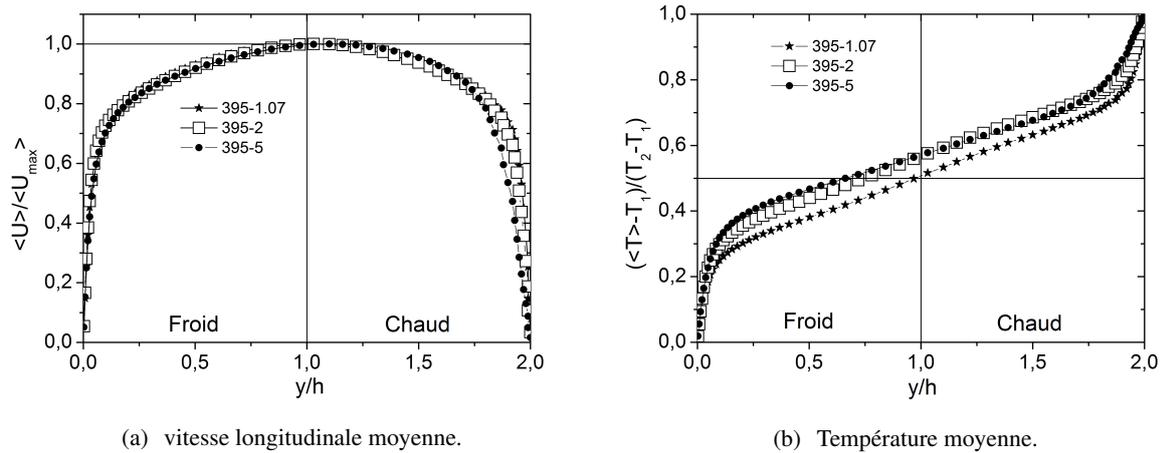


Figure 2 – Simulations à $Re_\tau = 395$: profils adimensionnés.

Pour la vitesse moyenne comme pour la température moyenne, les profils obtenus pour la simulation faiblement anisotherme (395-1.07) sont symétriques par rapport au centre du canal. On peut voir que l'augmentation du gradient de température crée une dissymétrie de tous les profils. La vitesse maximale est décalée vers le côté chaud du domaine (figure 2(a)). En ce qui concerne le profil de température moyenne (figure 2(b)), on peut remarquer que plus le rapport de température augmente, plus le profil de température est décalé vers le haut par rapport à celui de la simulation faiblement anisotherme, 395-1.07. Une plus grande partie du domaine (plus de la moitié) est à une température supérieure à la température moyenne $T_m = (T_2 + T_1)/2$ qui par conséquent est obtenue du côté froid du domaine.

3.2. Cas faiblement turbulent, $Re_\tau = 180$

Dans cette partie, nous avons réalisé la même étude que précédemment mais en diminuant l'intensité turbulente ($Re_\tau = 180$). Les profils adimensionnés de vitesse longitudinale et de température moyennes sont représentés sur les figures 3(a) et 3(b).

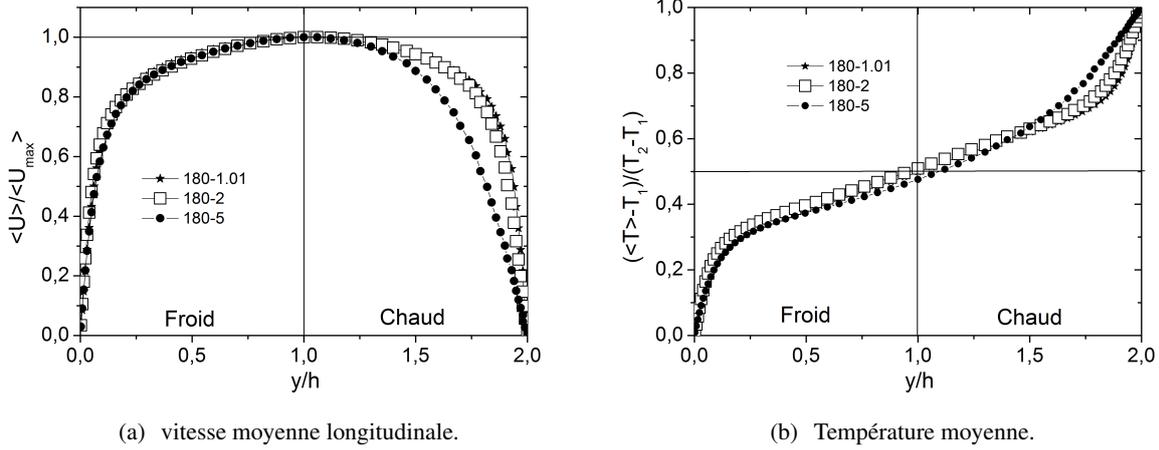


Figure 3 – Profils adimensionnés par U_{\max} ou par T_{\max} pour les simulations à $Re_{\tau} = 180$.

Pour la simulation 180-2, on peut remarquer (figure 3(a)) que, de la même façon que pour les simulations 395-2 et 395-5, la vitesse maximale est décalée vers le côté chaud du domaine. Le profil de température (3(b)) est légèrement au dessus de celui obtenu pour la simulation 180-1.01. En comparant les simulations 180-2 et 395-2, on remarque qu'en augmentant l'intensité turbulente, on augmente la dissymétrie des profils.

On peut remarquer sur les profils de la simulation 180-5 que les évolutions du profil sont totalement différentes. Les évolutions des profils sont totalement différentes. La vitesse maximale est de nouveau obtenue au centre du canal tandis que le profil de température est décalé vers le bas par rapport à celui de la simulation 180-1.01. En regardant plus attentivement le côté chaud du domaine pour la simulation 180-5 (figures 3(a) et 3(b)), on peut voir que le profil de vitesse est arrondi et que celui de température est quasiment linéaire. Ces deux tendances sont caractéristiques d'un écoulement laminaire. On retrouve donc un effet de relaminarisation du côté chaud du domaine créé par le gradient de température.

On peut alors se demander si le fait que la simulation 180-5 évolue différemment, est uniquement dû à l'effet de relaminarisation. Pour répondre à cette question, nous avons réalisé une étude sur un écoulement laminaire soumis à un gradient de température.

4. Influence d'un fort gradient de température sur un écoulement laminaire

Pour cette étude, nous avons calculé analytiquement l'effet d'un gradient de température sur un écoulement laminaire. On s'intéresse à l'écoulement laminaire, solution de l'équation de Poisson. En considérant que l'écoulement va dans la direction x , on a :

$$\frac{d}{dy} \left(\mu \frac{du}{dy} \right) = \psi \quad (7)$$

La viscosité est calculée avec la loi de Sutherland (équation (5)) et la température varie linéairement en fonction de y . On peut donc obtenir la vitesse u en fonction de la température de la façon suivante :

$$u = \psi \left(\alpha_1 (T(y))^{3/2} + \alpha_2 (T(y))^{1/2} + \alpha_3 (T(y))^{-1/2} + \alpha_4 \right) \quad (8)$$

où α_1 , α_2 et α_3 dépendent du rapport de température imposé.

Sur la figure 4, sont représentés les profils de vitesse obtenus pour un écoulement laminaire et des rapports de température de 1, 2 et 5.

En présence d'un gradient de température, on remarque que la vitesse maximale se décale du côté froid du domaine, soit l'opposé de ce que l'on a noté pour un écoulement turbulent.

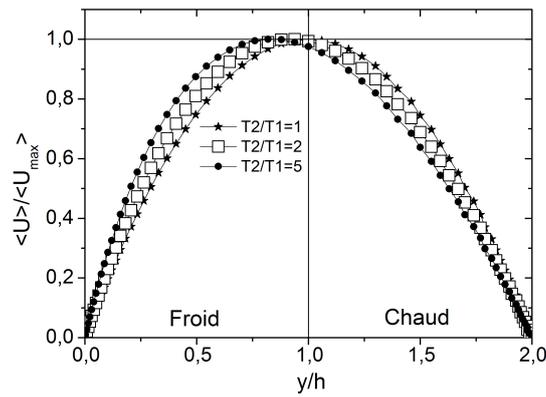


Figure 4 – Profils de vitesse pour un écoulement laminaire.

5. Mécanisme physique influençant la dissymétrie des profils

La différence d'évolution du profil de vitesse moyenne dans un cas laminaire ou turbulent, soumis à un gradient de température, peut s'expliquer en analysant l'effet de la température sur la viscosité totale. La viscosité totale est la somme de la viscosité moléculaire (μ), calculée avec la loi de Sutherland, et de la viscosité turbulente μ_{sm} , calculée par le modèle sous-maille WALE : $\mu_{total} = \mu + \mu_{sm}$

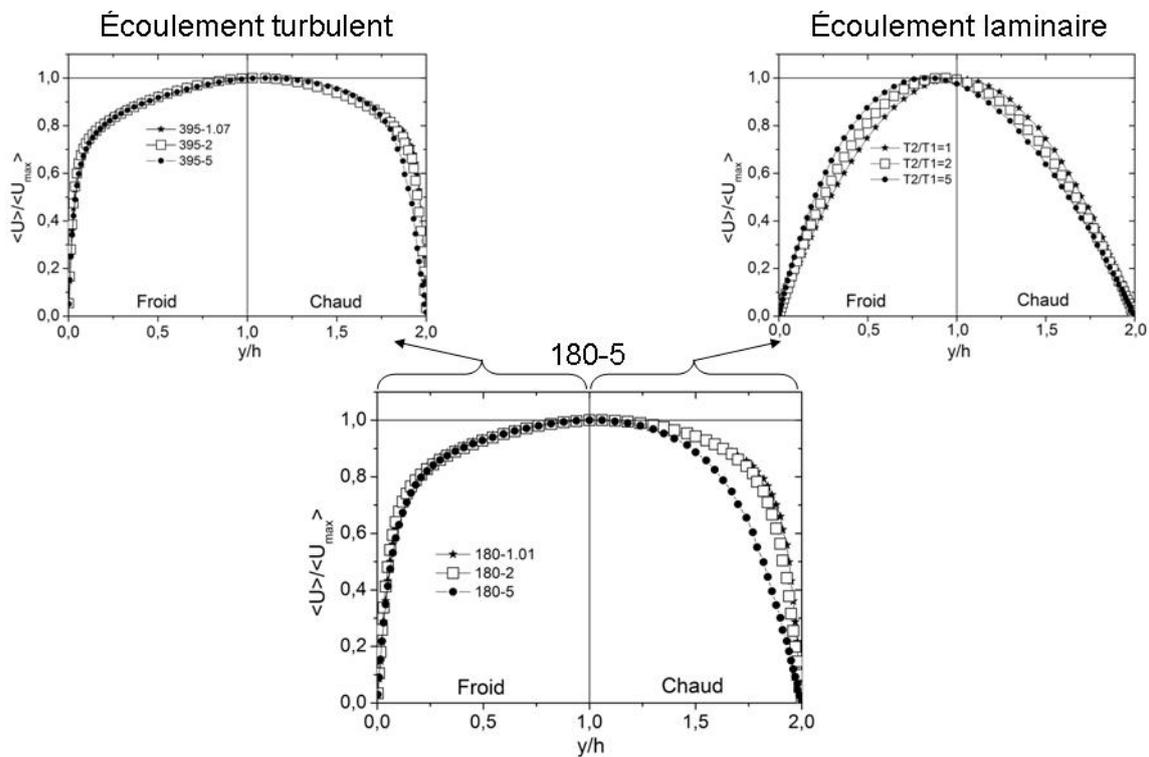


Figure 5 – Compétition des effets du gradient de température sur les différentes viscosités pour la simulation 180-5.

On sait que lorsque la température augmente, la viscosité moléculaire augmente et, à l'inverse, la viscosité turbulente diminue. En effet, la viscosité moléculaire d'un gaz augmente avec la température alors que, pour un même débit, un écoulement turbulent chauffé se relaminarise ; c'est à dire que la viscosité turbulente diminue.

Pour un écoulement laminaire, la viscosité turbulente est nulle et n'a donc pas d'effet sur l'écoulement. Dans ce cas là, seule la viscosité moléculaire influence l'écoulement. Du côté chaud du domaine, la viscosité totale (moléculaire pour un écoulement laminaire) est plus importante que du côté froid. Ceci incite à une nouvelle répartition de la vitesse dans l'écoulement, facilitant le passage du fluide du côté

froid du domaine.

Pour un écoulement turbulent, les deux viscosités ont des effets antagonistes sur l'écoulement. Il y a une compétition entre ces effets pour "commander" la viscosité totale. Pour un écoulement suffisamment turbulent, la viscosité turbulente l'emporte, ce qui fait que la viscosité totale est supérieure du côté froid. Dans ce cas là, la circulation du fluide est facilitée du côté chaud du domaine.

Pour la simulation 180-5, les deux viscosités ont des effets égaux sur la viscosité totale. Ceci explique pourquoi les tendances notées pour la simulation 180-2 (totalement turbulente) n'ont pas été amplifiées par l'augmentation du gradient de température. Pour cette simulation, on peut considérer que l'écoulement du côté chaud réagit comme un écoulement laminaire alors que du côté froid, il se comporte comme un écoulement turbulent (voir figure 5).

6. Conclusion

Dans cette étude, nous avons remarqué que pour toutes les simulations représentant des écoulements totalement turbulents, les évolutions des profils de vitesse et de température moyennes, dues au gradient de température, sont les mêmes. On observe une dissymétrisation des profils du côté chaud par rapport à ceux du côté froid, un décalage de la vitesse maximale vers le côté chaud et un décalage de la température moyenne (T_m) du côté froid du domaine. Nous avons mis en évidence que l'influence d'un gradient de température sur un écoulement laminaire crée des tendances opposées à celles relevées pour un écoulement turbulent. Enfin, nous avons noté l'apparition d'une relaminarisation du côté chaud du domaine créé par le gradient de température qui est susceptible d'influencer très fortement l'ensemble de l'écoulement en particulier pour un cas faiblement turbulent soumis à un fort gradient de température.

Ce dernier point est particulièrement important pour l'application finale qu'est le récepteur solaire. En effet le phénomène de relaminarisation se crée du côté chaud du domaine, soit du côté où l'on souhaite conserver d'importants transferts thermiques (et donc une turbulence importante). L'exemple de la simulation 180-5 est représentatif de la nécessité d'avoir une connaissance fine de l'écoulement à travers le canal. Pour un fort gradient de température, l'écoulement en proche paroi chaude est laminaire alors que l'écoulement global à travers le canal est turbulent.

Références

- [1] M. Vrina and A. Ferriere. Development of high temperature air solar receiver based on compact heat exchanger technology. In *14th Solar Paces International Symposium, Las Vega*, 2008.
- [2] S. Serra, A. Toutant, and F. Bataille. Numerical investigation of a turbulent flow submitted to a high temperature gradient. *14th Solar Paces International Symposium, Las-Vegas*, page 6, 2008.
- [3] S. Paolucci. On the filtering of sound from the navier-stockes equations. Technical Report SAND82-8257, SANDIA National Labs., Livermore, CA (USA), 1982.
- [4] G. Speziale, C.G. Erlebacher, and M. Y. Hussaini. The subgrid-scale modelling of compressible turbulence. *Physics of Fluids*, 31 :940–943, 1998.
- [5] F. Nicoud and F. Ducros. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 62 :183–200, 1999.
- [6] E. Montreuil. *Simulations numériques pour l'aérothermique avec des modèles sous-maille*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2000.
- [7] P. Moin, K. Squires, W. Cabot, and S. Lee. A dynamic subgrid-scale model for compressible turbulence and scalar transport. *Physics of Fluids*, 3(11) :2746–2757, 1991.
- [8] S. Husson, R. Knikker, and F. Bataille. Simulations des grandes echelles pour les configurations fortement anisothermes. In *SFT 2006*, volume 1, pages 283–288, Paris, Mai 2006.
- [9] S. Serra, A. Toutant, and F. Bataille. Etude de la modélisation thermique d'un écoulement turbulent soumis à un fort gradient de température avec la simulation des grandes echelles thermiques. In *SFT 2009*, volume 2, pages 521–526, Vannes, Mai 2009.