

# Simulation numérique directe d'un écoulement turbulent en canal soumis à un fort gradient de température.

Adrien TOUTANT<sup>1\*</sup>, Françoise Bataille<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire PROMES, UPR CNRS 8521, Rambla de la thermodynamique, Technosud, 66100 Perpignan, France.

\* (auteur correspondant : Adrien.Toutant@univ-perp.fr)

**Résumé** - Au sein des récepteurs solaires haute température, les écoulements sont turbulents et soumis à de forts gradients thermiques. Pour optimiser ces récepteurs, on cherche à mieux comprendre les interactions entre turbulence et gradient de température. Une simulation numérique directe (SND) d'un écoulement turbulent soumis à un fort gradient de température a été réalisée. Le maillage d'environ 470 millions de points permet de résoudre toutes les échelles essentielles de la turbulence et aucun modèle sous-maille n'est utilisé. L'indépendance en maillage est montrée. Les statistiques de la turbulence ainsi que les spectres d'énergie cinétique turbulente et de température sont réalisés.

## Nomenclature

$u$	vitesse, $m^2 \cdot s^{-1}$		<i>Indices et exposants</i>
$E$	spectre d'énergie cinétique turbulente, $m^3 \cdot s^{-1}$	1	côté froid
$h$	demi hauteur du canal, $m$	2	côté chaud
$T$	température, $K$		

## 1. Introduction

Ce travail s'insère dans un projet vaste, à savoir le projet PEGASE (Production of Electricity using GAs turbine and Solar Energy) qui a pour but de réaliser un prototype de démonstration de centrale solaire à tour, fonctionnant avec de l'air sous pression comme gaz caloporteur. Le composant clé des centrales à tour est le récepteur solaire qui se trouve en haut de la tour et sur lequel vient se focaliser le rayonnement concentré. En effet, le récepteur solaire doit permettre de transférer au fluide caloporteur le maximum de l'énergie thermique qu'il reçoit par un chauffage asymétrique. Dans ce but, les débits au sein du récepteur sont très importants et par conséquent l'écoulement est turbulent. Cette étude amont étudie les interactions entre la turbulence et le gradient de température. Afin de se concentrer sur ces interactions, l'étude est réalisée sur une géométrie de canal plan bi-périodique dont les parois sont maintenues à température constante (figure 1).

Les écoulements turbulents en canal plan sont énormément étudiés dans la littérature [1]. Les études qui concernent des écoulements turbulents anisothermes sont moins nombreuses et celles qui concernent des écoulements turbulents fortement anisothermes sont rares [2, 3, 4, 5, 6, 7]. A notre connaissance, une seule SND des équations de Navier-Stokes à faible nombre de Mach et avec un ratio de température ( $r=T_2/T_1$ ) égal à deux a déjà été réalisée [8]. Cette simulation concerne un écoulement dont le nombre de Reynolds de frottement (basé sur la demi-hauteur du canal,  $h$ , et sur la vitesse de frottement) est égal à 180. Comme le mentionne l'auteur, il y a donc des effets de bas nombre de Reynolds du côté chaud. Pour étudier le couplage turbulence/gradient de température dans des conditions représentatives des récepteurs solaires, il faut éviter les effets de bas nombre de Reynolds. Cet article présente une SND de référence à un nombre de Reynolds de frottement (basé sur la demi-hauteur du canal,  $h$ , et sur la vitesse de frottement) égal à 400 et pour un ratio de température  $r=T_2/T_1=2$ .

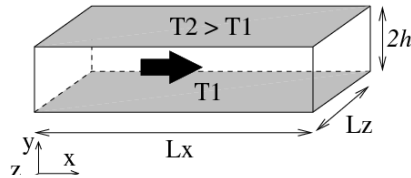


Figure 1 : Géométrie canal plan bi-périodique dont les parois sont maintenues à température constante ( $L_x = 4 \pi h$ ,  $L_z = 2 \pi h$ ).

Dans une première partie, nous décrirons l'outil numérique utilisé et en particulier les évolutions de sa parallélisation pour la réalisation du calcul. La deuxième partie montrera que l'essentiel des échelles de la turbulence sont résolues et que la taille du domaine de calcul est suffisante. Enfin, les statistiques de la turbulence et de la thermique seront analysées.

## 2. L'outil numérique et sa parallélisation

Pour la réalisation des SND, nous utilisons le logiciel Trio\_U développé par le CEA-Grenoble. Trio\_U permet des applications de thermohydraulique, en particulier, celles pour les écoulements turbulents à faible nombre de Mach qui nous intéressent. Trio\_U est un code de mécanique des fluides ouvert et modulaire pour lequel une conception orientée objet et le langage de programmation C++ ont été choisis.

Dans le cadre de ce travail, la simulation réalisée utilise une discrétisation de type volume fini avec un maillage structuré raffiné dans la direction perpendiculaire aux parois. Les grandeurs scalaires comme la pression et la température sont discrétisées au centre des mailles. Les grandeurs vectorielles comme la vitesse sont discrétisées au centre des faces. Le schéma en temps utilisé est un schéma en temps explicite Runge-Kutta d'ordre 3. Les schémas convectifs sont un schéma centré d'ordre 2 pour la vitesse et un schéma Quick d'ordre 3 pour la température.

Le maillage réalisé contient  $1536 \times 396 \times 768 = 470$  millions d'éléments (raffiné suivant y). Pour le calcul en parallèle, le domaine est découpé en  $32 \times 8 \times 16 = 4096$  sous-domaines. Chaque sous-domaine est attribué à un processeur et contient 115 000 éléments. La parallélisation utilise du "flat-mpi" (4096 processus MPI). Pour générer un maillage aussi important, il faut d'abord découper le domaine et ensuite mailler chaque sous-domaine. Cette opération de maillage parallèle n'existait pas dans Trio\_U et a été développée pendant la période des « grands challenges » du CINES. Pour optimiser le temps de calcul, nous avons également modifié la méthode de projection pendant laquelle la pression est calculée. En effet, le calcul de la pression représente une très grosse partie du temps de calcul (plus de 80%). L'utilisation d'un solveur multigrille géométrique développé lors des « grands challenges » a permis de diviser ce temps par un facteur 10. Le solveur multigrille implémenté utilise 5 niveaux de grille (4 agglomérations : 2 en y puis 2 isotropes) :

- $1536 \times 396 \times 768$  (niveau fin) = 470 000 000 mailles,
- $1536 \times 198 \times 768$  (agglomération en y),
- $1536 \times 168 \times 768$  (agglomération partielle en y afin d'obtenir des mailles cubiques),
- $768 \times 84 \times 384$  (agglomération isotrope),
- $384 \times 42 \times 192$  (agglomération isotrope) = 3 100 000 mailles (niveau grossier).

On comprend le gain en temps potentiel de résoudre en partie la pression sur un maillage plus de 100 fois plus léger (niveau grossier). Sur ces différents niveaux de grille, 7 itérations multigrille de type V-cycle permettent de diviser le résidu par un facteur  $10^{10}$ . On utilise un lisseur de type Jacobi avec 12 itérations de pré-lissage et 12 de post lissage. Le solveur GCP+SSOR qui résout la pression sur la grille grossière représente 40% du temps CPU du solveur de Poisson. Au total, la résolution du problème de Poisson consomme en moyenne 1,12 secondes, dont :

- 0.3 secondes dans les échanges MPI,
- 0.42 secondes dans le solveur GCP+SSOR sur grille grossière.

Les échanges de messages pendant la résolution en pression représente un débit MPI total de 520 Go/s, soit 1 Go/s/nœud ou 130 Mo/cœur avec une taille moyenne des messages égale à 6.9 ko.

### 3. Taille du domaine et convergence en maillage

Pour éviter l'apparition de phénomènes non physiques dus à l'utilisation de conditions aux limites périodiques, le domaine doit être suffisamment grand. En effet, de cette façon, les grandeurs ne sont plus corrélées. On représente donc les corrélations de vitesse à différentes distances des parois pour vérifier qu'elles tendent vers zéro au milieu du canal (figure 2). Les courbes de la figure 2 montrent que les corrélations tendent bien vers zéro. On trouve des résultats similaires dans la direction transverse et à d'autres distances de la paroi. Par ailleurs, ces résultats sont similaires au cas isotherme mais les corrélations diminuent moins vite : le gradient de température a donc un impact sur la taille des structures turbulentes.

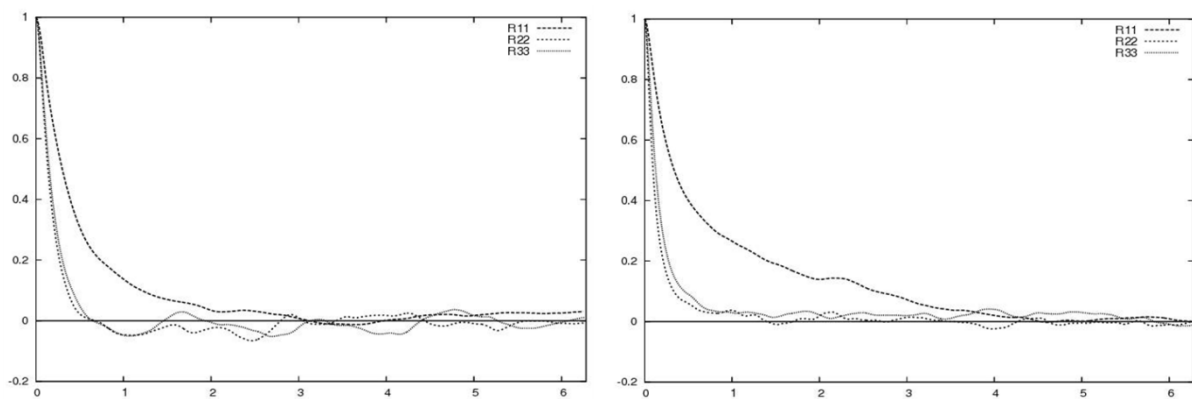


Figure 2 : Corrélations de vitesse dans le sens de l'écoulement à 15 mm de la paroi froide (à gauche) et à 1,25 mm de la paroi froide (à droite).

Pour s'assurer que le maillage utilisé est suffisamment raffiné, on réalise une étude de convergence en maillage. Nous comparons ici les résultats correspondant à trois résolutions différentes (figures 3 et 4) :

1. Maillage grossier : 513x265x257 (35 millions de points)
2. Maillage fin : 769x397x385 (115 millions de points)
3. Maillage très fin : 1537x397x769 (470 millions de points)

On constate que pour la vitesse moyenne (caractéristique macroscopique de l'écoulement) les résultats sont presque équivalents sur les trois maillages (figure 3). De même, pour les fluctuations de vitesse qui représentent la turbulence (structures fines de l'écoulement), les résultats des 3 maillages sont en très bon accord (figure 4). Comme les faibles différences entre les résultats diminuent entre la comparaison d'une part des maillages grossier/fin et d'autre part des maillages fin/très fin, on en déduit que le maillage est suffisamment fin et que la résolution du maillage très fin est nécessaire pour décrire précisément les phénomènes turbulents qui nous intéressent.

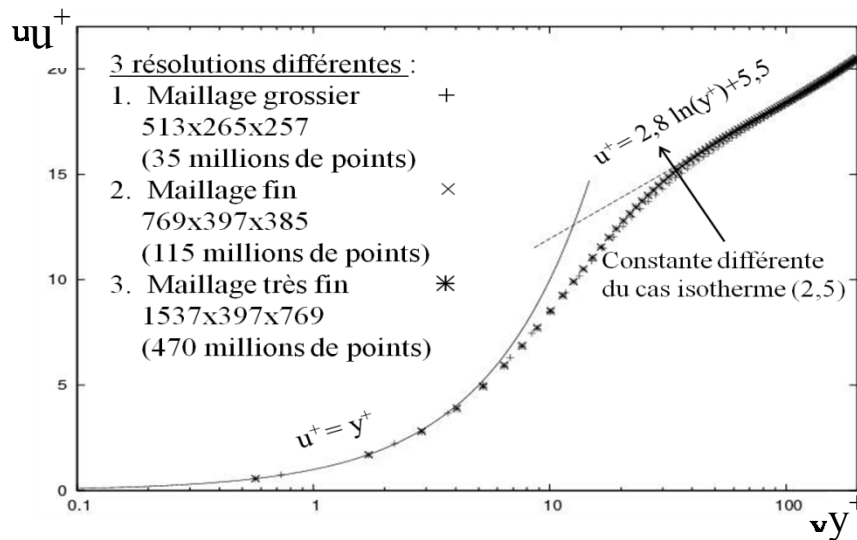


Figure 3 : Vitesse moyenne dans le sens de l'écoulement adimensionnée côté froid.

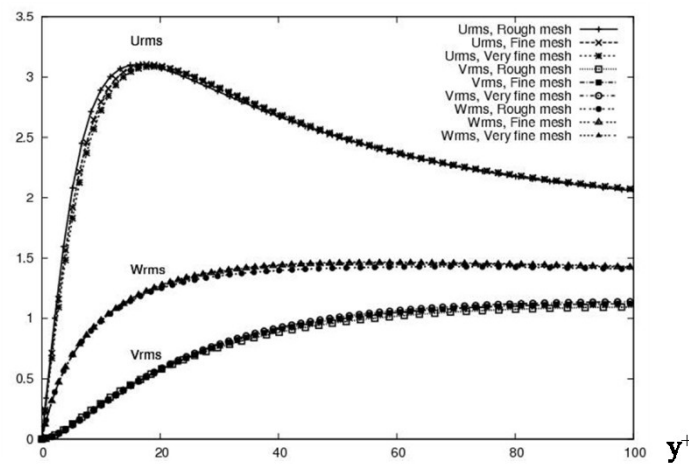


Figure 4 : Fluctuations turbulentes de la vitesse adimensionnées côté froid.

Pour vérifier que toutes les échelles essentielles de la turbulence sont capturées, on s'intéresse au spectre mono-dimensionnel d'énergie cinétique turbulente. La figure 5 montre que toutes les échelles dont l'énergie est supérieure à  $10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$  sont bien représentées et que les échelles de moindre énergie n'ont pas d'impact.

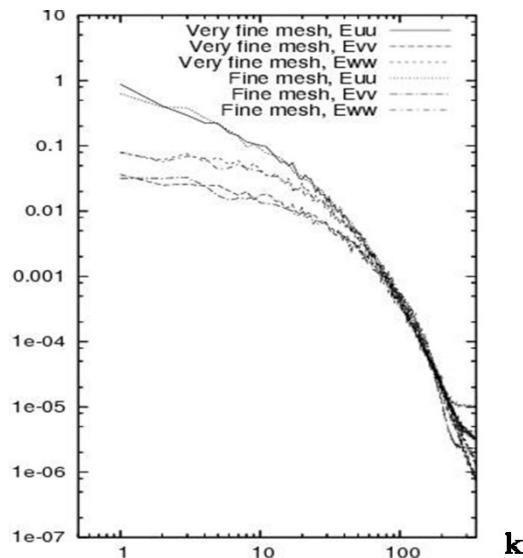


Figure 5 : Spectre d'énergie cinétique turbulente côté froid pour les maillages fin et très fin.

## 4. Statistiques de la turbulence et de la thermique

Pour caractériser l'écoulement convectif au sein des récepteurs solaires ici représentés par un canal plan anisotherme, on s'intéresse au profil des grandeurs suivant la direction perpendiculaire aux parois. On compare en particulier les profils obtenus côté chaud et côté froid afin d'évaluer l'impact du gradient de température sur les statistiques de la turbulence. Classiquement (*i.e.* en isotherme), les grandeurs sont adimensionnées par la vitesse de frottement. En utilisant cet adimensionnement classique, de grandes dissymétries entre les côtés chauds et froids apparaissent à la fois pour les grandeurs moyennes (non représenté ici) et les grandeurs fluctuantes de la vitesse (figure 6) et la température. On remarque notamment que les constantes de la loi logarithmique sont modifiées côtés chaud et froid par rapport à celles du cas isotherme. Une explication possible de ces modifications et de ces dissymétries est la variation des propriétés du fluide en fonction de la température. Afin de tenir compte de ces variations, on peut utiliser l'adimensionnement de Van Driest pour la vitesse moyenne dans le sens de l'écoulement et l'adimensionnement semi-local pour les autres grandeurs. Concernant la vitesse moyenne, l'adimensionnement de Van Driest permet de supprimer les dissymétries et de retrouver les constantes du cas isotherme pour la loi logarithmique (non représenté ici). En revanche, si on s'intéresse aux fluctuations des grandeurs qui représentent la turbulence et la structure fine de l'écoulement, on constate que l'adimensionnement semi-local ne permet pas de supprimer la dissymétrie (figure 6).

Ainsi, l'adimensionnement semi-local qui tient compte de la variation des propriétés du fluide dans la direction perpendiculaire aux parois ne suffit pas à faire se superposer les profils des côtés chaud et froid. Les différences entre les écoulements isotherme et chauffé asymétriquement ne s'expliquent donc pas par la simple variation moyenne des propriétés du fluide (masse volumique). Le couplage turbulence et température est plus complexe. C'est la première fois que cette interaction est montrée par simulation numérique directe dans un cas pleinement turbulent (sans effet bas Reynolds).

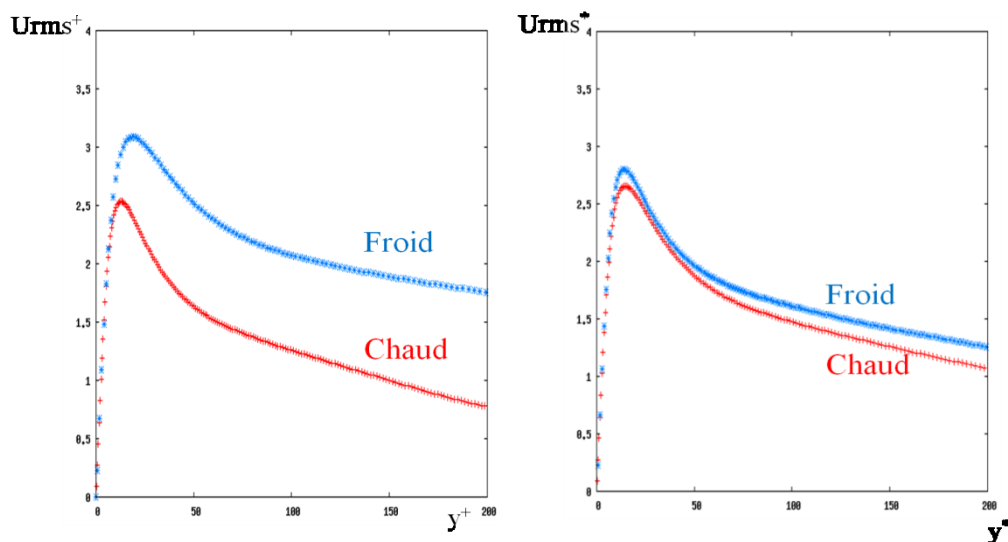


Figure 6 : Fluctuations turbulentes de vitesse dans le sens de l'écoulement : adimensionnement classique (à gauche) et adimensionnement semi-local (à droite).

## 5. Conclusion

Nous avons réalisé une simulation numérique directe de référence d'un écoulement pleinement turbulent soumis à un fort gradient de température. Les conditions d'écoulement sont représentatives des phénomènes physiques qui ont lieu au sein des récepteurs solaires. Les statistiques de la turbulence qui ont été calculées montrent que le couplage entre la dynamique et la thermique est complexe.

Afin de mieux comprendre les interactions entre turbulence et thermique, nous prévoyons d'étudier l'établissement spatial et temporel des écoulements. Ce travail nécessitera de coupler plusieurs domaines : le premier servira de domaine précurseur qui fournira au second une entrée turbulente.

### Références

- [1] R. D. Moser, J. Kim et N.N. Mansour, Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to  $Re = 590$ . *Physics of Fluids*, (1999), 11 (4), 943–945.
- [2] W.-P. Wang et R. H. Pletcher, On the large eddy simulation of a turbulent channel flow with significant heat transfer. *Physics of Fluids*, (1996), 8 (12), 3354–3366.
- [3] B. Lessani et M. V. Papalexandris, Time-accurate calculation of variable density flows with strong temperature gradients and combustion. *Journal of Computational Physics*, (2006), 212, 218–246.
- [4] B. Lessani et M. V. Papalexandris, Numerical study of turbulent channel flow with strong temperature gradients. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, (2007), 18, 545–556.
- [5] S. Serra, A. Toutant et F. Bataille, Thermal large eddy simulation in a very simplified geometry of a solar receiver. Accepted for publication in *Heat Transfer Engineering* (2010).
- [6] S. Serra, A. Toutant et F. Bataille, Effect of a high temperature gradient on a turbulent flow - study of kinetic-energy and temperature spectra, *6 International Conference on Computational Heat and Mass Transfer ICCHMT09* (Guangzhou, China, 18-21 mai 2009).
- [7] S. Serra, A. Toutant et F. Bataille, Physical mechanisms of high and transverse temperature gradient effects on solar receiver performances, *6 International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer THMT09*, Begell House Inc. (Rome, Italie, 14-18 sept. 2009), 1039-1042.
- [8] F. C. Nicoud, Numerical study of a channel flow with variable properties. Center for Turbulent Research, *Annual Research Briefs*, (1998), 289-309.

### Remerciements

Nous remercions le CINES qui nous a fourni les ressources informatiques nécessaires à la réalisation des simulations. Nous remercions également le CEA et en particulier Benoît Mathieu pour son aide et les développements qu'il a réalisés dans le code Trio\_U.