

Simulations numériques 3D d'écoulements de convection naturelle à haut nombre de Rayleigh générés par un barreau chauffé en cavité fermée

Yann Fraigneau & Patrick Le Quéré

UPR CNRS 3251
LIMSI
Campus d'Orsay Bâtiment 508
BP133 91403 Orsay Cedex
Yann.fraigneau@limsi.fr

Résumé :

Nous présentons une étude numérique 3D d'écoulements de convection naturelle instationnaires en cavité fermée parallélépipédique dans laquelle est placé un barreau chauffant cylindrique de section carrée, aligné suivant l'axe longitudinal. Le fluide considéré est de l'air. Deux configurations géométriques sont traitées, l'une où la position du barreau est centrée, l'autre décentrée. Le nombre de Rayleigh associé au flux de chaleur et à la hauteur du barreau est $Ra = 6,04 \cdot 10^8$. Afin de minimiser les coûts en temps de calcul, le domaine de simulation peut être restreint à la zone médiane de la cavité. La configuration d'étude est alors définie comme un domaine périodique de longueur caractéristique L_y . Nous montrons l'influence de L_y sur les caractéristiques dynamiques intrinsèques de l'écoulement. Par ailleurs, Nous discutons de la pertinence des résultats obtenus dans le cadre de conditions de simulation spécifiques (non prise en compte du rayonnement, adiabaticité des parois, flux de chaleur fixé), par comparaison avec des mesures expérimentales.

Abstract :

We present a 3D numerical study of unsteady natural convection flows in an enclosed parallelepipedic cavity heated by a horizontal square-cylindrical bar. The fluid is air. We consider two geometrical configurations: the centered bar and the off-centered bar. The heat flux Rayleigh number value is $Ra = 6.04 \cdot 10^8$ (defined with the bar cross section size). In order to minimize the CPU time cost, the numerical domain can be limited to the median area of the cavity. Therefore the geometrical configuration is represented by a periodical domain with the periodicity length L_y . We show the length scale's influence on the dynamic features of the flow. We discuss also the results obtained in the framework of specific simulation conditions (no radiation, wall adiabaticity, fixed heat flux), by comparison with experimental data.

Mots-clefs : Simulation numérique, convection naturelle, turbulence.

1 Introduction

Les simulations numériques de problèmes de convection naturelle en régime instationnaire ou turbulent peuvent s'avérer délicates, notamment à cause de la disparité de comportement des échelles thermique et dynamique. Ceci explique la difficulté des approches de type RANS pour modéliser de tels écoulements. Les approches prenant en compte les instationnarités de l'écoulement, comme la LES (Large Eddy Simulation), présentent un meilleur potentiel de par leur aptitude à résoudre les plus grandes échelles de l'écoulement. Toutefois, le problème de la disparité se retrouve au niveau de la modélisation des échelles non résolues – dites de sous-maillages. De plus, la résolution d'écoulement par une approche instationnaire induit un coût en temps de calcul qui peut se révéler assez lourd compte tenu du temps d'intégration numérique

nécessaire pour obtenir un écoulement statistiquement convergé. Afin de réduire ce coût, il est souvent nécessaire de limiter la résolution spatiale de l'écoulement. Quand la géométrie s'y prête, on peut restreindre l'étendue du domaine d'étude en n'en considérant qu'une partie, prolongée artificiellement par des conditions de périodicité dans la direction tronquée. Toutefois, la longueur de périodicité peut avoir une incidence sur les caractéristiques intrinsèques de l'écoulement.

Dans le cadre de ce travail, nous présentons une étude résultant de simulations numériques 2D et 3D d'écoulements de convection naturelle instationnaires générés par un barreau chauffé en cavité fermée. Deux configurations sont considérées, l'une où la position du barreau est centrée sur la cavité, l'autre où elle est décentrée. Les simulations ont été réalisées suivant une approche instationnaire de type MILES (Monotone Integrated Large Eddy Simulation). Pour les deux configurations, nous mettons en évidence l'influence de la longueur caractéristique de périodicité sur la structure dynamique moyenne de l'écoulement. Dans le cadre de la configuration centrée, certains résultats sont comparés à des mesures expérimentales, réalisées à l'ONERA-CERT (Perrin, 2006), dans des conditions de fonctionnement ayant servi de référence pour les conditions de simulation. Quelques remarques sont présentées concernant la pertinence de certains résultats obtenus en fonction des conditions de calcul et plus particulièrement des conditions aux limites.

2 Description des configurations d'étude

La géométrie de l'étude est définie par une enceinte parallélépipédique contenant un barreau de section carrée (de côté a) alignée horizontalement suivant la longueur de l'enceinte (cf. Fig. 1a). Le fluide considéré est de l'air à la pression atmosphérique. Les parois haute et basse de l'enceinte sont isothermes ($T_p = 293$ K). Le barreau libère un flux de chaleur de $165,2$ $W.m^{-2}$. Le nombre de Rayleigh défini par le flux de chaleur et la hauteur du barreau est $Ra = 6,04.10^8$. Les parois latérales de la cavité sont considérées adiabatiques. Deux configurations sont étudiées, l'une où le barreau est en position centrée (cf. Fig. 1b), la seconde où il est décentré (cf. Fig. 1c) -la position du barreau est définie par la distance d aux parois. La hauteur L_z de la cavité varie également. Les autres paramètres restent identiques (cf. tableau I).

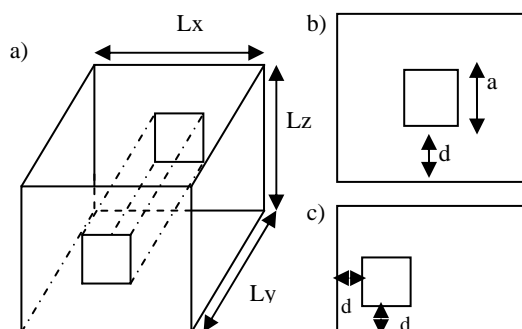


Figure 1 : schémas des géométries. a) configuration générique 3D b) plan de coupe centrée c) décentrée.

	Conf. centrée	Conf. décentrée
a	0,204 m	0,204 m
d	0,2095 m	0,05 m
L_x	0,64 m	0,64 m
L_y	0,96 m	0,96 m
L_z	0,623 m	0,423 m

Tableau 1 : Paramètres géométriques des configurations étudiées

3 Simulations numériques

3.1 Hypothèses de simulation et équations considérées

Les simulations ont été réalisées sous l'hypothèse de Boussinesq classique après avoir vérifié que les effets de dilatabilité du gaz n'avaient pas d'incidence notable sur les caractéristiques de l'écoulement, les écarts de température étant localement de l'ordre de 60K. Cette vérification a été réalisée pour ces configurations d'étude par des simulations 2D sous l'hypothèse de faible

nombre de Mach. Dans le cadre de l'hypothèse retenue, les équations de continuité (a), de quantité de mouvement (b) et d'enthalpie (c) - où les termes de dissipation visqueuse et la puissance liée à la force de gravitation ont été négligés - sont présentées ci-dessous. P désigne la pression, T la température, V la vitesse, g la constante de gravité. La masse volumique ρ et la chaleur spécifique massique C_p sont constantes et uniformes, la viscosité dynamique μ et la conductivité thermique λ dépendent de la température suivant la loi de Sutherland.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (a)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} \otimes \vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V} + \vec{g} \quad (b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (T \cdot \vec{V}) = \nabla \cdot \frac{\lambda}{\rho C_p} \cdot \nabla T \quad (c)$$

L'intégration des équations de Navier-Stokes et de température a été effectuée par une méthode volumes finis, discrétisée à l'ordre 2 en espace et en temps. Le maillage de discrétisation est structuré, cartésien, de type décalé. L'algorithme de résolution est basé sur une méthode classique de type prédiction-projection (Gadoin *et al.*, 2001).

Les maillages définis ne permettant pas de résoudre l'ensemble des échelles fluctuantes de l'écoulement, les phénomènes liés aux fluctuations de sous-maille (non-résolues) sont supposés purement dissipatifs et simplement modélisés par la diffusion numérique du schéma utilisé pour la discrétisation spatiale des termes de convection (QUICK). Cette approche constitue une modélisation de type MILES - Monotonically Integrated Large Eddy Simulation (Yan *et al.*, 2002).

3.2 Simulations numériques réalisées

Les maillages associés aux différentes configurations ont été définis de manière à décrire le développement des couches limites le long des parois. Ainsi, dans les plans XZ (transverses au barreau), le raffinement du maillage au niveau des parois du barreau permet d'obtenir une résolution certes minimaliste mais néanmoins satisfaisante pour résoudre les phénomènes de transfert en proche paroi, soit environ 3 à 5 points dans les zones de couches limites (Grötzbach, 1983). Dans la direction longitudinale, le maillage est régulier et la taille des mailles dépend de la longueur caractéristique L_y considérée.

Dans le cadre de la configuration centrée, deux simulations 3D sont présentées, la première couvrant la totalité du domaine ($L_y = 0,96\text{m}$), la seconde en configuration périodique, de longueur caractéristique $L_y = 0,408\text{m}$ (soit $2a$). Le maillage est composé de $128 \times 48 \times 128$ points pour les deux simulations, ce qui implique une taille de maille suivant la direction longitudinale L_y plus importante dans le cadre de la simulation intégrale.

En configuration décentrée, deux simulations 3D périodiques sont présentées pour lesquelles les valeurs de L_y sont $7,6 \cdot 10^{-2}\text{m}$ et $2,28 \cdot 10^{-1}\text{m}$. Le maillage est composé de $160 \times 32 \times 128$ points.

Le pas de temps d'intégration numérique est $\Delta t = 6,5 \cdot 10^{-4}\text{s}$. Après l'obtention d'un état statistiquement convergé de l'écoulement, le calcul des grandeurs statistiques a été réalisé sur un temps de 200s pour les configurations centrées et de 300s pour les configurations décentrées.

Deux simulations 2D, représentant le cas limite $L_y = 0$ pour chacune des configurations, ont été réalisées dans des conditions de résolution analogues, avec une résolution spatiale deux fois plus fine (sauf en résolution de proche paroi où les tailles de maille sont du même ordre de grandeur).

4 Présentation des résultats

Influence de la longueur caractéristique de périodicité sur la dynamique : Dans le cadre de la configuration centrée, les résultats obtenus par simulation 3D périodique présentent un très bon accord avec ceux résultant de la simulation intégrale au voisinage du plan médian de la cavité, notamment sur les grandeurs moyennes telles que le champ de vitesse (cf. Fig. 2 b-c). En revanche, on constate une modification profonde de la structure dynamique moyenne de l'écoulement issu de la simulation 2D, relatant le cas particulier où la longueur caractéristique du domaine vaut $L_y = 0$ (cf. Fig. 2a). La structure conique coiffant le barreau a laissé place à deux cellules convectives contra-rotatives. Ce résultat met en évidence la forte influence de la longueur caractéristique de périodicité L_y sur les caractéristiques dynamiques intrinsèques de l'écoulement. Cet état de fait est corroboré dans le cadre de la configuration décentrée où l'on constate une évolution des champs de vitesse moyenne en fonction de L_y (cf. Fig. 3 a-c). Lorsque L_y augmente (0 à 0,076m), le cœur à faible vitesse de la zone de recirculation principale tend à s'élargir, ce qui génère des zones de survitesse à sa périphérie, en zone de proche paroi (cf. Fig. 2b). Pour des valeurs de L_y plus élevées, le développement des effets tridimensionnels associés à de plus grandes longueurs d'onde induit une expansion de la recirculation principale qui s'étend au-dessus du barreau (cf. Fig. 2c). Elle repousse la cellule convective, initialement située au-dessus du barreau, qui tend à se réduire et à perdre en inertie. Pour $L_y > 0,228\text{m}$, la structure dynamique moyenne de l'écoulement reste similaire.

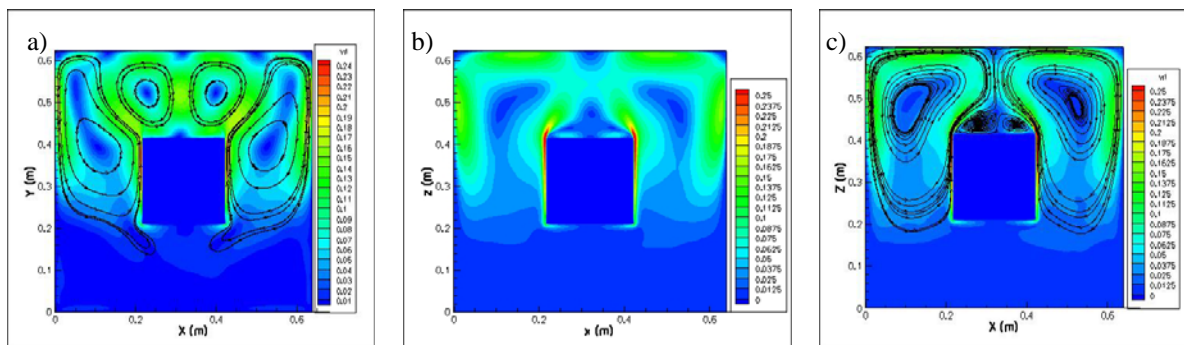


Figure 2: Champ de vitesse moyenne dans le plan médian de la cavité en configuration centrée. a) cas 2D ($L_y = 0$) ; b) cas 3D périodique ($L_y = 0,408\text{m}$) ; c) cas 3D intégral.

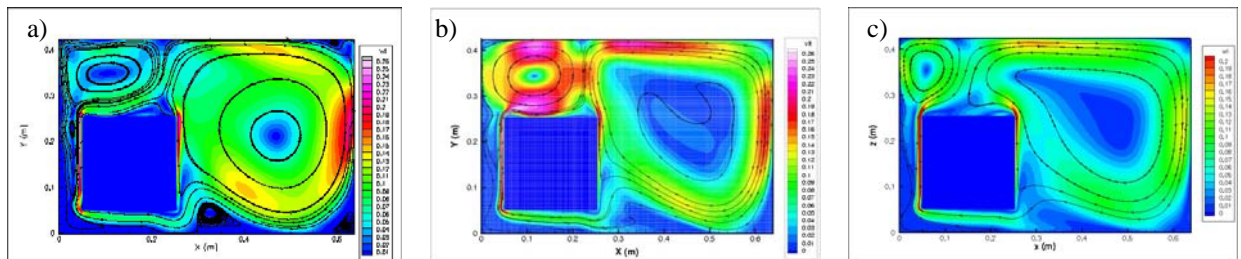


Figure 3 : Champ de vitesse moyenne dans le plan médian de la cavité en configuration décentrée. a) cas 2D ($L_y = 0$) ; b) cas 3D périodique ($L_y = 0,076\text{m}$) ; c) cas 3D périodique ($L_y = 0,228\text{m}$).

Comparaison avec les mesures expérimentales en configuration centrée : Les champs de vitesse moyenne résultant de la simulation 3D intégrale sont globalement en bon accord avec l'expérience (cf. Figs. 2c et 8), notamment au niveau des régions de couche limite le long du barreau (cf. Fig. 9). Toutefois, des écarts plus significatifs sont observés dans la partie basse des zones de recirculation latérales, où la vitesse de l'écoulement est plus prononcée. En ce qui concerne les champs de température moyenne, l'accord est également satisfaisant entre les résultats numériques et expérimentaux. Même si les simulations tendent à prédire des niveaux de température plus élevés de l'ordre de 5K à 10K, une bonne similitude des profils est observée

(cf. Figs. 4-5). En revanche, l'intensité des fluctuations de température prédite par les simulations est beaucoup plus élevée, tout particulièrement au niveau des couches limites verticales le long du barreau (cf. Fig. 7), et dans une moindre mesure, dans le panache thermique au-dessus du barreau (cf. Fig. 6). Des observations similaires sont constatées sur les profils d'écart-type de vitesse, les plus grands écarts observés par rapport à l'expérience (facteur de 2 à 4) restent cantonnés au niveau des couches limites et sont beaucoup plus réduits dans le panache (de l'ordre de 10% à 25 %). La simulation 3D périodique donne des résultats très similaires à ceux de la simulation intégrale, notamment sur les champs moyens de vitesse (cf. Figs. 2b-c) - où les écarts sont quasi inexistantes au niveau du panache et des couches limites - et de température - où les écarts maximum sont de l'ordre de 1K - (Figures non montrées ici). Les variations notables se portent sur les écarts-type de vitesse et de température au niveau des couches limites verticales du barreau, où l'on constate un accroissement des valeurs dans le cas du calcul périodique (de l'ordre de 15% à 25% sur les maxima). Cet accroissement est principalement dû au maillage plus raffiné dans la direction longitudinale qui réduit les effets de dissipation numérique. Ces résultats sont détaillés dans le document de Fraigneau *et al.*, 2006.

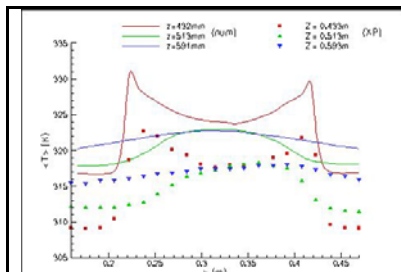


Figure 4 : Profils de $\langle T \rangle$ dans le panache - comparaison expérience simulation intégrale.

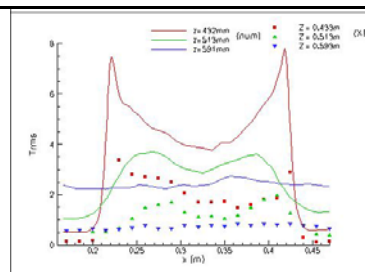


Figure 6 : Profils de $\sqrt{\langle T'^2 \rangle}$ dans le panache - comparaison expérience simulation intégrale.

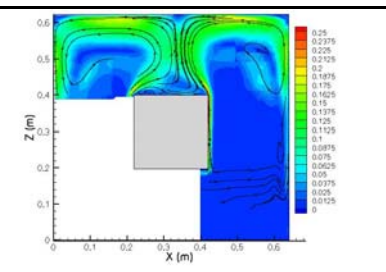


Figure 8 : champs de $\langle V \rangle$ mesurée par PIV dans le plan médian de la cavité, Perrin (2006).

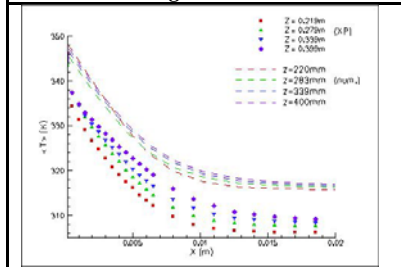


Figure 5 : Profils de $\langle T \rangle$ dans la couche limite verticale du barreau (CLVB) - comparaison expérience simulation 3D intégrale.

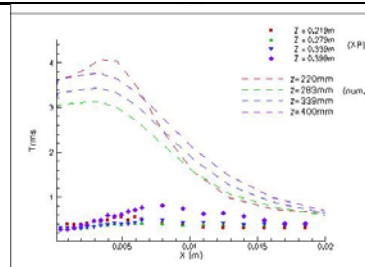


Figure 7 : Profils de $\sqrt{\langle T'^2 \rangle}$ dans la CLVB - comparaison expérience simulation 3D intégrale.

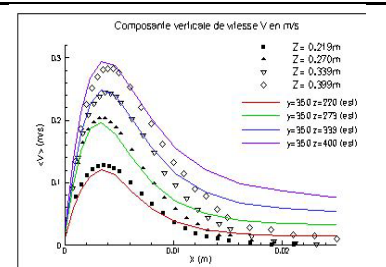


Figure 9 : Profils de $\langle V \rangle$ dans la CLVB - comparaison expérience simulation 3D intégrale.

Les différences observées avec l'expérience peuvent naturellement être en partie attribuées à la modélisation MILES qui ne quantifie pas les effets liés aux fluctuations de sous-maillages. Toutefois, elles peuvent également être imputées aux écarts inévitables entre les conditions de fonctionnement expérimentales et les conditions de simulation, en théorie identiques. En effet, les transferts radiatifs ne sont pas considérés. Même s'ils ont été minimisés dans le cadre de l'expérience, ils ne sont pas nuls et la non prise en compte de ce phénomène tend globalement à accroître la température dans les zones chaudes (barreau) et à accroître la turbulence (Sergent *et al.*, 2006a). Le fait de considérer les parois latérales de la cavité adiabatiques - cas idéal difficilement reproductible expérimentalement - est également un facteur favorisant l'augmentation de la température de l'écoulement. Enfin, l'imposition d'un flux de chaleur constant au niveau des parois du barreau ne permet pas de considérer l'influence de l'inertie thermique du matériau sur l'écoulement. En conséquence, les fluctuations de température de l'écoulement de couche limite ne sont pas amorties alors qu'elles devraient tendre vers zéro en

zone de proche paroi. L'intensité des fluctuations de température est alors beaucoup plus importante qu'elle ne devrait l'être (cf. Fig. 7), ce qui peut expliquer en partie le niveau plus élevé de turbulence dans l'écoulement, par effet de couplage via les effets de flottabilité. Une analyse plus détaillée des écarts observés impliquant la précision des résultats expérimentaux n'est pas envisageable dans l'immédiat, faute d'information sur l'incertitude des mesures.

4 Conclusions

Dans le cadre de cette étude, nous avons réalisé une première série de simulations numériques 3D concernant les phénomènes de convection naturelle générés par un barreau chauffé dans une enceinte close, à nombre de Rayleigh élevé. Nous avons montré que l'on pouvait obtenir des résultats satisfaisants, principalement sur les champs de vitesse et de température moyennes, à partir d'une approche instationnaire, basée sur une modélisation simple de type MILES. Les variations observées par rapport aux résultats expérimentaux, notamment sur les grandeurs fluctuantes et dans une moindre mesure sur les grandeurs moyennes, peuvent être en partie liées à une insuffisance de l'approche MILES, trop simpliste. Une étude plus approfondie de l'approche LES peut être envisagée en utilisant des modèles de sous-maille plus sophistiqués, prenant en compte les échelles dynamique et thermique, (Sergent *et al.*, 2006b). Mais elles sont également associées aux conditions de simulation comme la non-prise en compte du rayonnement, les conditions adiabatiques et la condition à flux de chaleur fixé, qui diffère des conditions expérimentales, même si ces dernières ont été initialement prévues pour être en adéquation.

Il est possible de réduire la taille du domaine de calcul, en se ramenant à une portion de domaine munie d'une direction périodique, et d'obtenir des résultats pratiquement similaires à ceux de la simulation intégrale dans le voisinage du plan médian. Toutefois, dans les configurations étudiées, il est nécessaire de considérer une longueur caractéristique de périodicité supérieure au côté de la section transverse du barreau afin que l'ensemble des effets tridimensionnels intrinsèques à l'écoulement puisse se développer.

Remerciements à L. Perrin, P. Reulet et P. Millan de l'ONERA-CERT/DMAE pour nous avoir communiqué les résultats expérimentaux utilisés comme référence dans le cadre de cette étude.

Références

- Fraigneau, Y. & Le Quéré, P., 2006, Résultats de simulations numériques 3D de convection naturelle et mixte dans le cadre des configurations académique centrée et industrielle, *PRC MAEVA II, RA 5/09659 DMAE*, pp 155-189.
- Gadoin, E., Le Quéré, P. & Daube, O., 2001, A general methodology for investigating flow instability in complex geometries, *Int. J. Num. Meth. In Fluids* **37**, pp 175-208.
- Grötzbach, G., 1983, Spatial resolution requirements for direct simulation of Rayleigh-Bénard convection, *J. Comp. Phys.* **49**, pp 241-264.
- Perrin L., 2006, Analyse expérimental d'écoulements de convection naturelle et mixte en milieu confiné, Thèse de Doctorat, ONERA/DMAE.
- Sergent A., Xin S., Joubert P. & Le Quéré P., 2006a, Surface radiation effects on turbulent Rayleigh-Bénard convection in a parallelepipedic cavity, Proceedings of the 5th Int. Symposium on Turbulent, Mass and Heat Transfer, Dubrovnik, Croatie, 25-29 septembre 2006, pp 531-534.
- Sergent A., Joubert P. & Le Quéré P., 2006b, Large Eddy Simulation of turbulent thermal convection using a Mixed Scale Diffusivity Model, *PCFD* **6**, pp 40-49.
- Yan H., Knight D., Zheltovodov A.A., 2002, Large-eddy simulation of supersonic flat-plate boundary layers using the monotonically integrated large-eddy simulation (MILES) technique, *J. fluids Eng.* **124** (4), pp 868-875.