



Simulation numérique 2D 3D des écoulements de convection naturelle et mixte en cavités anisothermes fermées et ventilées

Ridouane Ezzouhri, Patrice Joubert, François Penot

► To cite this version:

Ridouane Ezzouhri, Patrice Joubert, François Penot. Simulation numérique 2D 3D des écoulements de convection naturelle et mixte en cavités anisothermes fermées et ventilées. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00162827

HAL Id: hal-00162827

<https://hal.science/hal-00162827>

Submitted on 29 Aug 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SIMULATION NUMERIQUE 2D 3D DES ECOULEMENTS DE CONVECTION NATURELLE ET MIXTE EN CAVITES ANISOTHERMES FERMEES ET VENTILEES

Ridouane EZZOUHRI¹, Patrice JOUBERT¹, François PENOT²

¹LEPTAB, Université de La Rochelle, 17026 La Rochelle cedex 01

²LET-ENSMA, UMR, CNRS 6608, Avenue C. Ader, BP 40109, 86961 Futuroscope cedex
rezzouhr@univ-lr.fr, pjoubert@univ-lr.fr, francois.penot@let.ensma.fr

Résumé : Des écoulements de convection naturelle et mixte en cavités (types habitat) anisothermes, fermées ou ventilées sont étudiés dans ce travail à l'aide de la Simulation des Grandes Structures (SGS). En convection naturelle, les calculs 2D/3D en SGS sont comparés avec ceux de référence d'une simulation numérique directe (SND). En convection mixte, des résultats expérimentaux disponibles dans la littérature sont comparés avec ceux de la SGS qui permet de reproduire globalement un comportement singulier avec phénomène d'hystérésis de l'écoulement, détecté lors des campagnes expérimentales de visualisation et de mesure.

Mots clés :

Écoulements turbulents, convection naturelle et mixte, simulation des grandes échelles

1. EQUATIONS & MODELISATION

L'approche SGS repose sur la séparation, à l'aide d'une technique de filtrage spatial, des différentes structures spatiales de l'écoulement. Les grandes structures, dépendantes de chaque type d'écoulement, sont calculées directement par la résolution des équations filtrées, tandis que les petites structures de caractère plus universel, sont prises en compte par des modèles, dits de sous-maille, qui viennent fermer le système d'équations. Ce système commande le mouvement de l'air (fluide newtonien, incompressible et répondant à l'hypothèse de Boussinesq) circulant à l'intérieur de la cavité. Les grandeurs caractéristiques utilisées sont la hauteur H de la cavité, la différence de température ΔT entre la paroi chauffée et les autres parois, la vitesse de convection naturelle $Ra^{1/2} \kappa H$ et la vitesse débitante de soufflage U_{souf} en cas de la convection mixte. On définit le tenseur τ_{ij} des contraintes de sous-maille et le vecteur h_j flux thermique de sous-maille qui sont à modéliser. La plupart des modèles de sous-maille utilisent le concept d'une viscosité de sous-maille ν_{sm} pour modéliser le déviateur du tenseur τ_{ij} et d'une diffusivité de sous-maille κ_{sm} pour modéliser le vecteur h_j . Le problème se ramène alors à la modélisation de ν_{sm} et κ_{sm} . Une approche dynamique [1] a été choisie pour déterminer la constante du modèle local pour la diffusivité de sous maille, proposé par Sergent et al. [2] et aucune modélisation n'a été prise en compte pour la viscosité de sous-maille ($\nu_{sm}=0$). L'explication de ces choix est citée dans les références [1] et [2].

2. CONFIGURATIONS ET CONDITIONS AUX LIMITES

Les deux configurations retenues pour cette étude numérique en convection naturelle et mixte correspondent au cas expérimentaux présentés dans [2] et [3]. Les représentations schématiques 3D de ces cavités sont données ci-dessous.

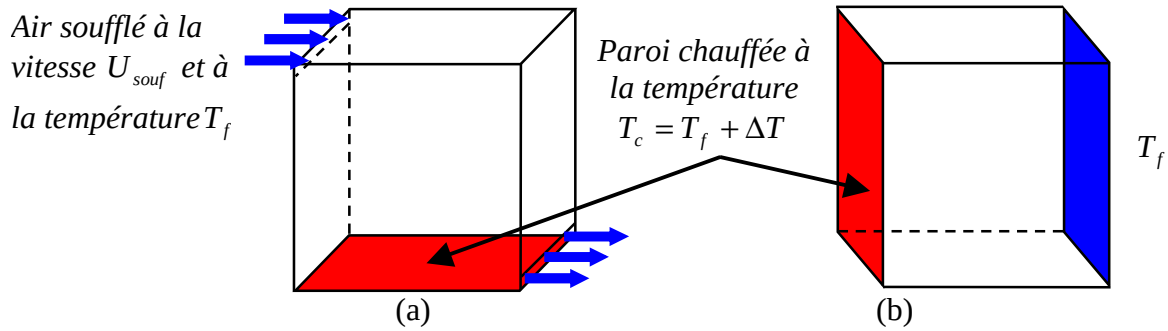


Figure 1 : cavité ventilée(a) et cavité fermée(b)

2.1. Convection naturelle

La configuration schématisée sur la figure 1 (b) est une cavité fermée de 1m de haut, 1m de long et 0,32m de profondeur. Les parois verticales sont différenciellement chauffées ($T_c=30^\circ\text{C}$ et $T_f=15^\circ\text{C}$) ce qui conduit à un nombre de Rayleigh basé sur la hauteur de la cavité, $Ra_H=1,5.10^9$. Une répartition de température mesurée expérimentalement [2] est imposée aux parois horizontales et les parois latérales sont considérées adiabatiques. Concernant les calculs SGS, le tableau1 résume les caractéristiques des maillages utilisés.

	Axe horizontal			Axe transversal		Axe vertical		
	SND (**)		SGS	SND (**)	SGS	SND (**)		SGS
	2D	3D	2D / 3D	3D	3D	2D	3D	2D / 3D
Nœuds	128	180	64	100	32	256	200	128
Répartitions	Hyper (*)		Hyper (*)		Cos	Régulière		Régulière

Tableau 1 : Caractéristiques des maillages en convection naturelle 2D et 3D

(*) Les nœuds sont resserrés près des parois suivant une loi hyperbolique ou une loi cosinus

(**) Simulation numérique directe (SND) réalisée en 2D par la méthode des volumes finis et en 3D par les méthodes spectrales Chebyshev en collocation [2]

2.2. Convection mixte

La configuration schématisée sur la figure 1 (a) est une cavité ventilée de 1,04m de haut, 1,04m de long et 0,3m de profondeur, équipée d'une fente de soufflage en partie haute et d'une reprise en partie basse, de hauteurs respectives égales à 0,018 m et 0,024 m, s'étendant sur toute la profondeur. L'air est soufflé à l'intérieur de la cavité à une température $T_f=15,1^\circ\text{C}$ et à une vitesse débitante U_{souf} comprise entre 0,2m/s et 0,6m/s, ce qui correspond à un nombre de Reynolds bâti sur la hauteur de la fente de soufflage Re_h compris entre 200 et 700. Les deux parois latérales sont considérées adiabatiques, le plancher est chauffé à une température $T_c=35,5^\circ\text{C}$, alors que le plafond et les deux parois verticales sont maintenus à une température $T_f=15,1^\circ\text{C}$ (égale à celle de l'air introduit) ce qui conduit à un nombre de Rayleigh bâti sur la hauteur de la cavité, $Ra_H=2,4.10^9$. L'écoulement observé est faiblement turbulent et présente une déflexion du jet et une inversion du sens de rotation de l'écoulement principal dans la cavité lorsque l'on fait varier Re_h . Cette bifurcation s'accompagne également d'un phénomène d'hystérésis, ce qui laisse penser qu'il s'agit d'une bifurcation subcritique. Des études numériques antérieures [4], [5] n'ont, à notre connaissance, jamais pu reproduire correctement ce phénomène.

Concernant les calculs SGS, le tableau 2 résume les conditions aux limites et les caractéristiques du maillage.

	SGS (3D)					
	Plancher	Plafond	Parois latérales	Soufflage	Reprise	Reste
Températures	T_c	T_f	$\partial T / \partial y$	T_f	$\partial T / \partial x = 0$	T_f
Vitesses	0	0	0	(*)	(**)	0
Nœuds	60		10	4	4	52
Répartitions	Hyper (***)					

Tableau 2 : conditions aux limites et caractéristiques du maillage en convection mixte 3D

(*) Au soufflage, un profil parabolique de vitesse issu des points expérimentaux est imposé

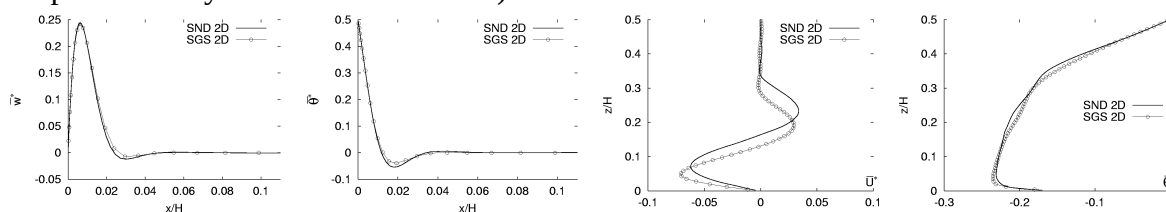
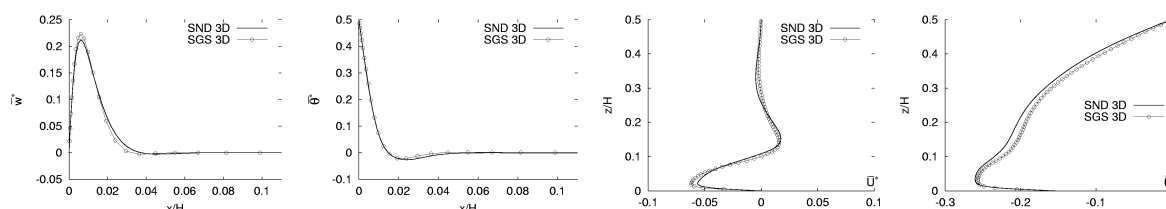
(**) À la reprise, une condition de type caractéristique est imposée pour la vitesse horizontale, afin d'assurer la conservation des débits entrée-sortie ($u(t+\Delta t)=u(t)+\text{correction}$) et un flux normal nul est imposé pour les deux autres composantes de vitesse

(***) Les nœuds sont resserrés près des parois et à proximité des interfaces de chaque ouverture (soufflage et reprise) suivant une loi hyperbolique.

3. PRESENTATION DES RESULTATS

3.1. Convection naturelle 2D 3D

Les figures 1, 2 et le tableau 3 représentent les résultats de la comparaison 2D 3D entre les calculs en SGS et ceux en SND, sous forme des profils horizontaux de la vitesse verticale moyenne adimensionnelle et de la température moyenne adimensionnelle à mi-hauteur de la cavité ($z/H=0,5$), des profils verticaux de la vitesse horizontale moyenne adimensionnelle et de la température moyenne adimensionnelle le long de la ligne médiane ($x/H=0,5$), des échanges globaux et des débits moyens à la paroi chaude. Les courbes représentées en 3D sont tracées suivant le plan central de la cavité ($y/H=0,166$). Les résultats de la SGS permettent de bien reproduire ceux de la SND et ce d'autant mieux en 3D qu'en 2D (amélioration des profils verticaux de vitesse horizontale moyenne adimensionnelle et de température moyenne adimensionnelle).

Figure 1 : Comparaisons numérique(SND)/numérique(SGS) en convection naturelle 2DFigure 2 : Comparaisons (SND)/numériques (SGS) en convection naturelle 3D

		SND (2D)	SGS (2D)	SND (3D)	SGS (3D)
Nusselt (échanges globaux)		56,56	56,65	58,00	58,07
Débits moyens	à la côte $z/H=0,5$	2,8	3	3,1	3,1
	à la côte $z/H=0,5$	3,6	3,2	3	3

Tableau 3 : Transferts thermiques et débits moyens ($\times 10^3$) à la paroi chaude

3.2. Convection mixte 3D

Pour un ensemble de paramètres donné $Ra_H=2,4.10^9$ et $Re_h=684$, la figure 3 présente la comparaison entre l'expérience et les calculs en SGS, sous forme des profils horizontaux de la vitesse verticale moyenne adimensionnelle et de la température moyenne adimensionnelle à mi hauteur de la cavité ($z/H=0,48$) et des profils verticaux de la vitesse horizontale moyenne adimensionnelle et de la température moyenne adimensionnelle le long de la ligne médiane de la cavité ($x/H=0,5$). Les courbes représentées sont tracées suivant le plan central de la cavité ($y/H=0,144$). Un bon accord général est constaté entre l'expérience et les calculs en SGS, avec cependant une petite différence au niveau du maximum de la vitesse horizontale à proximité du plafond où l'approche dynamique prédit une dynamique du jet plus importante que celle observée expérimentalement. Le cœur de la cavité reste quasiment isotherme, avec une température obtenue numériquement ($19,6^\circ\text{C}$) très proche de la valeur mesurée ($19,4^\circ\text{C}$).

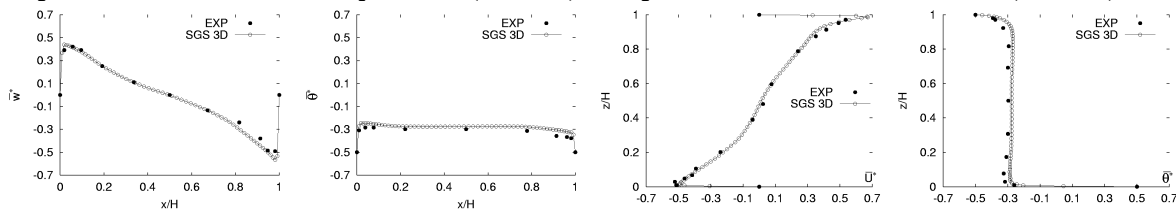


Figure 3 : Comparaison expérience/numérique en convection mixte 3D

Au cours des campagnes de visualisation, un comportement singulier de l'écoulement a été observé. Pour un même ensemble de paramètres (même différence de température ΔT , même nombre de Reynolds Re_h), le sens de rotation de l'écoulement principal dans la cavité pouvait être soit *horaire* soit *antihoraire*. À titre d'exemple, les deux circulations d'écoulement observées pour $Ra_H=2,4.10^9$ et $Re_h=396$ sont présentées sur la figure 4 (pour des raisons de clarté, les nœuds sont positionnés suivant des répartitions régulières).

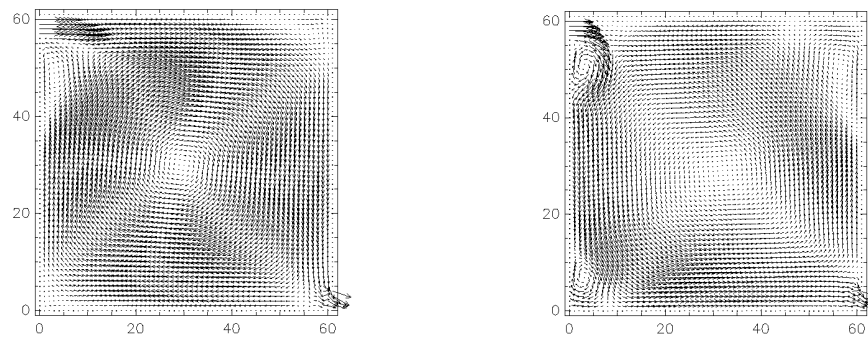


Figure 4 : Champs moyens de vitesse horizontale pour les calculs SGS avec les mêmes paramètres $Ra_H=2,4.10^9$ et $Re_h=396$: sens horaire (à gauche) et sens antihoraire (à droite)

Pour reproduire numériquement ce phénomène, la démarche suivante a été adoptée : pour un écart de température donné $\Delta T=20,4^\circ\text{C}$ ($Ra_H=2,4.10^9$), et un nombre de Reynolds Re_h tel que la circulation s'effectue dans le sens horaire (noté +), on fait décroître progressivement la vitesse de soufflage jusqu'à atteindre une circulation d'écoulement inversée (noté -). Il s'agit de la phase décroissante. La valeur critique pour laquelle le changement de sens apparaît est notée $Re_h^{(-)}$. Partant de ce nouvel état d'équilibre, la vitesse du jet est progressivement augmentée (phase croissante), en repassant par les mêmes valeurs que celles prises lors de la phase décroissante. La valeur critique pour laquelle la circulation redevient positive est notée $Re_h^{(+)}$. Les résultats sont montrés sur la figure 5. Partant d'une circulation négative, la SGS retrouve une valeur $Re_h^{(+)}$ pour l'inversion de sens de circulation, supérieur à

$Re_h^{(-)}$. L'effet d'hystérésis est bien reproduit. Les valeurs observées expérimentalement et numériquement pour $Re_h^{(-)}$ sont identiques (264), mais la valeur critique $Re_h^{(+)}$ obtenue numériquement (684) est plus élevée que celle relevée expérimentalement (468).

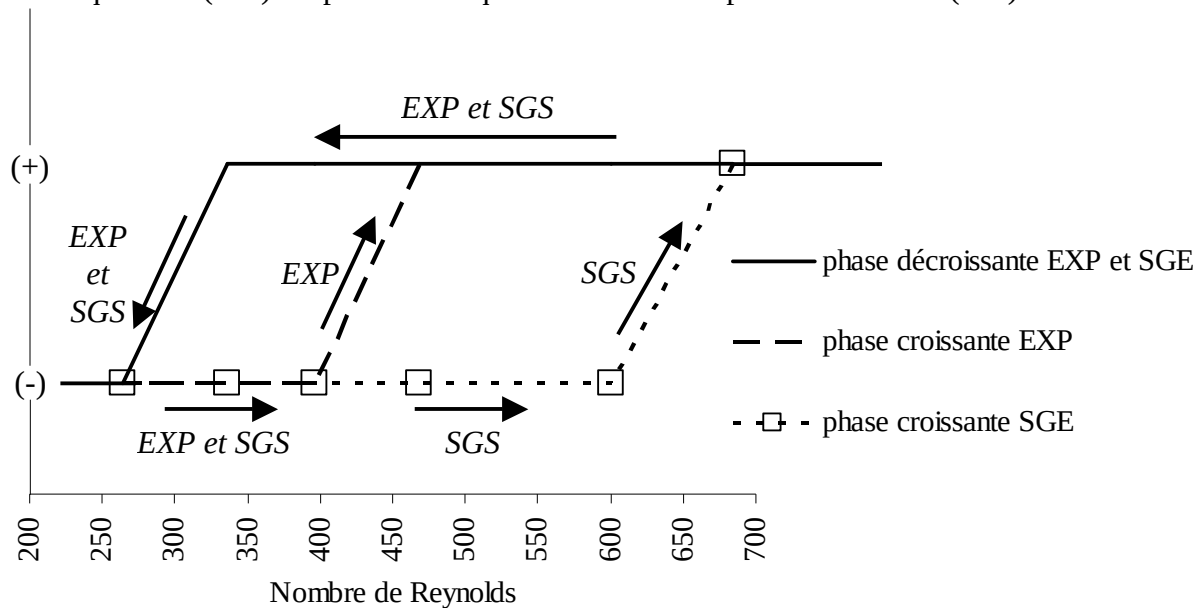


Figure 5 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques obtenus à valeurs croissantes et décroissantes du nombre de Reynolds, montrant l'effet d'hystérésis

4. CONCLUSION

Pour la convection naturelle en cavité fermée anisotherme, les résultats 2D de la SGS reproduisent correctement ceux de la SND. Les comparaisons sont encore plus proches en 3D.

Pour la convection mixte en cavité ventilée anisotherme avec soufflage et extraction d'écoulement, Les résultats de la SGS montre un très bon accord avec ceux d'une expérience réalisée au LET. Les calculs SGS permettent également de représenter le phénomène d'hystérésis détecté expérimentalement, avec cependant un léger retard pour le rétablissement d'un sens horaire de circulation de l'écoulement en augmentant le nombre de Reynolds. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour expliquer cet écart. À notre connaissance, aucune étude numérique n'a permis jusqu'à présent une telle comparaison.

Références

- [1] R. Ezzouhri, P. Joubert, Etude numérique de la convection naturelle & mixte dans des cavités de type habitat, 12^{èmes} Journées Internationales de Thermique, JITH 2005, Tanger-Maroc, 2005. (<http://iusti.polytech.univ-mrs.fr/JITH2005/index.html>)
- [2] J. Salat, S. Xin, P. Joubert, A. Sergent, F. Penot, P. Le Quéré, Experimental and numerical investigation of turbulent natural convection in a large air-filled cavity, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 25:824-832, 2004.
- [3] S. Mergui, Caractérisation expérimentale des écoulements d'air de convection naturelle et mixte dans une cavité fermée, *thèse de l'Université de Poitiers* n° 668, 1993.
- [4] D. Blay, S. Mergui, C. Niculae, Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal wall jet, *Fundamentals of Mixed Convection*, ASME/HTD, vol. 213, 1992.
- [5] W. Zhang, Q. Chen, Large eddy simulation of natural and mixed convection airflow indoors with two simple filtered dynamic subgrid scale models, *Num. Heat Trans, part A*, 37:447-463, 2000.