

Simulation numérique 3D de l'écoulement dans une cavité ventilée anisotherme en convection mixte. Comparaison avec des résultats expérimentaux

Ridouane EZZOUHRI^{1*}, Patrice JOUBERT¹, François PENOT², Sophie MERGUI³

¹Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment (LEPTAB), Université de La Rochelle, 17026 La Rochelle cedex 01

²Laboratoire d'Etudes Thermiques (LET-ENSMA), UMR, CNRS 6608, Avenue C. Ader, BP 40109, 86961 Futuroscope cedex.

³Laboratoire Fluides Automatique et Systèmes Thermiques (FAST), UMR CNRS 6708, Campus Universitaire – Bât. 502, 91405 Orsay cedex

* (auteur correspondant : rezzouhr@univ-lr.fr)

Résumé – Dans ce travail, une approche numérique de l'écoulement en convection mixte dans une cavité ventilée 3D anisotherme est entreprise. L'objectif est de simuler des systèmes de chauffage et de ventilation typiques du bâtiment. Pour cela, les résultats de cette étude sont comparés avec des résultats expérimentaux disponibles dans la littérature. 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 le nombre de Reynolds. Cette bifurcation s'accompagne également d'un phénomène d'hystérésis, ce qui laisse penser qu'il s'agit d'une bifurcation subcritique.

1. Introduction

Les écoulements générés par un jet sont depuis longtemps abondamment étudiés, en raison des multiples situations physiques dans lesquelles ils sont rencontrés. En particulier, dans le domaine de l'habitat, le processus de mélange de l'air du jet avec l'air, généralement plus chaud, régnant dans une pièce doit être optimisé. Il est nécessaire de tenir compte des exigences liées à la notion de l'occupant, à savoir la recherche d'une homogénéité maximale de l'air ambiant en température, tout en minimisant les zones dynamiquement agitées. Il faut aussi rajouter une contrainte d'ordre économique qui consiste à réduire la consommation énergétique globale. Ce triple objectif nécessite une connaissance précise du comportement de l'écoulement dans les locaux soumis à des contraintes dynamiques et thermiques spécifiques. Deux approches sont disponibles pour y parvenir : l'expérience et la simulation numérique. D'un point de vue pratique, de telles manipulations sont difficiles à mettre en place, du fait d'un investissement important en temps et en argent nécessaire pour mettre en œuvre des cellules expérimentales de taille réelle, sans oublier les difficultés pratiques pour imposer des conditions aux limites contrôlées (distribution de l'air, présence d'ouvertures, conditions thermiques régnant sur les parois...). Il est tentant alors de se tourner vers la simulation numérique, moins coûteuse, et qui permet de réaliser aisément des études paramétriques. La condition nécessaire à une telle approche numérique est cependant de pouvoir disposer d'un outil fiable de prévision des écoulements rencontrés dans de telles configurations, typiquement anisothermes et instationnaires, ce qui n'est pas assuré *a priori*.

Ce papier s'intéresse à une configuration de ventilation anisotherme qui a fait l'objet d'une étude expérimentale détaillée au LET de Poitiers [1] et pour laquelle un changement de sens brutal de circulation de l'air à l'intérieur de la cellule a été observé lorsque le nombre de Reynolds de soufflage varie. Cette bifurcation de l'écoulement s'accompagne d'un phénomène

d'hystérésis, ce qui laisse penser qu'elle est de nature subcritique. Les études numériques antérieures [2], [3] n'ont à la connaissance des auteurs jamais pu reproduire correctement ce phénomène. Pour cela, une approche numérique de type Simulation des Grandes Echelles (SGE) a été appliquée à cette configuration (cavité ventilée et chauffée) en se basant sur des travaux antérieurs en convection naturelle [4]. L'approche SGE repose sur la séparation, à l'aide d'une technique de filtrage spatial, des différentes échelles spatiales de l'écoulement. Les grandes échelles, dépendant de chaque type d'écoulement, sont calculées directement par la résolution des équations filtrées, tandis que les petites échelles de caractère plus universel sont prises en compte par des modèles, dits de sous-maille, qui viennent fermer le système d'équations. Une étude préliminaire de différents modèles de sous-maille en convection mixte 3D a permis de choisir le modèle local de diffusivité de sous-maille [5] associé à une approche dynamique [4]. La comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus avec l'approche numérique SGE, qui permet de reproduire globalement le comportement singulier de l'écoulement détecté lors des campagnes expérimentales, est détaillée ci-dessous.

2. Equations et modélisation

L'air circulant à l'intérieur de la cavité est un fluide newtonien, incompressible et répondant à l'hypothèse de Boussinesq (faibles écarts de température et de pression). Dans ce cas, le système des équations *filtrées* est le système de la SGE qui commande le mouvement de l'air. Les grandeurs caractéristiques utilisées sont la vitesse débitante de soufflage U_{souf} , la hauteur de la cavité H et la différence de température ΔT entre le plancher chauffé et les autres parois. À l'issue du système d'équations filtrées, les deux termes à modéliser sont le tenseur des contraintes de sous-maille $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$ et le vecteur flux thermique de sous-maille $h_j = \overline{\theta u_j} - \bar{\theta} \bar{u}_j$, où \bar{u}_i et $\bar{\theta}$ sont respectivement les composantes adimensionnelles de la vitesse et de la température filtrées. La plupart des modèles de sous-maille utilise le concept d'une viscosité de sous-maille ν_{sm} pour modéliser le déviateur du tenseur τ_{ij} tel que $\tau_{ij}^d = \tau_{ij} - \frac{1}{2} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_{sm} \bar{S}_{ij}$, où \bar{S}_{ij} est le tenseur du taux de déformation des échelles résolues. De manière analogue au tenseur τ_{ij} , le vecteur flux thermique de sous-maille, h_j , est estimé au moyen d'une diffusivité de sous-maille κ_{sm} tel que $h_j = -\kappa_{sm} (\partial \bar{\theta} / \partial x_j)$. Le problème se ramène alors à la modélisation des quantités de sous-maille ν_{sm} et κ_{sm} . Concernant la diffusivité de sous-maille κ_{sm} , une approche dynamique [4] a été choisie pour déterminer la constante du modèle local de diffusivité de sous maille, proposé par Sergent et al. [5]. Ce modèle possède la capacité de s'ajuster aux caractéristiques locales de l'écoulement et de s'annuler naturellement dans les zones bien résolues de l'écoulement et près des parois. Concernant la viscosité de sous-maille ν_{sm} , aucune modélisation n'a été prise en compte ($\nu_{sm}=0$). L'explication de ce choix est donnée dans le paragraphe ci-dessous.

3. Implémentation numérique

La discrétisation temporelle est réalisée suivant une méthode de projection qui assure une précision d'ordre deux. Un schéma d'Euler retardé est associé à la dérivation en temps, une formulation implicite pour les termes de diffusion et une extrapolation explicite de type Adams-Bashforth pour les termes non-linéaires. La discrétisation spatiale est réalisée suivant

une méthode de volumes finis à maillages décalés. Les termes diffusifs sont traités par un schéma d'ordre deux en espace. Les termes non-linéaires de l'équation de l'énergie sont traités par un schéma centré, et nous avons utilisé un schéma Quick pour traiter ceux des équations de conservation de la quantité de mouvement. L'utilisation du schéma Quick permet de reproduire correctement la dissipation attendue [5]. En conséquence, on peut s'affranchir d'un modèle de viscosité de sous-maille, en prenant alors $\nu_{sm}=0$.

4. Configuration et conditions aux limites

La configuration expérimentale [1], schématisée sur la figure 1, est une cavité 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 0,018m et 0,024m, s'étendant sur toute la profondeur. L'air est soufflé à l'intérieur de la cavité à la température $T_f=15,1^\circ\text{C}$ et à une vitesse débitante, U_{souf} , comprise entre 0,2 et 0,6 m/s, ce qui correspond à un nombre de Reynolds basé sur la hauteur de la fente de soufflage, Re_h , variant entre 200 et 700. Le plancher de la cavité est chauffé à une température $T_c=35,5^\circ\text{C}$; les deux parois latérales sont considérées adiabatiques, alors que le plafond et les deux parois verticales sont maintenus à la température T_f , ce qui conduit à un nombre de Rayleigh basé sur la hauteur de la cavité, $Ra_H=2,4.10^9$. Des campagnes de visualisations par tomographie laser ont permis d'identifier les circulations d'écoulement susceptibles d'être rencontrées dans cette configuration. Des mesures locales de vitesse et ses fluctuations par anémométrie laser à deux composantes ont été réalisées dans le plan vertical médian de la cavité et complétées par des investigations dans la troisième direction visant à caractériser les éventuels effets 3D. Des mesures locales de température ont été effectuées par un thermocouple de type Chomel-Alumel de $25\mu\text{m}$.

Concernant les calculs SGE, le tableau 1 résume les conditions aux limites imposées.

	Plancher	Plafond	Parois verticales	Parois latérales	Soufflage	Reprise
Températures	T_c	T_f	T_f	$\partial T/\partial y=0$	T_f	$\partial T/\partial x=0$
Vitesses	0	0	0	0	(*)	(**)

Tableau 1 : Conditions aux limites (calculs SGE)

(*) 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 simulations en SGE ont été réalisées sur une grille composée de 60, 10 et 60 nœuds suivant les directions horizontale, transversale et verticale avec l'utilisation de 4 nœuds en soufflage et 4 en reprise. Les nœuds sont resserrés près des parois solides et à proximité des interfaces de chaque ouverture (soufflage et reprise) suivant une loi hyperbolique.

5. Résultats

Pour un ensemble de paramètres donné $Ra_H=2,4.10^9$ et $Re_h=684$, les figures 2 et 3 présentent respectivement les profils verticaux de la vitesse horizontale moyenne adimensionnelle et de la température moyenne adimensionnelle le long de la ligne médiane de la cavité ($x/H=0,5$); et les profils horizontaux de la vitesse verticale moyenne

adimensionnelle et de la température moyenne adimensionnelle à mi hauteur de la cavité ($z/H=0,48$). 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 simulations en SGE, 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 de $19,6^{\circ}\text{C}$ très proche de la valeur mesurée qui est de $19,4^{\circ}\text{C}$.

Reproduction numérique du phénomène d'hystérésis

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 numériquement 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).

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 SGE 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). Des investigations complémentaires sont nécessaires pour expliquer cette différence. Ainsi, si l'historique de la simulation ou de l'expérience est inconnu, l'allure de l'écoulement pour un ensemble de paramètres donné est imprédictible. En d'autres termes, la répartition et l'évolution des transferts s'effectuent différemment selon l'état initial du système.

6. Conclusion

À l'aide de la Simulation des Grandes Echelles (SGE), les bifurcations caractérisant les circulations à l'intérieur d'une cavité ventilée anisotherme réchauffée par le plancher et soumise à un jet froid horizontal à proximité du plafond ont été reproduites numériquement.

La comparaison entre les résultats numériques et ceux obtenus lors d'une étude expérimentale réalisée au LET montre un très bon accord. Les calculs SGE 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. À notre connaissance, aucune étude numérique n'a permis jusqu'à présent une telle comparaison.

Références

- [1] 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).
- [2] D. Blay, S. Mergui, C. Niculae, Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal wall jet, *Fundamentals of Mixed Convection, ASME/HTD*, 213 (1992).
- [3] 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 (2000), 447-463.
- [4] R. Ezzouhri, P. Joubert, Etude numérique de la convection naturelle & mixte dans des cavités de type habitat, *12^{ème} Journées Internationales de Thermique, JITH2005*, Tanger-Maroc (2005) <http://iusti.polytech.univ-mrs.fr/JITH2005/index.html>
- [5] Sergent. A, Joubert. P, Le Quéré. P, Development of a local subgrid diffusivity model for large eddy simulation of buoyancy driven flows: application to a square differentially heated cavity, *Num.Heat. Trans., part A*, 44 (8), (2003), 789-810.
- [6] D. Blay, S. Mergui, J-L. Tuhault, F. Penot, Experimental turbulent mixed convection created by confined buoyant wall jets. *1st Eur. Heat. Transf. Conf.* (U.K., sept 1992), 821-828.

Remerciements

Les calculs SGE ont été réalisés sur la machine NEC SX5 de l'Idris/Orsay.

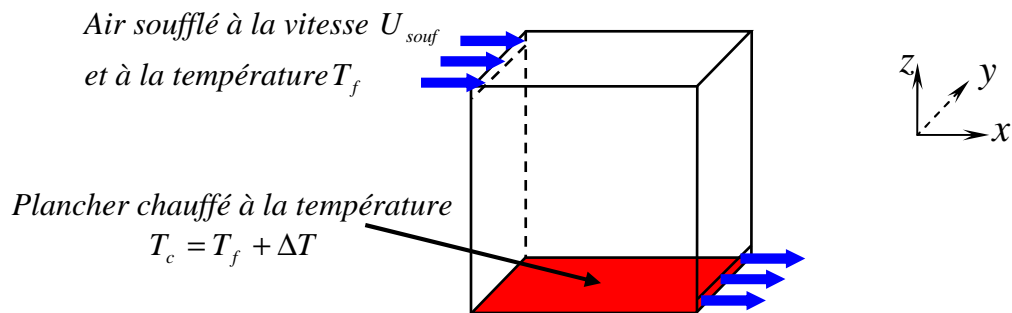


Figure 1 : Représentation schématique en 3D de la cavité ventilée anisotherme

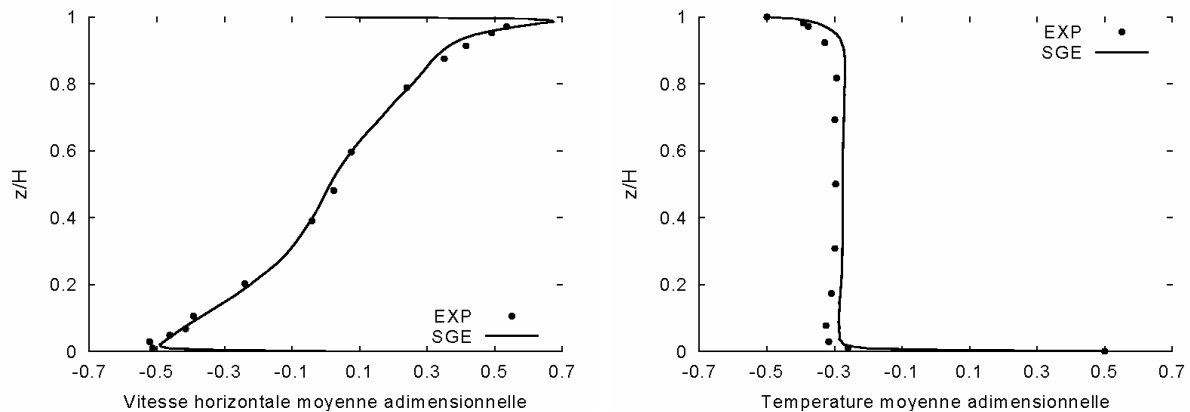


Figure 2 : Profils verticaux en $x/H=0,5$ de la vitesse horizontale moyenne adimensionnelle (à gauche) et de la température moyenne adimensionnelle (à droite)

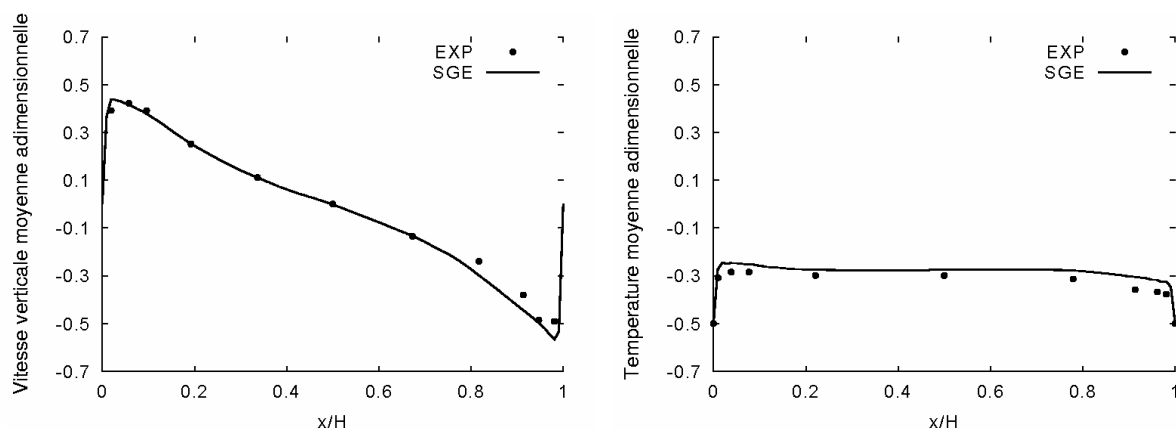


Figure 3 : Profils horizontaux en $z/H=0,48$ de la vitesse verticale moyenne adimensionnelle (à gauche) et de la température moyenne adimensionnelle (à droite)

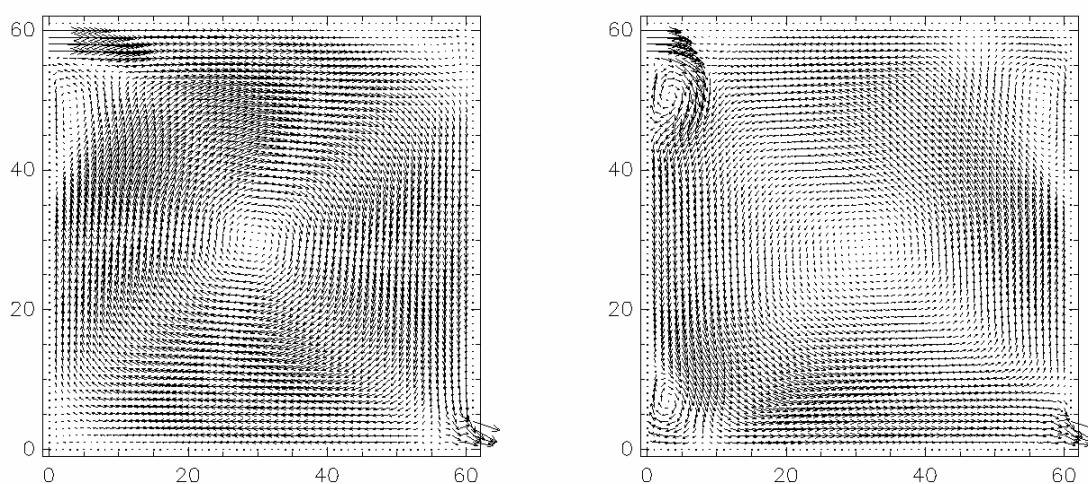


Figure 4 : Champs moyens de la vitesse horizontale pour les calculs SGE avec les mêmes paramètres $Ra_H = 2,4.10^9$ et $Re_h = 396$: sens horaire (à gauche) et sens antihoraire (à droite)

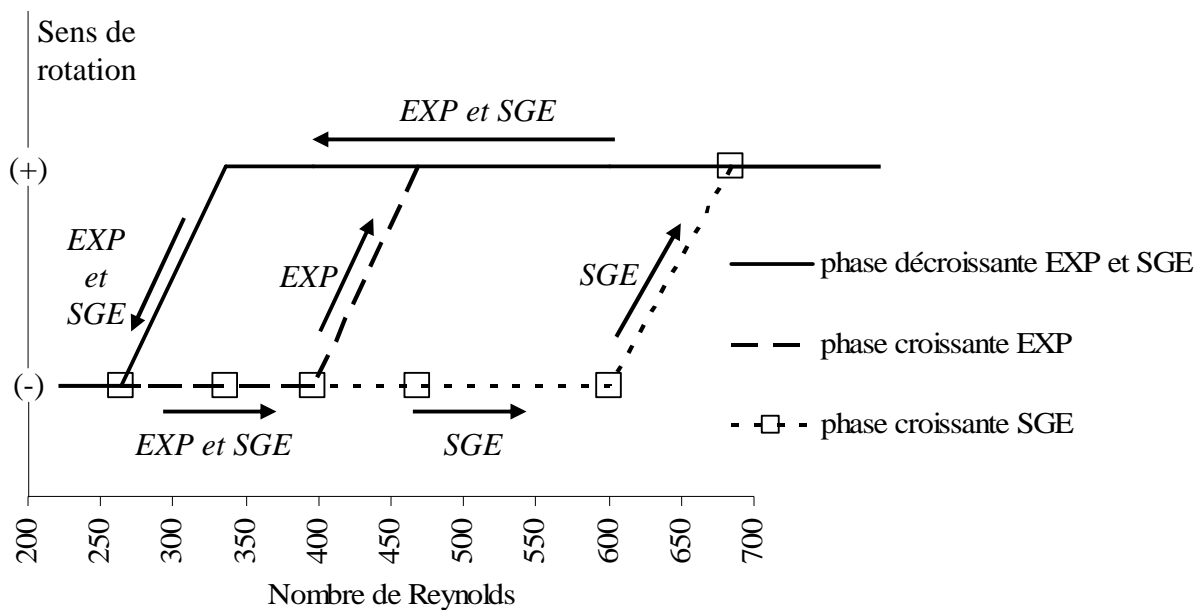


Figure 5 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques obtenus à valeurs croissantes et décroissantes du nombre de Reynolds, montrant l'effet d'hystérésis