

Caractérisation dynamique d'un écoulement instable de convection naturelle en milieu confiné par PIV

Gillian LEPLAT[†], Philippe BARRICAU, Philippe REULET & Pierre MILLAN

ONERA - The French Aerospace Lab - Département Modèles pour l'Aérodynamique et l'Énergétique
2 avenue Edouard Belin - BP 74025 - 31055 Toulouse Cedex 4 - FRANCE

[†] auteur correspondant : Gillian.Leplat@oncert.fr

Résumé - Une étude expérimentale est menée sur un cas instable d'écoulement laminaire de convection naturelle en milieu confiné généré par la présence d'un barreau chauffant au sein d'une cavité remplie d'air. La caractérisation dynamique de cet écoulement est réalisée grâce à la mesure de champs de vitesse instantanée par vélocimétrie à images de particules bidimensionnelle et résolue dans le temps. Une attention particulière à l'évolution de l'instabilité est portée dans cet article.

Mots clés : Convection naturelle, écoulement instable, PIV résolue dans le temps.

Nomenclature

X,Y,Z	Coordonnées cartésiennes (mm)	U,V,W	Vitesse selon X,Y,Z ($mm.s^{-1}$)
h_{bar}	Hauteur du barreau (mm)	H_{cav}	Hauteur de la cavité (mm)
\mathcal{A}	Rapport de forme	$T_{+,-}$	Température _{barreau,parois} (K)

1 Introduction

Comprendre l'environnement thermique dans les systèmes industriels est maintenant nécessaire pour des raisons d'optimisation dans les processus de conception ou plus récemment pour répondre à des problématiques d'économie d'énergie. Le phénomène de convection naturelle généré par un obstacle chauffant à l'intérieur de cavités est un des acteurs de la thermique aéronautique. Si des problèmes classiques comme la convection de type Rayleigh-Bénard ou encore le cas de parois verticales différentiellement chauffées sont bien connus, seulement peu de cas de convection naturelle en milieu confiné ont été étudiés jusque-là ([1] [2]) et le cas d'éléments chauffants à bords vifs centrés reste quasiment inexploré. De plus, les géométries souvent complexes des systèmes industriels rendent les mesures expérimentales difficiles d'accès et nécessitent la conception de modèles simplifiés.

Dans cet article, l'écoulement de convection naturelle dans une cavité parallélépipédique remplie d'air, présentant des parois plancher et plafond froides, des parois verticales considérées adiabatiques et un barreau chauffant en position centrale est étudié. Partant de l'idée de décrire les effets du confinement sur le comportement du fluide en régime laminaire [3], plusieurs dimensions de barreau ont été testées et différentes topologies d'écoulement ont été observées, figure 1.

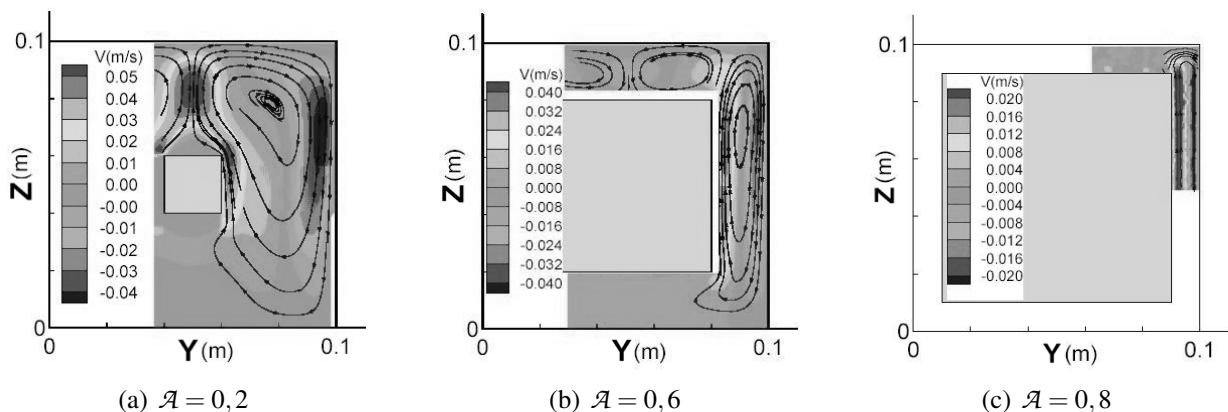


FIG. 1 – Champs de vitesse mesurés par PIV - Effet du rapport d'aspect [3]

Cette première étude a permis de mettre en lumière un cas pour lequel l'écoulement présentait un comportement particulièrement instable. Seules des visualisations qualitatives ont été réalisées sur ce cas. Le rapport d'aspect concerné est le suivant :

$$\mathcal{A} = \frac{h_{bar}}{H_{cav}} = 0,4 \quad \begin{cases} h_{bar} & : \text{ hauteur du barreau} \\ H_{cav} & : \text{ hauteur de la cavité} \end{cases} \quad (1)$$

Les présents travaux s'attachent à caractériser la dynamique de l'écoulement généré dans cette configuration par voie expérimentale à l'aide de la vélocimétrie par images de particules (PIV).

2 Dispositif expérimental et procédure

2.1 Description de la maquette

La présente étude porte sur une cavité parallélépipédique de section carrée $100mm \times 100mm$ et de profondeur $170mm$. On notera les axes X-Y-Z comme étant respectivement les directions suivant la Profondeur-Largeur-Hauteur de la cavité. Les parois verticales sont considérées adiabatiques¹ alors que les parois horizontales plancher et plafond sont régulées à la température uniforme $T_- = 20^\circ C$. L'élément chauffant est quant à lui un barreau parallélépipédique de section carrée également $40mm \times 40mm$, étendu sur toute la profondeur de la cavité et isotherme à la température $T_+ = 30^\circ C$. Le fluide utilisé pour réaliser l'étude est de l'air et le nombre de Rayleigh basé sur la hauteur du barreau, défini selon l'équation, est dans ce cas-là $5,75 \cdot 10^4$. Cette valeur est inférieure aux valeurs pour lesquelles on observe un écoulement turbulent ; par conséquent, le régime de l'écoulement est supposé laminaire.

2.2 Banc d'essais

En dépit du côté académique et de la simplicité de la géométrie de la maquette, la mise en place d'un banc d'essais motorisé, figure 2 est nécessaire pour réaliser les mesures PIV 2D résolues en temps. Le faisceau laser est séparé en deux pour produire deux nappes coplanaires venant impacter les deux côtés de la cavité et supprimer ainsi toute zone d'ombre induite par la présence du barreau. De plus, les images sont capturées à l'aide d'un système d'acquisition constitué de deux caméras numériques pour éliminer également tout effet de perspective qui pourrait masquer les zones de proche paroi du barreau. Pour l'étude des champs transverses, l'axe optique de l'objectif de la caméra A est centré sur la partie supérieure droite de la cavité tandis que la caméra B vise la partie inférieure gauche ; toutes deux étant synchronisées avec les impulsions laser.

2.3 Dispositif de mesures

Les champs de vitesse à l'intérieur de l'enceinte sont mesurés grâce à un dispositif PIV qui comprend un laser pulsé double cavité pouvant produire des énergies de $240mJ$ par impulsions à la longueur d'onde $\lambda = 532nm$. La séparation du faisceau laser en deux nappes est réalisée à l'aide d'une lame séparatrice de faisceaux (high energy beam splitter) avec 50% transmission / 50% réflexion pour la longueur d'onde considérée. La fumée de cigarette est utilisée comme ensemencement et les images sont enregistrées par deux caméras CCD ayant une définition spatiale de $1280 \times 1024 \text{ pixels}^2$. La fréquence maximale d'acquisition de l'ensemble du système est de 10 doublets d'images par seconde.

En dépit des faibles valeurs de vitesses attendues, de fortes limitations dans la durée d'acquisition pour réaliser une PIV résolue en temps sont introduites dues aux problèmes de stockage mémoire engendrés par l'utilisation de deux caméras.

Ainsi, des champs globaux de vitesse sont mesurés dans les directions longitudinales et transversales (par rapport au barreau) au moyen de la PIV bidimensionnelle à trois fréquences d'acquisition différentes : [2Hz 5Hz 10Hz] pour permettre d'augmenter la résolution temporelle du phénomène et suivre les différentes structures

¹Les propriétés d'adiabaticité ou d'uniformité en température des parois cavité ou barreau ont été contrôlées au préalable [3].

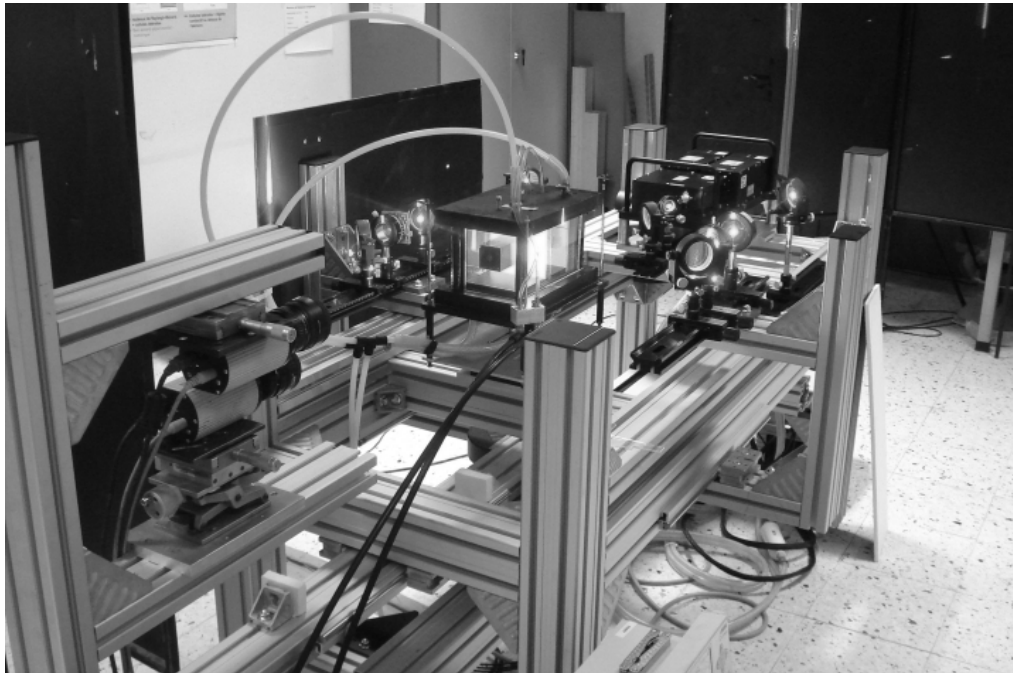


FIG. 2 – Banc d'essais avec dispositif PIV

mais au détriment de la durée d'acquisition. Le choix de la fréquence d'acquisition est fait également selon la configuration d'étude : deux caméras pour les sections transverses d'écoulement pour capturer la totalité du champ de mesures mais une seule caméra pour l'étude longitudinale du phénomène.

3 Résultats expérimentaux et discussion

Le phénomène est observé à travers différentes sections transverses de l'écoulement (plans Y-Z) à 2Hz pour une analyse éventuelle des champs moyens, cf. paragraphe 3.2, ainsi que différentes sections longitudinales de l'écoulement (plan X-Z) à 5Hz. Une étude à 10Hz est également menée à mi-profondeur de la cavité pour tenter de suivre les structures cohérentes présentes dans l'écoulement.

3.1 Évolution de l'instabilité

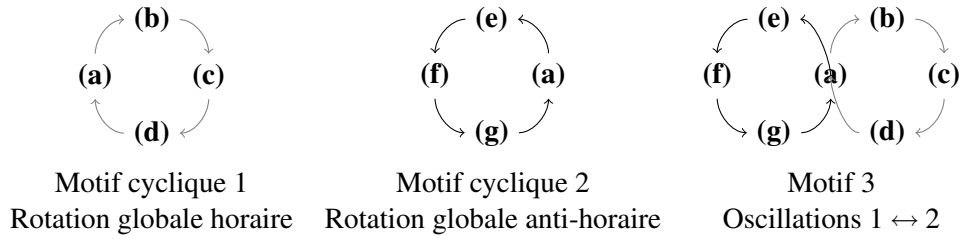
La figure 3 présente les champs de vitesse pour une section transverse à mi-profondeur de la cavité. Les lignes de courant sont tracées à des instants successifs de l'expérience et mettent en évidence deux évolutions possibles pour le fluide ; ces deux évolutions sont symétriques par rapport au plan vertical médian de la cavité et sont symbolisées par les cycles noirs et gris sur la figure 3. On notera toutefois que ces deux cycles partent d'un même état quasi stable 3(a).

La phase 3(a) est caractérisée par une topologie d'écoulement similaire à celle observée pour un confinement plus important, figure 1(b), avec deux zones de recirculation sur les côtés de l'enceinte et une paire de cellules secondaires contra-rotatives au dessus du barreau. Dans les phases suivantes, l'écoulement présente un comportement instable où les quatre cellules précédentes se déplacent en un mouvement global de rotation dans le sens horaire² et ceci pendant les phases 3(b) & 3(c). La transition entre ces deux phases s'accompagne d'une destruction de la cellule supérieure droite, l'écoulement est alors totalement incohérent dans cette zone et fortement tridimensionnel. Le cycle se termine par une remontée de la cellule inférieure droite vers sa position initiale avec la reformation des deux tourbillons contra-rotatifs secondaires 3(d). Ce retour est marqué quant à lui par un mouvement global de l'écoulement dans le sens anti-horaire, comme un pendule qui reviendrait à sa position d'équilibre après en avoir été écarté. Cette analogie au pendule peut également être appliquée à la phase quasi-stable où on note un léger battement des vortex secondaires comme autant d'oscillations du pen-

²Rotation dans le sens horaire pour le cycle gris et anti-horaire pour le cycle noir sur la figure 3.

dule autour de sa position d'équilibre. Un cycle complet peut durer de 6s à 8s et les vitesses maximales relevées sont de l'ordre de $50\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Mais le retour à l'état initial est ensuite suivi soit par un cycle identique soit par le schéma symétrique de développement de l'instabilité - transition du cycle gris vers le cycle noir, figure 3.

En résumé, l'instabilité de l'écoulement peut suivre deux motifs cycliques et un motif oscillatoire :



ATMANE *et al.* (2003) [1] ont également observé un comportement instable de l'écoulement pour des nombres de Rayleigh proches du nôtre lors de leur étude concernant le cas d'un cylindre chauffé. Ils proposent une asymétrie de la distribution de température sur la paroi plafond comme explication possible de l'apparition d'oscillations. Le déséquilibre des forces de poussée (d'Archimède) crée un mouvement du panache chaud au dessus du barreau vers un des deux côtés de l'enceinte et initie les oscillations. Cette hypothèse est concevable pour une enceinte remplie d'eau et une surface libre pour plafond mais plus discutable dans le cas d'une paroi régulée en température. Cependant, ce type de mouvement très basse fréquence peut être à l'origine du basculement dans un sens ou dans l'autre de l'écoulement lors des premières phases de l'instabilité.

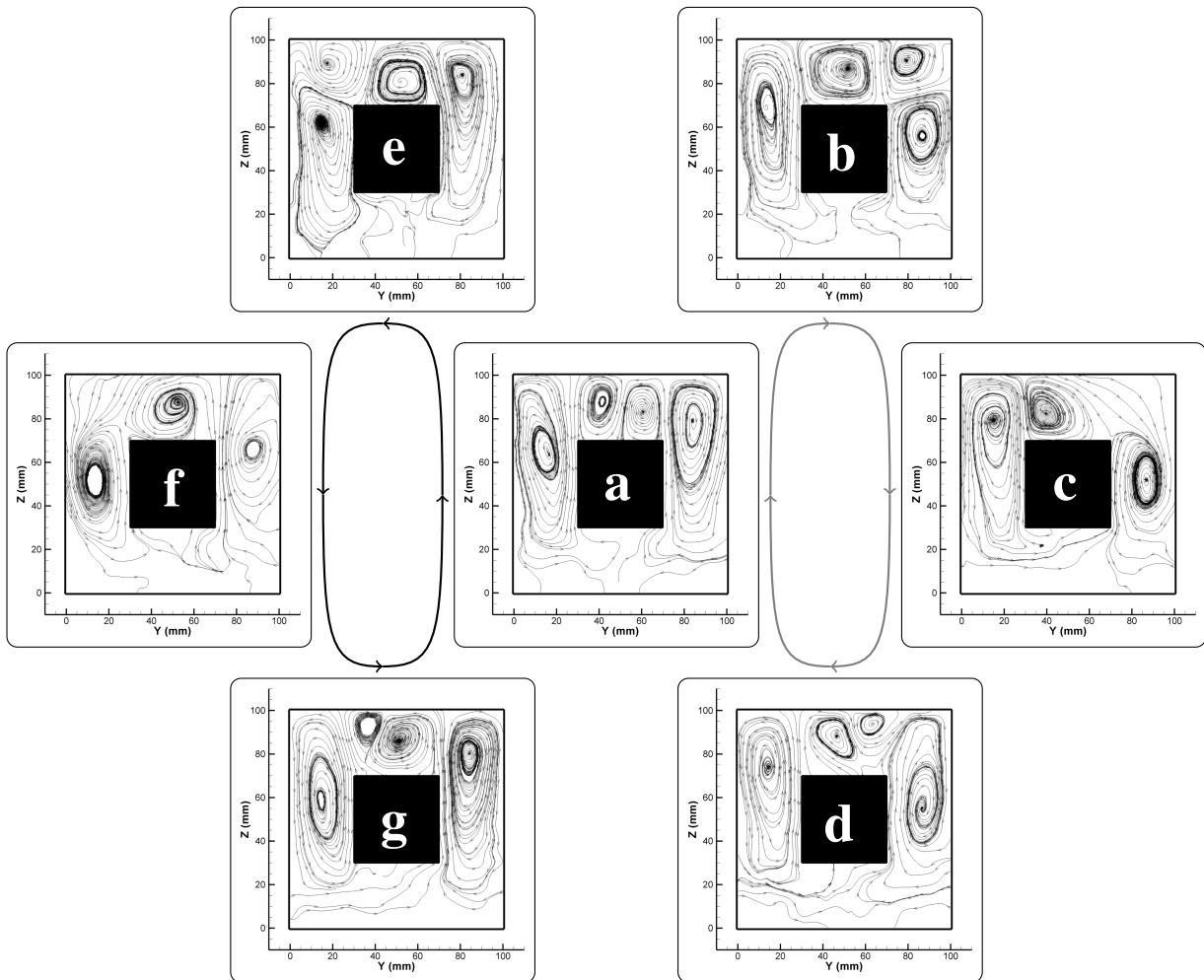


FIG. 3 – Phases de l'instabilité

De ce rapport d'aspect particulier ($\mathcal{A} = 0,4$), semblent émerger des structures tridimensionnelles instationnaires alors que l'écoulement reste stationnaire et parfaitement bidimensionnel pour les autres niveaux de

confinement. Les caractéristiques 3D sont clairement visibles sur les champs de vitesse longitudinaux où des valeurs élevées de la composante horizontale de la vitesse sont relevées, figure 4. De plus, le fluide s'élève au niveau de la couche limite thermique sur les flancs du barreau vers la paroi plafond et on observe de manière intermittente, l'apparition de cellules contra-rotatives longitudinales au niveau du plafond de la cavité. Une fois apparus, ces tourbillons se déplacent de manière irrégulière vers la droite ou la gauche, soit fusionnent ensemble ou avec d'autres paires de vortex dans le voisinage proche avant de disparaître du plan d'étude. Ces structures longitudinales apportent lors de leur passage, une forte composante négative à la vitesse verticale dans la zone située au-dessus de la couche limite motrice et semblent a priori être à l'origine du basculement vers la phase instable. Une telle bifurcation d'un écoulement 2D stationnaire vers des structures 3D instationnaires a été précédemment observée par KOIZUMI *et al.* (1996) [2] mais dans le cas encore une fois d'un cylindre chauffé. Les instabilités apparaissent alors pour des nombres de Rayleigh supérieurs à 10^5 et un positionnement du cylindre proche du plafond.

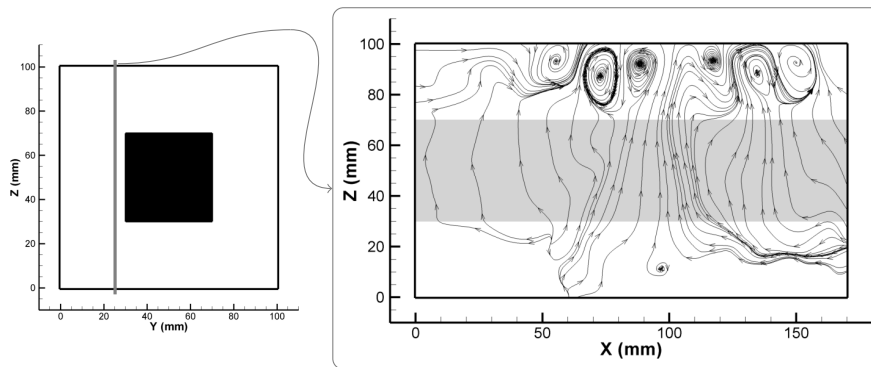


FIG. 4 – *Observation longitudinale*

De manière générale, le comportement instable du fluide semble venir d'une compétition entre une topologie de type Rayleigh-Bénard typique d'une couche horizontale de fluide chauffée par-dessous - observée pour des niveaux de confinement supérieurs, figure 1(b) - et une topologie présentant un panache se développant au-dessus du barreau et détruisant la convection de Rayleigh-Bénard - observée pour des niveaux de confinement plus faibles, figure 1(a). Le paramètre caractéristique qui pilote l'écoulement paraît être alors la hauteur séparant l'obstacle et la paroi plafond auquel vient s'ajouter la géométrie même de l'obstacle. Se crée alors un rapport de force qui induit soit un confinement des cellules de Rayleigh-Bénard par les deux boucles de recirculation latérales, soit une destruction de la convection cellulaire par ces mêmes tourbillons latéraux.

3.2 Convergence des moments statistiques

L'évolution de la composante verticale de la vitesse et de sa moyenne est présentée figure 5 pour une série de 12 acquisitions à 2Hz. Chaque ligne verticale de la grille sur les courbes représente la frontière entre deux acquisitions successives. Les valeurs sont extraites d'un plan transverse à mi-profondeur de l'enceinte et au point P de coordonnées $(75mm, 75mm)$. Ce point est situé juste au-dessus de la couche limite thermique sur la partie droite du barreau et, par conséquent, dès que l'écoulement entre dans une phase instable de ce côté de l'enceinte, la vitesse verticale prend une valeur négative. Mais ces phases se produisent de manière aléatoire d'un côté ou de l'autre de la cavité et la convergence n'est alors atteinte qu'à partir de la 10^{me} acquisition, soit 1000 secondes avec un champ moyen présenté figure 5(c). La vitesse moyenne en ce point vaut $29mm.s^{-1}$ avec un écart type atteignant 50% de cette valeur. Ces résultats soulignent le caractère fortement instable de l'écoulement.

4 Conclusions et perspectives

Une première investigation d'un écoulement de convection naturelle est menée et met en évidence un comportement fortement instable pour un rapport de confinement $\mathcal{A} = 0,4$. L'écoulement fait clairement apparaître des structures 3D et malgré la résolution temporelle des mesures PIV, aucune corrélation n'est encore possible

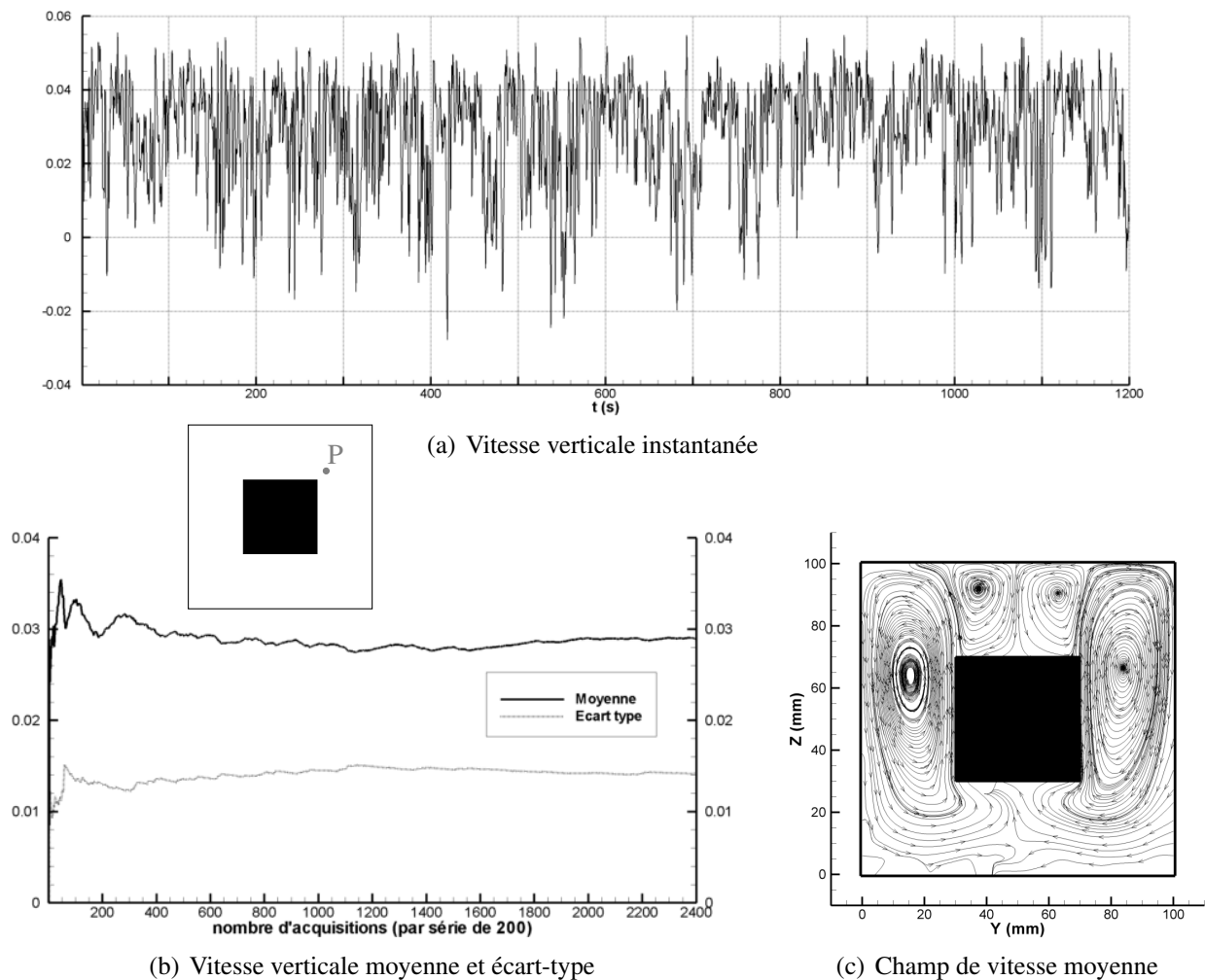


FIG. 5 – Évolution temporelle de la vitesse verticale

entre les études longitudinales et transversales. Mais, aucune raison géométrique ou asymétrie dans les conditions aux limites ne semble commander le basculement de l'écoulement dans un sens ou dans l'autre. À la lumière de ces résultats, l'écoulement conserve un comportement imprévisible avec néanmoins une récurrence de certains motifs topologiques.

Une analyse fréquentielle sur la base de mesures par vélocimétrie laser sur des temps longs sera prochainement réalisée dans le but de faire émerger d'éventuels phénomènes très basse fréquence et viendra clôturer l'analyse expérimentale. Les travaux seront ensuite axés sur des simulations numériques 2D puis 3D pour tenter d'avoir une meilleure compréhension du phénomène dans sa globalité.

Références

- [1] M.A. ATMANE, V.S.S. CHAN, and D.B. MURRAY. Natural convection around a horizontal heated cylinder : The effects of vertical confinement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46 :3661–3672, 2003.
- [2] H. KOIZUMI and I. HOSOKAWA. Chaotic behavior and heat transfer performance of the natural convection around a hot horizontal cylinder affected by a flat ceiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39 :1081–1091, 1996.
- [3] L. PERRIN, V. MÉNARD, Ph. REULET, and P. MILLAN. Dynamical and thermal behaviour of a confined natural convection flow. In *16th International Symposium on Transport Phenomena*, Prague, 2005.