



Analyse POD de l'écoulement d'entrée d'un canal vertical chauffé à flux constant

Martin Thebault^{*,***}, Stéphanie Giroux-Julien^{*}, Christophe Ménézo^{**}

^{*}CETHIL UMR 5008, University Lyon 1, Lyon, France

^{**}LOCIE UMR 5271, University Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac, France

^{***}School of Mech. & Manuf. Eng., UNSW, Sydney, Australia

martin.thebault@univ-lyon1.fr

christophe.menezo@univ-smb.fr

stephanie.giroux@univ-lyon1.fr

Résumé : Une campagne de mesure expérimentale a été menée sur un canal vertical uniformément chauffé dans le but d'étudier l'impact de perturbations contrôlées sur l'écoulement. Dans cette optique, des perturbations acoustiques ont été générées via un haut-parleur. Les champs de vitesse sont obtenus par mesure PIV (Particule Image Velocimetry). La perturbation introduite semble avoir un impact sur les champs de vitesse moyen ainsi que sur les fluctuations en entrée de canal. Certaines caractéristiques de ces perturbations sont identifiées en utilisant une analyse de type POD (Proper Orthogonal Decomposition)

Mots clés :

Convection naturelle, effet cheminée, perturbation acoustique, PIV, POD

1. Introduction

L'objectif à long terme de ces études est le contrôle d'un rafraichissement local et passif de composants de parois photovoltaïques intégrées au bâtiment (BIPV). L'idée est de tirer parti de l'écoulement de convection naturelle, généré sous un panneau photovoltaïque pour maximiser les transferts fluide/solide et limiter l'apparition de points chauds. Il a été montré par Bloem et al. [1] qu'une telle configuration permet à la fois d'augmenter la production instantanée d'électricité et de prolonger la durée de vie des panneaux photovoltaïques. Actuellement l'objectif de ces travaux est d'introduire une perturbation extérieure permettant d'agir sur l'écoulement. Dans cette optique des perturbations en pression, associées à des perturbations acoustiques ont été adoptées. De plus, l'étude de la sensibilité de cet écoulement aux perturbations extérieures aiderait à l'identification de ses propriétés intrinsèques, autant thermiques que dynamiques. A cette fin, des méthodes telles que des décompositions de Fourier ou des méthodes POD (Proper Orthogonal Decomposition) seront utilisées.

Les méthodes de réductions et de décompositions permettent la construction de modèles d'ordre réduit (ROM) mais peuvent aussi être utilisées pour étudier les caractéristiques intrinsèques d'un écoulement. Il existe de nombreuses méthodes de décomposition. Dans ce travail la méthode POD est utilisée. La méthode POD est une méthode *a posteriori* qui décompose une séquence de l'écoulement en modes spatiaux, classés selon un critère énergétique. La séquence décomposée est constituée de champs de vitesses de l'écoulement, que l'on nommera snapshots par la suite. Les snapshots peuvent provenir de données expérimentales, obtenues par PIV, ou de modèles numériques. Si l'on considère un ensemble de snapshots N , la décomposition POD consiste à décomposer un champ de vitesse u comme suit :

$$u(x, y, t) \simeq \sum_{k=1}^N \sqrt{\lambda_k} \cdot a_k(t) \cdot \phi_k(x, y) \quad (1)$$

Les a_k représentent les vecteurs propres de la matrice de corrélation du champ de vitesse u . Ils sont aussi appelés coefficient temporels associés aux modes POD. Les ϕ_k sont les modes POD et correspondent à des projections spatiales du champ de vitesse u sur la matrice des vecteurs propres a_k . Enfin les λ_k représentent les valeurs propres, associées au contenu énergétique de chaque mode. Une explication plus détaillée de la décomposition POD peut être trouvée dans de nombreux articles [2]

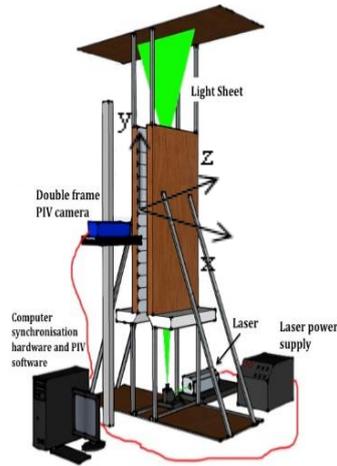


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental

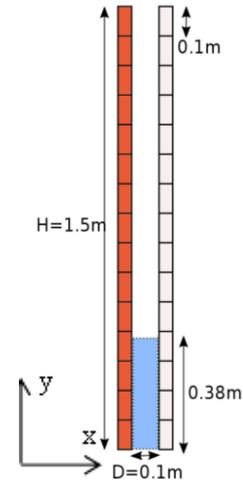


Figure 2. Coupe centrale du canal

2. Présentation du dispositif expérimental et travail préliminaire

2.1. Dispositif expérimental

La Fig. 1. présente un schéma du dispositif expérimental. Il est constitué de deux murs parallèles verticaux de hauteur $H=1.5\text{m}$, largeur $W=0.7\text{m}$ et séparés d'une distance fixe de $D=0.1\text{m}$. Sur la partie intérieure de chaque mur, 15 films chauffants en acier inoxydable de dimensions $10*70\text{cm}$ sont placés de sorte à permettre différentes configurations de chauffe. Dans le but d'évaluer les transferts énergétiques, des mesures de températures et de vitesses sont effectuées simultanément. Les températures sur chaque paroi sont mesurées sur toute la hauteur, à mi largeur ($z=0.35\text{m}$) du canal, par 75 thermocouples de type K. La Fig. 2 représente une coupe schématique de ce plan. Le plan d'observation PIV est représenté Fig. 2. par un rectangle bleu de dimension $h_{PIV}=0.38\text{m}$ et $w_{PIV}=D$. Ce plan d'observation restera le même pour tous les résultats présentés dans cette étude. Les perturbations acoustiques sont générées par un haut-parleur de 80watt et 8 Ohms avec une bande passante de $[50\text{ Hz} - 20\ 000\text{Hz}]$. Le signal est généré en utilisant un programme Matlab qui permet de créer différentes sortes de signaux périodiques. Le haut-parleur est placé sous le canal, à mi largeur, et légèrement décentré pour ne pas bloquer le chemin optique nécessaire pour la visualisation PIV. Les fréquences utilisées restant basses, on peut donc considérer que les perturbations acoustiques se propagent uniformément et verticalement dans le canal. Les incertitudes de mesures pour les thermocouples sont de 0.01K et les incertitudes pour les mesures PIV sont de 0.05m/s [3]. L'acquisition PIV est faite en mode double-exposition à 10Hz si bien que 10 paires d'images sont prises par seconde, chaque paire étant auto-corrélée de sorte à obtenir un champ de vitesse. Dans une étude précédente [4] il a été vérifié que 4000 snapshots à 10Hz prodiguaient une bonne convergence des quantités moyennes de l'écoulement.

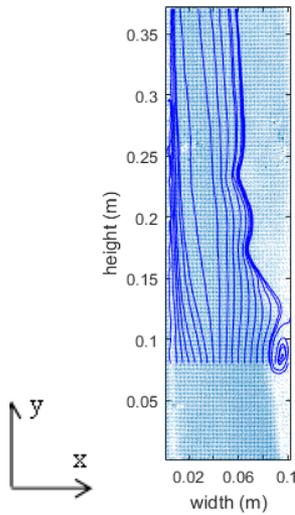


Figure 3.

Lignes de courant tracées à 0.08m

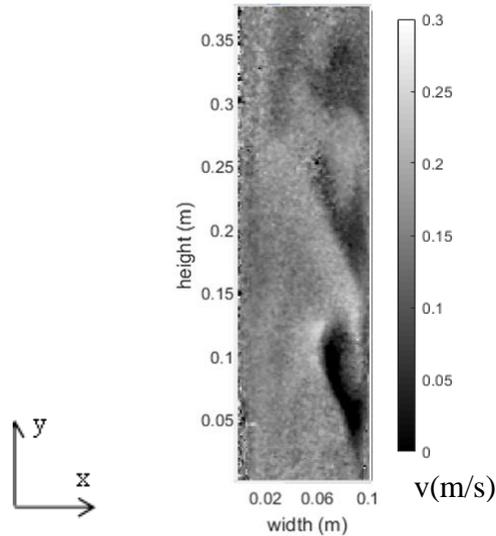


Figure 4.

Instabilités et ondes progressives

2.2. Fréquence naturelle d'un écoulement de convection naturelle, en entrée de canal

En considérant la hauteur du canal (1.5m) et la vitesse minimale attendue pour une puissance totale injectée de 100W, qui est d'environ 0.15m/s, le volume fluide dans le canal est entièrement renouvelé toute les 10s. Pour cela il a été décidé de ne prendre en considération que les fréquences supérieures à 0.1Hz. Des travaux précédents de Tkachenko et al. [5] ainsi que des analyses de Fourier (FFT) de l'écoulement ont soulignées une bande de basse fréquence [0.1 Hz – 3 Hz] pour ce type d'écoulement. La Fig. 3. présente un champ de vitesse, l'arrière-plan est coloré par les vecteurs vitesses et des lignes de courant ont été tracées. La Fig.4 présente un autre champ de vitesse instantané. Dans ces deux figures, une instabilité, associée à des oscillations quasi périodiques, ainsi qu'un tourbillon, peuvent être observées. On pourra noter que la structure tourbillonnaire n'est pas parfaitement définie par les lignes de courants car la résolution PIV en proche paroi ne le permet pas. La variation temporelle de la vitesse horizontale dans cette région est présentée Fig. 5. Les bandes obliques sont représentatives du passage d'ondes progressives. La transformation de Fourier de cette série est représentée Fig.6. Le spectre de fréquence est riche dans les basses fréquences et différents pics peuvent être identifiés. Pour la suite de cette étude, le pic à 44 Hz a été retenu.

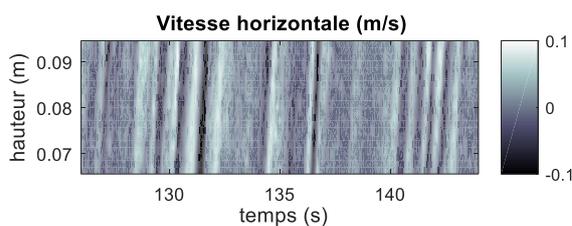


Figure 5 : Vitesse horizontale sur le segment $x=0.08m$ $y=[0.07m - 0.08m]$

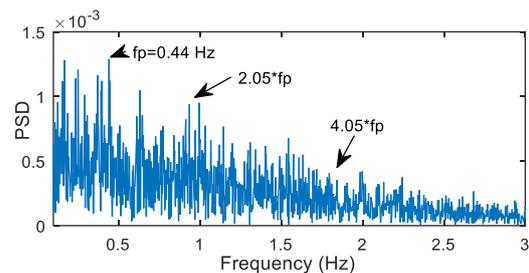


Figure 6 : Analyse FFT de la vitesse horizontale

2.3 Perturbation acoustique de l'écoulement

Des perturbations acoustiques ont été utilisées pour leur caractère non intrusif. Dans ce cas, une perturbation est générée à 0.44Hz. Comme il est impossible de générer une onde stationnaire à une fréquence si faible avec le dispositif présenté ci-dessus, des pulses ont été générés. Ces pulses sont générés a 0.44 Hz mais sont en fait composé d'un signal de 60Hz modulé et émis pendant une période très courte de 0.05s à 0.44Hz.

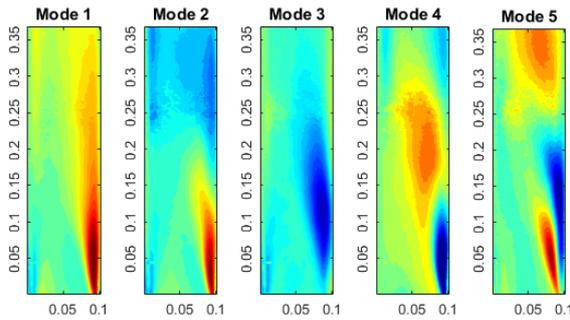


Figure 7: Modes cas naturel

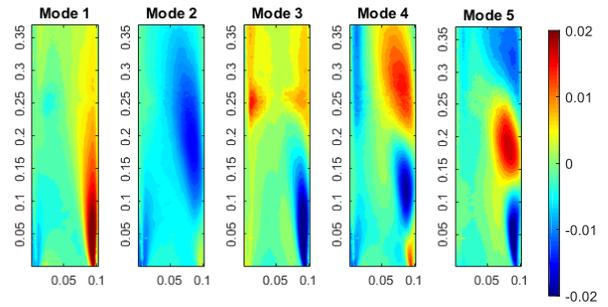


Figure 8: Modes 0.44hz

3. Impact des perturbations acoustiques

3.1 Analyse POD

Une décomposition POD a été effectuée sur deux séquences distinctes. La première correspond à un écoulement sans perturbation, ce cas sera appelé le cas naturel, et la seconde séquence correspond au cas où une perturbation à 0.44 Hz (cas 0.44 Hz) a été introduite. Avant de procéder à la décomposition POD, l'écoulement moyen sur la séquence a été soustrait. Les figures 7 et 8 montrent les 6 premiers modes POD pour le cas naturel et le cas 0.44 Hz. Le premier mode de cette décomposition représente les principales et lentes variations de l'écoulement autour de l'écoulement moyen. Les modes 2 et 3 représentent le battement observé sur le côté non chauffé. Ce battement, parfois, se transforme en oscillation et en onde progressive comme celles observées Fig. 4. Ces ondes et oscillations correspondent à la combinaison des modes 4 et 5, qui contiennent un changement de phase dans la direction verticale. On pourra noter que dans le cas 0.44 Hz, les modes sont mieux définis. Ceci peut être interprété comme une régularisation de l'instabilité dans le temps. La Fig.10 montre la décomposition FFT des coefficients temporels des modes 4 et 5 pour le cas 0.44 Hz. Par définition les modes POD ne sont pas nécessairement liés à des fréquences propres. Cependant, si une structure énergétique significative et récurrente, liée à une fréquence spécifique, apparaît dans l'écoulement, cette fréquence devrait apparaître dans le spectre du mode POD correspondant. Il est possible d'observer que dans le cas 0.44Hz, il y a un pic significatif à 0.47 Hz pour les modes 4 et 5. De plus une harmonique à 0.96 semble pouvoir être identifiée. La présence de la même fréquence dans ces deux modes semble signifier qu'ils servent à représenter les mêmes phénomènes passagers, mais déphasés dans l'espace. Dans le cas naturel, Fig. 9, le pic n'est pas aussi prononcé. Ces considérations semblent montrer que l'introduction de la perturbation régularise les phénomènes liés à la fréquence 0.44 Hz.

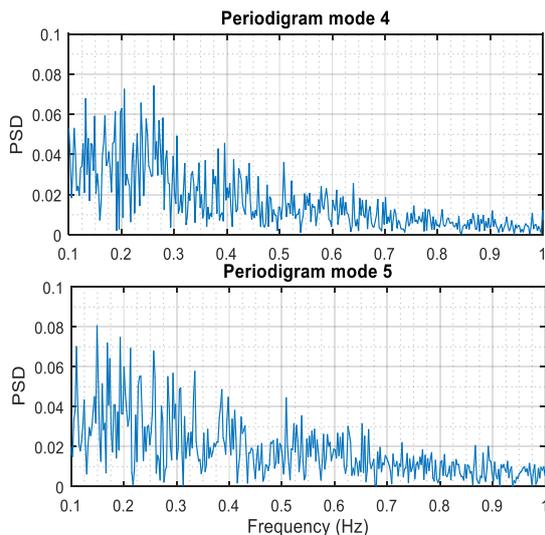


Figure 9: Décomposition FFT des coefficients temporels associés aux modes 4 et 5 cas naturel

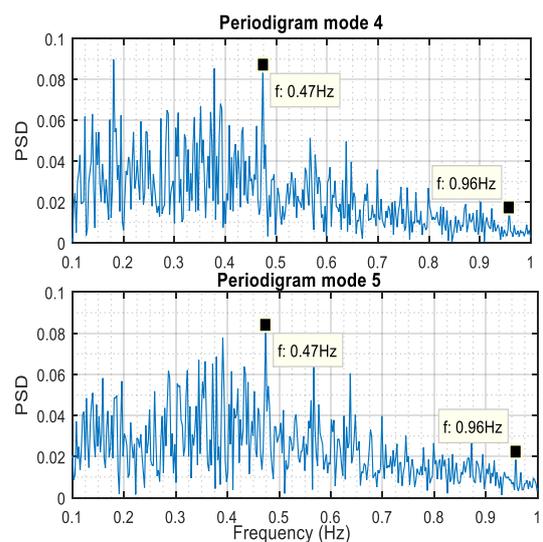


Figure 10: Décomposition FFT des coefficients temporels associés aux modes 4 et 5 cas 0.44 Hz

3.2 Impact global de la perturbation acoustique

La figure 11 montre le profil de vitesse moyen à 0.38 cm de l'entrée du canal. Il apparaît que sous la perturbation 0.44Hz, la vitesse moyenne augmente de 8%. Cependant aucune différence de température n'est observée sur la paroi chauffée dans cette zone.

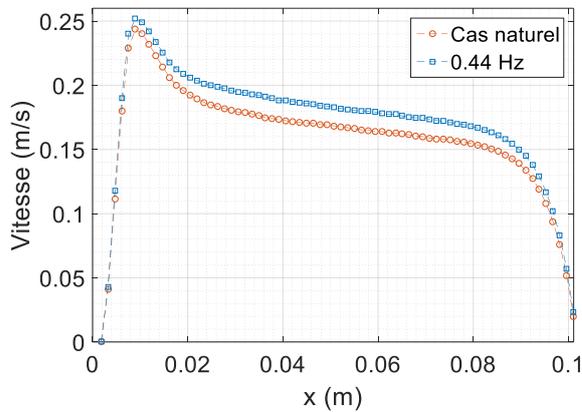


Figure 11: Profil de vitesse vertical moyen à $h=0.38m$

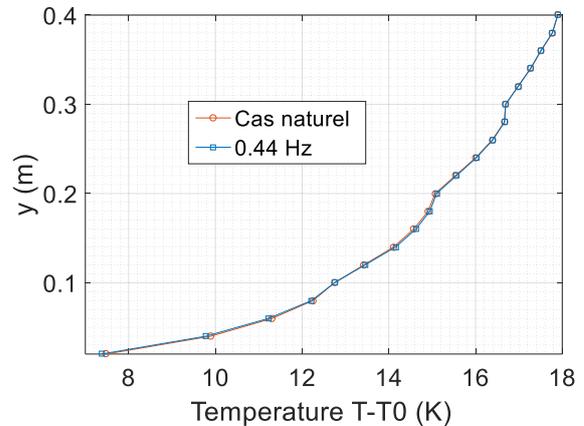


Figure 12: Température moyenne sur le mur chauffé

Conclusion

Ce travail traite de l'impact d'une perturbation acoustique sur l'écoulement de convection naturelle dans un canal vertical uniformément chauffé. Il semblerait que l'écoulement d'entrée soit sensible à cette perturbation et que la perturbation 0.44Hz permet une régularisation des phénomènes transitoires et intermittents observés en entrée du canal. Cette instabilité est à l'origine de lâchés tourbillonnaires et de structure progressives quasi-périodiques. Ces phénomènes peuvent être identifiés par l'analyse POD. Cette perturbation n'est qu'un exemple parmi d'autres perturbations implémentées. Il est prévu de procéder à des analyses similaires, à différentes hauteurs du canal et sur le canal entier en effectuant un bilan énergétique. Etant donné que les phénomènes physiques sont fortement interdépendant dans ce type d'écoulement, il est prévu d'obtenir des champs numériques détaillés qui donneraient accès aux champs de température et de pression. Les résultats expérimentaux seront utilisés pour valider les résultats numériques.

Nomenclature

u champ de vitesse (m/s)
 T température (K)
 N Nombre de snapshots
 a_k coefficients temporels du mode k
 T_0 température ambiante de référence (K)

Symboles grecs

ϕ_k k ième mode POD
 λ_k contenu énergétique du k ième mode (m/s)²

Références

- [1] J. J. Bloem, "Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 2, pp. 205–216, Feb. 2008.
- [2] L. Cordier and M. Bergmann, "Réduction de dynamique par décomposition orthogonale aux valeurs propres (POD)," *Ecole Printemps OCET*, pp. 12–17, 2006.
- [3] E. Sanvicente, "Experimental investigation of thermal and fluid dynamical behavior of flows in open-ended channels: Application to Building Integrated Photovoltaic (BiPV) Systems," INSA de Lyon, 2013.
- [4] S. Giroux-Julien, C. Menezo, and J. Vareilles, "Natural Convection in nonuniformly heated channel investigation – Application to photovoltaic facades," *Comput. Therm. Sci.*, vol. 1, no. 13, pp. 231–258, 2009.
- [5] O. A. Tkachenko *et al.*, "Numerical and experimental investigation of unsteady natural convection in a non-uniformly heated vertical open-ended channel," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 99, pp. 9–25, Jan. 2016.