



HAL
open science

Cavités latérales en écoulement à surface libre : étude pour deux allongements

Wei Cai, Cristian Escauriaza, Emmanuel Mignot, Nicolas Rivière

► **To cite this version:**

Wei Cai, Cristian Escauriaza, Emmanuel Mignot, Nicolas Rivière. Cavités latérales en écoulement à surface libre : étude pour deux allongements. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03440471

HAL Id: hal-03440471

<https://hal.science/hal-03440471>

Submitted on 22 Nov 2021

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.

Analyse expérimentale et numérique du champ de vitesse dans des cavités latérales de différents rapports d'aspect

E. MIGNOT^a, C. WEI^a, C. ESCAURIAZA^b, N. RIVIERE^a

a. LMFA, CNRS-Université de Lyon, INSA de Lyon, Bat. Joseph Jacquard, 20 av. A. Einstein, 69621 Villeurbanne (FRANCE)

b. Département d'ingénierie hydraulique et environnementale, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago (CHILI)

Résumé :

L'écoulement qui se met en place au sein de cavités situées sur le côté d'un écoulement principal, appelées « cavités latérales », est fonction des caractéristiques de l'écoulement principal et des caractéristiques géométriques de la cavité. Pour le même écoulement principal, deux cavités sont étudiées ici, la première de forme carrée au sein de laquelle une cellule horizontale de recirculation unique est observée et la seconde, rectangulaire, au sein de laquelle, deux cellules contrarotatives sont observées. Les mesures réalisées par PIV horizontales et les calculs réalisés par un code DES 3D montrent que les écoulements dans les deux cavités présentent une faible évolution du champ de vitesse dans la direction verticale. Les principaux résultats obtenus concernent : i) la vitesse de rotation de la première cellule qui est légèrement plus rapide pour la cavité carrée que pour la cavité rectangulaire, ii) la vitesse de rotation de la deuxième cellule est environ 5 fois plus lente que celle de la première et iii) la fréquence de génération des tourbillons dans la couche de mélange entre l'écoulement principal et la cavité qui est analogue dans les deux configurations.

Abstract :

The flow pattern which takes place within cavities located on the side of a main flow, referred to as «side cavities», depends both on the characteristics of the main flow and on the geometry of the cavity. Considering the same main flow, two cavities are studied herein, the first one is squared and a unique horizontal recirculation cell occupies the whole space and the second one is rectangular and two counter-rotating cells are observed. Measurements performed using horizontal PIV and numerical simulations carried out with a 3D DES model reveal that the flow pattern exhibits a limited a limited evolution of the velocity field along the vertical axis. Main results are that i) the rotational velocity of the first cell is slightly higher for the square cavity than for the rectangular cavity, ii) the rotational velocity of the second cell is about 5 times slower than that of the first cell and iii) the vortex shedding peak frequency is similar for both configurations..

Mots clefs : cavités, cellule de recirculation, expériences, PIV, calcul, DES

1 Introduction

Les cavités dans les écoulements à surface libre peuvent être définies comme des zones d'eau morte connectées à un écoulement principal. Cette connexion a pour effet de mettre en mouvement l'eau dans la cavité. Deux principaux types de cavités peuvent être rencontrés: a) les « cavités inférieures » situées en dessous de l'écoulement principal qui possèdent donc quatre parois latérales, une paroi au fond et une connexion supérieure avec l'écoulement principal et b) les « cavités latérales » qui possèdent trois parois latérales, une paroi inférieure, une surface libre et une connexion latérale avec l'écoulement principal. La principale différence entre ces deux types réside donc dans la présence ou non de la surface libre et donc du confinement vertical de l'écoulement.

Parmi les cavités latérales, on peut trouver : A. les cavités isolées (telles que présentées ici), B. celles situées entre 2 épis consécutifs (Uijtewaal [7]) et C. les séries de cavités (Ercicum *et al.* [2]). Les différences entre ces configurations sont liées à la direction de l'écoulement à l'entrée de la cavité : contrairement au cas A.,

dans les cas B. et C. l'écoulement principal a une vitesse transverse non-nulle lorsqu'il atteint la cavité. On s'intéresse ici à la configuration de cavité latérale A qui peut représenter par exemple un bras mort de rivière ou un port fluvial ou côtier.

Comme décrit par Riviere *et al.* [4], à la connexion entre l'écoulement principal et la cavité, un fort gradient de vitesse prend place, ce qui génère une couche de mélange qui s'étend du coin amont au coin aval de l'interface. Cette couche de mélange permet le transfert de masse et de quantité de mouvement entre les deux régions. De plus, les caractéristiques de cette couche de mélange gouvernent l'écoulement qui se met en place dans la cavité. Si les dimensions de la cavité le permettent, la génération de tourbillons au coin amont de l'interface génère le phénomène de seiche résultant en des oscillations de la surface libre de grande amplitude (Wolfinger *et al.* [9]). Les données de la littérature concernant les cavités latérales mélangent les approches expérimentales et numériques afin de caractériser les formes d'écoulement, les taux d'échange de scalaire passif ou les seiches.

Pour ce qui concerne les formes d'écoulement, Riviere *et al.* [4] ont montré que le paramètre principal est le rapport L/b de la cavité, avec L sa longueur (dans la direction perpendiculaire à l'écoulement principal) et b sa largeur (dans la direction de l'écoulement principal). La plupart des études disponibles dans la littérature traitent de faibles rapports d'aspects ($L/b \leq 1$) pour lesquelles une cellule de recirculation unique occupe la quasi-totalité de l'espace de la cavité. Weitbrecht *et al.* [8] ont montré qu'entre deux épis, L/b atteignant 3.3, une deuxième cellule stable apparaît dans la continuité de la première. Enfin, Riviere *et al.* [4] ont montré que pour des rapports d'aspects plus élevés (jusqu'à 6.6) une troisième et même une quatrième cellule pouvaient apparaître. Pour un écoulement principal en régime fluvial, les auteurs [4] ont montré que les autres paramètres résultant de l'analyse dimensionnelle (hauteur et nombre de Froude de l'écoulement principal, nombre de frottement de la cavité) ont un effet négligeable sur le nombre de cellules dans la cavité, tant que l'écoulement principal reste en régime fluvial.

Parmi les 14 configurations décrites par Riviere *et al.* [4], deux configurations sont sélectionnées ici, avec le même écoulement principal : la première, de rapport d'aspect $L/b=1$, donnant lieu à une cellule et la deuxième, de rapport d'aspect $L/b=3$, donnant lieu à deux cellules de recirculation. L'objectif est de déterminer précisément le champ de vitesse qui se met en place au sein de la cavité pour ces deux configurations et d'étudier notamment l'évolution des caractéristiques (taille, forme, vitesse de rotation) de la première cellule lors de l'apparition de la deuxième cellule. Pour cela, le travail combine deux approches : une approche expérimentale et une approche numérique suivant celle de Escauriaza et Sotiropoulos [1].

2 Approche expérimentale par PIV

Le dispositif expérimental se situe au Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA, UMR 5509, Lyon) et consiste en un canal principal en verre de 4.9m de long de section rectangulaire de $b=0.3m$ de large et d'un canal secondaire de même largeur ($b=0.3m$) et de longueur $L_{max}=2m$ représentant la cavité. L'ensemble est maintenu horizontal. Le canal secondaire intercepte le principal avec un angle de 90° comme présenté sur la Fig. 1. Pour les deux configurations présentées ici, la longueur L de la cavité est fixée par une paroi en verre à $L=b$ et $L=3b$, respectivement. L'eau arrivant dans le réservoir aval est refoulée vers le réservoir amont avec un débit $Q=3.5L/s$, réglé grâce un système vanne + débitmètre (Promag 50 from Endress Hauser; précision $\pm 0.05 L/s$). L'eau du réservoir amont se déverse alors dans le canal principal en passant à travers un nid d'abeille afin de stabiliser l'écoulement. Le niveau d'eau de l'ensemble de l'écoulement est contrôlé par un seuil aval permettant de régler la hauteur d'eau dans l'intersection et la cavité à $h=7cm$, mesuré à l'aide d'un limnimètre digital. Deux types de mesure de l'écoulement sont présentés ici : les champs de vitesse aux élévations $z=2cm$ et/ou $z=5cm$ mesurés par PIV, et les trajectoires de traceurs flottant à la surface obtenues par photographies en pose.

La PIV utilise deux types d'éclairage: i) un éclairage utilisant un projecteur de diapositives couplé à un système optique permettant de générer une tranche lumineuse de lumière blanche de 2 à 3mm d'épaisseur dans l'ensemble de la cavité et ii) un laser de 40mW couplé à une lentille cylindrique générant une nappe lumineuse d'épaisseur de l'ordre du millimètre. Des particules de polyamide (50 μm de diamètre) sont ajoutées à l'eau. Une caméra rapide placée au dessus de la cavité permet d'enregistrer le mouvement des particules sur 3000 images consécutives de 1280x960 pixels acquises à une fréquence fixée avec une résolution moyenne de 0.3 mm par pixel. Pour la cavité carrée ($L/b=1$), l'éclairage est positionné du côté de l'écoulement principal ($x < 0$), le champ de la caméra est centrée sur l'ensemble de la cavité, la fréquence d'acquisition est fixée à 12.2 Hz. Pour la cavité rectangulaire ($L/b=3$), du fait de la forte différence de

vitesse de rotation entre les deux cellules, ce champ de vitesse a été mesuré en deux temps : i) comme pour la cavité carrée pour la partie amont de la cavité ($0 < x < 500\text{mm}$) et ii) en positionnant l'éclairage à l'aval de la cavité ($x > 900\text{mm}$) avec une fréquence d'acquisition de 4Hz pour mesurer le champ de vitesse de la deuxième cellule. Les deux champs de vitesse ainsi obtenus ont alors été accolés l'un à l'autre (voir Fig. 4). Finalement, le logiciel commercial Davis (de Lavision) permet d'ortho-rectifier les images, d'en soustraire le fond et de calculer le champ de vitesse.

Concernant les trajectoires en surface, des particules (sciure de bois) sont ajoutées dans la cavité et l'éclairage par lumière blanche décrit ci-dessus est fixé à l'élévation $z=7\text{cm}$ afin d'éclairer les particules. Une fois que l'écoulement a retrouvé son établissement, des photographies en pose sont prises à l'aide d'un appareil positionné au dessus de la cavité avec un temps de pose de 6s pour $L/b=1$ et 8s pour $L/b=3$.

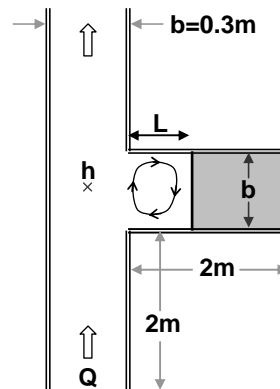


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental

3 Approche numérique par DES

Du fait de l'aspect fortement tridimensionnel de l'écoulement, l'approche numérique choisie est la modélisation 3D. Etant donné que i) le modèle conventionnel de résolution de l'équation URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ne parvient pas à capturer les instationnarités des structures cohérentes qui émergent d'instabilités à grande échelle et que ii) une approche LES (résolvant les équations de Navier-Stokes par une approche instationnaire sur un maillage très fin) nécessiterait de grosses ressources informatiques pour les écoulements considérés ici (à grand Nombre de Reynolds), l'approche sélectionnée a été la méthode dite DES (Detached-Eddy Simulation) qui est un hybride entre les méthodes URANS et LES. Le modèle résout donc les équations URANS à l'aide d'une approche DES qui utilise le modèle de viscosité turbulente à une équation de Spalart et Allmaras [6] comme base de formulation du modèle de turbulence hybride initialement décrite par Spalart [5]. Le modèle utilise des coordonnées curvilignes généralisées et est composé de 7 millions de nœuds dans le calcul présenté ici. Ce modèle s'est montré apte à décrire des phénomènes physiques gouvernés par de grandes structures cohérentes, très dynamiques (Paik *et al.* [3], Escauriaza and Sotiropoulos [1]). A ce stade, seuls les calculs dans la cavité carrée $L/b=1$ ont été réalisés et seront présentés en section 4.1 pour l'élévation $z=5\text{cm}$.

4 Résultats

4.1 Champ de vitesse en cavité carrée $L/b=1$

Comme décrit par l'ensemble de la littérature, dans le cas d'une cavité carrée de rapport d'aspect $L/b=1$, une cellule unique de recirculation d'axe vertical occupe l'ensemble de la cavité (Fig. 2). Les mesures montrent qu'une fois le régime permanent atteint, la structure de l'écoulement est très stable. Elle se compose d'une cellule dont le centre est situé à $x/b=0.47$ et $y/b=0.57$. La photographie à la surface ainsi que les champs PIV à $z=5\text{cm}$ et $z=2\text{cm}$ sont très similaires entre eux, ce qui laisse penser que l'écoulement présente une évolution assez limitée en fonction de l'élévation. Seule une vitesse de rotation légèrement supérieure est mesurée à $z=5\text{cm}$ par rapport à $z=2\text{cm}$. Comme attendu, la vitesse est très faible au centre de la cellule, augmente en s'approchant des parois (au moins jusqu'à l'approche des couches limites). Ces résultats sont en bon accord avec les données de la littérature pour une cavité carrée. La figure 2 montre de même que la vitesse maximale est observée au niveau de la paroi opposée à l'écoulement principal ($x=b$) à mi-largeur ($y=b/2$). Il

sera intéressant de confirmer ce comportement sur d'autres configurations.

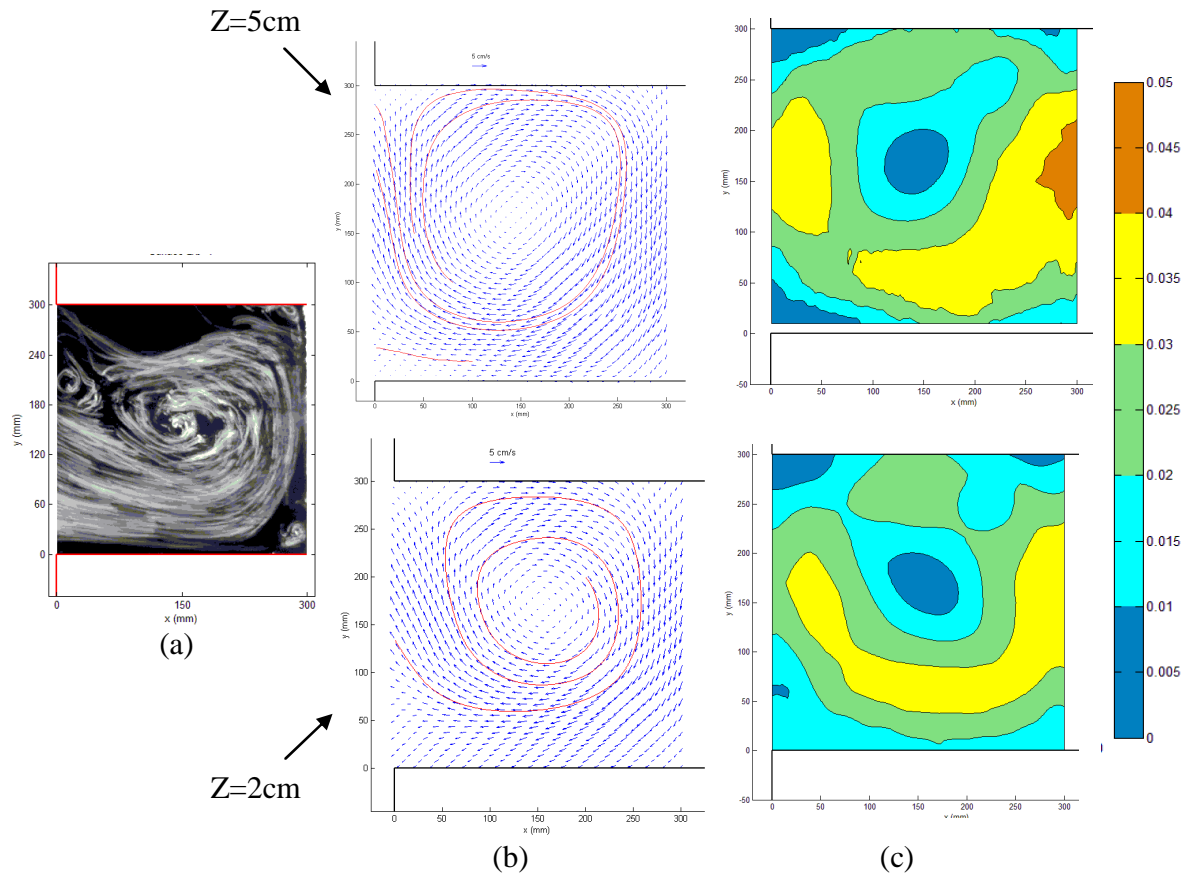


Figure 2. Mesures pour la cavité $b/L=1$: photo de surface (a), champ (b) et norme (c) de vitesse moyenne. Mesures à $z=5\text{cm}$ (haut) et à $z=2\text{cm}$ (bas).

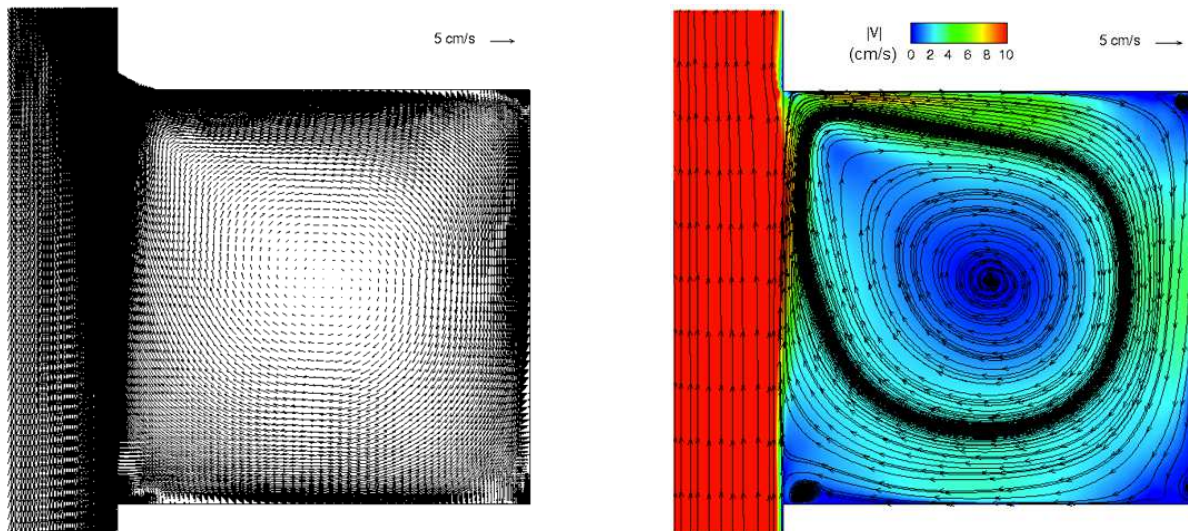


Figure 3. Calcul du champ de vitesse moyenne à $z=5\text{cm}$ pour la cavité carrée $b/L=1$.

Les résultats des calculs numériques sont présentés en Fig. 3, pour l'élévation $z=5\text{cm}$. Cette figure montre que les lignes de courant calculées sont en bon accord avec celles qui ont été mesurées. Tout d'abord, la position du centre de la cellule de recirculation à l'élévation $z=5\text{cm}$ est estimée par le calcul à $x/b=0.5$ et $y/b=0.55$ (Fig. 3), c'est à dire proche de celle mesurées expérimentalement ($x/b=0.47$ et $y/b=0.57$ sur la Fig. 2). De plus, les lignes de courant à $z=5\text{cm}$ mesurées (Fig. 2) passant par la région $x=150\text{mm}$ et $50 < y < 100\text{mm}$ atteignent le coin aval de la cavité $x\sim 50\text{mm}$ – $y\sim 250\text{mm}$. Cette asymétrie des lignes de courant est retrouvée

sur les résultats du calcul (Fig. 3) même si les lignes de courant ne sont pas parfaitement identiques. Enfin, la norme de la vitesse calculée est du même ordre de grandeur que celle mesurée sauf à proximité de la paroi aval de la cavité ($y=300\text{mm}$) où la vitesse calculée (5-6cm/s) excède celle mesurée (2-3cm/s).

4.2 Champ de vitesse en cavité rectangulaire $L/b=3$

D'après notre analyse de la littérature, les cavités allongées avec $L > b$ ont été très peu étudiées, malgré leur présence sur le terrain, notamment pour ce qui concerne les anciens méandres devenus des bras morts de rivière (par exemple les lônes sur l'Ain). La Fig. 4, analogue à la Fig. 2 mais pour une longueur de cavité $L/b=3$, montre que deux cellules cohérentes existent à la surface et sur toute la colonne d'eau. Les principaux résultats sont alors que:

- la frontière entre la première et la deuxième cellule est légèrement oblique et se trouve à $x/L \sim 1.6$ (résultat cohérent avec les mesures préliminaires de Riviere *et al.* [4]).
- le sens de rotation des deux cellules est bien sûr inverse, la première étant dans le sens horaire et la deuxième dans le sens antihoraire.
- le rapport entre la vitesse de rotation de la première et de la deuxième cellule est compris entre 4 et 5.

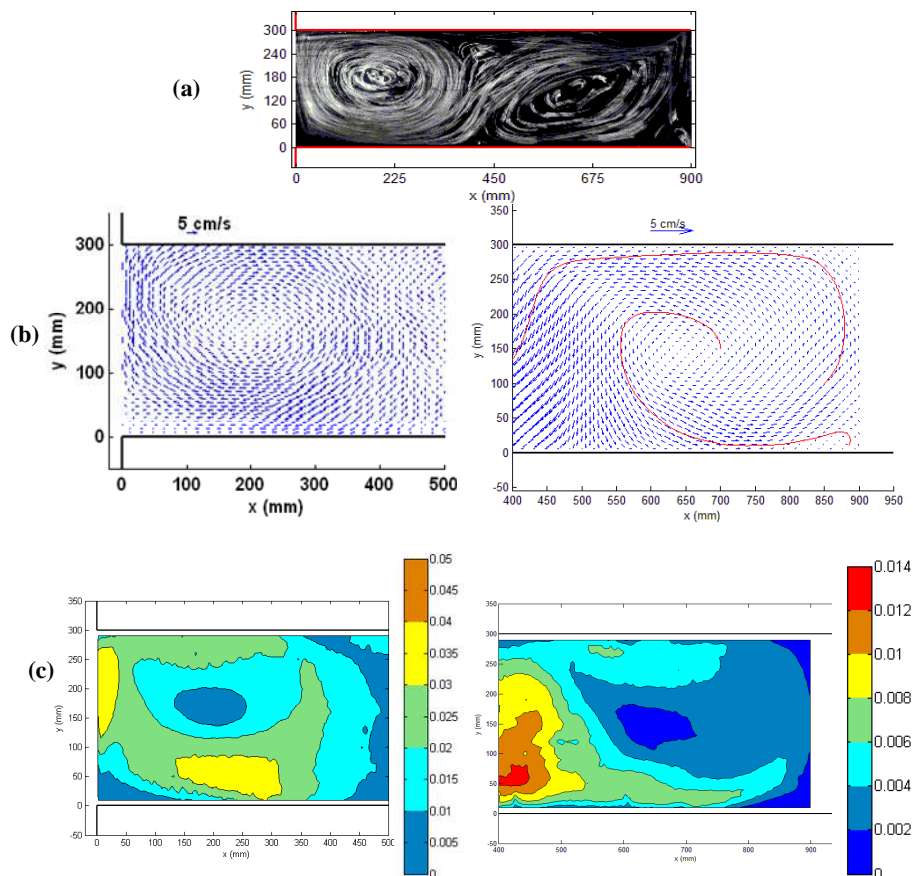


Figure 4. Mesures pour la cavité carrée $b/L=3$. a=photo de surface ; b-c= champ (b) et norme (c) de vitesse mesurés selon les 2 champs PIV;

4.3 Spectre d'énergie à l'interface

Dans cette section, les spectres d'énergie des signaux de vitesse longitudinale en fonction du temps $u(t)$ obtenu par PIV et par le calcul au point $y=b/2$ et $x=20\text{mm}$ sont analysés et comparés. La Fig. 5 montre que pour les deux configurations géométriques, un pic très net d'énergie est mesuré pour une fréquence de 0.62Hz, soit $T=1.61\text{s}$. Il s'agit vraisemblablement de la fréquence de génération des structures cohérentes (lâcher de tourbillon) dans la couche de mélange. Cette fréquence est identique pour les deux configurations ($L/b = 1$ et 3) : elle n'est pas affectée par la taille de la cavité, tout au moins en l'absence de seiche, comme c'est le cas ici. Finalement, le spectre d'énergie calculé est très similaire au spectre mesuré et le pic

du spectre calculé est observé à $f=0.8\text{Hz}$, soit $T= 1.25\text{s}$, c'est-à-dire une période légèrement plus courte que celle mesurée.

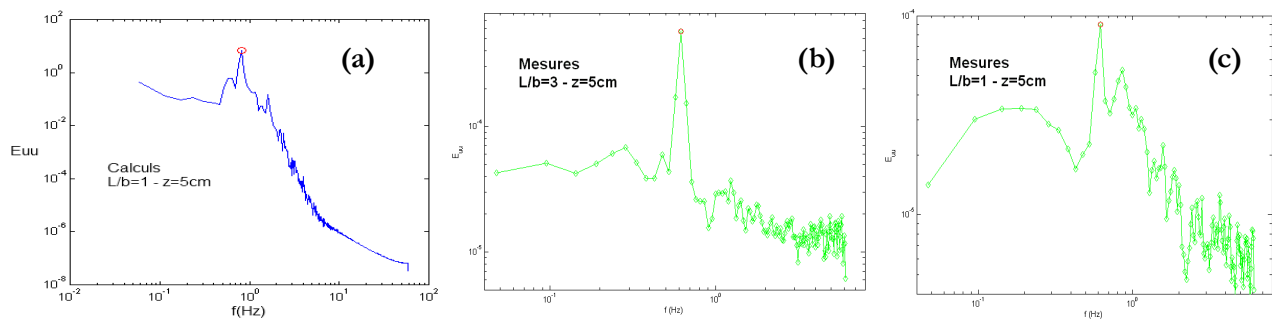


Figure 5 : Spectre d'énergie de la vitesse u (selon x) à $x=20\text{mm}$, $y=150\text{mm}$, $z=5\text{cm}$ pour $L/b=1$: calculée (a) et mesurée (b) puis pour $L/b=3$: mesurée (c).

5 Conclusion

Le travail présenté ici a permis de comparer le champ de vitesse qui se développe dans une cavité latérale pour deux rapports d'aspect différents de la cavité, avec le même écoulement principal. Nous avons montré par une approche mixte (expérimentale et numérique) que pour une cavité carrée, une seule cellule se met en place et que cette cellule évolue peu sur l'axe vertical. De plus, nous avons montré que pour une cavité rectangulaire (ou allongée), une deuxième cellule contra-rotative apparaît à côté de la première cellule et que la frontière entre ces deux cellules est légèrement oblique. De plus, la vitesse de rotation de la deuxième cellule est très nettement inférieure à la vitesse de rotation de la première. Enfin, nous avons montré que le spectre d'énergie du signal de vitesse mesuré dans la couche de mélange entre l'écoulement principal et la première cellule de la cavité présente un pic à une fréquence de 0.62Hz pour chacune des deux géométries et que le calcul estime cette fréquence à une fréquence légèrement plus forte $f=0.8\text{Hz}$.

6 Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien d'ECOS-Sud et de la Conicyt (projet C11E02).

References

- [1] Escauriaza, C. and Sotiropoulos, F., Reynolds number effects on the coherent dynamics of the turbulent horseshoe vortex system. *Flow, Turbulence and Combustion* 86, 231-262, 2011.
- [2] Erpicum S., Meile T., Dewals B., Piroton M. and Schleiss A., 2D numerical flow modeling in a macro-rough channel, *Int. J. for Num. methods in Fluids*, 61, 1227-1246, 2009.
- [3] Paik, J., Escauriaza, C. and Sotiropoulos, F., On the Bi-modal Dynamics of the Turbulent Horseshoe Vortex System in a Wing-Body Junction, *Physics of Fluids*, 19, 045107, 2007.
- [4] Riviere N., Garcia M., Mignot E., Travin G., Characteristics of the recirculation cell pattern in a lateral cavity, *International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2010)*, Braunschweig, Allemagne, Septembre 2010, p. 673.
- [5] Spalart, P. R., Detached-eddy simulation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 41, 181-202, 2009.
- [6] Spalart, P.R., and S.R. Allmaras, A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, *Rech. Aerosp.* 1, 5-21, 1994.
- [7] Uijtewaal W., Effects of groyne layout on the flow in groyne fields : Laboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(9), 782-791, 2005.
- [8] Weitbrecht V., Socolofsky S. A. et Jirka G. H., Experiments on Mass Exchange between Groin Fields and Main Stream Rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(2), 173-183, 2008.
- [9] Wolfinger, Ozen and Rockwell, 2012, "Shallow flow past a cavity: coupling with a standing gravity wave", *Phys. Fluids*, 24:104103, pp. 1-16