

Étude expérimentale de la dynamique d'un écoulement dans une cavité cubique comprenant un bloc partiellement chauffé.

Experimental study of the flow dynamics in a confined cubic enclosure with an inner block partially heated.

Alexandre WEPPE*, Florian MOREAU, Didier SAURY

Institut Pprime, UPR 3346 CNRS - ENSMA - Université de Poitiers
Téléport 2, 1 avenue Clément Ader, BP40109, F-86961 Futuroscope Cedex, France

*(auteur correspondant : alexandre.weppe@ensma.fr)

Résumé - Un écoulement à effets de flottabilité dominants est généré au sein d'une cavité comprenant un bloc cubique partiellement chauffé. Cet écoulement est étudié expérimentalement du côté chaud de la cavité et dans le plan vertical médian. Des mesures de vitesses sont effectuées afin de caractériser la dynamique de l'écoulement. Les résultats montrent la présence d'un écoulement de couches limites et d'une zone centrale aux vitesses nulles. Des perturbations sont observées et augmentent avec la hauteur de la cavité.

Mots-clés : Etude expérimentale ; Convection naturelle.

Abstract - A buoyancy-driven flow is generated within a cavity comprising a partially heated cubic block. This flow is studied experimentally on the heated side of the cavity and in the vertical median plane. Velocity measurements are carried out in order to characterize the flow dynamics. The results show the presence of a boundary layer flow and a central zone at zero velocities. Disturbances are observed and increase with cavity height.

Keywords: Experimental study; Natural convection.

Nomenclature

L longueur de la cavité, m
 l largeur de la zone étudiée, m
 H_{bloc} hauteur du bloc chauffant, m
 $Ra_{H_{bloc}}$ nombre de Rayleigh basé sur H_{bloc} ,
 $Ra_{H_{bloc}} = \frac{g\beta(T_c - T_f)H_{bloc}^3}{\nu\alpha}$
 d diamètre d'une particule, m
 Stk nombre de Stokes,
 $Stk = \frac{\rho d^2 v_{ref}}{18\mu l}$
 T température, K
 T_0 température moyenne, $T_0 = \frac{1}{2}(T_c + T_f)$, K
 v_{ref} vitesse de référence de l'écoulement,
 $v_{ref} = \frac{\alpha}{H_{bloc}} \sqrt{Ra_{H_{bloc}}}$, m.s⁻¹
 X, Y, Z coordonnées physiques, m

Symboles grecs

σ écart-type
 ρ masse volumique à T_0 , kg.m⁻³
 μ viscosité dynamique à T_0 , kg.m⁻¹.s⁻¹
 α diffusivité thermique à T_0 , m².s⁻¹
 β coefficient de dilatation thermique volumétrique à T_0 , K⁻¹
 ν viscosité cinématique à T_0 , m².s⁻¹

Indices

c relatif à la paroi chaude
 f relatif à la paroi froide
 as relatif à l'écoulement ascendant
 des relatif à l'écoulement descendant

1. Introduction

Les écoulements turbulents à effets de flottabilité dominants sont présents dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans les secteurs du nucléaire et de l'automobile. On peut par exemple citer la problématique du refroidissement d'un compartiment moteur qui est un point essentiel dans le dimensionnement d'un véhicule. Suite à un arrêt brutal du moteur après une forte sollicitation, l'intégrité de celui-ci doit être préservée alors même qu'il n'est plus refroidi par un écoulement externe forcé. Pour de telles situations, la convection, souvent en régime turbulent, permet d'assurer le refroidissement.

Le projet, au sein duquel s'inscrit cette étude expérimentale, a pour ambition de résoudre les problèmes rencontrés par les partenaires industriels lors de simulations d'écoulements turbulents avec effets de flottabilité dominants en espace confiné et aussi d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques observés pour ce type d'écoulement.

Notre démarche a consisté à définir une configuration de référence permettant d'étudier un écoulement en espace confiné représentatif des régimes rencontrés dans le domaine automobile. Le compartiment moteur a été simplifié en une cavité cubique comportant en son sein un bloc cubique partiellement chauffé. Plusieurs études, en majorité numériques, traitent de l'influence d'un obstacle dans une cavité. Ainsi certaines études démontrent, à l'intérieur d'une cavité cubique, l'impact de la taille et de la conductivité d'un bloc non-chauffé [1, 2] quand d'autres s'intéressent plus particulièrement au rôle d'un bloc chauffant sur les transferts conjugués conduction/convection. [3, 4]. Comme il sera montré dans la section 2 et avec la figure 2, la zone en orange qui est la zone étudiée dans nos travaux a des similarités avec les écoulements rencontrés dans une cavité différentiellement chauffée. Les écoulements turbulents générés à l'intérieur d'une cavité différentiellement chauffée ont déjà été étudiés expérimentalement [5, 6, 7]. Cependant, contrairement à ces études, la "cavité différentiellement chauffée" étudiée ici est ouverte.

Dans un premier temps, nous allons présenter le dispositif expérimental ainsi que la métrologie utilisée pour nos mesures puis nous analyserons les résultats obtenus avant de conclure sur cette étude préliminaire.

2. Dispositif expérimental et métrologie

2.1. Dispositif expérimental

La cavité utilisée dans cette étude est une cavité cubique de côté $L = 1$ m dans laquelle est placé un bloc chauffant de côté $L_{bloc} = 0,8$ m (voir Fig. 1 et 2).

Deux échangeurs à eau en aluminium (conductivité $\lambda = 174 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) imposent une température $T_f = 292 \text{ K}$ aux parois latérales de la cavité cubique au moyen de deux bains thermostatés Fig.1. Les parois horizontales haute et basse de la cavité sont en polystyrène extrudé (conductivité $\lambda = 0,035 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et sont donc considérées comme adiabatiques. Elles sont de plus recouvertes d'une feuille de Mylar faiblement émissive ($\epsilon = 0,044$). Les parois avant et arrière de la cavité cubique sont quant à elles en verre d'épaisseur 6 mm permettant ainsi de visualiser l'écoulement. Des blocs de polystyrène extrudé sont maintenus devant ces parois afin de conserver leur caractère adiabatique tout en laissant la possibilité de libérer des espaces pour la visualisation.

Le bloc cubique à l'intérieur de la cavité est maintenu par quatre supports en polymère fixés sur des tiges filetées. Les tiges sont entourées de tubes en PVC et traversent la paroi basse pour

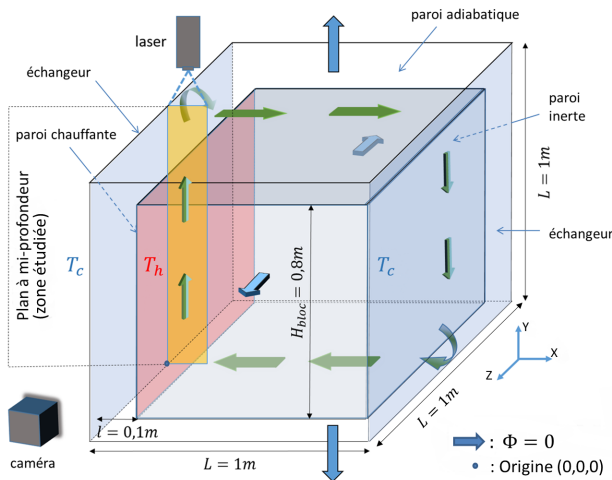


Figure 1 : Vue 3D de la cavité

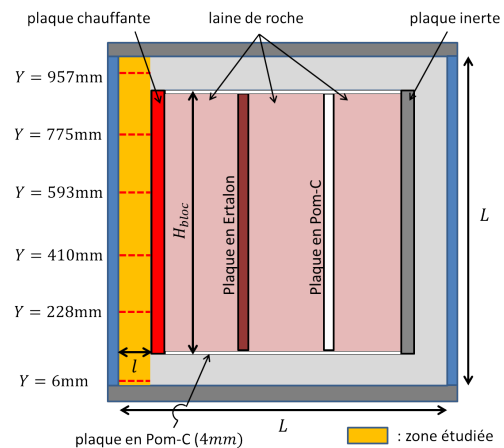


Figure 2 : Vue du plan à mi-profondeur de la cavité (profils de vitesses (en pointillés rouges))

prendre appui sur le bâti. Ces supports limitent les échanges conductifs (conductivité $\lambda = 0,025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et sont positionnés aux quatre extrémités de la face basse du cube afin de limiter les perturbations dans le plan médian où, comme nous le verrons par la suite, nous effectuerons nos mesures.

Le bloc cubique est notamment composé de deux plaques d'aluminium (conductivité $\lambda = 174 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) d'épaisseurs $e = 4 \text{ cm}$ dont l'une est chauffée (Fig. 1 et 2) de manière homogène par l'intermédiaire d'un fil résistif à une température $T_c = 325 \text{ K}$ et l'autre est considérée comme inerte. Ces deux plaques forment les faces latérales du bloc cubique placées en regard des parois à température imposée T_f de la cavité. Entre ces deux plaques est disposée une succession de panneaux en laine de roche, d'une plaque en POM-C et d'une plaque en Ertalon. De cette manière, la température diminue de la paroi chaude du bloc jusqu'à la paroi inerte en préservant la tenue mécanique de l'ensemble. Les faces avant, arrière, haute et basse du bloc cubique sont recouvertes de plaques de POM-C d'épaisseur 4mm pour préserver un bon état de surface. Ces plaques de POM-C sont elles-mêmes recouvertes d'une feuille de Mylar faiblement émissive. Quatre tiges filetées (deux face avant et deux face arrière) recouvertes de tubes en PVC maintiennent également les plaques en Ertalon et en POM-C.

La différence de température entre la paroi chaude du bloc cubique et la paroi de la cavité $\Delta T = T_c - T_f = 33 \text{ K}$ permet d'obtenir un nombre de Rayleigh basé sur la hauteur du bloc cubique utilisé dans cette étude $Ra_{H_{bloc}} = 1,4 \times 10^9$.

2.2. Conditions limites

Chacune des faces avant, arrière, haute et basse du bloc sont instrumentées avec 9 thermocouples. 14 thermocouples sont fixés sur la face intérieure de chacune des plaques d'aluminium du bloc cubique. Enfin, 10 thermocouples sont positionnés à l'intérieur du bloc. L'ensemble de ces 74 thermocouples ont permis un suivi précis des conditions de températures autour et à l'intérieur du bloc et ont permis de vérifier l'homogénéité en température de la paroi chaude (écart-type=0,6K).

2.3. Mesures de vitesses

Les mesures de vitesses sont effectuées par PIV (*Particle Image Velocimetry*). Un générateur de fumée produit le traceur de l'écoulement (particules d'huile de paraffine : $\rho = 856 \text{ kg.m}^{-3}$, $\text{diamètre} = 5 \mu\text{m}$) et la nappe laser est créée par un laser pulsé Nd : YAG Litron. Le nombre de Stokes associé $Stk \simeq 7 \times 10^{-4} \ll 1$ indique que les particules suivent précisément l'écoulement.

Les particules sont visualisées à l'aide d'une caméra *Tokina F100* de résolution $2320 \times 1720 \text{ pixels}^2$. La taille d'un pixel est de $7 \mu\text{m}$ et la taille du champ est fixée à $97 \times 72 \text{ mm}^2$. La largeur de l'image correspond à la largeur l de l'espace entre la paroi chaude à T_c et la paroi froide à T_f .

6000 doublets d'images sont acquis à une fréquence de 96 Hz pour chaque mesure et la durée entre deux images varie selon la zone visualisée (entre 1000 et 5000 μs). 6 zones sont étudiées le long de notre cavité (Fig.2). Pour chaque zone, les vitesses verticales et horizontales sont analysées par la suite. Au sein d'une même zone, les faibles vitesses observées au centre de la cavité nécessitent de prendre les premières images de chaque doublet. De nouvelles paires d'images adaptées à de petits déplacements sont ainsi créées.

Le traitement d'images est effectué avec l'algorithme "Adaptative PIV" de Dantec®. Cet algorithme adapte la taille des fenêtres d'interrogations (de 64×64 à 32×32) pour gagner en précision dans les zones où la densité de particules est suffisante. Un overlapping variant entre 75% et 50% permet de suivre les changements de tailles des fenêtres.

2.4. Recollement des données "basses" et "hautes" vitesses

Les champs moyens et RMS sont associés soit aux faibles vitesses soit aux vitesses plus importantes. Ils nécessitent donc d'être recoupés pour chaque zone.

Un critère seuil est choisi afin de délimiter, pour une zone, le champ des "hautes" vitesses et le champ des "basses" vitesses. Ce critère est déterminé grâce à la norme de la vitesse en pixels de déplacements des particules de la zone concernée. Si cette norme est inférieure à un pixel de déplacement, le champ des basses vitesses est choisi. En effet, en dessous du pixel de déplacement, les valeurs des vitesses associées aux champs des hautes vitesses sont calculées par l'algorithme et non plus mesurées. Afin d'assurer une transition continue entre les champs de vitesses hautes et basses, on choisit d'utiliser une fonction de transition classique comprenant une tangente hyperbolique :

$$V = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \tanh \left(\frac{x_d - x}{p} \right) \right) \cdot BV + \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \tanh \left(\frac{x - x_d}{p} \right) \right) \cdot HV \quad (1)$$

avec comme variables, x_d : valeur frontière (critère seuil) ; p : facteur de largeur ; HV : hautes vitesses ; BV : basses vitesses.

La valeur frontière x_d correspond à la position x à laquelle on choisit d'utiliser soit le champ des hautes vitesses soit le champ des basses vitesses. Cette valeur frontière est obtenue à partir des données expérimentales et varie selon la zone étudiée : $x_d = f(Y)$. La valeur de p est choisie de façon à minimiser le "saut" de vitesses observé entre le champ des hautes vitesses et le champ des basses vitesses mais modifie un plus grand nombre de points autour de la valeur frontière x_d . La valeur de p est fixée à $p = 5 \text{ mm}$ afin de limiter ce "saut" sans modifier de manière importante les points avoisinants.

3. Résultats

Les mesures ont été effectuées dans le plan médian. Des profils de vitesses moyennes sont tracés pour différentes côtes choisies équitablement le long de la cavité (Fig. 3) avec l'origine $Y = 0$ mm prise sur la partie supérieure de la paroi basse de la cavité. La position de ces côtes est schématisée Fig 2. L'écoulement est ascendant le long de la paroi à température T_c et le développement d'une couche limite est observé. La couche limite s'épaissit de la zone $Y = 228$ mm à la zone $Y = 775$ mm. Elle devient nulle dès lors que l'écoulement ne rencontre pas ou plus la paroi ($Y = 6$ mm et $Y = 957$ mm). Une couche limite suivant l'écoulement descendant est également observée le long de la paroi à température T_f . La couche limite descendante est moins épaisse que la couche limite ascendante. De plus, le maximum de vitesse en valeur absolue pour la couche limite descendante est environ quatre fois inférieur à celui de la couche limite ascendante (pour $Y = 593$ mm : $V_{max/as} = 0,360\text{m.s}^{-1}$, $V_{max/des} = 0,085\text{m.s}^{-1}$). Cette différence s'explique par le fait qu'une partie de l'écoulement ascendant se dirige vers le canal haut comme le montre le profil de vitesses horizontales moyennes pour $Y = 957$ mm (Fig4).

Pour les zones présentant une couche limite sur la paroi froide et la paroi chaude, les vitesses moyennes horizontales et verticales situées dans la zone centrale de la cavité sont proches de 0m.s^{-1} . Cette zone peut donc être considérée comme au repos en moyenne. Néanmoins, à mesure que l'on s'élève dans la cavité, les valeurs RMS des vitesses horizontales (correspondant à l'enveloppe autour des courbes de vitesse moyenne et représentées par des barres verticales de hauteur 2σ) proches de la paroi froide et dans la zone centrale augmentent significativement. Elles traduisent des perturbations de plus en plus importantes au sein de l'écoulement. La couche limite ascendante est moins affectée par ces perturbations. La vitesse, très majoritairement verticale, y est élevée et ne subit que très peu l'influence de l'écoulement situé dans la zone centrale.

Les zones $Y = 6$ mm et $Y = 957$ mm présentent des caractéristiques particulières. Elles sont dépourvues de limite à leur droite du fait de l'absence de paroi. Ainsi, la zone $Y = 6$ mm voit une partie de l'écoulement provenant de la couche limite descendante se diriger vers le canal bas. Cela se traduit par des vitesses horizontales moyennes positives. A l'inverse, et comme l'on se trouve très proche de la paroi basse, les vitesses verticales moyennes sont nulles. Pour la zone $Y = 957$ mm, l'écoulement qui se dirige vers le canal haut possède cette fois-ci une composante verticale moyenne et une composante horizontale moyenne non négligeables. La cote choisie est représentative du "virage" amorcé par l'écoulement.

4. Conclusion

Cette étude préliminaire a permis de caractériser la topologie globale de l'écoulement au sein de la cavité. Des mesures de vitesses ont été effectuées dans le plan médian. Un écoulement de couches limites avec vitesses nulles au centre de la cavité a pu être constaté. Des perturbations dans la zone centrale et proche de la paroi froide ont été mises en évidence. la direction globale de l'écoulement aux extrémités haute et basse de la cavité a également été étudiée. Une prochaine étape sera de pouvoir étudier les transferts de chaleur au sein de la cavité.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR pour le financement du projet MONACO 2025; les programmes CPER (2015-2020) et FEDER (2014-2020); ainsi que le personnel d'appui qui a participé à la mise en place de ce dispositif expérimental, en particulier H. Arlaud, C. Fuentes, J.-C. Fraudeau et N. Papin.

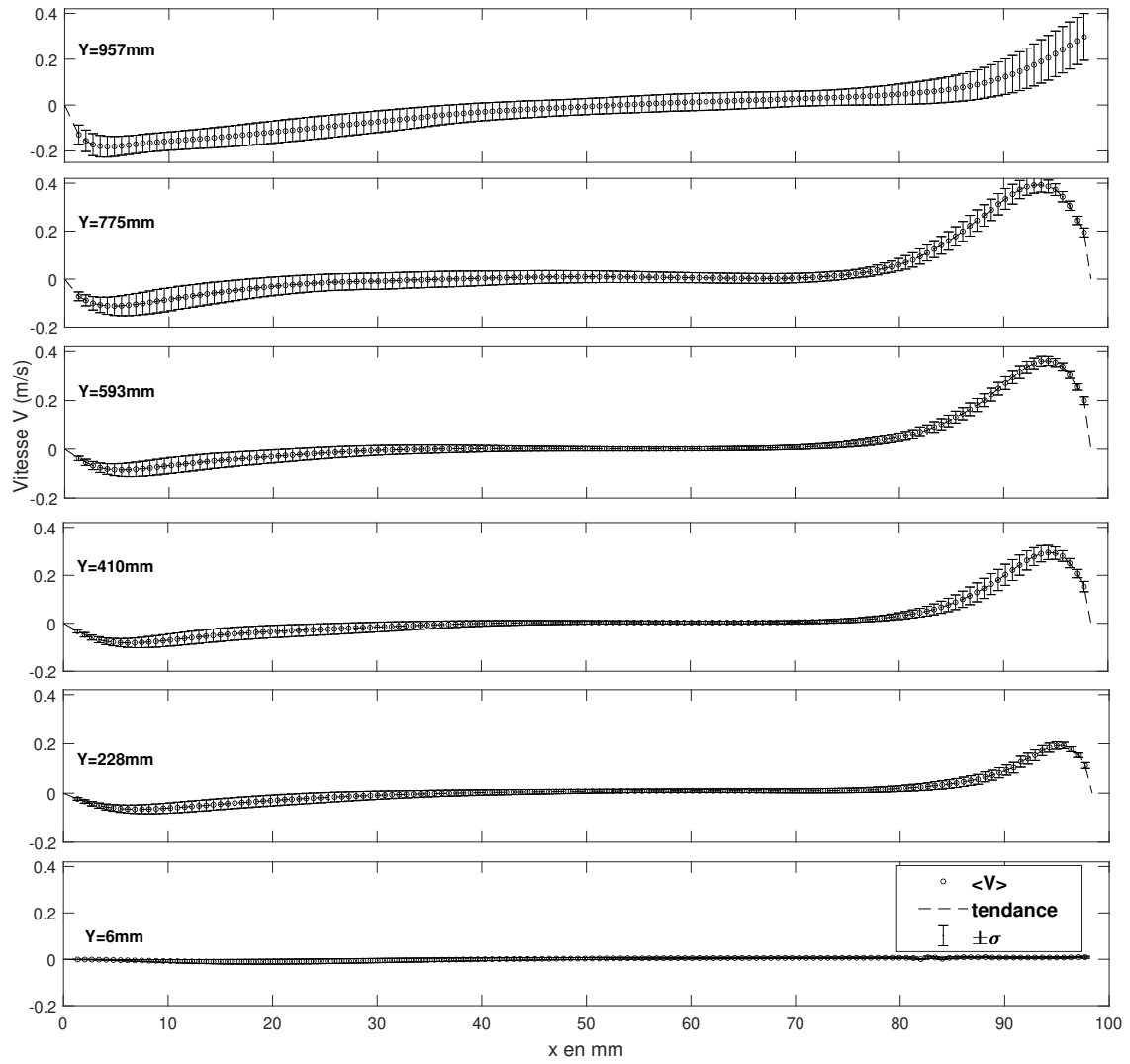


Figure 3 : Profils horizontaux de vitesse verticale moyenne, V , à différentes altitudes dans le canal chauffé. Les barres verticales correspondent aux vitesses RMS (hauteur 2σ).

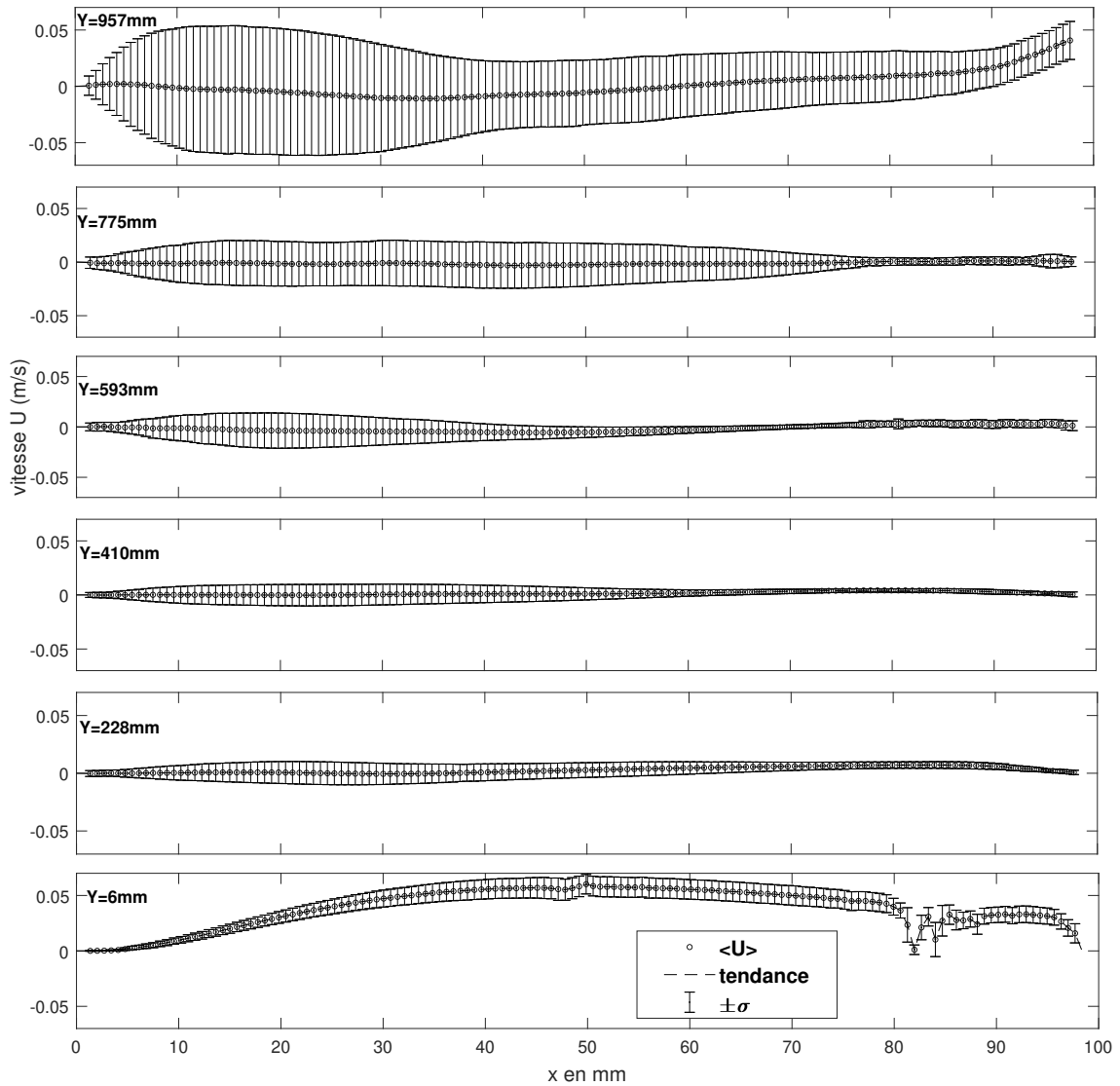


Figure 4 : Profils horizontaux de vitesse horizontale moyenne, U , à différentes altitudes dans le canal chauffé. Les barres verticales correspondent aux vitesses RMS (hauteur 2σ).

Références

- [1] House et al., Effect of a Centered Conducting Body on Natural Convection Heat Transfer in an Enclosure, *Numerical Heat Transfer*, 18 (1990) 213-2255.
- [2] Bhave et al., Natural convection heat transfer enhancement using adiabatic block : Optimal block size and Prandtl number effect, *Int. J. of Heat and Mass transfer*, 49 (2006) 3807-3818.
- [3] Liu et Pan-Thien, A complete conjugate conduction convection and radiation problem, *Computational Mechanics*, 24 (1999) 175-186.
- [4] Ha et Jung, A numerical study on three-dimensional conjugate heat transfer of natural convection and conduction in a differentially heated cubic enclosure with a heat-generating cubic conducting body, *Int. J. of Heat and Mass transfer*, 43 (2000) 4229-4248.
- [5] Saury et al., Natural convection in an air-filled cavity : Experimental results at large Rayleigh numbers, *Int. C. in Heat and Mass transfer*, 38 (2011) 679-687.
- [6] Salat et al., Experimental and numerical investigation of turbulent natural convection in a large air-filled cavity, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 25 (2004) 824-832.
- [7] Betts et Bokhari, Experiments on turbulent natural convection in an enclosed tall cavity, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 21 (2000) 675-683.