

# Réalisation de mesures couplées vitesse/température dans un écoulement de convection naturelle turbulent

Pierre BELLEOUD\*, Alina ILIE, Didier SAURY, Denis LEMONNIER

Institut Pprime - UPR CNRS 3346, CNRS - ENSMA - Université de Poitiers, Département Fluides Thermique Combustion, ENSMA, Téléport 2, 1 avenue Clément Ader – BP 40109, F-86961 Futuroscope CEDEX, France

\* (auteur correspondant : pierre.belleoud@ensma.fr)

**Résumé** - Une campagne de mesures couplées vitesse/température a été menée dans un canal vertical en convection naturelle avec un nombre de Rayleigh basé sur la hauteur de  $1,15 \times 10^9$ . L'écoulement est généré à l'aide d'un barreau chauffé placé en partie basse du canal. Ce type de mesures permet d'avoir accès aux flux thermiques turbulents ( $\langle u'T' \rangle$  et  $\langle v'T' \rangle$ ) mais nécessite de mesurer simultanément la vitesse et la température. Ces mesures de température et de vitesse sont réalisées par un dispositif associant un micro-thermocouple ( $12,7 \mu\text{m}$ ) et la PIV. Ces deux systèmes de mesure sont alors synchronisés permettant ainsi d'obtenir au même instant (et moyennant quelques précautions) la température et les composantes de la vitesse. Un post-traitement permet alors d'accéder aux flux thermiques turbulents.

## Nomenclature

$U$	vitesse horizontale, $m.s^{-1}$	$H_1$	flux thermique horizontal, $J.s^{-1}.m^{-2}$
$V$	vitesse verticale, $m.s^{-1}$	$c_p$	chaleur spécifique à pression constante, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$T$	température, $K$	<i>Symboles grecs</i>	
$H$	hauteur de la cheminée, $m$	$\alpha$	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
$L$	largeur de la cheminée, $m$	$\alpha_T$	diffusivité thermique turbulente, $m^2.s^{-1}$
$D$	profondeur de la cheminée, $m$	$\beta$	coefficient de dilatation thermique, $K^{-1}$
$x, y, z$	coordonnées dimensionnelles, $m$	$\Delta T$	différence de température, $\Delta T = T_b - T_{amb}$ $K$
$X^*, Y^*, Z^*$	coordonnées adimensionnées ( $X^* = x/L, Y^* = y/L, Z^* = z/D$ )	$\nu$	viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
$Ra_H$	nombre de Rayleigh basé sur la hauteur	$\nu_T$	viscosité turbulente, $m^2.s^{-1}$
$g$	accélération de la gravité, $m.s^{-2}$	$\rho$	masse volumique de l'air, $kg.m^{-3}$
$V_{réf}$	vitesse de référence, $m.s^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
$U^*, V^*$	vitesse adimensionnées par $V_{réf}$	'	fluctuation
$T^*$	température adimensionnée, $T^* = (T - T_{amb})/\Delta T$	$b$	barreau
$R_{AB}$	coefficient de corrélation entre deux signaux aléatoires A et B, $R_{AB} = \frac{\Sigma(A-\bar{A}) \cdot (B-\bar{B})}{(\Sigma(A-\bar{A})^2)^{1/2} \times (\Sigma(B-\bar{B})^2)^{1/2}}$	$amb$	ambiante
		$\langle X \rangle$	moyenne temporelle de la quantité X

## 1. Introduction

Le phénomène de convection naturelle fait l'objet de nombreuses recherches dans divers domaines, en particulier pour le bâtiment où on la retrouve généralement dans un régime turbulent. Les équations qui régissent la convection naturelle font apparaître un couplage entre la vitesse et la température (notamment dans le terme de flottabilité). Ce couplage est matérialisé par les termes traduisant les flux de chaleur turbulent ( $\langle U'T' \rangle$  et  $\langle V'T' \rangle$ ) que l'on retrouve par exemple dans les équations RANS. Une méthode de mesure a été développée dans le but d'obtenir simultanément les valeurs de la vitesse et de la température afin d'évaluer ces quantités.

Des mesures couplées fil chaud/fil froid existent mais ne sont pas applicables au cas de la convection naturelle car le fil chaud perturbe l'écoulement. Hormis cela, peu d'études ont été réalisées sur le sujet et concernaient principalement des flux turbulents dans des écoulements spécifiques de convection forcée où il n'est pas nécessaire de faire l'acquisition de mesures simultanément [1]. Néanmoins, des mesures simultanées de vitesse et température ont été réalisées par Tholet et Bogard [2] en 1994 pour calculer les flux de chaleur et des coefficients de corrélation sur le couplage entre la vitesse et la température. A cet effet, Ils ont associé une méthode de Vélocimétrie Laser bidimensionnelle (LDV 2D) pour les mesures de vitesse et un fil froid de  $0,64 \mu\text{m}$  de diamètre pour les mesures de la température. Lors de ces mesures, le fil froid était placé à  $0,3 \text{ mm}$  du volume de mesure LDV dans la couche limite thermique turbulente avec une vitesse d'écoulement libre de  $8 \text{ m.s}^{-1}$ . En 1995, Wardana [3] s'est intéressé à la corrélation entre la vitesse et la température dans une cheminée fortement chauffée en utilisant la LDV et un thermomètre à résistance. Pietri [4] a également effectué des mesures couplées par LDA associé à un fil froid de  $0,63 \mu\text{m}$  de diamètre au sein d'un jet légèrement chauffé. Plus récemment, en 2010, Felis [6] a aussi mené des mesures couplées vitesse-température par LDA et un thermocouple de type K de  $25 \mu\text{m}$  de diamètre dans un rideau d'air à double jet utilisé pour le confinement de la chaleur en cas d'incendie dans un tunnel. Une autre approche de mesure a été développée par Hu [7] dans le sillage d'un cylindre par méthode optique (Molecular Tagging Velocimetry and Thermometry, i.e. MTV&T). Des molécules phosphorescentes ont été utilisées comme traceurs pour la vitesse et la température et bien que cette étude ait été réalisée dans un écoulement d'eau, cette méthode fait intervenir des particules plus petites que pour la PIV. Néanmoins, aucune référence concernant l'utilisation de cette technique en convection naturelle turbulente n'a été trouvée dans la littérature.

Les mesures présentées ci-dessous ont été réalisées par PIV et un micro-thermocouple dans un canal vertical ouvert aux deux extrémités et où le mouvement est induit par un barreau chauffé situé dans la moitié inférieure de la cheminée. Le choix de la PIV pour les mesures de vitesse s'appuie sur la possibilité d'imposer la fréquence d'acquisition des données (ce qui est impossible en LDV !) ce qui facilite la synchronisation avec la mesure de température par micro-thermocouple. Le dispositif expérimental, la méthodologie utilisée ainsi que les premiers résultats seront présentés dans la suite de l'article.

## 2. Dispositif expérimental et méthodologie

### 2.1. Description du dispositif expérimental

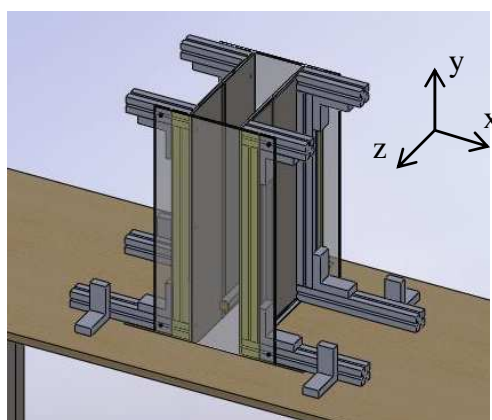


Figure 1 : Vue du dispositif expérimental

L'expérience est menée dans une cheminée ouverte (Figure 1) de  $60 \text{ cm}$  de hauteur ( $H$ ),  $12 \text{ cm}$  de large ( $L$ ) et  $30,5 \text{ cm}$  de profondeur ( $D$ ). Les parois latérales de la cheminée sont en

acier de 5 mm d'épaisseur, recouvertes de peinture noire et isothermes à la température ambiante. Une fente verticale (en Plexiglas®) de 5 mm de large est réalisée sur toute la hauteur de ces dernières et de permet de faire passer une nappe laser dans le plan vertical à mi-profondeur de la cheminée. Les faces avant et arrière sont en Plexiglas® pour permettre l'acquisition par PIV. Un barreau en dural ( $\epsilon=0,1$ ) de section carrée de 2 cm de côté est placé horizontalement à 12 cm du bas de la cheminée et 2 cm de la paroi de droite et maintenu à température constante grâce à une cartouche chauffante. Afin d'éviter toute perturbation extérieure, le dispositif est placé dans une cellule dédiée parallélépipédique de 3 m×5 m de section horizontale et 3 m de hauteur.

## 2.2. Métrologie associée

Le barreau est maintenu à température par une alimentation EA-PS 8360-15 (étant donnée la conductivité thermique du dural ( $134 \text{ W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), le barreau est isotherme). Cette température est mesurée à l'aide d'un thermocouple de type K de  $50\mu\text{m}$  de diamètre avec une erreur de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . De par leurs inerties et leurs grandes conductivités, les parois latérales peuvent être considérées comme isothermes (à la température ambiante). La température ambiante est mesurée avec un thermocouple de type T de  $100\mu\text{m}$  placé au sein d'une plaque d'aluminium. Les acquisitions sont réalisées par centrale d'acquisition Agilent 34972A.

Un thermocouple de type K ( $12,7\mu\text{m}$  de diamètre) a été spécialement conçu pour faire l'acquisition de la température à l'intérieur de la cheminée (Figure 2a). Il est monté sur un support à l'extrémité d'une canne coudée dont le déplacement est contrôlé par un système micrométrique piloté par ordinateur suivant les trois directions de l'espace. Les broches du support ont un diamètre de  $100 \mu\text{m}$  et une longueur de 2 cm. Avec ses dimensions, cette sonde possède un temps de réponse d'environ 1.6 ms, un facteur d'atténuation de 7% pour des mesures à 25 Hz [8] et peut être utilisée pour une vitesse maximum d'écoulement d'air d'environ 0,7 m/s. La soudure froide est plongée dans un bain thermostaté dont on vérifie la température à l'aide d'une sonde PT100. Les mesures de température sont réalisées avec un temps d'intégration de 0,1 NPLC (Number of Power Line Cycles) soit 2 ms. Le thermocouple est relié à un multimètre digital NI 4071 DMM monté sur un châssis NI PXI 1031 temps réel et les mesures sont réalisées dans la gamme  $\pm 100 \text{ mV}$  permettant d'obtenir une résolution de  $6\text{-}\frac{1}{2}$  digits jusqu'à 100Hz. Cela donne une résolution de  $0,025^\circ\text{C} \pm 0,01^\circ\text{C}$  pour la température. Le même nombre de mesures de température et de vitesse sont réalisés (soit 3197 valeurs).

Les mesures de vitesse sont réalisées par PIV (Figure 2b) avec un laser pulsé à 100Hz (Nd-YAG) qui génère une nappe laser d'environ 1 mm d'épaisseur. L'écoulement estensemencé avec des particules d'huile de paraffine de 1 à  $5\mu\text{m}$  de diamètre. L'acquisition des images est réalisée par une caméra Dantec SpeedSense 9040 CCD avec une fréquence de 25Hz et une résolution de 8 bits par pixel. La caméra est équipée avec un objectif de 60mm de distance focale ayant ouverture maximale de 2,8. Les images font  $108,3 \times 79,7 \text{ mm}^2$  pour une résolution de  $1632 \times 1200$  pixels. Les champs de vitesse sont obtenus par intercorrelations sur des fenêtres d'interrogation de  $32 \times 32$  pixels avec 50 % d'overlapping (soit  $\approx 1 \text{ mm}$  de résolution spatiale). En réalité, la distance de travail entre le plan laser et la caméra est optimisée pour pouvoir travailler avec un temps entre de pulse de 2 ms dans la gamme de vitesse considérée. Ainsi l'intervalle de temps entre deux impulsions laser a été réglé égal au temps d'intégration de la mesure de température. On procède ensuite à une analyse statistique sur 3197 champs de vecteurs de vitesse. Dans cette étude, on enregistre donc 3197 doublets d'images à 25Hz, soit une durée d'acquisition de 128 s. Ce temps est suffisant pour obtenir des quantités statistiques convergées. En effet, l'écart relatif entre les valeurs moyennes et RMS ne dépasse pas 3% lorsque l'on compare les résultats avec un temps d'acquisition de 600 s.

Enfin, l'enregistrement de la température du barreau, de l'air ambiant et des parois de la cheminée est synchronisé avec la première acquisition de PIV et est réalisé avec une station Agilent 34972A pendant toute la durée de la mesure par PIV avec une fréquence de 1 Hz.

### 2.3. Synchronisation des mesure

Afin de réaliser des mesures couplées de vitesse et de température, les acquisitions sont synchronisées avec un générateur d'impulsion / retard BNC 575. La fonction du BNC est de piloter le système PIV via le logiciel DynamicStudio (Dantec), une sortie a donc été rajoutée pour déclencher et synchroniser la mesure de température sur la première impulsion du laser.

### 2.4. Précautions expérimentales

Pour limiter les perturbations entre les deux techniques de mesure il est nécessaire de prendre quelques précautions. En effet, une prise de température et de vitesse rigoureusement au même point demanderait de placer le thermocouple dans le plan laser, ce qui engendrerait une élévation de température (voir Figure 3). Il faut donc se placer au plus près de la position souhaitée tout en restant en dehors de la nappe laser. A cet effet, une série de mesures de température a été réalisée suivant la direction  $z$  et autour du plan laser, afin de déterminer la position optimale où la mesure n'est pas affectée par le laser (Figure 3).

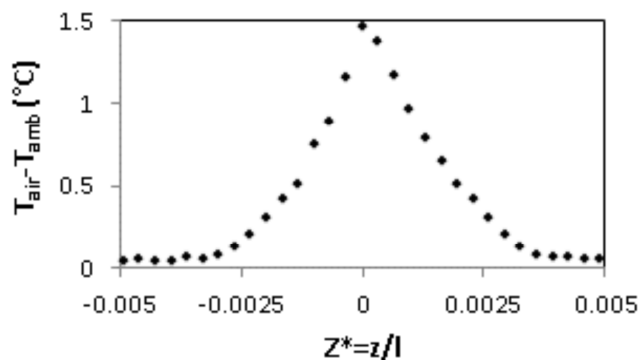


Figure 3 : *Ecart moyen de température au travers du plan laser suivant l'axe  $z$  ( $z=0$  : centre de la nappe laser).*

La Figure 3 présente l'élévation de température enregistrée par la sonde lors de sa traversée du plan laser (de l'ordre de  $1,4^{\circ}\text{C}$  dans le cas présent). La plus proche position non influencée par le laser est à  $Z^*=-0.003$ . On remarque également sur la Figure 4 que le thermocouple ne perturbe pas l'écoulement.

Enfin, pour évaluer les flux thermiques turbulents  $\langle u'T' \rangle$  et  $\langle v'T' \rangle$  en un point il est nécessaire d'utiliser le vecteur vitesse (issu de la PIV) le plus proche du point de mesure de température. On s'appuie pour cela sur la valeur du coefficient de corrélation entre les signaux de température et de vitesse  $R_{v,T}$ . En effet, dans un écoulement de convection naturelle, le fort couplage entre la vitesse et la température doit se retrouver dans les mesures (notamment entre la composante verticale de la vitesse et la température).

## 3. Résultats et discussion

On présente dans cette partie les résultats des mesures couplées vitesse/température pour un écoulement d'air en convection naturelle turbulente dans une cheminée disposant d'un barreau que l'on maintient à une température,  $T_b$ , de  $87,6^{\circ}\text{C}$  (voir Figure 4). Les mesures de température ont lieu à une côte de  $Y^*=1,83$ , soit 220 mm depuis l'entrée de la cheminée avec une température ambiante,  $T_{amb}$ , de  $21,2^{\circ}\text{C}$ . Dans ces conditions, on a un nombre Rayleigh basé sur

la hauteur  $Ra_H = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu} = 1,46 \times 10^9$  et une vitesse de référence  $V_{ref} = \frac{\alpha}{H} Ra_H^{1/2} = 1,34$  m/s. Notons que d'autres définitions du nombre de Rayleigh sont possibles [9], mais qu'elle que soit la façon de définir le nombre de Rayleigh, les conclusions demeurent inchangée.

◆ mesures couplées      — mesures non couplées

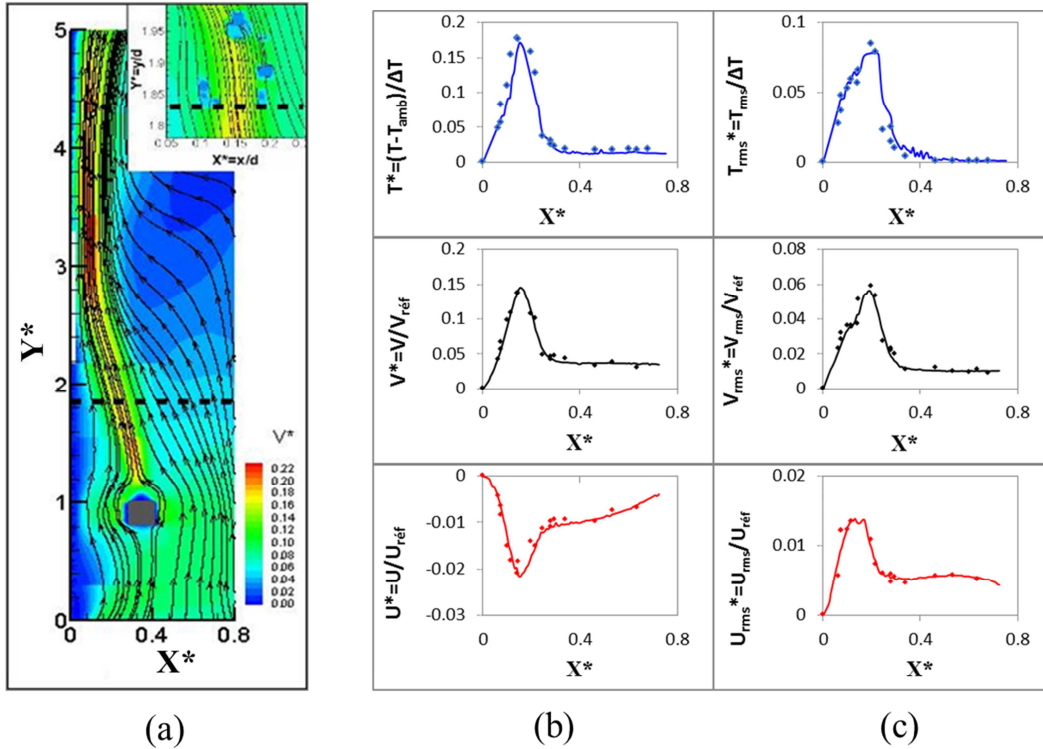


Figure 4 : (a) Lignes de courant et intensité de la composante verticale de la vitesse,  $V^*$  et zoom sur zone autour de la position du thermocouple. (b) Profils des valeurs moyennes adimensionnées de la température,  $T^*$ , et des composantes horizontale,  $U^*$ , et verticale,  $V^*$ , de la vitesse. (c) Profils des fluctuations RMS adimensionnées de la température,  $T^*_{RMS}$ , et des composantes horizontale,  $U^*_{RMS}$ , et verticale,  $V^*_{RMS}$ , de la vitesse.  $Y^*=1.83$  et  $Z^*=0$ .

La figure 4a donne une vision générale de la structure de l'écoulement par les lignes de courant. On note, particulièrement qu'il y a pas de perturbation au niveau de la position de la sonde. Des réflexions parasites sur la sonde crée néanmoins une zone de saturation locale dans laquelle la vitesse ne peut pas être déterminée. La figure 4b montre le bon accord entre le profil des valeurs de la température moyenne et la distribution des composantes de la vitesse moyenne. La température et la vitesse verticale augmentent jusqu'à un maximum de la même manière à  $X^*\approx 0,15$  (dans le panache du barreau) puis diminuent pour se stabiliser en dehors du panache. La vitesse horizontale a une évolution opposée, elle décroît jusqu'à un minimum aux alentours de  $X^*=0,15$  et augmente jusqu'à la sortie du panache. On peut noter que les valeurs RMS de ces quantités suivent des évolutions quasi-similaires, elles augmentent jusqu'à être maximales dans le panache et diminuent pour se stabiliser en dehors. On remarquera enfin que les graphes représentant les valeurs mesurées avec et sans couplage en figures 4a et 4b soulignent qu'il n'y a pas d'interférence entre les deux méthodes de mesure ; que ce soit une influence du laser sur la température ou de la sonde sur les profils de vitesse.

Les coefficients de corrélation entre la composante verticale de la vitesse et la température,  $R_{TV}$ , sont présentés dans la table 1. Ce dernier atteint des valeurs élevées dans le panache,

jusqu'à  $R_{V,T}=0,926$ , où les effets de la convection naturelle sont les plus importants et donc où le couplage entre la température et la vitesse le plus fort. En dehors du panache, la vitesse est quasi-nulle, les gradients de température sont faibles (peu d'effets de flottabilité) et logiquement la corrélation vitesse-température diminue.

$X^*$	$\langle T^* \rangle / T^*_{rms}$	$\langle U^* \rangle / U^*_{rms}$	$\langle V^* \rangle / V^*_{rms}$	$R_{TV}$	$R_{UV}$
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
<b>0,063</b>	0,048 / 0,027	-0,003 / 0,005	0,033 / 0,021	<b>0,912</b>	-0,697
<b>0,081</b>	0,111 / 0,060	-0,011 / 0,010	0,076 / 0,039	<b>0,926</b>	-0,857
<b>0,109</b>	0,109 / 0,053	-0,012 / 0,012	0,084 / 0,036	<b>0,876</b>	-0,580
<b>0,127</b>	0,134 / 0,052	-0,016 / 0,013	0,096 / 0,036	<b>0,827</b>	-0,517
<b>0,155</b>	0,171 / 0,052	-0,019 / 0,015	0,125 / 0,037	<b>0,751</b>	-0,467
<b>0,211</b>	0,178 / 0,074	-0,018 / 0,011	0,134 / 0,060	<b>0,814</b>	-0,261
<b>0,248</b>	0,127 / 0,079	-0,016 / 0,008	0,110 / 0,057	<b>0,912</b>	-0,085
<b>0,266</b>	0,074 / 0,061	-0,013 / 0,006	0,079 / 0,052	<b>0,918</b>	-0,172
<b>0,285</b>	0,036 / 0,022	-0,012 / 0,006	0,053 / 0,031	<b>0,882</b>	0,029
<b>0,322</b>	0,024 / 0,014	-0,010 / 0,005	0,048 / 0,025	<b>0,821</b>	0,108
<b>0,340</b>	0,022 / 0,010	-0,010 / 0,006	0,048 / 0,022	0,726	0,106
<b>0,396</b>	0,018 / 0,004	-0,010 / 0,004	0,043 / 0,011	0,564	0,053
<b>0,544</b>	0,017 / 0,001	-0,010 / 0,005	0,031 / 0,012	-0,442	0,227
<b>0,747</b>	0,017 / 0,001	-0,006 / 0,005	0,033 / 0,011	-0,335	0,006

Table 1 : Valeurs moyennes et fluctuations RMS de la température et de la vitesse à  $Y^*=1,83$  et leurs coefficients de corrélation respectif.

Afin de mieux apprécier le couplage vitesse/température, on peut observer les profils temporels adimensionnés de la composante verticale de la vitesse  $V^*$  et de la température  $T^*$  en  $X^*=0,266$ . Le coefficient de corrélation entre ces deux signaux est alors de 0,918 et on peut observer la très bonne concordance des variations temporelle sur les deux profils.

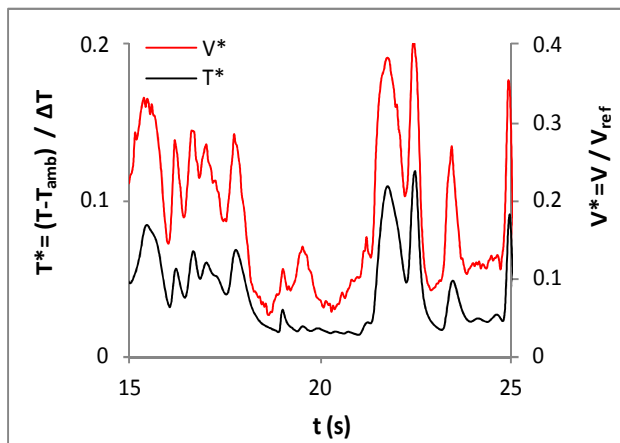


Figure 5 : Profils adimensionnés de la température et de la vitesse verticale en  $X^*=0,266$  et  $Y^*=1,83$ .

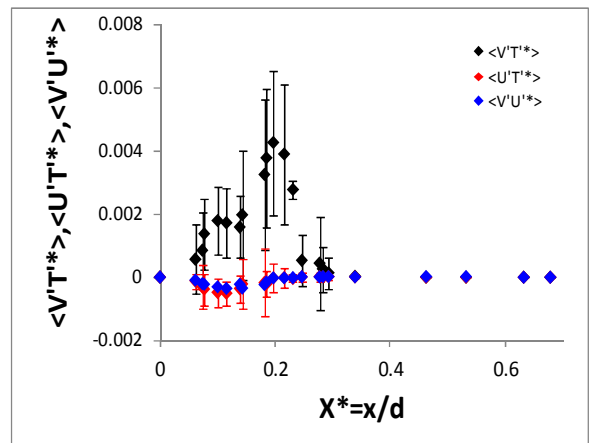


Figure 6 : Contrainte de Reynolds adimensionnée  $\langle U'V' \rangle^*$  et flux thermiques turbulents  $\langle U'T' \rangle^*$  et  $\langle V'U' \rangle^*$  en  $Y^*=1,83$ .

Ainsi, ces données couplées de vitesse et de température nous permettent d'évaluer une les flux thermiques turbulents adimensionnés  $\langle V'T' \rangle^*$  et  $\langle U'T' \rangle^*$  et ainsi qu'une tension de

Reynolds adimensionnée  $\langle U'V' \rangle^*$  (Figure 6). Il est à noter le comportement quasiment identique des quantités  $\langle U'T' \rangle^*$  et  $\langle U'V' \rangle^*$  auquel on pouvait s'attendre étant donnée la très bonne corrélation entre les signaux de température  $T^*$  et de vitesse verticale  $V^*$  et que les mêmes ordres de grandeur pour les deux signaux sont obtenus (cf. Figure 5).

De plus, avec l'analogie de Reynolds [10], on peut définir le flux thermique horizontal  $H_1$  et une diffusivité turbulente,  $\alpha_T$ , par les relations :

$$H_1 = \rho c_p \langle U'T' \rangle \quad (2)$$

$$H_1 \equiv -\rho c_p \alpha_T \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x} \quad (3)$$

On peut donc obtenir la relation entre le flux thermique turbulent et la composante horizontale du gradient de température moyenne  $\langle T \rangle$ . Ainsi,

$$\langle U'T' \rangle = -\alpha_T \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x} \quad (4)$$

De même, en utilisant une composante du tenseur des contraintes, on peut exprimer  $\langle U'V' \rangle$  en fonction du gradient de vitesse moyenne et ainsi faire apparaître une viscosité turbulente,  $\nu_T$  :

$$\langle U'V' \rangle = -\nu_T \frac{\partial \langle V \rangle}{\partial x} \quad (4)$$

Cela permet de définir un nombre de Prandtl turbulent,  $Pr_T$ , par le rapport de viscosité turbulente par la diffusivité turbulente. Ainsi,

$$Pr_T = \frac{\nu_T}{\alpha_T} = \frac{\langle U'V' \rangle}{\langle U'T' \rangle} \cdot \frac{d\langle T \rangle/dx}{d\langle V \rangle/dx} \quad (5)$$

La figure 7 présente le profil du nombre de Prandtl turbulent (équation 5) suivant l'axe x (pour  $Y^*=1,83$ ). Celui-ci se répartit autour d'une valeur moyenne de unitaire, dans une zone proche du panache ( $X^*$  entre 0,15 et 0,2) ce qui était attendu pour cet écoulement faiblement turbulent à la vue des profils de vitesse et de température mesurés. De plus, d'après [10] une valeur unitaire est souvent rencontrée.

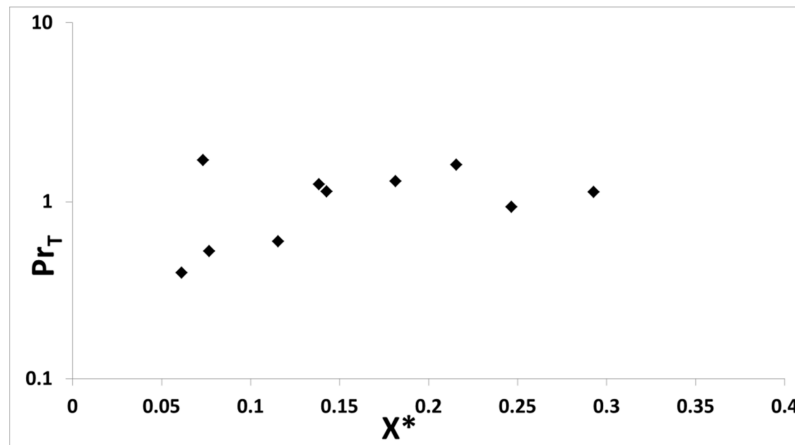


Figure 7 : Contrainte de Reynolds adimensionnée  $\langle U'V' \rangle^*$  et flux thermiques turbulents  $\langle U'T' \rangle^*$  et  $\langle V'T' \rangle^*$  en  $Y^*=1,83$ .

## 4. Conclusion

Cet article résume l'élaboration de la méthode de mesures couplées vitesse-température dans un écoulement de convection naturelle dans le but de contribuer au développement des modèles de turbulence, notamment par les quantités turbulentes des équations de Navier-Stokes. Dans

un premier temps, il a été vérifié que les deux méthodes n'interfèrent pas l'une avec l'autre. Il a fallu pour cela estimer la plus petite distance entre la sonde et la nappe laser. On peut également rappeler que ces deux méthodes de mesure ont été choisies car elles permettaient d'être synchronisées plus aisément. La bonne corrélation entre les signaux de vitesse et de température a ensuite été vérifiée. Cette corrélation est maximale dans le panache du barreau où les effets de flottabilité sont les plus importants. Une fois cette vérification faite, il a été possible d'obtenir les valeurs des quantités turbulentes (flux turbulents  $\langle U'T' \rangle$  et  $\langle V'T' \rangle$ ). Une évaluation du nombre de Prandtl turbulent a ainsi pu être faite.

Cette méthode s'avérant efficace, il est maintenant envisagé de la transposer à une cavité différentiellement chauffée, de grandes dimensions, où s'établissent des régimes turbulents de convection naturelle à haut nombre Rayleigh ( $1,2 \times 10^{11}$ ). Cela permettrait, entre autres, d'établir une base de données expérimentale dans le but de développer des modèles de turbulence adaptés à ces écoulements avec force de flottabilité prépondérantes.

## Références

- [1] M. Hirota, E. Mohri, H. Asano et H. Goto, Experimental study on turbulent mixing process in cross-flow type T-junction, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 31 (2010), 776-784.
- [2] K. A. Thole et D. G. Bogard, Simultaneous temperature and velocity measurements, *Meas. Sci. Technol.*, 5 (1994), 435-439.
- [3] I. N. G. Wardana, T. Ueda et M. Mizomoto, Velocity-temperature correlation in strongly heated channel flow, *Experimental in Fluids*, 18 (1995), 454-462.
- [4] L. Pietri, M. Amielh et F. Anselmet, Simultaneous measurements of temperature and velocity fluctuations in a slightly heated jet combining a cold wire and laser Doppler anemometry, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 21 (2000), 22-36.
- [5] M. F. Blair et J. C. Bennett, Hot-wire measurements of velocity and temperature fluctuations in a heated turbulent boundary layer, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 20 (1987), 209-16.
- [6] F. Felis, M. Pavageau, J. C. Elicer-Cortés et T. Dassonville, Simultaneous measurements of temperature and velocity fluctuations in a double stream-twin jet air curtain for heat confinement in case of tunnel fire, *Int. Com. in Heat and Mass Tr.*, 37-9 (2010), 1191-1196.
- [7] H. Hu et M. M. Koochesfahani, Flow visualisation and simultaneous velocity and temperature measurements in the wake of a heated cylinder, (11th International Symposium on flow visualization 9-12 août 2004) University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana, USA.
- [8] H. H. Bruun, *Hot-wire anemometry Principles and signal analysis*, Oxford University Press (1995) 21-45.
- [9] F. Penot, O. Skurtys et D. Saury, Preliminary experiments on the control of natural convection in differentially-heated cavities, *Int. J. of Thermal Sci.*, 49 (2010), 1911-1919.
- [10] H. Tennekes et J. L. Limley, *A first course in Turbulence*, The MIT Press (1972) 40-52.

## Remerciements

Les auteurs remercient le soutien financier du programme de recherche « ANR Habisol 4C » et le programme interdisciplinaire « Energie » du CNRS. Ils remercient également Mme Catherine Fuentes et M. Hervé Arlaud pour leur contribution.