

## Etude expérimentale d'une couche de mélange anisotherme

M.Ndoye<sup>1,2</sup>, E.Dorignac<sup>3</sup>, J.Carlier<sup>1</sup>, G.Arroyo<sup>1</sup>, J.Delville<sup>2</sup> & D.Heitz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cemagref, Unité Technologie des Equipements Agroalimentaires, 17 avenue Cucillé F-35044 Rennes, France

<sup>2</sup> Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques UMR CNRS 6609 Université de Poitiers, ENSMA  
CEAT 43 route de l'Aérodrome F-86036 Poitiers, France

<sup>3</sup> Laboratoire d'Etudes Thermiques UMR CNRS 6608 Université de Poitiers, ENSMA  
malick.ndoye@lea.univ-poitiers.fr

### Résumé :

Une couche de mélange anisotherme plane est étudiée dans différentes configurations de gradients forcés de vitesse et de température. L'écoulement est mis en oeuvre dans une soufflerie spécialement conçue pour générer des écoulements à basse vitesse avec génération séparée de deux courants à vitesses et températures contrôlées séparément. L'étude utilise une nouvelle technique d'anémométrie par fil chaud à surchauffe programmable dénommée PCTA. Le capteur permet de mesurer simultanément la vitesse et la température à haute fréquence en un même point. Les profils transversaux de vitesse et de température mesurés le long de la direction principale d'écoulement donnent accès aux paramètres d'expansion de la couche de mélange. Les expansions de l'épaisseur de vorticités et de l'épaisseur de mélange thermique sont comparées, en fonction du paramètre  $\lambda$  de cisaillement dynamique et du nombre de Richardson. L'utilisation de l'anémomètre PCTA ouvre des perspectives d'analyse fine des interactions vitesse-température dans le mélange turbulent.

### Abstract :

A non-isothermal plane mixing-layer has been studied in several conditions as regard the velocity and temperature gradients imposed as inlet conditions. The flow was generated in a wind-tunnel specifically designed to study the mixing of low velocity parallel streams adjusted separately in velocity and temperature. A novel technique, based on a Parameterizable Constant Temperature Anemometer (PCTA), was used to measure simultaneously the velocity and the temperature at a single point at high frequencies. The transverse profiles obtained at different positions along the streamwise direction giving access to the expansion parameters of the mixing-layer, the expansion rates of the vorticity thickness and thermal mixing thickness were compared in relation with the coefficient  $\lambda$ , related to the shear stress, and the Richardson number. The ability of the PCTA to deliver simultaneous measurements at high frequency will enable, in future works, a finer analysis of velocity-temperature interactions in the turbulent mixing process.

### Mots-clefs :

**Turbulence ; thermoanémométrie ; surchauffe multiple**

## 1 Introduction

L'étude des couches de mélange anisothermes est menée conjointement par nos laboratoires en vue d'améliorer la maîtrise des confinements thermiques par la réduction du mélange dans les situations aérauliques de type écoulements turbulents cisailés. Les applications principales se situent dans les rideaux d'air et dans les soufflages ultra-propres et froids mis oeuvre dans l'industrie alimentaire et la grande distribution. Les résultats présentés ici portent sur une couche de mélange horizontale générée par la rencontre de deux flux parallèles à des vitesses et des températures différentes. L'écoulement a été généré dans la soufflerie à basses vitesses du Cemagref de Rennes. Les données analysées sont issues d'un anémomètre de type nouveau, appelé PCTA, qui mesure simultanément la vitesse et la température à haute fréquence en un

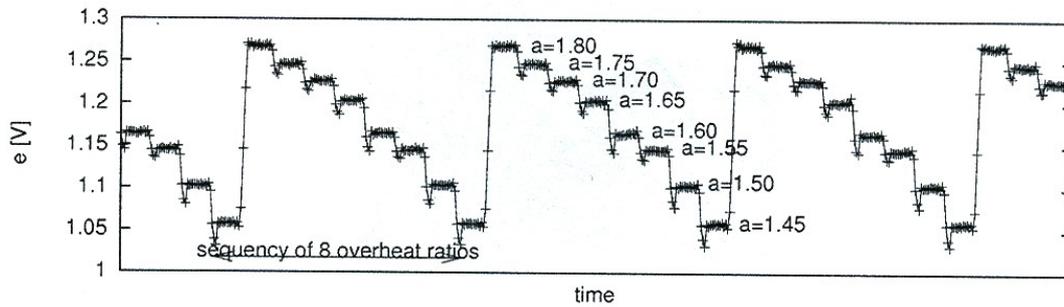


FIG. 1 – Allure de la réponse de l’anémomètre PCTA pour un réglage de motif à 8 surchauffes.

point, en appliquant une nouvelle technique d’anémométrie à fil chaud (surchauffes multiples programmables). Après une présentation de la soufflerie et des configurations d’écoulements, les profils de vitesses et températures et les RMS associées sont présentés. L’analyse des influences croisées des gradients de vitesse et de température est menée à partir des différents paramètres d’expansion de la couche de mélange.

## 2 Méthode expérimentale

Cette étude expérimentale est basée sur l’utilisation d’un nouvel anémomètre mis au point dans nos laboratoires. Il s’agit d’un anémomètre basé sur le principe du fil chaud à surchauffes mutiles pour la mesure simultanée de la vitesse et de la température. Le principe développé a été dénommé **PCTA** pour Paramétrizable Constant Temperature Anemometer (Anémomètre à Température constante à Surchauffe Programmable).

### 2.1 Principe de la surchauffe multiple

L’anémomètre PCTA met en oeuvre la technique classique de l’anémométrie à température constante décrite par Bruun (1993) et Perry (1982). En partant du fait que le fil chaud est principalement sensible à la vitesse pour des surchauffes élevées et à la température pour des surchauffes faibles (fil froid), différents auteurs ont mis en oeuvre un principe de surchauffes multiples pour mesurer à la fois la vitesse et la température dans les écoulements, soit avec plusieurs capteurs en parallèle, soit avec une succession de surchauffes différentes appliquées à un même capteur (Corrsin (1947), Kovaszny (1950), Walker and al (1990), Saez (1998)). Ces auteurs ont ainsi eu accès à des moments jusqu’à l’ordre deux en vitesse et température, mais pas à la mesure simultanée vitesse-température à haute fréquence.

### 2.2 Principe de l’anémomètre PCTA

Le PCTA repose sur la mise au point d’une électronique spécifique capable de faire varier rapidement la surchauffe du fil chaud et de reproduire à fréquence constante un motif unitaire de paliers successifs de surchauffes. La figure 1 donne l’allure caractéristique d’un motif unitaire à 8 surchauffes. Le nombre de paliers de surchauffe par motif peut varier de 2 à 8. La durée d’un motif peut être réglée entre 100 et 1000 microsecondes.

Pour avoir accès à haute fréquence à la mesure simultanée de la vitesse et de la température en un même point, l’acquisition en volts est suivie d’un traitement de données qui permet d’extraire, pour chaque motif unitaire, une valeur de vitesse et une valeur de température. Avec

un fil suffisamment fin, la fréquence d'acquisition ainsi obtenue peut atteindre plusieurs kHz. La performance du PCTA dépend étroitement de l'utilisation d'une méthode d'étalonnage dite dynamique dans laquelle le capteur mesure, sur un banc d'étalonnage spécifique, une vitesse variant de manière périodique et une température décroissante. Les principes de mesure, de traitement du signal et d'étalonnage sont décrits plus en détail dans Ndoye et al (2007) Seules les grandes lignes en sont reprises ici. L'équation utilisée pour décrire la relation entre la réponse en tension du fil et le couple (U,T) de vitesse et température dans le fluide peut être choisie parmi plusieurs équations non linéaires décrites en particulier par Bruun [1]. La relation la plus opérationnelle pour le PCTA dans les conditions de la présente étude est :

$$e^2 = (a + bU^n)(T_f - T) \quad (1)$$

dans laquelle  $e$  est la tension instantanée mesurée,  $U$  et  $T$  sont les inconnues, alors que la température du fil  $T_f$ , les coefficients  $a$  et  $b$  et l'exposant  $n$  sont des paramètres associés à un niveau de surchauffe. Une seule valeur de tension est extraite automatiquement pour chaque palier et deux hypothèses fortes sont posées : 1. la répétabilité de l'application des surchauffes est telle que les paramètres  $a$ ,  $b$ ,  $n$  et  $T_f$  sont valables pour un niveau de surchauffe sur l'ensemble des motifs et 2.  $U$  et  $T$  sont considérés constants sur un motif, ce qui revient à filtrer les variations de  $U$  et  $T$  à la fréquence de répétition des motifs.

La précision de la méthode PCTA a été évaluée en estimant successivement l'incertitude liée à la technique de traitement du signal, à la procédure d'étalonnage en dynamique et au processus de mesure, suivant les recommandations du GUM (2004).

### 3 Dispositif expérimental

Une couche de mélange est générée par une soufflerie équipée de deux circuits aérauliques juxtaposés fonctionnant en circuit ouvert (figure 2). Chaque circuit aéraulique est constitué d'un ventilateur de 7,5 kW équipé d'une batterie froide de 42 kW et d'un réchauffeur de 31 kW. Les deux écoulements d'air aspirés séparément en (1) passent par un caisson de mise en pression, une chambre de conditionnement équipée d'écrans, puis un convergent. Toute cette partie amont est divisée en deux veines séparées par une plaque isolante épaisse (2). A la sortie du convergent, les deux courants se rencontrent au bord de fuite de la plaque séparatrice, dont la partie finale est effilée. La couche de mélange ainsi générée se développe dans une veine d'essai de  $1m^2$  de section carrée et de 3m de longueur. A l'aval de la veine d'essai, le flux mélangé est évacué par un divergent (3). La vitesse et la température des deux écoulements parallèles est réglée séparément dans la gamme  $[0,5 : 5]$  m/s et  $[5 : 35]$  °C. A l'entrée de la veine d'essai, le taux de turbulence dans les deux écoulements parallèles est, avant mélange, inférieur à 1% pour la vitesse et de l'ordre de 1% pour la température.

Classiquement, le développement de la couche de mélange à partir de son origine physique (le bord de fuite de la plaque séparatrice) dépend de l'état des couches limites développées en amont de part et d'autre de la plaque séparatrice. Un dispositif de déclenchement de la turbulence sur les deux faces de la plaque a été testé et adopté pour obtenir, dans toutes les configurations d'essai, des conditions comparables d'état de ces couches limites. La soufflerie peut pivoter autour de son axe pour changer l'orientation du plan central de la couche de mélange par rapport à la gravité, pour des études fines de la convection mixte. Cette dernière fonctionnalité n'a pas été utilisée dans l'étude présentée ici.

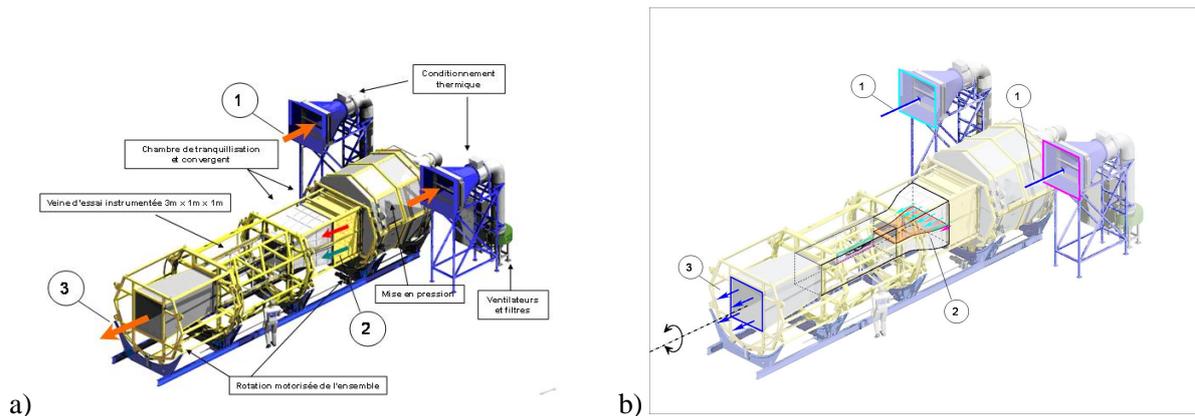


FIG. 2 – Soufflerie du Cemagref-Rennes pour l'étude des couches de mélange dynamiques et thermiques à bases vitesses : a) : vue générale ; b) : détails.

#### 4 Configurations étudiées

La figure 4 schématise l'écoulement de couche de mélange généré dans la veine d'essai en configuration de couche plane horizontale. Les deux écoulements ont, au bord de fuite de la plaque séparatrice des profils uniformes hors les couches limites développées sur la plaque et sur les parois hautes et basses de la soufflerie. Ces deux profils ont, hors couches limites, des conditions de vitesse et de température notées  $(U_1, T_1)$  pour la veine du bas et  $(U_2, T_2)$  pour la veine du haut. En raison des applications visées par cette étude, la température la plus basse a toujours été associée à la vitesse la plus forte.

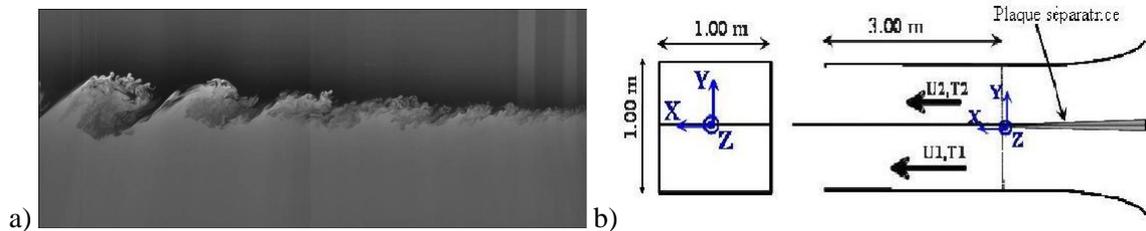


FIG. 3 – a) Visualisation de la couche de mélange par ensemençement de fumée dans la veine basse ( $U_1 = 4\text{m/s}$ ,  $U_2 = 2\text{m/s}$ ,  $T_1 = 10^\circ$ ,  $T_2 = 35^\circ$ ); b) Schéma de principe de l'écoulement de couche de mélange étudié dans la veine d'essai de la soufflerie.

On désigne classiquement par configuration *stable* une configuration dans laquelle le gradient global de température  $(T_2 - T_1)/\Delta y$  est positif,  $\Delta y$  étant ici un terme générique pour désigner l'épaisseur verticale de la couche de mélange thermique, désignée plus loin par  $\delta_T$ , l'épaisseur de la couche de mélange au sens de la vitesse étant  $\delta_\omega$ , l'épaisseur de vorticité. Ce cas correspond à un écoulement froid situé en dessous de l'écoulement chaud ( $T_1 < T_2$ ). A l'inverse, on désigne par configuration *instable* un écoulement dans lequel  $T_1 > T_2$  (Viollet (1997)). Le paramètre conditionnant principalement l'expansion dynamique de la couche de mélange en situation isotherme ( $T_1 = T_2$ ) est le paramètre  $\lambda = (U_1 - U_2)/(U_1 + U_2)$  (Brown and Roshko (1974)). Pour étudier les influences respectives du gradient de vitesse  $(U_2 - U_1)/\delta_\omega$  et du gradient de température  $(T_2 - T_1)/\delta_T$  sur les expansions de couche de mélange, nous avons fait varier  $U_1$  et  $U_2$  en maintenant des couples  $(U_1, U_2)$  permettant des comparaisons basées sur  $\lambda$ . Les configurations suivantes sont décrites et analysées dans la présente étude :

	$U_1$ [m/s]	$U_2$ [m/s]	$T_1$ [°C]	$T_2$ [°C]	$\lambda$	
config1	3.50	2.5	10	20	1/6	stable
config2	3.5	2.5	10	35	1/6	stable
config3	4.5	1.5	10	35	1/2	stable
config4	3.5	2.5	35	10	1/6	instable
config5	1.5	4.5	35	10	1/2	instable

TAB. 1 – Différentes configurations d'écoulements testées

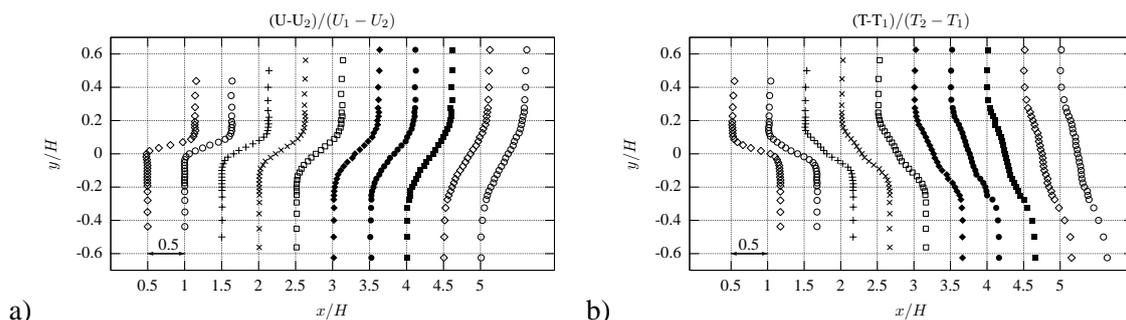


FIG. 4 – Profils de la vitesse moyenne (a) et de la température moyenne (b) dans la couche de mélange pour la configuration config4

## 5 Résultats

Un exemple des profils de vitesses et de températures obtenues simultanément dans la couche de mélange est représenté sur les figures 4 et 5. Les expansions de la zone de mélange thermique et de la zone de mélange dynamique sont analysées en fonction du paramètre de cisaillement de la couche de mélange et de l'influence relative des effets thermiques (cf. figure 6). Nous définissons alors un nombre de Richardson global basé sur les gradients de vitesse et de température à l'entrée de la section d'essai défini par :

$$R_i = \beta g \frac{(T_2 - T_1)/l_T}{((U_1 - U_2)/l_U)^2} \quad (2)$$

où  $\beta$  est le coefficient de dilatation défini par  $1/\bar{T}$ ,  $l_T$  et  $l_U$  sont des échelles de longueur caractéristiques des gradients de vitesse et de température à l'entrée de la section d'essai calculées à partir des épaisseurs de couches limites correspondantes. Comme on peut le voir sur la figure 6, les différentes expansions de la couches de mélange (dynamique et thermique) sont des fonctions croissantes du paramètre de cisaillement  $\lambda$ . Les configurations d'écoulement dites *stables*, testées ici ayant des nombres de Richardson faibles, nous n'avons pas observé d'effet significatif de  $R_i$  sur l'expansion de la zone de mélange thermique. L'analyse des densités de probabilités jointes vitesse-température devrait permettre de mieux cerner l'influence relative de la température dans le mélange scalaire-vitesse. Un exemple des pdf obtenues dans la couche de mélange est représenté sur la figure 7.

## 6 Conclusion

L'anémomètre PCTA a permis de réaliser des acquisitions simultanées de vitesse et de température au même point avec une fréquence élevée. De ces mesures ont été extraits des profils

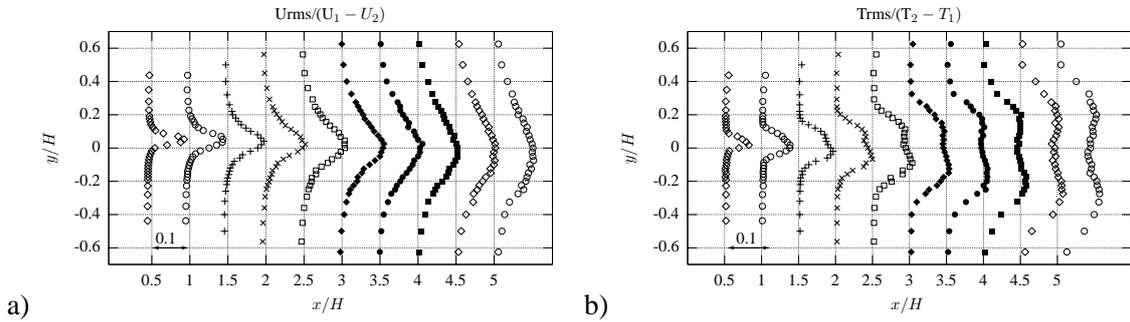


FIG. 5 – Profils des fluctuations de vitesses (a) et des fluctuations de température (b) dans la couche de mélange pour la config.4

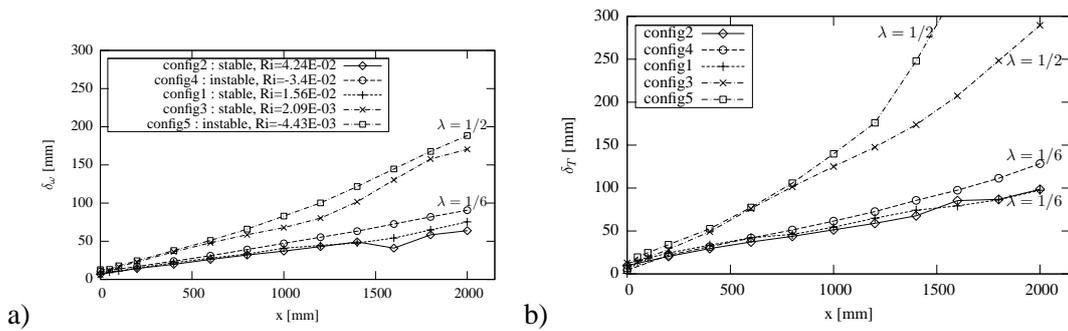


FIG. 6 – Expansions de l'épaisseur de vorticité (a) et de l'épaisseur de la zone de mélange thermique (b) suivant l'axe longitudinale de la couche de mélange

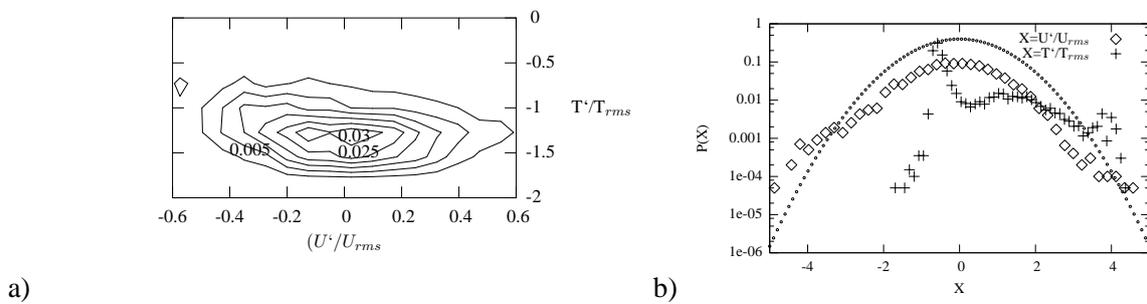


FIG. 7 – Exemple de densités de probabilité obtenues dans la couche de mélange pour la config4 : (a) PDF jointes de la vitesse et de la température ; (b) PDF de la vitesse et de la température

de vitesse et de température conduisant à une analyse des paramètres d'expansion de la couche de mélange. Il apparaît que la combinaison du paramètre  $\lambda$  lié au cisaillement dynamique avec le nombre de Richardson global donne une première approche prometteuse pour explorer les possibilités d'optimisation, en réduction ou en augmentation du mélange. La poursuite de cette étude doit permettre, avec une approche basée sur le nombre de Richardson local et en utilisant les corrélations vitesse-température restituées par le PCTA, d'affiner la compréhension des interactions vitesse-température dans le mélange.

## 7 Remerciements

Nous souhaitons remercier pour leur soutien financier la Région Bretagne (France) allocation nA3C905, la fondation PPRIMME de l'Université de Poitiers et le ministère français de la recherche allocation nř032670 (projet NMAC2003-24 FOEHN). Nous tenons également à remercier Carine Fourment ( Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques de Poitiers) et Jean Marc Mougenot (Centre d'Etudes Aérodynamiques et Thermiques de Poitiers, France) pour leur appui sur le développement de l'anémomètre PCTA.

## Références

- Brown and Roshko. 1974 On density effects and large structure in turbulent mixing layers. *J. Fluid Mech.* **64** part4, 775-816
- Bruun, H.H. 1995 hot wire anemometry, principles and signal analysis. *Oxford Science Publications*
- Corrsin, S. 1947 Extended applications of the hot-wire anemometry flows. *Rev.Sci.Instr.* **18** 469-471
- GUM 2004 Guide to the expression of Uncertainty Measurement. Supplement 1. Numerical methods for the Propagation of distributions. *Draft (2004)*
- Kovaszny, L.S.G. 1950 The hot-wire anemometer in supersonic flows. *J.Aero.Sci.* **17** 565-572
- Ndoye, M. 2007 Parameterizable Constant Temperature Anemometer for simultaneous velocity and temperature measurements in turbulent flows. *Proceeding of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows. Lyon, July 2007. ISAIIF8-00122*
- Perry, A.E. 1995 hot wire anemometry. *Oxford Science Publications*
- Saez, M. 1998 Contribution à l'étude expérimentale de la convection mixte. *Phd thesis. Université Grenoble I.*
- Viollet, P.L. 1997 Mécanique des fluides à masse volumique variable. *Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.*
- Walker, Ng and Walker. 1990 Experimental comparison of two hot-wire techniques in supersonic flow. *AIAA Journal* **27** 1074-1080