

## Analyse fine des interactions entre fluctuations de vitesse et de température dans une couche de mélange

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

<sup>1</sup> : Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques - UMR CNRS 6609 - Université de Poitiers - ENSMA

<sup>2</sup> : Laboratoire d'Etudes Thermiques - UMR CNRS 6608 - Université de Poitiers - ENSMA

<sup>3</sup> : Cemagref, Université européenne de Bretagne, 17 av de Cucillé, CS64427, 35044 Rennes Cedex, France

malick.ndoye@lea.univ-poitiers.fr

### Résumé :

On s'intéresse dans ce travail au couplage vitesse-température au sein d'une couche de mélange anisotherme modélisant une frontière aéraulique entre deux masses d'air de vitesses et de températures différentes telles que rencontrées dans les dispositifs de rideaux d'air séparateurs d'ambiances. Les mesures, basées sur une nouvelle technique d'anémométrie fil chaud, ont été obtenues à partir d'un fil chaud unique fonctionnant à surchauffe variable. Le synchronisme des mesures permet une analyse fine des interactions entre les fluctuations de vitesse et de température dans le mélange turbulent : une analyse en quadrants confirme la prédominance, dans le flux de chaleur turbulent, des éjections aux points selles des régions inter-tourbillonnaires.

### Mots-clefs :

**Flux de chaleur - Mélange turbulent - Anémométrie à fil chaud - Analyse en quadrants**

### 1 Introduction

Le transport de scalaire, comme la température ou la concentration, par un écoulement de type couche de mélange est communément rencontré dans de nombreuses applications industrielles et écoulements environnementaux. Parmi celles-ci se situe la maîtrise localisée des environnements thermiques qui est un enjeu important dans l'industrie.

Des études sont menées conjointement par nos laboratoires en vue d'améliorer le confinement thermique par la réduction du mélange dans des situations aérauliques de types couches de mélange. Dans ces écoulements cisailés, le processus de mélange de température dépend largement des tensions mécaniques imposées par le champ de vitesse, d'où l'intérêt de comprendre le couplage inhérent entre les champs de vitesse et de température. Ce couplage apparaît dans les équations de transport de scalaire sous la forme d'un flux de chaleur vectoriel dont une composante est  $\overline{u'T'}$ .

Nous proposons une analyse du mécanisme de ces interactions responsables du transport de scalaire à partir de mesures du flux de chaleur à travers une couche de mélange anisotherme à basses vitesses. Grâce à un nouvel anémomètre à surchauffes multiples, la mesure simultanée et en un même point des fluctuations de vitesse  $u'$  et de température  $T'$  permet une analyse fine de la turbulence basée sur les corrélations, les densités de probabilités conditionnelles et la décomposition en quadrants du flux de chaleur. Après une présentation succincte de la configuration expérimentale et des caractéristiques de l'écoulement nous proposons ici une analyse en quadrants du flux de chaleur.

## 2 Configuration expérimentale et moyens de mesure

La couche de mélange est générée dans une soufflerie à basses vitesses spécifique équipée de deux circuits aérauliques juxtaposés et fonctionnant en circuit ouvert. Deux courants d'air de vitesses différentes et de températures différentes, aspirés indépendamment, traversent une chambre de conditionnement équipée d'écrans puis un convergent tout en restant thermiquement isolés par une plaque séparatrice. A la sortie du convergent, les deux courants pénètrent dans une veine d'essais en se rencontrant à l'aval d'une seconde plaque séparatrice effilée dans sa partie finale, puis entament un processus de mélange. La veine d'essais est horizontale, longue de 3 m et de section 1 m<sup>2</sup>. Une description complète de la soufflerie peut être trouvée dans [5].

L'écoulement de couche de mélange généré dans la veine d'essais est schématisé sur la figure 1. Les conditions d'entrée en vitesse et température sont  $U_1 = 4$  m/s et  $T_1 = 10^\circ\text{C}$  pour

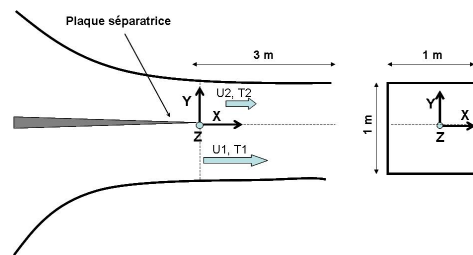


FIGURE 1 – Système de coordonnées associé à la soufflerie de mesures.

la veine du bas,  $U_2 = 2$  m/s et  $T_2 = 35^\circ\text{C}$  pour la veine du haut, soit un rapport de vitesse  $r = 0.5$ , un paramètre de cisaillement  $\lambda = \frac{1-r}{1+r} = 0.33$  et une différence de température  $\Delta T = 25$  K.

Les mesures sont effectuées à l'aide d'une sonde fil chaud classique connectée à un nouvel anémomètre à température variable, nommé PCTA (Parameterizable Constant Temperature Anemometer), spécialement conçu dans nos laboratoires pour la mesure simultanée de vitesse et de température au même point avec un fil chaud unique. Dans cette technique faisant appel à la surchauffe multiple ([1], [7]), on fait varier de manière périodique la température du fil par un convertisseur numérique-analogique. Un exemple d'évolution de la tension anémométrique instantanée est donné à la figure 2. La fréquence de répétition des motifs peut aller jusqu'à 3000 Hz. La procédure d'étalonnage dynamique et le calcul des valeurs instantanées de vitesses et

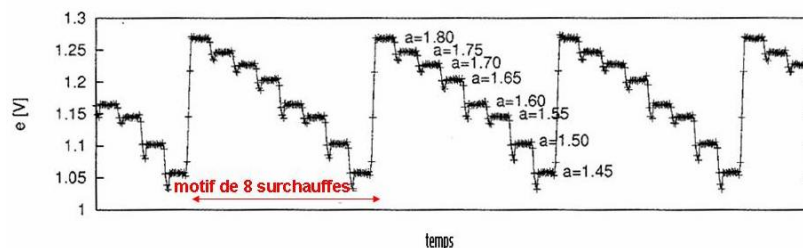


FIGURE 2 – Exemple de signal issu de l'anémomètre PCTA.

températures décorrélées sont basés sur des algorithmes de Levenberg Marquardt.

### 3 Caractérisation de l'écoulement

La caractérisation détaillée de l'écoulement peut être trouvée dans [5]. Les profils des valeurs moyennes de la température comportent une triple inflexion en forme de *S* contrairement à ceux de la vitesse, comme l'ont également noté Masutani and Bowman [4] ou Fiedler [2] dans des couches de mélange de scalaire passif. Parallèlement, on trouve une évolution classique pour les fluctuations de vitesse alors que les fluctuations de température ont une évolution bimodale présentant deux pics. Ces caractéristiques sont illustrées sur la figure 3 qui met en évidence une similitude de l'écoulement à partir de  $x/\Theta_{H.V.} = 500$ , où  $\Theta_{H.V.}$  est l'épaisseur de quantité de mouvement de la couche limite mesurée du côté haute vitesse de la plaque séparatrice.

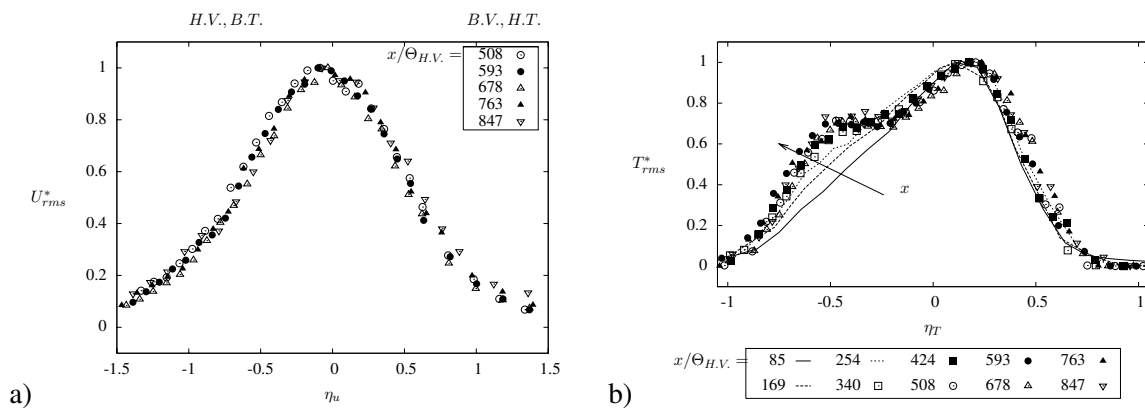


FIGURE 3 – Exemple d'évolutions longitudinales des profils de fluctuations de : (a) vitesse, (b) température ;  $\lambda = 0.33$ ,  $\Delta T = 25$  K. Les valeurs RMS de vitesse  $U_{rms}^*$  et température  $T_{rms}^*$  sont normalisées par leur valeur maximale locale. Les positions transversales sont repérées par les variables de similitude  $\eta_u$  et  $\eta_T$ .

### 4 Analyse en quadrants du flux de chaleur

Nous présentons ici les résultats d'une analyse en quadrants des fluctuations de vitesse et de température. Celle-ci permet d'étudier la contribution au flux de chaleur des principaux mouvements au sein de l'écoulement.

L'analyse en quadrants, initialement introduite par Lu and Willmarth [3], consiste à partager le signal instantané en quatre quadrants, chacun correspondant à l'une des quatre combinaisons possibles de  $u'$  et  $T'$  en termes de signes (cf figure 4). La moyenne temporelle de  $u'T'$  calculée

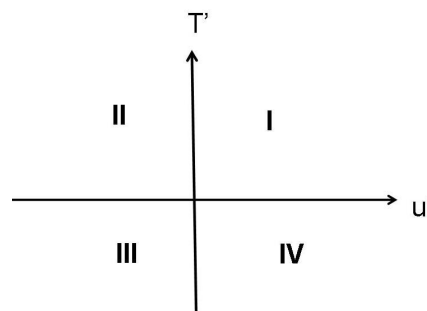


FIGURE 4 – Schéma de principe de la répartition en quadrants des fluctuations de vitesse et de température.

sur chaque quadrant fournit une moyenne conditionnelle traduisant les contributions croisées

au flux de chaleur  $u'T'$  pour chaque point de mesure.

#### 4.1 Identification des mouvements de fluide associés aux quadrants

La figure 5, décrivant la topologie classique de l'écoulement, permet de distinguer deux types de structures macroscopiques : les gros tourbillons appelés noyaux et les filaments (zones fines qui enlacent ces tourbillons). Entre deux noyaux, au centre du filament, se trouve le point selle. L'évolution des coefficients de dissymétrie de la vitesse  $S_u$  et de la température  $S_T$ , représentée

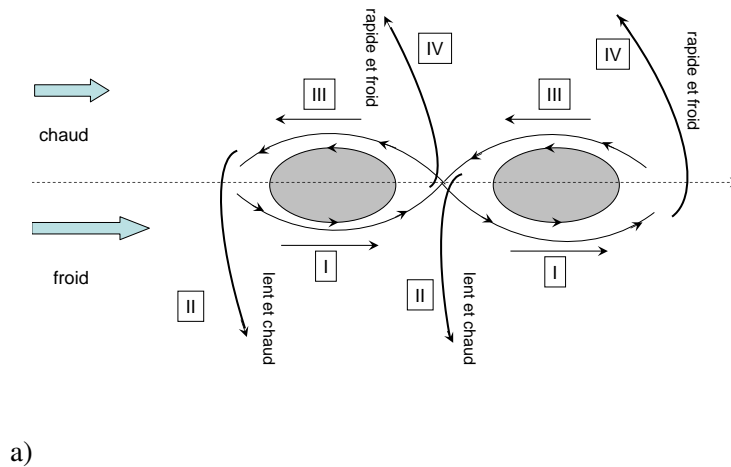


FIGURE 5 – Schéma des principaux mouvements de fluide contribuant au flux de chaleur dans la couche de mélange anisotherme.

sur la figure 6, montre que les contributions dominantes à la dissymétrie des fluctuations (événements intermittents dominants) sont de signe opposé entre les fluctuations de vitesse  $u'$  et les fluctuations de température  $T'$ . En outre, les points selles sont des lieux de forte éjection de

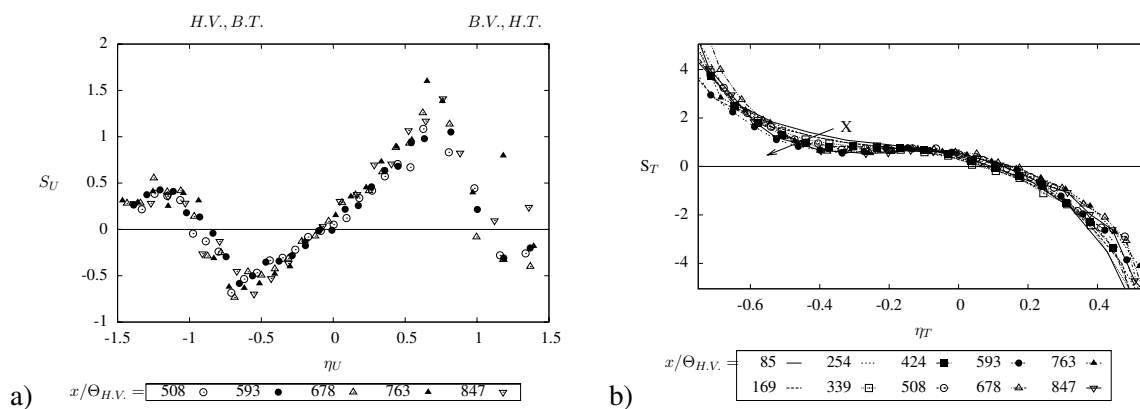


FIGURE 6 – Coefficients de dissymétrie : (a) vitesse, (b) température ;  $\lambda = 0.33$ ,  $\Delta T = 25$  K .

fluide vers l'extérieur, cette éjection produisant une accélération de l'écoulement du côté basse vitesse et une décélération du côté haute vitesse ([6]), avec des fluctuations de vitesse verticale  $v'$  et des fluctuations de vitesse longitudinale  $u'$  de signes opposés.

Par exemple, dans le cas étudié ici, l'écoulement uniforme froid et rapide *arrache* du fluide au passage des points selles. Ce fluide issu des noyaux est à une température moyenne supé-

rieure à la température froide, et sa vitesse moyenne est inférieure à la vitesse rapide. Donc du fluide plus chaud et plus lent (induisant  $T' > 0$  et  $u' < 0$ ), est éjecté des points selles. Cela correspond alors au quadrant *II*.

De la même manière, l'écoulement uniforme chaud et lent arrache du fluide froid des points selles. Le fluide issu des noyaux est plus froid et plus rapide que l'écoulement uniforme. Cela correspond donc au quadrant *IV*.

Ainsi le quadrant *II* ( $u' < 0$  et  $T' > 0$ ) correspond à l'éjection de fluide lent et chaud. Le quadrant *IV* ( $u' > 0$  et  $T' < 0$ ) correspond à l'éjection de fluide rapide et froid. Les quadrants *I* et *III* correspondent aux interactions entre la périphérie des structures et les zones extérieures d'écoulement uniforme.

## 4.2 Analyse

Les distributions de moyennes conditionnelles sont représentées sur la figure 7 pour différentes positions  $x$  correspondant chacune à une vignette. Chaque vignette présente des profils transversaux de  $\overline{u'T'}$  séparés en quatre courbes correspondant chacune à un quadrant. Le niveau de  $\langle u'T' \rangle_i$  est représentatif de l'intensité de chacun des quatre mouvements élémentaires du fluide.

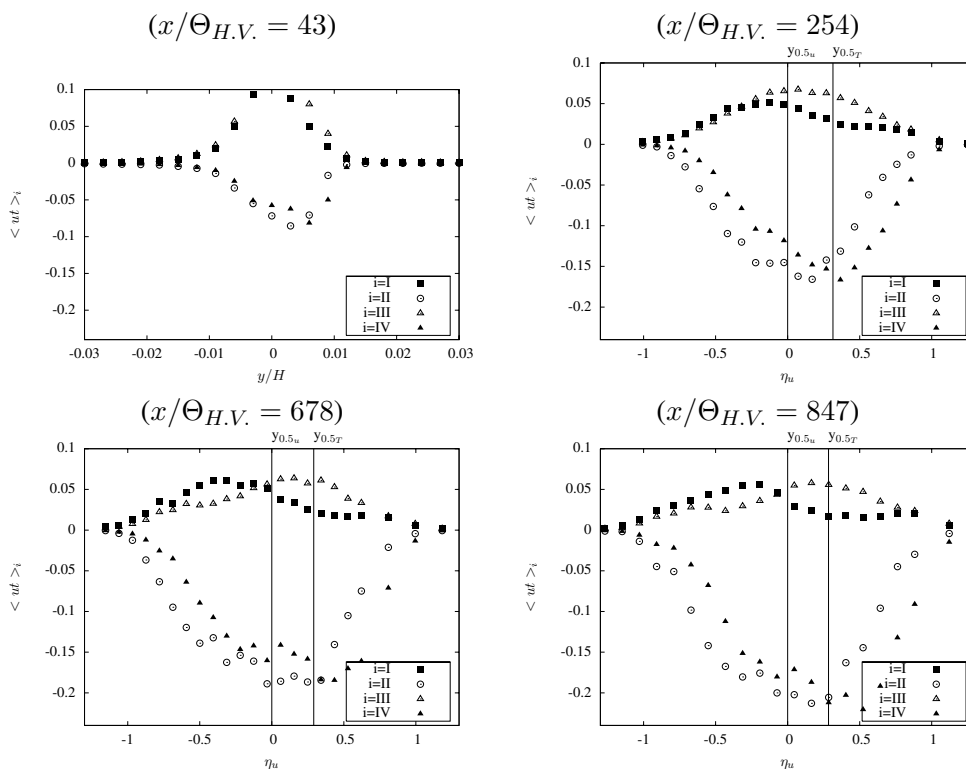


FIGURE 7 – Profils transversaux des contributions aux flux de chaleur pour chaque quadrant  $i = I$  à  $IV$  pour  $43 \leq x/\Theta_{H.V.} \leq 847$ .

Dans la zone initiale de sillage, les contributions des différents quadrants sont d'intensité comparable.

Vers l'aval, pour une position  $x$  donnée, on peut remarquer que les contributions de *I* et *III* sont équivalentes de part et d'autre de l'axe de la couche de mélange dynamique. Les interac-

tions entre la périphérie des structures cohérentes et les parties uniformes de l'écoulement se font de manière quasi-symétrique par rapport à l'axe de la couche de mélange dynamique. Elles atteignent une valeur maximale aux frontières de cette couche de mélange avant de décroître vers une valeur nulle dans la zone d'écoulement uniforme. Cela correspond bien à la topologie de la figure 5 où les quadrants *I* et *III* sont portés par les noyaux des structures de la zone de mélange dynamique. L'amplitude des contributions de *II* et *IV* est plus importante. Cela traduit une prédominance, dans le flux de chaleur, des éjections de fluide vers l'extérieur, qui présentent une symétrie centrée sur l'axe de la couche de mélange thermique.

Dans la zone de similitude, les mouvements les plus importants sont les éjections. L'intensité des interactions entre la périphérie des structures et les zones extérieures d'écoulement uniforme diminue progressivement alors que le niveau des éjections augmente suivant  $x$ . Cela est cohérent avec l'expansion de la couche de mélange dynamique et thermique qui est associée à une importance grandissante des éjections aux points selles et à des structures moins bien définies après la similitude.

## 5 Conclusion

Grâce à la mise en œuvre de l'anémométrie à fil chaud à surchauffes multiples (PCTA) à fréquence élevée, la mesure simultanée en un point des fluctuations de vitesse et de température a permis une analyse fine des interactions entre ces fluctuations. En complément d'autres analyses menées sur les corrélations et les densités de probabilités conditionnelles, l'analyse en quadrants met en évidence, dans le flux de chaleur, les contributions dominantes des éjections aux points selles. Pour cet écoulement particulier de couche de mélange anisotherme, des perspectives intéressantes résident dans la mise en œuvre du PCTA à deux fils croisés, pour la prise en compte simultanée des contributions liées à  $u'$ ,  $v'$  et  $T'$ .

## Références

- [1] S. Corrsin. Extended applications of the hot-wire anemometer. *NACA Technical Notes*, 1864, 1949.
- [2] H.E. Fiedler. Transport of heat across a plane turbulent mixing layer. *Advances in Geophysics*, 18 :93–109, 1974.
- [3] S.S. Lu and W.W. Willmarth. Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 60 :481–511, 1973.
- [4] S.M. Masutani and C.T. Bowman. The structure of a chemically reacting plane mixing layer. *Journal of fluid Mechanics*, 172 :93–126, 1986.
- [5] M. Ndoye. Anémométrie fil chaud à température variable : application à l'étude d'une couche de mélange anisotherme. *Thèse de Doctorat, Université de Poitiers*, 2008.
- [6] B.W. Spencer and B.G. Jones. Stastical investigation of pressure and velocity fields in the two-stream mixing layer. *AIAA, 4th Fluid and Plasma Dynamic Conference*, 1971.
- [7] D.A. Walker and W.F. Ng. Experimental comparison of two hot wire techniques in supersonic flow. *AIAA Journal*, 27 :1074–1080, 1989.