

## ETUDE EXPERIMENTALE DE CERTAINS MOMENTS VITESSE-TEMPERATURE D'ORDRES 2, 3 ET 4 EN TUNNEL AEROTHERMIQUE TURBULENT

JEAN-PIERRE MAYE

Laboratoire\* d'Etudes Aérodynamiques et Thermiques (L.E.A.T.),  
 40, avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers, France

(reçu le 2 juillet 1979)

**Résumé** – Dans une première partie, on résume les principes théoriques et les modalités de mise en oeuvre pratique d'une technique originale de détermination simultanée de moments vitesse-temperature de différents ordres dans un champ aérothermique turbulent stationnaire en moyenne. La méthode utilise un capteur thermoanémométrique en rotation constitué de deux fils fins parallèles alimentés à températures constantes et fait appel à un traitement statistique des signaux. Dans une seconde partie, on présente et discute brièvement quelques résultats concernant certains moments d'ordres 2, 3 et 4 mesurés dans la zone thermiquement établie d'un tunnel aérothermique bidimensionnel; ces premiers résultats, pour la plupart originaux, montrent que la technique de mesure utilisée est fiable et bien adaptée aux explorations de type systématique des champs de corrélations vitesse-temperature en écoulements aérothermiques turbulents.

### NOMENCLATURE

$\vec{U}(U + u_1;$	vecteur vitesse instantanée;
$u_2; u_3),$	
$\vec{U}_e,$	$= U_e + u_e$ vitesse instantanée de refroidissement du fil;
$\vec{T},$	$= T + t$ , température instantanée du fluide;
$\vec{E},$	$= E + e$ , tension instantanée délivrée par l'anémomètre;
$\bar{T}_I, \bar{T}_{II},$	températures des fils sensibles;
$\bar{\phi}, \phi,$	angles instantané et moyen du fil avec la direction de $U$ ;
$\psi,$	angle de rotation de la sonde sur son axe;
$y,$	distance du point de mesure à la paroi;
$U_i^\alpha U_j^\beta U_k^\gamma t^\delta,$	$= \frac{u_i^\alpha u_j^\beta u_k^\gamma t^\delta}{(U^{(\alpha+\beta+\gamma)} \sqrt{t^2})}$
	corrélation vitesse-temperature adimensionnelle d'ordre $(\alpha + \beta + \gamma + \delta)$ .

### 1. INTRODUCTION

SI LA connaissance des champs de corrélations vitesse-temperature apparait fondamentale, pour la prévision et la compréhension des champs thermiques turbulents moyens, il faut bien constater que les résultats expérimentaux les concernant sont encore très limités, notamment par comparaison avec ceux relatifs aux tensions de Reynolds. La raison principale de ce manque d'information expérimentale provient essentiellement des difficultés inhérentes à la mesure de ces corrélations et en premier lieu de celle consistant à séparer en un point et un instant donnés les

fluctuations instantanées  $u_1, u_2, u_3$  et  $t$  correspondantes.

Les méthodes généralement utilisées à cet effet, qui ont jusqu'à présent essentiellement concerné les champs aérothermiques, sont basées sur le fait qu'un fil chaud est sensible à la fois à la vitesse et à la température locales instantanées de l'écoulement dans lequel il est placé. Trois paramètres, de rôles différents, permettent cependant de différencier ces méthodes dans le cas des écoulements turbulents stationnaires en moyenne:

- (i) La configuration de la sonde (nombre et position des fils).
- (ii) Le nombre de coefficients de surchauffe successifs pour chaque fil.
- (iii) Le nombre de positions successives de l'élément sensible, en un même point de mesure.

Ainsi, Johnson [1], Webster [2], Deardorff et Willis [3], Bourke et Pulling [4], utilisent comme élément sensible un ensemble de trois fils soumis à des coefficients de surchauffe différents mais constants; ils déplacent ensuite ces fils pour obtenir en chaque point les différentes corrélations désirées. L'inconvénient principal de cette méthode résulte de l'utilisation d'un élément sensible complexe, fragile, difficile à réaliser et risquant de ne pas répondre aux exigences de non interaction entre fils et de ponctualité de la mesure.

Une variante plus performante de cette "méthode 3 fils" est proposée par Charnay, Schon et Sunyach [5]; elle permet, (avec toutefois les inconvénients cités précédemment), en combinant convenablement les tensions instantanées issues de deux anémomètres au moyen d'amplificateurs opérationnels, d'isoler certaines fluctuations de vitesse qui peuvent ensuite être "corrélées" avec la fluctuation de température délivrée par le thermomètre à résistance alimentant le 3ème fil.

\* Associé au C.N.R.S. No. I91, 40 avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers, France.

Corrsin [6], Mathieu [7], Kovasny [8], Verollet [9] et Fulachier [10], utilisent, quant à eux, une sonde à deux fils en  $X$  soumis à plusieurs coefficients de surchauffe successifs, sauf pour la mesure de  $\overline{u_1 t}$  qui est généralement réalisée avec un seul fil perpendiculaire à l'écoulement. Cette technique donne des résultats satisfaisants pour les corrélations doubles; elle nécessite par contre une mise en oeuvre et un dépouillement assez laborieux, particulièrement si on utilise la résolution graphique du "diagramme des fluctuations" introduite par Kovasny.

Une variante de la méthode précédente, mise en oeuvre par Ibragimov, Subbotin et Taranov [11], ne nécessite qu'un seul fil également soumis à plusieurs coefficients de surchauffe successifs; les diverses corrélations sont séparées, compte tenu de l'hypothèse de stationnarité de l'écoulement moyen, en donnant au fil différentes positions successives.

En dehors des éléments de différentiation qui viennent d'être brièvement examinés, ces diverses méthodes possèdent en commun les caractéristiques suivantes:

- (i) Les anémomètres utilisés sont du type "à intensité constante" (sauf pour [5]).
- (ii) L'exploitation est généralement limitée à la détermination des moments d'ordre 2.
- (iii) Les chaînes de mesure sont du type analogique.

La technique de mesure résumée et illustrée dans ce qui suit, en mettant en oeuvre une sonde à deux fils parallèles alimentés par des anémomètres "à température constante" et un traitement des signaux entièrement numérique et statistique, se différencie assez radicalement des méthodes classiques précédentes; on constatera qu'elle est bien adaptée aux investigations expérimentales du type systématique des champs de corrélations vitesse - température en écoulements aérothermiques turbulents.\*

## 2. METHODE DE MESURE

### 2.1. Hypothèses

La technique de détermination des corrélations vitesse-température résumée dans ce qui suit repose en premier lieu sur les relations (1) et (2):

$$\tilde{E}^2 = (\bar{T} - \tilde{T})(A + B\tilde{U}^n) \quad (1)$$

$$\tilde{U}_e = |\tilde{U}|(\sin \tilde{\phi})^s \quad (2)$$

qui caractérisent respectivement la loi de transfert thermique d'un fil chaud soumis à une vitesse de refroidissement  $\tilde{U}_e$  ("loi de King") et le lien existant entre cette dernière et la vitesse réelle du fluide.

Les conditions de validité de (1) et (2) sont bien connues [12]. On notera seulement ici que les coefficients  $A$  et  $B$  varient assez peu avec  $\tilde{T}$  si le fluide considérée est l'air (variations relatives inférieures à 1 et 3% pour  $B$  et  $A$ , respectivement, si les écarts sur  $\tilde{T}$  restent inférieurs à 20°C [12]); on admettra alors, dans

cette étude, que les coefficients  $A$  et  $B$  sont constants pour une position donnée du fil dans l'écoulement, hypothèse qui ne semble introduire que des limitations assez faibles au domaine pratique d'utilisation du fil chaud en convection forcée.

En second lieu, la technique de mesure proposée admet l'habituelle hypothèse de linéarité pour la réponse directionnelle du fil aux fluctuations de vitesse, soit:

$$u_e = a(\phi) \cdot u_1 + b(\phi, \psi)u_2 + c(\phi, \psi)u_3 \quad (3)$$

expression déduite de (2) en ne conservant que les termes linéaires du développement limité et en notant [12]:

$$\begin{cases} a(\phi) = (\sin \phi)^s \\ b(\phi, \psi) = -s(\sin \phi)^{s-1} \cdot \cot \phi \cdot \cos \psi \\ c(\phi, \psi) = -s(\sin \phi)^{s-1} \cdot \cot \phi \cdot \sin \psi \end{cases} \quad (4)$$

Cette hypothèse de linéarité restreint en principe le domaine de validité de la méthode anémométrique utilisée aux écoulements à faibles intensités de turbulence; on constatera par la suite (Section 2.2.iii) qu'il n'en est pas nécessairement ainsi pour la technique proposée.

### 2.2. Principe théorique

Celui-ci est développé dans [12] et résumé dans [13]; on se bornera ici à rappeler les trois phases principales de la démarche théorique suivie:

(i) *Séparation des vitesses et températures locales instantanées.* En appliquant (1) à deux fils parallèles identiques et suffisamment voisins pour être soumis aux mêmes conditions cinématiques et thermiques on tire les inconnues instantanées  $\tilde{U}_e$  et  $\tilde{T}$  à partir de (5) et (6)

$$\tilde{U}_e = K_1(\tilde{E}_1^2 - \tilde{E}_1^2 - K_2)^{1/n} \quad (5)$$

$$\tilde{T} = \bar{T}_1 - (\bar{T}_1 - \bar{T}_{II})(1 - \tilde{E}_1^2/\tilde{E}_1^2)^{-1} \quad (6)$$

où  $K_1$  et  $K_2$  sont des constantes si les températures  $\bar{T}_1$  et  $\bar{T}_{II}$  des fils I et II sont maintenues constantes (et différentes).

(ii) *Calcul des corrélations du type  $\zeta_j^{m,\delta} = \overline{u_e^m t^\delta}$  ( $m$  et  $\delta$ : entiers  $\geq 1$ ).* Les inconnues instantanées  $\tilde{U}_e$  et  $\tilde{T}$  ayant été séparées à partir de (5) et (6) on opère ensuite la décomposition:

$$\begin{cases} \tilde{U}_e = U_e + u_e \\ \tilde{T} = T + t \end{cases} \quad (7)$$

après avoir calculé les moyennes  $U_e$  et  $T$ ; il suffit ensuite d'élever les fluctuations  $u_e$  et  $t$  aux puissances respectives  $m$  et  $\delta$ , de multiplier les valeurs obtenues entre elles et d'en prendre la moyenne pour obtenir les corrélations du type  $\zeta_j^{m,\delta}$ , l'indice  $j$  indiquant que la corrélation ainsi calculée est fonction de la position ( $j$ ) du capteur thermo-anémométrique dans l'écoulement.

(iii) *Détermination des corrélations du type  $\zeta_k^{m,\delta} = \overline{u_1^\alpha u_2^\beta u_3^\gamma t^\delta}$  ( $m = \alpha + \beta + \gamma$ ;  $\alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0, \delta \geq 1$ ).*

\* L'essentiel de cet article est tiré de [12].

De la linéarité de (3) on déduit aisément que tout moment  $\zeta_j^{m,\delta}$ , précédemment calculé pour une position  $j$  de l'élément sensible ( $m$  et  $\delta$  fixés), s'exprime linéairement en fonction des corrélations à déterminer du type  $\zeta_k^{m,\delta}$ , soit :

$$\zeta_j^{m,\delta} = \sum_{k=1}^N A_{j,k}^m \zeta_k^{m,\delta} \quad (j, m, \delta \text{ fixés}) \quad (8)$$

avec

$$A_{j,k}^m = \frac{m!}{\alpha! \beta! \gamma} a^\alpha(\phi) b^\beta(\phi, \psi) c^\gamma(\phi, \psi) \quad (9)$$

l'indice  $k$  pouvant varier de 1 à  $N = (m + 1)(m + 2)/2$ , nombre maximum d'éléments du type  $\zeta_k^{m,\delta}$  linéairement indépendants pour un couple  $(m, \delta)$  donné.

On conçoit alors qu'en inversant le système (8) (considéré maintenant pour  $j = N$  positions différentes du capteur thermo-anémométrique) il est possible d'exprimer linéairement les corrélations à déterminer (du type  $\zeta_k^{m,\delta}$ ;  $k = 1, N$ ) en fonction des moments déjà calculés (du type  $\zeta_j^{m,\delta}$ ;  $j = 1, N$ ) sous réserve que la matrice  $|A_{j,k}^m|$  soit régulière, ce qui peut être théoriquement assuré par un choix convenable des paramètres  $\phi$  et  $\psi$ .

Ce choix peut également être motivé par le souci de limiter l'influence parasite des termes non linéaires négligés dans (3); cette limitation, rendue possible grâce au principe théorique même de la méthode, permet d'en étendre le domaine d'application aux écoulements à intensités de turbulence assez fortes tout en continuant à utiliser (3).

### 3. ILLUSTRATION EXPERIMENTALE

#### 3.1. Conditions expérimentales

Les résultats de mesures présentés ci-après ont été obtenus dans la zone établie ( $x/H \approx 110$ ) d'un tunnel aérothermique parallélépipédique de grandes dimensions ( $2H = 12,4$  cm;  $l = 1,22$  m;  $L = 11$  m) chauffé à densité de flux thermique constante, pour une vitesse maximale (au centre du tunnel) voisine de 9 m/s et des écarts de températures (entre centre et paroi) de l'ordre de 20°C.

La méthode de mesure des corrélations a été expérimentée avec une sonde DISA comportant deux fils parallèles de 25  $\mu$ m inclinés de  $\pi/4$  par rapport à son axe; les paramètres caractéristiques étaient les suivants :

- (i) Coefficients de surchauffe:  $a_I = 0,85$ ,  $a_{II} = 0,35$  à 0,30.
- (ii) Moyennes statistiques réalisées sur 4096 données acquises pendant une durée de 20 s.
- (iii) Nombre de rotations (de  $\pi/4$ ) de la sonde par point de mesure: 7; la valeur (choisie ici pour des raisons pratiques [12]) de ce dernier paramètre permet, l'axe de sonde étant confondu avec la direction de la vitesse moyenne, de mesurer toutes les corrélations vitesse-température doubles plus

certaines corrélations triples et quadruples; l'ensemble complet des moments d'ordre 2, 3 et 4 pourra par la suite être déterminé à partir de  $N = 10$  rotations à condition de se donner un degré de liberté supplémentaire en faisant varier l'angle  $\phi$  entre fils et direction de la vitesse moyenne de l'écoulement, de manière à assurer la régularité de la matrice  $|A_{j,k}^m|$ .

#### 3.2. Résultats et discussion

Les Figs. 1 et 3-6 montrent quelques premiers résultats concernant certaines corrélations doubles,

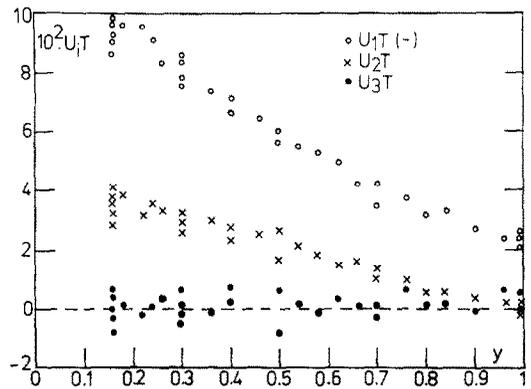


FIG. 1. Corrélations adimensionnelles doubles  $U_1 T$ .

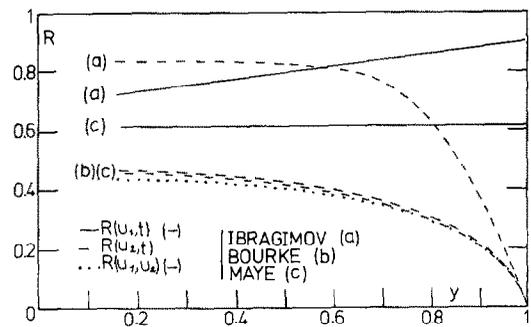


FIG. 2. Coefficients de corrélation  $R(u_i, t)$  et  $R(u_i, u_j)$ .

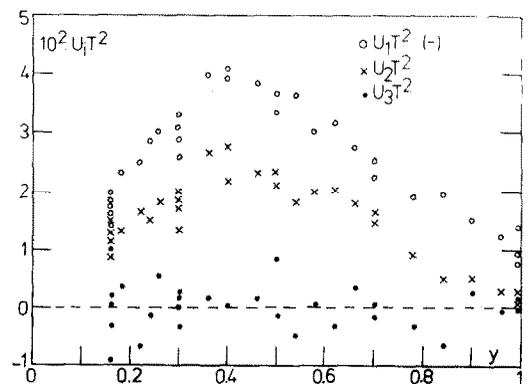
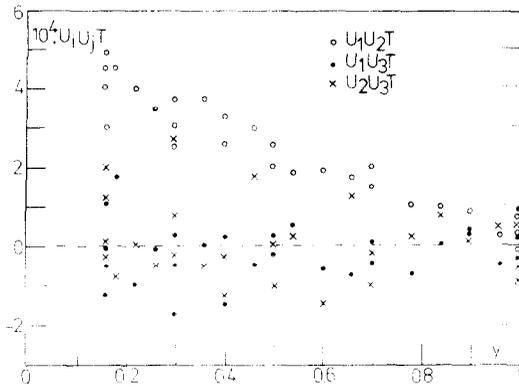
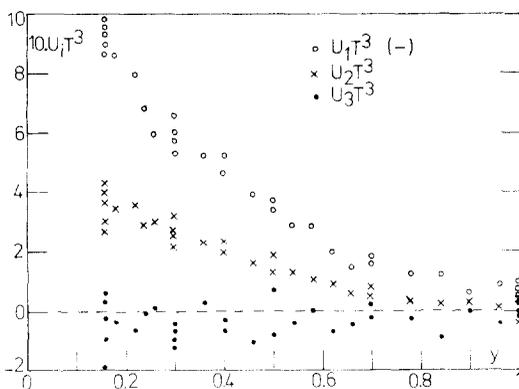
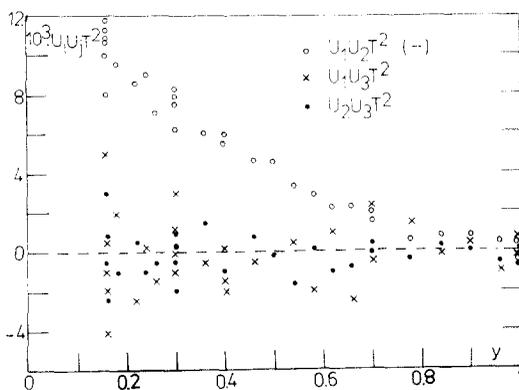


FIG. 3. Corrélations adimensionnelles triples  $U_i T^2$ .

FIG. 4. Corrélations adimensionnelles triples  $U_i U_j T$ .FIG. 5. Corrélations adimensionnelles quadruples  $U_i T^3$ .FIG. 6. Corrélations adimensionnelles quadruples  $U_i U_j T^2$ .

triples et quadruples adimensionnelles mesurées dans la zone établie du tunnel aérodynamique.

(a) *Moments d'ordre 2.* Un bref examen des résultats permet de constater que :

(i) La dispersion des points représentatifs n'est pas

supérieure à celle observée chez les auteurs ayant déjà essayé, par des méthodes différentes, de mesurer de telles grandeurs.

(ii) La corrélation  $U_2 T$  est nettement inférieure à  $U_1 T$ .

(iii) La corrélation  $U_3 T$  peut être partout considérée comme nulle (à la dispersion près des résultats).

Afin de comparer ces résultats à ceux déjà obtenus [4, 11] dans un tube et qui semblent constituer les seules références comparables ("There do not appear to be any previous measurements of this correlation ( $u_2 t$ ) in pipe flow" [4]), on a représenté (Fig. 2) les profils moyens des coefficients de corrélation ainsi mesurés, [ $R(u_2, t)$  pour [4],  $R(u_2, t)$  et  $R(u_1, t)$  pour [11]], à laquelle on a ajouté le profil du coefficient  $R(u_1, u_2)$  déduit des résultats de Comte Bellot [14]. De l'étude comparative de ces résultats on déduit que :

(i) Les valeurs trouvées pour  $R(u_1, t)$  sont pratiquement constantes et nettement inférieures à celles proposées par Ibragimov [11], particulièrement au centre (0,6 au lieu de 0,9) du conduit.

(ii) Les valeurs trouvées pour  $R(u_2, t)$  sont nettement inférieures à celles proposées par Ibragimov [11] mais en parfait accord avec celles de Bourke [4].

(iii) Le profil de  $R(u_2, t)$  est très voisin de celui de  $R(u_1, u_2)$ , la légère divergence notée à l'approche de la paroi ne pouvant être considérée comme significative.

(b) *Moments d'ordre 3.* Avant d'analyser brièvement les résultats correspondants, on notera que :

(i) Il n'existe pas (à notre connaissance) de résultats expérimentaux équivalents obtenus en conduite.

(ii) Toutes les corrélations faisant intervenir la fluctuation  $u_3$  à la puissance 1 sont nulles (à l'incertitude des mesures près); il en est de même, au centre du tunnel, pour toutes les corrélations faisant intervenir la fluctuation  $u_2$ .

La Fig. 3 met en évidence les résultats suivants :

(i) La corrélation  $U_1 T^2$  (négative) est partout supérieure (en valeur absolue) à la corrélation  $U_2 T^2$  (positive).

(ii) Les deux corrélations précédentes passent par un maximum situé vers  $y \approx 0,3-0,4$ .

A défaut de pouvoir comparer ces résultats à ceux obtenus par d'autres auteurs dans un écoulement de type conduite, on a voulu les comparer avec ceux (concernant uniquement  $U_2 T^2$ ) donnés par Johnson [1] dans le cas d'une couche limite.\* Le désaccord est très net; en effet, si cet auteur semble également avoir décelé un extrêmu pour  $U_2 T^2$  (plus proche de la paroi que celui observé sur la Fig. 3), cet extrêmu est, en valeur absolue, un minimum (dont la valeur numérique est voisine de 0) car la corrélation mesurée est partout de signe négatif. L'explication de ce désaccord à partir des différences de structures des écoulements étudiés paraît difficile et une erreur dans

\* [15] "Experiments of this type involve a very considerable amount of work, and no measurements extending Johnson's investigation have been reported".

les mesures semble plus probable. A ce propos, on notera que :

- (i) Les résultats donnés par Johnson (1959) ne concernent que les corrélations triples du type  $u_2 T^2$ , ces dernières étant, d'après l'auteur, affectées d'une très grande incertitude.
- (ii) Johnson avoue lui-même être étonné de ses résultats qui le conduisent à conclure, en comparant les équations de l'énergie turbulente et des fluctuations de température, qu'il y a analogie excellente entre tous les terms correspondants des deux équations, sauf pour ceux traduisant la convection turbulente, qui sont de signes contraires.
- (iii) L'ensemble des résultats présentés ici est parfaitement cohérent avec les caractéristiques théoriques connues du champ thermique étudié, compte tenu des différentes symétries.

La Fig. 4 montre que la corrélation  $U_1 U_2 T$  (positive) présente une loi de variation sensiblement linéaire dans le domaine considéré tandis que les corrélations  $U_1 U_3 T$  et  $U_2 U_3 T$  sont certainement nulles en moyenne statistique.

(c) *Moments d'ordre 4.* Les observations générales déjà formulées précédemment à propos des corrélations triples (cohérence avec les déductions théoriques, inexistence de résultats expérimentaux comparables) sont encore valables; on constatera également que la dispersion des points expérimentaux observés ici n'est apparemment pas supérieure à celle correspondant aux corrélations triples.

La Fig. 5 montre que la corrélation  $U_1 T^3$  (négative) est, dans tout le domaine exploré, nettement supérieure, en valeur absolue, à  $U_2 T^3$  (positive), l'écart entre les deux étant minimum sur l'axe du tunnel.

Une loi de variation du même type est également observée sur la Fig. 6 pour la corrélation quadruple  $U_1 U_2 T^2$  (négative) alors que les moments  $U_1 U_3 T^2$  et  $U_2 U_3 T^2$  sont, à la dispersion près, nuls en moyenne statistique.

#### 4. CONCLUSION

Les premiers résultats expérimentaux obtenus dans un tunnel aérothermique bidimensionnel illustrent les possibilités et la puissance de la méthode thermo-anémométrique développée pour mesurer simultanément les corrélations vitesse-température de différents ordres dont la connaissance actuelle, particulièrement pour les moments d'ordre supérieur à 2, apparaît souvent insuffisante dans de nombreux cas, tels ceux nécessitant le choix d'une hypothèse de fermeture adaptée à un modèle statistique de champ thermique turbulent [17].

Bien que déjà opérationnelle, cette méthode est encore susceptible d'améliorations pratiques notamment au niveau du traitement du signal pour lequel l'utilisation d'une technique inspirée de celle de Kalman [16], actuellement en cours de développement au laboratoire, devrait permettre de réduire à la fois les temps de calcul et la dispersion des résultats obtenus.

#### REFERENCES

1. D. S. Johnson, Velocity and temperature fluctuation measurements in a turbulent boundary layer downstream of a stepwise discontinuity in wall temperature, *J. Appl. Mech.* **26**, 325-336 (1959).
2. C. A. G. Webster, An experimental study of turbulence in a density stratified shear flow, *J. Fluid Mech.* **19**, 221-245 (1964).
3. J. W. Deardorff et G. E. Willis, Investigation of turbulent thermal convection between horizontal plates, *J. Fluid Mech.* **28**, 675-704 (1966).
4. P. J. Bourke et D. J. Pulling, A turbulent heat fluxmeter and some measurements of turbulence in air flow through a heated pipe, com. pers. (1969).
5. G. Charnay, P. P. Schon et M. Sunyach, Isolement et échantillonnage de signaux aléatoires transmis par plusieurs anémomètres à fils chauds, *Entropie*, No. 50 (1973).
6. S. Corrsin, Extended applications of the hot wire anemometer, NACA TN. No. 1864 (1949).
7. J. Mathieu, Contribution à l'étude aérothermique d'un jet plan évoluant en présence d'une paroi, P.S.T. No. 374 (1961).
8. L. S. G. Kovasnay, Turbulence measurements, in *High Speed Aero. Jet Propulsion Series*, Vol. IX. Princeton University Press (1954).
9. E. Verollet, Etude d'une couche limite turbulente avec aspiration et chauffage à la paroi, Thèse, Marseille (1972).
10. L. Fulachier, Contribution à l'étude des analogies des champs dynamique et thermique dans une couche limite turbulente. Effet de l'aspiration, Thèse, Marseille (1972).
11. M. Kh. Ibragimov, V. I. Subbotin et G. S. Taranov, Determination of the correlation between pulsations of velocity and temperature in turbulent air flow in a tube, *Sov. Phys. Dokl.* **13** (12), 1208-1210 (1969).
12. J. P. Maye, Contribution à une étude statistique des champs thermiques turbulents, Thèse Doctorat ès Sciences, Poitiers (1976).
13. J. P. Maye, Principes théoriques d'une nouvelle technique de mesure des corrélations vitesse-température par anémométrie à fil chaud, *C.R. Hebd. Séanc. Acad. Sci. Paris* **272**, 826-829 (1971).
14. G. Comte-Bellot, Ecoulement turbulent entre deux parois parallèles, P.S.T. No. 419 (1965).
15. J. Kestin et P. D. Richardson, Heat transfer across turbulent, incompressible boundary layers, *Int. J. Heat Mass Transfer* **6**, 147-189 (1963).
16. R. E. Kalman, A new approach to linear filtering and prediction problems, *J. Basic Engng* **82D**, 35-45 (1960).
17. J. P. Maye, Contribution à une étude statistique théorique des champs thermiques turbulents aux faibles nombres de Peclet, *Int. J. Heat Mass Transfer* **18**, 927-932 (1975).

### EXPERIMENTAL STUDY OF SOME MULTI-ORDERS VELOCITY-TEMPERATURE CORRELATIONS IN AN AEROTHERMAL TURBULENT CHANNEL

**Abstract** - The first part of this paper gives a brief description of an original method proposed to measure multi-orders velocity-temperature correlations in a stationary aerothermal turbulent field. This method

needs a thermo-anemometric probe composed of two thin parallel wires supplied with constant temperature anemometers and uses statistical treatment of data. The second part of this paper shows some results concerning 2, 3 and 4 orders moments measured in the thermal established region of a bidimensional aerothermal channel; these results illustrate the viability of the method and its good adaptation for systematic measurements of velocity-temperature correlations in an aerothermal turbulent field.

#### EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG EINIGER BEZIEHUNGEN HÖHERER ORDNUNG ZWISCHEN GESCHWINDIGKEIT UND TEMPERATUR IN EINEM AEROTHERMISCH TURBULENTEN STRÖMUNGSKANAL

**Zusammenfassung** — Der erste Teil dieser Arbeit gibt eine kurze Beschreibung der erstmals vorgeschlagenen Methode, die Beziehungen höherer Ordnung zwischen Geschwindigkeit und Temperatur in einem stationären aerothermisch turbulenten Strömungsfeld zu messen. Diese Methode verwendet eine Thermo-Anemometer-Sonde, die aus zwei dünnen, parallelen Drähten besteht, welche an Konstanttemperatur-Anemometer angeschlossen sind. Die Daten werden statistisch ausgewertet.

Der zweite Abschnitt dieser Arbeit zeigt einige Resultate von Momenten 2., 3. und 4. Ordnung, die im thermisch ausgebildeten Gebiet eines zweidimensionalen aerothermischen Strömungskanals gemessen wurden. Diese Ergebnisse zeigen die Durchführbarkeit der Methode und ihre gute Eignung für systematische Messungen zur Bestimmung von Beziehungen zwischen Geschwindigkeit und Temperatur in einem aerothermisch turbulenten Strömungsfeld.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИЙ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ МЕЖДУ СКОРОСТЬЮ И ТЕМПЕРАТУРОЙ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА В КАНАЛЕ

**Аннотация** — В первой части работы дается краткое описание оригинального метода, предложенного для измерения корреляций высоких порядков между скоростью и температурой в стационарном турбулентном поле. Метод основывается на использовании термоанемометрического зонда, состоящего из двух параллельных нитей, включенных в цепи анемометров постоянной температуры, и аппаратуры статистической обработки данных. Во второй части статьи приводятся некоторые результаты по моментам 2, 3 и 4 порядка, полученные в области термически установившегося двумерного течения в канале, которые иллюстрируют пригодность метода и возможность его использования при систематических измерениях корреляций между скоростью и температурой в турбулентном потоке.