Aperçu sur la thermoanémométrie dans les métaux liquides ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) et les gaz très chauds ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$)

*Some aspects of thermoanemometry
in liquid metal ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)
and high temperature gas ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$)*

Ph. Caperan

Y. Dolias

M. Favre-Marinet

Institut de mécanique de Grenoble

Dans une première partie est faite une revue des principaux problèmes posés par l'anémométrie à film chaud dans les liquides. Une brève description des solutions apportées par divers auteurs est effectuée, plus particulièrement dans le cas des métaux liquides. La seconde partie est consacrée aux mesures de vitesse dans les gaz très chauds. En effet, l'anémométrie à fil chaud classique est mise en défaut dans l'écoulement de gaz très chaud qui se produit à la sortie d'un disjoncteur pendant une rupture. La détermination des vitesses a été effectuée à partir de la mesure de la fréquence des tourbillons de Von Karmann derrière un cylindre de petit diamètre placé en travers de l'écoulement. Cette méthode permet de prolonger la mesure pendant la montée en température.

In a first part one presents a review of the main problems arising from the use of hot film anemometry in liquids. One makes a brief description of the several solutions proposed in the literature, particularly dealing with liquid metals. The second part is devoted to velocity measurements in high temperature gas. Indeed, the classical hot wire anemometry fails in the case of gas flow at the outlet of circuit breaker during rupture. The velocity measurements are made from the frequency of Von Karman vortices shed from a small diameter cylinder spanwise in the flow. This method allows an extension of the velocity measurement range during the increase of temperature.

Nous ferons une revue des problèmes spécifiques à l'utilisation du film chaud dans les métaux liquides (M.L.), tout en rappelant ceux survenant lors de son utilisation dans les gaz ou l'eau.

Puis nous exposerons les difficultés d'application du fil chaud dans des écoulements instationnaires de gaz très chauds, ainsi que les solutions apportées à ces problèmes.

A. Anémométrie à film chaud dans les métaux liquides (Ph. Caperan)

L'utilisation des films chauds en thermoanémométrie s'impose dès que l'on travaille en milieu opaque (métaux liquides) à température inférieure à 100 °C ou bien dans des géométries inadaptées à l'usage de l'A.L.D.

Les principes de base de l'anémométrie à fils ou à films chauds sont identiques, mais des différences de fonctionnement apparaissent dues aux propriétés du fluide dans lequel la mesure est réalisée ou à la particularité des sondes employées. Nous noterons respectivement Re , Pe , Nu , Gr et M les nombres de Reynolds, de Peclet, de Nusselt, de Grashof et d'Hartmann construits sur une dimension caractéristique des sondes.

1. Etalonnage en régime statique :

Dans les M.L. comme dans l'eau, des salissures se collent au film, surtout lors de passage par la surface libre. Ces impuretés modifient la résistance thermique R de conduction, invalidant l'étalonnage. Des modifications des propriétés surfaciques des sondes ont été proposées pour éviter ce problème [4, 5] mais elles nécessitent une manipulation supplémentaire du capteur. Sajben [1] propose d'éliminer R en la mesurant à vitesse nulle. Ses résultats, obtenus pour des fils de rapport de forme 100 sont fort bien corrélés avec les prédictions théoriques de Tomotika *et al.* [6]. Hill *et al.* [7] ont précisé les conditions d'emploi de cette méthode sur des sondes de rapport 20 dans le mercure et dans l'eau : à vitesse nulle la convection naturelle est prépondérante dans l'eau ($0.1 < Gr < 20$) alors que dans les M.L. elle est négligeable devant la conduction pure. Cela justifie la procédure de Sajben, dont l'efficacité a été pleinement démontrée par Malcolm [8] dans du mercure.

2. Etalonnage dynamique :

Une atténuation de la sensibilité dynamique est signalée par divers auteurs [2] selon la fréquence f des fluctuations de vitesse. Deux comportements extrêmes sont mis en évidence, selon le type du fluide :

i. Faibles nombres de Biot, sonde dièdre ou conique : à $f \sim 0$, la puissance Joule totale Q d'alimentation du fil chaud est la somme de q_1 , due à l'échange direct film-fluide, et de q_2 due aux fuites thermiques de conduction dans le substrat, (le rapport q_1/q_2 croissant avec Bi). A f suffisamment grand, la fuite thermique est inhibée, et la puissance Q nécessaire s'en trouve diminuée. Cela se traduit par une perte de sensibilité du film lorsque f croît. Divers modèles ont été proposés [9, 10, 11] permettant de prédire la sensibilité dynamique d'une sonde de géométrie donnée.

ii. Faibles nombres de Prandtl : Pour les métaux liquides, c'est l'inertie de la couche limite thermique qui créera un filtrage des petites structures de l'écoulement, correspondant à une atténuation des hautes fréquences. Les modèles élaborés à ce jour [12], sont bien corrélés avec les résultats expérimentaux [13].

	Bi	Pr	Pe
air	Bi^0	0,7	Pe^0
eau	$200 \cdot Bi^0$	7	$160 \cdot Pe^0$
M.L.Hg. (NaK)	$1400 \cdot Bi^0$	0,025	$4,8 \cdot Pe^0$

Valeurs relatives de Bi et Pe pour différents fluides. Pour $v = 3 \text{ m/s}$ et $d = 50 \mu$ on a : $Bi^0 = 0.1$ et $Pe^0 = 6.9$

Cet effet de filtrage par la couche limite thermique est également relié à la très faible sensibilité directionnelle de la sonde à faible rapport de forme, défaut analysé en détail par Hill *et al.* [14].

3. Quelques grandeurs d'influence :

Température : l'effet de celle-ci est déjà bien décrit pour les fils chauds. On trouvera dans [8, 3] des indications supplémentaires dans le cas de films dans du mercure.

Champ magnétique : en écoulement MHD dans des M.L. il faut nécessairement prendre en compte l'effet du champ B à deux niveaux. La résistance de la sonde est modifiée par l'application du champ, c'est l'effet magnéto-résistif quantifié par Holroyd [3] à partir de travaux antérieurs. D'autre part, B inhibe la convection naturelle et mixte [15] : pour $Pe = 0$ et à Gr fixe, Nu décroît lorsque le nombre de Hartmann M augmente. En définitive, si le champ fait varier les valeurs moyennes de Nu , il ne modifie pas de manière significative la sensibilité statique de la sonde [16], Alemany [17]. Signalons enfin un effet parasite dû aux champs alternatifs (induction), que Robinson & *al.* [5] signalent tout en proposant une ingénieuse solution au problème.

Pression : Dans certains cas (Alemany [17], Caperan [18]), la sonde subit de fortes variations de pression qui modifient la résistance thermique de la couche d'impuretés piégées à la surface de la sonde et donc la réponse du pont. La seule solution réside alors dans une très grande propreté de l'installation et des sondes.

4. Conclusion

Les techniques de thermoanémométrie à film chaud dans les M.L. sont maintenant suffisamment dominées pour permettre des mesures de turbulence dans des conditions réputées difficiles telles que les cavités recirculantes (Taberlet [19], Trakas [20]) ou les milieux diphasiques MHD (Gherson *et al.* [16]).

Références

- [1] M. SAJBEN. — *The Rev. Scien. Instr.*, vol. 36, 7, 1965.
- [2] S.G. BANKOFF & R.S. ROSLER. — *The Rev. Scien. Instr.*, vol. 33, 11, 1962.
- [3] R.J. HOLROYD, *DISA information*, 1979.
- [4] M. HOFF. — *Inst. and control systems*, Vol. 42, 1969.
- [5] T. ROBINSON & K. LARSSON. — *J.F.M.*, Vol. 60, Pt 4, 1973.
- [6] S. TOMOTIKA & H. YOSINOBU. — *J. Math. Phys.*, Vol. 36, 1957.
- [7] J.C. HILL & C.A. SLEICHER. — *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 12, 1969.

- [8] D.G. MALCOLM. — *J.F.M.* vol. 37, 1969.
 [9] B.J. BELLHOUSE & D.L. SCHULTZ, *J.F.M.*, vol. 29, 1967.
 [10] J.F. BRISON, G. CHARNAY & G. COMTE-BELLOT. — *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 22, 1979.
 [11] E.W. NELSON & J.A. BORGOS. — *T.S.I. Quartely*, Vol. 9, Is. 1, 1983.
 [12] C.A. SLEICHER & G.B. LIM. — *Proc. 3rd biennial symp. on Turbulence in liquids*, Rolla, Mo, USA.
 [13] D.G. MALCOM & V. VERMA. — *J.F.M.*, Vol. 112, 1981.
 [14] J.C. HILLS & C.A. SLEICHER. — *The Rev. Scien. Instr.*, Vol. 16, 1973.
 [15] P.S. LYKODIS & P.F. DUNN. — *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, 1973.
 [16] P. GHERSON & P.S. LYKODIS, *J.F.M.*, Vol. 147, 1984.
 [17] A. ALEMANY *Doctorat d'Etat*, INPG & USM Grenoble, 1978.
 [18] Ph. CAPERAN. — *Thèse D.I.*, INP et USM de Grenoble, 1982. Voir aussi Ph. CAPERAN & ALEMANY, *J. Méc. Th. et App.*, Vol. 4, 1985.
 [19] E. TABERLET, *Thèse D.I.*, USMG et INP Grenoble, 1984. Voir aussi E. TABERLET & Y. FAUTRELLE, *J.F.M.*, Vol. 159, 1985.
 [20] C. TRAKAS, P. TABELING & J.P. CHABRERIE. — *J. Méc. Théor. Appl.*, 3, 1984.

B. Thermoanémométrie dans les gaz très chauds (Y. Dolias - M. Favre-Marinet)

L'Institut de mécanique de Grenoble a été amené à effectuer des mesures de vitesse et de température dans des gaz très chauds à l'occasion d'une collaboration avec le constructeur de matériel électrique Merlin-Gérin qui souhaite connaître les écoulements à l'intérieur des disjoncteurs lors d'une rupture dans des conditions extrêmes de fonctionnement (intensité de quelques milliers d'ampères, tension de quelques centaines de volts). Lorsque l'appareil disjoncte, un arc électrique se forme entre les contacts et dissipe une grande énergie dont une partie chauffe le gaz contenu dans le disjoncteur. Il se produit alors des mouvements de gaz très chauds ($T > 2\,000^\circ\text{K}$) à vitesse élevée (quelques centaines de m/s) pendant un temps très bref (quelques millisecondes). Dans l'utilisation normale des disjoncteurs, le gaz employé est le SF6 : dans l'étude présente c'est de l'air. Il est évacué vers l'extérieur à travers deux tubes qui constituent les électrodes.

1. Limitation des mesures de vitesse au fil chaud

L'anémométrie à fil chaud, a été utilisée pour mesurer les vitesses à la sortie d'une des électrodes. Le principe de l'anémométrie à température constante, est mis en défaut lorsque la température du fluide T_f n'est plus constante dans le temps, car alors la réponse du fil est contaminée par la température et ne dépend plus seulement de la vitesse du fluide. A fortiori, si la température du fluide T_f devient supérieure à celle du fil T_w , le signal de l'anémomètre s'annule et l'on n'a plus d'information pour reconstituer les vitesses. Dans un écoulement de gaz chaud, la solution consiste alors à augmenter la surchauffe du fil afin de reculer au maximum la limite $T_f = T_w$. La température maximale d'utilisation du fil chaud est en principe donnée par la température de fusion du matériau ($1\,700^\circ\text{C}$ pour Pt-Rh), mais elle est en fait inférieure, car il se produit pour des températures de l'ordre de $1\,000^\circ\text{C}$ des modifications des caractéristiques physiques qui affectent la réponse du fil.

Si le fil utilisé ne peut pas être considéré comme infiniment long ($1/d < 600$) la conduction de chaleur vers les broches conduit à une répartition de température avec un maximum ($T_{\max}$) au centre du fil. [1] [2] (le résultat d'un calcul numérique est porté sur la figure 1). Pratiquement, c'est la température moyenne $\bar{T}_w$ du fil que l'on règle en affichant la surchauffe sur l'anémomètre. $T_{\max}$ ne devant pas dépasser la valeur admissible, on est donc conduit à choisir une température moyenne $\bar{T}_w$ bien inférieure. La figure 1 montre que la condition la plus sévère pour $T_{\max}$ à $\bar{T}_w$ donnée est rencontrée en gaz froid ($T_{\max} - \bar{T}_w / \bar{T}_w \sim 25\%$ pour un rapport $1/d = 200$) ce qui impose une température $\bar{T}_w \leq 800^\circ$ pour un fil en Pt-Rh. Il apparaît également que l'anémomètre délivre encore un signal non nul, lorsque $\bar{T}_w < T_f < T_{\max}$.

L'étalonnage de l'appareil étant effectué en gaz « froid », la réponse du fil devient délicate à interpréter lorsque T_f augmente notablement. Nous avons alors envisagé la possibilité de mesurer la fréquence des tourbillons de Von Karman derrière un cylindre de petit diamètre de manière à s'affranchir de cette dépendance du signal de l'anémomètre en température.

1. Répartition de la température dans un fil chaud.

2. Disposition des fils dans l'écoulement.

2. Dispositif expérimental. Mesure de la fréquence des tourbillons de Von Karman

Les sondes utilisées sont constituées de fil en tungstène (diamètre 6μ) ou en Pt-Rh (diamètre 7μ) (longueur utile $l \sim 1,4$ mm). Le diamètre élevé des fils employés a été choisi pour une meilleure tenue mécanique. La disposition des fils est indiquée sur la figure 2. L'obstacle qui sert à générer les tourbillons de Von Karman est un cylindre de diamètre $d_0 = 0,5$ mm. Une première expérience a été effectuée avec un fil en tungstène réglé à la température $T_0 = 300^\circ\text{C}$. Un fil froid placé hors du sillage de l'obstacle permet de mesurer la température. Le signal E à la sortie de l'anémomètre (fig. 3) présente une augmentation rapide, suivie d'un plateau avec des fluctuations de fréquence élevée puis d'une chute extrêmement brutale à l'instant t_1 . L'élévation de température T_1 mesurée au fil froid est maximale à l'instant $t_1 + 0,4$ ms (fig. 4). Compte-tenu de la plus grande inertie thermique du fil froid, on peut attribuer la décroissance rapide du signal E à l'élévation brutale de T_1 . La courbe de vitesse déterminée à partir de E , à l'aide de la relation d'étalonnage tension-vitesse est complètement biaisée à partir de l'instant t_1 (fig. 5). La figure 6 représente la fréquence des tourbillons de Von Karman, calculée à partir de E en faisant la différence des temps correspondants à deux extréma de E successifs. Cette détermination assez rudimentaire de f explique les grandes variations observées sur la figure 6. La fréquence f est convertie en vitesse par la relation $S = fd/U$ (1) avec $S = 0,2$ qui correspond à la situation où $300 < Re < 2.10^5$ (U représente la vitesse en amont de l'obstacle) [3]. Par ailleurs, la vitesse a été mesurée dans les mêmes conditions mais sans l'obstacle (fig. 7). On constate une bonne correspondance entre la détermination des vitesses par les deux méthodes, tant que le gaz est froid ($t < t_1$, fig. 4) ce qui confirme la relation (1) même lorsque l'écoulement est rapidement variable. Remarquons les vitesses plus faibles dans le sillage proche de l'obstacle (fig. 5), résultat compatible avec celui de Roshko [3]. Lorsque la température T_1 s'élève, la mesure de U par la méthode des tourbillons (fig. 6) indique une décroissance de la vitesse, compatible avec une autre détermination effectuée à l'aide de 2 fils froids décalés dans le sens de l'écoulement.

Une autre expérience avec un fil de Pt-Rh surchauffé à une température $\sim 800^\circ$ vient confirmer les mesures précédentes (fig. 8).

3. Signal brut de l'anémomètre.

4. Signal de température.

5. Vitesse derrière l'obstacle à partir de la courbe d'étalonnage $E = f(U)$.

6. Fréquence des tourbillons de Von Karman pour $T_w = 300^\circ\text{C}$.

7. Vitesse sans obstacle dans les mêmes conditions d'essai.

8. Fréquence des tourbillons de Von Karman pour $T_w = 800^\circ\text{C}$.

Conclusion

Cette étude montre que la méthode des tourbillons de Von Karman est en bon accord avec une détermination directe de la vitesse en gaz froid même dans un écoulement instationnaire et permet de prolonger cette mesure pendant la montée en température. Toutefois, dans cette expérience, la montée rapide de la température s'accompagne d'une chute en vitesse et l'écoulement étudié ne constitue pas le meilleur test de la méthode.

L'exploitation de la méthode des tourbillons de Von Karman n'a pas été poursuivie pour l'étude des disjoncteurs, car les conditions de fonctionnement envisagées pour ces appareils conduisent à des températures nettement supérieures à la température de fusion du Pt-Rh. La méthode semble par contre intéressante pour les écoulements moins chauds ($T < 800^\circ\text{C}$) variables dans le temps ou non. Elle est toutefois limitée à l'étude d'écoulements unidirectionnels dont la direction est connue a priori.

Références

- [1] S. CORRSIN. — Turbulence Experimental Methods. *Handbuch der Physik*, Vol. 8 part II, Springer, Berlin (1963).
- [2] RON F. BLACKWELDER. — Hot Wire and Hot-Film Anemometers. *Methods of Experimental Physics: Fluids Dynamics*, Edited by Raymond J. Emrich, Volume 18, Part A, Academic Press, Inc., New York — London (1981).
- [3] A. ROSHKO. — *On the Development of Turbulent Wakes From Vortex Streets*. California Institute of Technology, NACA-Technical Note 2913, Washington (1953).

Adresse des auteurs

Messieurs Ph. Caperan, Y. Dolias et M. Favre-Marinet
Institut de mécanique de Grenoble
B.P. 68 — 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex (France)