

Anémométrie à fil chaud sous excitation en courant modulé.

Monica STOIAN¹, Frédéric RONSEAU², Mihai CHIRTOC², Jean-François HENRY^{2*}, Mourad REBAY¹, Mohammed LACHI¹

UTAP, EA 3802, UFR Sciences de Reims, Moulin de la Housse, B.P. 1039, 51 687 REIMS Cedex 2

¹L T M : Laboratoire de Thermomécanique

²L T P : Laboratoire de Thermophysique

*(Auteur correspondant : jf.henry@univ-reims.fr)

Résumé. Nous présentons la théorie et le fonctionnement d'une sonde anémométrique à fil chaud dans une nouvelle configuration de mesure, avec excitation en courant périodique et détection synchrone de la 3^{ème} harmonique (méthode 3ω). Par rapport aux sondes classiques excitées en courant continu, on démontre une grande sensibilité ($v_{min} = 0,085 \text{ m/s}$) pour une faible surchauffe du fil ($\approx 1^{\circ}\text{C}$). La sonde a été utilisée pour la mesure de la vitesse de l'air dans un écoulement externe sur une plaque plane. Les résultats expérimentaux valident un modèle de détermination du champ dynamique par volumes finis.

Nomenclature

f	fréquence de modulation électrique, Hz	v	vitesse d'écoulement, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
h	coefficient d'échange, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	V	tension, V
I	intensité, A	<i>Symboles grecs</i>	
k	conductivité thermique, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	α	diffusivité thermique, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
l	demi longueur du fil, m	ν_c	viscosité cinématique, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
m	paramètre d'ailette, m^{-1}	φ	phase, $^{\circ}$
r	rayon du fil, m	ρ_{el}	résistivité el., $\Omega\cdot\text{m}$
r_{el}	coefficient de température de R, K^{-1}	θ	écart de température, K
R	résistance électrique, Ω	ω	pulsation, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$

1. Introduction

Les sondes anémométriques à fil chaud avec excitation en courant constant ou en température constante sont couramment utilisées depuis longtemps pour l'étude d'écoulement des fluides [1]. Une sonde à fil chaud pour liquides, avec excitation modulée, a été proposée en Réf. [2]. Elle était très sensible aux faibles vitesses, mais du fait de l'exploitation du déphasage entre le courant et la température du fil, la sensibilité au coefficient d'échange h n'était pas constante, et la gamme dynamique était relativement restreinte. Nous présentons ici la théorie de l'exploitation du signal 3ω (notamment son amplitude) appliquée aux mesures de vitesses d'écoulement des fluides. Nous avons développé une sonde excitée en courant modulé et nous comparons les résultats expérimentaux obtenus par détection synchrone à 3ω à ceux obtenus avec un modèle développé par volumes finis pour l'étude la convection forcée sur une plaque plane.

A la différence des sondes classiques qui sont chauffées à des dizaines de degrés au-dessus de la température ambiante, la sonde sous excitation modulée ne présente qu'un échauffement réduit. La vitesse minimale mesurable (limitée par la convection naturelle) est donc substantiellement réduite.

2. Théorie de l'anémométrie à fil chaud avec excitation modulée

Le principe de mesure est basé sur le refroidissement produit par un courant d'air, donc sur un transfert convectif autour du fil. La sonde composée du fil chaud et de ses supports (les contacts électriques) peut être considérée comme un modèle standard d'ailette. Elle est suspendue dans l'air et présente une symétrie par rapport au plan passant par son milieu. Pour décrire les phénomènes de transferts thermiques qui s'y établissent, il est suffisant de considérer seulement la moitié du fil sonde (longueur $l = L/2$) dont une des extrémités est en contact avec le support métallique agissant comme un puits thermique.

La sonde est alimentée en courant alternatif $I(t) = I_0 \cos(\omega t)$ à fréquence f . Un flux de chaleur périodique proportionnel à la puissance dissipée $I^2(t)R_0$ est généré dans le fil par effet Joule. La température $\theta(f)$ possède une composante à la fréquence 2ω (seconde harmonique) et par conséquent sa résistance électrique $R(t)$ oscille aussi à 2ω :

$$R(t) = R_0 [1 + r_{el} \theta_{2\omega} \cos(2\omega t - \varphi)] \quad (1)$$

Par la loi d'Ohm, la tension à travers la résistance a l'expression suivante:

$$V(t) = I(t)R(t) = I_0 R_0 \{ \cos(\omega t) + (1/2)r_{el} \theta_{2\omega} [\cos(\omega t - \varphi) + \cos(3\omega t - \varphi)] \} \quad (2)$$

Le terme en 3ω est dû à la combinaison du courant alternatif en ω avec la variation de la résistance en 2ω (méthode connue sous le nom de 3ω) [3]. Le premier terme dans l'éq. (2) est prédominant et sera supprimé en plaçant la sonde dans un pont de Wheatstone. La sélection de la 3^{ème} harmonique lors de la mesure se fait avec un voltmètre à détection synchrone calé sur cette fréquence. L'amplitude de ce signal peut être exprimée sous la forme [4]:

$$V_{3\omega_{eff}}(f) = \left(\frac{I_{0eff} l}{\pi r^2} \right)^3 C_M F(f) \quad (3)$$

où $C_M = \rho_{el}^2 r_{el} / k$ est une constante du matériau constituant le fil. L'indice (*eff*) désigne des valeurs efficaces mesurées. $F(f)$ est un facteur de forme qui représente la température normalisée moyennée sur la longueur du fil [5]:

$$F(f) = \frac{1}{(ml)^2} \left(1 - \frac{\tanh(ml)}{ml} \right) \quad (4)$$

Cette expression est similaire à celle connue en anémométrie classique à courant constant [1, p. 24], mais avec une expression différente pour le paramètre d'ailette m qui dépend des pertes de chaleur latérales par convection et de la fréquence f :

$$(ml)^2 = \left(\frac{2h}{kr} + j \frac{2\omega}{\alpha} \right) l^2 \quad (5)$$

Dans le cas d'un écoulement d'air ($h \cong 10$ à $100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), et à fréquence f suffisamment basse, la partie imaginaire de l'équation 5 devient négligeable devant la partie réelle, et par conséquent $(ml)^2 \cong 2hl^2/kr$. Pour l grand, $\tanh(ml)/ml \ll 1$, et l'équation (4) se réduit à :

$$F \cong \frac{1}{(ml)^2} = \frac{kr}{2hl^2} \quad (6)$$

En faisant apparaître le nombre de Nusselt $Nu = (2rh)/k_f$ l'équation (6) s'écrit (voir aussi [6]):

$$F = \frac{k}{k_f} \left(\frac{r}{l} \right)^2 \frac{1}{Nu} \quad (7)$$

Nous considérons la corrélation [1, p. 20] basée sur la loi de King modifiée, applicable pour un écoulement stationnaire en convection forcée :

$$Nu = A+B(Re)^{1/2} \quad (8)$$

dans laquelle on retrouve le nombre de Reynolds $Re = (2rv)/\nu_c$, ν la vitesse d'écoulement et ν_c la viscosité cinématique du fluide. Le terme en $(Re)^{1/2}$ est spécifique aux transferts de chaleur en écoulement laminaire. Finalement on obtient la relation plus générale :

$$V_{3\omega_{eff}}^{-1} \propto F^{-1} = a + bv^n \quad (9)$$

Expérimentalement on trouve la valeur de l'exposant $n = 0,4$ à $0,45$ [1, p. 95, 96]. L'éq. (9) montre la relation linéaire entre l'inverse de l'amplitude du signal 3ω et la vitesse de l'écoulement à une puissance proche de la valeur théorique de $1/2$.

3. Dispositif expérimental

Le schéma du dispositif de mesure est présenté dans la figure 1. L'instrument de mesure est un amplificateur synchrone (lock-in) SR 850. Pour $f = 0,1$ Hz, $I_{0eff} = 21,9$ mA et une constante de temps pour l'enregistrement de 30 s, le signal $V_{3\omega}$ variait entre 110 μV (sans écoulement) et 15 μV ($\nu \approx 12$ m/s). L'oscillation de température crête à crête du fil variait respectivement entre 2,4 et 0,33 °C.

Pour le fil, nous avons utilisé le matériau $Fe_{54}Ni_{29}Co_{17}$ (Kovar) produit par Goodfellow Co., ayant une grande résistivité électrique ρ_{el} , un grand coefficient thermique de la résistivité r_{el} et un faible coefficient de dilatation thermique (Tableau 1). Les paramètres thermiques du fil ne sont pas spécifiés par le constructeur. Nous avons calculé la chaleur spécifique massique par la moyenne pondérée de ses constituants. La diffusivité thermique du Tableau 1 a été déterminée par une mesure réalisée à haute fréquence ($f > 1$ Hz, Fig. 2).

	$2r$	$2l$	k	α
	$10^{-6} m$	mm	$W m^{-1} K^{-1}$	$10^{-6} m^2 s^{-1}$
Fil en Kovar $Fe_{54}Ni_{29}Co_{17}$	50	41	29,0	7,79
	ρ_{el}	$r_{el} = (\Delta R_{el}/R_{el})/\Delta$	$C_M = \rho_{el}^2 r_{el}/k$	R_0
	$10^{-8} \Omega m$	$10^{-3} K^{-1}$	$10^{-18} \Omega^2 m^3 W^{-1}$	Ω
Fil en Kovar $Fe_{54}Ni_{29}Co_{17}$	20,75	3,04	4,513	4,30

Tableau 1 : Propriétés du fil $Fe_{54}Ni_{29}Co_{17}$ utilisé et paramètres de la sonde anémométrique construite.

Dans ces conditions, le deuxième terme de l'éq. (4) est dominant: $(ml)^2 \cong 2j\omega l^2/\alpha \gg 1$, et le signal 3ω ne dépend plus des échanges thermiques avec le fluide. A partir de l'éq. (4) on obtient à la place de l'éq. (6) :

$$F \cong \frac{1}{(ml)^2} = -j \frac{\alpha}{2\omega l^2} \quad (10)$$

4. Calibrage

Nous avons réalisé le calibrage de la sonde dans une soufflerie ouverte composée d'un ventilateur alimenté par un alternostat en tension alternative réglable (Fig. 3). Le canal diffuseur d'air vertical d'une hauteur de 1 m est muni au milieu d'une plaque comportant des trous en nid d'abeilles pour uniformiser la vitesse de l'air. Nous avons mesuré la vitesse de l'air au centre du canal pour chaque tension du ventilateur à l'aide d'un anémomètre à hélice. En remplaçant ce dernier par la sonde à fil chaud, nous avons identifié les constantes de l'éq. (9) : $b = 756 \pm 10$ et $n = 0,41 \pm 0,01$. La constante a est liée à la convection naturelle (nombre de Grashoff) et constitue la valeur limite des mesures à faible vitesse. Dans notre cas, du fait de la faible surchauffe du fil, nous obtenons $a \approx 0$ (Fig.4). En effet, l'amplitude du signal dans l'air stagnant correspond par extrapolation à $v_{min} = 0,085 \text{ m/s}$, ce qui montre la grande sensibilité de la sonde construite. Cela s'explique par le nouveau principe de mesure à faible courant modulé et au processus de détection synchrone. Avec la méthode classique, il est nécessaire de chauffer le fil de quelques dizaines de degrés au-dessus de l'ambiante, tandis que dans notre cas moins de un degré suffit pour obtenir un bon signal 3ω . La limite ultime de sensibilité est imposée par la convection naturelle générée par le fil chaud lui-même. En inversant l'éq. (9) on trouve la loi de calibrage:

$$v = (756 F)^{-2,44} \quad (11)$$

5. Résultats expérimentaux et discussion

La nouvelle sonde a été testée en mesurant la vitesse de l'écoulement d'air au sein d'une couche limite se développant sur une plaque plane en PVC de 350 mm de longueur, 250 mm de largeur et 20 mm d'épaisseur. Cette dernière est fixée verticalement au-dessus du canal, à une hauteur de 20 mm par rapport à sa section de sortie. Le courant d'air est parallèle à la surface de la plaque. Pour chaque vitesse d'écoulement, nous avons réalisé plusieurs mesures à différents points selon la longueur x de la plaque et à une hauteur $y = 1,45 \text{ mm}$ par rapport à la surface de la plaque.

Sur la Figure 5, les vitesses mesurées (points) sont comparées aux résultats numériques obtenus par un modèle de résolution par volumes finis des équations de la couche limite laminaire en régime stationnaire [7]. L'influence de la proximité de la surface de la plaque se manifeste sur la vitesse normalisée $v(x)/v(x=0)$. Pour des faibles vitesses d'entrée [$v(x=0) = 0,3 \dots 2 \text{ m/s}$], la couche limite dynamique s'étend au-delà de la hauteur $y = 1,45 \text{ mm}$ pour tous les points de mesures ($2,0 < x < 30 \text{ cm}$) et donc le fluide est ralenti par rapport à sa valeur à l'entrée $x = 0$ [$v(x)/v(x=0) < 1$]. Ce ralentissement est plus marqué loin du bord d'attaque (grands x). Par contre, pour des grandes vitesses d'entrée [$v(x=0) = 5 \dots 10 \text{ m/s}$], l'épaisseur de la couche limite diminue de sorte que le ralentissement (à la hauteur y choisie) n'existe plus [$v(x)/v(x=0) \approx 1$]. Pour la plus faible vitesse [$v(x=0) = 0,5 \text{ m/s}$] et pour grand x , le ralentissement relatif mesuré (0,43) est moins important que celui prévu par calcul (0,20).

6. Conclusions

Une sonde anémométrique à fil chaud dans une nouvelle configuration de mesure en courant modulé et détection synchrone de la 3^{ème} harmonique vient d'être créée, calibrée et mise en place. Elle se distingue par une grande sensibilité ($v_{min} = 0.085 \text{ m/s}$) pour une faible surchauffe du fil ($\approx 1^{\circ}\text{C}$). Dans cette étude, nous avons mesuré uniquement la composante normale de la vitesse. En effet, la sonde que nous avons construite à partir d'un fil relativement long ($2l = 41 \text{ mm}$) intègre les variations de la composante axiale de la vitesse. Le prix à payer est un temps de réponse assez long ($\approx 1 \text{ min.}$), inversement proportionnel à la fréquence de modulation. Les résultats expérimentaux valident qualitativement notre modèle par volumes finis, développé pour le calcul des vitesses dans un écoulement de couche limite laminaire sur une plaque plane (convection forcée).

Références

- [1] H.H. Bruun, "Hot wire anemometry", Oxford University Press, Oxford, 1995.
- [2] W.S. Chung, O. Kwon, D.S. Choi, S. Park, Y.K. Choi and J.S. Lee, *Superlattices and Microstructures* **35** (2004), 325.
- [3] C. Dames and G. Chen, *Rev. Sci. Instrum.* **76** (2005), 124902.
- [4] M. Chirtoc and J. F. Henry, "3 ω hot wire method for micro-heat transfer measurements: from anemometry to scanning thermal microscopy (SThM)", *14th Int. Conf. on Photoacoustic and Photothermal Phenomena* (Cairo, Egypt, 6-9.01.2007) (conf. invitée).
- [5] M. Chirtoc, J.F. Henry, J.S. Antoniow and J. Pelzl, "Comportement thermique d'une sonde locale d'un microscope thermique à balayage SThM soumise à des conditions extrêmes d'opération", *Actes du Congrès SFT* (Ile de Ré, 16-19.05.2006) p. 713-718.
- [6] P. Paranthoen, C. Petit and J.C. Lecordier, *J. Fluid Mech.* **124** (1982), 457-473.
- [7] M. Stoian, "Couplage thermique convection-conduction en régime non stationnaire", *thèse en cotutelle*, Univ. Reims Champagne Ardenne et Univ. Politehnica Bucarest, Roumanie, Oct. 2006.

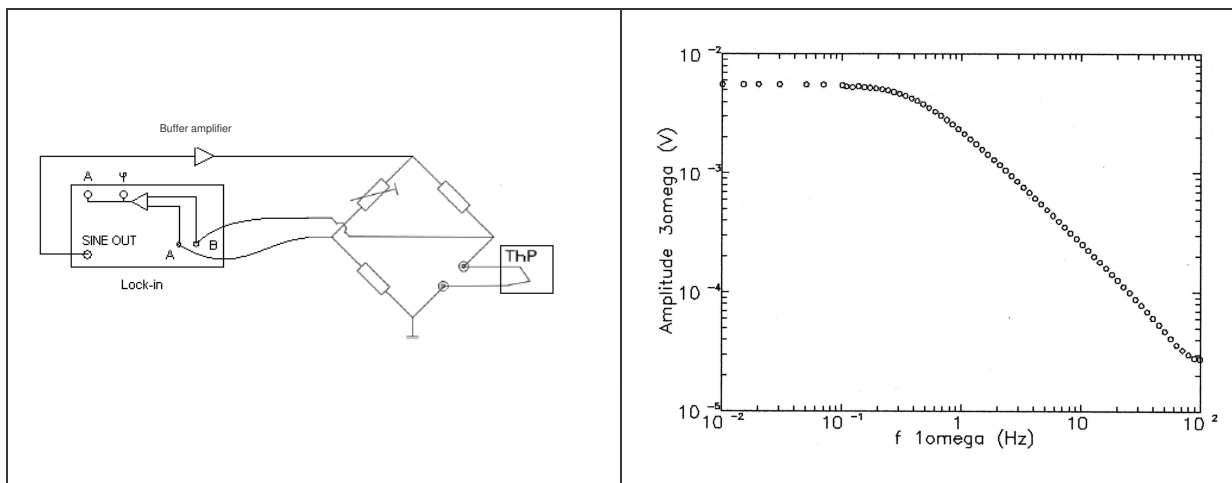


Figure 1. Schéma du dispositif de détection.

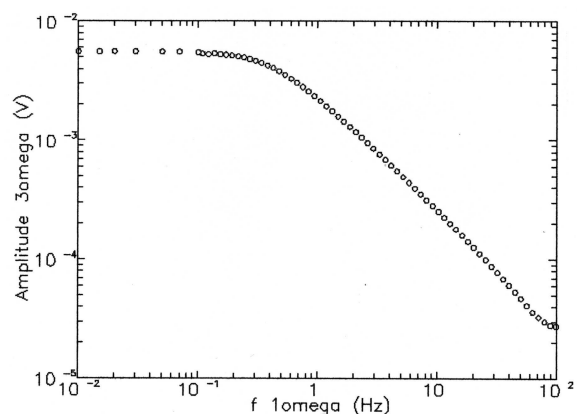


Figure 2. Amplitude du signal 3ω en fonction de la fréquence de modulation. Le domaine sensible au coefficient d'échange h est situé au-dessous de 0,3 Hz



Figure 3. Photographie du dispositif expérimental composé du ventilateur, de l'alternostat, du canal diffuseur, du fil chaud attaché à la plaque et de l'amplificateur synchrone.

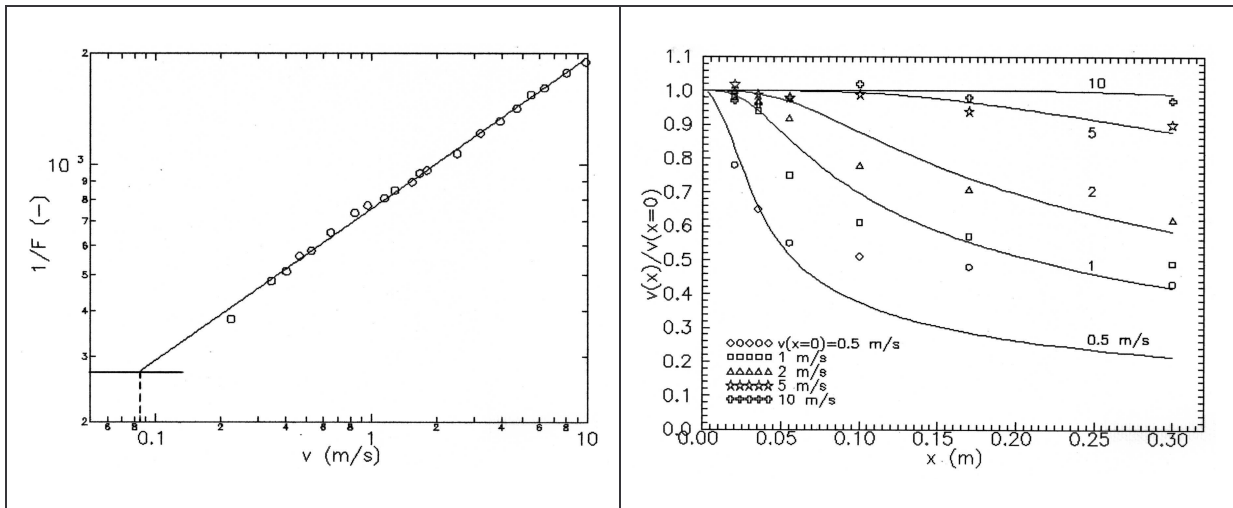


Figure 4. Calibration de la sonde à fil chaud. Points - mesures; courbes - éq. (9) avec $a = 0$, $b = 756$ et $n = 0,41$. La marque horizontale indique le signal pour $v=0$.

Figure 5. Vitesse normalisée de l'air $v(x)/v(x=0)$ à une hauteur $y = 1,45$ mm de la surface de la plaque, en fonction de la distance x du bord d'attaque, pour différentes vitesses d'entrée $v(x=0)$. Points - mesures; courbes - calculs numériques.