

Techniques de caractérisation dynamique d'écoulements gazeux en micro canal

François LANZETTA*, Eric GAVIGNET, Farid IDRI

Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 7174, Département CREST
Parc technologique – 2 avenue Jean Moulin – 90000 Belfort
*(auteur correspondant : francois.lanzetta@univ-fcomte.fr)

Résumé - Nous présentons dans cet article des résultats expérimentaux concernant la caractérisation d'écoulement d'azote (mesure de débit et de température) dans un micro canal (longueur = 57 mm, largeur = 150 μm , hauteur = 200 μm) à l'aide d'un anémomètre à microthermocouple de type intrusif. La gamme de débit étudiée est 0 – 200 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Cette sonde active utilise un microthermocouple de type K et de 25.4 μm de diamètre à travers trois méthodes de mesure dynamiques : la méthode de la fréquence de relaxation, la méthode du temps de vol et la méthode de la phase.

Nomenclature

e	écart entre fil, mm	w	largeur de rainure, μm
f	fréquence d'oscillation, Hz	<i>Symboles grecs</i>	
h	hauteur du canal, μm	θ	phase, $^\circ$
I	courant, A	<i>Indices et exposants</i>	
l	largeur du canal, μm	c	chauffage
L	longueur du canal, μm	inf	inférieur
p	profondeur de rainure, μm	r	relaxation
R	amplitude efficace, V	sup	supérieur
t	temps, s	0	référence
T	température, K		

1. Introduction

Les écoulements en microcanaux apparaissent dans de nombreuses configurations industrielles et de laboratoires à travers des applications liées à la biologie, au génie des procédés, à la chimie, à l'aérodynamique [1-3] et aux transferts de chaleur avec ou sans écoulements réactifs [4,5]. La mesure de caractéristiques thermophysiques des fluides en écoulements internes ou externes dans ces géométries très contraignantes nécessite le développement d'une instrumentation spécifique. Afin d'explorer les écoulements gazeux en micro canal, nous avons développé une méthode utilisant un anémomètre thermoélectrique utilisant un microthermocouple comme sonde active. Ce type de capteur présente différents avantages : simplicité technologique, faible coût, bonnes résolutions spatiale et temporelle. Un anémomètre est un capteur dont le fil résistif constitue l'élément sensible. Ce fil est chauffé par effet Joule ; il évacue le flux de chaleur produit vers un fluide par convection. On relie alors cette capacité à évacuer le flux de chaleur au phénomène étudié, une vitesse d'un fluide en écoulement ou son débit. Nous sommes ainsi en présence d'une sonde fournissant deux grandeurs : la température et la vitesse (débit). Dans les conditions sévères de géométries rencontrées dans les MEMS, il apparaît donc nécessaire de mesurer avec une grande exactitude la valeur des vitesses et des débits. Nous présentons dans cet article des résultats expérimentaux concernant la caractérisation d'écoulement d'azote (mesure de débit et de température) dans un micro canal en verre à l'aide de trois méthodes de mesure

intrusives, de type dynamique : la méthode de la fréquence de relaxation, la méthode du temps de vol et la méthode de la phase. Ces trois méthodes ont été testées dans la gamme de débit $0 - 200 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ et chacune a montré des caractéristiques différentes en termes de sensibilité, d'échauffement, de fréquence d'excitation.

2. Méthodes expérimentales

2.1. Dispositif expérimental.

Le dispositif expérimental se compose d'un micro canal en verre instrumenté par des micro thermocouples en fils disposés de manière intrusive et perpendiculairement à la section de passage. (Fig. 1). Ces thermocouples de type K (Chromel-Alumel) sont placés deux par deux à différentes abscisses du canal. Un régulateur de débit Bronkhorst a été utilisé comme étalon dans le cadre des ces expérimentations.

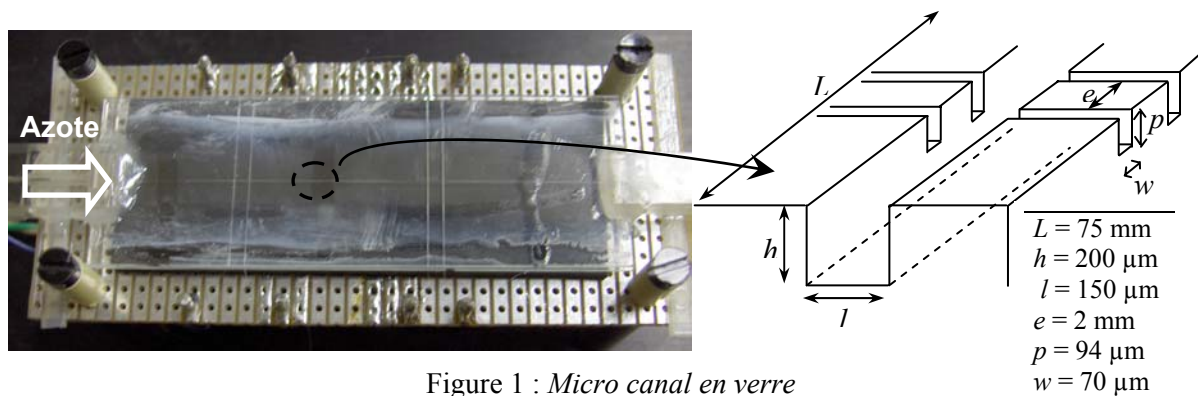


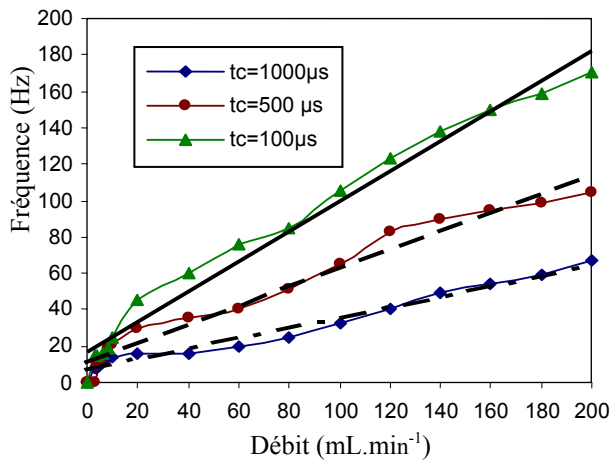
Figure 1 : Micro canal en verre

2.2. Méthode de la fréquence de relaxation

La méthode de la fréquence utilise un microthermocouple dont le fonctionnement repose sur celui de l'anémomètre à fil chaud. La sonde, placée dans le milieu dont on veut mesurer le débit, est soumise à une série périodique d'échauffement par effet Joule et de refroidissement lié à la convection engendrée par l'écoulement. La première phase, de durée fixe t_c permet au capteur d'atteindre une température T_{sup} supérieure à celle du fluide en écoulement (environ $20 \text{ }^\circ\text{C}$ au-dessus de la température moyenne du fluide en écoulement), tandis que lors de la seconde, le capteur se refroidit jusqu'à atteindre à nouveau la température du fluide T_{inf} (température ambiante). Cette phase de refroidissement, de durée t_r , étant liée à la perte convective engendrée par l'écoulement. Sa durée n'est pas constante et dépend directement de la vitesse du fluide donc de son débit [6,7].

Pour voir l'influence du temps de chauffe sur la fréquence d'oscillation du système, des mesures de débit ont été prises, ceci pour différents temps de chauffe et pour une intensité de courant de 90 mA . Les résultats des mesures représentés figure 2 expriment les variations de fréquence en fonction du débit pour trois temps de chauffe nettement distincts ($100, 500$ et $1000 \mu\text{s}$). Les valeurs des fréquences sont toutes ramenées à l'origine en calculant $(f-f_0)$ où f_0 représente la valeur de la fréquence enregistrée à débit nul (conditions de convection naturelle dans le canal). Aux faibles valeurs de débits (inférieurs à $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) les résultats issus de ces mesures sont difficilement exploitables. En effet, les courbes présentent plusieurs points d'intersections entre elles. En fixant un temps de chauffe et un débit à mesurer, la fréquence à mesurer change rapidement et la stabilité de cette fréquence n'est pas atteinte. Ceci reflète la difficulté d'aller mesurer dans le micro canal avec des temps de chauffe aussi proches l'un de l'autre. En ajoutant une courbe de tendance du premier ordre pour chacune des trois courbes

de fréquence, on peut estimer la sensibilité du capteur en calculant la pente correspondante. Le tableau 1 donne les valeurs de ces sensibilités. Nous montrons ainsi que la sensibilité de la sonde est inversement proportionnelle au temps de chauffe.



Intensité du courant $I = 90 \text{ mA}$	
Temps de chauffe (μs)	Sensibilité ($\text{Hz/mL}\cdot\text{min}^{-1}$)
100	0,83
500	0,52
1000	0,29

Tableau 1 : Sensibilité du capteur en fonction du temps de chauffe

Figure 2 : Variation de la fréquence en fonction du débit pour les temps de chauffe $t_c = 100, 500$ et $1000 \mu\text{s}$. Courant $I = 90 \text{ mA}$

2.3. Méthode du temps de vol

La méthode de mesure utilisée pour déterminer la vitesse locale de l'écoulement à l'intérieur du canal est la technique du temps de vol. Cette technique est basée sur le principe de la mesure du temps que met une information (flux de chaleur) pour se déplacer dans un milieu (fluide gazeux) depuis un émetteur (fil chauffant) séparé d'un récepteur (microthermocouple) d'une distance donnée [8].

Cette technique consiste à envoyer un pulse de courant dans un fil et à capter le flux de chaleur transporté par l'écoulement par un élément récepteur qui est un micro thermocouple (Fig. 4). Le fil utilisé est un fil de Chromel de diamètre $25,4 \mu\text{m}$. Il est chauffé à l'aide d'un générateur basse fréquence de rapport cyclique et de fréquence variables permettant de régler la durée de l'échelon de chauffage et d'un transistor permettant de fixer l'intensité du courant. Le thermocouple récepteur est un thermocouple de type K (Chromel/Alumel) de diamètre identique au fil émetteur et placé à une distance de 2 mm. Le signal prélevé sur le thermocouple et correspondant à l'augmentation de température obtenue est alors amplifié à l'aide d'un amplificateur faible bruit à gain élevé ($X 1000$) afin d'être exploité.

La variation des pentes en fonction du débit pour $t_c = 2\text{s}$ et $I = 160 \text{ mA}$ donne des résultats mitigés quant à la pertinence de cette méthode. Les écarts mesurés entre les valeurs des pentes lors de la phase de chauffage ou le temps entre l'émission et la réception du pulse sont insignifiants. Cette méthode est dans ce cas inexploitable. Ce résultat provient du fait que la sonde réceptrice se trouve trop éloignée de l'émetteur. Le signal thermique est alors trop faible pour modifier la pente de la courbe notamment dans sa phase croissante. Cependant, on note que le signal correspondant au débit de $200 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ possède de manière générale une amplitude générale plus importante que pour la courbe à débit nul. Cette méthode sera modifiée à l'avenir en réduisant la distance entre l'émetteur et le récepteur.

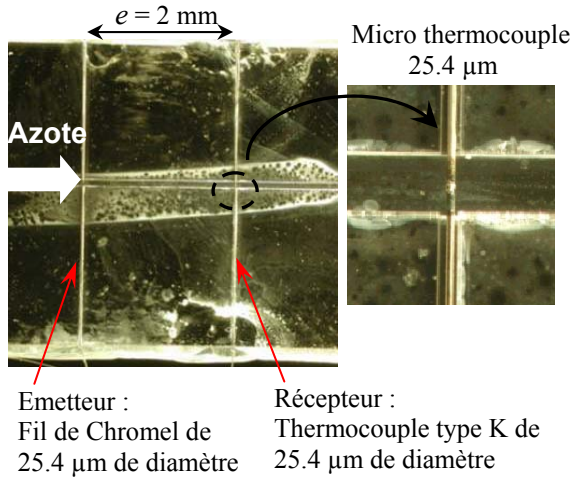


Figure 4 : Micro canal équipé pour le temps de vol

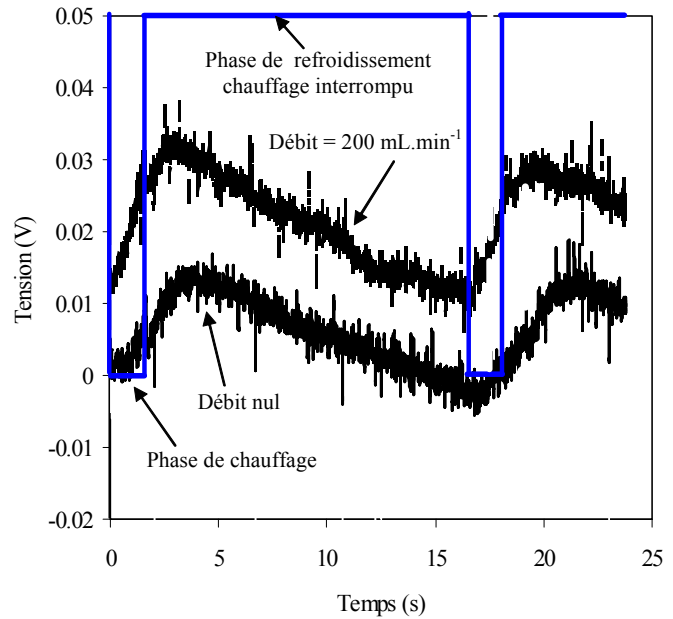


Figure 5 : Réponse du capteur

2.4. Méthode de la phase

La méthode de la phase consiste à chauffer le fil émetteur à l'aide d'un courant électrique de tension sinusoïdale et de fréquence et d'amplitude variables (Fig. 4 et 6a) [8]. L'énergie transportée par l'écoulement est détectée par un micro thermocouple placé à 2 mm en aval du fil chauffant (après amplification). La réponse au signal d'excitation est également de forme sinusoïdale, de fréquence identique, mais présente un retard de phase θ par rapport au signal émis ainsi qu'une amplitude efficace R fortement atténuée (Fig. 6b). La mesure du déphasage entre les deux signaux ou de l'amplitude du signal reçu est fonction du débit dans le microcanal.

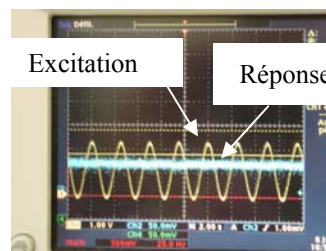
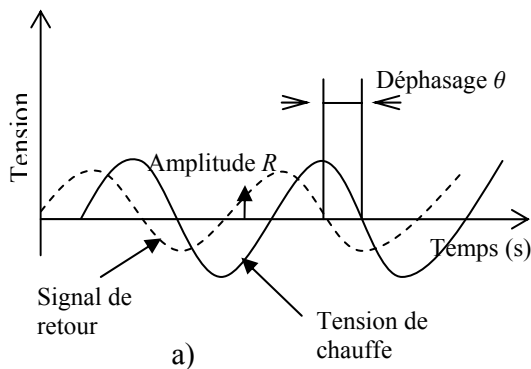


Figure 6 : Détection synchrone : a) principe b) mesures

Les mesures du déphasage et de la valeur efficace du signal reçu sont effectuées en faisant varier le débit de l'écoulement gazeux dans le canal de 0 à 200 mL.min⁻¹ pour différentes valeurs de fréquence d'excitations. Les fréquences choisies sont 150, 200, 300 et 400 mHz. Les figures 7a et 7b représentent les variations obtenues.

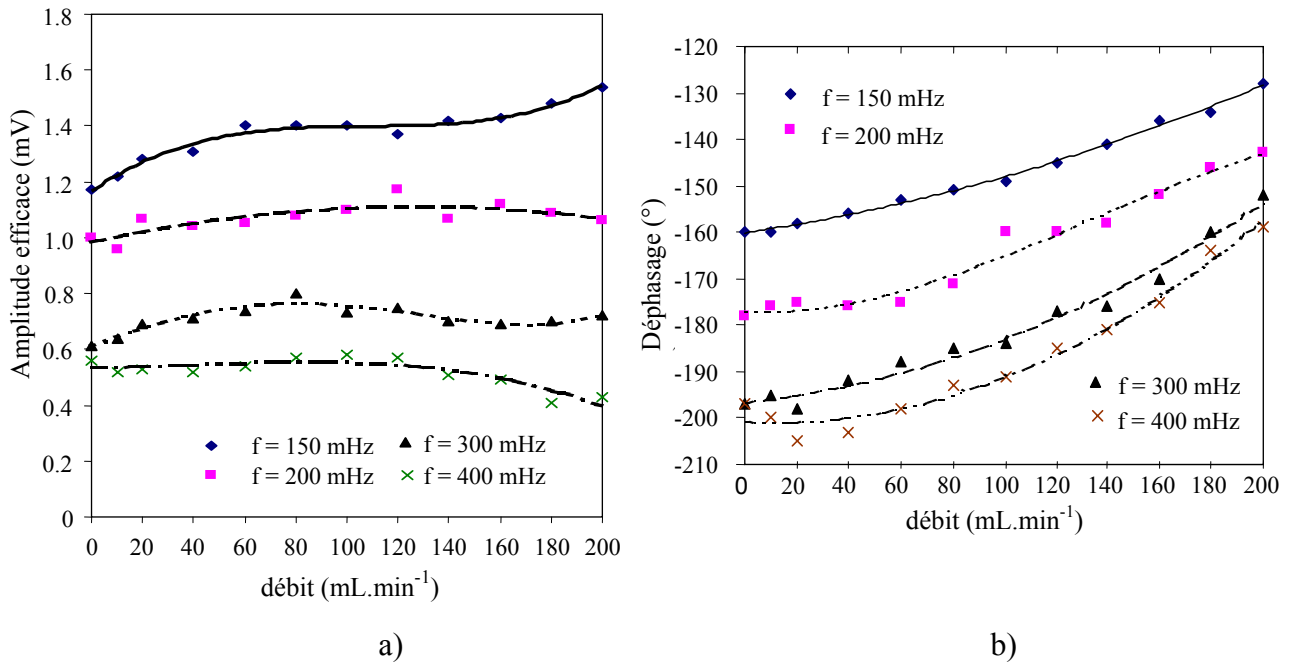


Figure 7 : Variation a) de l'amplitude efficace et b) du déphasage du signal reçu en fonction du débit pour différentes fréquences du signal d'excitation du fil chauffant d'amplitude efficace $R = 1.30 V$.

Les courbes concernant les valeurs efficaces de l'amplitude du signal reçu (Fig. 7a) sont difficilement exploitables ; les variations étant inférieures au mV. Ces courbes ne contiennent aucune information exploitable relative au débit. En ce qui concerne le déphasage (Fig. 7b), on remarque qu'il croît avec le débit imposé. Les déphasages les plus significatifs sont obtenus pour les fréquences les plus élevées. De plus, au delà d'un débit de 60 mL.min⁻¹, les variations de phase semblent linéaires et la pente la plus élevée (liée à la sensibilité du capteur) correspondant à une fréquence de 400 mHz est d'environ 0.4 °/(mL.min⁻¹).

3. Conclusion

Nous avons démontré la possibilité de réaliser un anémomètre à effet thermoélectrique, ou thermo anémomètre, pour la mesure des vitesses et des débits au moyen de microthermocouples bifilaires. Ce système présente un certain nombre d'avantages : il est peu onéreux et il permet la mesure simultanée de la vitesse (ou du débit) et de la température de l'écoulement. Dérivant du principe de l'anémomètre à fil chaud, le capteur réalisé a permis de mettre en évidence sa bonne sensibilité sur une large gamme de débit et tout particulièrement pour les faibles débits. Dans l'état actuel de nos recherches, la réponse du capteur a été grandement améliorée par rapport aux premiers essais [7]. Nous avons réduit cette durée à quelques centaines de μs [8]. Pour ce faire, trois techniques de mesure ont été développées. La première, utilisant une technique de chauffage et refroidissement périodiques sur un seul fil, a montré un gain de sensibilité du capteur pour le courant le plus élevé (90 mA). La technique du temps de vol n'a pas donné de bons résultats car l'intensité du courant appliquée au fil chauffant est trop importante donc un problème d'inertie thermique dans le canal n'est pas à écarter. Un gain de sensibilité sur le capteur est obtenu par la technique du déphasage pour les différentes fréquences d'excitation du fil chauffant. La plage de débit mesurable en utilisant cette technique varie de 60 à 200 mL/min. Les amplitudes efficaces enregistrées par le détecteur synchrone sont très faibles par rapport à la tension d'excitation du capteur qui est de 1,30 V. L'exploitation du déphasage dans ce cas est plus intéressante,

facilement mesurable par le détecteur. L'avantage de la première méthode sur les deux autres réside dans l'obtention d'une fréquence de travail voisine de quelques centaines de hertz et qui permet d'envisager l'étude d'écoulement faiblement instationnaires.

Une prochaine étude sera menée avec un canal équipé de sondes thermo anémométriques construites autour de fils microthermocouples de type K et de 7.5 μm de diamètre. L'intérêt de fils plus fins est double. D'une part, ils s'échaufferont plus vite sous l'effet de pulses de courant, ce qui réduira le temps de chauffage. De même, une diminution de l'intensité du courant de chauffage devrait permettre de limiter l'échauffement de la jonction et donc d'améliorer encore le temps de réponse du thermo anémomètre. D'autre part, la diminution de la taille des fils permettra de moins gêner l'écoulement dans le canal en réduisant les pertes de charge locales et les turbulences.

Les résultats actuels ne sont en fait qu'une première étape vers la miniaturisation générale du dispositif. L'objectif final de nos recherches est de développer un microsystème de très faibles dimensions de manière à pouvoir être utilisé dans des microcanaux de diamètre hydraulique inférieur à 50 μm permettant d'accéder aux trois informations : pression, température et vitesse. En dessous d'un diamètre hydraulique de 100 μm , l'écoulement de fluide perd de ses caractéristiques de continuité. Un autre domaine de la mécanique des fluides s'ouvre alors ; celui des écoulements possédant des propriétés de discontinuité relatives aux conditions de raréfaction.

Références

- [1] N.T. Nguyen, S.T. Wereley, *Fundamentals and applications of microfluidics*, Artech House Publishers, 2nd Edition, (2006).
- [2] H.A. Stone, S. Kim, Microfluidics: Basic Issues, applications and challenges, *AIChE Journal*, 47 (6) (2001), 1250-1254.
- [3] N.T. Nguyen, Micromachined flow sensors – a review, *Flow Meas. Instrum.*, 8 (1) (1997), 7-16.
- [4] H. Hetsroni, A. Mosyak, E. Pogrebnyak, L.P. Yarin, Fluid flow in micro-channels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48 (2005), 1982-1998.
- [5] S.S. Hsieh, H.H. Tsai, C.Y. Lin, C.F. Huang, C.M. Chien, Gasflow in a long microchannel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47 (2004), 3877-3887.
- [6] F. Lanzetta, E. Gavignet, P. Nika, *Caractérisation et modélisation d'un microdébitmètre thermique à thermocouple bifilaire*, Congrès de la Société Hydrotechnique de France, Microfluidique Micro-écoulements liquides et gazeux : phénomènes physiques et applications, Toulouse, France, 3-5 décembre (2002), 21-30
- [7] E. Gavignet, L. Girardot, F. Lanzetta, *Mesure de champs de vitesses dans un jet par sonde anémométrique à microthermocouple et comparaison par Vélocimétrie Laser à Franges d'Interférence*, Quatrième colloque francophone Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie, Belfort, France, 17-21 novembre (2003), 557-563
- [8] F. Idri, *Etude expérimentale des écoulements gazeux en microcanal*, Rapport de stage Master Recherche Ingénierie Fluidique et Thermique, Université de Franche-Comté, (2006)