

Caractérisation spectrale de μ thermocouples K de 7,6 μm de diamètre pour une application aux mesures de fluctuations de température dans des écoulements anisothermes turbulents.

Hervé Arlaud, Gildas Lalizel

ISAE-ENSMA / Institut P' UPR 3346
Département Fluides, Thermique et Combustion, Axe COST.
Téléport 2. 1, Av Clément Ader.
BP 40109 Futuroscope Chasseneuil Cedex

gildas.lalizel@ensma.fr

Résumé - Malgré le développement rapide de méthodes non intrusives optiques (interférométrie, fluorescence induite par LASER, etc...), le thermocouple reste le capteur de mesure le plus simple, le plus précis et le plus utilisé dans un fluide. Cet article présente le développement d'une sonde micro-thermocouple de type K montée sur broches, dont le diamètre réel de la jonction est de 7,6 μm ainsi que la comparaison de la réponse spectrale avec des sondes de diamètres plus importants. La réponse spectrale de la sonde est mesurée et comparée à une modélisation nodale instationnaire.

Nomenclature

S	sensibilité du thermocouple, $V.K^{-1}$	G_1	conductance de conduction, $W.K^{-1}$
L	longueur du thermocouple, m	G_2	conductance convecto-radiative, $W.K^{-1}$
S	surface d'échange du thermocouple, m^2	τ	constante de temps du fil, s
T_c	température du thermocouple, K	$A(f)$	facteur d'amortissement à la fréquence d'excitation f
$T_{broches}$	température des broches, K		
T_f	température du fluide, K		

1. Introduction

La métrologie thermique intrusive au sein des fluides présente un nombre important de types de capteurs, à choisir en fonction de la gamme des températures étudiées, la précision de mesure et la réponse dynamique souhaitée. Nous noterons de façon non exhaustive les thermistances, les sondes à résistance de platine, les fils froids et enfin les thermocouples. Le principe de fonctionnement des thermocouples est basé sur l'effet thermoélectrique Seebeck découvert en 1821. Lorsque deux métaux différents sont en contact, leur nuage électronique génère une tension électrique qui est une fonction de la température de la jonction. La sensibilité de la mesure S est également appelée coefficient de Seebeck. Son ordre de grandeur est la dizaine de microvolt par degrés selon la nature des couples métalliques. Les principaux couples utilisés sont présentés dans le tableau suivant :

Type	Métaux utilisés	Coefficient de Seebeck S ($\mu\text{V}/\text{C}$)	Température de fonctionnement (C)
K	Chromel / Alumel	42	-270 à 1370
E	Chromel / Constantan	68	-210 à 1000
J	Fer / Constantan	54	-210 à 1200
S	Platine Rhodium / Platine	6	-500 à 1760

Tableau 1 : Caractéristiques électrique et thermique de différents thermocouples

Le thermocouple le plus utilisé est le type K, couple composé d'Alumel et de Chromel. Il présente une très bonne sensibilité et une gamme de fonctionnement très large. Sa loi de calibration est croissante et approchée par une loi polynomiale qui permet d'obtenir, sur toute l'étendue de mesure, des précisions supérieures à 0,01%.

Dans les écoulement turbulents anisothermes, il est important de pouvoir déterminer les fluctuations temporelles des températures locales pour, par exemple, étudier le mélange du scalaire passif ou modéliser le tenseur des corrélations croisées vitesses/températures qui apparaissent dans l'équation de conservation de l'énergie au sein des écoulements de convection naturelle ou mixte. Le capteur doit donc être capable de mesurer les fluctuations de température sur un large domaine spectral, et ce dernier doit être d'autant plus large que l'écoulement est turbulent. Sa réponse spectrale doit ainsi être la plus homogène possible sur la plus grande étendue spectrale possible. Généralement, nous utilisons les fils froids, en tungstène ou en platine rhodié 10% par exemple, qui sont plus simple à réaliser, puisqu'il est plus « aisé » de souder un fil sur des broches que deux fils face à face.

Les thermocouples fins, de diamètre inférieur à 25 μm , sont peu intrusifs, résistent mécaniquement jusqu'à la température de fusion des métaux qui les constituent et fonctionnent à des pressions de plusieurs bars ainsi qu'à des vitesses de fluides de plusieurs centaines de m/s.

Le thermocouple, placé dans un écoulement turbulent anisotherme, subit en régime transitoire des fluctuations temporelles de flux thermique convectifs, radiatifs et conductifs.

La réponse dynamique d'un thermocouple dépend ainsi de trois phénomènes thermiques :

- L'inertie du couple qui est directement liée au diamètre D , à la longueur L du thermocouple, et à la nature du matériau.
- Les échanges thermiques par convection avec le fluide à la température T_f et les échanges par rayonnement avec le milieu ambiant.
- Les pertes par conduction dans les broches du support du couple, à la température $T_{broches}$.

Compte-tenu de la dimension du thermocouple fin, nous pouvons considérer que la température du fil est homogène ($Bi \ll 1$). L'équation instationnaire de la température d'un thermocouple T_c dans un écoulement turbulent à la température moyenne T_f peut alors s'écrire comme :

$$\rho_c C_p V_c \frac{dT_c(f)}{dt} = G_1 (T_{broches}(t) - T_c(t)) + G_2 (T_f(t) - T_c(t))$$

Paranthoen et al. [4] a montré que si le rapport L/D est supérieur à 200, les pertes par conduction dans les broches peuvent être négligées devant les pertes convecto-radiatives, $G_1 \ll G_2$. La conductance globale s'écrit alors :

$$G = h_{tot}S$$

Avec :

$$h_{tot} = h_{conv} + h_{rad} = h_{conv} + 4\epsilon T_m T_m^3 (T_f - T_c)$$

Où le coefficient d'échange convectif h_{conv} peut être estimé numériquement par une corrélation du nombre de Nusselt Nu ($Nu=f(Re, Pr)$) d'un écoulement laminaire ou turbulent autour d'un cylindre isotherme.

Dans de nombreux cas, il est même possible de négliger les transferts radiatifs, comme dans le cas des écoulements faiblement chauffés et/ou loin des parois chaudes par exemple.

Dans ce cas, où $L/D > 200$, L'équation de bilan thermique du thermocouple est une équation différentielle du premier ordre et la constante de temps τ est définie par :

$$\tau = \frac{h_{conv}S}{\rho_c V_c C p_c}$$

Soit f la fréquence calculée à partir de τ . La variation temporelle de la température du couple T_c soumis à une fluctuation périodique thermique s'écrit ainsi :

$$T_c(t) = T_f(t) [1 - A(f) \exp(-2\pi ft)]$$

où $A(f)$ représente la réponse spectrale du thermocouple à la fréquence f . Ainsi, plus l'inertie du couple est petite, plus la réponse temporelle du capteur sera rapide.

Actuellement, les thermocouples les plus fins que l'on trouve sur le marché ont des diamètres égaux à 25 μm et certains, développés dans les laboratoires de recherches académiques sont des thermocouples utilisant des fils de 12,7 μm de diamètre et très rarement du 7,6 μm . Les difficultés essentielles résident dans le soudage des deux composants qui conduit souvent à une soudure fragile, mais aussi dans l'accès à des fils de Chromel et d'Alumel à des diamètres inférieurs à 7,6 μm .

Un travail rigoureux et approfondi de méthodologie a donc été nécessaire pour réaliser un thermocouple de 7,6 μm de diamètre respectant le quadruple challenge défini par les critères suivant : précision de la mesure ($< 0,01$ K), fréquence de coupure élevée, intrusivité faible et forte résistance mécanique.

Le capteur présenté ici sur la figure 1, est composé de 3 éléments : la jonction de mesure réalisée par le soudage bout à bout d'un fil de Chromel et d'un fil d'Alumel, les broches, également en Chromel et Alumel, sur lesquelles est pointé le thermocouple, et enfin un support de sonde en céramique.

La longueur L du capteur est de 3 mm et le rapport L/D est de 398. Les broches ont un diamètre de 0,2 mm et leur longueur est égale à 5 mm.

Ce travail d'optimisation de la réalisation de sonde 7,6 μm a reposé sur trois aspects primordiaux :

- L'amélioration de la tenue mécanique et thermique du capteur par l'utilisation de colle céramique et le perfectionnement de la fabrication du support (usinage et mise en forme),
- La maîtrise du soudage par point sur les broches des 2 fils tendus composant le thermocouple.
- Enfin, la soudure entre les fils de Chromel et d'Alumel pour créer la jonction de mesure.

L'objectif de cet article est de montrer que la réponse spectrale du thermocouple est bien celle d'un thermocouple fin de 7,6 microns. Pour cela, un banc d'essai spécifique a été mis en place.

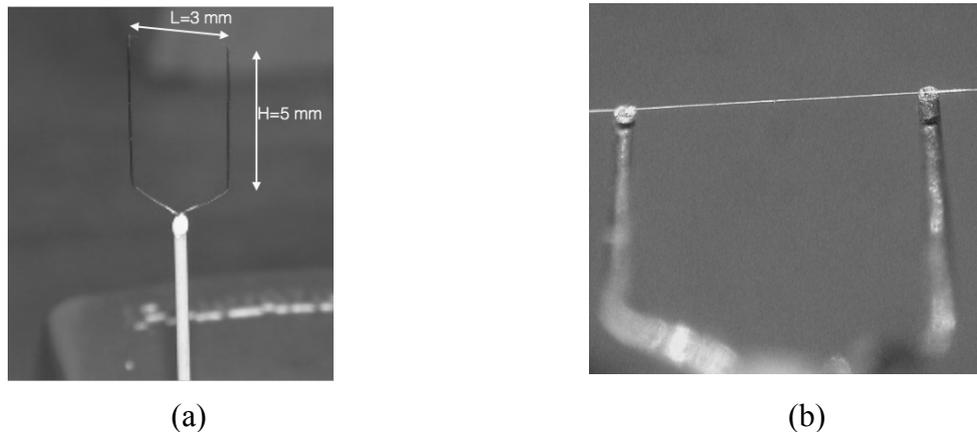


Figure 1 : (a) photographie d'un capteur complet et (b) zoom sur le fil et la soudure sur broche d'un thermocouple fin de 7,6 microns

2. Dispositif expérimental de la mesure de la réponse spectrale des thermocouples fins.

Le banc d'essai, présenté sur la figure 2, a été spécialement mis en place pour déterminer la réponse dynamique d'un thermocouple en fonction des fluctuations temporelles de température imposée, dans des conditions où la vitesse moyenne de l'écoulement peut également varier.

Le banc d'essai idéal consisterait en un écoulement à vitesses variables contenant des fluctuations périodiques de température parfaitement maîtrisées, reproductibles, et très précises. Cela reste extrêmement complexe à développer... Nous avons donc établi un protocole alternatif, similaire à celui développé par Arwatz et al. (2013) : l'échauffement par Laser. Le thermocouple est placé à l'intérieur du noyau potentiel d'un jet rond dont le débit est régulé par un col sonique monté sur un circuit d'air comprimé. Les variations de température sont générées par des fluctuations périodiques contrôlées du flux radiatif éclairant le thermocouple. Cette source est un Laser solide émettant à 532 nm dont la puissance est de l'ordre de la centaine de mW. La périodicité de l'éclairement est déterminée à l'aide d'un disque tournant ajouré dont la fréquence de rotation peut varier de 1 à 750 Hz. Une photodiode, placée sur le chemin optique, en aval du thermocouple, permet de mesurer la puissance du rayonnement Laser en fonction du temps. Il est ainsi possible de corrélérer la mesure temporelle de la température du thermocouple avec la fluctuation périodique du rayonnement incident. Les deux tensions issues du thermocouple fin et de la photodiode sont relevées à l'aide d'une carte d'acquisition de tension fonctionnant à 12,5 kHz relié à un PC.

Une centaine de périodes de flux radiatif est donc ainsi traitée afin d'obtenir une moyenne de phase du cycle thermique mesurée par le thermocouple, ce pour chaque fréquence de rotation du disque tournant. Une incrémentation d'un pas de 10 Hz a été retenu afin d'assurer une bonne précision sur la réponse spectrale du couple.

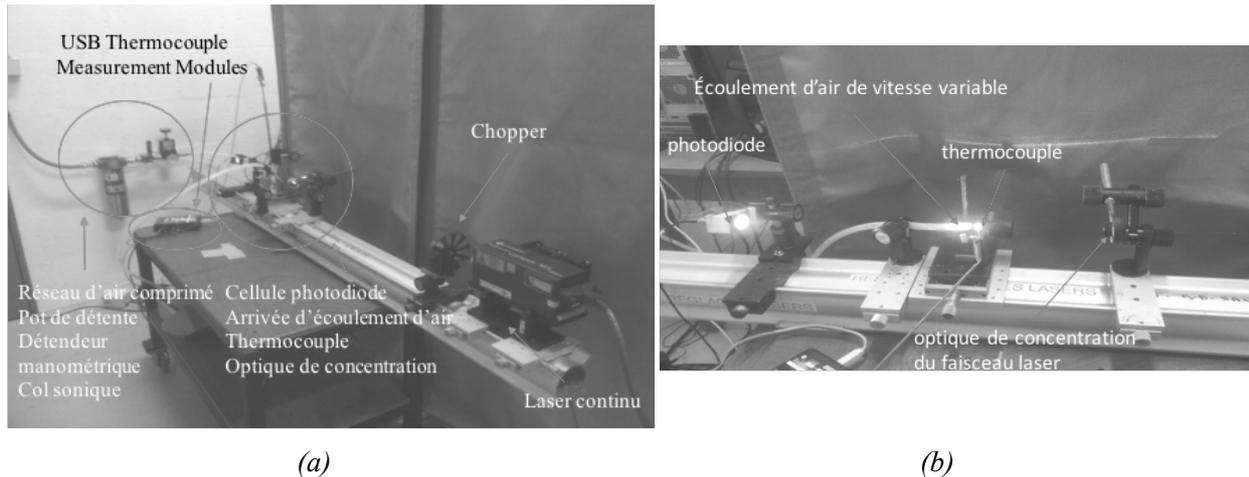


Figure 2 : schéma du dispositif expérimental de la calibration de la réponse dynamique du capteur.

3. Résultats expérimentaux et comparaisons avec un modèle nodal.

Les mesures expérimentales de la réponse spectrale du thermocouple ont été réalisées dans deux écoulements de vitesse égales à 0,5 m/s et 3m/s. Ces mesures sont présentées sur la figure 3 et ont été superposées aux modèle numérique.

Ce dernier relève d'un réseau nodal simple, où le thermocouple y est représenté par un nœud, ce qui est suffisant car le nombre de Biot est toujours très inférieur à 1. Il échange donc par convection avec l'air ambiant et par rayonnement (absorption du rayonnement périodique LASER, émission et absorption du rayonnement thermique). Le flux convectif est déterminé à l'aide d'une corrélation de convection forcée autour d'un cylindre isotherme. Ce nœud échange également par conduction avec deux nœud représentant chacun une broche en Chromel et en Alumel. Ces broches sont maintenues à la température ambiante.

Il est alors possible de comparer les différentes valeurs de flux échangés par le thermocouple, sur le tableau 2 suivant.

$G_{cond}(W.K^{-1})$	$G_{conv}(W.K^{-1})$	$G_{rad}(W.K^{-1})$
$1,48.10^{-6}$	$1,44.10^{-4}$	$2,72.10^{-4}$

Tableau 2 : Comparaison des conductances de conduction, convective et radiative du micro-thermocouple.

Les flux conductifs peuvent être négligés dans le modèle thermique, ce qui est en accord avec le rapport L/D du microthermocouple.

La résolution instationnaire est calculée en utilisant une discrétisation temporelle de type Euler explicite. Le pas de temps choisi est calculé en fonction de la fréquence d'excitation Laser.

Nous pouvons observer sur les figures 3 les superpositions des réponses spectrales expérimentale et numérique. La décroissance caractéristique qui apparaît sur la figure 3b est une fonction spectrale de premier ordre dont la fréquence de coupure est de 220 Hz. Nous relevons également une très bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats du modèle numérique nodal. Cela signifie que la soudure est de très bonne qualité et que la taille effective du couple est bien celle d'un thermocouple de 7,6 μm de diamètre.

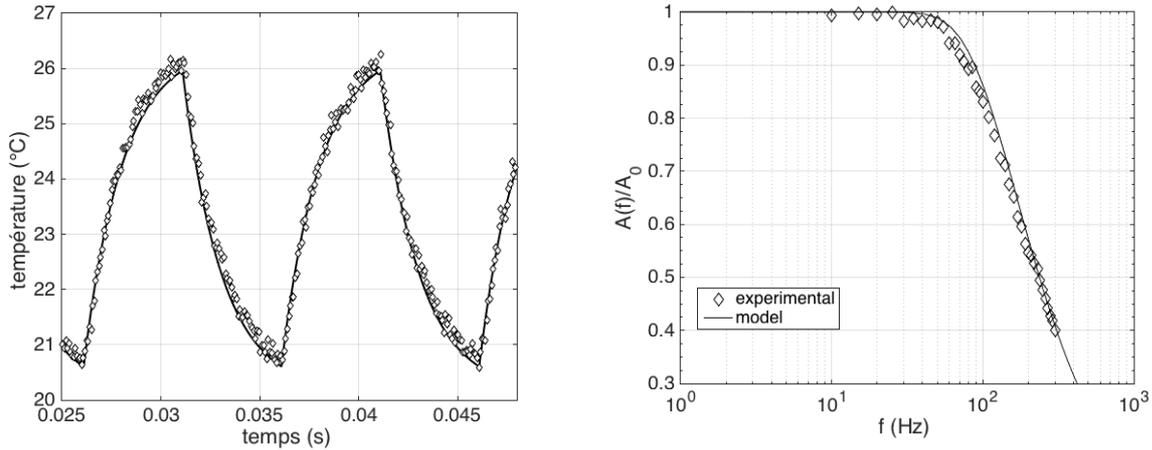


Figure 3 : (a) Comparaison des fluctuations temporelles de température mesurées expérimentalement et modélisées excités à une fréquence de 100 Hz et (b) comparaisons des réponses spectrales expérimentales et numériques pour un thermocouple de $7,6 \mu\text{m}$, dans un écoulement à $0,5 \text{ m/s}$.

Sur les figure 4 nous avons établi, à partir du modèle numérique précédemment cité, l'influence du diamètre des fils sur la réponse spectrale, ce pour des thermocouples de diamètre $25 \mu\text{m}$, $12,7 \mu\text{m}$ et $7,6 \mu\text{m}$, dans une vitesse d'écoulement égale à $0,5 \text{ m/s}$. Il est alors très facile d'estimer l'apport du $7,6 \mu\text{m}$ sur la mesure instationnaire des températures dans ces écoulements à basse vitesse.

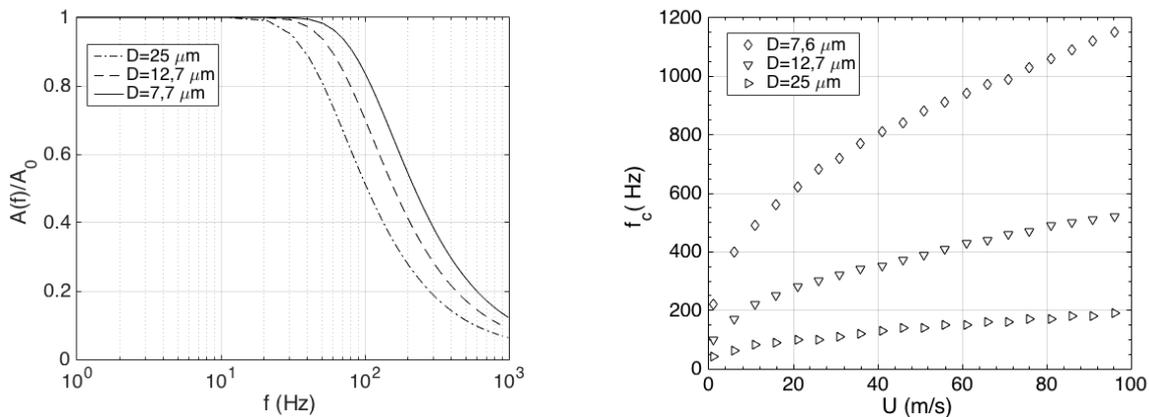


Figure 4 : (a) Comparaison numérique de la réponse spectrale théorique d'un thermocouple de 25 , $12,7$ et $7,6 \mu\text{m}$ dans un écoulement de $0,5 \text{ m/s}$ et (b) variation de la fréquence de coupure d'un thermocouple de 25 , $12,7$ et $7,6 \mu\text{m}$ en fonction de la vitesse de l'écoulement, d'après le modèle numérique.

La fréquence de coupure est définie comme étant la fréquence à partir de laquelle la réponse est égale à $63,2\%$ du stimulus. Les variations de la fréquence de coupure d'un thermocouple de 25 , $12,7$ et $7,6 \mu\text{m}$ sont présentées en fonction de la vitesse de l'écoulement sur la figure 4b. Bien sûr, les échanges convectifs augmentent en fonction de la vitesse de l'écoulement, il s'en suit donc que l'inertie thermique des thermocouples diminue et leurs fréquences de coupure augmentent. Il devient dès lors possible d'effectuer des mesures, grâce aux thermocouples fins, de fluctuations de température sur une très large gamme, contrairement aux fils froids par exemple, ou une re-calibration est nécessaire avant chaque expérience avec une étendue des températures mesurables plus faibles.

4. Conclusions

La miniaturisation des sondes de thermocouple reste primordiale pour caractériser les écoulements anisothermes turbulents, au sein desquels les fluctuations de température sont très rapides. Les thermocouples que nous avons développés sont fiables, précis, résistants et ont une fréquence de coupure 80 % plus grande que ceux développés précédemment. Ces thermocouples de 7,6 μm de diamètres ont pu être réalisés grâce au développement d'une méthode de fabrication bien spécifique et associant la mise en œuvre d'un équipement électronique et d'un banc de fabrication munit de platines de déplacements micrométriques.

Références

- [1] Arwatz G., Bahri C., Smits A.J. and Hultmark M. Dynamic calibration and modeling of a cold wire for temperature measurement. *Meas. Sci. Technol.*, vol 24, (2013).
- [2] Thierry L., Microsondes thermométriques, *Techniques de l'ingénieur* (2006)
- [3] Browne L.W.B. et Antonia R.A.. The effect of wire length on temperature statistics in a turbulent wakes. *Experiments in Fluids*, vol 5, 426-428, (1987)
- [4] Paranthoen P., Petit C. et Lecordier J.C. The effect of the thermal prong-wire interaction on the response of a cold wire in gaseous flows (air, argon and helium). *Journal of Fluid Mechanics*, vol 124, 457-473, (1982).
- [5] Petit C., Paranthoen J.C., Lecordier J.C. and Gajan P. Dynamic behaviour of cold wires in heated airflows ($300 < T < 600$ K). *Experiments in Fluids*, vol 3, 169-173, (1985).