

Fluxmètre thermique : étalonnage et mesures

Aymen ZRIBI, Sylvie BEGOT*, Magali BARTHES, François LANZETTA

Institut FEMTO-ST, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comte
Département ENERGIE, 2 avenue Jean Moulin, 90000 Belfort, France
*(auteur correspondant : sylvie.begot@ubfc.fr)

Résumé - Cette étude se situe dans le cadre du développement de fluxmètres thermiques. Dans une première partie, nous étudions les effets d'intrusion d'un fluxmètre à gradient à sondes résistives en platine déposées sur un substrat en verre à l'aide d'une étude par éléments finis. Dans une deuxième partie, nous déterminons les incertitudes de mesures associées à l'utilisation de la loi de Fourier pour calculer le flux. Dans une troisième partie, nous étudions un banc d'étalonnage en flux par comparaison à des fluxmètres de référence. Nous présentons des résultats de mesure pour différentes valeurs de flux qui montrent une bonne concordance entre les valeurs mesurées par les capteurs de référence et celle de notre capteur

Nomenclature

a	coefficient du polynôme d'étalonnage, $W.m^{-2}.\Omega^{-2}$	U	incertitude élargie
b	coefficient du polynôme d'étalonnage, $W.m^{-2}.\Omega^{-1}$	x	coordonnée spatiale
c	coefficient du polynôme d'étalonnage, $W.m^{-2}$	<i>Symboles grecs</i>	
e	épaisseur, m	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
k	facteur d'élargissement	ϕ	densité de flux thermique, $W.m^{-2}$
T	température, K	<i>Indices et exposants</i>	
TC	thermocouples	c	composée
u	incertitude	$réf$	référence
		1	côté source chaude
		2	côté puits froid

1. Introduction

Cette étude se situe dans le cadre du développement de fluxmètres thermiques. En effet, la connaissance du flux thermique est une donnée importante pour caractériser les échanges dans toutes sortes de configurations rencontrées dans l'industrie, le bâtiment, les machines thermiques, les procédés thermo-chimiques... Afin de répondre à ce besoin, nous avons développé un fluxmètre thermique basé sur le principe du fluxmètre à gradient [1]. La plupart des capteurs commerciaux basés sur le principe de la mesure d'un gradient de température utilisent des thermopiles comme éléments sensibles [2][3][4][5]. Cependant, des travaux de recherches utilisant des résistances variables avec la température comme élément sensible existent [6][7][8][9]. Ces résistances permettent de n'utiliser qu'un seul métal et donnent également une mesure de température. Nous avons développé un capteur de ce type. Cet article traite de l'étalonnage et des mesures obtenues.

2. Description du fluxmètre réalisé

2.1. Principe de mesure

Le principe de mesure est celui du fluxmètre à gradient (Figure 1). Le flux est alors relié aux températures par la loi de Fourier. En faisant l'hypothèse que le flux de chaleur est mono dimensionnel et stationnaire :

$$\phi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

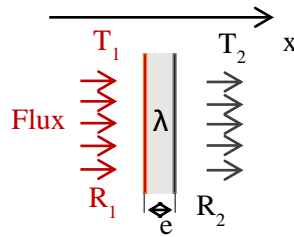


Figure 1 : Principe de mesure

2.2. Réalisation du fluxmètre et de ses supports

Le fluxmètre est composé d'un substrat en verre de type Borofloat de dimensions 5x5x0.5 mm³. Sur les 2 faces de ce substrat, sont déposées des résistances de platine de formes méandre ou spirale et de différentes largeurs de pistes. Plus de détails sur la fabrication du fluxmètre sont donnés dans [10][11]. La plage de mesure en température est de 20°C à 100°C. Dans la suite, nous étudierons plus particulièrement le fluxmètre de forme méandre et de largeur de piste 60 μm (Figure 2) et noté M60. Deux supports ont été conçus : un support auto-adhésif et un support vissant. Le capteur y est noyé dans une colle thermoconductrice.



Figure 2 : Fluxmètre M60 et ses deux supports possibles

3. Etude de l'implantation du capteur

L'implantation des fluxmètres est une question délicate car les capteurs modifient l'environnement thermique. Pour cette raison, nous avons conçu et modélisé un banc d'essai pour visualiser l'influence du capteur sur la mesure de flux. Le schéma du banc est présenté sur la Figure 3. Les résultats du modèle éléments finis simulant les conditions sans capteur, avec un capteur sans support, avec un support auto-adhésif ou avec un support vissant en inox sont présentés Figure 4 et Figure 5. Deux types de matériaux sont étudiés : le polyamide PA6 et l'aluminium, choisis pour représenter les matériaux isolants et conducteurs respectivement.

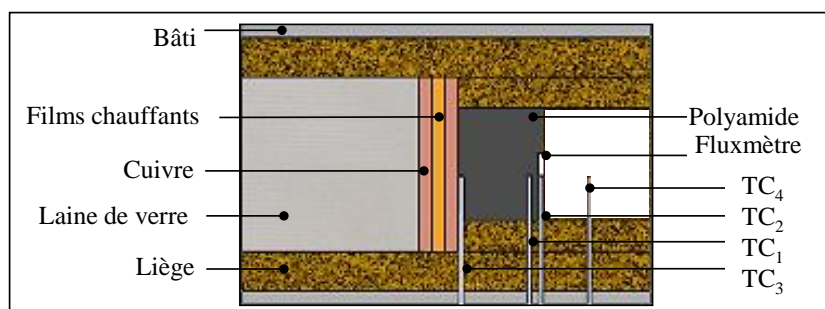
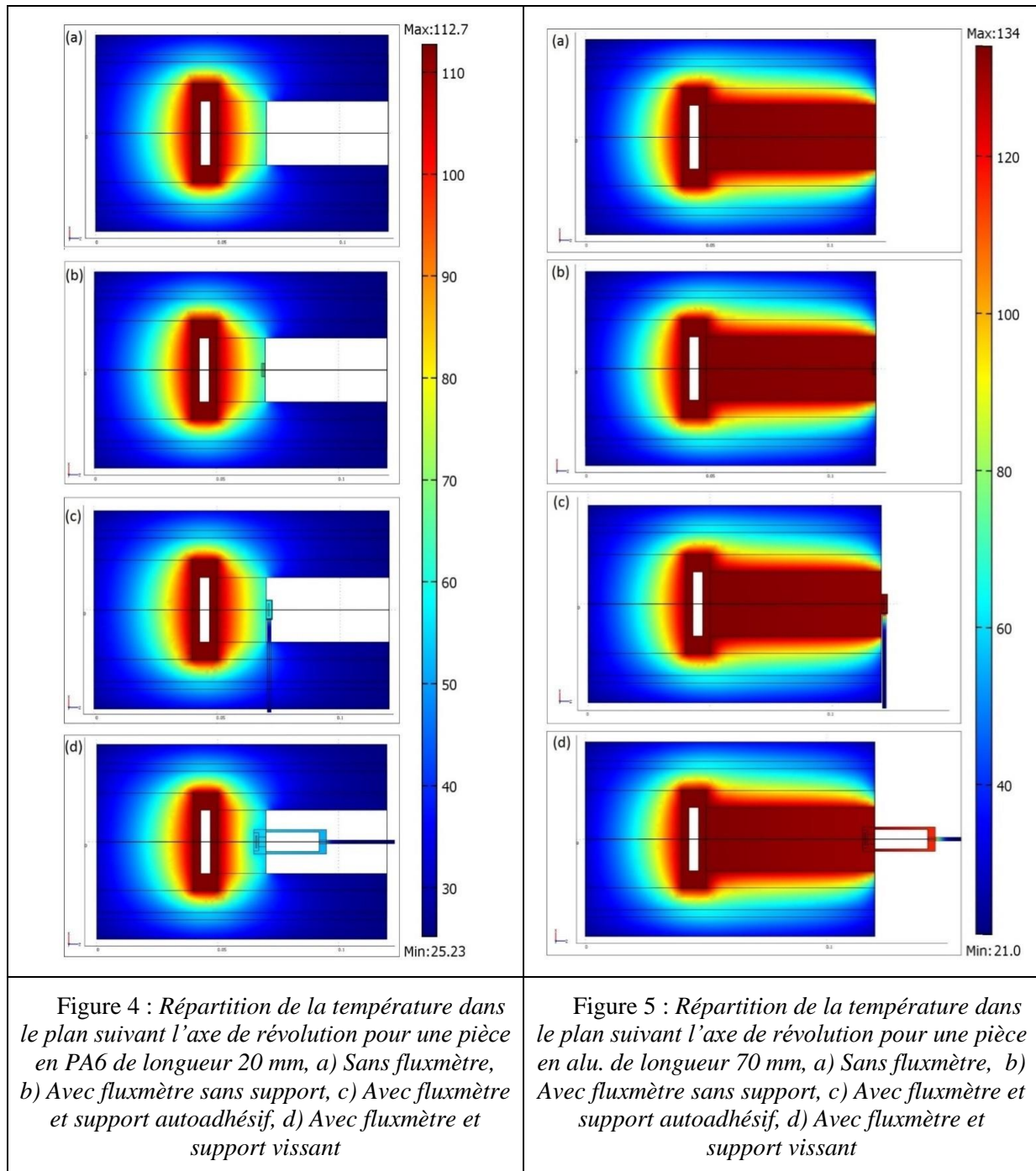


Figure 3 : Banc d'essai du fluxmètre



Nous constatons (Tableau 1) que le fluxmètre sans support représente la configuration la moins intrusive. La présence du fluxmètre ne conduit en effet qu'à des écarts de flux de l'ordre de quelques pourcents. Néanmoins, le capteur inséré n'étant pas facilement démontable, la configuration avec un support autoadhésif offre un meilleur compromis entre intrusion et coût de fabrication, car les écarts de flux se situent entre 15 % et 23 %. Le support vissant doit être réservé aux utilisations en conditions vibratoires et avec un matériau de propriétés proches de celles du support en inox. Cette étude nous a permis de définir une erreur de mesure systématique due à la présence du capteur. Dans les paragraphes suivants, nous allons étudier les incertitudes de mesure dues au capteur lui-même.

Pièce instrumentée	PA6		Aluminium 2017A		
Température de chauffe (°C)	112,7		134		
Modèle COMSOL	ϕ (W m ⁻²)	Ecart relatif (%)	ϕ (W m ⁻²)	Ecart relatif (%)	
Sans fluxmètre	614	-	1417	-	
Avec fluxmètre	Sans support	637	3,75	1378	2,75
	Avec support autoadhésif	710	15,64	1747	23,29
	Avec support vissant	1128	83,71	939	33,73

Tableau 1 : Valeurs des densités de flux thermique obtenues par simulation numérique

4. Mesures de densité de flux thermique par méthode indirecte

Nous appelons méthode indirecte la mesure de flux par application de la loi de Fourier à partir des 2 mesures de température du capteur. L'avantage de cette méthode est d'une part sa simplicité, et d'autre part, elle permet une mesure simultanée de température et de densité de flux thermique suite à un étalonnage préalable en température des sondes résistives.

4.1. Calcul d'incertitudes

Nous avons déterminé les incertitudes des mesures de densité de flux thermique. Chaque mesure de température est la moyenne de 3 échantillons. Conformément à la loi sur la propagation des incertitudes [12], l'incertitude composée en flux est obtenue par :

$$u_c(\phi) = \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} u(\lambda) \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial e} u(e) \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial T_1} u(T_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial T_2} u(T_2) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Il en découle alors :

$$u_c(\phi) = \left[\left(\frac{(T_2 - T_1)}{e} \right)^2 u^2(\lambda) + \left(\frac{\lambda}{e^2} (T_1 - T_2) \right)^2 u^2(e) + \left(-\frac{\lambda}{e} \right)^2 u^2(T_1) + \left(\frac{\lambda}{e} \right)^2 u^2(T_2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Les résultats présentés dans le Tableau 2 montrent, pour une densité de flux thermique d'environ 1000 W.m⁻² mesurée par méthode indirecte, que l'incertitude élargie est de l'ordre de 490 W.m⁻² soit presque 50 %. Pour cette densité de flux thermique, l'incertitude liée aux températures T_1 et T_2 contribue à plus de 94 % de l'incertitude composée. Pour étudier la contribution de chaque composante dans l'incertitude composée, nous avons tracé sur la Figure 6 les courbes d'évolution de la contribution des sources d'incertitude en fonction de la densité de flux thermique appliquée. Ces courbes montrent que la contribution des températures (T_1 , T_2) dans l'incertitude composée diminue par rapport aux autres contributions lorsque la valeur de la densité de flux thermique augmente. Ces éléments donnent donc des pistes pour améliorer la mesure de flux par méthode directe : diminution de l'incertitude de mesure associée aux mesures de température à faible flux et diminution de l'incertitude sur la valeur d'épaisseur du substrat à hautes valeurs de flux.

Source d'incertitude	Valeur \pm	Type	Incertitude type	Coefficient de sensibilité	Incertitude ($W m^{-2}$)	Contribution (%)
λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	0,03	B	$0,03/\sqrt{3}$	833.33	14,43	0,35
e (m)	5×10^{-5}	B	$5.10^{-5} / \sqrt{3}$	2.10^6	57,74	5,55
T_1 ou T_2 ($^{\circ}C$) [10]	0,07	A	0,07	2400	168	47,05
u_c					244,93	100
U (k=2)					489,86	

Tableau 2 : Valeurs d'incertitudes calculées pour un flux thermique d'environ $1000 W.m^{-2}$

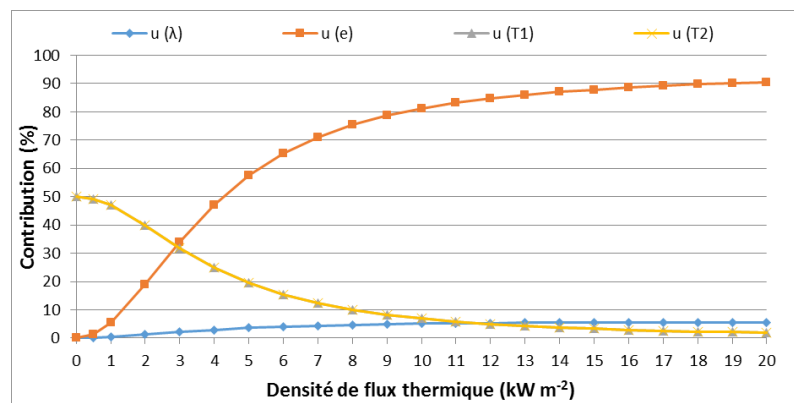


Figure 6 : Evolution de la contribution des sources d'incertitude dans l'incertitude composée en fonction de la densité de flux thermique appliquée

4.2. Mesures de flux

Pour tester la mesure de la densité de flux thermique à l'aide de nos capteurs étalonnés en température, nous avons utilisé le banc d'essais présenté au §3. Le fluxmètre est placé dans son support vissant et la pièce est en PA6. Nous avons comparé les résultats avec ceux obtenus en utilisant la mesure de température effectuée à l'aide de thermocouples du commerce. Les valeurs de flux pour différents essais sont tracées par rapport à la température mesurée de la source électrique. Le calcul de l'écart relatif entre les mesures des densités de flux thermique par fluxmètre et par thermocouples (Figure 7) est de l'ordre de 15 % pour le premier essai et de l'ordre de 25 % pour le deuxième essai. Ces résultats montrent une bonne reproductibilité des mesures faites avec le fluxmètre. Néanmoins, l'incertitude de mesure est importante.

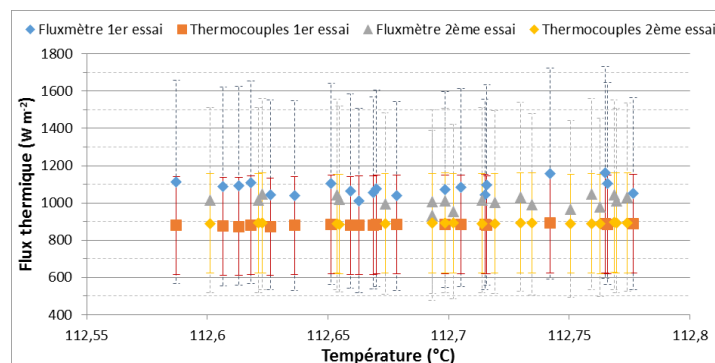


Figure 7 : Mesures des densités de flux thermique avec thermocouples et fluxmètre

5. Etalonnage et mesure de densité de flux thermique par méthode directe

Pour remédier à cette large plage d'incertitude à faible flux, nous avons développé un banc et une procédure d'étalonnage par comparaison à des fluxmètres de référence. Une fois cet étalonnage effectué, les capteurs ont été testés et des mesures de flux ont été faites. Cette méthode est appelée méthode directe. Elle permet de s'affranchir des variations de paramètres thermophysiques du substrat avec la température.

5.1. Banc et procédure d'étalonnage

Le banc d'étalonnage et de mesure des densités de flux thermique est constitué d'une enceinte cubique ($250 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$) en Plexiglas amorphe (PMMA) (Figure 8). Afin de diminuer les pertes par convection, l'enceinte est placée sous basse pression (4,2 mbar). De part et d'autre de l'enceinte, des montages permettent le placement de deux échangeurs en cuivre permettant d'imposer un gradient de température. Sur chaque échangeur est fixé un cylindre plein en cuivre de diamètre 10 mm et de longueur 115 mm. Au bout de chaque cylindre, nous avons installé un fluxmètre thermique du commerce (Captec). Entre ces deux capteurs Captec, nous avons placé notre fluxmètre disposé sur son support autoadhésif.

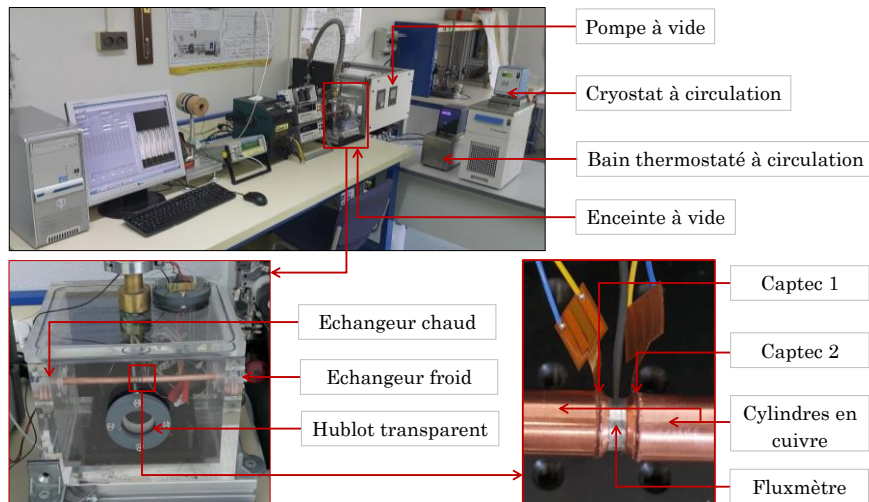


Figure 8 : Banc d'étalonnage et de mesures des densités de flux thermique par méthode directe

Pour faire varier le gradient de température au niveau des fluxmètres, nous avons imposé du côté de l'échangeur froid une température de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ et nous avons fait varier la température au niveau de l'échangeur chaud de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ à $90 \text{ }^\circ\text{C}$ par pas de $10 \text{ }^\circ\text{C}$. A chaque pas, nous avons mesuré 20 valeurs du fluxmètre de référence et des résistances R_1 et R_2 .

A partir de ces mesures, nous en déduisons les valeurs des densités de flux thermique par une interpolation polynomiale sur R_1 et R_2 :

$$\phi(R_1, R_2) = a_1 R_1^2 + a_2 R_2^2 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + c \quad (4)$$

5.2. Calcul d'incertitudes

L'incertitude composée due à l'étalonnage en densité de flux thermique est liée aux variances associées au fluxmètre de référence et au fluxmètre à étalonner :

$$u_c(\phi) = \left(u_{ref}^2 + u_c^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

L'incertitude pour le fluxmètre de référence nous a été fournie par le constructeur. L'incertitude pour notre capteur dépend de l'incertitude de la mesure des résistances :

$$u^2 = \left(\frac{\partial \phi}{\partial R} \right)^2 u_R^2 \quad (6)$$

avec un coefficient de sensibilité maximal observé dans la campagne de mesures de :

$$\frac{\partial \phi}{\partial R} = 2640 \text{ W m}^{-2} \Omega^{-1} \quad (7)$$

Les valeurs d'incertitudes et leurs composantes liées à l'étalonnage en densité de flux thermique sont répertoriées dans le Tableau 3. Ce calcul d'incertitudes montre des valeurs très faibles par rapport à l'incertitude de mesures calculée par méthode indirecte. En effet, le nombre de sources d'incertitudes décroît avec cette méthode. Ainsi, les incertitudes élargies sont de l'ordre de 113 W.m^{-2} soit une réduction d'un facteur 4, pour ce cas test.

Composantes d'incertitude	Valeurs	Type	Coeff. sensibilité	Contribution de l'incertitude (W m^{-2})
Etalonnage fluxmètre de référence	30 W m^{-2}	B	1	17,32
Répétabilité de mesure, $n = 20$	$27,23 \text{ W m}^{-2}$	A	1	27,23
Homogénéité du milieu de comparaison	80 W m^{-2}	B	1	46,19
Etalonnage résistance R_1, R_2 pour un calibre de mesure de $1 \text{ k}\Omega$	$2,88 \times 10^{-4} \Omega$	B	2640	0,76
u_c				56,36
$U (k=2)$				112,72

Tableau 3 : détermination de l'incertitude élargie pour la méthode directe

5.3. Mesures de flux

Nous utilisons le même banc que pour l'étalonnage, mais les gradients de température appliqués sont différents. Nous avons mesuré les densités de flux thermique par fluxmètre de référence (Captec) et par fluxmètre étalonné pour trois températures au niveau de l'échangeur froid : $15 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et $35 \text{ }^\circ\text{C}$, et pour chacune de ces températures froides, pour des valeurs de températures chaudes de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ à $90 \text{ }^\circ\text{C}$ par pas de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figure 9).

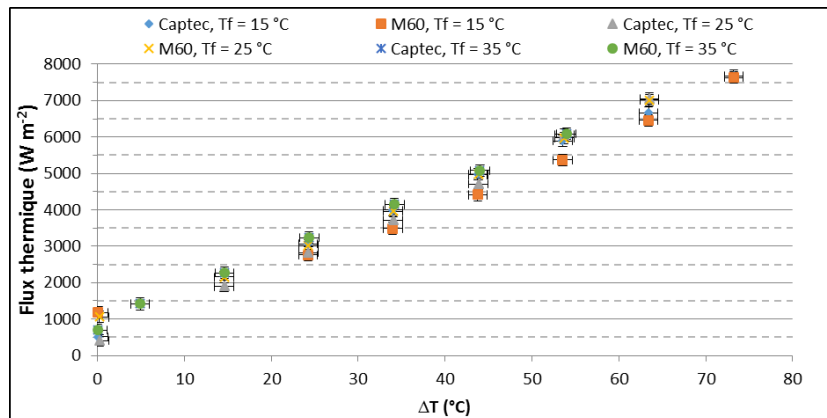


Figure 9 : Densités de flux thermiques des fluxmètres de référence (Captec) et étalonné

Nous observons que les courbes de notre fluxmètre et du fluxmètre de référence ne passent pas par zéro, probablement en raison d'un offset sur le fluxmètre de référence. Hormis cette anomalie, nous remarquons une très bonne répétabilité des mesures des densités de flux thermique et une bonne concordance avec les valeurs des fluxmètres de référence.

6. Conclusion

Dans cet article, nous avons rappelé les caractéristiques d'un fluxmètre de taille micrométrique. Nous avons étudié les effets d'intrusion de ce capteur et de ses supports, avons calculé les incertitudes de mesure, présenté des bancs et comparé des méthodes d'étalonnage. Nous avons montré que la méthode d'étalonnage directe en flux présente des incertitudes de mesure plus faibles que la méthode indirecte. Nous avons présenté des résultats de mesure qui montrent une bonne concordance avec les valeurs mesurées par des capteurs de référence. Compte-tenu des incertitudes de mesure et des difficultés d'étalonnage à faible flux, la gamme de mesure se situe entre 1000 et 8000 W.m⁻².

Références

- [1] Tom E. Diller. Advances in heat flux measurements. *Advances in Heat Transfer*, 23:279–368, 1993.
- [2] Captec, 47 rue Jeanne d'Arc 59000 Lille, France. <http://www.captec.fr> [last accessed 2016/12/16].
- [3] Hukseflux Thermal Sensors B.V, Delftechpark 31, 2628 XJ Delft, The Netherlands. <http://www.hukseflux.com> [last accessed 2016/12/16].
- [4] Vatec corporation, P O Box 66 Christiansburg VA 24068, USA. <http://www.vatec.com> [last accessed 2016/12/16].
- [5] GreenTEG, Technoparkstr. 1, CH-8005 Zürich, Switzerland, <http://www.greenteg.com> [last accessed 2016/12/16].
- [6] A. Andretta, B. Bartoli, B. Coluzzi, V. Cuomo, and S. De Stefano. Simple heat flux meter. *Rev. Sci. Instrum.*, 52(2), 1980.
- [7] Julian W. Post, A. Bhattacharyya, and M. Imran. Experimental results and a user-friendly model of heat transfer from a thin film resistance temperature detector. *Applied Thermal Engineering*, 29(1):116 – 130, 2009.
- [8] Francesco Paolo D'Aleo and Horst-Michael Prasser. Design, calibration and testing of a thin film temperature gauge array for temperature and heat flux measurements in fluid mixing experiments. *Flow Meas. Instrum.*, 24(0):29 – 35, 2012.
- [9] Boussad Azerou. *Conception, réalisation et mise en oeuvre de fluxmètres thermiques passifs et dynamiques à base de couches minces*. PhD thesis, Université de Nantes France, 2013.
- [10] Aymen Zribi, Magali Barthès, Sylvie Bégot, François Lanzetta, Jean Yves Rauch, and Virginie Moutarlier. Design, fabrication and characterization of thin film resistances for heat flux sensing application. *Sensor Actuat. A: Phys.*, 245:26 – 39, 2016.
- [11] Aymen Zribi. *Fluxmètre thermique : conception, modélisation, réalisation, et caractérisation. Mesures de températures et de densités de flux thermiques*. PhD thesis, Université de Franche-Comté France, 2016.
- [12] Robert J Moffat. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental thermal and fluid science*, 1(1):3–17, 1988.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude envers l'Agence Nationale de Recherche programme Systèmes Energétiques et Décarbonés (SEED) Edition 2012 projet MISTIC (Micro générateurs Stirling pour la récupération d'énergie thermique basse température).