

Fluxmètre thermique : conception, tests et mesures de flux de chaleur conductif.

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

Institut FEMTO-ST, Département ENERGIE
2, avenue Jean Moulin, 90000 BELFORT Cedex

* (auteur correspondant : aymen.zribi@univ-fcomte.fr)

Résumé - Cette étude se situe dans le cadre du développement de fluxmètres thermiques. Notre objectif final est de développer un capteur de mesure de flux thermique, de dimensions micrométriques, que nous validerons grâce à un banc d'essai spécifique. La phase préliminaire de ce travail porte sur la conception d'un prototype millimétrique et la comparaison des résultats obtenus avec ceux obtenus à partir de mesures de températures. Notre prototype actuel est un fluxmètre à gradient normal, conçu, modélisé et fabriqué au laboratoire. Les thermo-résistances et les plots de connexion en platine sont déposés par pulvérisation cathodique de part et d'autre d'un substrat rigide en verre de 0,5 mm d'épaisseur. La résistance à la forme d'un méandre, avec des largeurs de piste de 60 μ m, et la surface sensible du capteur est de 4 mm² (cf. figure 1). Un recuit a été pratiqué. Pour tester ce capteur, un support spécifique a été conçu. Il intègre le fluxmètre thermique avec les connexions filaires ainsi que plusieurs thermocouples. Dans un premier temps, tous les capteurs, associés à leur support, sont étalonnés par rapport à une sonde de référence de haute précision sur un banc d'étalonnage statique certifié. Dans un second temps, ces capteurs sont testés sur le banc d'essai constitué d'un bâti cylindrique isolé radialement avec du liège. A l'intérieur de ce dernier, on retrouve un assemblage de différents éléments. Le système de chauffage est constitué de deux films chauffants insérés entre des pièces en cuivre afin d'homogénéiser au mieux le flux surfacique. Ces pièces sont en contact avec d'autres éléments cylindriques (conducteurs ou isolants thermiques). Ces derniers sont instrumentés avec notre fluxmètre thermique à thermo-résistances, ainsi qu'avec des thermocouples de type K localisés en différents points du montage. Le fluxmètre ainsi que les thermocouples sont connectés respectivement à des multimètres de précision et à un boîtier d'acquisition. L'ensemble des signaux sont enregistrés sur un ordinateur via un programme d'acquisition. Il permet à la fois l'affichage et l'enregistrement simultané des températures, des valeurs des résistances et des densités de flux thermique. A partir des données collectées, nous avons pu déterminer et comparer les flux thermiques obtenus. Les incertitudes de mesures ont été déterminées. L'auto-échauffement des résistances a été étudié. Les résultats montrent une bonne répétabilité de la mesure de flux, ainsi qu'une bonne concordance avec les mesures de températures.

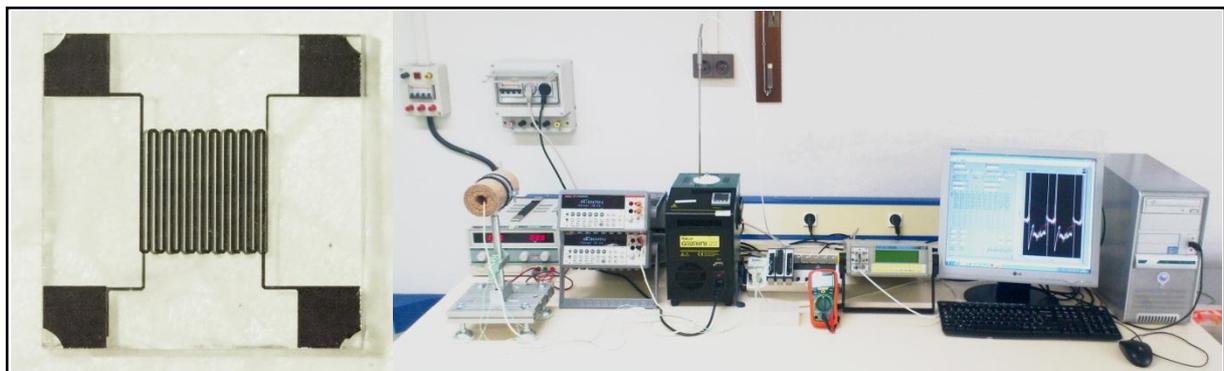


Figure 1 : Fluxmètre développé et son banc d'essai.

Nomenclature

e	épaisseur du fluxmètre, m	U_k	incertitudes multimètre, $^{\circ}C$
n	nombre de mesures	U_p	incertitudes sonde Pt100, $^{\circ}C$
S_{exp}	écart type expérimental	X_i	mesure expérimentale
T	température, $^{\circ}C$	δ	incertitudes
U_c	incertitudes composées, $^{\circ}C$	ϕ	densité du flux thermique, $W.m^{-2}$
U_{exp}	incertitudes expérimentales, $^{\circ}C$	λ	conductivité thermique, $W.K^{-1}.m^{-1}$
U_f	incertitudes four Gemini, $^{\circ}C$		

1. Introduction

La connaissance du flux thermique à travers une paroi est une donnée primordiale dans de nombreux domaines, comme par exemple la thermique du bâtiment et l'optimisation des machines thermiques. Ce type de mesure nécessite l'introduction d'un capteur qui soit le moins intrusif possible, qui couvre une large plage de température et avec une sensibilité optimale. A priori, on peut distinguer trois types de fluxmètres : fluxmètre à gradient, fluxmètre à inertie, fluxmètre à dissipation. Holmberg et Diller [1] ont développé un micro capteur de flux thermique mesurant simultanément la densité de flux de chaleur et la température. Devisme *et al.* [2] présentent deux sortes de fluxmètres à gradient transversal. Pullins et Diller [3] ont élaboré un capteur de flux de chaleur à thermopile, destiné à une utilisation dans des environnements thermiques extrêmes. Enfin, Post *et al.* [4] ont mis l'accent sur l'étude des trois modes de transfert de chaleur grâce à un détecteur de température à résistance. La littérature montre que la majorité des capteurs de flux thermiques sont à contact direct. Lorsqu'ils sont fixés sur une paroi, ces capteurs mesurent alors un flux conductif. En se basant sur le premier principe de la thermodynamique, on peut remonter au flux convectif et/ou radiatif [5]. D'autres types de capteurs sensibles uniquement au rayonnement [6] ou à la convection [7] sont disponibles. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au développement et à la caractérisation d'un fluxmètre thermique. Dans une première partie nous présenterons le prototype que nous avons développé. Puis, dans une seconde partie, nous détaillerons le banc expérimental développé pour la validation du capteur. Par la suite, nous présenterons la méthode de détermination et la quantification des erreurs/incertitudes de mesures. Enfin, nous terminerons par l'analyse des résultats obtenus.

2. Capteur de flux thermique : prototype

Notre prototype est un fluxmètre thermique à gradient de température. Ce capteur est réalisé à partir de dépôts de couches minces faisant office de sonde de température résistive de part et d'autre d'un substrat isolant thermique. L'utilisation de films minces permet de créer des dispositifs plus petits, moins coûteux, plus fiables, et avec un temps de réponse plus rapide ([8] [9]). La mesure de la différence de température entre les deux surfaces du fluxmètre permet de déterminer la densité du flux de chaleur en régime permanent (loi de Fourier). Afin que le capteur soit le moins intrusif possible, il doit présenter une faible résistance thermique par rapport à la pièce à analyser. Cependant, ce dernier point implique une faible différence de température entre les deux faces du capteur [10]. Pour mesurer ces faibles différences de températures, on doit garantir une bonne sensibilité thermique, ce qui nécessite des valeurs de résistances électriques relativement importantes, et implique d'ajuster les paramètres suivants :

- une réduction de la largeur de la piste, tout en limitant la fragilité de celle-ci,
- une épaisseur minimale des films afin de garantir la continuité électrique,
- un accroissement de la longueur de la piste, limité par l'encombrement.

En tenant compte de l'ensemble de ces critères, nous avons effectué la conception des fluxmètres à l'aide d'un logiciel CAO. Nous avons ainsi pu valider une dizaine de concepts différents avant de n'en sélectionner qu'un, objet de cette étude. Le concept retenu est un fluxmètre à thermo-résistances de platine (Figure 2a). Celles-ci, ainsi que les plots, sont déposés par pulvérisation cathodique de part et d'autre d'un substrat en verre de 0.5 mm d'épaisseur. La résistance, d'épaisseur 280 nm et de surface utile 4 mm², a la forme d'un méandre et une largeur de piste de 60 µm. Chaque face du fluxmètre présente quatre plots; deux pour assurer la connexion électrique, et deux autres pour assurer une symétrie entre les deux faces lors du passage du flux de chaleur. La sonde réalisée est présentée sur la figure 2b. La sonde présente les avantages de garantir la protection du capteur, d'être peu intrusive et de faciliter les opérations de montage et démontage. Afin de caractériser le capteur, nous avons développé un banc d'étalonnage spécifique qui fait l'objet du paragraphe suivant.

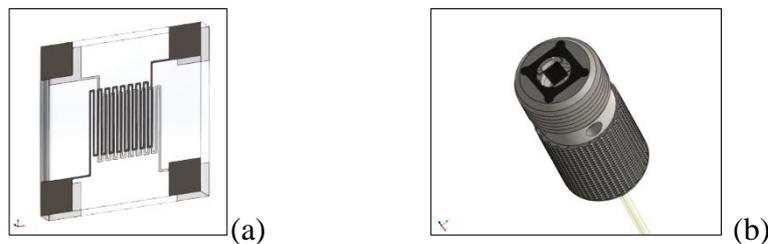


Figure 2 : Fluxmètre thermique (Verre, Platine, Méandre 60 µm) et son support spécifique

3. Dispositif expérimental

L'étalonnage est réalisé grâce à un banc certifié. Ce banc (cf. figure 1) est composé d'une sonde de référence haute précision en platine (Pt100) reliée à un thermomètre de référence, d'un four d'étalonnage et de deux multimètres de précision Keithley 2100 (montage 2 fils). Ces derniers permettent aussi de contrôler l'intensité du courant injecté dans les thermo-résistances, et donc de minimiser les phénomènes d'auto échauffement jouant sur la sensibilité du fluxmètre. Le banc d'essais est constitué d'un bâti cylindrique en polyamide isolé radialement avec du liège (cf. Figure 3). A l'intérieur de ce dernier, on retrouve un assemblage de différents éléments. Le système de chauffage est constitué de deux films chauffants insérés entre des pièces en cuivre afin d'homogénéiser au mieux le flux surfacique. L'un des côtés de ces pièces est isolé (laine de verre) alors que l'autre est en contact avec un cylindre plein (en polyamide ou en aluminium). Ce dernier qui est en contact de l'autre côté avec l'air ambiant est instrumenté avec le prototype inséré de fluxmètre thermique et avec des thermocouples (type K).

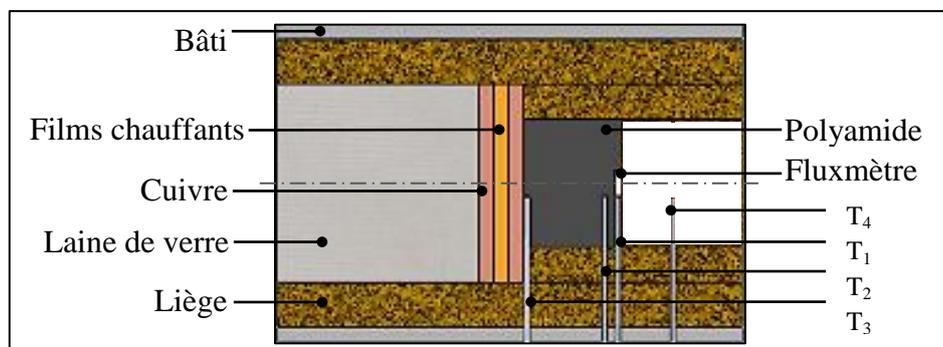


Figure 3 : Disposition des thermocouples et du fluxmètre thermique à l'intérieur du banc (vue en coupe)

Les thermocouples sont localisés de manière à permettre les mesures de la température ambiante (T₄), de la température au niveau du système de chauffe (T₃) et des deux

températures à proximité du fluxmètre (T_2 , T_1). Le fluxmètre, ainsi que les thermocouples, sont connectés respectivement à des multimètres de précision et à un boîtier d'acquisition. L'ensemble des signaux est enregistré via un programme d'acquisition. A partir des données collectées, nous avons pu déterminer et comparer les flux thermiques obtenus.

4. Caractérisation et résultats

4.1. Erreurs et incertitudes

Afin de caractériser notre prototype, nous avons déterminé les incertitudes et erreurs des différentes mesures. Concernant la mesure de température, et conformément à la loi sur la propagation des incertitudes, l'incertitude composée est obtenue par combinaison de ses composantes individuelles. Avant d'être combinées, les contributions doivent être exprimées sous forme « d'incertitudes-types » (grandeurs homogènes à des écarts-types). De façon générale, l'expression de l'écart type expérimental de la série de n mesures est donnée par :

$$S_{\text{exp}} = \left[\frac{1}{n-1} \sum (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ avec } \bar{X} = \left[\frac{\sum X_i}{n} \right] \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

Dans notre cas, on a effectué une série de trois mesures pour chaque température d'étalonnage (incertitude de type A). L'incertitude de type expérimental est donnée par :

$$U_{\text{exp}} = \frac{S_{\text{exp}}}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

D'où l'expression de l'incertitude composée :

$$U_c = \left[U_{\text{exp}}^2 + U_p^2 + U_f^2 + U_k^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Les valeurs d'incertitudes expérimentales et leurs composantes associées sont données dans le tableau 1 ci-dessous :

<i>Composante</i>	<i>Désignation</i>	<i>Incertainde</i> [°C]	<i>Remarques</i>
Incertaindes expérimentales	U_{exp}	0.01	Incertainde moyenne des thermo-résistances calculée à partir de (2)
Sonde Pt100	U_p	0.01	Incertainde moyenne calculée sur une plage de température de 0 à 400°C
Four Gemini	U_f	0.10	Incertainde moyenne calculée sur une plage de 35°C jusqu'à 550°C
Keithley 2100	U_k	0.02	Incertainde propre au multimètre
Incertainde composée	U_c	0.11	Calculée à partir de (3)

Tableau.1 : Valeurs des incertitudes expérimentales liées à la mesure de la température

La mesure de la différence de température entre les deux surfaces du fluxmètre permet de déterminer la densité du flux de chaleur (loi de Fourier en conduction et régime permanent).

$$\phi = \frac{\lambda}{e} (T_2 - T_1) \quad (4)$$

L'incertitude sur la valeur de la densité de flux est donnée par:

$$\delta\phi = \left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial\lambda} \delta\lambda \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial e} \delta e \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial T_1} \delta T_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial T_2} \delta T_2 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Il en découle alors :

$$\delta\phi = \left[\left(\frac{(T_2 - T_1)}{e} \delta\lambda \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{e^2} (T_1 - T_2) \delta e \right)^2 + \left(-\frac{\lambda}{e} \delta T_1 \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{e} \delta T_2 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Les valeurs d'incertitudes de mesure de densité de flux thermique (Tableau 2) sont élevées, et nous conduisent à envisager un étalonnage direct en flux [3].

	$\delta\lambda$	δe	δT_1	δT_2	$\delta\phi$
	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	m	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$W \cdot m^{-2}$
Incertitude	0.1	$50 \cdot 10^{-6}$	0.11	0.11	396

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

4.2. Résultats et discussion

Nous supposons que la valeur fournie par la sonde Pt 100 (étalonnée, certifiée) est la valeur du mesurage, l'erreur absolue commise est alors la valeur absolue de la différence entre la valeur fournie par la thermo-résistance, et celle de la sonde. La source de variabilité des résultats dépend donc de plusieurs facteurs impactant la sensibilité des thermo-résistances et la répétabilité des mesures vis à vis du mesurage. Les performances du prototype sont influencées par :

- l'impact sur le comportement des sondes de trois cycles thermiques identiques. Ces cycles correspondent à la phase d'étalonnage statique suivie d'une phase de refroidissement libre. Toutes les températures (T : sonde de référence et T_1 , T_2 : capteurs) étant déterminées dans les mêmes conditions de fonctionnement, cela permet de déterminer l'erreur absolue liée à la sonde de référence, et de vérifier la répétabilité de nos mesures par thermo-résistances.

- l'impact de la valeur du courant d'injection dans la résistance qui est générateur d'effet Joule. Deux valeurs d'intensités sont testées : 0,1 et 1 mA.

Avec un courant injecté de 1 mA, les courbes d'étalonnage donnant la température en fonction de la résistance de part et d'autre du capteur sont linéaires, avec des pentes presque similaires mais des résistances initiales différentes (Figure 4). Cette différence provient d'une différence d'épaisseur de dépôt. La figure 5 correspond à l'évolution de l'erreur lorsque le prototype subit les trois cycles chauffage/refroidissement libre. On constate que ces cycles thermiques influencent fortement le comportement des thermo-résistances. En effet, après deux cycles thermiques, l'erreur absolue varie entre $3^{\circ}C$ et $7^{\circ}C$. Ceci montre l'importance et la nécessité d'une phase de recuit. Par la suite, les résultats présentés concerneront un fluxmètre ayant subi un recuit à $450^{\circ}C$ pendant 6 heures. Nous avons ensuite étudié l'influence du courant d'alimentation sur l'auto-échauffement de la sonde. Nous avons ainsi effectué une série de tests à 1.0 mA et à 0.1 mA. Les mesures des températures sur la figure 6 montrent, pour un courant injecté de 1 mA, une augmentation très nette de la température au centre du fluxmètre avant d'atteindre un régime quasi statique. En revanche, pour un courant injecté de 0.1 mA, les mesures de températures montrent un très faible échauffement, quasi stable, au centre du fluxmètre. Nous avons donc décidé de réaliser les essais avec un courant de 0.1 mA. Par la suite, nous avons effectué des mesures avec le capteur monté sur son

support. Après trois cycles d'étalonnage, les résultats, présentés sur la Figure 7, montrent une bonne linéarité de la température en fonction des valeurs de résistance électrique. De la même manière que précédemment, nous avons déterminé l'erreur par rapport à la sonde de référence (Figure 8). On constate une bonne répétabilité des mesures sauf à température ambiante pour laquelle le système de régulation du four n'est pas adapté. Après validation des mesures de température, nous avons mesuré la densité de flux thermique par deux méthodes expérimentales : directement grâce au fluxmètre, ou à partir des mesures des thermocouples. Lorsque la pièce instrumentée (Figure 3) est en polyamide, nous pouvons observer sur la Figure 9 une bonne répétabilité des mesures de densité de flux. Le calcul de l'écart relatif entre les deux essais indépendants a montré qu'il reste inférieur à 10 %. Dans le cas, où la pièce instrumentée est en aluminium, la Figure 10 montre une bonne répétabilité des mesures de densité de flux déterminées par notre prototype. En revanche, les flux calculés à partir des mesures des thermocouples montrent une grande dispersion. De plus, ces valeurs sont supérieures aux valeurs théoriques que l'on devrait obtenir car la résistance thermique de la pièce en aluminium étant très faible, le flux est très sensible à la précision de la mesure de température et à la localisation des thermocouples.

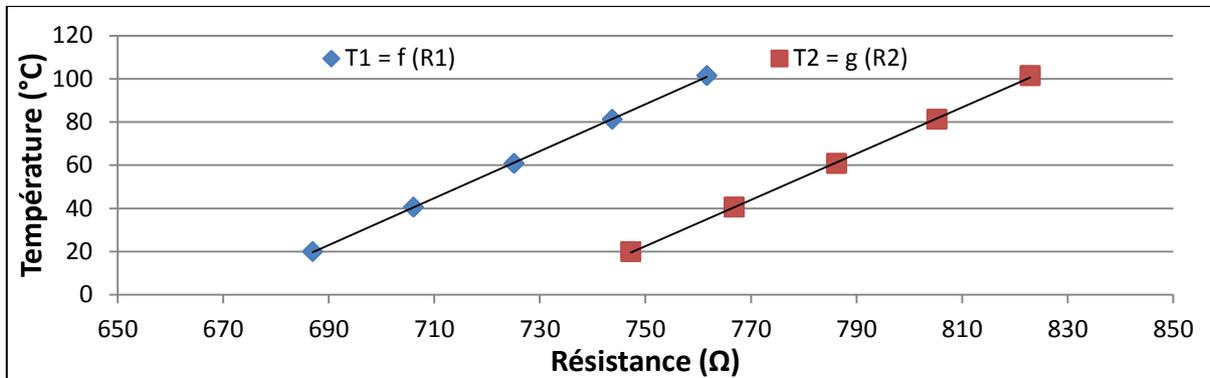


Figure 4 : Etalonnage des thermo-résistances du fluxmètre thermique (avant recuit, 1 mA)

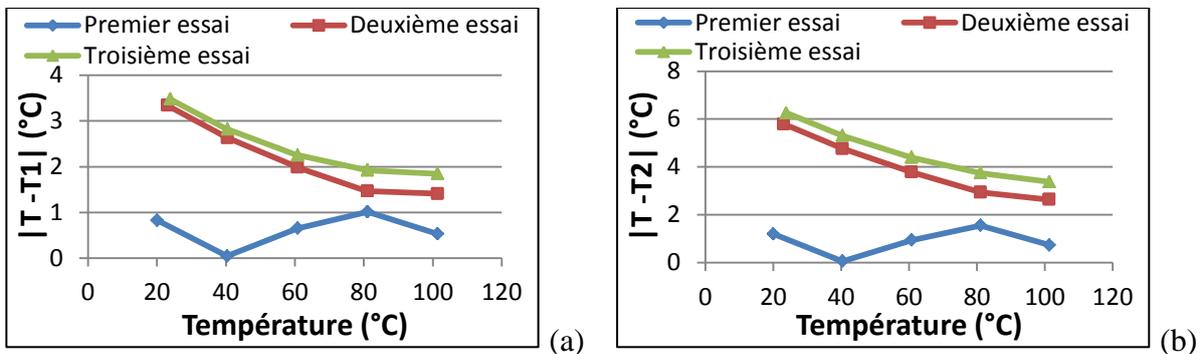


Figure 5 : Erreur absolue et répétabilité de mesure des températures (avant recuit, 1 mA)

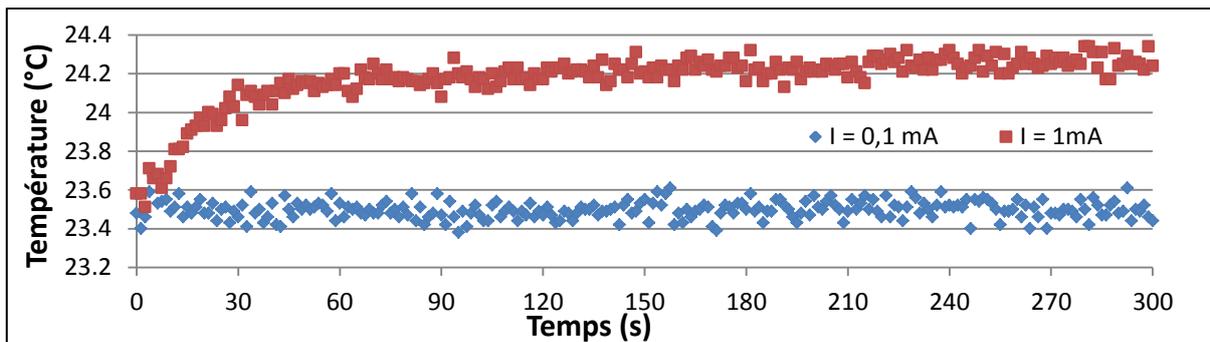


Figure 6 : Mesures de température au centre du fluxmètre thermique (après recuit)

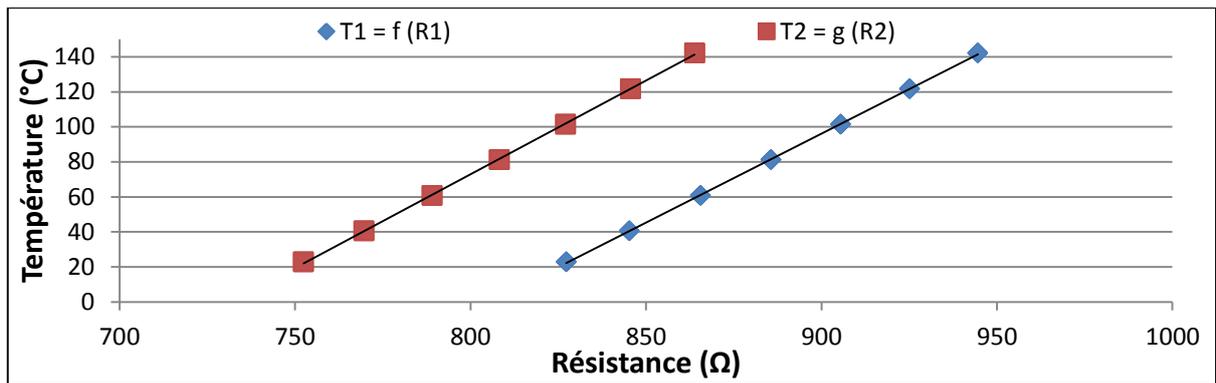


Figure 7 : Etalonnage des thermo-résistances du fluxmètre thermique (après recuit, 0.1mA)

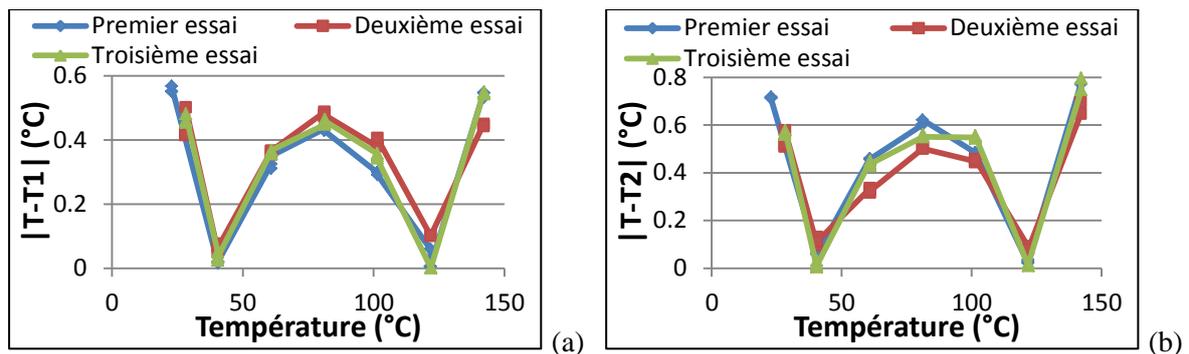


Figure 8 : Erreur absolue et répétabilité de mesure de températures (après recuit, 0.1mA)

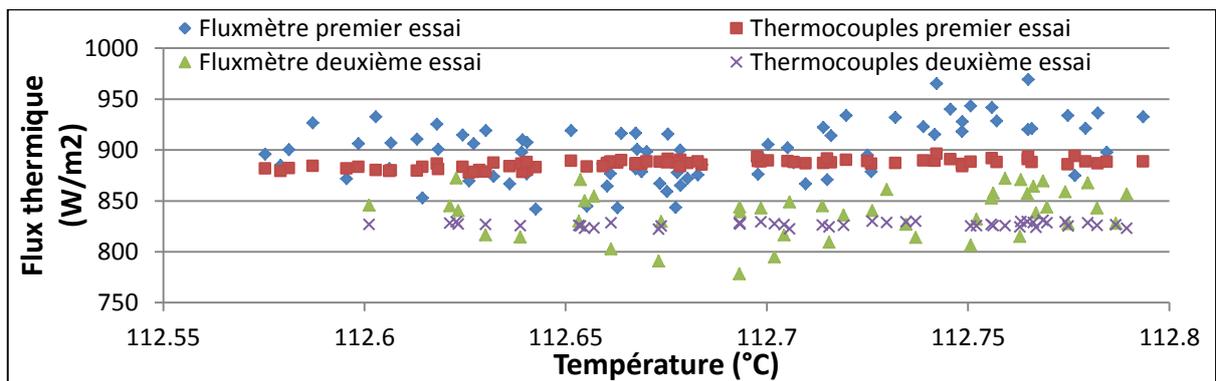


Figure 9 : Mesures des densités de flux thermique avec thermocouples et fluxmètre pour une pièce isolante en polyamide

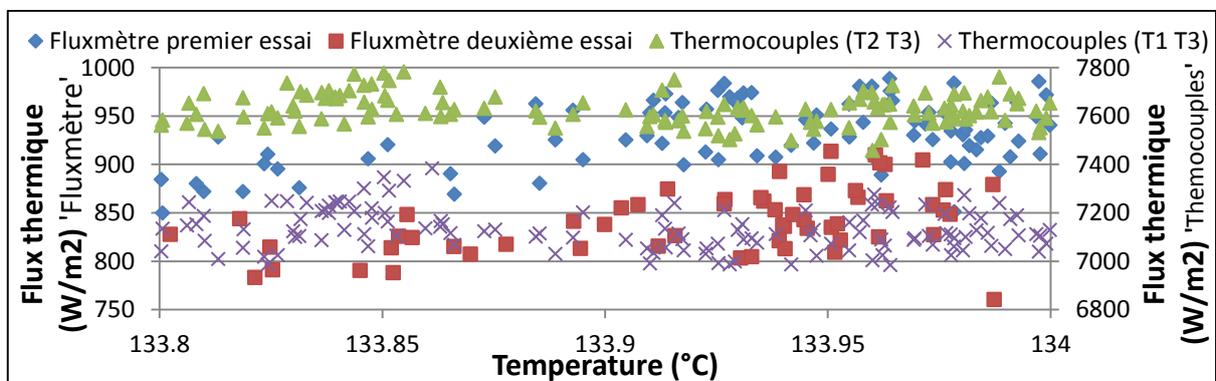


Figure 10 : Mesures des densités de flux thermique avec thermocouples et fluxmètre pour une pièce conductrice en aluminium

5. Conclusion

Nous avons réalisé et testé un fluxmètre thermique à gradient de température en régime permanent. Les éléments sensibles, de surface utile de 4 mm^2 sont des pistes métalliques de platine déposées sous la forme de méandres d'épaisseur 280 nm, de largeur $60 \text{ }\mu\text{m}$ sur un substrat de verre d'épaisseur 0,5 mm. Les mesures de densités de flux thermique ont été comparées à celles obtenues à l'aide de thermocouples. Afin de garantir une bonne répétabilité des mesures et limiter l'effet Joule dans les thermo-résistances, nous avons effectué un recuit sur le capteur, et fixé le courant à 0,1 mA. Le capteur a été testé sur deux types de matériaux : un isolant (polyamide) et un conducteur (aluminium). Dans le premier cas, les mesures présentent une bonne concordance (écart maximal de 10% entre le fluxmètre et les mesures faites par thermocouples). Dans le second cas, les essais ne sont pas concluants, car la mesure de référence de la densité du flux par thermocouples est très imprécise.

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).

Références

- [1] D. G. Holmberg, T. E. Diller, High-frequency heat flux sensor calibration and modeling, *Journal of fluids engineering*, 117(1995), 659-664
- [2] J. M. Devisme, T. Langlet, O. Douzane, J. M. Roucoult, M. Quéneudec, Theoretical and experimental study of heat flowmeters of transverse gradient type for thermal measurements in building, *Int. J. Therm. Sci.*, 40 (2001), 205-215
- [3] C. A. Pullins, T. E. Diller, In situ high temperature heat flux calibration, *International journal of heat and mass transfer*, 53 (2010), 3429-3438
- [4] J. W. Post, A. Bhattacharyya, M. Imran, Experimental results and a user-friendly model of a heat transfer from a thin film resistance temperature detector, *Applied thermal engineering*, 29 (2009), 116-130
- [5] T.E. Diller, Advances in heat flux measurements, *Advances in heat transfer*, 23, (1993)
- [6] M. Boutchich, K. Ziouche, M. Aithamouda-Yala, P. Godts and D. Leclercq, Package-free infrared micro sensor using polysilicon thermopile, *Sensor and actuators, A physical*, A121 (2005), 52-58
- [7] E. Chiavazzo, L. Ventola, F. Calignano, D. Manfredi, P. Asinari, A sensor for direct measurement of small convective heat fluxes: Validation and application to micro-structured surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 55 (2014), 42-53
- [8] J.M.J. den Toonder, A.R. van Dijken, Optimization of mechanical properties of thin free-standing metal films for RF-MEMS, in: *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 820 (Nanoengineered Assemblies and Advanced Micro/Nanosystems), (2004), 177-182
- [9] G. Flik, H.C. Eisenschmid, Raudzis, F. Schatz, W. Schoenenborn, H. Trah, Microsensors for automotive applications – metrology and test, in: *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 687 (Materials Science of Microelectromechanical Systems (MEMS) Devices IV), (2002), 3-13
- [10] P. Thureau, Fluxmètres thermiques, Mesure des grandeurs thermo physiques, *Techniques de l'ingénieur*, r2900