

Conception, fabrication et tests de fluxmètres thermiques 1D performants réalisés à partir de dépôts couches minces

Boussad AZEROU, Bertrand GARNIER, Julien LAUNAY, Abdeljalil LAHMAR

Laboratoire de Thermocinétique, UMR CNRS 6607, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes
La chantrerie, BP 50609, 44306 Nantes, France

Résumé – En insérant un réseau de microthermocouples au sein de parois et en utilisant les techniques inverses, on peut réaliser des mesures peu biaisées de flux de chaleur. Il s'agit ici de remplacer le réseau de thermocouples filaires par un réseau de thermo-résistances déposés sur un substrat souple et fin. L'intérêt est notamment une moindre perturbation due à la plus faible épaisseur de l'élément thermosensible (typiquement autour du μm) ainsi qu'une bien meilleure connaissance des distances entre les différents capteurs de température dans le fluxmètre, celles-ci étant définies avec précision dans le masque réalisé lors du procédé d'élaboration du dépôt. Ce travail présente ainsi la conception, la réalisation de ces nouveaux capteurs à base de couches minces ainsi que la comparaison de leurs performances avec celles des fluxmètres plus classiques à réseau de thermocouples filaires.

Nomenclature

e Epaisseur du dépôt, m

T Température, K

R Résistance électrique. du dépôt, Ω

I Intensité du courant électrique, A

α coefficient de température, K^{-1}

E Tension de déséquilibre, V

U Tension d'alimentation, V

φ Densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$

h Coefficient d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$

1. Introduction

Les fluxmètres thermiques sont très utiles pour la compréhension et le contrôle des phénomènes thermiques couplés ou non à d'autres processus physiques, chimiques ou mécaniques. Pour réduire les biais de mesure, le fluxmètre doit être judicieusement conçu de manière à assurer une mesure non biaisée des grandeurs thermiques recherchées (température, flux de chaleur...) tout en assurant la meilleure sensibilité possible.

Le flux de chaleur peut être mesuré par des méthodes directes. Il existe ainsi des fluxmètres à gradient normal, à gradient tangentiel, à dissipation électrique ou enthalpique [1] Cependant, très souvent ces capteurs sont placés sur la surface et perturbent plus ou moins les transferts de chaleur. Dans les cas les plus difficiles mais très courant de régime instationnaire et de transfert dans des parois métalliques, il existe un type de fluxmètre conçu spécialement pour minimiser les biais induits par sa présence [2]. Il s'agit de fluxmètre constitué de 2 demi-coquilles réalisées dans le même matériau que celui de la paroi. Un réseau de thermocouple filaire est installé dans le plan de coupe à différentes distances de la paroi et les évolutions de température sont utilisées pour estimer les flux à l'aide de techniques inverses classiques telles que spécification de fonction ou autres [3, 4, 5]. Comme le plan de coupe est alors parallèle à la direction du flux de chaleur, il perturbe très peu la diffusion de la chaleur notamment pour des transferts 1D perpendiculaire à la paroi. Un certain nombre de travaux existe dans la littérature à propos de ce fluxmètre, ils concernent autant sa conception que son utilisation dans diverses situations [6]

L'objectif de notre travail est la conception et la réalisation d'un nouveau type de capteur fluxmétrique à base de dépôt couche mince afin d'obtenir des mesures encore moins biaisées. En effet dans les fluxmètres filaires, compte tenu de la taille des thermocouples autour de $50\mu\text{m}$, il y a une certaine imprécision au niveau de la localisation de la soudure fils/paroi métallique. Il en résulte une incertitude d'environ une vingtaine de μm pour la distance entre 2 thermocouples filaires. Avec des procédés couches minces, l'incertitude entre la position des thermorésistances est inférieure à $5\mu\text{m}$, elle est fixée lors de la fabrication des masques d'où une probable amélioration de la mesure de flux.

Dans ce travail, on présente la conception et la fabrication du fluxmètre à couches minces et par la suite les tests de comparaison avec un fluxmètre plus classique à thermocouples filaires.

2. Conception et fabrication du fluxmètre à base couches minces

Le nouveau capteur fluxmétrique a été réalisé à partir d'un dépôt couche mince en cuivre étamé, réalisé sur un substrat souple de polyimide, des procédés de photolithographie ayant été utilisés pour obtenir un réseau de capteurs de thermo-résistances. On a choisi de réaliser des thermo-résistances au lieu de thermocouples car les premiers ne nécessitent qu'un seul dépôt et d'autre part on peut ajuster sa sensibilité en changeant l'intensité du courant les traversant.

La première étape visant à la réalisation d'un capteur fluxmétrique est la création d'un masque servant de support au dépôt de cuivre. Ce masque a ensuite été imprimé en négatif par flashage sur un film transparent, solution permettant une résolution spatiale de 1 à 3 μm (fig.1).

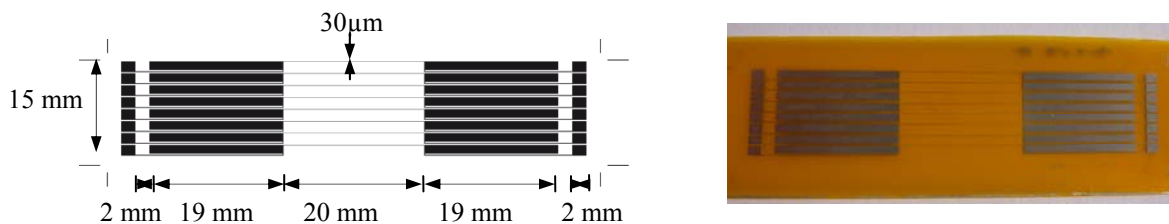


Figure 1 : Masque et réseau de thermo-résistances pour le nouveau fluxmètre à couche minces

A partir du film tracé, les couches minces de cuivre étamé de $9\mu\text{m}$ d'épaisseur ont été réalisées sur un substrat souple en polyimide et d'épaisseur $25\mu\text{m}$. La réalisation du motif électrique par photolithographie a comporté les étapes suivantes :

- 1) insolation de la résine photo sensible à travers le masque réalisé
- 2) enlèvement de la résine non réticulée à l'aide d'un produit développeur
- 3) attaque chimique du cuivre laissé apparent.

Un étamage très fin à l'étain permet d'éviter l'oxydation future des dépôts de cuivre. L'élément thermo-résistif central a une longueur de 20 mm et une largeur de $30\mu\text{m}$ (figure 2).

Du point de vue électrique, les thermo-résistances sont insérées dans des ponts de Wheatstone constitués de résistances pures en contact avec un échangeur de chaleur qui permet de les maintenir à température constante (16°C).

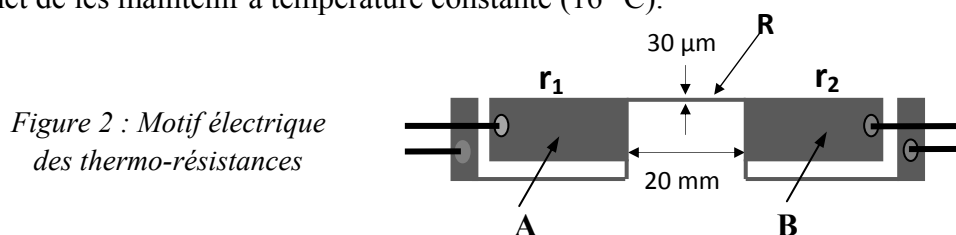
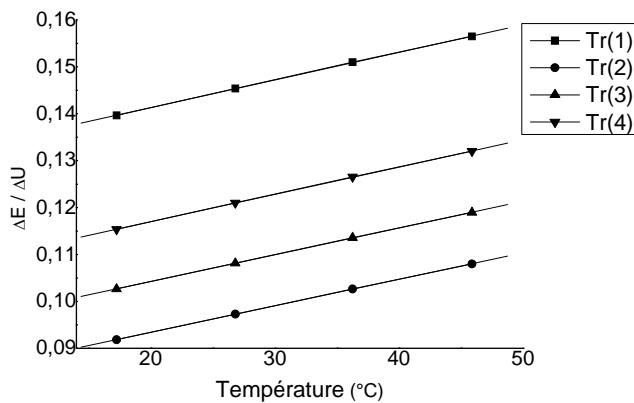


Figure 2 : Motif électrique des thermo-résistances

3. Etalonnage des capteurs

L'étalonnage des différentes thermo-résistances (TR) sur un même fluxmètre a été réalisé dans une étuve en régime permanent et ceci pour 5 températures entre 16 et 46 °C. La tension d'alimentation ΔU a été gardée la même durant l'étalonnage ($\Delta U \approx 46,0$ mV). Le déséquilibre de tension ΔE du pont de chaque TR a été mesuré par le système d'acquisition de tensions (Nat. Instrum+ amplis ANS $G = 1000$, $f_c=10$ Hz). La grandeur $\Delta E/\Delta U$ est une fonction linéaire de la température d'étalonnage: $\Delta E/\Delta U = aT + b$. Les résultats obtenus pour les différents capteurs sont présentés dans le tableau 1. La sensibilité moyenne des capteurs est de $26,15 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, soit plus faible qu'un thermocouple massif de type K. Le coefficient de température moyen de la résistivité électrique du cuivre étamé est alors de $\alpha = 1,82 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, soit inférieure à celle du cuivre massif ($3,93 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).



TR n°	$a \cdot 10^4 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	b	$\alpha \cdot 10^3 \text{ (K}^{-1}\text{)}$
TR ₁	5,88261	0,12957	1,86207
TR ₂	5,64105	0,08215	1,78561
TR ₃	5,70095	0,09286	1,80457
TR ₄	5,81561	0,10537	1,84086

Tableau 1 : Etalonnage de 4thermorésistances au sein du fluxmètre

Figure 3 : Etalonnage des capteurs

4. Calcul de l'effet Joule et de l'auto-échauffement parasite

Le passage d'un courant électrique dans les thermo-résistances entraîne un certain auto-échauffement par effet Joule et par suite une augmentation de température ce qui crée des biais de mesure. Les échauffements induits au niveau des thermo-résistances centraux ont été obtenus par des simulations numériques en considérant une seule thermo-résistance (fig. 4).

Ainsi, le couplage entre les champs électrique et thermique au sein de la couche mince métallique a été modélisé par éléments finis avec le logiciel Comsol (version 3.4), en utilisant l'approximation de couches minces pour le dépôt. La figure 4 montre un schéma simplifié du modèle électrothermique développé, qui prend en compte un seul capteur thermo résistif (dépôt couches minces de cuivre) muni au milieu d'une résistance R et de deux autres résistances r_1 et r_2 en série avec R le tout placé sur un film de polyimide (ép. $25 \mu\text{m}$) puis sur un bloc en acier inoxydable (ép. 15 mm). L'étude paramétrique, a été réalisée en variant le courant électrique entre 1 et 100 mA par l'intermédiaire de la tension d'alimentation (U).

La figure 5 présente l'effet Joule et les températures moyenne et maximale dans l'élément thermorésistif central traversé par des courants variables entre 1 et 100 mA. Le courant étant typiquement de $19,8 \text{ mA}$, on en déduit dans nos essais des auto-échauffements inférieurs à $0,06 \text{ }^\circ\text{C}$.

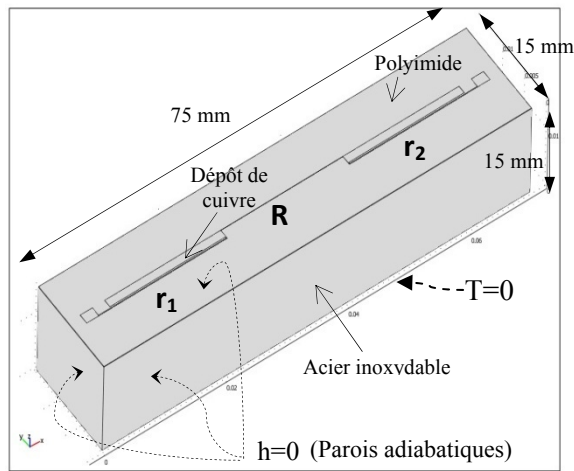


Figure 4 : modèle électrothermique étudié

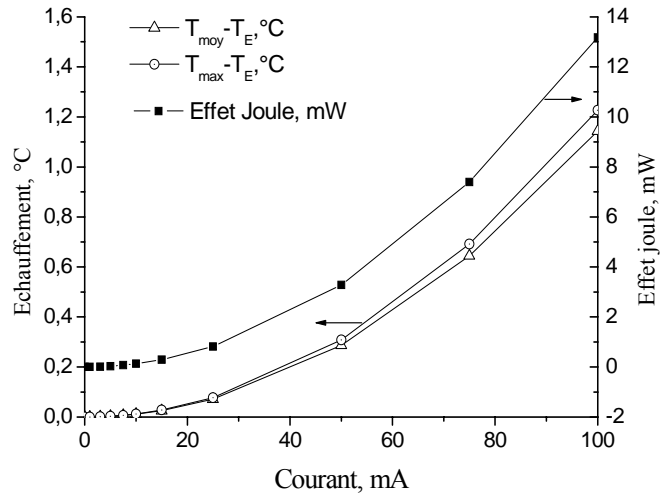


Figure 5 : auto-échauffement et effet Joule

5. Dispositif de test pour la comparaison des performances des capteurs

Un montage symétrique comportant une chauffeuse mince Minco, avec de part et d'autre des pièces en aluminium d'épaisseur 3 mm (pour homogénéiser le flux) puis des pièces en acier inoxydable d'épaisseur 15 mm et instrumentées de thermocouples filaires (type K, diam. 50 μm) et de thermo-résistances à couches minces a été réalisé afin de comparer les performances des deux types de fluxmètres à thermocouples filaires et à couches minces. Comme le montre la figure 6, les deux types de capteurs sont installés sur la partie supérieure de montage.

En appliquant la tension aux bornes du réchauffeur Minco, la chaleur se dissipe symétriquement de part et d'autre de celui-ci (1 à 2 % près). Les différents éléments du dispositif sont séparés par une couche de graisse conductrice afin de favoriser le transfert de chaleur et limiter les sources de dissymétrie.

Il est à noter que les parties haute et basse du dispositif sont maintenues à température constante à l'aide d'échangeur alimenté par un bain thermostaté.

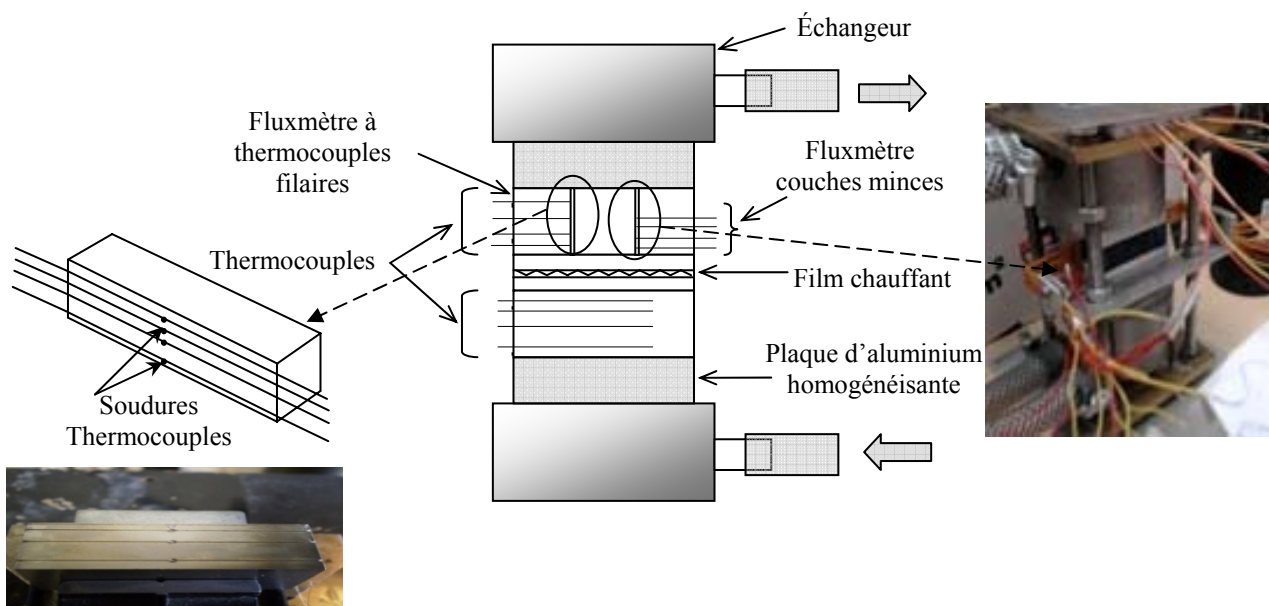


Figure 6 : Dispositif expérimental

6. Résultats expérimentaux et discussion

L'évolution de la densité de flux de chaleur ϕ a été estimée en se basant sur les relevés de température donnés par les deux types de capteurs fluxmétriques, à base de thermo-résistances (TR) et à base de thermocouples filaires (TH), au moyen d'une technique inverse. La méthode d'estimation de la densité de flux utilisée est basée sur le concept de spécification de fonction et de pas de temps futur [3], le choix de cet algorithme séquentiel est justifié par sa facilité de mise en œuvre.

Les figures 7 et 8 présentent les relevés de température et de flux obtenus par les fluxmètres à thermo-résistances et à thermocouples, suite à l'application d'un flux de chaleur imposé avec une tension de chauffage de $U_{ch} = 20$ volts et ceci pour une durée de 100s (fréquence d'échantillonnage: 50 Hz). Les évolutions en température et en flux sont similaires. Les tableaux 2 et 3 présentent des valeurs chiffrées concernant le flux de chaleur et les températures obtenus avec les 2 fluxmètres. Il apparaît ainsi que les écarts entre flux dissipé électriquement et flux mesuré sont plus faibles avec le fluxmètre à thermo-résistances en couches minces (écarts entre 2 et 3%) qu'avec le fluxmètre à thermocouples (écarts entre 6 et 9%). Par ailleurs les écarts types sur la température et le flux restent sensiblement identiques pour les 2 type de fluxmètres d'où des bruits de mesure similaires.

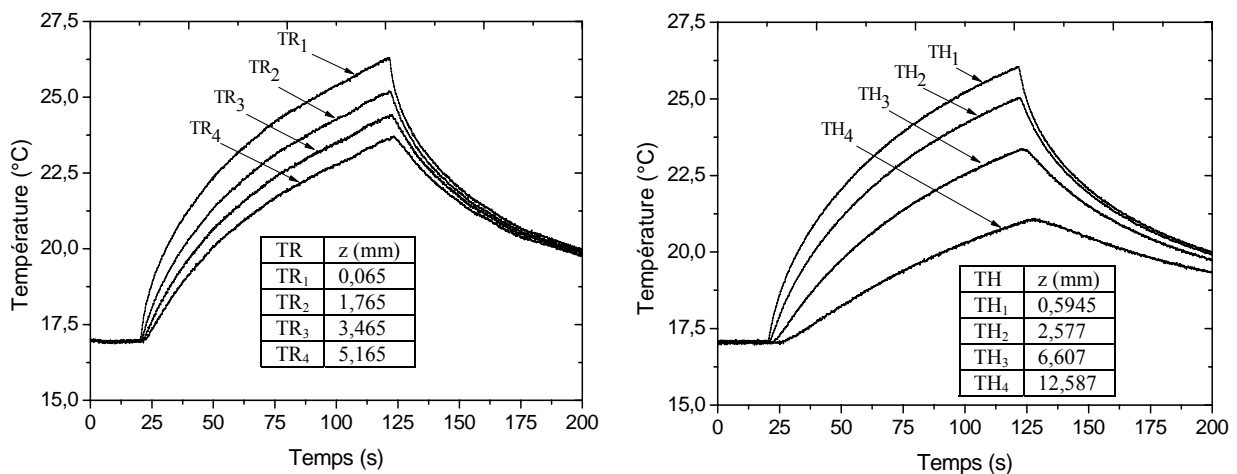


Figure 7 : Températures mesurées par les thermo-résistances (TR) et les thermocouples (TH)

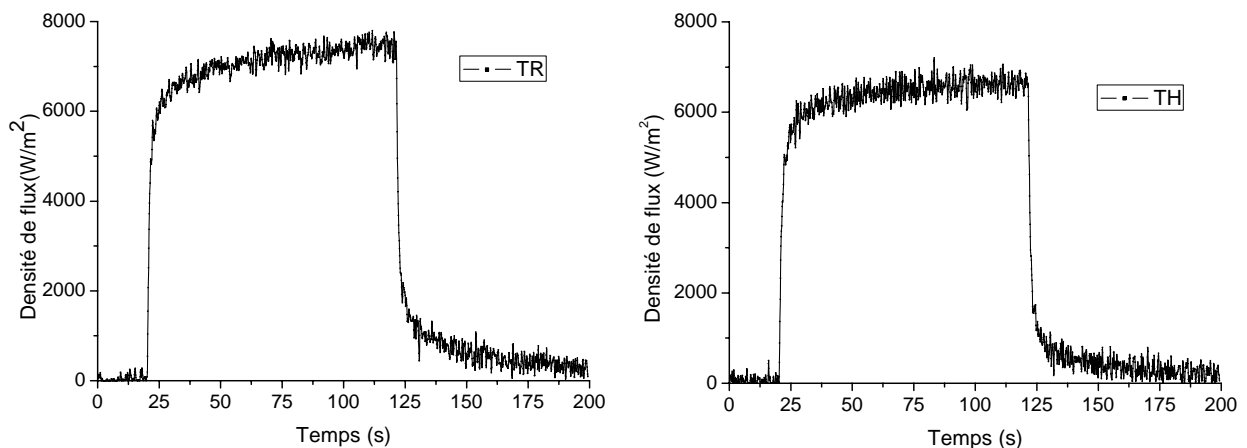


Figure 8 : Densités de flux estimées par les fluxmètres à thermo-résistances (TR) et à thermocouples (TH), suite à l'application d'un double échelon de flux (durée : 100 s ; $U_{ch} = 20$ Volts)

Tableau 2 : Densité de flux estimée par les deux types de capteurs fluxmétrique (σ : écart type ; ϕ : flux de chaleur; TR : thermo-résistance ; TH : thermocouple, les valeurs analysées sont considérées sur une durée de 40s avant la fin du chauffage de durée 100s)

		Fluxmètre à thermorésistances			Fluxmètre à thermocouples filaires		
U_{ch} (Volts)	ϕ élec. (W/m ²)	ϕ TR estimé* (W/m ²)	σ TR (W/m ²)	Ecart/ ϕ élec. (%)	ϕ TH estimé* (W/m ²)	σ TH (W/m ²)	Ecart/ ϕ élec. (%)
10	1776,8	1842,8	0,165	2,9	1656,6	0,177	6,8
20	7107,3	7378	0,169	3	6611,7	0,188	7
30	15991,5	15685	0,016	1,9	14607,1	0,020	8,7

* : moyenne sur 40s

Tableau 3 : Températures mesurées par le capteur le plus proche de la paroi dans les 2 fluxmètres (les valeurs analysées sont considérées sur une durée de 4s avant la fin du chauffage de durée 100s)

	Fluxmètre à thermorésistances(TR)		Fluxmètre à thermocouples filaires (TH)	
U_{ch} (V)	TR1 *(°C)	σ TR1 (°C)	TH1* (°C)	σ TH1 (°C)
10	2,28	0,026	2,17	0,059
20	9,26	0,045	8,88	0,046
30	19,22	0,093	19,16	0,102

*: moyenne sur 4s

5. Conclusion

Après avoir exposé les caractéristiques et le procédé de fabrication, il est apparu que le nouveau fluxmètre à base de thermo-résistances en couches minces s'avère être plus précis que le fluxmètre classique à thermocouples filaires. Aucun changement significatif du temps de réponse n'a pu être constaté. L'intérêt de tels fluxmètres est ainsi une meilleure connaissance de la localisation des différents capteurs utile lors du calcul du flux de chaleur par méthode inverse. De plus, de part le procédé de fabrication, ce type de fluxmètre a l'avantage d'être facilement réalisable en série. Par ailleurs, sa sensibilité peut être ajustée en variant la tension d'alimentation des ponts de Wheatstone et donc le courant traversant chaque thermo-résistance.

Références

- [1] F. Van der Graff, F. 1990, Heat flux sensors, in Ricol, T. and Scholz, J. (eds), *Thermal Sensors 4*, VCH, Weinheim, Germany-(1990) 297–322.
- [2] J.P. Bardon, Y. Jarny, "Procédé et dispositif de mesure en régime transitoire de température et flux surfacique" Brevet n° 94.01996, 22 Février 1994
- [3] J.V. Beck, B. Blackwell, C. A St. Clair, "*Inverse Heat Conduction, Ill-posed problems*", J. Wiley & Sons, Inc. New York, 1985
- [4] A.Saidi, J. Kim, *Exp Therm. Fluid Sci*, 28 (2004) 903-908
- [5] J.V. Beck, *Nuclear Engng Design* (1968)170-178
- [6] B. Bourouga, V. Goizet, J.P. Bardon, *Int. J. Therm. Sci.* 39 (2000) 96-109.

Remerciements : les auteurs remercient le Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS ainsi que le Conseil général de Vendée pour leur soutien dans ce programme de recherche