

Réflexions sur l'utilisation de capteurs de densité de flux thermique sur un banc expérimental in-situ.

Considerations about the use of heat flux sensors in a *in-situ* experimental bench.

Marina MALAGONI^{1*}, Sandra GALLEGO², Stéphane GINESTET², Gilles ESCADEILLAS²

¹ Instituto Federal de Goiás

Avenida Assis Chateaubriand, n° 1.658, Setor Oeste. 74130-012 - Goiânia, Goiás, Brasil.

² Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions – LMDC

135 Avenue de Ranguel, 31400 Toulouse.

*(auteur correspondant : malagoni@insa-toulouse.fr)

Résumé – ce travail s'intéresse à des problèmes soulevés sur des fluxmètres pendant la mise en place d'un banc d'essais pour monitorer *in-situ* des façades d'un bâtiment ancien avant et après rénovation, afin d'appréhender le comportement thermo-hydrigue de ces parois. Nous présentons un nouveau type de fluxmètre perforé qui serait plus adapté pour des parois respirantes sur des bâtiments anciens et nous menons une réflexion sur le facteur de sensibilité : son étalonnage, sa probable dérive dans le temps, l'incertitude associée et la résistance du câblage électrique.

Mots-clés : Monitoring *in-situ* ; Fluxmètres ; Métrologie ; Etalonnage ; Sensibilité.

Abstract – this work is interested in problems raised on flowmeters during the installation of a test bench to monitor *in-situ* the facades of an old building before and after renovation, in order to understand the thermo-hydric behaviour of its walls. We present a new type of perforated flowmeter that would be more suitable for breathable walls on old buildings and we reflect on the sensitivity factor: its calibration, probable drift over time, the associated uncertainty and the resistance of the electrical wiring.

Keywords: *In-situ* monitoring; Heat flux sensors; Metrology; Calibration; Sensitivity.

Nomenclature

S	sensibilité, $V/(W/m^2)$	T	température, °C
q	densité de flux de chaleur, W/m^2	<i>Symboles grecs</i>	
L	épaisseur échantillon, m	λ	conductivité thermique, $W/(m.K)$
E	tension de sortie, V	<i>Indices et exposants</i>	
ΔT	écart de température, °C	f	mesuré avec fluxmètre
u	incertitude	λ	mesuré avec lambdamètre
u_c	incertitude standard combinée		

1. Introduction

La littérature est riche en travaux comparant les propriétés thermo-physiques mesurées *in-situ* et les simulations numériques décrivant le comportement thermique de murs modernes, anciens et rénovés à l'aide de différents matériaux [1]–[3]. Cependant, on constate aussi un écart entre les valeurs déterminées sur site en conditions réelles et les valeurs théoriques, souvent attribué à la variabilité des propriétés des matériaux et aux modèles de transfert de chaleur et de masse et généralement corrigé avec des coefficients multiplicateurs (type « offset ») [4].

On observe aussi un manque d'informations sur la méthodologie de mise en place des capteurs, notamment en ce qui concerne l'étalonnage, le comportement de la sensibilité dans le temps, la forme du capteur elle-même et les longueurs de câble électrique. Autant de variables qui pourraient aussi être à l'origine de ces écarts.

L'utilisation des capteurs de densité de flux thermique (fluxmètres) implique des contraintes sur plusieurs facteurs. La pose du transducteur sur un mur modifie la résistance thermique locale et fait que le flux de chaleur local peut différer de celui du mur non instrumenté.

De plus, la résistance thermique du capteur étant généralement différente de celle de son environnement immédiat, le flux thermique sur les bords du capteur n'est pas unidimensionnel. Sans mentionner que l'hypothèse de régime permanent est rarement, voire jamais, valable pour des mesures *in-situ* [5]. On voit donc que l'étalonnage de ce type de capteur doit être réalisé au plus près de son cadre d'application.

L'utilisation des fluxmètres *in-situ* demande alors un étalonnage à des niveaux de flux de chaleur et températures cohérents avec les conditions finales d'utilisation [6]. Ce travail se propose donc d'établir un nouveau protocole d'étalonnage des capteurs de densité de flux thermique en le comparant avec la procédure de la norme américaine ASTM C1130.

Nous présentons les analyses de la sensibilité sur des fluxmètres de surface pleine et aussi perforée. Ces derniers seraient plus adaptés pour des parois respirantes sur bâtiments anciens, afin de réduire les perturbations sur le flux thermique [7]. Une étude particulière est aussi menée sur l'influence de la longueur du câble électrique, qui relie les capteurs à la centrale d'acquisition pour la mesure de densité de flux thermique. Une analyse sur l'ampleur et l'importance relative des incertitudes de la sensibilité des fluxmètres sera enfin présentée.

2. Matériaux et méthodes

Dans cette partie ; nous présentons les fluxmètres et les équipements utilisés dans cette étude aussi bien que le protocole d'étalonnage des fluxmètres.

2.1. Fluxmètres

Les capteurs de densité de flux thermique sont constitués de thermocouples connectés en série et ils correspondent à un transducteur produisant une tension de sortie (E) linéairement proportionnelle à la densité de flux thermique locale (q). Chaque fluxmètre présente une sensibilité (S) d'usine qui correspond à ce coefficient de proportionnalité.

Comme montré par Zarr *et al.* [8], l'ordonnée à l'origine peut être négligée et la forme fonctionnelle présentée sur l'équation 1 est suffisante pour l'étalonnage.

$$E = Sq \quad (1)$$

Avec le temps, les capteurs peuvent s'abîmer et le facteur d'étalonnage peut dériver. Le but de cette procédure est donc de vérifier la validité du facteur d'usine de fluxmètres (l'étude porte sur des fluxmètres sortis d'usine en 2015) et le niveau d'interférence du rallongement des câbles électriques sur la mesure.

La Figure 1 présente les fluxmètres étudiés. Ce sont des capteurs carrés présentant 10 cm de côté et une épaisseur de 0,6 mm fabriqués par la société CAPTEC. Ils sont constitués de 140 thermocouples de type K par cm^2 et le matériau électriquement isolant du support correspond à de l'époxy et du polyimide. Les deux capteurs pleins sont appelés P1 et P2 et les

deux trousés T1 et T2. La surface de mesure des capteurs troués est deux fois plus petite que celle des capteurs pleins et le diamètre des trous est de 1,6 cm.

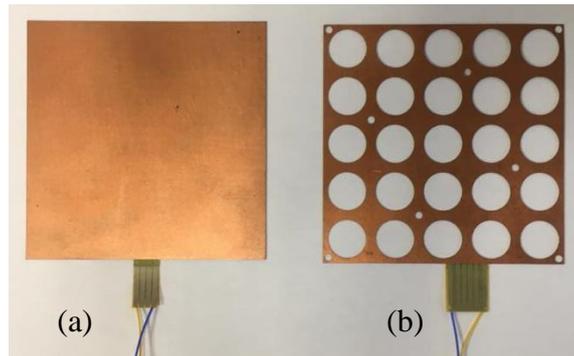


Figure 1 : Typologie des fluxmètres étudiés : (a) plein ; (b) troué.

2.2. Equipements

La procédure d'étalonnage consiste à comparer la mesure de la tension de sortie d'un fluxmètre relié à une centrale d'acquisition de données (Centrale Agilent 34907A avec carte d'acquisition 34901A) et la densité de flux thermique obtenue à l'aide d'un appareil de mesure de la conductivité thermique à plaque chaude gardée, appelé lambdamètre ou λ -mètre (Lambda-Meßtechnik GmbH Dresden – EP500). Un aperçu général du banc d'essais est montré sur la Figure 2.

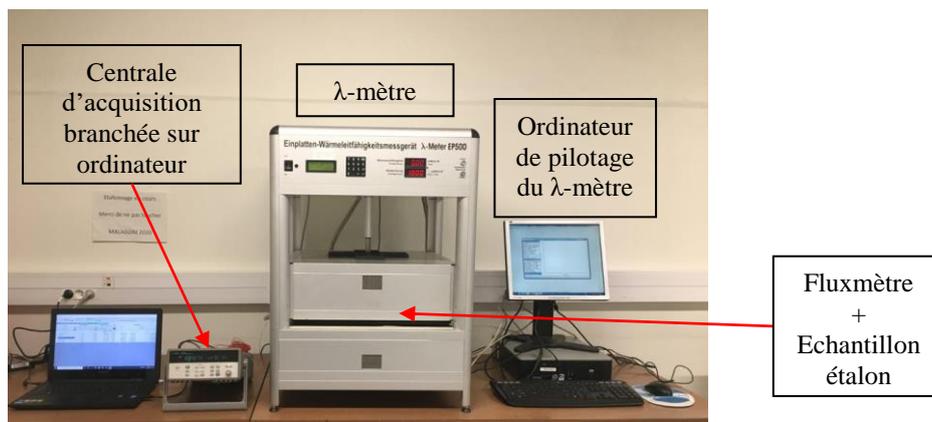


Figure 2 : Configuration du banc d'essais pour l'étalonnage des fluxmètres.

Les mesures avec le lambdamètre ont été effectuées selon la norme ASTM C177 [9] en adaptant l'empilement dans l'équipement avec un échantillon étalon en verre de conductivité thermique égale à 0,625 W/m.K et d'épaisseur de 19,4 mm.

Contrairement aux équipements classiques pour l'étalonnage des capteurs thermiques, l'équipement à plaque chaude gardée utilisé ne fournit pas le flux de chaleur. C'est un équipement spécifique pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux d'usage en génie civil et la procédure présentée a été adaptée pour permettre son utilisation.

Nous avons posé un panneau isolant fibreux de haute densité au-dessus de la plaque froide et au centre de cet isolant (percé de 15 x 15 cm) nous avons positionné l'échantillon étalon en verre. Puis au-dessus de ce dernier, nous avons posé le fluxmètre à étalonner. Nous cherchons une configuration simple à mettre en place en laboratoire et plus proche des conditions réelles d'usage de ce capteur *in-situ* comme discuté précédemment. La pression de contrôle est réglée

à 1 kN/m² à chaque essai. La Figure 3 présente les schémas d'empilement des échantillons dans le lambdamètre pour la configuration préconisée par la norme américaine et celle simplifiée avec l'étalon en verre.

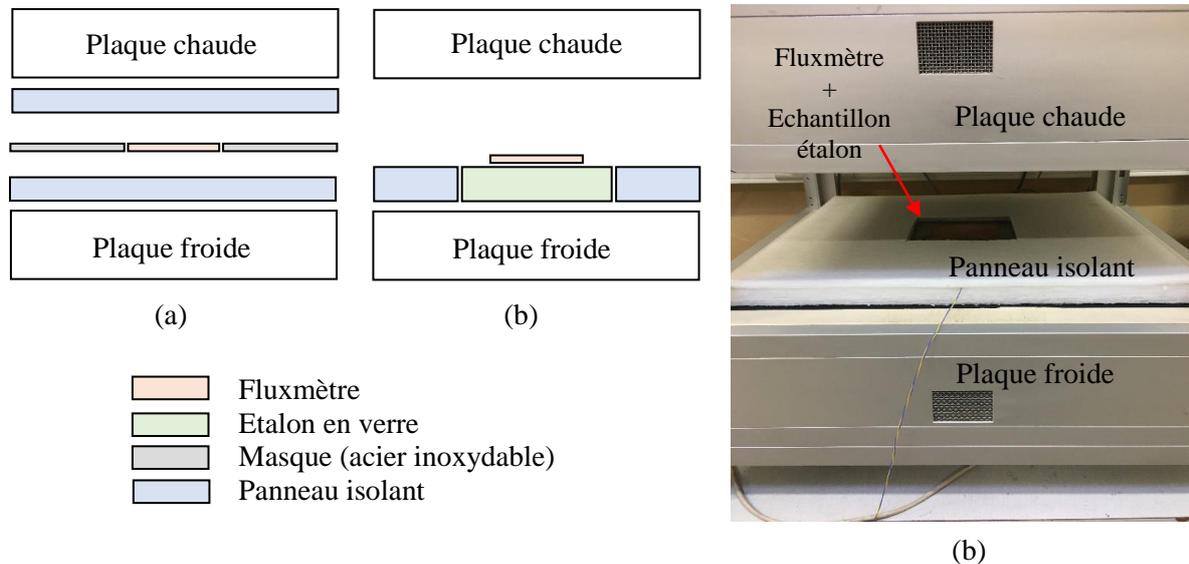


Figure 3 : Empilement dans le lambdamètre : (a) méthode ASTM C1130 ; (b) méthode avec échantillon étalon en verre.

Nous avons pris un soin particulier pour centrer le fluxmètre comme le montre la Figure 4.

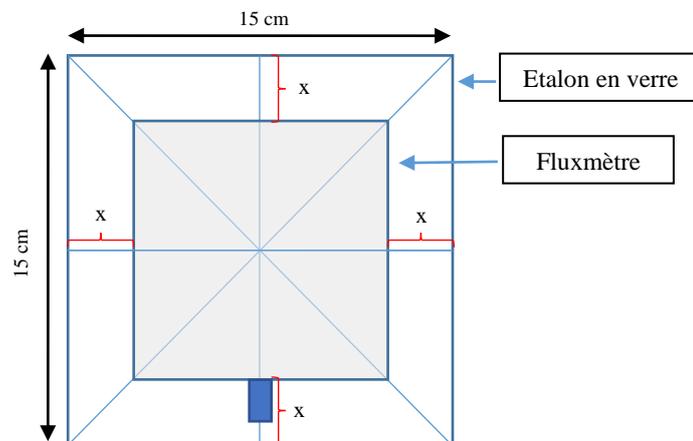


Figure 4 : Positionnement du fluxmètre sur l'échantillon étalon.

A la fin de l'essai, le lambdamètre donne les valeurs de la conductivité thermique (λ) en fonction du temps. Les capteurs ont été testés à une température moyenne de 20°C et trois différentes densités de flux thermique ajustées en fonction de la différence de température entre les plaques chaude et froide (ΔT), soit 5, 10 et 15°C. Les températures ont été choisies en fonction des températures moyennes de la ville de Cahors (Lot 46), où les capteurs seront posés et de la capacité du lambdamètre.

2.3. Protocole d'étalonnage

Les deux procédures décrites ci-dessus donnent des relevés en fonction du temps. La centrale d'acquisition fournit les valeurs de tension (E) et le lambdamètre la conductivité thermique (λ). Afin de pouvoir comparer les données, il est nécessaire de calculer la densité de flux thermique en régime permanent pour chaque essai.

2.3.1. Calcul de la densité de flux à partir de la mesure de la conductivité thermique

A partir des valeurs de λ obtenues, on peut calculer la densité de flux thermique à travers l'empilement dans le lambdamètre, en utilisant la loi de Fourier ou l'analogie électrique selon l'équation 2, avec l'hypothèse d'un système monodimensionnel.

$$q_\lambda = \lambda \frac{\Delta T}{e} \quad (2)$$

2.3.2. Relevés de la tension de sortie

A partir des valeurs obtenues en régime permanent et en prenant 6 chiffres significatifs, on réalise une moyenne de la tension de sortie pour pouvoir calculer la densité de flux thermique. Nous avons relevé les données toutes les minutes, et la moyenne est obtenue à partir d'environ 200 valeurs. La mesure s'achève lorsque λ varie de moins de 1,0% en l'espace de 60 minutes. La Figure 5 présente les résultats d'un essai. On voit bien l'intervalle où le régime permanent est atteint, grâce à des droites verticales en pointillés rouge.

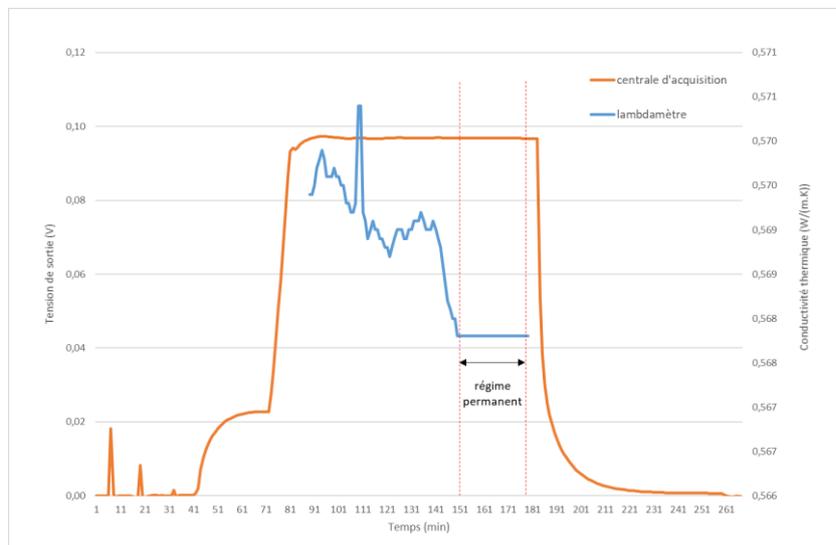


Figure 5 : Visualisation des mesures de tension de sortie de la centrale d'acquisition et des mesures de conductivité thermique avec le lambdamètre, au cours du temps.

2.3.3. Calcul de la sensibilité

Pour calculer le nouveau facteur, nous traçons le graphique de la densité de flux donnée à partir du lambdamètre (q_λ) en fonction de la tension de sortie donnée par la centrale Agilent (E) pour chaque variation de température (5, 10 et 15°C), comme montré sur la Figure 6.

Une corrélation linéaire comme montrée sur l'équation 1 a été observée pour tous les capteurs. Le coefficient de détermination (R^2) est égal à 1 pour tous les fluxmètres analysés. La valeur finale de la sensibilité étalonnée (S) correspond donc à la pente de la droite obtenue.

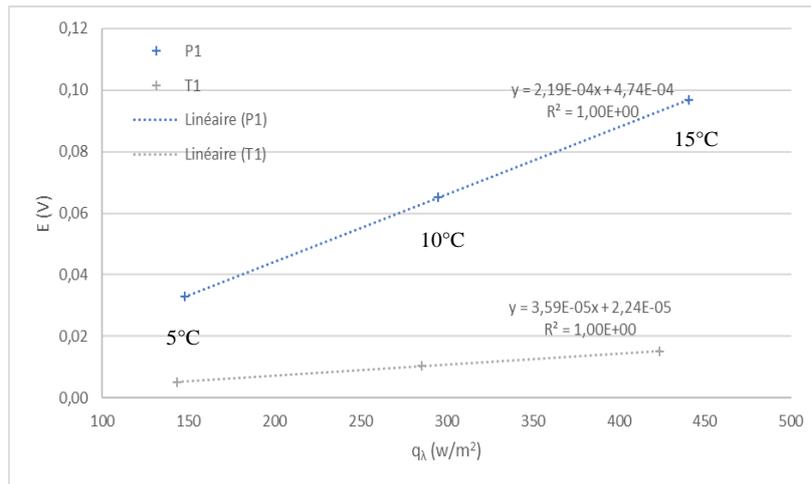


Figure 6 : Densité de flux obtenue à partir du lambdamètre (q_λ) en fonction de la tension de sortie donnée par la centrale Agilent (E) pour chaque variation de température sur les fluxmètres P1 et T1 avec la méthode de l'échantillon étalon en verre.

3. Influence de la longueur du câble électrique

L'allongement du câble électrique est assez fréquent lors de mesures *in-situ* avec des centrales d'acquisition (nous ne parlons pas des capteurs autonomes). Ce type de modification entraîne une résistance supplémentaire au niveau de la chaîne de mesure. Le but ici est de présenter l'influence de la longueur du câble sur l'étalonnage avec la méthode ASTM C1130, donc sur la valeur finale de la sensibilité des capteurs.

Nous avons ajouté une longueur de 10 ($\pm 0,01$) m de câble en cuivre étamé multibrin (diamètre intérieur égal à $7 \times 0,193$ mm) à chaque capteur (longueur initiale du câble égale à 3 m) et répété les mesures sans modifier leur positionnement dans le lambdamètre.

4. Incertitudes de mesure

Les incertitudes sur les valeurs mesurées ont été évaluées selon les directives internationales actuelles [10]. Pour les valeurs de densité de flux thermique (q_λ), calculées à partir des valeurs de conductivité thermique (λ), nous avons considéré les incertitudes de résolution et celles fournies par le fabricant du lambdamètre (reproductibilité et exactitude des mesures). Pour les valeurs de tension de sortie de la centrale d'acquisition (E), nous avons considéré les incertitudes de résolution et celles fournies par le fabricant (mesure, commutation et conversion du transducteur). Ces composants ont été combinés selon le principe de propagation des incertitudes avec un coefficient d'élargissement égal à 2, selon une loi rectangulaire de distribution.

Le calcul de l'incertitude pour la sensibilité (S) des fluxmètres a été fait selon le principe de propagation des incertitudes appliqué à l'équation 1, comme montré sur l'équation 3.

$$u_c(S) = \sqrt{\frac{u_{(E)}^2}{q_\lambda^2} + \frac{E^2}{q_\lambda^4} \cdot u_{(q\lambda)}^2} \quad (3)$$

5. Résultats et discussion

5.1. Sensibilité

Le Tableau 1 présente les valeurs des sensibilités d'usine pour les fluxmètres étudiés, ainsi que celles en étalonnant selon la méthode de l'étalon en verre et de la norme ASTM C1130.

Echantillon	S_{usine}	Etalon verre			ASTM C 1130		
		$S_{\text{étalonné}}$	$\pm u_c (S)$	(ΔS)	$S_{\text{étalonné}}$	$\pm u_c (S)$	(ΔS)
		V/(W/m ²)	V/(W/m ²)	V/(W/m ²)	%	V/(W/m ²)	V/(W/m ²)
P1	1,91E-04	2,19E-04	0,03E-04	14,6	1,95E-04	0,05E-04	2,1
P2	1,84E-04	2,22E-04	0,03E-04	20,4	1,96E-04	0,05E-04	6,5
T1	2,18E-05	3,59E-05	0,06E-05	64,5	2,47E-05	0,41E-05	13,3
T2	2,14E-05	3,44E-05	0,06E-05	60,6	2,37E-05	0,41E-05	10,7

Tableau 1 : Sensibilités étalonnées des fluxmètres par la méthode avec échantillon étalon en verre et ASTM C1130 et écart (ΔS) entre les valeurs obtenues par rapport à la sensibilité d'usine.

Les différences observées entre les sensibilités d'usine et celles obtenues après étalonnage 5 ans plus tard montrent que cette étape est indispensable pour l'utilisation rigoureuse de tels capteurs sur des bancs d'essais *in-situ* et pour éviter des erreurs de mesure importantes.

La méthode de la norme américaine donne des valeurs plus proches de la sensibilité d'usine. Les différences peuvent être liées à la méthode d'étalonnage en usine, au niveau de densité de flux thermique de l'étalonnage ou à la dérive de la sensibilité dans le temps. De plus, on note que les fluxmètres troués donnent des résultats avec une incertitude plus faible que les pleins pour les deux méthodes. Cette différence est expliquée par des tensions de sortie beaucoup plus faibles pour les capteurs troués (environ 10 fois).

L'écart plus important par rapport à la sensibilité d'usine observé pour la méthode avec l'échantillon étalon en verre peut être dû à un effet de bord engendré par la différence de surface entre le fluxmètre et l'échantillon. Cependant, d'autres essais devront être réalisés pour valider cette méthode d'étalonnage puisque son principal atout est de se rapprocher des conditions opératoires *in-situ*. Par exemple, le matériau étalon en verre pourrait être remplacé par un matériau dont la conductivité thermique est similaire à celle de la paroi à instrumenter.

5.2. Câblage électrique

Le Tableau 2 présente les valeurs de sensibilité des fluxmètres calculées sans rallongement et avec rallongement du câble avec la méthode ASTM.

Echantillon	Longueur initiale		Rallongé		(ΔS)
	$S_{\text{étalonné}}$	$\pm u_c (S)$	$S_{\text{étalonné}}$	$\pm u_c (S)$	
	V/(W/m ²)	V/(W/m ²)	V/(W/m ²)	V/(W/m ²)	
P1	1,95E-04	0,05E-04	1,98E-04	0,05E-04	1,5
P2	1,96E-04	0,05E-04	1,94E-04	0,05E-04	-0,8
T1	2,47E-05	0,41E-05	2,45E-05	0,41E-05	-1,0
T2	2,37E-05	0,41E-05	2,37E-05	0,41E-05	0,0

Tableau 2 : Sensibilités étalonnées des fluxmètres par la méthode ASTM C1130 avec et sans rallongement du câble et écart (ΔS) entre les valeurs obtenues.

Ces résultats montrent que le fait de multiplier la longueur initiale du câble par un facteur 4 n'intervient quasiment pas sur la sensibilité des capteurs et la précision de l'essai. En effet, les valeurs de sensibilité obtenues après rallongement sont comprises dans l'incertitude de la mesure avant rallongement.

6. Conclusion

Nous avons montré que la vérification de la sensibilité des capteurs de densité de flux thermique doit être menée en fonction de leur utilisation *in-situ* pour se rapprocher au plus près des conditions opératoires réelles. Pour cela, une nouvelle méthode d'étalonnage facilement réalisable en laboratoire a été présentée et comparée à la norme américaine.

Enfin, l'allongement du câble de raccordement n'influe pas de manière significative sur les mesures effectuées avec les capteurs de densité de flux thermique et peut être envisagé après positionnement des fluxmètres sur le banc d'essais si nécessaire.

Références

- [1] G. Costantine, C. Maalouf, T. Moussa, and G. Polidori, "Experimental and numerical investigations of thermal performance of a hemp lime external building insulation," *Build. Environ.*, vol. 131, no. January, pp. 140–153, 2018.
- [2] T. Bejat, A. Piot, A. Jay, and L. Bessette, "Study of two hemp concrete walls in real weather conditions," in *Energy Procedia* 78, 2015, vol. 78, pp. 1605–1610.
- [3] B. Arregi, R. Garay-Martinez, J. Astudillo, M. García, and J. C. Ramos, "Experimental and numerical thermal performance assessment of a multi-layer building envelope component made of biocomposite materials," *Energy Build.*, vol. 214, no. 109846, 2020.
- [4] G. F. Jones and R. W. Jones, "Steady-state heat transfer in an insulated, reinforced concrete wall: Theory, numerical simulations, and experiments," *Energy Build.*, vol. 29, no. 29, pp. 293–305, 1999.
- [5] ASTM, *Building applications of heat flux transducers*, no. special technical publication 885. 1983.
- [6] ASTM International, *C1130: Standard Practice for Calibrating Thin Heat Flux Transducers*. 2017, pp. 1–8.
- [7] T. J. Sauer, O. D. Akinyemi, P. Thery, J. L. Heitman, T. M. DeSutter, and R. Horton, "Evaluation of a new, perforated heat flux plate design," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 35, pp. 800–804, 2008.
- [8] R. R. Zarr, B. Dougherty P., J. J. Filliben, and V. M. Fuentes, "Calibration of Thin Heat Flux Sensors for Building Applications Using ASTM C1130," *J. Test. Eval.*, vol. 29, pp. 293–300, 2001.
- [9] ASTM International, *C177: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate*. 2019.
- [10] Joint Committee For Guides In Metrology - JCGM, *Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 2010, p. 134.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à Fabien Nougarrowles pour son expertise technique tout au long de la campagne de mesures.