

# Comparaison de méthodes de mesure de résistance thermique in-situ de parois de bâtiment : essais sur un immeuble d'habitation occupé.

Jean-Pierre MONCHAU<sup>1\*</sup>, Vincent FEUILLET<sup>2</sup>, Laurent IBOS<sup>2</sup>, Yves CANDAU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>THEMACS Ingénierie, 23 rue Alfred Nobel, 77420 Champs-sur-Marne

<sup>2</sup>Université Paris-Est, CERTES / OSU Efluve, 61 Av. du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex

\* (auteur correspondant : [monchau@themacs.fr](mailto:monchau@themacs.fr))

**Résumé** – La réglementation thermique actuellement en vigueur en France [1] fixe de hautes exigences en termes d'isolation thermique de bâtiments. Le nombre de bâtiments peu isolés est très important. Le gisement d'économie d'énergie lié à l'insuffisante isolation des bâtiments est ainsi très élevé. De plus, tout bâtiment neuf devra être à énergie positive à l'horizon 2020. Dans ce contexte, il est indispensable de pouvoir contrôler les performances thermiques d'un bâtiment pendant sa construction, à sa livraison, au cours de son utilisation ou avant sa rénovation. Seule la mesure de résistance thermique permet de répondre à ce besoin de contrôle des parois opaques. En effet les méthodes plus globales (bâtiments en relaxation, co-heating...) ne sont pas utilisables à toutes les étapes de la vie d'un bâtiment. Actuellement, des méthodes de mesure de la résistance thermique de parois existent, soit à l'état de mesure de laboratoire ou exploratoires [2], soit dans le cadre de normes internationales [3] ou de projets de norme [4,5].

Notre étude consiste à comparer quatre méthodes d'évaluation de la résistance thermique in-situ des parois de bâtiment : valeurs mesurées, incertitudes associées, durées de mesure. L'une des méthodes considérée est normalisée [3] et utilise des fluxmètres. Les trois autres méthodes utilisent la thermographie infrarouge. Parmi ces dernières, une méthode fait l'objet d'un projet de norme internationale [4,5]. La méthode du Seid [6] consiste à comparer la température de surface de la paroi et de la paroi artificiellement modifiée. La dernière méthode a été mise au point au CERTES et utilise la thermographie passive [7]. Les quatre méthodes ont été testées sur la plateforme PANISSE, Site d'Observation de l'OSU EFLUVE [8]. Les résultats présentés montrent de fortes disparités dans les valeurs obtenues. Cela s'explique notamment par la faiblesse du modèle 1D pour ce cas d'étude.

## Références

- [1] Réglementation Thermique 2012, *Ed. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (2012).
- [2] R. Albatici, A. M. Tonelli, Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site, *Energy and Buildings*, 42 (2010), 2177-2183.
- [3] Norme ISO-9869-1.
- [4] S. Kato, K. Kuroki, S. Hagihara, Method of in-situ measurement of thermal insulation performance of building elements using infrared camera, *6<sup>th</sup> International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings* (Sendai, Japon, 2007).
- [5] Projet de norme ISO-9869-2.
- [6] D. Pajani, Surface équivalente d'irrégularité ou de défaut (Seid) et mesure du "U" par la méthode du Seid, *Conférence Thermogram'2011* (Châlons en Champagne, France, 2011).
- [7] J-P. Monchau, L. Ibos, V. Feuillet, Diagnosis of insulated building walls using passive infrared thermography and numerical simulation, *7<sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring*, (Nantes, France, 2014).
- [8] <http://osu-efluve.u-pec.fr/recherche/observations>.

## Nomenclature

$T_s$	température de surface de paroi, $K$	$R$	résistance thermique, $K.m^2.W^{-1}$
$T_n$	température d'environnement, $K$	$U$	transmittance thermique, $W.m^{-2}.K^{-1}$
$T_{i,e}$	température d'air int/ext, $K$	$\lambda$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$T_{hs}$	température de surface du h-mètre, $K$	$Q$	flux thermique, $W$
$h$	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	$q$	densité de flux thermique, $W.m^{-2}$

## 1. Introduction

Notre étude consiste à utiliser quatre méthodes d'évaluation de la résistance thermique in-situ des parois de bâtiment en comparant les valeurs mesurées, les incertitudes associées, les durées de mesure. L'une des méthodes considérées est normalisée [1] et utilise des fluxmètres. Les trois autres méthodes utilisent la thermographie infrarouge. Parmi ces dernières, une méthode fait l'objet d'un projet de norme internationale [2,3]. La méthode du Seid consiste à comparer la température de surface de la paroi et de la paroi artificiellement modifiée [4]. La dernière méthode a été mise au point au CERTES et utilise la thermographie passive [5]. Les quatre méthodes ont été testées sur la plateforme PANISSE, Site d'Observation de l'OSU EFLUVE [6]. La paroi étudiée est un mur constitué de 20 cm de béton cellulaire isolé par l'extérieur d'un isolant en PS graphité de 62 mm d'épaisseur, séparé du mur par une lame d'air non ventilée et recouvert d'un enduit mince.

## 2. Principes généraux de la méthode de détermination de la résistance thermique d'une paroi opaque

En régime stationnaire, la résistance thermique d'une paroi de bâtiment est définie ainsi :

$$R = \frac{T_{si} - T_{se}}{q} \quad (1)$$

Cette grandeur permet de caractériser et comparer les différents isolants utilisés dans le domaine du bâtiment. Pour calculer la résistance thermique d'une paroi opaque, on doit donc mesurer la température des surfaces intérieure et extérieure ainsi que le flux thermique. Ce dernier peut être directement mesuré comme dans la méthode fluxmétrique (ISO-9869-1) ou déduit d'une autre mesure. La méthode préconisée dans la norme ISO9869-2 consiste à déterminer le coefficient d'échange  $h_i$  sur la surface du mur intérieur et en déduire le flux en fonction des températures de surface et d'environnement. On peut aussi déterminer le flux en interposant sur le mur une résistance thermique additionnelle connue ; c'est la méthode du Seid. La dernière méthode utilisée est celle développée au CERTES. Elle utilise une méthode inverse pour déterminer la résistance thermique à partir d'images thermiques enregistrées sur plusieurs jours.

Les méthodes in-situ ne peuvent être mises en œuvre en régime permanent étant donné que les conditions climatiques extérieures ne peuvent pas être contrôlées. Pour permettre de calculer la résistance thermique en régime non permanent, on doit faire un bilan sur plusieurs jours. Toutes les méthodes et normes de mesure imposent une durée de mesure supérieure à 3 jours et multiple de 24h. Cela permet de limiter l'impact de la variation d'énergie stockée dans le mur entre le début et la fin de la mesure.

Le calcul de  $R$  peut s'effectuer de deux manières :

- en utilisant les moyennes des grandeurs physiques ;
- en utilisant une approche dynamique par identification.

Après une brève description des méthodes et des résultats, une étude comparative permettra de faire apparaître les avantages et inconvénients des différentes approches.

### 3. Méthode de mesure de résistance thermique d'une paroi opaque par la méthode normalisée ISO/DIS 9869-1

#### 3.1. Présentation de la méthode

La partie 1 de cette norme est une méthode de mesure de la résistance thermique de paroi opaque par une méthode fluxmétrique [1]. La norme décrit dans le détail les conditions expérimentales de la mesure ainsi que les précautions à prendre pour l'instrumentation. Cette méthode normalisée propose deux méthodes de traitement des données pour prendre en compte la nature transitoire du régime. L'annexe B de la norme propose une méthode d'analyse dynamique des mesures. Cela permet de réduire le temps de la mesure. L'autre méthode consiste à utiliser les moyennes des températures et du flux. C'est cette solution qui a été choisie dans cette étude. Dans ce cas, la résistance thermique est calculée grâce aux moyennes des grandeurs physiques :

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{Si_j} - T_{Se_j})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (2)$$

#### 3.2. Dispositif expérimental

L'instrumentation doit être constituée d'au moins deux mesures de température et d'une mesure de flux thermique. Pour permettre une étude plus détaillée, quatre mesures de température ont été effectuées avec deux dispositifs différents, soit 8 mesures de températures, et trois mesures de flux (figure 1). La norme préconise que les capteurs de températures et de flux soient de couleur et d'émissivité identiques. Cela a été réalisé en recouvrant les différents capteurs de bandes adhésives opaques identiques. Un enregistreur de données MAE<sup>®</sup> dédié à cette méthode de mesure a été utilisé avec des fluxmètres Hukseflux<sup>®</sup>. Il permet d'enregistrer deux flux thermiques (un à l'extérieur et un à l'intérieur) ainsi que quatre températures. Cette instrumentation a été doublée avec deux enregistreurs de température FLUKE<sup>®</sup> ainsi qu'un voltmètre enregistreur FLUKE<sup>®</sup> pour mesurer le flux grâce à un capteur de flux CAPTEC<sup>®</sup>. A partir des moyennes calculées sur 5 jours (figures 1 et 2 et tableaux 1 et 2), la résistance thermique a été calculée avec ces données en les combinant pour obtenir toutes les valeurs extrémales.

	Flux int MAE	Flux ext MAE	Flux CAPTEC
	$W.m^{-2}.K^{-1}$	$W.m^{-2}.K^{-1}$	$W.m^{-2}.K^{-1}$
Hukseflux	6.5	4.7	
CAPTEC			5.4

Tableau 1 : Valeurs moyennes des flux thermiques sur les deux faces du mur ; face intérieure, les deux fluxmètres (CAPTEC et Hukseflux) ont été superposés

	T <sub>Se</sub>	T <sub>e</sub>	T <sub>Si</sub>	T <sub>i</sub>
	°C	°C	°C	°C
Thermocouple	5.11	4.39	18.01	18.78
MAE	5.96	4.79	18.14	19.94

Tableau 2 : Valeurs moyennes des températures utilisées pour le calcul de R ; mesures avec des enregistreurs de température Fluke 54IIB et le dispositif MAE dédié à la mesure de résistance thermique

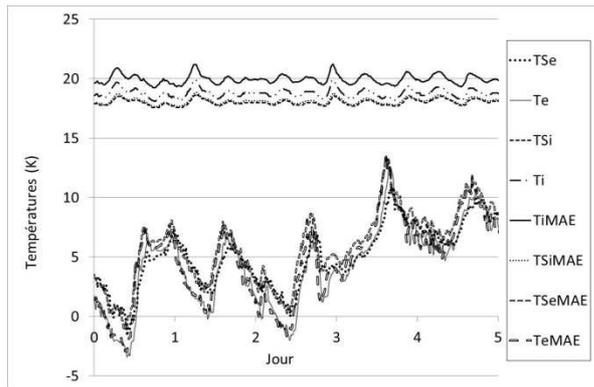


Figure 1 : Températures de surface et d'air, intérieures et extérieures mesurées sur 5 jours par différents dispositifs

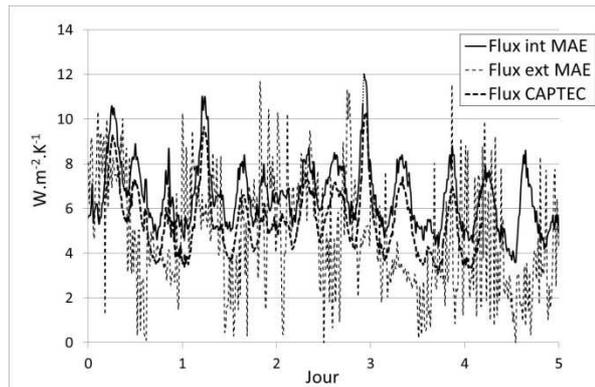


Figure 2 : Flux thermiques intérieur et extérieur mesurés par différents dispositifs

## 4. Méthode de mesure de résistance thermique d'une paroi opaque par la méthode normalisée ISO/DIS 9869-2

### 4.1. Présentation de la méthode

La méthode proposée dans cette norme consiste à observer la surface intérieure de la paroi à caractériser à l'aide d'une caméra thermique et à enregistrer une séquence d'images thermiques pendant une période allant de 3 à 6 jours en fonction des conditions climatiques. Deux dispositifs additionnels sont placés dans la scène thermique.

Le premier est un appareil permettant une mesure du coefficient d'échange sur la paroi. Il est constitué d'une plaque en cuivre mince recouverte d'une peinture d'émissivité élevée et connue. Cette plaque est chauffée à une température supérieure à la température de l'ambiance de 3 à 10°C, à l'aide d'un film chauffant. Un fluxmètre est placé entre ces deux éléments dans la partie centrale de la plaque et mesure la densité de flux  $q$  à travers la plaque en cuivre. Ce dispositif est placé sur un matériau isolant d'au moins 5 cm d'épaisseur. La température de surface de la plaque en cuivre  $T_{hs}$  est connue à l'aide d'un thermocouple ou bien de la caméra thermique.

Le second dispositif est une plaque en cuivre recouverte d'une peinture d'émissivité élevée et connue et placée sur un matériau isolant de manière à disposer d'une inertie thermique faible. Un thermocouple permet de connaître la température de la plaque. Cette température est égale à la température d'environnement intérieur  $T_{ni}$ . Un deuxième appareil identique doit être placé sur la face extérieure de la paroi afin de connaître la température d'environnement extérieur  $T_{ne}$ . Le coefficient d'échange est obtenu à partir de la relation :

$$h = \frac{q}{T_{hs} - T_{ni}} \quad (3)$$

Ceci permet de déterminer le flux  $Q$  passant à travers une surface  $A$  de la paroi :

$$Q = h \times (T_{ni} - T_s) \times A \quad (4)$$

où  $T_s$  est la température de surface de la paroi (déterminée à partir des images thermiques) et d'en déduire la transmittance thermique de la paroi :

$$U = \frac{Q}{(T_{ni} - T_{ne}) \times A} \quad (5)$$

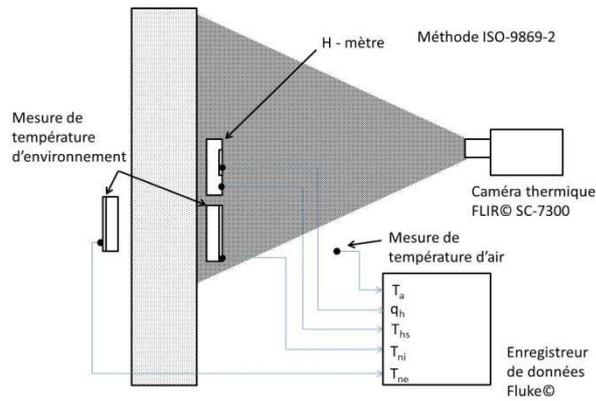


Figure 3 : Vue du dispositif expérimental utilisé pour le test de la norme 9869-2

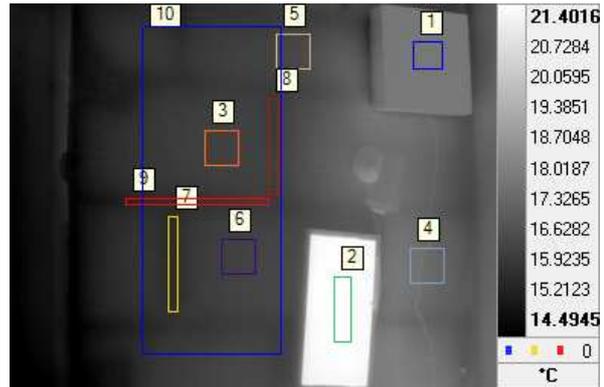


Figure 4 : Exemple d'image thermique lors du test de la norme 9869-2

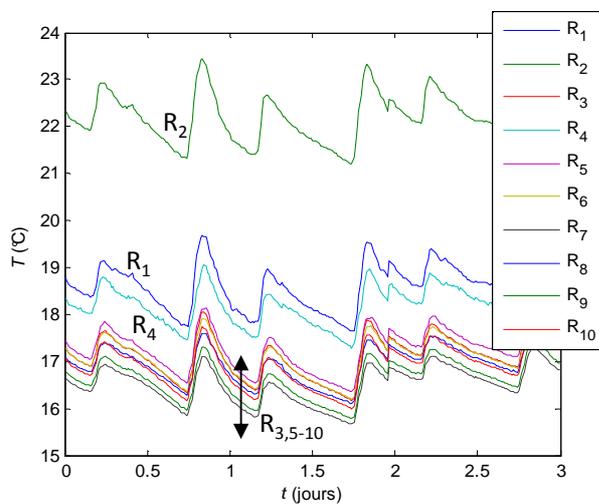


Figure 5 : Variations temporelles de la température des zones d'intérêt de la figure 4 lors du test de la norme 9869-2

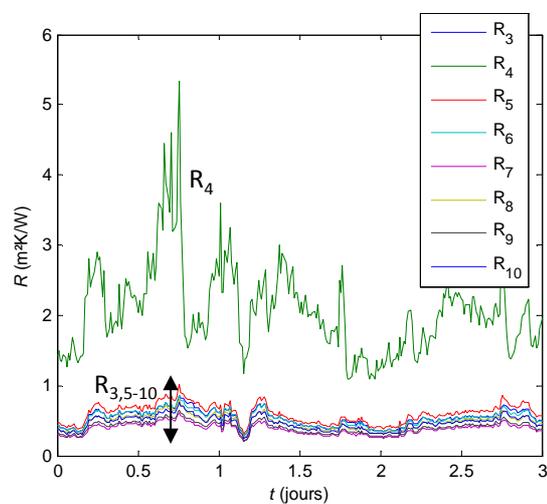


Figure 6 : Estimation de résistance thermique à l'aide de la norme 9869-2

## 4.2. Dispositif expérimental

Un schéma du dispositif expérimental est présenté sur la figure 3. Une image thermique de la paroi équipée des appareils de mesure de  $h$  et  $T_{ni}$  est présentée sur la figure 4 avec les zones d'intérêt sélectionnées pour le calcul de la résistance thermique (zones 3 à 10). La zone 1 permet le calcul de  $T_{ni}$  et la zone 2 le calcul de  $T_{hs}$ . La plaque chauffée présente une bonne uniformité en température (variations inférieures à  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  sur toute sa surface). Les variations temporelles de flux échangé par cette plaque sont au maximum de  $\pm 3\%$ . La figure 5 présente l'évolution des températures moyennes sur les zones d'intérêt pendant les trois jours de mesure. La figure 6 présente l'estimation de résistance thermique sur les zones 3 à 10.

## 5. Méthode de mesure de résistance thermique d'une paroi opaque par la méthode du Seid

Cette méthode consiste à placer sur la paroi à caractériser un isolant de résistance thermique connue  $R_{ref}$  et d'émissivité proche de celle de la surface de la paroi. Une observation par caméra thermique de la différence de température apparente entre la surface du mur  $T_{si,app}$  et de l'isolant rapporté  $T_{sRef,app}$  et une mesure de la température d'environnement

$T_{ni}$  permettent une estimation de la différence de résistance thermique entre les deux zones. La méthode a été proposée par D. Pajani et est décrite dans la référence [4] et doit être utilisée en intérieur. La résistance thermique  $R$  de la paroi est obtenue par la relation :

$$R = R_{ref} \times \frac{T_{ni} - T_{sRef,app}}{T_{sRef,app} - T_{si,app}} \quad (6)$$

Le dispositif expérimental mis en place pour tester cette méthode est décrit dans la figure 7. L'isolant de référence placé dans la scène thermique est une plaque de polystyrène extrudé ( $R_{ref} = 1,7 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ). Les mesures ont été effectuées pendant une journée avec un pas de temps de 15 minutes. Les estimations de résistance thermique sont présentées sur la figure 8.

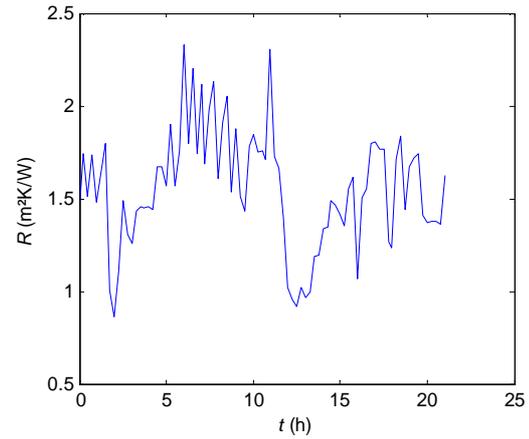
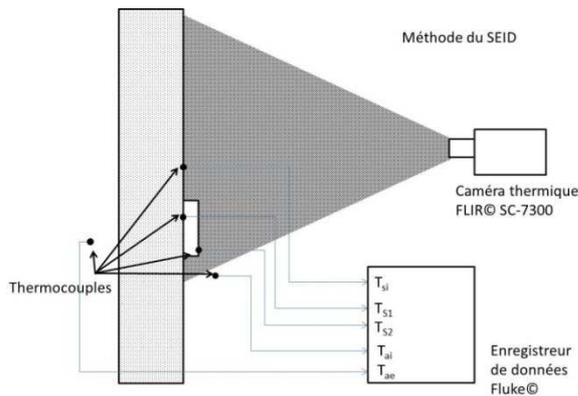


Figure 7 : Dispositif de mesure par la méthode du Seid

Figure 8 : Estimation de résistance thermique par la méthode du Seid

## 6. Méthode de mesure de résistance thermique d'une paroi opaque par méthode thermographique passive

### 6.1. Présentation de la méthode

La méthode thermographique proposée vise à déterminer la résistance thermique de la paroi à partir de mesures de température sur la paroi extérieure obtenues par thermographie infrarouge en mode passif. Une modélisation aux éléments finis [5] résout le système thermique schématisé sur la figure 9, les transferts conductifs dans la paroi étant considérés monodimensionnels. Dans cette modélisation, les coefficients d'échange  $h_{int}$  et  $h_{ext}$  sont constants et fixés aux valeurs préconisées par la réglementation [7]. Une évolution possible consisterait à estimer ou mesurer en continu ces coefficients. Les mesures sont associées au modèle afin de déterminer les paramètres inconnus de celui-ci en minimisant le critère suivant à l'aide de l'algorithme de Levenberg-Marquardt [8] :

$$S = \sum_{i=1}^I [T_{Se,mes}^i - T_{Se,estim}^i(\beta)]^2 \quad (7)$$

où  $T_{Se,mes}$  sont les températures de surface extérieure mesurées,  $T_{Se,estim}$  les températures estimées calculées par le modèle à partir du vecteur  $\beta$  regroupant les paramètres à estimer.

Dans un premier temps, les mesures de thermographie infrarouge doivent être corrigées par la prise en compte de l'émissivité de la paroi, de la température d'environnement, du facteur de transmission atmosphérique et de la température d'air [5]. Pour ce faire, un miroir diffusant en aluminium rugueux d'émissivité égale à 0,063 ainsi qu'une surface noire recouverte de

peinture Nextel<sup>®</sup> Velvet Coating 811-21 d'émissivité égale à 0,97 sont positionnés sur la façade dans le champ de vision de la caméra. La première approche de modélisation consiste à considérer un monomur équivalent à la paroi réelle constitué d'un matériau homogène dont les propriétés thermophysiques (conductivité  $\lambda$  et capacité thermique massique  $c_p$ ) sont déterminées par la minimisation (figure 9). Dans le modèle, l'épaisseur  $e$  du mur est fixée à l'épaisseur totale  $e_{totale}$  de la paroi supposée connue. Après identification pour une campagne de mesures de sept jours sur la façade ouest, la conductivité identifiée du monomur est  $0,06 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , soit une résistance thermique de  $4,5 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ . Sur la figure 10 sont présentées les évolutions des températures mesurées et estimées.

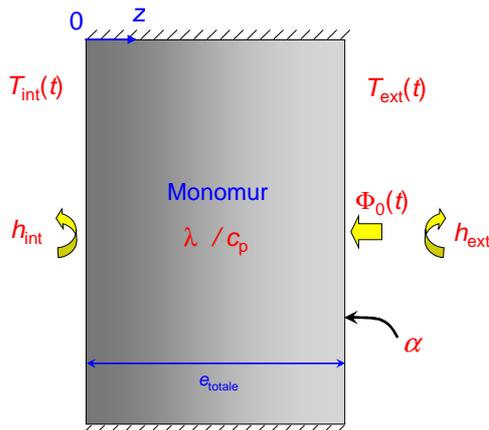


Figure 9 : Représentation schématique du système thermique monomur étudié

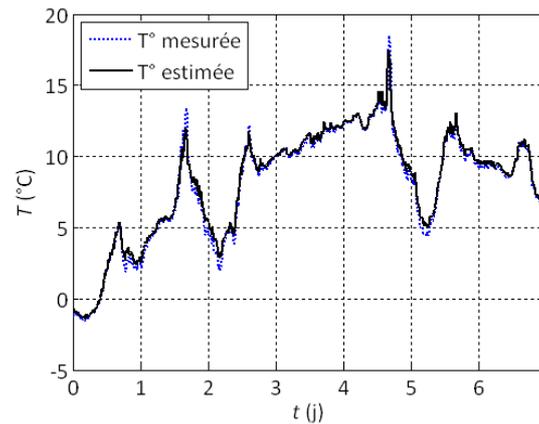


Figure 10 : Températures mesurées et estimées durant la campagne de mesures

## 6.2. Dispositif expérimental

Les capteurs installés en façade extérieure du bâtiment utilisés dans le cadre de la méthode thermographique sont présentés sur la figure 11. Les températures de surfaces extérieures sont mesurées par caméra thermique placée dans un caisson étanche avec PC portable (bande 7,7-9,2  $\mu\text{m}$ , pas de temps de 15 s, figure 12) pour l'ensemble de la façade et par thermocouples pour les mesures ponctuelles (type K, pas de temps 15 s). L'ensoleillement est mesuré à l'aide de cellules solaires. Une station météo placée sur le toit permet de réaliser l'acquisition de la température et de l'humidité de l'air extérieur. Les mesures de la température et de l'humidité de l'air intérieur sont réalisées à l'aide de thermo et hygro-puces (pas de temps 10 mn). Enfin, un albedomètre et un émissomètre développés au laboratoire assurent les mesures sur site du coefficient d'absorption solaire et de l'émissivité de l'enduit de façade.

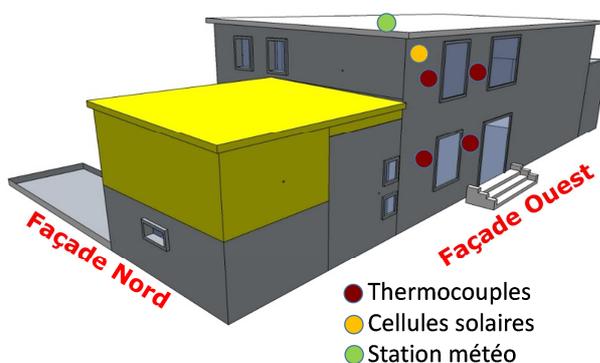


Figure 11 : Capteurs extérieurs intervenant dans la méthode thermographique



Figure 12 : Intérieur du caisson étanche avec caméra thermique

## 7. Présentation des résultats, discussion

Les mesures de la résistance thermique de la paroi opaque étudiée sont présentées dans le tableau 1. On appelle valeur attendue, la valeur calculée connaissant la composition du mur.

La méthode ISO-9869-1 a donné des valeurs variant de 1,84 à 3,8  $K.m^2.W^{-1}$  en fonction des dispositifs expérimentaux utilisés et de leur emplacement. Ces écarts sont supérieurs aux incertitudes attendues (la norme annonce des incertitudes minimales de 28%). La méthode ISO-9869-2 permet de mesurer le  $U$  moyen d'une paroi sur l'ensemble de la surface étudiée. Cependant l'incertitude sur la mesure de  $h$  ne permet pas d'obtenir des mesures précises pour des murs correctement isolés. Les niveaux d'incertitudes dépendent de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur et sont de 100% dans notre étude.

		Valeur attendue	ISO9869-1	ISO9869-2	Méthode Seid	Méthode IR passive
$R$	$K.m^2.W^{-1}$	3.8	2.8	2.1	1.6	4.5
Incertitude	$K.m^2.W^{-1}$	-	1	1.3	0.7	0.7
Durée de mesure	Jours	-	5	3	1	7

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des mesures et incertitudes de la mesure de  $R$

## 8. Conclusion

Les fortes disparités dans les valeurs obtenues mettent en évidence que la condition d'un flux thermique en 1D n'est pas valable. Il est donc plus utile de déterminer le coefficient  $U$  moyen pour une paroi, en prenant en compte les effets de bord. Seules les méthodes thermographiques permettent cela. Les méthodes normalisées étudiées ici ne sont pas adaptées pour mesurer des résistances thermiques compatibles avec la réglementation actuelle [7] mais plutôt adaptées au diagnostic de bâtiments anciens. La méthode du Seid mériterait d'être approfondie étant donné sa simplicité et la courte durée de mesure pour des murs faiblement isolés. De par la présence de ponts thermiques, on ne peut réellement mesurer la résistance thermique attendue mais plutôt les pertes thermiques des parois. Cependant les mesures faites sur l'enveloppe extérieure (§ 6) donnent des résultats en cohérence avec les matériaux installés, mais cette méthode requiert une instrumentation beaucoup plus lourde.

## Références

- [1] Norme ISO-9869-1.
- [2] S. Kato, K. Kuroki, S. Hagihara, Method of in-situ measurement of thermal insulation performance of building elements using infrared camera, *6<sup>th</sup> International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings* (Sendai, Japon, 2007).
- [3] Projet de norme ISO-9869-2.
- [4] D. Pajani, Surface équivalente d'irrégularité ou de défaut (Seid) et mesure du "U" par la méthode du Seid, *Conférence Thermogram'2011* (Châlons en Champagne, France, 2011).
- [5] J-P. Monchau, L. Ibos, V. Feuillet, Diagnosis of insulated building walls using passive infrared thermography and numerical simulation, *7<sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring*, (Nantes, France, 2014).
- [6] <http://osu-efluve.u-pec.fr/recherche/observations>.
- [7] Réglementation Thermique 2012, *Ed. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (2012).
- [8] D. W. Marquardt, An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11 (1963), 431-441.