Comparaison des températures de surface d'une façade de bâtiment obtenues par simulation et par des mesures de terrain par thermographie infrarouge

Jean-Pierre Monchau[1], Laurent Ibos[1], Vincent Feuillet*[1]

[1] Université Paris-Est, CERTES / OSU Efluve
61 avenue du Général De Gaulle, 94010 Créteil Cedex, France
***vincent.feuillet@u-pec.fr**

RESUME. Ce travail présente l'instrumentation d'un bâtiment d'habitation assurant le suivi thermique de parois. Les mesures de température de parois extérieures par thermographie infrarouge sont corrigées par la prise en compte des paramètres influents puis comparées aux mesures par thermocouples et aux résultats issus d'une modélisation numérique.

MOTS-CLÉS : thermographie infrarouge passive, parois, résistance thermique.

ABSTRACT. This work presents the thermal monitoring of a multi-layered wall of a restored building. Surface temperatures measured by infrared thermography are corrected by taking account of the influence parameters. Then they are compared with thermocouple measurements and numerical simulations.

KEYWORDS : passive infrared thermography, walls, thermal resistance.

1. INTRODUCTION

La thermographie infrarouge est de plus en plus utilisée pour le suivi thermique de bâtiments. Elle a l'avantage d'être non intrusive et de présenter des résolutions spatiales et thermiques élevées. Malgré cela, il est difficile d'aboutir à un diagnostic quantitatif en raison des nombreux paramètres influençant la scène thermique observée (Bareira et de Freitas 2007). Il n'existe qu'une seule norme internationale définissant une méthode de mesure in-situ de la résistance thermique d'une paroi isolée à l'aide de capteurs par contact (thermocouples, fluxmètres) (Norme ISO 1994). Cependant, une nouvelle norme basée sur l'utilisation de la thermographie infrarouge est en préparation (Kato et al. 2007). On ne trouve dans la littérature que peu d'études de terrain quantitatives utilisant la thermographie infrarouge passive. Par exemple, une méthodologie a permis d'obtenir des valeurs de transmittances thermiques d'enveloppes de bâtiment (Albatici et Tonelli 2010). Cependant les auteurs insistent sur la difficulté de prise en compte des conditions de mesure (météo, utilisation du bâtiment, travaux de rénovation). Dans l'étude proposée, des mesures de thermographie infrarouge passive sur une paroi multicouche d'une habitation rénovée (plateforme PANISSE) sont analysées. Cette habitation a été instrumentée et isolée par l'extérieur en 2011. Un ensemble de paramètres est mesuré en continu : température d'air et humidités intérieur et extérieur, températures de surfaces, flux solaires incidents. Une méthode normalisée fluxmétrique de mesure de la résistance thermique de la paroi est mise en œuvre. Enfin, les relevés thermographiques sont comparés, après correction, à des résultats de simulation numérique.

2. INSTRUMENTATION ET MESURES

2.1. PLATEFORME PANISSE

La plateforme PANISSE (Plateforme d'Analyse du Niveau d'Isolation in-Situ par Suivi Energétique) est un immeuble d'habitation de deux niveaux, construit dans les années 60 en béton cellulaire. Lors d'une rénovation en 2011, cet immeuble a été isolé par l'extérieur. Une couche isolante de 6 cm d'épaisseur en polystyrène expansé graphité a été fixée sur les parois extérieures du bâtiment. Une lame d'air a été conservée entre la paroi porteuse et l'isolant. Ce dernier a été recouvert d'un enduit de finition. Une vue en coupe d'une des parois du bâtiment est présentée sur la figure 1.

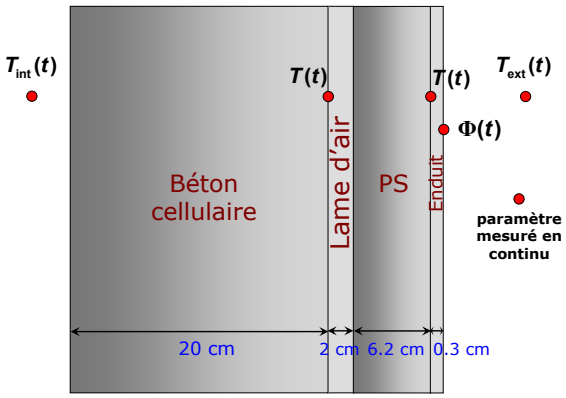

Figure 1 : Vue en coupe d'une paroi extérieure de la plate-forme PANISSE.

Le bâtiment est situé sur la commune de Villemomble (département de la Seine-Saint-Denis, 93) et est habité en permanence. Deux vues du bâtiment sont présentées sur la figure 2. Trois façades sont libres (Est, Nord et Ouest). Une partie du bâtiment est mitoyenne avec un autre immeuble d'habitation symétrique. Sur la façade Nord, un garage tient lieu de garde thermique sur la partie en rez-de-chaussée. Le bâtiment possède un toit terrasse sur lequel a été installée une station météo qui permet d'enregistrer en continu divers paramètres : vitesse et direction du vent, précipitations, température d'air extérieur, humidité relative et pression. Lors des travaux de rénovation, des thermocouples de type K ont été insérés en différentes positions sur la façade : 3 sur la façade Est, 1 sur la façade Nord et 6 sur la façade Ouest (Cf. figure 2). Pour chaque position, un thermocouple a été installé sous l'enduit de parement et un deuxième en surface extérieure de la paroi en béton cellulaire (Cf. figure 1). En outre, des cellules solaires ont été positionnées sur chacune des façades et sur le toit afin de disposer des flux solaires incidents sur chacune des faces du bâtiment. Ces cellules solaires ont préalablement été étalonnées à l'aide d'un pyranomètre Kipp&Zonnen™. L'ensemble des capteurs est relié à un dispositif d'acquisition de données National Instruments™ piloté par une application LabView™. Les données sont acquises en continu depuis début 2013 avec un pas de temps de 15 secondes. Les données sont stockées dans des fichiers journaliers horodatés.

La température de surface des parois intérieures n'est pas mesurée. En revanche, des capteurs autonomes (thermo et hygro-puces de marque Warito™) sont placés dans diverses pièces du bâtiment afin d'enregistrer avec un pas de temps de 10 minutes la température d'air et l'humidité à l'intérieur du bâtiment. Ces enregistreurs miniatures autonomes sont livrés étalonnés avec un certificat d'étalonnage (précision de 0.12°C et 3% d'HR). Leur programmation, ainsi que la récupération des données s'effectue à l'aide d'un lecteur USB.

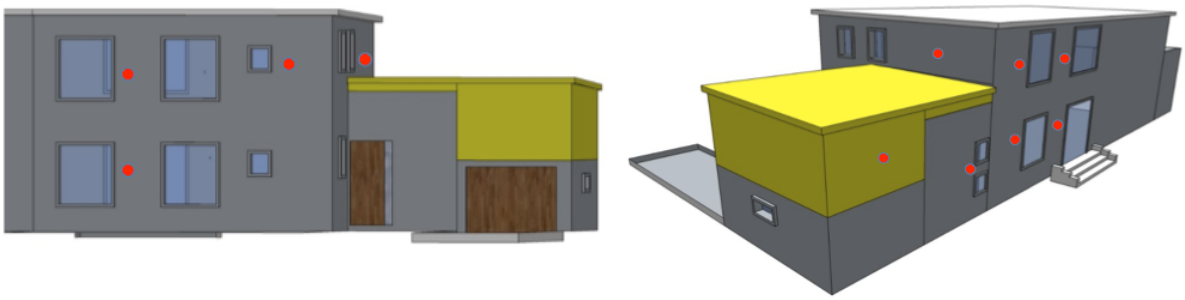

Figure 2 : Vues des façades de la plateforme PANISSE et position des capteurs implantés dans les parois : façades Est et Nord (à gauche), façades Nord et Ouest (à droite).

Le coefficient d'absorption solaire de l'enduit de façade a été mesuré sur site à l'aide d'un albédomètre fabriqué en laboratoire. Celui-ci est muni de deux cellules solaires dos à dos étalonnées à l'aide d'un pyranomètre. La valeur du coefficient d'absorption solaire est α=0.37. De même, l'émissivité du revêtement de façade a été mesurée sur site à l'aide d'un émissomètre portable développée récemment au sein du CERTES (Monchau et al. 2013). La valeur de l'émissivité du revêtement dans la bande de longueur d'onde 8 - 14 µm est ε=0.93.

2.2. CAMPAGNE DE MESURES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

Une campagne de mesures de douze jours a été menée du 25 janvier au 6 février 2013. Lors de cette campagne, une caméra thermique a été utilisée pour enregistrer en continu les déperditions de la façade Ouest du bâtiment. Pour ce faire, la caméra a été placée dans un caisson étanche avec un PC portable qui permet de stocker les images avec un pas de temps de 15 secondes à l'aide du logiciel Altair™ (Cf. figure 3). La caméra utilisée est une caméra ondes longues (7.7 - 9.2 µm) à détecteur matriciel (320×256 pixels) refroidi par Stirling. La caméra est munie d'un objectif standard de 25 mm. La température et l'humidité de l'air dans le caisson sont enregistrées en continu avec un capteur miniature autonome identique à ceux utilisés à l'intérieur du bâtiment.

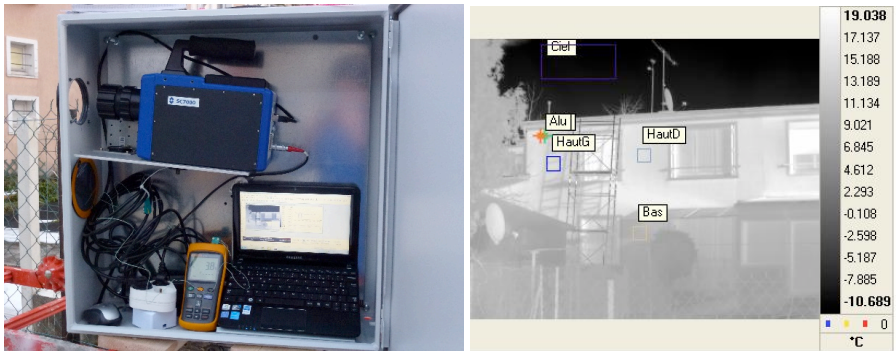

Figure 3 : Vues du caisson étanche permettant un suivi thermographique en continu pendant plusieurs semaines de la façade Ouest (à gauche) ; exemple d'image thermique de la façade Ouest acquise lors d'une journée ensoleillée (à droite).

Un miroir diffusant en aluminium rugueux d'émissivité égale à 0.063 (Datcu et al. 2005) ainsi qu'une surface noire recouverte de peinture Nextel™ Velvet Coating 811-21 d'émissivité égale à 0.97 sont positionnés sur la partie supérieure gauche de la façade Ouest. Les températures de ces deux surfaces, placées dans la scène thermique vue par la caméra, sont enregistrées en continu à l'aide de thermocouples. La surface réfléchissante et diffusante en aluminium permet de déterminer en continu

la température de l'environnement radiatif de la façade. La surface noire permet de tenir compte en continu de l'atténuation atmosphérique.

Les séquences d'images thermiques sont corrigées de manière à tenir compte des différents paramètres influant sur la valeur de la température de surface des parois : émissivité, température d'environnement, facteur de transmission atmosphérique et température d'air (Monchau 2013). Un exemple de comparaison entre deux profils de température mesurée (sur 12 jours) par caméra et par thermocouple sur le point supérieur gauche de la façade Ouest est présenté sur la figure 4. Les écarts de température thermocouple-caméra sur trois points de la façade Ouest sont présentés sur la figure 5. Les moyennes de ces écarts sont respectivement de -0.07°C, 0.15°C et 0.14°C. Les écarts-type correspondants sont respectivement de 0.44°C, 0.43°C et 0.39°C. On remarque de manière générale un accord satisfaisant entre les mesures par thermocouple et par caméra, hormis pour certaines périodes qui correspondent à des alternances rapides de périodes ensoleillées et de passages nuageux.

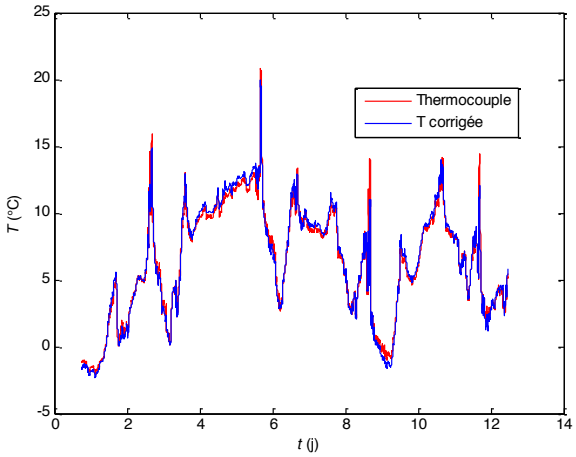

Figure 4 : Comparaison des mesures par thermocouple et par caméra thermique sur le point supérieur gauche de la façade Ouest.

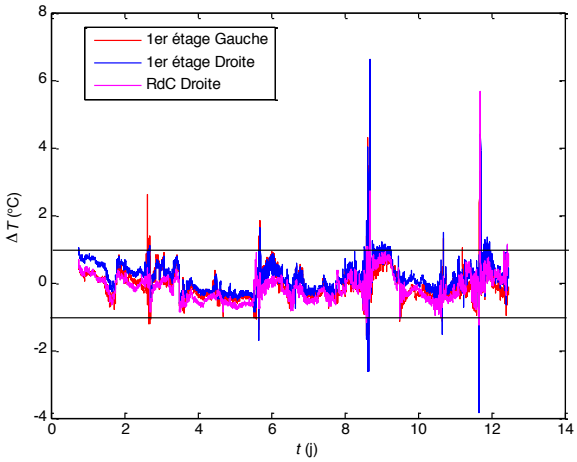

Figure 5 : Ecarts de température thermocouple-caméra sur trois points de la façade Ouest.

3. MESURE DE LA RESISTANCE THERMIQUE DU MUR

3.1. PRINCIPE

Pour mesurer la résistance thermique du mur, deux méthodes ont été utilisées : l'une très proche de celle décrite dans la norme ISO-9869 (Norme ISO 1994), l'autre utilisant la connaissance de la structure du mur et de la résistance thermique déclarée de l'isolation thermique par l'extérieur (ITE). Celle-ci est constituée de polystyrène expansé graphité d'épaisseur 62 mm pour une résistance thermique de 2 $m^2.K.W^{-1}$.

La figure 6 montre les points de mesures de l'instrumentation mise en œuvre. T_1 est la mesure température de la surface du mur côté intérieur, T_2 est la mesure de la température de la surface du mur en béton cellulaire entre celui-ci et l'ITE et T_3 la température de surface de l'enduit extérieur. Ces trois mesures sont réalisées à l'aide de thermocouples de type K. Les températures d'air intérieur et extérieur T_{int} et T_{ext} sont mesurées grâce à des enregistreurs Warito™ avec certificat d'étalonnage. HFM est un capteur de flux thermique de la marque Captec™ de sensibilité 18 µV/(W.m^{-2}).

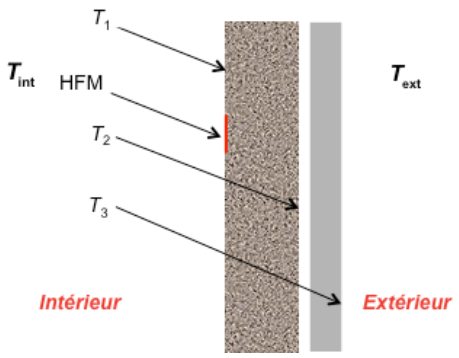

Figure 6 : Vue en coupe de l'instrumentation utilisée pour la mesure de la résistance thermique du mur.

3.2. METHODE DE MESURE DE LA NORME ISO-9869

Le principe consiste à calculer les moyennes des températures de surfaces du mur et la moyenne du flux thermique. Ces moyennes temporelles doivent être idéalement calculées sur plusieurs jours et sur une durée multiple de 24 h. On vérifie que les variations de l'énergie accumulée par le mur sont négligeables par rapport à l'énergie ayant traversé celui-ci pendant la durée de mesure. Une méthode expérimentale simple permet de le vérifier : on calcule la résistance thermique R_{th} toutes les 24 h et lorsque la valeur converge avec des écarts inférieurs à 5%, on considère que la valeur peut être validée. La norme ISO-9869 décrit une approche dynamique permettant en outre de tenir compte de l'inertie thermique. La mesure présentée ici a été faite sur 48 h, durée qui pourrait être considérée insuffisante si les conditions météorologiques n'avaient pas été favorables : ciel couvert, pas d'ensoleillement, températures très peu variables entre le jour et la nuit et conditions équivalentes les jours précédant la mesure.

La résistance thermique totale R_{th} est calculée ainsi :

$$R_{th} = \frac{\langle T_1 \rangle - \langle T_3 \rangle}{\langle \Phi_S \rangle} \quad \textbf{(1)}$$

avec Φ_S le flux surfacique.

3.3. METHODE UTILISANT LES CARACTERISTIQUES DU MUR

Dans ce cas, on utilise la connaissance de la résistance de l'isolant pour estimer le flux :

$$\langle \Phi_S \rangle = \frac{\langle T_2 \rangle - \langle T_3 \rangle}{R_{ITE} + R_{la}} \quad \textbf{(2)}$$

où R_{ITE} est la résistance thermique de l'ITE et R_{la} celle de la lame d'air. A partir de ce flux surfacique, on calcule R_{th} comme précédemment.

3.4. RESULTATS

Les moyennes des mesures sont données dans le tableau 1 :

Moyenne des mesures sur 48 h					
T_{int} (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_{ext} (°C)	Φ_S (W.m^{-2})
19.66	18.34	16.00	6.42	6.28	3.11

Tableau 1 : Mesures moyennes pour la mesure de la résistance thermique du mur.

Le flux calculé suivant la seconde méthode donne Φ_s=3.46 W.m^{-2}. Les valeurs de la résistance thermique ainsi calculées par les deux méthodes donnent : R_{th1}=3.83 m^2.K.W^{-1} et R_{th2}=3.44 m^2.K.W^{-1}. L'écart entre les deux valeurs est de l'ordre de 10%, ce qui reste raisonnable pour une méthode fluxmétrique.

4. COMPARAISON DES MESURES AVEC LA SIMULATION NUMERIQUE

4.1. PRINCIPE

Dans cette partie, les mesures obtenues sur site sont comparées aux résultats issus d'une modélisation numérique des transferts de chaleur au sein de la paroi. Les mesures analysées concernent la paroi se situant sur la façade Ouest du bâtiment, au premier étage. La simulation numérique est effectuée à l'aide du logiciel commercial Comsol™. Celui-ci résout le système thermique étudié par la méthode des éléments finis.

Dans un premier temps, il convient de formaliser les transferts de chaleur en termes de domaines et conditions limites et de définir les différents paramètres intervenant dans la modélisation. Les caractéristiques géométriques et thermophysiques de la paroi simulée sont reportées dans le tableau 2. Une lame d'air de 2 cm d'épaisseur s'interpose entre le béton cellulaire et le polystyrène expansé. Le système thermique correspondant est schématisé sur la figure 7.

Sur cette dernière figure apparaissent l'ensemble des paramètres thermophysiques mis en jeu dans les transferts de chaleur. Du côté intérieur, la paroi échange par convection (coefficient d'échange h_{int} supposé constant) avec l'air intérieur de température $T_{\text{int}}(t)$. La chaleur diffuse par conduction à travers les différentes couches de la paroi (épaisseur e_{i}, conductivité thermique λ_{i}, masse volumique ρ_{i}, capacité thermique massique c_{i}). Egalement, du côté extérieur, la paroi échange par convection (coefficient d'échange h_{ext} supposé constant) avec l'air extérieur $T_{\text{ext}}(t)$ et reçoit le flux solaire incident $\Phi_0(t)$. Ce dernier n'est qu'en partie absorbé par la paroi par l'intermédiaire du facteur d'absorption de la paroi α. La lame d'air est modélisée par une résistance thermique R_{la}. Enfin, le transfert est supposé monodimensionnel dans la direction de l'épaisseur de la paroi (direction z). La zone d'investigation est en effet prise au centre du mur, éloignée des ouvertures et éventuels ponts thermiques. Le tableau 3 présente les valeurs prises pour les paramètres de transfert issues de la littérature (Réglementation Thermique 2012) ou de mesures sur site (coefficient α).

Couche i	Epaisseur e_i (cm)	Conductivité thermique λ_i (W.m^{-1}.K^{-1})	Masse volumique ρ_i (kg.m^{-3})	Capacité thermique massique c_i (J.K^{-1}.kg^{-1})
Béton cellulaire (i=1)	20	0.14	400	1000
Polystyrène (i=2)	6.2	0.031	20	1450
Enduit (i=3)	0.3	0.3	833	1000

Tableau 2 : Caractéristiques de la paroi pour la comparaison avec la simulation numérique.

h_{int} (W.m^{-2}.K^{-1})	h_{ext} (W.m^{-2}.K^{-1})	α	R_{la} (m^2.K.W^{-1})
25	8	0.37	0.15

Tableau 3 : Paramètres de transfert intervenant dans la modélisation.

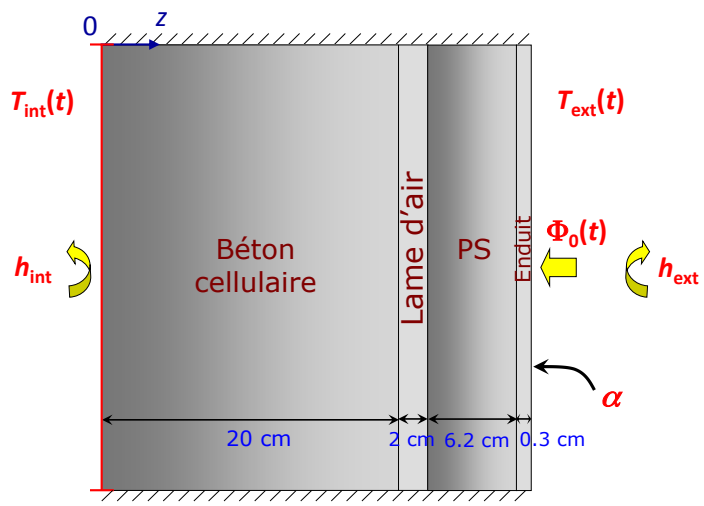

Figure 7 : Représentation schématique du système thermique correspondant à la paroi étudiée.

4.2. RESULTATS

Nous comparons ici la température de paroi extérieure mesurée par thermographie infrarouge avec la température calculée par le modèle pour la configuration présentée au paragraphe 4.1. Les fichiers météo obtenus sur site sont utilisés en données d'entrée par le modèle. La figure 8(a) montre l'évolution des températures mesurée T_{mes} et calculée par le modèle T_{cal} sur une durée de 7 jours. La figure 8(b) montre les écarts obtenus, c'est-à-dire la différence T_{mes}-T_{cal} entre les deux températures précédentes.

On note une concordance correcte entre les mesures et le modèle pour la période considérée. Cependant, un biais apparaît tout au long de la période, la température mesurée étant globalement inférieure à la température calculée. La moyenne des écarts T_{mes}-T_{cal} est de -0.71°C tandis que l'écart-type correspondant est de 0.63°C. Les décalages les plus importants ont lieu lors d'augmentations ou diminutions brusques d'ensoleillement. Une méthode d'estimation de paramètres pourra permettre par la suite de diminuer ces écarts en ajustant la valeur de certains paramètres de la modélisation.

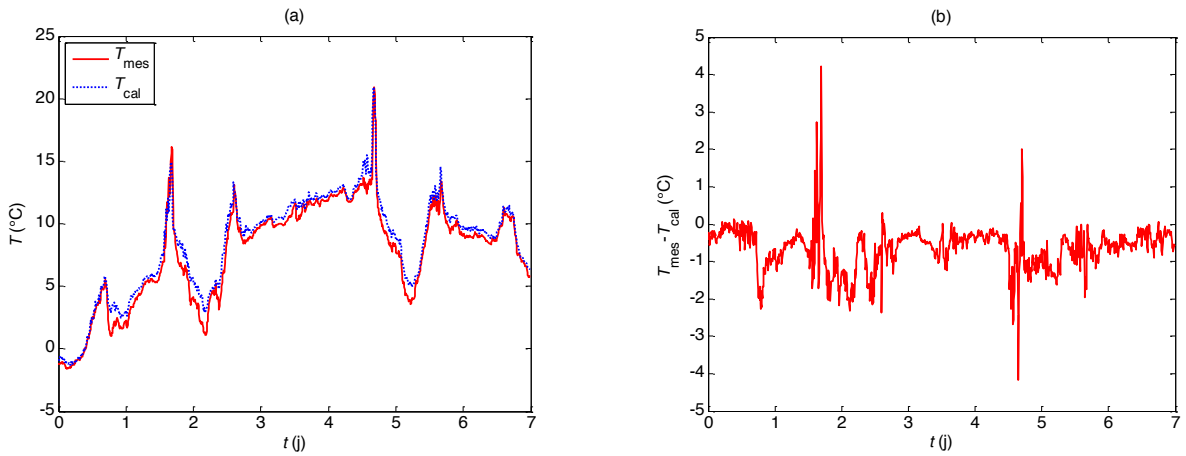

Figure 8 : Températures de paroi extérieure – façade Ouest/1er étage
(a) Températures mesurée par thermographie IR T_{mes} et calculée T_{cal}, (b) Ecarts T_{mes}-T_{cal}.

5. CONCLUSION

Ce travail présente l'instrumentation d'un bâtiment d'habitation permettant le suivi thermique de parois. La première étape de l'analyse des mesures consiste à corriger les températures de surface extérieure mesurées par thermographie infrarouge par la prise en compte des paramètres influents (température d'environnement, facteur de transmission atmosphérique, émissivité de la surface à mesurer, température de l'atmosphère). La méthode de correction proposée est évaluée par comparaison avec les mesures par thermocouple. L'étape suivante montre la bonne concordance entre les mesures de température de paroi extérieure par thermographie infrarouge et les résultats issus d'un modèle numérique de la paroi (éléments finis).

On cherchera par la suite à estimer différents paramètres supposés inconnus du modèle permettant de déterminer la résistance thermique de la paroi que l'on pourra comparer à celle obtenue par la méthode normalisée fluxmétrique. L'identification à mettre en œuvre consistera à minimiser l'écart entre les températures mesurées et celles calculées par le modèle à l'aide d'un algorithme d'optimisation de paramètres (Marquardt 1963). On déterminera par ailleurs la durée de mesure par thermographie IR minimale permettant d'obtenir une estimation satisfaisante de la résistance thermique de la paroi. Le rôle de la lame d'air doit également être approfondi (non linéarités, propriétés variables avec la température).

6. BIBLIOGRAPHIE

Albatici R., Tonelli A. M. 2010. « Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site ». *Energy and Buildings* 42: 2177-2183.

Bareira E., de Freitas V. P. 2007. « Evaluation of building materials using infrared thermography ». *Construction and Building Materials* 21: 218- 224.

Datcu S., Ibos L., Candau Y., Matteï S. 2005. « Contribution to improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography ». *Infrared Physics and Technology* 46: 451- 467.

Kato S., Kuroki K., Hagihara S. 2007. « Method of in-situ measurement of thermal insulation performance of building elements using infrared camera ». In *6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC)*. Sendai (Japon).

Marquardt D. W. 1963. « An algorithm for the least squares estimation of non linear parameters ». *SIAM Journal* 1: 431- 441.

Monchau J.-P. 2013. « Mesure d'émissivité pour la thermographie infrarouge appliquée au diagnostic quantitatif des structures ». Thèse de Doctorat, Université Paris-Est.

Monchau J.P., Marchetti M., Ibos L., Dumoulin J., Feuillet V., Candau Y. 2013. « Infrared emissivity measurements of building and civil engineering materials ». *International Journal of Thermophysics*. Sous presse.

Norme ISO 9869-1. 1994.

Réglementation Thermique 2012. 2012. *Ed. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*.