

Méthode non destructive de diagnostic de parois isolées du bâtiment par thermographie infrarouge active.

Mohamed LARBI YUCEF^{1*}, Atef MAZIOUD¹, Laurent IBOS¹, Yves CANDAU¹, Pierre BREMOND², Michel PIRO³, Alain FILLOUX⁴

¹Centre d'Etude et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes (CERTES) – EA 3481 Université Paris XII Val de Marne – 61, avenue du Général De Gaulle – 94010 Créteil Cedex

²CEDIP Infrared Systems - 19, Boulevard Bidault – F-77183 Croissy Beaubourg

³EDF R&D Site des Renardières - Avenue des Renardières, Ecuelles – 77250 Moret sur Loing

⁴Alpheis - 1200 Route des Lucioles, Espace Beethoven, – 06560 Valbonne

* (auteur correspondant : larbiyoucef@univ-paris12.fr)

Résumé - Ce travail concerne le développement d'un protocole expérimental pour le contrôle de l'isolation de murs de bâtiments. Des panneaux normalisés plâtre polystyrène sont chauffés en face avant par des lampes halogènes. La température est mesurée par une caméra infrarouge. Les propriétés thermophysiques et l'épaisseur sont estimées par une méthode utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt. L'estimation se fait par comparaison entre les mesures et un modèle 1D basé sur la méthode des quadripôles thermiques et une inversion numérique par la méthode de Steffest.

Nomenclature

A, B, C, D	coefficients matrice quadripôles	R_c	Résistance d'interface, $m^2.K.W^{-1}$
a	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$	T	température, K
e_i	épaisseur de couche, m	<i>Symboles grecs</i>	
C_p	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
h_1	coefficient d'échange face avant, $W.m^{-2}.K^{-1}$	θ	température dans l'espace de Laplace, K
h_2	coefficient d'échange face arrière, $W.m^{-2}.K^{-1}$	ϕ	flux dans l'espace de Laplace, $W.m^{-2}$
k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
p	variable de Laplace	i	couche de la paroi

1. Introduction

Ce travail fait partie d'un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche ANR dans le cadre des appels à projets intitulés PREBAT [1]. L'objectif de ce projet est de fournir une méthode de contrôle et de diagnostic de murs isolés de bâtiments réhabilités et dont les performances énergétiques restent médiocres. Ce type de bâtiments représente 60% du parc de logements en France. Ceci montre l'importance de disposer d'une méthode de diagnostic vu le nombre considérable de bâtiments concernés.

La méthode proposée s'appuie sur des mesures par caméra infrarouge du fait de son caractère non intrusif ni destructif. Quelques travaux ont été menés dans ce domaine mais la démarche utilisée était qualitative et orientée vers la détection de défauts ou de manques d'isolation [2,3]. Notre travail est quantitatif et vise à estimer la résistance thermique globale de parois isolées.

2. Protocole expérimental

2.1. Doublages isolants normalisés

Les panneaux utilisés sont des doublages plâtre polystyrène munis d'une certification ACERMI [4] pour l'isolant et répondant au DTU 25.41. Les caractéristiques thermophysiques sont reportées dans le tableau 1. Les panneaux utilisés ont pour épaisseur de plâtre 10 mm et respectivement 20, 60 et 100mm de polystyrène (10+20, 10+60 et 10+100). Ceci nous permettra d'étudier des panneaux « limites » et un panneau intermédiaire.

	k $W.m^{-1}.K^{-1}$	ρ $kg.m^{-3}$	Cp $J.kg^{-1}.K^{-1}$	a $\times 10^{-7} m^2.s^{-1}$
Plâtre	0,35	800	1090	4.38
Polystyrène	0,038	20	1450	13.1

Tableau 1 : Caractéristiques thermophysiques des panneaux isolants utilisés.

2.2. Description de l'expérimentation

Les panneaux isolants sont chauffés par deux lampes halogènes de 500W chacune et à une distance de 60 cm. Une caméra infrarouge CEDIP (7-11 μ m) est utilisée pour mesurer les températures en face avant. Pour les mesures de température de surface et d'air en face arrière ainsi que les mesures de température d'air, nous utilisons des thermocouples de type K. Ces mesures sont réalisées à titre indicatif et ne sont pas exploitées pour l'instant. Pour les températures d'air, les thermocouples sont protégés par un petit cylindre en aluminium. Le schéma d'ensemble est illustré en figure 1.

Dans une seconde série de mesures, nous avons réalisé un cube de 50 cm d'arête et dont les faces internes sont recouvertes de papier aluminium. Ce dispositif est appliqué sur la face avant des panneaux. Il est destiné d'une part à uniformiser l'éclairage du panneau et d'autre part à réduire les pertes radiatives en face avant (figure 2). Deux ouvertures sont pratiquées à l'arrière du cube pour l'emplacement des lampes et une autre pour la caméra infrarouge. Un thermocouple est placé dans le cube afin de mesurer la température d'air en face avant.

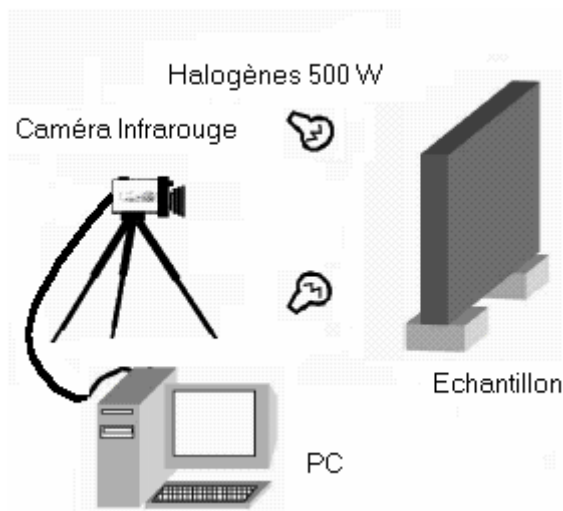


Figure 1 : Vue d'ensemble du banc expérimental



Figure 2 : Vue intérieure du cube recouvert d'aluminium, de la caméra IR et des lampes.

3. Modèles thermiques

3.1. Méthodes des quadripôles – Modèle 1D

Nous supposons le cas d'une paroi bicouche plâtre polystyrène avec résistance de contact R_c (représentant un contact imparfait entre le plâtre et le polystyrène) et dont la face avant absorbe une densité de flux P . Les conditions aux limites sont représentées par un coefficient d'échange global h_1 en face avant et h_2 en face arrière (figure 3). La méthode des quadripôles thermiques est utilisée pour résoudre ce problème.

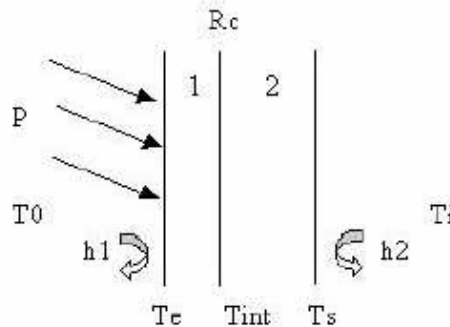


Figure 3 : Schéma d'un bicouche avec conditions aux limites.

Nous supposons qu'à l'état initial le système est à l'équilibre thermique ($T(t=0)=0$). Dans l'espace de Laplace (températures θ et flux ϕ), nous avons le système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} \theta_e \\ \phi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1/h_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i \\ \phi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i \\ \phi_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

avec :

$$A_i = D_i = \cosh(\alpha e_i) ; B_i = \frac{\sinh(\alpha e_i)}{k_i \alpha} \text{ et } C_i = k_i \alpha \sinh(\alpha e_i) \quad (2)$$

$$\alpha^2 = \frac{P}{a_i} \quad (3)$$

La température $T_e(t)$ est par la suite calculée en utilisant la méthode de transformation numérique inverse de Steffest [5].

3.2. Modèle tridimensionnel

Dans ce cas, nous avons utilisé le code de calculs tridimensionnels Fluent™ basé sur la méthode des volumes finis. Ces calculs nous permettront de vérifier notre hypothèse de transfert monodimensionnel au centre de la zone éclairée (condition permettant l'emploi du modèle 1D présenté au paragraphe 3.1) et de déterminer l'étendue de la zone affectée par des effets de bord en périphérie de la zone éclairée.

Les panneaux bicouches sont cette fois-ci modélisés en coordonnées cylindriques. La configuration consiste alors en un cylindre de 2000 mm de diamètre (pour éviter les effets des perturbations générées par le milieu extérieur), une couche de plâtre de 10mm et une couche de polystyrène de 100mm. Un maillage tridimensionnel est réalisé sous Gambit avec au total 108200 cellules (figure 4). Une zone centrale de 50 cm de diamètre est chauffée par un flux de 1000 W pendant une heure. Les conditions aux limites sont représentées par des coefficients d'échange globaux de $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ en face avant, arrière et sur les côtés pour se

rapprocher le plus possible du cas réel (panneau de 1200 mm de largeur). Le maillage ainsi réalisé sera par la suite intégré dans un panneau non homogène se qui explique le choix du modèle 3D.

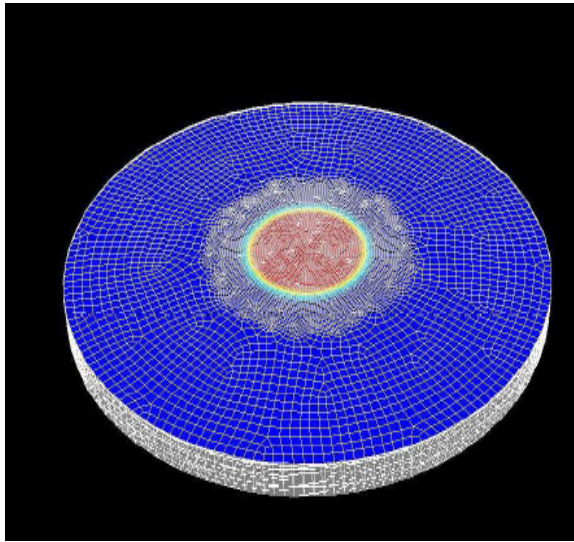


Figure 4 : Maillage automatique sous Gambit utilisé dans le code Fluent

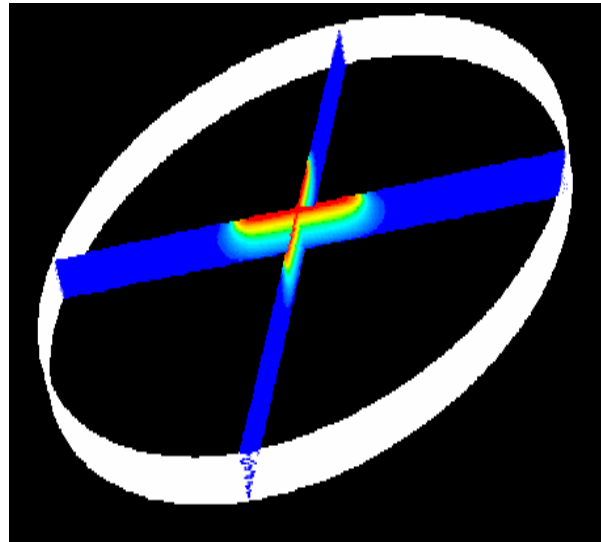


Figure 5 : Profils de température dans la zone centrale obtenus à l'aide de Fluent.

4. Résultats

4.1. Modèle tridimensionnel

Comme illustré dans la figure 5, la zone centrale montre un comportement monodimensionnel dans une zone de diamètre égal à 45 cm. Ceci signifie que pour utiliser l'hypothèse de modèle monodimensionnel, nous devons étudier les profils de température dans cette zone. D'autre part, nous ne voyons pas apparaître d'effets de bord significatifs qui auraient créé des échanges tridimensionnels même au centre de la zone éclairée. La conséquence de ce résultat est le bon dimensionnement du cube avec des faces internes en aluminium qui sera fixé sur la face avant des panneaux isolants.

4.2. Images thermiques

Les caméras CEDIP sont fournies avec le logiciel Altair qui permet une analyse des images thermiques en temps réel ou après acquisition. Dans notre travail, nous avons relevé des images en face avant. Il est possible d'insérer des outils pour faire des analyses à différents emplacements de l'image (figure 6).

4.3. Mesures

Nous présentons dans les figures 7 et 8, les mesures en face avant obtenues sur les trois panneaux (10+20, 10+60 et 10+100), sans présence du cube (figure 7) et avec le cube réfléchissant placé en face avant (figure 8). Pour le premier cas (sans cube), nous avons utilisé le maximum de la puissance soit 1000 W. Dans le second cas, nous avons utilisé seulement le quart de la puissance soit 250 W. Il apparaît clairement que les amplitudes de température sont plus importantes dans le cas où le cube est présent. De plus, l'augmentation de la durée de chauffage permet d'obtenir des écarts plus importants entre les panneaux. Cela est sûrement dû à la surface des faces internes qui sont réfléchissantes et permettent une

absorption plus importante du flux visible émis par les lampes halogènes, le cube se comportant ainsi comme une sphère intégrante. De même, il semble que les échanges radiatifs à grande longueur d'onde soient réduits. Cependant, cette dernière hypothèse nécessite d'être vérifiée par des mesures de températures des faces internes du cube.

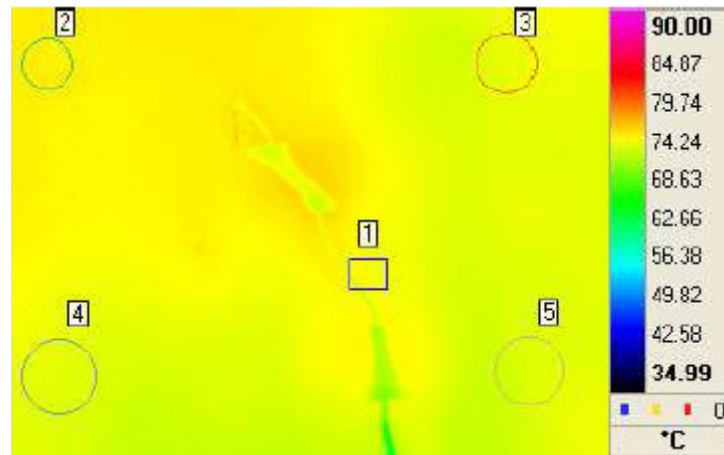


Figure 6 : Image Altair en face avant du panneau.

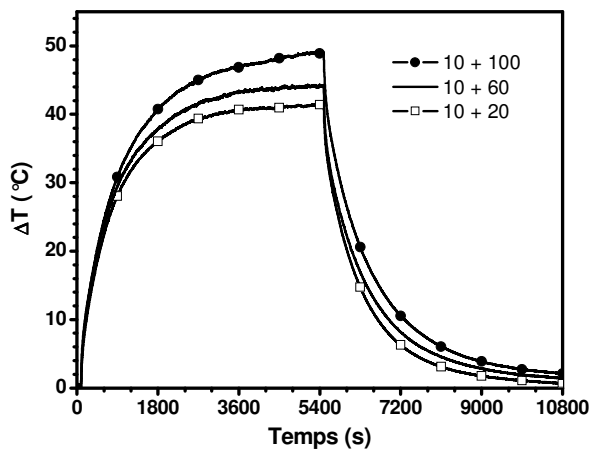


Figure 7 : Résultats expérimentaux dans le premier cas d'étude (sans présence du cube en face avant)

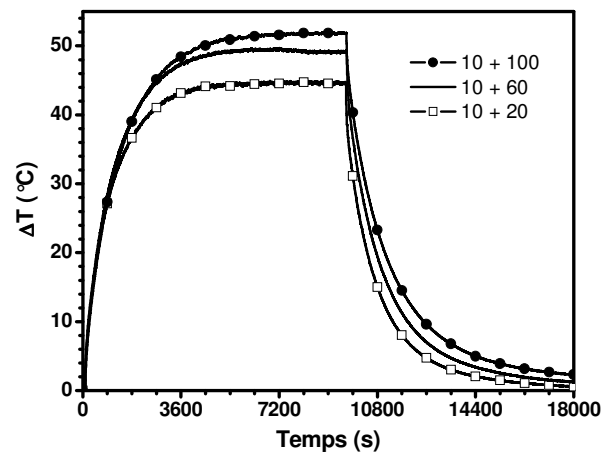


Figure 8 : Résultats expérimentaux pour le cas avec cube en face avant.

4.4. Estimation de paramètres

Pour pouvoir effectuer un contrôle de l'isolation de murs en partie courante, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques thermophysiques de ce mur ainsi que les épaisseurs de chaque couche et ce à partir des mesures de température en face avant. Pour cela, nous proposons de réaliser une identification de paramètres par une minimisation de l'écart quadratique entre les mesures et le modèle 1D en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt [6] disponible sous Matlab. Nous proposons d'effectuer une des deux inspections : la première consiste à supposer que les caractéristiques sont connues (avis technique) et les épaisseurs sont à contrôler et vice versa pour la seconde approche. Nous présentons dans le tableau 2 les résultats de l'estimation de l'épaisseur de l'isolant, de la puissance absorbée et du coefficient d'échange en face avant pour les deux cas d'étude (sans et avec cube) dans le cas où on considère les propriétés thermophysiques connues. L'estimation se fait sur le front montant pendant toute la durée du chauffage.

Nous remarquons que les résultats sont satisfaisants dans le premier cas (sans cube) et moins satisfaisants dans le cas avec cube. Ceci est probablement dû à une augmentation de la température d'air à l'intérieur du cube. Nous envisageons par la suite un contrôle plus précis de cette température en différents points, de manière à ce que son évolution temporelle puisse être prise en compte dans le modèle. Les incertitudes sur P , h_1 et e indiquées dans le tableau 2 sont des incertitudes statistiques calculées à partir des éléments diagonaux de la matrice de variance-covariance, donc des résidus de l'identification. Le calcul de ces incertitudes doit être amélioré afin de prendre en compte les incertitudes sur les paramètres supposés connus du modèle (propriétés thermophysiques des deux couches, R_c , épaisseur du plâtre). Par ailleurs, l'identification a été réalisée dans cet article sur une seule série de mesure.

Paramètre	Puissance absorbée P $W.m^{-2}$	Coefficient d'échange global h_1 $W.m^{-2}.K^{-1}$	Epaisseur d'isolant e m
Cas 1 : Valeur (Incertitude)	520 (2)	10,46 (0,05)	0,099 (0,017)
Cas 2 : Valeur (Incertitude)	216 (2)	10,72 (0,16)	0,100 (0,042)

Tableau 2 : Résultat de l'identification de l'épaisseur d'isolant dans le cas 1 (sans cube) et le cas 2 (avec cube en face avant).

5. Conclusion

Nous avons montré la faisabilité de ce projet, particulièrement en ce qui concerne les durées de chauffage qui sont comprises entre une heure et une heure et demi, ce qui est acceptable pour une opération de diagnostic et contrôle. Des durées de plusieurs heures ne seraient pas acceptées sur le plan industriel. Le protocole expérimental doit être affiné afin de pouvoir augmenter la sensibilité du dispositif, c'est-à-dire sa capacité à distinguer des épaisseurs d'isolants proches en une durée de mesure la plus réduite possible. Par ailleurs, il est nécessaire d'étendre l'étude à un cas réel de mur extérieur isolé par une paroi plâtre – polystyrène, afin de définir notamment le temps d'établissement d'un régime permanent dans la partie isolante et par là même la durée minimale de l'expérience.

Références

- [1] Projet ANR-05-PBAT-010_02, Agence Nationale de la Recherche, *Programme de Recherche Energie dans Bâtiment, Projet PROTOMERES* (2005).
- [2] L. Ibos, M. Larbi Youcef, M. Mazioud, Y. Candau, Non destructive testing of building walls, *Proc. Quantitative InfraRed Thermography Conference - QIRT 2006* (Padova, Italie, 2006).
- [3] D. Manuel, S. Oblin, P. Richard, Thermographie infrarouge appliquée à la détection de défauts d'isolation, *Rapport final CSTB ENEA 98.128R*, Paris (2003).
- [4] ACERMI, *Certificat ACERMI n° 03/081/057*, Paris (2006).
- [5] H. Stehfest, Algorithm 368 : Numerical inversion of Laplace transform, *Communication of the ACM, vol 13, n°1*, (1970).
- [6] D. W. Marquardt, An algorithm for the least squares estimation of non linear parameters, *SIAM Journal, 1, 431-441*, (1963).