

Etude in situ des caractéristiques thermophysiques d'une paroi en pierre naturelle.

Tingting WU, Franck BRACHELET, Didier DEFER, Emmanuel ANTCZAK*

Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France
UArtois, LAMTI
Faculté des Sciences Appliquées, Technoparc Futura
F-62400 Béthune, France

*(auteur correspondant : emmanuel.antczak@univ-artois.fr)

Résumé - Le contexte actuel de démarche écologique dans la construction remet au goût du jour les matériaux d'origine naturelle comme la pierre. Soumis aux conditions micro-climatiques, ceux-ci voient leurs caractéristiques thermophysiques évoluer dans le temps. Il est donc nécessaire de pouvoir disposer d'outils de caractérisation permettant d'observer ces phénomènes. L'instrumentation proposée dans cette étude est constituée de capteurs fluxométriques disposés de part et d'autre d'une paroi de bâtiment, elle est associée à un traitement basé sur les notions de quadripôle thermique et d'impédance thermique dans le domaine fréquentiel.

Nomenclature

a	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$	T	température, K
b	effusivité thermique, $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$	<i>Symboles grecs</i>	
e	épaisseur, m	θ	température, $^{\circ}C$
f	fréquence, Hz	ϕ	flux, $W.m^{-2}$
H	fonction de transfert	ω	pulsation, $rad.s^{-1}$
j	variable complexe	<i>Indices et exposants</i>	
t	temps, s	t	transfert
Z	impédance thermique, $K.m^2.W^{-1}$	i	incrément
		s	stockage

1. Introduction

Les notions de développement durable et d'éco-construction font revenir au goût du jour l'utilisation des matériaux naturels dans les procédés constructifs de bâtiments. L'objectif consiste à réaliser des bâtiments qui permettent de respecter au mieux l'environnement, tant au cours de la réalisation, que pendant la durée de vie et à la fin du cycle de vie, lors de la destruction et de l'élimination des produits de construction. Ce type d'habitat doit prioritairement se baser sur l'utilisation de ressources locales pour réduire les contraintes liées au transport. On utilise ainsi des matériaux naturels aussi bien pour la structure (pierre, bois, brique de terre...) que pour l'isolation thermique ou phonique (chanvre, lin, paille...). Leurs qualités, délaissées avec le temps au profit des matériaux industrialisés aux volumes de production importants, sont à nouveau mises en valeur, notamment après l'application de la Réglementation Thermique 2005 et les conclusions du Grenelle de l'environnement en 2007. On raisonne actuellement, entre autre, sur les confort d'hiver et d'été ce qui met en avant la notion de paroi lourde qui avait été négligée depuis de nombreuses années. On se propose dans cette étude d'analyser le comportement thermique en laboratoire et in situ d'éléments de construction en pierre naturelle. L'analyse est basée sur l'établissement de modèles de comportement qui serviront de base à une identification non paramétrique pour une optimisation. L'approche entrée/sortie réalisée à partir de la théorie du quadripôle thermique a pour but d'exprimer les fonctions de transfert associées au système. L'instrumentation est

basée sur des mesures de flux et de températures sur les faces intérieure et extérieure d'une paroi de bâtiment constituée de pierre naturelle. Les perturbations induites par la métrologie sont analysées et intégrées au modèle. Une analyse détaillée de la sensibilité aux paramètres permet de discuter des possibilités d'identification simultanée, en fonction des gammes de fréquences, des paramètres thermiques. Cette méthode se place dans la problématique générale des méthodes inverses. Le travail se situe dans le domaine fréquentiel, et vise à traiter des sollicitations aléatoires, donc complexes. L'objectif est de suivre l'évolution des caractéristiques thermiques (effusivité et diffusivité thermiques) pendant une année, donc en fonction des différentes saisons, d'une paroi de bâtiment réalisée à partir de pierre naturelle, qui est un matériau poreux influencé par son environnement micro-climatique extérieur.

2. Aspects théoriques

Ce travail est basé sur l'étude des transferts thermiques par conduction dans un solide opaque. Le champ de températures d'un milieu conducteur soumis à une sollicitation thermique quelconque est solution d'une équation aux dérivées partielles [1] appelée équation de la chaleur. La prise en compte des conditions limites et initiales permet sa résolution et conduit à la connaissance en tout point de l'état thermique local défini par la température et la densité de flux. Si on se limite à l'étude de transferts thermiques qui s'effectuent dans une seule direction, les lignes de flux sont supposées rester parallèles à un axe qui définit la direction de propagation. Dans ce type de problème, les surfaces isothermes sont des plans perpendiculaires. Cette remarque permet de simplifier les équations en notant que les opérateurs dépendant des directions y et z sont nuls. Dans la suite de ce travail nous nous limiterons aux transferts unidirectionnels.

2.1. Quadripôle thermique

La représentation matricielle des phénomènes thermocinétiques met en évidence une analogie électricité/thermique [2]. En électricité, l'étude des quadripôles passe par une mise en équation sous une forme matricielle des tensions et des intensités mesurables aux bornes du système. Dans le cas du quadripôle thermique, la température joue le rôle de la tension et le flux celui de l'intensité. Pour schématiser le système thermique, le symbolisme utilisé en électricité est souvent retenu. L'orientation, qui est ici adoptée pour le sens des courants ou des flux, est celle qui est retenue classiquement pour l'écriture de la matrice chaîne. Pour une plaque homogène, la matrice de transfert exprime la dépendance entre le vecteur d'état thermique de la face d'accès arrière d'indice 2 (face dite "de sortie") et le vecteur de la face d'accès avant d'indice 1 (face "d'entrée").

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{où } A = \text{Cosh}\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}}e\right); B = \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \cdot \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}}e\right); C = b\sqrt{j\omega} \cdot \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega}{a}}e\right)$$

a, b et e désignent respectivement la diffusivité, l'effusivité et l'épaisseur du matériau. Dans le cas général, un milieu quelconque, assurant un transfert unidirectionnel de chaleur par conduction, peut toujours être assimilé à une juxtaposition de milieux homogènes [3]. Un milieu multicouche sera traité comme la mise en cascade de milieux homogènes. La matrice de transfert sera obtenue par le produit des matrices définies pour chacun des milieux homogènes constituant la structure.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix} = [M_1][M_n] \begin{bmatrix} \theta_{n+1} \\ \phi_{n+1} \end{bmatrix} = [M_{eq}] \begin{bmatrix} \theta_{n+1} \\ \phi_{n+1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2. Impédance thermique

Les transferts conductifs unidirectionnels dans un milieu homogène peuvent être représentés dans le formalisme du quadripôle thermique par les relations matricielles suivantes (le déterminant vaut 1):

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

On peut substituer aux quatre grandeurs de base de flux et température quatre grandeurs généralisées par les combinaisons linéaires suivantes :

- La somme des températures : $\Sigma\theta(t) = \theta_1(t) + \theta_2(t)$
- La différence des flux : $\Delta\phi(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t)$
- La différence des températures : $\Delta\theta(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t)$
- La somme des flux : $\Sigma\phi(t) = \phi_1(t) + \phi_2(t)$

Les grandeurs généralisées sont liées par :

$$\Sigma\phi(\omega) = \frac{1+A}{B} \cdot \Delta\theta(\omega) \text{ et } \Delta\phi(\omega) = \frac{-1+A}{B} \cdot \Sigma\theta(\omega) \quad (4)$$

Les résultats obtenus s'expriment sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \Sigma\phi \\ \Delta\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_t & 0 \\ 0 & H_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Sigma\theta \end{bmatrix} \text{ où } H_t(\omega) = \frac{1+A}{B} \text{ et } H_s(\omega) = \frac{-1+A}{B} \quad (5)$$

Il apparaît ici qu'un système homogène est entièrement caractérisé par deux fonctions H_t et H_s . Les échanges de chaleur dans le système peuvent être représentés par deux modes découplés. Le mode transfert qui associe les grandeurs $\Sigma\phi$ et $\Delta\theta$ est représentatif du transfert de chaleur à travers le système. Le mode "stockage" qui associe les grandeurs $\Sigma\theta$ et $\Delta\phi$ est représentatif des processus de stockage - déstockage de chaleur sensible par le système [4]. Les deux modes sont indépendants. Ces résultats généraux conduisent à des applications intéressantes dans le domaine temporel. Dans le domaine fréquentiel, les fonctions H_t et H_s sont homogènes à des admittances et nous conduisent à définir les impédances généralisées caractéristiques du fonctionnement thermique du système :

$$Z_t = \frac{1}{H_t} \text{ et } Z_s = \frac{1}{H_s} \quad (6)$$

$$\Sigma\theta(\omega) = Z_s(\omega) \cdot \Delta\phi(\omega) \text{ et } \Delta\theta(\omega) = Z_t(\omega) \cdot \Sigma\phi(\omega) \quad (7)$$

Le développement des expressions des impédances conduit à :

$$Z_s(\omega) = \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \cdot \text{cotanh}\left(\frac{X_e}{2}\right) \text{ et } Z_t(\omega) = \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \cdot \tanh\left(\frac{X_e}{2}\right) \text{ avec } X_e = \sqrt{\frac{j\omega}{a}}e \quad (8)$$

On reconnaît dans ces expressions le terme $1/b\sqrt{j\omega}$ qui est l'impédance caractéristique du milieu de propagation. Le module de la fonction Z_t tend donc vers $R_{th}/2$ où R_{th} représente la résistance thermique de la paroi.

$$si f \rightarrow 0 \text{ alors } th\left(\frac{X_e}{2}\right) \approx \left(\frac{X_e}{2}\right) \text{ et } Z_t \rightarrow \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \cdot \frac{\sqrt{j\omega}}{\sqrt{a}} \cdot \frac{e}{2} = \frac{R_{th}}{2} \quad (9)$$

En régime stationnaire (ou quasi stationnaire), l'impédance Z_t permettra d'identifier la résistance thermique R . Le module de Z_s va évoluer en $1/(\pi C_{th}f)$ où C_{th} est la capacité de la paroi. Cette propriété se retrouve par une étude à la limite de l'expression de Z_s . L'impédance Z_s peut conduire à une caractérisation de la capacité thermique du système.

$$si f \rightarrow 0 \text{ alors } cotanh\left(\frac{X_e}{2}\right) \approx \left(\frac{2}{X_e}\right) \text{ et } Z_s \rightarrow \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \cdot \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{j\omega}} \cdot \frac{2}{e} = \frac{2}{jC\omega} \quad (10)$$

On constate que les expressions des impédances font référence aux notions de transfert et de stockage. Elles permettent principalement d'avoir accès aux grandeurs que sont la diffusivité et l'effusivité thermiques qui permettent de connaître la conductivité thermique par exemple, souvent utilisée en thermique du bâtiment.

3. Etude expérimentale

3.1. Instrumentation

Pour mesurer simultanément flux et température dans un même plan nous avons utilisé des fluxmètres plans à gradients tangentiels. Leur principe de fonctionnement consiste en particulier à établir des écarts de températures aux bornes de jonctions thermoélectriques planes, ceci en provoquant des micro-constrictions de lignes de flux thermique traversant le plan du capteur. Ces capteurs ont fait l'objet de nombreux travaux [5]. Le capteur de flux thermique est réalisé à la demande, de dimensions et de formes sur mesure. Il produit une tension positive ou négative dépendant de l'orientation du flux thermique pour une mesure correspondant à un bilan thermique. Le signal est généré par le flux, ce capteur ne nécessite pas d'alimentation électrique. Son épaisseur est de l'ordre de 300 μm pour des dimensions de 5x5mm² à 250x250mm². Les sensibilités couramment rencontrées sont de l'ordre de 3 mV/(W/cm²) pour un capteur de 1 cm². La faible inertie du capteur autorise des temps de réponse de l'ordre de 150 ms. L'intégration d'un thermocouple plaqué de type T peut être réalisée. L'avantage essentiel de ce type de capteur basé sur la technologie des circuits imprimés est d'avoir une épaisseur très faible ($\approx 0.3\text{mm}$), ce qui permet de minimiser la perturbation induite par sa présence sur le système à étudier. Les capteurs utilisés ici ont une surface sensible de 200 mm x 200 mm, leur sensibilité est de l'ordre de 75 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$. Ils sont placés de part et d'autre de la paroi comme cela est représenté sur les figures 1, 2 et 3. Ils sont reliés à une centrale d'acquisition autonome, les données sont sauvegardées avec un pas d'acquisition de 120 s et stockées sur une carte mémoire. La récupération des données est effectuée toutes les 7 à 8 semaines. On dispose ainsi des flux et températures de la surface intérieure et des flux et températures de la surface extérieure.

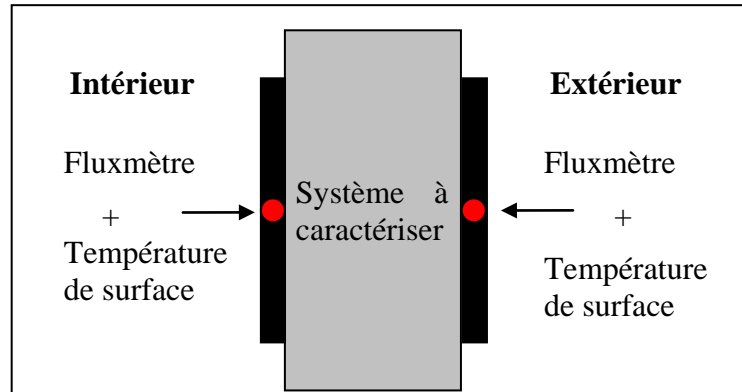


Figure 1. Principe d'instrumentation de la paroi en entrée/sortie

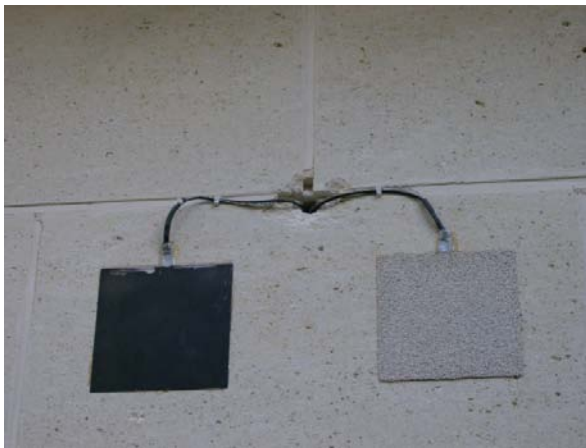


Figure 2 : Positionnement des fluxmètres à l'extérieur de la paroi

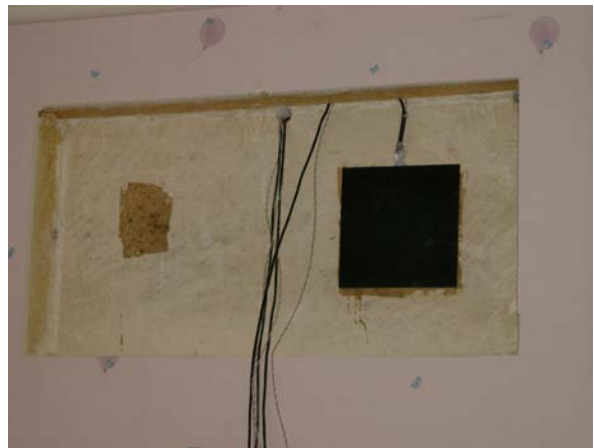


Figure 3 : Positionnement des fluxmètres à l'intérieur de la paroi

Pour le placement des capteurs à l'intérieur du bâtiment, une ouverture a été créée dans le complexe isolant (plâtre et laine de verre), celui-ci est remplacé au même endroit pour assurer l'unidirectionnalité et l'uniformité des lignes de flux. Cette disposition permet de caractériser uniquement l'élément en pierre et d'étudier l'évolution de ses propriétés thermiques liée aux transferts couplés de masse et de chaleur, variables en fonction des saisons.

3.2. Résultats et interprétation

La courbe suivante montre l'évolution de la conductivité thermique équivalente calculée à partir des mesures et des modèles élaborés précédemment. Les fonctions de transferts sont calculées à partir des données expérimentales relevées (flux et températures). Les paramètres thermophysiques des expressions théoriques des fonctions de transferts sont obtenus de façon itérative (méthode du simplex) pour caler le modèle théorique sur les points expérimentaux. A partir de la connaissance de la diffusivité et de l'effusivité thermiques, nous avons accès à l'ensemble des paramètres thermophysiques : conductivité thermique et chaleur volumique. On observe sur la courbe suivante (figure 4), l'évolution de la conductivité thermique équivalente de l'élément de paroi en pierre, dont les dimensions sont équivalentes à un bloc de béton manufacturé ($0.2 \times 0.25 \times 0.5 \text{ m}^3$). Le calcul a été réalisé par semaine de mesure (correspondant à un point), on obtient donc en globalité une évolution annuelle de cette conductivité qui donne une idée de l'influence que peut avoir l'hygrométrie extérieure sur un milieu poreux. La configuration particulière de l'exposition de la façade implique que le

matériau n'est jamais réellement à l'état sec, pour lequel des mesures classiques en laboratoire sur échantillons ont donné une conductivité équivalente de $0.7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

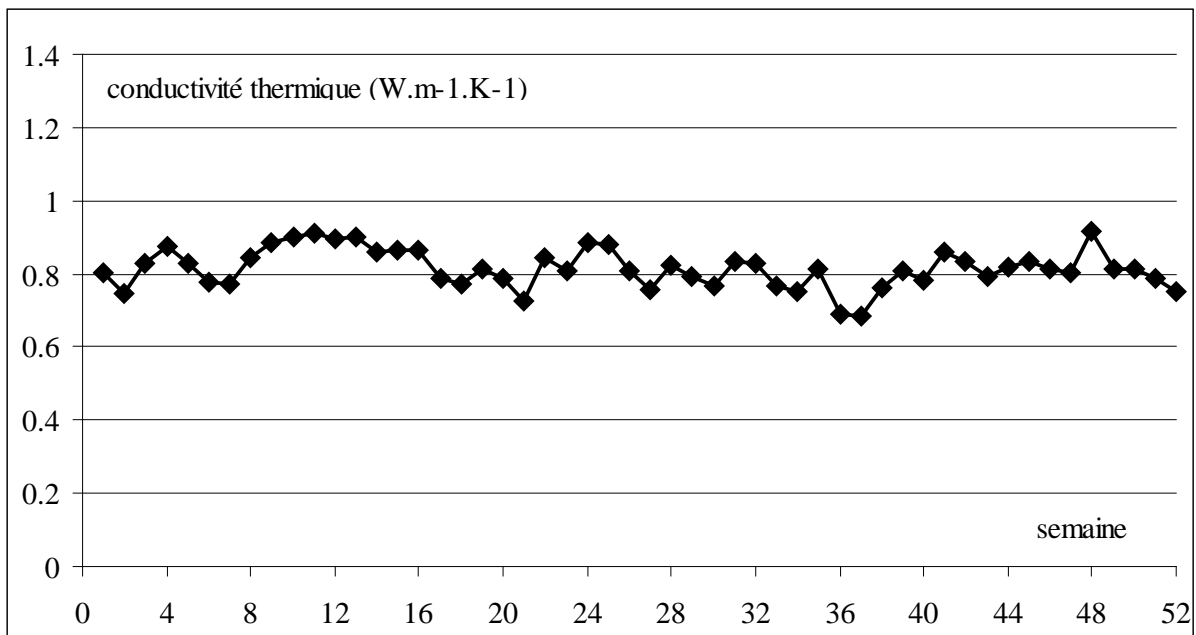


Figure 4 : Evolution de la conductivité thermique équivalente sur un an

4. Conclusion

L'objectif était de proposer une méthode de caractérisation thermique in situ d'une paroi de bâtiment. L'instrumentation proposée, basée sur l'utilisation des fluxmètres thermiques, est fiable et adaptée aux conditions micro-climatiques extérieures, le couplage avec une centrale d'acquisition permet d'avoir une instrumentation autonome à demeure sur le site de mesure. Les différents traitements proposés sont adaptés aux transferts conductifs mais nécessitent un minimum d'investissement dans le domaine du traitement du signal. La spécificité des matériaux naturels rend un peu plus complexe une étude liée aux variations des grandeurs thermiques, néanmoins, dans une approche entrée/sortie les résultats sont logiques et mettent en évidence un comportement évolutif lié à la porosité du matériau constitutif de la paroi et à l'hygrométrie variable de l'environnement.

Références

- [1] Carslaw H.S., J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Second edition, Oxford University Press, 1959.
- [2] Degiovanni A., Conduction dans un "mur" multicouche avec sources : extension de la notion de quadripôle, *Int. J. Heat and Mass transfer*, vol. 31, n°3, p. 553-557, 1988.
- [3] Degiovanni A., Systèmes multicouches : problèmes liés à l'homogénéisation des caractéristiques thermiques, *Revue Générale de Thermique*, n°339, p. 117-128, 1990.
- [4] Defer D., Bellatar S, Duthoit B., Non destructive in situ inspection of a wall by thermal impedance, *Materials and Structure*, n°26, p.3-7, 1993.
- [5] Defer D., Shen J., Lassue S., Duthoit B., Non destructive testing of a building wall by studying natural thermals signals, *Energy and Building*, vol. 34, p 63-69, 2002.