

Notion d'impédance appliquée à l'étude du comportement thermique d'une pierre calcaire de construction à partir de mesures en laboratoire et in situ

Tingting Wu¹, Emmanuel Antczak^{*2}, Franck Brachelet², Didier Defer²

¹ TREFLE, IUT Bordeaux 1, 15 rue Naudet, 33175 Gradignan cedex, France

² LGCgE, Univ Lille Nord de France, U-Artois, Faculté des Sciences Appliquées, Technoparc Futura, 62400 Béthune, France

*emmanuel.antczak@univ-artois.fr

RESUME. Les évolutions récentes de la réglementation thermique et les conclusions apportées au Grenelle de l'environnement ont conduit une partie des constructeurs de bâtiments à s'inspirer de l'habitat traditionnel ancien. L'impact écologique des matériaux, tant à la fabrication, qu'à l'utilisation et à la destruction est devenu prépondérant. La conception doit aussi être réétudiée pour favoriser l'inertie. Cette démarche revalorise l'utilisation des écomatériaux, majoritairement présents dans l'habitat ancien. L'important est de pouvoir évaluer leur sensibilité à l'humidité dans une optique de durabilité. Dans ce cadre nous proposons d'étudier l'évolution des caractéristiques thermiques d'une pierre calcaire dans différentes conditions (laboratoire, in situ...) et à différentes échelles (échantillon, paroi...). Ce type de pierre est traditionnellement utilisé dans la construction individuelle ou le logement collectif.

MOTS-CLÉS : Impédance thermique, fluxmètres, mesures in situ.

ABSTRACT. The recent evolutions of the French thermal regulation and the conclusions brought in the Grenelle environment forum encourage a part of the builders to be inspired by the traditional housing environment. The ecological impact of materials, for manufacturing, use and destruction, is more and more taken into account. The conception must be also reanalyzed to facilitate the thermal inertia. This approach revalues the use of ecomaterials, mainly present in the ancient housing environment. It's important to be able to estimate their sensibility at the humidity in an optics of durability. In this executive, we suggest studying the thermal characteristics of a limestone in various conditions (laboratory, in situ) and in various scales (sample, wall). This stony type is traditionally used in the individual or the collective housing.

KEYWORDS : Thermal impedance, fluxmeters, in situ measurement.

1. INTRODUCTION

La politique mondiale de réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre fait revenir au goût du jour l'utilisation des matériaux naturels dans les procédés constructifs de bâtiments. Ceux-ci sont d'autant mieux valorisés lorsque l'impact énergétique de leur transformation et de leur transport jusqu'au lieu de mise en œuvre est faible. 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 crue...) que pour l'isolation thermique ou phonique (chanvre, lin, paille...). Leurs qualités, délaissées avec le temps au profit des matériaux industrialisés et produits

en grande quantité, sont à nouveau mises en valeur, notamment après la sortie du Grenelle de l'environnement en 2007. Le cas étudié ici concerne la pierre calcaire issue et utilisée dans le bassin Parisien. 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 calcaire. Les perturbations induites par la météorologie sont analysées et intégrées au modèle. Une analyse détaillée de la sensibilité aux paramètres permet de discuter des possibilités d'identification simultanées, 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 pendant une année, donc en fonction des différentes saisons, d'une paroi de bâtiment réalisée en pierre calcaire naturelle, qui est un matériau poreux influencé par son environnement micro-climatique extérieur.

2. ASPECTS THEORIQUES

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 (Carslaw et al., 1959) 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. QUADRIPOLE THERMIQUE

La représentation matricielle des phénomènes thermocinétiques met en évidence une analogie électricité/thermique (Degiovanni, 1988). 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 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"). a , b et e désignent respectivement la diffusivité, l'effusivité et l'épaisseur du matériau.

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

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

2.2. IMPEDANCE THERMIQUE

A partir de la représentation matricielle précédente, on peut substituer aux quatre grandeurs de base de flux et température en entrée et en sortie, quatre grandeurs généralisées définies par les combinaisons linéaires suivantes : somme des températures ($\Sigma\theta$), différence des flux ($\Delta\phi$), différence des températures ($\Delta\theta$) et somme des flux ($\Sigma\phi$). Elles sont liées par :

$$\Sigma\phi(\omega) = \frac{1+A}{B} \cdot \Delta\theta(\omega) \quad \text{et} \quad \Delta\phi(\omega) = \frac{-1+A}{B} \cdot \Sigma\theta(\omega) \quad (2)$$

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

$$\begin{bmatrix} \Sigma\phi \\ \Delta\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_t & 0 \\ 0 & H_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Sigma\theta \end{bmatrix} \quad \text{où} \quad H_t(\omega) = \frac{1+A}{B} \quad \text{et} \quad H_s(\omega) = \frac{-1+A}{B} \quad (3)$$

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 (Degiovanni, 1990). Les deux modes sont indépendants. 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 :

$$Z_t = \frac{1}{H_t} \quad \text{et} \quad Z_s = \frac{1}{H_s} \quad (4)$$

Le développement des expressions des impédances conduit à :

$$Z_s(\omega) = \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \cdot \text{cotanh}\left(\frac{X_e}{2}\right) \quad \text{et} \quad Z_t(\omega) = \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \cdot \text{tanh}\left(\frac{X_e}{2}\right) \quad \text{avec} \quad X_e = \sqrt{\frac{j\omega}{a}} \quad (5)$$

On reconnaît dans ces expressions le terme $1/b\sqrt{j\omega}$ qui est l'impédance caractéristique du milieu de propagation. 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.

3. ETUDE EXPERIMENTALE

Le travail se programme suivant trois approches, en fonction des conditions limites thermiques imposées (déterministes, aléatoires) et de l'environnement d'étude (laboratoire, in situ). On cherche d'abord à étudier les caractéristiques thermiques du matériau en laboratoire, à partir d'échantillons, par des méthodes classiques inspirées de la norme NF EN 12664. Ensuite, toujours en laboratoire, on évalue le comportement du matériau mis en œuvre, sur une surface représentative réduite de 1m² environ, dans des conditions contrôlées de flux et de température sous sollicitations déterministes. Enfin, la dernière étape consiste à étudier le matériau dans des conditions aléatoires, c'est-à-dire dans une structure de paroi de bâtiment soumise à son environnement microclimatique. Ces trois échelles d'observations du matériau permettent de connaître son comportement thermique, dans des conditions réelles d'utilisation. Ceci est d'autant plus important pour les matériaux naturels puisqu'ils sont généralement sensibles aux variations hygrométriques saisonnières.

3.1. INSTRUMENTATION

Pour mesurer simultanément flux et température dans un même plan nous avons utilisé des fluxmètres plans à gradients tangentiels (Hérin et al., 1993). 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 (Defer et al., 2002)(Chauchois et al., 2011). Le capteur de flux thermique 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 énergétique, ce capteur ne nécessite pas d'alimentation électrique. Son épaisseur est de l'ordre de 300 μm pour des dimensions de 5x5mm à 250x250mm. 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 permet la mesure de températures. L'avantage essentiel de ce type de capteur basé sur la technologie des circuits imprimés est d'avoir une épaisseur très faible, 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 150 mm x 150 mm, leur sensibilité est de l'ordre de 75 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$

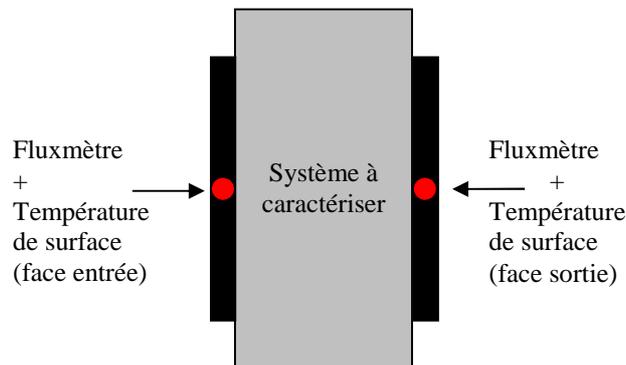


Figure 1. Principe d'instrumentation du système en entrée/sortie

Les capteurs de flux et de température sont positionnés en entrée et en sortie du système. La fixation se fait par résine époxy pour réduire les résistances de contact et s'affranchir des risques de décollement du support.

3.2. ETUDE EN LABORATOIRE D'UNE PAROI ET DE SES ELEMENTS CONSTITUTIFS

Le matériau étudié est une pierre calcaire naturelle utilisée pour la construction de bâtiments et de maisons individuelles (calcaire du bassin Parisien). Le but est de réaliser un protocole de mesures à partir d'un banc de caractérisation thermique défini suivant les préconisations de la norme NF EN 12664 sur la performance des matériaux et produits pour le bâtiment. Les sollicitations thermiques sont imposées aux plus grandes faces de l'échantillon de matériau (20x20x8 cm^3) par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur circulant dans des plaques échangeuses en aluminium, en entrée et en sortie, représentent un écart de température de l'ordre de 5°C. La circulation du fluide est assurée par des bains thermostatés régulés au 1/10^{ème} de degré. Cette norme est plutôt destinée à la certification des matériaux isolants du bâtiment, elle est néanmoins applicable aux matériaux de conductivité thermique inférieure à 2 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. La pierre étudiée ici a une masse volumique sèche apparente de 1723 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, et une porosité d'environ 35 %. Le fascicule matériaux de la réglementation thermique mentionne des valeurs de conductivité thermique variant de 0,85 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à 1.1 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour cette gamme de

masse volumique de matériau sec. Les valeurs sont relativement élevées et c'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'adapter la méthode de caractérisation, notamment en ce qui concerne l'évaluation des résistances de contact qui ont un impact important étant donné le caractère conducteur du matériau étudié. Celles-ci peuvent avoir des valeurs atteignant 20 % de la résistance de l'échantillon, pour des conductivités élevées (matériau humide), ce qui induit autant d'imprécisions de mesure. A partir de la formulation de l'impédance d'entrée d'un système, l'écriture d'une expression théorique d'impédance suppose que soient connues les conditions limites du système par une relation liant ses grandeurs de sortie. Nous introduisons l'expression en étudiant le cas de la paroi homogène. Le passage au cas général d'une paroi multicouche permet d'aborder un système correspondant à notre configuration expérimentale. La porosité du matériau étant élevée, et sachant qu'il sera mis en œuvre sans complément d'hydrofugation, nous avons étudié l'évolution de la conductivité thermique et de la chaleur volumique (tableau 1) en fonction de la teneur en eau massique apparente w (%). La conductivité thermique λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) est obtenue à partir d'un régime permanent de transfert, des températures différentes sont imposées aux plaques échangeuses. La chaleur volumique ρc ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$) est déduite d'un régime de stockage entre deux états d'équilibre différents. A partir de ces deux grandeurs, on obtient l'effusivité thermique b ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1/2}$) et la diffusivité thermique a ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), caractéristiques du régime transitoire. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous en fonction de la masse volumique ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Les valeurs obtenues, basées sur le principe d'une mesure faisant l'objet d'une norme, serviront de valeurs de référence à l'étude du matériau in situ. Elles résultent de la moyenne effectuée sur 3 essais, l'écart minimum observé est de 3.87 % et l'écart maximum observé est de 7.18% sur les paramètres thermiques.

$w(\%)$	0	1.44	2.90	5.75	6.42	10.93	14.05
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	1723	1750	1770	1820	1830	1910	1970
$\lambda(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	0.79	0.86	0.9	1	1.03	1.24	1.44
$\rho c(\text{W}/\text{m}^3\cdot\text{K})$	$1.36\cdot 10^6$	$1.49\cdot 10^6$	$1.59\cdot 10^6$	$1.79\cdot 10^6$	$1.81\cdot 10^6$	$2.11\cdot 10^6$	$2.27\cdot 10^6$
$a(\text{m}^2/\text{s})$	$5.78\cdot 10^{-7}$	$5.8\cdot 10^{-7}$	$5.34\cdot 10^{-7}$	$5.52\cdot 10^{-7}$	$5.84\cdot 10^{-7}$	$5.86\cdot 10^{-7}$	$6.33\cdot 10^{-7}$
$b(\text{J}/\text{K}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{1/2})$	1034	1135	1161	1344	1352	1615	1806

Tableau 1 : Caractéristiques thermophysiques de la pierre calcaire

Le matériau est ensuite mis en œuvre sous la forme d'une paroi de bâtiment de 1 m^2 environ. Cette configuration permet d'étudier le matériau dans sa forme manufacturée. Les blocs sont parallélépipédiques, de dimensions $50 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$. Les capteurs sont positionnés en partie courante du dispositif constructif et les sollicitations imposées se présentent cette fois-ci sous forme d'échelons ou sinusoïdes. La modification du signal d'entrée permet d'étendre l'étude au déphasage des sollicitations créées par la présence du matériau. C'est une approche récente qui intéresse notamment les notions de confort d'été dans les bâtiments ainsi que la fréquence et l'amplitude des cycles de chauffage en hiver. Le traitement des signaux se fait par une approche de type statistique. On sait que la fonction d'intercorrélation traduit la similitude d'un signal temporel par rapport à un autre signal décalé dans le temps. Les signaux étudiés ici sont les flux entrant et sortant, le décalage obtenu s'apparente à la notion de déphasage en thermique du bâtiment. Les résultats obtenus correspondent à

la réponse impulsionnelle du système, le déphasage correspond au décalage temporel de l'amplitude de corrélation maximale. La valeur obtenue ici est de 7h22mn. Les grandeurs mesurées montrent une forte variabilité liée à la teneur en eau. L'approche en laboratoire permet d'anticiper le comportement du matériau in situ. La procédure de caractérisation consiste à se servir des valeurs de référence établies dans le cadre imposé des conditions de laboratoire pour interpréter l'évolution des grandeurs thermiques in situ.

3.3. ETUDE D'UNE PAROI DE BATIMENT IN SITU

Le bâtiment étudié est une maison individuelle. Le principe de positionnement des capteurs est le même que celui présenté au paragraphe 3.1, c'est-à-dire en vis-à-vis, côtés intérieur et extérieur. La mesure est donc réalisée en entrée et en sortie, les capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition autonome, les données sont sauvegardées avec un pas d'acquisition de 120 s. Le laboratoire a une longue expérience de ce type de procédure (Wu et al., 2010). On dispose ainsi des flux et températures de la surface intérieure et de la surface extérieure (Figures 2, 3 et 4) sur une année complète pour pouvoir observer l'évolution des grandeurs thermiques en fonction des conditions climatiques extérieures. 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.



Figure 2 : Positionnement des capteurs sur la paroi in situ

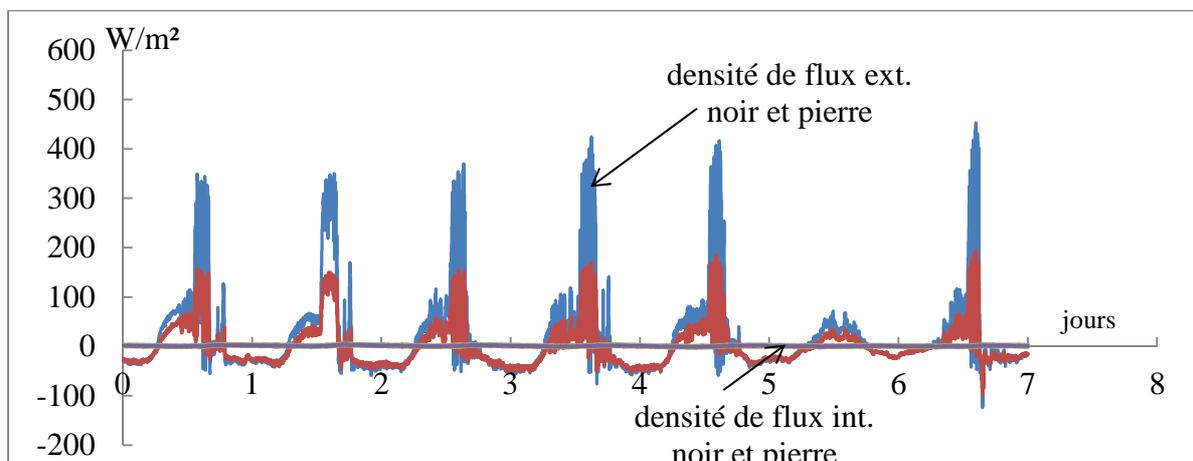


Figure 3 : Exemple de flux relevés en surface

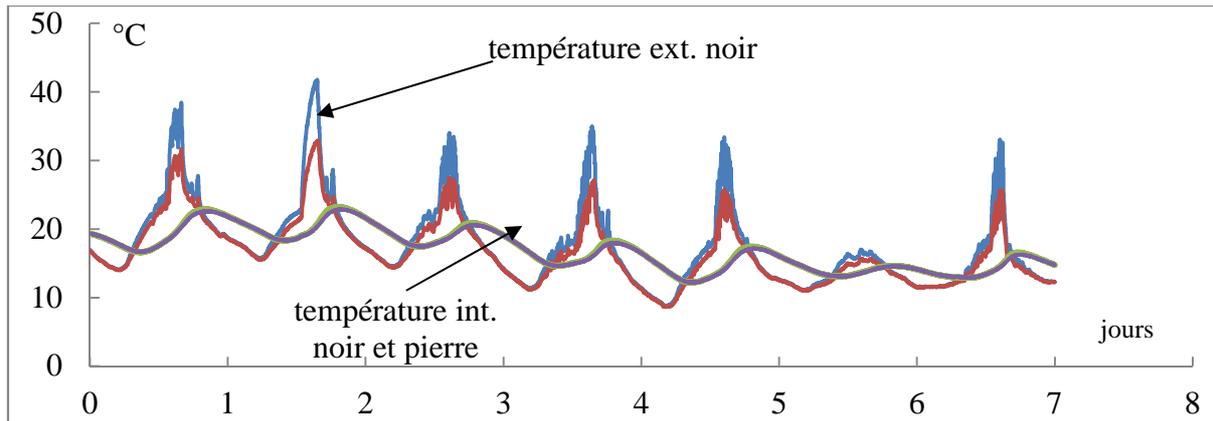


Figure 4 : Exemple de températures relevées en surface

Les données relevées sont traitées suivant la procédure expliquée au paragraphe 2.2. Les fonctions de transferts sont calculées à partir des données expérimentales en flux et en températures relevées, l'exemple de la fonction H_1 est donné Figure 5. La Figure 6 montre l'évolution de la conductivité thermique équivalente calculée à partir des mesures et des modèles élaborés précédemment..

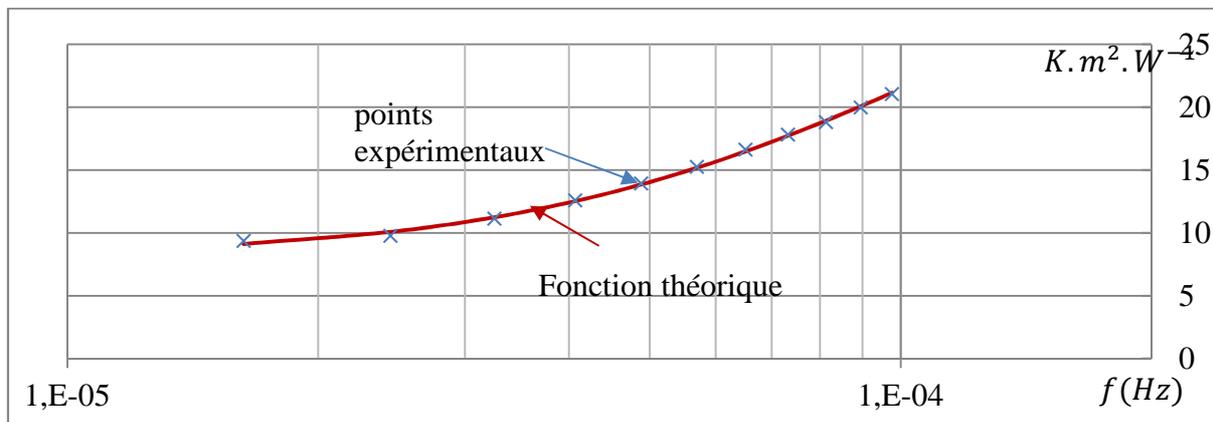


Figure 5 : Fonction H_1 calculée et optimisée

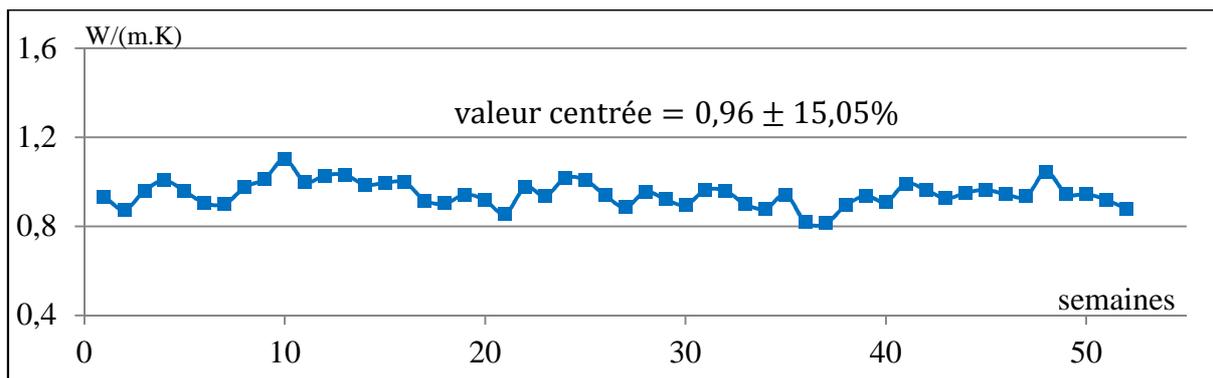


Figure 6 : Evolution de la conductivité thermique de la pierre *in situ* en fonction du temps

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. Le calcul a été réalisé par semaine de mesure (correspondant à un point), on obtient donc en globalité une évolution annuelle des grandeurs. A partir de la connaissance de la diffusivité et de l'effusivité thermiques, nous avons accès à l'ensemble des paramètres thermophysiques : conductivité thermique, chaleur volumique... La valeur moyenne obtenue pour la conductivité est de

0.96 W.m⁻¹.K⁻¹ dans une plage de variations de +/- 15.05 %. La chaleur volumique est plus sensible à la présence d'eau (capacité thermique élevée), elle est en moyenne de 1.46.10⁶ J.m⁻³.K⁻¹ avec +/- 38% de variation environ. Ces mesures font apparaître une forte variabilité des caractéristiques thermiques de la pierre dans le temps. Les mesures en laboratoire montrent une variation de +/- 23 % environ. Ces variations sont liées à l'évolution de la teneur en eau du matériau sur l'année. L'amplitude des variations est plus importante sur la chaleur volumique par rapport aux mesures de laboratoire. La paroi n'a pas subi de traitement d'hydrofugation, elle est donc sensible aux conditions microclimatiques extérieures. Située dans un environnement fortement végétalisé donc humide, la façade est masquée par une haie naturelle qui limite les apports solaires, le matériau n'est donc jamais réellement à l'état sec ce qui explique sa conductivité élevée.

4. CONCLUSION

L'objectif est de proposer une méthode de caractérisation thermique in situ d'une paroi de bâtiment en complément de mesures de laboratoire de référence. L'instrumentation mise en place, basée sur l'utilisation des fluxmètres thermiques, s'est avérée fiable et adaptée aux conditions microclimatiques extérieures. 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 soumis à l'environnement climatique. Les variations constatées ici pour la conductivité thermique sont de l'ordre de 40% par rapport à l'état sec. L'étude préalable en laboratoire montre qu'elles sont liées à la teneur en eau du matériau. L'approche à différentes échelles permet de cerner le comportement thermique d'un matériau afin d'en optimiser son utilisation dans le cadre d'un procédé constructif.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Carslaw H.S., J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Second edition, Oxford University Press, 1959.
- 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.
- Degiovanni A., « Systèmes multicouches : problèmes liés à l'homogénéisation des caractéristiques thermiques », *Revue Générale de Thermique*, n°339, p. 117-128, 1990.
- 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.
- Hérin P., Théry P., « Measurements on the thermoelectric properties of thin layers of two metals in electrical contact. Application for designing new heat flow sensors » *Meas. Sci. Technol.*, p158 - 163 1993.
- T. Wu, E.Antczak, D.Defer, T.Chartier, Thermal Characteristics in situ monitoring of detached house wall constituted by raw clay, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 14, n° 5, pp. 653-667, 2010.
- A.Chauchois, E.Antczak, D.Defer, O.Carpentier, Formalism of thermal waves applied to the characterization of materials thermal effusivity, *Rev. Sci. Instrum.*, 82, issue 7, 9 pages, 2011.