
Détermination de la diffusivité thermique et de l'épaisseur du béton d'enrobage par thermographie infrarouge

Brachelet Franck¹, DU Tao¹, Defer Didier¹, Antczak Emmanuel *¹

¹ Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement - LGCgE
Univ Lille Nord de France

U-Artois, FSA, Technoparc Futura, 62400 Béthune, France.

* emmanuel.antczak@univ-artois.fr

RÉSUMÉ. Ce travail présente une méthode inverse pour déterminer la diffusivité thermique et l'épaisseur du béton d'enrobage de deux poutres expérimentales, l'une en béton et l'autre en mortier. L'armature métallique centrale est sollicitée à l'aide d'un chauffage par induction et l'évolution des températures de surface est mesurée à l'aide d'une caméra infrarouge. Une modélisation numérique mettant en œuvre un schéma ADI permet de résoudre l'équation de transfert thermique. Il est intégré à une procédure d'identification qui conduit à la détermination des paramètres d'épaisseur et de diffusivité thermique. Une étude de sensibilité montre que ces paramètres peuvent être déterminés simultanément durant la phase de chauffage de la barre.

ABSTRACT. This paper presents an inverse method to determine thermal diffusivity and thickness of concrete cover of two experimental beams, one is made with concrete and the other with mortar. Central rebar is heated by an electromagnetic inductor and surface temperatures evolutions are recorded with an infrared. An ADI numerical modeling is implemented in order to solve the heat transfer equation. It is integrated with an identification process which leads to the determination of the parameters of thickness and thermal diffusivity. A sensitivity study shows that these parameters can be determined simultaneously during the heating phase of the bar.

MOTS-CLÉS : thermographie infrarouge, méthode inverse, diffusivité thermique, Contrôle Non Destructif, béton d'enrobage.

KEYWORDS: infrared thermography, inverse method, thermal diffusivity, Non Destructive Testing, concrete cover.

1. Introduction

La thermographie infrarouge est une méthode de contrôle non destructif (CND) qui est appliquée au génie civil depuis plusieurs décennies. Son emploi premier a été la mise en évidence des contrastes des températures de surface des parois de bâtiments liés à la présence de ponts thermiques. La thermographie infrarouge en tant que méthode de CND appliquée à la détection du tracé des armatures a été présentée par De Halleux et Maldague en 1999 (De Halleux *et al.*, 2000). Des travaux complémentaires ont été exposés (Wiggenhauser, 2002) sur l'application de la thermographie infrarouge au génie civil. L'expérience développée par notre laboratoire (Ostrowski, 2005) a montré la difficulté de connecter directement les armatures à un générateur électrique. L'ensemble de ces travaux concerne la détection de défauts de manière qualitative par chauffage interne des armatures à partir du passage d'un courant électrique. Dans une approche quantitative, la détermination de la profondeur des défauts est un des objectifs de nombreuses méthodes de CND. En thermographie infrarouge, les méthodes dites actives comme la thermographie pulsée (Maierhofer *et al.*, 2006), modulée (Breitenstein *et al.*, 2003) ou à phase pulsée (Maldague *et al.*, 2002) sont toutes orientées vers ce type de détermination quantitative. L'approche envisagée dans ce travail est relativement différente : un inducteur électromagnétique placé à la surface extérieure du corps d'épreuve provoque une élévation de température de l'armature métallique positionnée dans le volume de ce dernier. La mesure par thermographie s'effectue en surface après diffusion de la chaleur à travers la couche de béton d'enrobage séparant l'armature de la surface extérieure (Brachelet *et al.*, 2009). Au regard de la littérature traitant des méthodes de CND par thermographie infrarouge active (Maldague, 2001), force est de constater qu'elles sont établies pour des transferts thermiques unidirectionnels alors qu'ici le problème est bidimensionnel. Ces méthodes sont difficilement applicables dans le cas de cette poutre dont les dimensions sont réduites. L'analyse des données mesurées est basée sur une procédure inverse destinée à déterminer l'épaisseur du béton d'enrobage ainsi que sa diffusivité thermique. Dans un premier temps, le corps d'épreuve est réalisé en mortier, milieu considéré homogène, sur lequel la procédure expérimentale et le traitement sont testés. La méthode est ensuite appliquée à une poutre en béton armé.

2. Procédure expérimentale

2.1. Dispositifs de sollicitation et de mesure

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 1. La poutre testée est positionnée sur les bras du circuit magnétique de l'inducteur. La caméra infrarouge est placée en face de la poutre à une distance de 2 mètres. Le modèle employé est une CEDIP Silver 420, muni d'un détecteur InSb matriciel de 320x256 éléments sensibles dans la gamme des ondes moyennes [3-5 μ m]. L'enregistrement des

thermogrammes se déroule durant les phases de sollicitation et de relaxation de la poutre à la cadence de 0.2Hz.

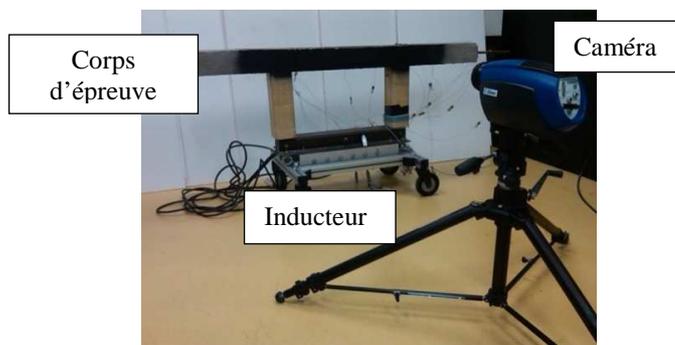


Figure 1. *Dispositif expérimental*

La procédure expérimentale consiste à commander l'inducteur électromagnétique par un signal de type créneau d'une durée de 300 secondes. L'induction de courant provoque une génération de chaleur dans la barre. La température de la barre s'élève et entraîne un phénomène de transfert de chaleur par conduction dans l'élément en béton.

Le principal avantage du chauffage par induction est d'être une méthode sans contact. Les parties métalliques à chauffer n'ont pas besoin d'être directement connectées à un générateur électrique. L'inducteur en forme U est constitué d'un circuit résonant LC accordé à une fréquence de 50 Hz. Les bobines de l'inducteur génèrent un champ magnétique qui tend à se refermer par l'armature métallique de la poutre.

2.2. Corps d'épreuves

Des poutres de géométrie prismatiques ont été confectionnées, leurs dimensions sont de $0.1 \times 0.1 \times 1.5 \text{ m}^3$, elles sont présentées Figure 2. Ces poutres comportent une armature métallique de 12mm de diamètre, coaxiale à leur axe longitudinal. Leur formulation classique est à base de ciment CEM I. L'une des poutres est réalisée en mortier et l'autre en béton. Le mortier a été utilisé pour la première étude de faisabilité sur la détermination de la diffusivité thermique et de l'épaisseur d'enrobage car il présente à l'échelle de ce montage expérimental un milieu plus homogène que le béton. Ce dernier est l'objet de la seconde partie du travail.

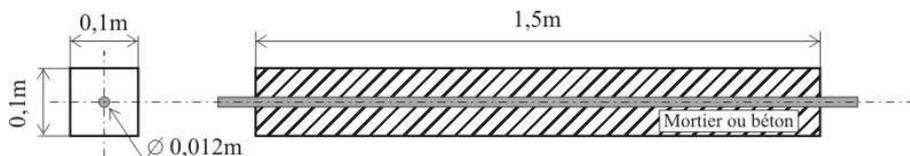


Figure 2. *Corps d'épreuve*

3. Traitement des données

3.1. Modélisation numérique

Les évolutions de la température en chaque point peuvent être obtenues en résolvant l'équation fondamentale des transferts thermiques (Özişik, 1993) :

$$\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} + \frac{1}{k} g(x, y, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} \quad [1]$$

Où T représente la température en chaque point et à chaque instant. λ est la conductivité thermique en $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$. $g(x, y, t)$ est la densité volumique de flux générée par unité de volume en $[\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]$ en fonction du temps. α est la diffusivité thermique exprimée en $[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$. Elle est définie comme étant le quotient de la conductivité thermique par la chaleur volumique (ρC_p).

Afin de résoudre l'équation (1), une modélisation de la poutre est effectuée à l'aide de la méthode ADI (Alternate Difference Implicit). Cette méthode a été choisie pour sa stabilité et sa faible ressource en coût de calcul (Mitchell *et al.*, 1980). Au regard des symétries existant dans la section de la poutre, seulement un quart de la poutre a été modélisé. Un schéma du maillage de la section de la poutre est présenté figure 3. Le modèle comporte 50x50 éléments carrés. Les échanges entre le milieu solide (la poutre) et le fluide environnant (l'air) sont représentés par un coefficient d'échange global (h_g). Les conditions limites imposées aux axes de symétrie du modèle (frontière intérieure) sont de type adiabatique. L'objectif de la modélisation est de simuler la température de surface T_{sim} , qui se situe au droit de la barre sur l'axe (OX).

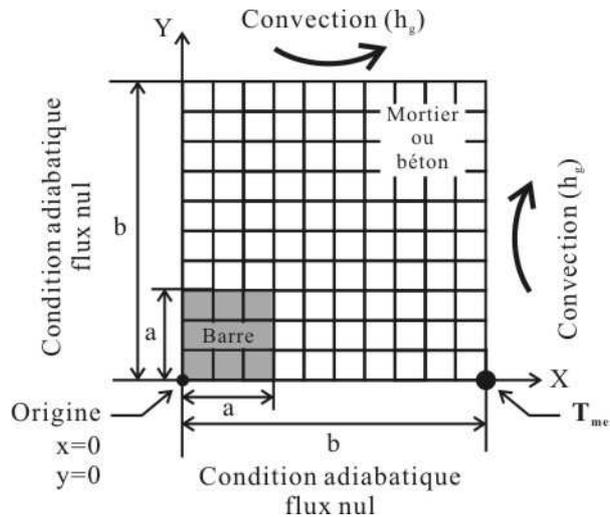


Figure 3. Maillage et conditions limites imposés à un quart de la poutre

Les propriétés thermophysiques attribuées aux différents domaines du modèle sont les suivantes, les valeurs sont précisées dans le tableau 1 :

- Pour $x \leq a$ et $y \leq a$, $\lambda = \lambda_{\text{acier}}$ et $\alpha = \alpha_{\text{acier}}$
- Pour $a < x < b$ et $a < y < b$, $\lambda = \lambda_{\text{mortier ou béton}}$ et $\alpha = \alpha_{\text{mortier ou béton}}$

La température initiale est définie comme étant la température ambiante T_0 , soit, $T(x, y, 0) = T_0$, à $t = 0s$.

| | Density [kg.m ⁻³] | λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | $\rho.C_p$ [J. K ⁻¹ . m ⁻³] | α [m ² .s ⁻¹] |
|----------|----------------------------------|--|---|--|
| Béton | 2300 | 1.67 | 800 | 6.4x10 ⁻⁷ |
| Armature | 7900 | 54 | 440 | 1.0x10 ⁻⁵ |

Tableau 1. Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés pour la simulation numérique.

La sollicitation thermique est considérée comme étant un signal de forme carré d'amplitude unité. La valeur de la puissance induite est difficilement calculable car elle dépend de nombreux facteurs tels que la distance de la barre par rapport à l'inducteur ou la masse de métal présente dans l'entrefer. La linéarité de ce système thermique permet de s'affranchir de cette difficulté en considérant l'évolution des températures normalisées.

3.2. Procédure inverse

La première étape de la procédure d'inversion consiste à calculer les températures de surfaces. L'évolution de cette température ($T_{\text{simulée}}$) est comparée à l'évolution normalisée de la température obtenue expérimentalement à l'aide de la caméra infrarouge. La fonction d'erreur f est exprimée comme étant la valeur quadratique moyenne de la différence entre les températures $T_{\text{simulée}}$ et $T_{\text{mesurée}}$. La procédure d'optimisation se résume à identifier un ensemble de paramètres qui minimisent cette fonction d'erreurs (3).

$$f(p_1, p_2, \dots) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{\text{mesurée}}^i - T_{\text{simulée}}^i)^2} \rightarrow \text{Min} \quad [2]$$

La température normalisée étant une fonction non linéaire des paramètres inconnus, l'algorithme choisi pour minimiser cette fonction est celui du simplex (Nelder, 1965). Cette méthode de minimisation effectue une recherche directe du minimum sans avoir recours au calcul de gradient numérique. Les temps de calcul sont réduits par rapport aux autres méthodes. La méthode Nelder-Mead est une

méthode de minimisation non linéaire sans contraintes. Elle est répétée jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt lié à la précision soit satisfait.

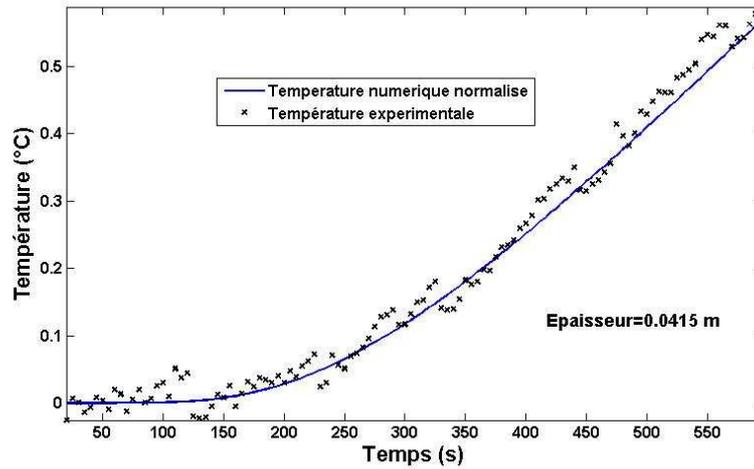


Figure 4. Evolutions des températures normalisée et expérimentale

La figure 4 montre un exemple d'évolution des températures normalisées. La température mesurée à la surface de la poutre (points T_{mes}) avec la caméra infrarouge est superposée à la température simulée à la surface de la poutre au droit de l'armature métallique (T_{sim}). Un bon accord entre ces deux courbes est observable. Pour diminuer l'amplitude du bruit de mesure, la température utilisée est la valeur moyenne spatiale sur les points (pixels) autour du point le plus chaud. La moyenne T_{moy} a été effectuée sur 5 pixels (températures T_i).

3.2. Etude des fonctions de sensibilités

L'étude des fonctions de sensibilité permet de définir l'influence de chaque paramètres du système et d'optimiser le choix de l'intervalle de temps sur lequel le processus d'identification doit être mené. Les fonctions de sensibilité de la température $X_{pi}(t)$ aux différents paramètres est exprimée par la fonction suivante :

$$X_{p_i}(t) = \frac{\partial T(p_1, p_2, \dots, p_n, t) / T(p_1, p_2, \dots, p_n, t)}{\partial p_i / p_i} \quad [3]$$

Avec $p_i = h_g, \lambda_{mortier \text{ ou } béton}, \lambda_{acier}, \alpha_{mortier \text{ ou } béton}, \alpha_{acier}$, et l'épaisseur du béton de recouvrement « e ».

La figure 3 montre l'évolution des fonctions de sensibilités durant les mille premières secondes de l'expérimentation. Leur étude comparative et une étude de corrélations des paramètres montrent qu'il est possible d'identifier simultanément la diffusivité thermique et l'épaisseur du béton de recouvrement durant la phase de sollicitation. L'intervalle de temps choisi est de [100-600s].

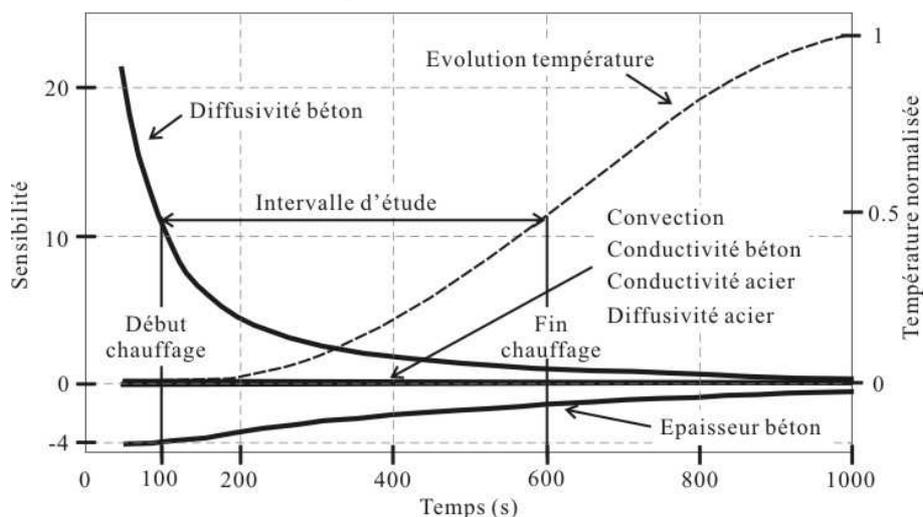


Figure 3. Fonctions de sensibilité aux différents paramètres dans le cas du béton

4. Résultats et Discussion

4.1. Détermination de l'épaisseur d'enrobage dans le cas du mortier

Le premier cas de figure concerne la poutre en mortier qui fait office d'étude de faisabilité. Le mortier est plus homogène que le béton à l'échelle des points de mesure représentés par la surface élémentaire vue par la caméra infrarouge. La démarche expérimentale appliquée et les résultats obtenus par la procédure inverse de traitement des données décrite précédemment conduisent aux résultats donnés dans le tableau 2. Cette même procédure a été répétée 10 fois sur des points adjacents à l'axe longitudinal de la barre.

| | Epaisseur (m) | Diffusivité ($10^{-7}m^2/s$) |
|--------------------------|---------------|--------------------------------|
| Moyenne | 0.0413 | 7.083 |
| Maximum | 0.0422 | 7.35 |
| Minimum | 0.0380 | 6.87 |
| Ecart-type | 0.00104 | 0.1158 |
| Coefficient de variation | 2.52% | 1.63% |
| Valeur de référence | 0.044 | 7.3 |

Tableau 2. Epaisseur et diffusivité thermique pour la poutre en mortier

La valeur moyenne estimée de la diffusivité thermique du béton est de $7.083.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et l'épaisseur de l'enrobage est estimée à 41,3mm. L'écart type est de 0.00104 m sur l'épaisseur ce qui représente un coefficient de variation de 2.52 %. Pour la diffusivité, l'écart type est de $0.1158 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ce qui représente un coefficient de variation de 1.63 %. Les résultats moyens obtenus s'écartent respectivement des valeurs de référence de 6.1 % pour la position et de 3 % pour la diffusivité thermique. Cette dernière est comparée à la valeur obtenue sur des échantillons de mortier confectionnés lors du coulage de la poutre. Les valeurs de référence de la conductivité thermique et de la chaleur volumique ont été mesurées en laboratoire sur un banc de caractérisation thermique en suivant une procédure normalisée (NF EN 12664, 2001). Ces résultats conduisent à la valeur de la diffusivité thermique qui servira de référence $\alpha = 7.30 \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. Concernant le positionnement, la valeur théorique est estimée comme étant la différence entre la demi-épaisseur de la poutre ($b = 50 \text{ mm}$) et le rayon de la barre ($a = 6 \text{ mm}$). Cette première étude donne de bons résultats et permet de valider la méthode de caractérisation.

4.2. Détermination de l'épaisseur d'enrobage dans le cas du béton

Dans cette étude le mortier est remplacé par du béton, ce qui rapproche réellement d'une structure béton armé. Les procédures expérimentales et théoriques restent similaires, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 3.

| | Epaisseur (m) | Diffusivité ($10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) |
|--------------------------|---------------|--|
| Moyenne | 0.0412 | 6.74 |
| Maximum | 0.0433 | 7.21 |
| Minimum | 0.0385 | 6.16 |
| Ecart-type | 0.0015 | 0.35 |
| Coefficient de variation | 3.64 % | 5.19 % |
| Valeur de référence | 0.044 | 6.46 |

Tableau 3. Epaisseur et diffusivité thermique pour la poutre en béton

Comme précédemment, la procédure a été réalisée sur 10 points adjacents au droit de l'armature, la valeur moyenne estimée de la diffusivité thermique du béton est de $6.74.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et l'épaisseur de l'enrobage est estimée à 41,2 mm. L'écart type est de 0.0015 m sur l'épaisseur ce qui représente un coefficient de variation de 3.64 %. Pour la diffusivité, l'écart type est de $0.35 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ce qui représente un coefficient de variation de 5.19 %. Les résultats moyens obtenus s'écartent respectivement des valeurs de référence de 6.3 % pour la position et de 4.3 % pour la diffusivité thermique.

Bien que les poutres aient été coulées avec beaucoup de précautions, il est difficile de garantir un positionnement identique sur toute la longueur de l'armature. Pour vérifier la présence éventuelle d'une erreur de positionnement, la poutre saine a

été tronçonnée. Un décalage d'environ 1 mm vers le bas a été mesuré dans la section coupée ($e = 0.043$ mm par rapport à la surface d'étude). De plus, l'armature présente des nervures pour favoriser son adhérence avec le béton, ce qui introduit une erreur supplémentaire sur sa position. La valeur $e = 0.044$ m peut servir de référence mais il faut garder à l'esprit qu'elle comporte des incertitudes.

D'après l'étude de la sensibilité de la température normalisée aux différents paramètres, la diffusivité du béton joue un rôle également important. La précision des résultats obtenus par la procédure d'inversion dépend de cette valeur. Lors de la fabrication des poutres en béton, une partie du béton a été réservée pour confectionner des échantillons cylindriques 16 cm x 32 cm. Une mesure de la diffusivité du béton a été effectuée sur des tranches circulaires de ces échantillons à l'aide des bancs de caractérisation disponibles au laboratoire. Même si le béton utilisé pour les échantillons et la poutre est issu de la même gâchée, les conditions différentes de mise en œuvre, de maturation et de vieillissement conduisent à des variations des valeurs de la diffusivité thermique. De plus, les méthodes de caractérisation sont liées à des surfaces d'observation différentes, quelques dm^2 pour les échantillons de référence et quelques cm^2 pour la procédure d'inversion sur la poutre. Afin de disposer d'une valeur plus représentative, un échantillon a été directement prélevé sur la poutre et la diffusivité obtenue est de $6,46 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Cette valeur sert d'élément de comparaison pour les résultats issus de la procédure d'inversion.

5. Conclusion

La démarche adoptée dans ce travail est de type non-destructive. Une méthode de mesure par thermographie infrarouge associée à un chauffage par induction a permis d'étudier un élément en béton armé. Une procédure d'inversion a été mise en œuvre afin de déterminer l'épaisseur du béton d'enrobage et sa diffusivité thermique. Cette méthode est basée sur une modélisation par différences finies du quart de la section de la poutre. La comparaison entre les valeurs expérimentales des températures, obtenues par thermographie infrarouge, et celles issues de la simulation montre des résultats qui sont en accord avec des valeurs mesurées à l'aide de techniques éprouvées. Cette première approche expérimentale doit pouvoir être appliquée à d'autres types d'éléments du génie civil (voiles, planchers...). La diffusivité thermique est une grandeur qui dépend de la conductivité thermique et de la chaleur volumique, elles mêmes sensibles à la teneur en eau et à l'état de dégradation du matériau (porosité, fissuration, décollement...). On pourrait donc envisager de corrélérer cette grandeur à d'éventuelles pathologies du béton.

6. Bibliographie

Brachelet F., Du T., Defer D., Antczak E., « Detection of poor filling in prestressed beam specimen by inductive thermography and transfer function analysis », 7th International

XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering (NDTCE'09), Nantes, 30 Juin - 3 Juillet 2009, France

Breitenstein O., Langenkamp M., *Lock-in Thermography Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials*, Springer, 2003.

De Halleux B., Dubois P.M., Maldague X., Michaux D., « Auscultation des ouvrages d'art pour établir le tracé des armatures de précontrainte par voie thermographique », *Actes des Journées Francophones Auscultation et Instrumentation des Ouvrages de Génie Civil*, Béthune, 23 Novembre 2000.

Maierhofer Ch., Arndt R., Röllig M., Rieck C., Walther A., Scheel H., Hillemeier B., "Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures," *Cement & Concrete Composites* 28 (2006) 393-401

Maldague X., *Theory and Practice of Infrared Technology for Non Destructive Testing*, New-York, John-Wiley & Sons, 2001.

Maldague X., Galmiche F., Ziadi A., « Advances in pulsed phase thermography », *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, Juin. 2002, p. 175-181.

Mitchell A., Griffith D. F., *The finite difference method in partial differential equations*, p 59-10, New-York, John Wiley & Sons 1980.

Nelder J., Mead R., « A simplex method for function minimization », *Computer Journal*, vol. 7, n° 4, p.308-313.,1965.

NF EN 12664, Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique, Norme, 2001.

Ostrowski Ch., Auscultation des ouvrages en béton par thermographie infrarouge active et passive, Thèse de doctorat, Université d'Artois, 2005.

Necati Özişik M., *Heat conduction*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New-York, 1993.

Wiggenhauser H., « Active IR-applications in civil engineering », *Infrared Physics & Technology*, Vol. 43, 2002, p. 233-238.