

Evaluation de méthodes de détection de défauts, par thermographie infrarouge active, dans des échantillons d'enrobés bitumineux.

Jean DUMOULIN^{1*}, Vincent FEUILLET², Mario MARCHETTI³, Thomas SAUVAGNAT¹, Laurent IBOS², Atef MAZIOUD²

¹Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes, Division Métrologie et Instrumentation
Route de bouaye, BP 4129, 44341 Bouguenais Cedex (jean.dumoulin@lpc.fr)

²Centre d'Etudes et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes, Université Paris 12
61, avenue du Général De Gaulle, 94010 Créteil Cedex

³Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy, CETE de l'Est
71, rue de la grande haie, 54510 Tomblaine

Résumé - Cet article présente une étude de la détection de défauts, par thermographie infrarouge active sur des matériaux très hétérogènes tels que les enrobés bitumineux employés dans la construction des chaussées. Elle s'appuie sur des expérimentations en laboratoire et des simulations numériques. Les résultats de détection obtenus par décomposition en valeurs singulières sont présentés et discutés. La détermination de la profondeur des défauts s'appuie sur une méthode inverse associée à une modélisation par quadripôle thermique multicouche 1D.

1. Introduction

Dans le cadre de la politique de diagnostic de l'état structurel et de préservation du patrimoine routier français, il s'avère nécessaire de développer des méthodes permettant un contrôle non destructif des revêtements de chaussées. Ces méthodes visent à détecter différents défauts, émergents ou pas, caractéristiques d'une dégradation des structures de chaussées. Parmi ces défauts, les décollements entre la couche de roulement et la couche de liaison de la structure de chaussée peuvent conduire à une dégradation rapide de l'état de surface pouvant engendrer la réfection totale de la couche de roulement. Leur détection précoce est donc un enjeu d'importance.

Dans le domaine du contrôle non destructif, la détection de défauts par thermographie infrarouge active a été étudiée et utilisée depuis de nombreuses années [1] sur de nombreux matériaux (métaux, composites, *etc.*) dans le domaine de la construction mécanique. A notre connaissance, dans le domaine du Génie Civil, le nombre d'études publiées à ce jour est plus limité. Parmi celles-ci on notera les travaux conduits sur les parements en béton de ciment des ouvrages d'art [2] et sur l'isolation des parois de bâtiment [3]. L'étude de méthodes de détection de défauts, par thermographie infrarouge active, dans le cas de matériaux de porosité variable et très hétérogènes, tels les enrobés bitumineux employés dans la construction des chaussées, reste un champ d'investigation ouvert.

Dans ce contexte, une première étude de faisabilité de la détection de défauts artificiels insérés sur des échantillons parallélépipédiques en béton bitumineux avait été conduite [4]. Elle s'appuyait principalement sur des essais réalisés en laboratoire par thermographie pulsée, avec une caméra refroidie (CEDIP™ Jade 3) et une caméra non refroidie (FLIR™ S65). La détection des défauts était obtenue par calcul des contrastes thermiques. Une première méthode inverse pour estimer la profondeur du défaut, éprouvée dans le cas de matériaux en béton de ciment, avait été évaluée et conduit à des résultats encourageants, mais encore insatisfaisants. Dans cet article nous présentons les résultats obtenus pour la caractérisation

des défauts en utilisant une modélisation par la méthode des quadripôles thermiques 1D multicouches. En matière de détection nous proposons également une comparaison entre l'approche par calcul du contraste thermique et par calcul de la décomposition en valeurs singulières des cartes de températures. L'ensemble des méthodes fait l'objet de tests à la fois sur des données expérimentales et simulées sous FLUENT™ avec des conditions aux limites proches des conditions d'essais en laboratoire. Les données d'essais analysées et présentées dans cet article ont été obtenues en utilisant la caméra infrarouge non refroidie FLIR™ S65.

2. Expérimentations en laboratoire et simulations numériques

2.1. Banc d'essai en laboratoire

Le dispositif expérimental consiste en un banc optique sur lequel sont positionnés la caméra infrarouge, deux spots halogènes de 500 W (pilotés en tension) et un échantillon de béton bitumineux (épaisseur 10 cm x largeur 18 cm x longueur 50 cm) inséré dans un cadre en béton cellulaire. Un caisson équipé d'un revêtement réfléchissant est utilisé pour homogénéiser la distribution spatiale de la densité de flux d'excitation thermique en surface de l'échantillon étudié. Les sollicitations thermiques appliquées lors des essais étaient des créneaux. La figure 1 présente une vue schématique du dispositif expérimental en laboratoire.

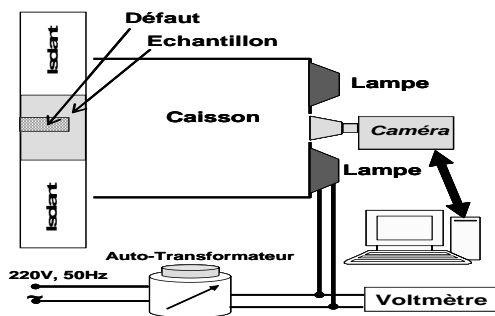


Figure 1 : Schéma du banc d'essais en laboratoire

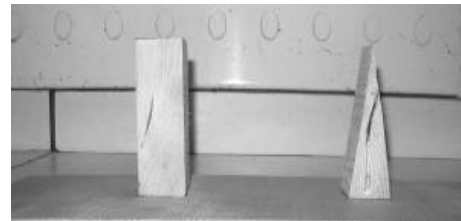


Figure 2 : Vue des deux défauts en bois insérés en face arrière de l'échantillon

La figure 2 présente une vue des deux défauts en bois de pin de géométries différentes et non émergents en surface de l'échantillon en béton bitumineux. La partie supérieure de ces deux défauts est située à $-1,3\text{ cm}$ depuis la surface observée. Les deux défauts ont une hauteur de $8,7\text{ cm}$ et une base carrée en face arrière de section $4 \times 4\text{ cm}^2$. Le défaut pyramidal permet de simuler grossièrement la géométrie d'une fissure non émergente. Deux durées de créneaux de 60 s et 300 s , inférieures au temps de diffusion théorique au sein de l'échantillon pour une profondeur de $-1,3\text{ cm}$, ont été utilisées lors de cette étude. La densité de flux moyenne appliquée était de 3000 W.m^{-2} . L'émissivité d'un enrobé bitumineux de ce type en bande III est de $0,98$.

2.2. Simulation numérique sous Fluent

En parallèle, des simulations numériques sous FLUENT™ en 3D par volumes finis ont été réalisées. L'échantillon étudié numériquement a été soumis aux mêmes sollicitations thermiques que celles générées en laboratoire. La phase de relaxation thermique au cours du temps a également été suivie numériquement. Pour les créneaux de 60 s et 300 s , la densité de flux appliquée était de 2620 W.m^{-2} . La géométrie de l'échantillon de béton bitumineux munis des deux défauts est équivalente à celle utilisée pour les essais en laboratoire. Pour les simulations, un maillage 3D non structuré basé sur des cellules en forme de tétraèdres a été réalisé sous GAMBIT™. Le nombre de cellules est égal à 1892429 . Les propriétés

thermophysiques du béton bitumineux et du bois de pin utilisées lors des calculs sont reportées dans le Tableau 1.

Matériau	$\lambda (W.m^{-1}.K^{-1})$	$\rho (kg.m^{-3})$	$C_p (J.kg^{-1}.K^{-1})$
Béton Bitumineux	1.41	2262	1255
Bois (Pin)	0.15	600	1900

Tableau 1 : Propriétés Thermophysiques des matériaux utilisées lors des simulations

La température initiale pour tout le volume de l'échantillon est choisie égale à 293 K et un coefficient d'échange global $h = 10 W.m^{-2}.K^{-1}$ constant au cours du temps a été considéré pour modéliser les échanges sur les faces avant et arrière. Les faces latérales de l'échantillon sont supposées parfaitement isolées.

3. Localisation des défauts par décomposition en valeurs singulières

Pour détecter les défauts sur les images infrarouges, différents outils d'analyse peuvent être mis en œuvre [1]. Ils font appel à des techniques de rehaussement de contraste (accroissement de la signature des défauts), de décomposition des séquences d'images infrarouges sur des bases (compression des informations) et de segmentation d'images (localisation des défauts sur les images infrarouges).

Sans connaissance a priori sur la localisation des défauts, l'approche la plus simple consiste à calculer les cartes d'échauffement au cours du temps depuis l'état initial à froid (avant sollicitation thermique). L'inconvénient de cette approche pour la détection est qu'elle conduit à autant de cartes que d'images infrarouges prises en compte pour le calcul. La localisation du défaut requiert alors d'analyser l'ensemble de la séquence obtenue.

Pour réduire le nombre d'images infrarouges à analyser dans une séquence, il existe différentes alternatives [1] (analyse fréquentielle, interpolation par un polynôme, ...). Parmi celles-ci, la décomposition en valeurs singulières permet d'extraire de manière compacte des informations sur les variations spatiales et temporelles d'une séquence d'images infrarouges [5]. La décomposition en valeurs singulières d'une matrice \mathbf{A} de taille $M \times N$ (avec $M > N$) prend pour expression (équation 1) :

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T \quad (1)$$

Avec : \mathbf{U} matrice orthogonale de taille $M \times N$, Σ matrice diagonale de taille $N \times N$ (valeurs singulières de \mathbf{A} sur la diagonale) et \mathbf{V}^T transposée d'une matrice orthogonale de taille $N \times N$.

Pour pouvoir mettre en œuvre cette décomposition sur une séquence d'images infrarouges (matrices 3D), il faut au préalable réorganiser cette séquence sous forme d'une matrice 2D \mathbf{A} de taille $M \times N$. Pour se faire, chaque image infrarouge à un instant t devient une colonne de la matrice \mathbf{A} . Dès lors, l'information spatiale est obtenue en parcourant la matrice \mathbf{A} suivant ses lignes et l'information temporelle en la parcourant suivant ses colonnes. Après calcul, les colonnes de \mathbf{U} représentent les modes statistiques orthogonaux (fonctions empiriques orthogonales) qui permettent de décrire les variations spatiales des données. Les lignes de \mathbf{V}^T représentent les composantes principales qui décrivent les variations temporelles. La première fonction empirique orthogonale représente les variations spatiales les plus caractéristiques des données et ainsi de suite par ordre décroissant. Dans le cadre de notre étude, l'analyse des cinq premières fonctions empiriques orthogonales suffisaient à localiser le défaut parallélépipédique.

La figure 5 présente les résultats obtenus en utilisant l'approche par décomposition en valeurs singulières de séquences d'images infrarouges simulées et expérimentales pour une durée du créneau d'excitation de 300 s.



Figure 5 : Premières fonctions empiriques orthogonales : simulations à gauche –essais à droite

La signature du défaut parallélépipédique est nette sur les données simulées et plus diffuse sur les données expérimentales. Cette dégradation de la signature peut être attribuée aux performances de la caméra utilisée, à la présence de convection naturelle et au comportement thermique des granulats. Le même constat a pu être fait sur différentes simulations et expérimentations. Pour le défaut pyramidal seules les données simulées permettent d'isoler ce défaut sur de telles cartes. L'avantage de cette approche est qu'elle permet de concentrer l'information sur quelques cartes. Toutefois, son coût en calcul et en espace mémoire requis, lors du post traitement, peut s'avérer un facteur limitant à son utilisation.

4. Méthode inverse d'estimation de la profondeur d'un défaut

4.1. Modélisation directe du transfert 1D par la méthode des quadripôles thermiques

Le problème de modélisation 1D transitoire dans l'empilement étudié (Figure 6) est résolu à l'aide des quadripôles thermiques [6].

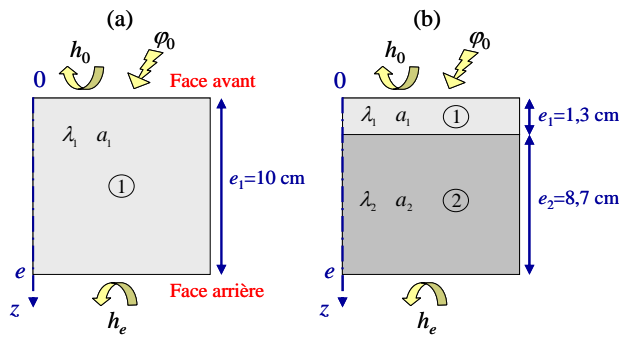


Figure 6 : Empilement 1D modélisé par la méthode des quadripôles thermiques
(a) zone saine, (b) zone défectueuse

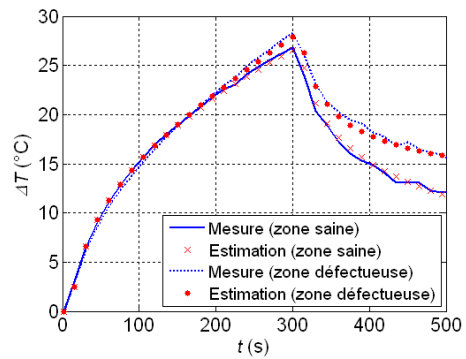


Figure 7 : Echauffements mesurés et estimés sur une zone saine et sur une zone défectueuse

Cette technique semi-analytique consiste à appliquer la transformation de Laplace à la température T et à la densité de flux de chaleur φ (solicitation thermique). Pour le cas de la zone saine, la transformation du problème de conduction thermique conduit à une relation matricielle reliant les transformées de la température et du flux en face avant et en face arrière de l'empilement ($z = 0$ et $z = e$) :

$$\begin{bmatrix} \tilde{T}(0, p) \\ \tilde{\varphi}(0, p) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_1(p) & B_1(p) \\ C_1(p) & D_1(p) \end{bmatrix}}_{M_1(p)} \begin{bmatrix} \tilde{T}(e, p) \\ \tilde{\varphi}(e, p) \end{bmatrix} \quad (2)$$

avec
$$A_1(p) = D_1(p) = \text{ch}(\alpha_1 e_1), B_1(p) = \frac{\text{sh}(\alpha_1 e_1)}{\lambda_1 \alpha_1}, C_1(p) = \lambda_1 \alpha_1 \text{sh}(\alpha_1 e_1), \alpha_1 = \sqrt{\frac{p}{a_1}} \quad (3)$$

M_1 est la matrice de transfert associée à la couche, e_1 est l'épaisseur suivant z de la couche, λ_1 et a_1 sont respectivement la conductivité et la diffusivité thermiques de la couche.

Pour le cas de la zone défectueuse, le produit des matrices M_i pour $i=1$ et 2 permet d'écrire la matrice de transfert M relative à l'empilement bicouche telle que :

$$\begin{bmatrix} \tilde{T}(0, p) \\ \tilde{\varphi}(0, p) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_1(p) & B_1(p) \\ C_1(p) & D_1(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2(p) & B_2(p) \\ C_2(p) & D_2(p) \end{bmatrix}}_{M(p)} \begin{bmatrix} \tilde{T}(e, p) \\ \tilde{\varphi}(e, p) \end{bmatrix} \quad (4)$$

La connaissance de deux conditions limites en température et en flux en faces avant et arrière (respectivement $z = 0$ et $z = e$) de l'empilement permet d'accéder aux deux conditions limites inconnues à l'aide de (2) ou (4). Le retour dans l'espace réel des températures est obtenu en utilisant l'algorithme de Stehfest-Gaver [7].

La prise en compte de coefficients d'échange thermique en faces avant et arrière (respectivement h_0 et h_e) s'effectue à l'aide de la matrice de transfert suivante :

$$H_{0/e} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{0/e} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Enfin, le partage de la densité de flux dissipée φ_{diss} en face avant de l'empilement (une part est évacuée par l'air ambiant, une autre à travers l'empilement) nécessite l'écriture d'un bilan d'énergie modifiant la matrice de transfert M de l'empilement.

4.2. Méthodologie inverse

La procédure d'identification vise à déterminer l'ensemble des paramètres inconnus du modèle en minimisant le critère suivant:

$$S = \sum_{j=1}^J \left[T_{mes}^j - T_{est}^j(\beta) \right]^2 \quad (6)$$

T_{mes} sont les températures mesurées, T_{est} les températures estimées calculées à l'aide du modèle quadripôles à partir du vecteur β regroupant les paramètres à estimer et J le nombre de données expérimentales. La minimisation de S menant à l'identification des paramètres est effectuée avec l'algorithme de Levenberg-Marquard [8].

L'estimation de la profondeur d'un défaut est réalisée en trois temps. Au préalable, la technique de localisation des défauts (cf. §3) est utilisée pour identifier une zone saine de l'enrobé bitumineux (sans défaut) et une zone défectueuse. La deuxième étape consiste alors à appliquer l'algorithme d'inversion sur la zone saine afin d'estimer la puissance dissipée φ_{diss} lors du créneau ainsi que les coefficients d'échange h_0 et h_e supposés égaux, les propriétés thermophysiques de l'enrobé bitumineux étant connues. Ces valeurs estimées sont ensuite utilisées en paramètres d'entrée pour l'identification de la profondeur du défaut sur les données de la zone avec défaut (troisième étape).

4.3. Résultats d'estimation

Nous présentons ci-après les résultats obtenus avec ce modèle dans le cas de mesures réalisées sur le défaut parallélépipédique en bois localisé à 1,3 cm de profondeur dans

l'échantillon d'enrobé bitumineux. L'échantillon est soumis à un créneau d'excitation d'une durée de 300 s. Les graphes des températures estimées et mesurées sur les deux zones sont présentés sur la Figure 7. L'étape 1 d'estimation de la densité de flux mène à une estimation de la densité de flux $\varphi_{diss}=3108 \text{ W.m}^{-2}$ et des coefficients d'échange h_0 et $h_e=15,0 \text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$. L'étape suivante de l'identification nous conduit à une profondeur de défaut de 1,5 cm. L'ordre de grandeur de la profondeur estimée est correct mais reste supérieur à la profondeur réelle du défaut. Une explication à cet écart sur la profondeur peut être imputée au modèle de transfert 1D utilisé. Pour de telles durées, il ne permet pas de décrire correctement le phénomène de diffusion thermique se développant à l'interface entre le défaut et le matériau sain (apparition de phénomènes 2D/3D). Par ailleurs, un échauffement plus faible permettrait de minimiser la variation du coefficient d'échange en face avant au cours du temps (coefficient considéré constant dans le modèle). Cependant, ceci aurait pour effet de diminuer les écarts de température entre la zone saine et la zone défectueuse et donc la sensibilité de l'algorithme d'inversion à la profondeur du défaut.

5. Conclusion

La détection de défaut par thermographie infrarouge active sur des matériaux non homogènes de type enrobés bitumineux utilisés pour les couches de roulement de chaussées a été mise en œuvre lors d'essais en laboratoire. L'utilisation de simulations numériques sous FLUENT™ a permis d'identifier l'influence des conditions expérimentales et du caractère non homogène de ce type de matériau sur les étapes de détection et de caractérisation des défauts. Deux perspectives de recherche peuvent être identifiées. L'une porte sur l'implémentation de la méthode inverse développée au niveau de chaque pixel des thermogrammes pour essayer d'atténuer les effets de non homogénéité du matériau sur le calcul. L'autre perspective est de mettre en œuvre une modélisation par quadripôles thermiques en 2D avec des couches hétérogènes au sein de l'empilement.

Références

- [1] Maldague, X.P.V., "Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing", *John Wiley & sons Inc* (2001).
- [2] 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", *Journal of Cement & Concrete Composite* (2006), vol 28, pp 393-401.
- [3] Larbi Youcef, M., Mazioud, A., Ibos, L., Candau, Y., Brémond, P., Piro, M., Filloux, A. "A non destructive method for diagnostic of insulated building walls using infrared thermography", Proc. of Thermosense XXIX, 9-13 Avril 2007, Orlando, USA.
- [4] Marchetti, M., Ludwig, S., Dumoulin, J., Ibos, L., Mazioud, A., "Active Infrared Thermography for Non-Destructive Control for Detection of Defects in Asphalt Pavements", *Proc. of QIRT 2008 (Quantitative Infrared Thermography)*, 2-5 Juillet 2008, Cracovie, Pologne.
- [5] N. Rajic, Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures, *Composite Structures*, vol 58, pp 521–528, 2002.
- [6] D. Maillet, S. André, J.C. Batsale, A. Degiovanni, C. Moyne, *Thermal Quadrupoles*, Wiley ed., Chichester (2000)
- [7] H. Stehfest, "Remarks on algorithm 368, Numerical inversion of Laplace transforms", *Comm. A.C.M.* (1970), n°13, 624.
- [8] Marquardt D.; "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", *SIAM Journal Applied Math.* (1963), Vol. 11, pp. 431-441.