

# Thermographie infrarouge synchronisée avec la mesure de paramètres météorologiques : Application à l'auscultation du tablier d'un pont ouvert au trafic

Antoine CRINIÈRE<sup>1\*</sup>, Jean DUMOULIN<sup>1</sup>, Laetitia PEREZ<sup>2</sup> et Frédéric BOURQUIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LUNAM Université, IFSTTAR, Cosys, Route de bouaye, CS4, F-44340, Bouguenais, France

<sup>2</sup>LUNAM Université, LTN, UMR-CNRS 6607, rue Christian Pauc, 44306 Nantes, France

<sup>3</sup>Université Paris-Est, IFSTTAR, Cosys, 14 - 20 Bd Newton, Champs-Sur-Marne, F-77447, Marne-la-Vallée, France

\* (auteur correspondant : [antoine.crinie@ifsttar.fr](mailto:antoine.crinie@ifsttar.fr))

**Résumé** - Cet article présente un monitoring thermique conduit pendant plusieurs jours sur le tablier du pont de « Musmeci » à Potenza (Italie). L'analyse des données est conduite en exploitant la mesure de paramètres météorologiques synchronisée avec l'acquisition d'images thermiques. Une analyse par FFT, permet de détecter sur les séquences de cartes d'amplitude et de phase la structure interne du tablier. Un modèle thermique exprimé dans le domaine fréquentiel a été développé et couplé à une procédure d'estimation de paramètres. Une cartographie de la distribution spatiale de la conductivité thermique apparente est ainsi calculée puis comparée avec l'analyse d'images par approche fréquentielle.

## Nomenclature

### *Symboles :*

$T$  Température °C

$k$  Conductivité thermique  $W.m^{-1}.°C^{-1}$

$\alpha$  Diffusivité thermique  $m^2.s^{-1}$

$j$  Nombre imaginaire

$\omega$  Pulsation  $rad.s^{-1}$

$t$  Temps  $s$

$e$  Epaisseur  $m$

$t_p$  Période  $s$

$h$  Coefficient d'échange convectif  $W.m^{-2}.C^{\circ-1}$

$f$  Fréquence  $Hz$

$x$  Variable spatiale  $m$

$\varphi$  Flux thermique  $W.m^{-2}$

### *Indices et exposants :*

$\sim$  Transformée de Fourier

$a$  Paramètres apparents

$n$  Harmonique

$m$  Moyenne

## 1. Introduction

Parmi les axes de recherche conduit au sein de l'IFSTTAR la maîtrise du vieillissement, des risques et les nuisances est un thème qui englobe la résistance au temps et aux agressions du milieu naturel. Au sein de cet axe, la durabilité des ouvrages est un enjeu primordial d'ordre économique mais aussi de sécurité pour l'utilisateur. Le diagnostic de l'état des ouvrages fait donc l'objet de nombreux travaux de recherche que ce soit au niveau de l'instrumentation ou des outils d'analyse de données acquises sur ouvrages avec de nouveaux dispositifs d'auscultation. Parmi les différentes techniques non destructives étudiées, la surveillance des structures par thermographie infrarouge, couplée aux avancées des technologies de l'information et de la communication [1], apparaît comme une voie de recherche à explorer. Un système de mesure par thermographie infrarouge, adapté à un tel contexte de mise en œuvre et d'exploitation, a été étudié et développé [2]. Ce système de mesure a été déployé sur différentes structures de Génie Civil dans le cadre du projet européen ISTIMES [3]. Les

résultats que nous présentons dans cet article s'appuient sur des données acquises, pendant plusieurs jours sur le tablier du pont de « Musmeci » à Potenza (Italie).

Une présentation de l'ouvrage, du système de mesure déployé sans interrompre la circulation et des mesures obtenues est faite. Par la suite deux méthodes d'analyse sont présentées. La première couramment utilisée en contrôle non destructif par thermographie infrarouge active s'appuie sur l'utilisation de la FFT. La deuxième s'appuie sur une modélisation thermique par la méthode des quadripôles thermiques dont la résolution se fait dans le domaine fréquentiel. Les conditions aux limites (flux solaire, flux convectif) sont calculées à l'aide de modèles disponibles dans la littérature et des données mesurées sur site. Une procédure d'estimation de paramètres adaptée à de telles données est proposée. Au final une cartographie de la conduction thermique apparente en surface du tablier du pont est calculée. Les résultats obtenus par ces deux approches sont analysés et des perspectives sont proposées.

## 2. Dispositif expérimental et mesures réalisées sur ouvrage

Le pont de Musmeci (Viadotto dell'Industria), situé sur la commune de Potenza en Italie a été conçu par l'architecte Sergio Musmeci (1926-1981). Sa construction a été achevée en 1975. La figure 1 présente une vue de cet ouvrage en béton. Dans le cadre du projet européen ISTIMES [3], différentes techniques de mesure en vue d'ausculter cet ouvrage ont été testées pendant une semaine l'approche par thermographie infrarouge en surveillance continue pendant 3 jours.

### 2.1. Le système de mesure déployé

Ce système s'articule autour d'un mini-PC® Zotac. Il intègre le système d'information développé pour l'architecture web du projet ISTIMES, mais permet également la synchronisation et le stockage des différentes données acquises. Un schéma de principe est présenté sur la figure 2.



Figure 1 Pont de Musmeci

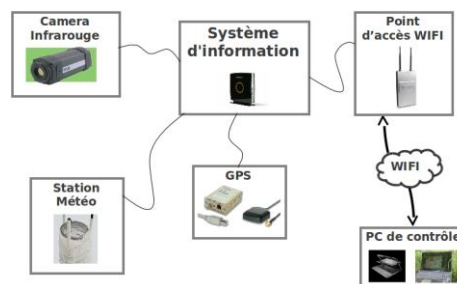


Figure 2 Système d'information utilisé

Un GPS (positionnement + datation des données), une camera infrarouge FLIR® A320 et une station météo VAISALA® WXT520 sont connectées au système conçu pour fonctionner de manière autonome. Le système assure la mise à disposition des données sur un réseau wifi privé. Un PC de contrôle peut être utilisé localement afin de paramétrer le système. Il autorise également la récupération asynchrone des données. Lors des essais, le mini-PC a été placé dans un boîtier étanche sous le pont. La caméra infrarouge et la station météo ont été fixées sur un mât de 6m (figure 3). Le mât était positionné au niveau du garde corps du pont.

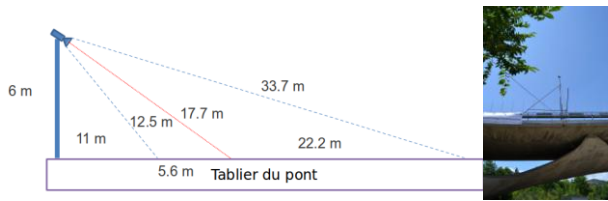


Figure 3 Schéma de montage de la camera

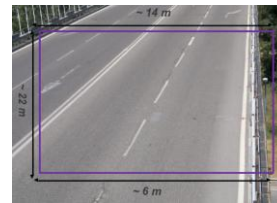


Figure 4 Champ de vision

La figure 4 présente de manière schématique le champ de vue de la caméra infrarouge reportée sur une photographie de la surface du tablier de ce pont.

## 2.2. Les données mesurées

Durant cette expérimentation, le suivi du champ de température de surface a été réalisé par thermographie infrarouge avec une fréquence d'échantillonnage d'environ  $0.083 \text{ Hz}$  obtenu par moyenne d'images en cours d'acquisition. L'évolution de la température de l'air et de la vitesse du vent faisait l'objet de mesures en parallèle avec une fréquence d'échantillonnage de  $0.0167 \text{ Hz}$ . Le suivi de l'évolution de l'humidité relative constituait un des paramètres d'entrée pour corriger en temps réel les mesures infrarouges [2] avant stockage. La figure 5 présente l'évolution de la température de surface en un point du tablier extraite de la séquence d'images infrarouges, mais aussi l'évolution de la vitesse du vent et de la température de l'air durant l'essai sur site.

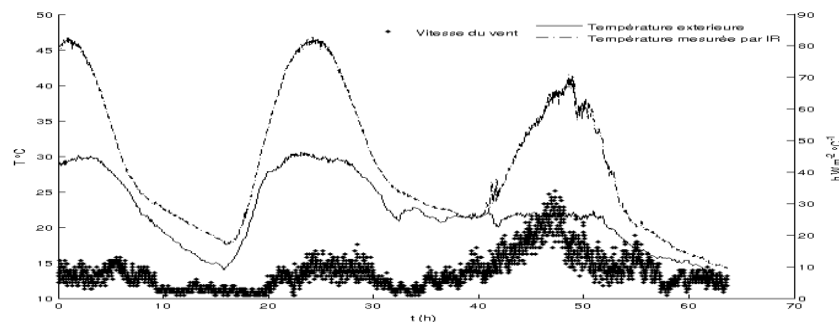


Figure 5 Evolution des Températures de surface et d'air et de la vitesse du vent

On constate sur cette figure que, pendant les deux premiers jours, les vitesses du vent entre le jour et la nuit varient périodiquement. Puis le dernier jour un épisode de vent intense dans la journée se traduit par une chute de la température de surface de l'ouvrage.

## 2.3. Structure du tablier

Une coupe transversale du tablier et une vue 3D de la structure interne des dalles utilisées pour le tablier du pont sont reportées sur la figure 6.

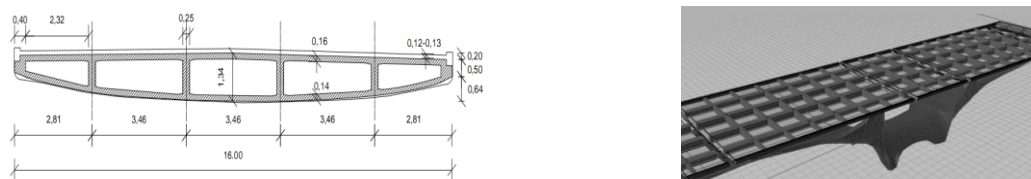


Figure 6 Schéma du pont

Le tablier est revêtu d'une couche d'étanchéité puis d'une couche de roulement en Béton Bitumineux mis en œuvre au-dessus de la surface en béton des dalles ayant une structure interne en caisson.

Nous reportons dans le tableau 1 les propriétés thermiques des matériaux à considérer.

	Conductivité $W.m^{-1}.C^{\circ-1}$	Diffusivité $m^2.s^{-1}$	Capacité thermique volumique $Jm^{-3}.C^{\circ-1}$
Enrobé	1.41	$4.967.10^{-7}$	2838810
Béton	1.8	$8.5.10^{-7}$	2116000
Air	0.0242	$1.96.10^{-5}$	1232

Tableau 1 Propriétés des matériaux

### 3. Modélisation thermique

Dans ce paragraphe nous décrivons le modèle thermique étudié et la procédure d'estimation utilisée pour construire une cartographie des conductivités thermiques apparentes à partir des données mesurées.

#### 3.1. Modélisation du tablier du pont

Les mesures acquises présentent un comportement périodique quasi établi si l'on focalise notre analyse sur les deux premières journées de mesure. Le système à résoudre peut donc être exprimé en utilisant la notion d'amplitude complexe [4] [5]. Son expression est reportée dans l'équation 1. De plus, compte-tenu de l'épaisseur totale du tablier du pont, de sa nature et de la période des sollicitations thermiques naturelles observées sur quelques cycles jour-nuit, une condition de flux nul peut être appliquée sur le dessous du tablier.

$$\begin{cases} \frac{j\omega}{\alpha} \tilde{T}(\omega_n) = \frac{\partial^2 \tilde{T}(\omega_n)}{\partial x_a^2} \\ -k_a \left. \frac{\partial \tilde{T}(\omega_n)}{\partial x_a} \right|_{x=0} = \tilde{\varphi}(\omega_n) \\ -k_a \left. \frac{\partial \tilde{T}(\omega_n)}{\partial x_a} \right|_{x=e_a} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Enfin le tablier est assimilé à un milieu monocouche en considérant des propriétés thermiques apparentes. Cette simplification permet de s'affranchir en première approche de la géométrie 3D du tablier. Les différentes variables temporelles du système sont exprimées dans le domaine fréquentiel à l'aide de la transformée de Fourier, équation 2.

$$\tilde{T}(\omega_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_p} T(t) \exp(-j\omega_n t) dt \quad (2)$$

Le gradient thermique présent initialement dans la structure est inconnu. L'obtention du gradient de température au sein du milieu est approchée par répétition sur 10 périodes l'intervalle temporel pris en considération lors du calcul. La procédure d'identification est effectuée sur la septième période. La résolution du système est effectuée à l'aide des

quadripôles thermiques [6], exprimé dans l'équation 3 en considérant un matériau constitué d'une couche.

$$\begin{pmatrix} \tilde{T}(\omega_n)_{x=0} \\ \tilde{\varphi}(\omega_n)_{x=0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha_a}} e_a\right) & \frac{1}{k_a \sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha_a}}} \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha_a}} e_a\right) \\ k_a \sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha_a}} \sinh\left(\sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha_i}} e_i\right) & \cosh\left(\sqrt{\frac{j\omega_n}{\alpha_a}} e_a\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{T}(\omega_n)_{x=e_a} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(\omega_n) & B(\omega_n) \\ C(\omega_n) & D(\omega_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{T}(\omega_n)_{x=e_a} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Le retour dans le domaine temporel s'effectue alors à l'aide de la transformée de Fourier inverse, équation 4.

$$T(x=0, t) - T_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\omega_m} \frac{A(\omega_n)}{C(\omega_n)} \tilde{\varphi}(\omega_n) \exp(j\omega_n t) d\omega_n \quad (4)$$

### 3.2. Réduction du volume de données et prise en compte des flux convectif et solaire

Afin de réduire le volume de données à traiter et d'optimiser le processus de calcul utilisé, la période journalière présentant le moins de perturbations a été utilisée et sous-échantillonnée à 0.0083Hz. Les données sous-échantillonnées sont présentées sur la figure 7.

La détermination du flux global en surface du tablier s'appuie sur l'identification du flux convectif et du flux solaire en surface du tablier.

Le transfert de chaleur convectif dû au vent en surface de l'ouvrage doit être pris en considération. Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donc calculé pour chaque mesure de vitesse du vent en utilisant les corrélations de McAdams [7]. La figure 7 présente son évolution au cours du temps.

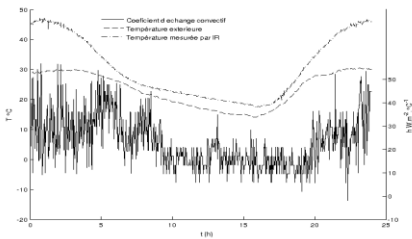


Figure 7 Mesures sous-échantillonnées à 0.0083Hz

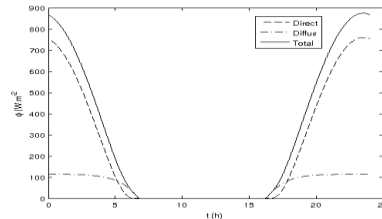


Figure 8 Composantes du flux solaire

Le sous échantillonnage temporel appliqué aux données conserve au niveau du coefficient d'échange calculé l'allure générale des variations de vent observées lors des essais.

De plus, le tablier de pont étudié est soumis à un flux solaire variable suivant les jours et la saison. D'autres paramètres comme la pente et l'exposition sont aussi à prendre en compte. Dans le cadre de notre étude, un modèle de flux solaire de la littérature [8] a été utilisé pour pallier l'absence de cette mesure lors des essais. Il permet le calcul du flux solaire reçu à un moment donné sur une région du globe. Le flux solaire total est obtenu en additionnant les flux direct, diffus et réfléchi. Dans notre cadre d'application, le système étudié n'est pas situé sur le versant d'une zone montagneuse et la pente de l'ouvrage est négligée. Pour assurer la correspondance avec nos données, le flux solaire est calculé pour une durée de 24h à partir de la datation des données fournies par le GPS ainsi que la latitude. La figure 8 présente le flux solaire ainsi reconstruit pour une période de 24h sans nuage correspondant aux premières 24 h de mesures.

### 3.3. Procédure d'identification de paramètres thermiques apparents

La procédure d'identification étudiée requiert la mise en œuvre d'un filtrage sur les différentes données de mesure brutes en entrée du calcul. Ce filtrage permet de réduire l'influence des événements trop rapides qui perturbent le modèle vis-à-vis du signal moyen étudié sur 24 h. Ainsi un filtre passe bas de Butterworth [9] a été appliqué à chaque donnée en entrée. Les fréquences de coupure et l'ordre des filtres sont reportés dans le tableau 2.

	Ordre	Fréquence de coupure Hz
Température mesurée par IR	4	0.165
Température extérieure	4	0.0165
Vitesse du vent	4	0.0917

Tableau 2 Paramètres des filtres de Butterworth

Les données filtrées (figure 9) sont utilisées pour le calcul du flux solaire  $\varphi_0(t)$  et le calcul du flux convectif en s'appuyant sur le calcul du coefficient de transfert de chaleur convectif  $h(t)$ . La connaissance de ces deux flux permet alors d'en déduire le flux global  $\varphi(t)$  en surface du tablier, équation 5.

$$\varphi(t) = h_{\text{filtré}}(t) \left( T_{\text{extérieure\_filtrée}} - \text{Mesure}_{\text{filtrée}} \right) + \varphi_0(t) \quad (5)$$

La figure 9 présente l'évolution des différents flux calculés en surface du tablier.

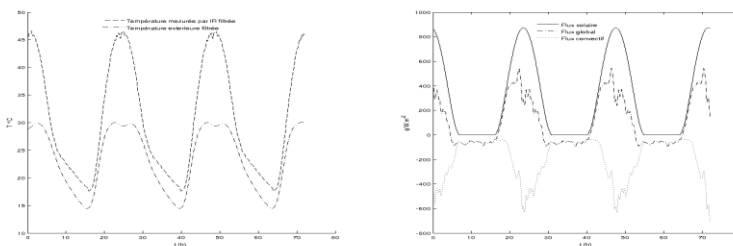


Figure 9 Calcul du flux de surface

La répétition de la période d'étude conduit également à rendre le coefficient d'échange convectif périodique.

La procédure d'estimation étudiée et mise en œuvre vise à déterminer des paramètres apparents du système. La figure 10 présente un schéma d'ensemble de la procédure d'estimation proposée.

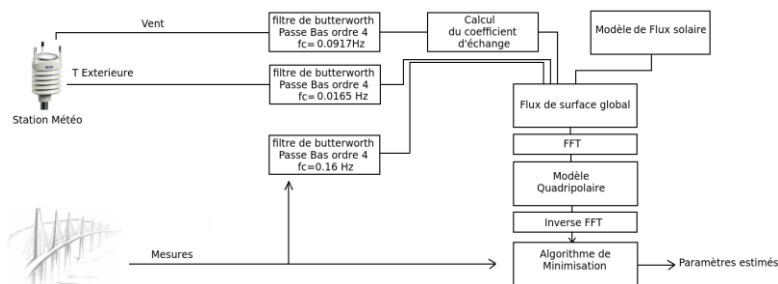


Figure 10 Procédure d'estimation

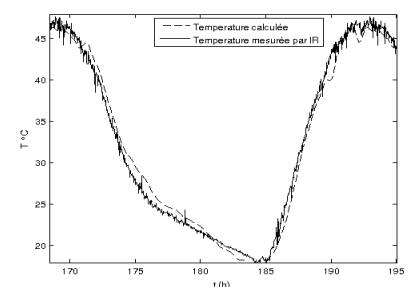


Figure 11 comparaison mesure - estimation

L'algorithme de minimisation choisi est l'algorithme de Levenberg-Marquardt [10].

## 4. Analyse des résultats

### 4.1. Application du modèle thermique en deux points du tablier

Avant d'appliquer la procédure d'estimation à une séquence d'images thermiques complète, nous présentons les résultats obtenus en deux points de la surface du tablier. L'un au droit d'une paroi en béton d'un caisson interne et l'autre au dessus de la partie évidée d'un caisson. Les conductivités thermiques apparentes estimées sont de  $1.75 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  au droit d'une paroi et  $1.8 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  au dessus de la partie évidée. La conductivité apparente calculée au niveau d'une paroi du caisson est de l'ordre de grandeur de la conductivité équivalente estimée dans le cas d'une connaissance *a priori* de paramètres [6]. La conductivité apparente calculée au dessus d'une partie vide d'un caisson est éloignée de la valeur de la conductivité équivalente calculée en considérant de l'air en troisième couche. Cet écart pourrait être dû à un coffrage perdu en bois utilisé lors de la fabrication sur site des dalles avec caisson. La figure 11 présente une comparaison entre la température mesurée et la température reconstruite après la procédure d'estimation sur une période.

### 4.2. Application du modèle thermique à la séquence d'images infrarouge et comparaison avec une analyse par FFT

La caméra infrarouge utilisée a une résolution spatiale  $320 \times 240$  pixels. Au sein de l'image, une zone de  $240 \times 200$  pixels a été extraite au centre de la scène. Par la suite afin de réduire les temps de calcul, une moyenne spatiale sur quatre pixels a été appliquée. Ainsi la séquence d'images thermiques traitée a une résolution spatiale de  $120 \times 100$  pixels. La figure 12 présente une image thermique sous échantillonnage spatialement et acquise le premier jour de la campagne d'essai à 12h30 GMT.

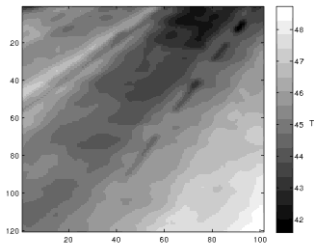


Figure 12 Température de surface

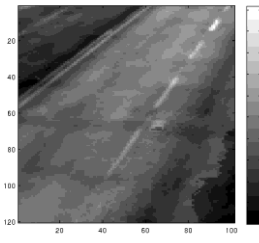


Figure 13 Cartographie de conductivité apparente

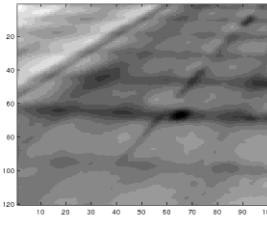


Figure 14 Carte d'amplitude

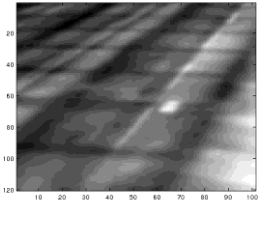


Figure 15 Carte de phase

La figure 13 présente le résultat de la procédure d'identification appliquée à la première période du signal thermique.

En parallèle une analyse fréquentielle a été appliquée à cette même séquence d'images. Une FFT [11] est appliquée sur l'évolution temporelle de chaque pixel. L'analyse des cartes de phase et d'amplitude calculées permet de détecter à certaines fréquences la structure interne du tablier. La figure 14 présente la valeur en amplitude de la deuxième harmonique du signal et la figure 15 la valeur en phase de la cinquième harmonique. La cartographie de conductivité apparente montre que le modèle étudié permet de détecter et caractériser les changements de propriétés dans l'épaisseur du tablier. Le premier caisson de béton est notamment bien visible. En revanche, l'état de surface de la structure, les ombres portées et la distorsion spatiale due au champ de vision de la caméra influent sur la sortie du modèle. Pour l'analyse fréquentielle les zones situées en haut à gauche et en bas à droite présentent une

dégradation de la qualité de la détection sur la carte d'amplitude pour l'une et celle de phase pour l'autre. Ces mêmes zones influencent la procédure d'estimation.

## 5. Conclusion

Le travail conduit dans cette étude s'est appuyé sur des données acquises pendant plusieurs jours sur un pont ouvert au trafic. Le système de mesure utilisé sur site mettait en œuvre une caméra infrarouge à matrice de microbolomètres et une station météorologique connecté à un système d'information adapté. L'analyse des séquences d'images infrarouges a été conduite par FFT puis à l'aide d'un modèle thermique et d'un protocole d'identification de la conductivité thermique apparente développé et étudié dans le cadre de ce travail. Un avantage de l'approche thermique est de conduire à une cartographie unique alors que l'approche par FFT requiert d'analyser les séquences de cartes de phase et d'amplitude. A contrario le temps de calcul est loin d'être aussi performant que l'approche par FFT, toutefois la parallélisation des calculs sur GPU devrait permettre un gain en temps de calcul très significatif. La cartographie des cartes de conductivité thermique apparente ouvre aussi la voie au suivi sur le long terme d'un possible indicateur d'état de la structure en lien avec le vieillissement des matériaux constitutifs d'une structure soumise aux aléas climatique et au trafic.

## Références

- [1] M. Argenti, V. Giannini, R. Averty, L. Bigagli, and J. Dumoulin, "ISTIMES: Integrated System for Transport Infrastructures Surveillance and Monitoring by Electromagnetic Sensing", EGU 2012, Vienne, Autriche, 22-27 avril 2012.
- [2] Dumoulin.J, Averty.R « Development of an infrared system coupled with a weather station for real time atmospheric correction using GPU computing: Application to bridge monitoring » QIRT2012 NAPLES. 2012.
- [3] Proto M. et al., « Transport Infrastructure Surveillance and Monitoring by Electromagnetic Sensing: The ISTIMES Project », Sensors 2010, 10, 10620-10639; doi:10.3390/s101210620.G.
- [4] Crinière, A. et al., 2013, On the feasibility of defect detection in composite material based on thermal periodic excitation. Composites Part:B, Vol 45, pp 1023-1030 (sous presse).
- [5] Autrique, L. et al, 2009, On the use of periodic photothermal methods for materials diagnosis. Sensors and Actuators B: Chemical, Vol 135, pp 478-487.
- [6] Maillet, D. et al., 2000, Thermal Quadrupoles Solving the Heat Equation through Integral Transforms, Wiley & Sons, New York.
- [7] McAdams, W. H., 1954, Heat Transmission, McGraw-Hill, New York.
- [8] Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley & Sons, New York.
- [9] Butterworth, S., 1930, On the Theory of Filter Amplifiers, Wireless Engineer, vol. 7, pp. 536-541.
- [10] Marquardt, D., 1963, An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, SIAM J. Appl. Math. 11, pp 431-441.
- [11] Cooley J.W., Tukey J.W., "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", Mathematics of Computation, vol. 19, n° 90, 1965, p. 297-301.