



Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

MÉTHODES THERMIQUES APPLIQUÉES AU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DU COLLAGE D'UN RENFORT CARBONE SUR UNE STRUCTURE EN BÉTON

**THERMAL METHODS APPLIED TO NON-DESTRUCTIVE TESTING OF GLUING
OF CARBON REINFORCEMENT ON A CONCRETE STRUCTURE**

Alexis CHAUSSOIS^(a), Franck BRACHELET^(a), Didier DEFER^(a), Emmanuel ANTCZAK^(a,*)

a. Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement – LGCgE, Univ Lille Nord de France, U-Artois, FSA,
Technoparc Futura, 62400 Béthune, France

* auteur correspondant : emmanuel.anticzak@univ-artois.fr

RÉSUMÉ

Les plaques polymères en fibre de carbone renforcée (CFRP) sont de plus en plus utilisées pour le renforcement structural des ouvrages par collage. Le but de ce travail est de mettre au point une méthode permettant de quantifier la qualité du collage sur un bloc de béton renforcé par CFRP, dont les défauts de collage ont été localisés au préalable par thermographie infrarouge. L'étude quantitative est réalisée à l'aide d'une estimation expérimentale de l'impédance thermique et par identification des paramètres thermophysiques du système, grâce à une procédure d'ajustement d'un modèle théorique.

ABSTRACT

Carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) are increasingly used for structural reinforcement of structures/buildings by bonding. The aim of this work is to develop a method to quantify the bonding quality on a concrete block reinforced by CFRP, of which bonding defects were located in advance by infrared thermography. The quantitative study

was conducted using an experimental estimation of the thermal impedance and identification of thermophysical parameters of the system, through a process of adjusting a theoretical model.

Mots-clés : béton, renforcement, composite, fluxmètres, méthode inverse, impédance thermique

1. INTRODUCTION

Le vieillissement des infrastructures de génie civil est au centre des préoccupations actuelles de nombreux pays. Le renforcement des ouvrages par plaques de composites (« CFRP » pour « Carbon Fiber Reinforced Plastics ») est une technique aujourd’hui largement répandue [1,2]. L’efficacité du renforcement est très sensible à la qualité du collage réalisé qui dépend essentiellement de deux paramètres : la réalisation du collage au moment de la mise en place et l’exposition de la couche de colle aux environnements agressifs. Les possibles défauts engendrés entre la

plaqué composite et le matériau renforcé sont invisibles et ils peuvent réduire de manière significative la zone de contact efficace entre le composite et le support, compromettant alors la liaison de l'ensemble. Ces défauts réduisent les performances mécaniques attendues ainsi que la durée de vie [3,4,5]. L'apparition de vides ou de défauts de l'adhésion composite/matériau n'est pas un phénomène rare. Il est important de pouvoir évaluer l'état de l'assemblage. Des méthodes de vérification de la qualité du collage de l'ensemble existent (« pull-off tests », « Hammer-tapping ») mais elles sont souvent destructives et ne permettent pas une inspection efficace et à grande échelle. Depuis quelques années s'est répandue une méthode d'auscultation par thermographie infra-rouge, qui s'avère être un moyen efficace de localiser les défauts invisibles en surface. Cette méthode présente plusieurs avantages. Non-destructive, elle est de mise en œuvre aisée, sans contact et à grand rendement. Cependant, il s'agit le plus souvent d'une méthode qualitative de mise en évidence et de localisation des défauts alors qu'il serait également important de parvenir à quantifier la qualité du collage ainsi que les dommages qui pourraient être engendrés par ces défauts. Des méthodes de traitement des images infrarouges sont envisageables mais leur mise en œuvre n'est pas adaptée aux contraintes de l'auscultation *in situ*. Nous montrons dans ce travail, qu'elle peut être avantageusement couplée à une approche locale d'investigation par détermination de l'impédance thermique du système.

2. APPROCHE THÉORIQUE

L'impédance thermique Z [6,7] est une fonction qui représente le rapport entre les composantes en fréquence (ou pulsation ω) de la température $\theta(\omega)$ et celles de la densité de flux $\phi(\omega)$ dans le même plan. Pour l'estimer, on crée une sollicitation sous la forme d'une dissipation de chaleur (par exemple avec une résistance chauffante) et on enregistre simultanément le flux et la température. Leur interaction est analysée au travers des variations de l'impédance $Z(f)$ dans le domaine fréquentiel. Cette approche permet d'exploiter des signaux aléatoires. La décomposition dans l'espace des fréquences couplée à une étude de sensibilité permet de cibler exactement la bande spectrale optimale pour identifier les paramètres d'intérêt. Ces derniers seront alors estimés en ajustant le modèle théorique de l'impédance sur le modèle expérimental. Théoriquement, le système que nous étudions peut globalement se traduire de la manière suivante : il est constitué par la mise en série de la partie du capteur situé en aval du plan de mesure et matérialisé par la capacité du capteur C_f , d'une résistance de contact capteur/plaque composite notée R_c , de la plaque composite (de caractéristiques thermiques connues et de largeur l), de l'épaisseur de colle ou de vide en cas de défaut de collage (matérialisée par une résistance thermique R et une capacité thermique C), et enfin du béton (en condition semi-infinie, représenté par son effusivité thermique b). A chaque partie est associée une matrice

[8]. Chaque milieu peut se représenter de la manière suivante :

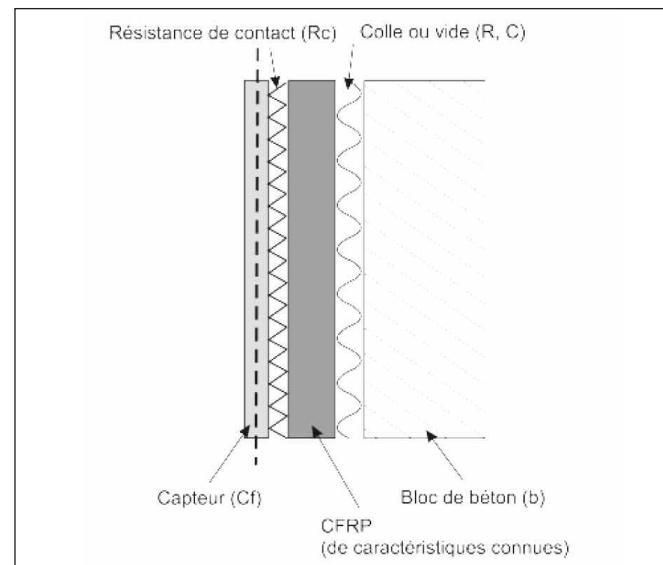


Figure 1 : Modélisation du dispositif expérimental

2.1. Eléments du modèle de comportement

Les mesures sont réalisées par un fluxmètre, appliqué sur la plaque composite. La faible épaisseur du fluxmètre permet de minimiser son influence sur le comportement thermique du système en aval du plan de mesure. On peut considérer en première approximation que le plan dans lequel s'effectuent les mesures correspond au plan médian du capteur. On associe au « demi » capteur la matrice suivante :

$$Z(f) = \frac{\theta(f)}{\phi(f)} = \frac{\theta(\omega)}{\phi(\omega)} \quad (1)$$

Où C_f représente la capacité thermique de la partie aval du fluxmètre. Il s'agit d'une valeur donnée constante connue qui globalise la capacité des matériaux constitutifs (kapton, cuivre, constantan) du capteur dont les épaisseurs et les propriétés thermophysiques sont connues. Pour notre étude $C_f = 650 \text{ J.m}^{-2}\text{K}^{-1}$. La qualité du contact se traduit par une valeur de résistance R_c (liant la chute de température à la densité de flux) qui sera identifiée à chaque essai. On peut lui associer la matrice de transfert suivante [9] :

$$\begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Les deux surfaces mises en contact sont ici bien planes et lisses. Cela laisse supposer une bonne qualité de contact et une faible valeur de R_c . Néanmoins, celle-ci sera calculée afin d'en estimer son influence. Pour le cas d'un milieu homogène, sa matrice possède une écriture générale qui fait apparaître sa dimension principale (épaisseur) sa diffusivité thermique et son effusivité thermique [9]. Le milieu à caractériser sera matérialisé soit par la colle (Résine



Epoxy Sikadur 30) soit par un vide d'air en cas de défaillance de collage. Dans les deux cas, nous allons associer à cette matrice les deux grandeurs que sont sa résistance thermique et sa capacité thermique. Dans les conditions d'étude, le béton se comporte comme un milieu semi-infini. Il intervient par son impédance caractéristique Z_c . Le paramètre b [$J \cdot m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$] représente l'effusivité thermique du matériau.

$$Z_c(j\omega) = \frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \quad (3)$$

L'impédance globale du système peut être caractérisée par une matrice de transfert globale M_1 , qui est le résultat du produit en cascade des matrices caractérisant chaque milieu. D'après le formalisme des quadripôles thermiques on obtient la relation suivante avec Z_e l'impédance d'entrée :

$$\begin{bmatrix} \theta_e(j\omega) \\ \phi_e(j\omega) \end{bmatrix} = [M_1] \times \begin{bmatrix} 1 \\ b\sqrt{j\omega} \cdot \phi_s(j\omega) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad Z_e = \frac{\theta_e(j\omega)}{\phi_e(j\omega)} \quad (4)$$

L'impédance ainsi décrite dépend donc de 4 paramètres à identifier (la capacité C_f du capteur étant connue et constante) : La capacité thermique C , la résistance thermique R de la colle, l'effusivité b du béton et la résistance de contact R_c entre le capteur et la plaque composite. Il est à noter que des simulations préliminaires ont mis en évidence que la valeur de la capacité thermique C de la colle pouvait être « négligée » car elle se trouve placée devant un bloc semi-infini de béton de forte chaleur spécifique.

2.2. Sensibilité aux paramètres

L'objectif de l'étude de sensibilité est de définir l'influence de chaque paramètre et d'optimiser le choix de la gamme de fréquences à utiliser pour parvenir à les identifier. L'impédance est une fonction complexe de la fréquence, les fonctions de sensibilité S_{Z,p_i} du module de Z vis-à-vis du paramètre p_i sont définies ainsi :

$$S_{Z,p_i}(f) = \frac{\Delta Z/Z}{\Delta p_i/p_i} \quad (5)$$

On peut remarquer que pour identifier la qualité du collage, matérialisé par la composante R (résistance thermique de la colle ou du vide), la zone d'étude est dans une bande de fréquences variant de $\sim 10^4$ Hz à quelques 10^2 Hz. On peut également noter que l'impédance est, comme nous le présagions, peu sensible à la capacité thermique C du milieu de collage, ainsi qu'à la capacité C_f du fluxmètre (qui sera fixée à $650 \text{ J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ d'après de précédentes études [6]). L'identification portera donc sur 3 paramètres (b , R_c , R). Il est à noter qu'il a été vérifié que les sensibilités aux paramètres ne sont pas corrélées.

2.3. Taux de remplissage

Pour traduire la qualité du collage, nous avons introduit un coefficient α qui est lié au taux de remplissage, par la colle, de l'espace compris entre la plaque de renforcement en carbone et le bloc de béton. Ce coefficient α peut varier entre 0 et 1. α tend vers 0 lorsqu'il y a absence de colle (le milieu est alors rempli d'air) et α tend vers 1 lorsque l'espace entre le CFRP et le béton est rempli de colle. La phase d'identification va aboutir à une estimation de la résistance thermique R_α [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] de la couche de collage. Cette résistance comprise entre la résistance d'une épaisseur d'air et celle d'une épaisseur remplie de colle sera traduite ici en un taux de collage, le paramètre α compris entre 0 et 1.

2.4. Détermination des paramètres thermophysiques du système

Le signal analogique de la température $T(t)$ observée à vitesse constante peut être représenté par la série $\{T(1), T(2), T(3), \dots, T(p)\}$. On suppose que ce signal est la réponse à une excitation de flux $F(t)$. $F(t)$ est également observée à des moments discrets $\{F(1), F(2), F(3), \dots, F(p)\}$. Les échantillons des deux signaux peuvent être liés par la relation linéaire suivante:

$$\begin{aligned} a_0 T(k) + a_1 T(k-1) + \dots + a_p T(k-p) &= b_0 F(k) + b_1 F(k-1) \\ &\dots + b_q F(k-q) \end{aligned} \quad (6)$$

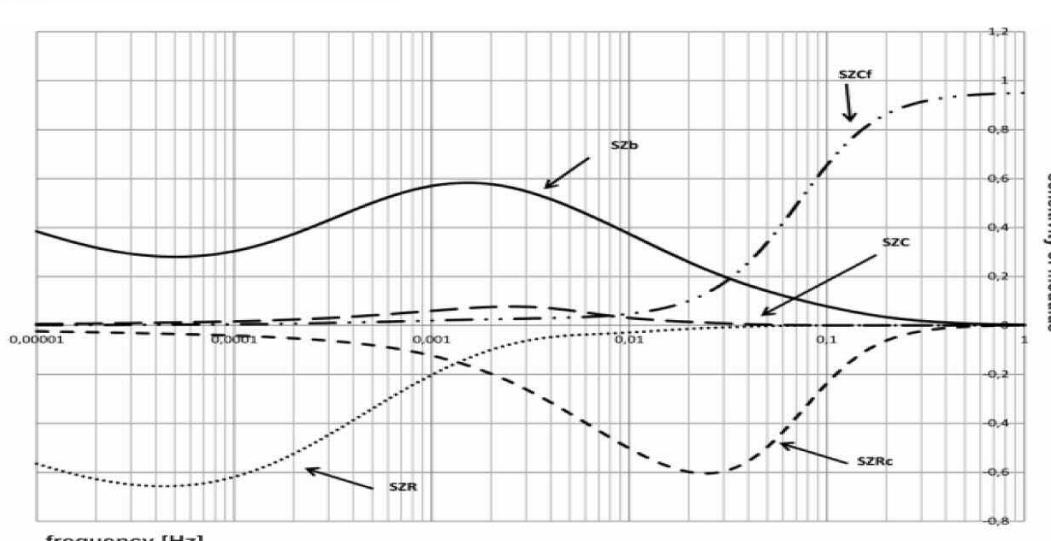


Figure 2 : Module de la sensibilité aux paramètres en fonction de la fréquence

Cette équation constitue un modèle linéaire discret d'ordre (p, q). Elle exprime le fait que la valeur de la fonction T à un instant donné dépend de l'excitation des valeurs passées et présentes de F et des valeurs passées de T . Une normalisation avec a_0 donne l'expression communément utilisée :

$$T(k) = - \sum_{i=1}^p a_i T(k-i) + \sum_{i=0}^q b_i F(k-i) \quad (7)$$

Avec $\theta(z)$ la transformée en z de la séquence $T(k)$ et $\phi(z)$ celle de $F(k)$:

et

$$\theta(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} T(k) z^{-k} \text{ et } \phi(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} F(k) z^{-k} \quad (8)$$

A partir de l'équation dépendante du temps reliant les signaux d'entrée et de sortie du système linéaire, une équation équivalente reliant les transformées en z peut être écrite :

$$\frac{\theta(z)}{\phi(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_q z^{-q}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-p}} = Z(z) \quad (9)$$

$Z(z)$ est la fonction de transfert en z du système linéaire discret temporel. Pour les valeurs particulières $z=e^{j\omega t}$ (où ω représente la fréquence d'échantillonnage), on obtient l'impédance expérimentale $Z(f)$ du système. Les paramètres thermophysiques du modèle théorique sont ensuite déterminés via une procédure d'estimation par la méthode des moindres carrés qui recherche itérativement le groupe de paramètres de l'impédance théorique qui minimise l'écart avec l'impédance expérimentale calculée.

3. APPROCHE EXPÉRIMENTALE

3.1. Caractéristiques des échantillons

La figure 3 reprend les caractéristiques dimensionnelles du système étudié et le positionnement des zones caractérisiques :

Un échantillon de béton (dalle carrée de 50cm de côté et 4cm d'épaisseur) a été renforcé extérieurement par une plaque composite (SIKA Carbodur 1012). La plaque a été collée avec une colle spécifique (Résine epoxy Sikadur

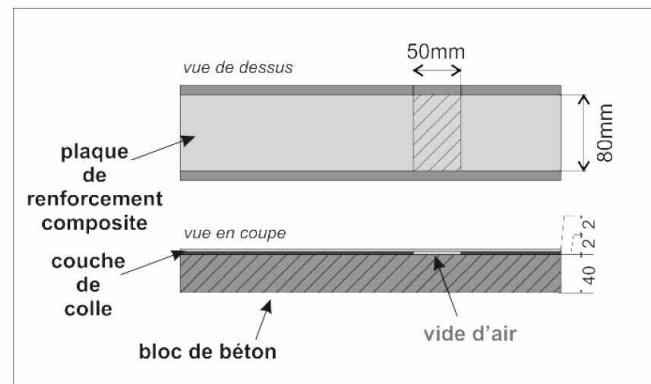


Figure 3 : Echantillon expérimental testé

30). Un défaut artificiel (vide d'air de 5cm x 5cm) a aussi été constitué sur une partie de l'échantillon (Fig 4.).

3.2. Localisation et caractérisation du défaut par méthodes thermiques

Dans cette expérimentation, la thermographie infrarouge n'est pas employée comme une technique de contrôle non destructif quantitative mais en tant qu'outil de mise en évidence de défaut. La résistance thermique créée par un défaut de collage provoque une élévation plus forte de la température. Le spécimen d'essai est placé en face de la caméra infrarouge et d'une structure supportant deux lampes halogènes. Cet ensemble situé à une distance de 2 mètres de l'échantillon offre un champ de vision permettant d'observer la totalité du spécimen. La sollicitation thermique est appliquée à l'aide des deux lampes halogènes. Cette détection des défauts réalisée à l'aide de la caméra infrarouge, constitue une première étape, et permet de localiser les zones potentiellement mal collées. L'étape suivante consiste à caractériser le degré de collage par impédance thermique. Nous avons placé notre système résistance chauffante/capteur de flux et température dans deux cas distincts : sur une zone où nous avons au préalable repéré un défaut de collage par l'intermédiaire de la caméra infrarouge (position 1 sur la Figure 4), et sur une zone saine (position 2 sur la Figure 4).

La sollicitation générée par la résistance chauffante peut être considérée comme uniforme. Les enregistrements du flux thermique et de la température permettent de calculer la fonction de transfert pour chacune des positions (bien et mal collées).

Matériau	épaisseur (m)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	c (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	a (m ² .s ⁻¹)	b (J.K ⁻¹ .m ⁻² .s ^{-1/2})	R (m ² .K.W ⁻¹)
CFRP	1.2.10 ⁻³	0.7	1530	840	5.44.10 ⁻⁷	948	1.71.10 ⁻³
Colle	2.10 ⁻³	0.2	1200	1220	1.36.10 ⁻⁷	541	1.10 ⁻²
Défaut	2.10 ⁻³	0.026	1.184	1000	2.2.10 ⁻⁵	5.55	7.69.10 ⁻²
Béton	Semi- ∞	1.8	2300	920	8.5.10 ⁻⁷	1952	

Tableau 1 : Principales caractéristiques des composants

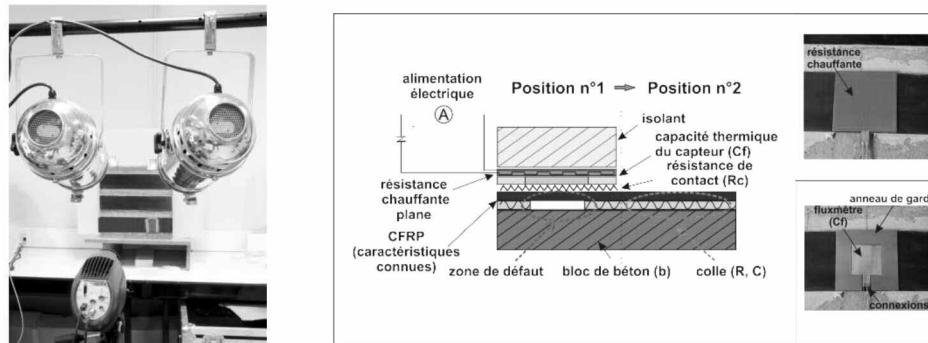


Figure 4 : Dispositifs expérimentaux de détection de défaut et de caractérisation du degré de collage

	Echantillon sain		Echantillon avec défaut	
	optimisation	mesure	optimisation	mesure
Rc ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)	0.005		0.017	
Taux de Remplissage α	0.99		0.023	
b du béton ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$)	2041	1952	2099	1952
Ecart-type		4.55		7.53

Tableau 2 : Paramètres thermophysiques obtenus

3.3. Résultats et interprétation

Un signal binaire pseudo-aléatoire (SBPA) a été utilisé comme excitation. Ce choix se justifie car c'est un signal facile à générer, et qui permet de donner des informations sur une large bande spectrale [9], contrairement à une sollicitation de type sinusoïdale (fréquence unique) ou une sollicitation de type Flash. Dans notre cas, la configuration du dispositif de sollicitation et de mesure permet de maîtriser les conditions limites. De plus, l'objectif à terme est de réaliser un dispositif portable de caractérisation in situ du degré de collage d'un renfort composite.

Le résultat de cette excitation nous permet de mesurer le flux et la température. L'impédance calculée permet alors la détermination des paramètres thermophysiques (b, R, α). Les résultats obtenus permettent de constater que l'influence du capteur sur le système étudié est bien prise en compte. En effet bien que la résistance de contact fluxmètre/carbone, qui est liée à la zone de frottement entre les deux matériaux et aléatoire en fonction des essais, soit multipliée par 3 entre les deux essais, elle ne modifie pas les valeurs des paramètres principaux recherchés (b et α). Ceci est important dans l'optique d'une procédure de mesure in situ, souvent éloignée des conditions de laboratoire. En ce qui concerne les résultats de l'effusivité thermique du support béton, les écarts-types entre les paramètres estimés et les valeurs obtenues en laboratoire ([NF-EN 12664]) sont faibles (<8%). Cela permet de valider les fréquences de sollicitations ciblées qui excitent l'ensemble du système multicouche. Enfin, pour le paramètre le plus important de notre étude, on note que le taux de remplissage est bien proche de 1 lorsque la plaque de renforcement est bien collée, et proche de zéro dans le cas du vide d'air. Les résultats ne laissent aucun doute quant à l'identification du défaut, même si son épaisseur est faible (2 mm) par rapport à l'épaisseur totale du système étudié (45 mm). La méthode semble apte à définir de manière

quantitative la qualité de collage d'un bloc de béton renforcé par CFRP. Elle nécessite d'être complétée par un état « intermédiaire » assimilé à un collage partiel et à des essais mécaniques d'arrachement associés. Cette démarche est en cours de réalisation

4. CONCLUSION

Les plaques en fibre de carbone sont largement utilisées pour renforcer les structures de génie civil. La thermographie infrarouge est une des techniques actuellement utilisée pour contrôler la phase de collage in situ et le plus souvent comme une analyse qualitative pour localiser le défaut. Ici nous l'avons couplée à une caractérisation par impédance thermique qui aboutit à l'estimation d'un taux de remplissage. Elle fournit un indicateur chiffré de la qualité du collage entre une plaque en fibre de carbone et un bloc de béton. La méthode est facilement transposable sur site, et doit permettre de donner rapidement une estimation du degré de collage des plaques de renforcement. En perspective, il pourrait être envisagé de caractériser thermiquement différents défauts mis en oeuvre avec différents taux de remplissage de colle (α) et d'étudier corrélativement les propriétés mécaniques de ces assemblages en laboratoire. Si une corrélation forte était mise en évidence, la caractérisation thermique pourrait fournir une estimation indirecte de la qualité mécanique du renforcement.

RÉFÉRENCES

- [1] J.N. Reddy, Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis -- CRC Press Inc - ISBN-10: 0849315921 – (2003)
- [2] ACI 440.2R-02. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete struc-



- tures. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan; (2002)
- [3] ACI Committee 440.2R02-08."Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Systems for Strengthening Concrete Structures", American Concrete Institute, Michigan, U.S.A., (2008)
- [4] AFGC. (2007). "Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites – Recommandations provisoires", Bulletin scientifique et technique de l'AFGC
- [5] Fib Task Group 9.3. (2001) Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, fib bulletin 14, Lausanne, Suisse
- [6] A. Chauchois, D. Didier, E. Antczak, and B. Duthoit, Use of noninteger identification models for monitoring soil water content, Meas. Sci. Technol. 14, 868 (2003)
- [7] A. Chauchois, E. Antczak, D. Defer, and F. Brachelet In situ characterization of thermophysical soil properties—Measurements and monitoring of soil water content with a thermal probe, J. Renewable Sustainable Energy 4, 043106 (2012)
- [8] A. Degiovanni, Thermal conduction in a multilayer slab with internal sources; using a quadripole method Int. J. Heat Mass Transfer 31, 553 (1988)
- [9] D. Defer, A. Chauchois, E. Antczak, and O. Carpentier, Determination of Thermal Properties in the Frequency Domain Based on a Non-integer Model: Application to a Sample of Concrete, Int. J. Thermophys., 30(3), 1025 (2009)

