

THERMOGRAPHIE INFRAROUGE APPLIQUÉE AU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DU RENFORCEMENT DE STRUCTURES PAR COLLAGE DE COMPOSITES : DE LA RECHERCHE EN LABORATOIRE À L'APPLICATION TERRAIN

INFRARED THERMOGRAPHY FOR THE NONDESTRUCTIVE CONTROL OF CFRP STRENGTHENED CONCRETE STRUCTURES: FROM RESEARCH LABORATORY TO FIELD APPLICATION

Jean DUMOULIN, Frédéric TAILLADE, Karim BENZARTI, Marc QUIERTANT

Université Paris-Est, LCPC

Christophe AUBAGNAC

LRPC d'Autun, CETE de Lyon

1. INTRODUCTION

De nos jours, la maintenance ou le renforcement des structures en béton armé par collage de matériaux composites est une technique de plus en plus utilisée et acceptée. Cependant, l'emploi de ces techniques de collage de matériaux requiert de suivre rigoureusement les procédures de mise en œuvre [1-3]. De plus, les équipes assurant de tels chantiers doivent être formées et entraînées aux procédures spécifiques afin de garantir dans le temps la pérennité et les performances du renforcement réalisé. Un contrôle *in situ* de la qualité du collage réalisé est donc nécessaire. La procédure de contrôle doit s'appuyer sur un ensemble de méthodes adaptées. L'inspection visuelle et le sondage acoustique (méthode du « maillet ») sont couramment utilisés pour détecter des délaminages. Néanmoins, ces approches s'avèrent insuffisantes pour déterminer la profondeur des défauts (cas des multicouches), l'étendue des zones décollées voire de quantifier la qualité du collage entre le composite et la structure (délaminage partiel, résine endommagée, mauvaises propriétés mécaniques de la résine). Par conséquent, des méthodes d'inspection complémentaires rapides et robustes sont requises. Parmi les méthodes d'évaluation non destructive, la thermographie infrarouge active a fait l'objet de travaux de recherche en raison de sa facilité d'emploi sur site réel.

1. INTRODUCTION

Strengthening or retrofitting of reinforced concrete structures by externally bonded Fiber Reinforced Polymer (FRP) systems is now a commonly accepted and widespread technique. However, the use of bonding techniques always implies following rigorous installing procedures [1-3]. Moreover installation crews have to be trained in accordance with the installation procedure to ensure the durability and long-term performance of the FRP reinforcements. Conformance checking through an in situ auscultation of the bonded FRP systems is then highly suitable. The quality-control program should involve a set of adequate inspections and tests. Visual inspection and acoustic sounding (hammer tap) are commonly used to detect delaminations (disbonds) but are unable to provide sufficient information about the depth (in case of multilayered composite) and width of debonded areas and are not capable of evaluating the level of adhesion between the FRP and the substrate (partial delamination, damage of the resin, poor mechanical properties of the resin). Consequently, rapid and efficient inspection methods are required. Among the non destructive methods under study, active infrared thermography was investigated due to its ability to be used on field.

2. PRINCIPE DU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DU COLLAGE DES COMPOSITES PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ACTIVE

Depuis de nombreuses années la thermographie infrarouge active est utilisée pour le contrôle des structures aérospatiales, et en particulier pour la détection et la caractérisation du délaminage dans les composites carbon/epoxy [4].

La méthode consiste à appliquer une excitation thermique, de durée τ , en surface des composites. La distribution des températures de surface au cours du temps est alors mesurée par caméra infrarouge et permet d'obtenir une séquence d'images thermiques. La figure 1 illustre le principe d'évolution dans le temps de la température d'une image thermique (thermogramme), sur une zone saine et sur une zone présentant un défaut.

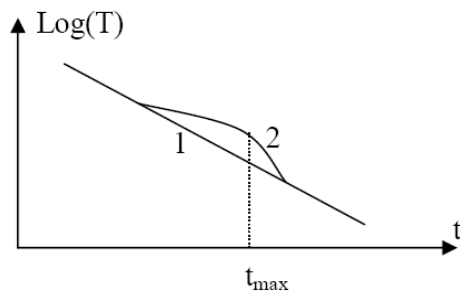


Fig. 1. Allure des thermogrammes au niveau d'une zone saine (1) et avec défaut (2)

L'utilisation du concept de temps de diffusion thermique associé à l'hypothèse de diffusion de la chaleur dans un milieu semi infini [4-6] permet de relier le temps où apparaît le contraste thermique maximum à la profondeur du défaut et à la diffusivité thermique du matériau étudié (Eq. 1).

$$z = \sqrt{t_{\max} a} \quad \text{Eq. 1}$$

a étant la diffusivité thermique du matériau, t_{\max} le temps associé au maximum de contraste et z la profondeur du défaut.

Il s'ensuit que pour des défauts de même nature mais localisés à différentes profondeurs, la localisation nécessite la détection de contrastes thermiques apparaissant à différents instants sur la séquence d'images thermiques. Pour une même sollicitation thermique, le contraste thermique s'atténue pour une profondeur croissante des défauts. La localisation du défaut requiert donc d'analyser l'ensemble de la séquence d'images thermiques acquise pendant et/ou après sollicitation thermique.

2. NONDESTRUCTIVE CONTROL PRINCIPLE OF FRP BONDING BY ACTIVE INFRARED THERMOGRAPHY

For many years, the Stimulated Infrared Thermography technique has been used to control aerospace structures, in particular to detect and characterize delaminations in carbon/epoxy composites [4].

Its principle consists in heating the surface of the composite during a period τ . The temperature distribution and evolution with time, on the sample surface, is measured by means of an infrared camera and a sequence of thermal images is generated. Figure 1 illustrate diagrammatically temperature evolution with time (thermogram) for two points of a thermal image over a sound area and a defect area.

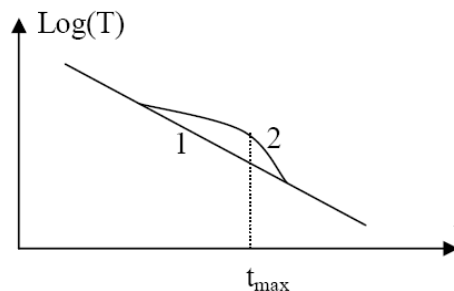


Fig. 1. Thermograms of sound (1) and faulty (2) areas

Using the thermal diffusion time concept and the hypothesis of heat diffusion in a semi infinite body [4-6], time associated to the maximum contrast can be connected (Eq. 1) to defect depth and thermal diffusivity of the studied material.

$$z = \sqrt{t_{\max} a} \quad \text{Eq. 1}$$

Where a is the thermal diffusivity of the material, t_{\max} the maximum contrast time and z the defect depth.

It follows that for defects of same nature but localized at different depths, their localization rest on detection of thermal contrast appearing at different time on thermal image sequence. For a same thermal sollicitation, thermal contrast fade while defect depth increase. So, localisation of defects require to analyse the whole thermal images sequence acquired during and/or after thermal sollicitation.

Différents outils d'analyse peuvent être mis en œuvre [4-5] pour cette détection. Ils font appel à des techniques de rehaussement de contraste (accroissement de la signature des défauts), de décomposition des séquences d'images thermiques sur des bases (compression des informations) et de segmentation d'images (localisation des défauts sur les images thermiques).

Un première approche pour réduire le nombre d'images thermique à analyser dans une séquence [5] est d'utiliser l'analyse fréquentielle. La transformée de Fourier (Eq. 2) est appliquée à l'évolution temporelle de chaque point de l'image.

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) \exp(-j2\pi k/N) = \text{Re}_n + \text{Im}_n \quad \text{Eq. 2}$$

L'examen des cartes d'amplitudes et des phases ainsi obtenues permet de localiser les défauts.

Une autre approche s'appuie sur la décomposition en valeurs singulières qui permet d'extraire de manière compacte des informations sur les variations spatiales et temporelles d'une séquence d'images thermiques [7]. La décomposition en valeurs singulières d'une matrice A de taille MxN (avec M>N) prend pour expression :

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad \text{Eq 3}$$

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

Pour pouvoir mettre en œuvre cette décomposition sur une séquence d'images thermiques (matrices 3D), il faut au préalable réorganiser cette séquence sous forme d'une matrice 2D A de taille MxN. Pour se faire, chaque image thermique à un instant t devient une colonne de la matrice A. Dès lors, l'information spatiale est obtenue en parcourant la matrice A suivant ses lignes et l'information temporelle en la parcourant suivant ses colonnes. Après calcul, les colonnes de 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. Typiquement, pour une séquence de 1000 images thermiques, l'analyse des cinq à dix premières fonctions empiriques orthogonales permet de localiser les défauts.

Different analysis tools [4-5] can be used. They lean on techniques of contrast enhancement (increase of defect signature), thermal images sequence decomposition on basis (data compression) and image segmentation (defect localisation on thermal images).

A first approach to reduce the number of thermal images to be analysed in a sequence [5] is to use frequency analysis tools. The Fourier transform (Eq. 2) is applied to temporal evolution of each pixel of the thermal image.

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) \exp(-j2\pi k/N) = \text{Re}_n + \text{Im}_n \quad \text{Eq. 2}$$

Magnitude and phase maps calculated are then analysed to locate defects.

Another approach leans on Singular value decomposition (SVD) which is an interesting tool for the extraction of the spatial and temporal information from a thermographic matrix in a compact or simplified manner [7]. The SVD of an MxN matrix A (M>N) can be calculated as follows:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad \text{Eq 3}$$

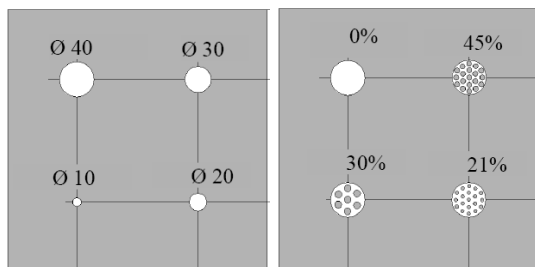
where U is an MxN orthogonal matrix, $\mathbf{\Sigma}$ being a diagonal NxN matrix (with the singular values of A in the diagonal), and \mathbf{V}^T is the transpose of an NxN orthogonal matrix (characteristic time).

Hence, to apply the SVD to thermographic data, the 3D thermogram matrix representing time and spatial variations has to be reorganized as a 2D MxN matrix A. This can be done by rearranging the thermograms for every time as columns in A, in such a way that time variations will occur column-wise while spatial variations will occur row-wise. Under this configuration, the columns of U represent a set of orthogonal statistical modes known as empirical orthogonal functions (EOF) that describe the spatial variations of data. On the other hand, the principal components (PCs), which represent time variations, are arranged row-wise in matrix \mathbf{V}^T . The first EOF will represent the most characteristic variability of the data; the second EOF will contain the second most important variability, and so on. Usually, original data can be adequately represented with only a few EOFs. Typically, a 1,000 thermal images sequence can be replaced by 5 to 10 EOFs and analysed to locate defects.

3. ESSAIS EN LABORATOIRE

3.1. Echantillons réalisés en laboratoire

Deux échantillons en béton ($300 \times 300 \text{ mm}^2$) ont été fabriqués (Fig 2.). Des défauts de collage ont été simulés en insérant des disques en TEFLON® (0,5 mm d'épaisseur) à la place de la colle entre la surface du béton et celle du composite (tissu en fibre de carbone/ résine époxy).



Echantillon n°1

Echantillon n°2

Fig. 2. Schéma des échantillons de laboratoire

L'échantillon n°1 comporte quatre disques de diamètre respectif : 40, 30, 20 et 10 mm. L'échantillon n°2 comporte quatre disques de même diamètre ($\varnothing = 40 \text{ mm}$) mais avec différents taux de perforation pour simuler différentes qualités de collage.



Fig. 3. Photographie des échantillons réalisés

En complément un autre échantillon a été réalisé avec trois tailles de défauts (disques en TEFLON®) localisés à différentes profondeurs. Les Figures 4 et 5 montrent la localisation des défauts insérés entre chaque couche des lamelles en fibre de carbone.

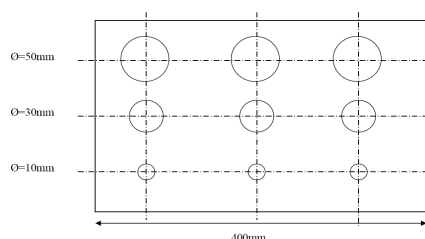
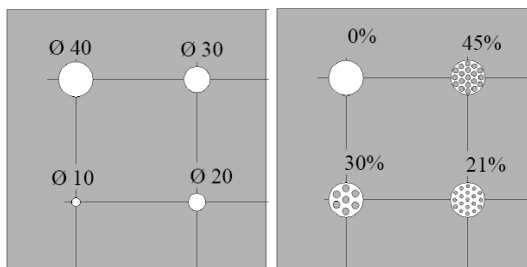


Fig. 4. Vue de dessus de l'échantillon n°3

3. EXPERIMENTS IN LABORATORY

3.1. Laboratory Samples

Two concrete samples ($300 \times 300 \text{ mm}^2$) have been manufactured (Fig 2.). The defects are simulated by replacing the adhesive material by a TEFLON® disc (0.5 mm thick) between the concrete surface and the carbon/epoxy laminate. The CFRP used was a wrap.



Sample n°1

Sample n°2

Fig. 2. Schematic view of laboratory samples

Sample n°1 contains four different discs (of diameters 40, 30, 20 and 10 mm). Sample n°2 contains four identical discs ($\varnothing = 40 \text{ mm}$) drilled with different percentages of small holes to simulate different qualities of the adhesive.



Fig. 3. View of laboratory samples realized

On the other hand another sample was realized with three size of defects (TEFLON® disks) located at different depths. Fig 4. and Fig. 5. show a schematic view of the inserted defects between CFRP layers (pre-cured unidirectional laminate sheets).

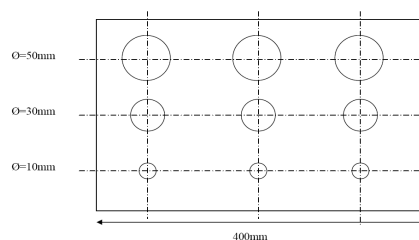


Fig. 4. Front view scheme of sample n°3

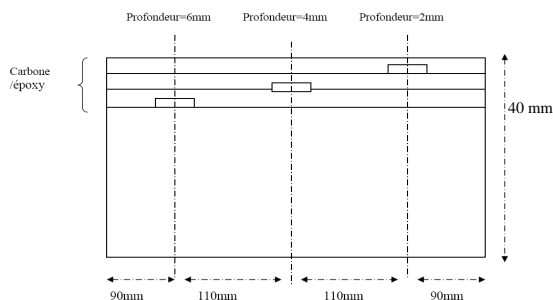


Fig. 5. Vue en coupe de l'échantillon n°3

La figure 6 présente une vue de cet échantillon réalisé en laboratoire.



Fig. 6. Echantillon en béton renforcé avec trois couches de composites en lamelles

3.2. Essais en laboratoire

Le banc d'essai utilisé sur les échantillons 1 et 2 (Fig. 7) se compose de deux lampes halogènes de 500 W. Une troisième de 300 W peut cependant être ajoutée.



Fig. 7. Vue du banc d'essai en laboratoire

Les durées des créneaux d'excitation thermique étaient de 5, 10 et 60 s, la densité de flux thermique étant supposée constante. Deux caméras infrarouges ont été utilisées : une caméra FLIR A320 équipée d'un détecteur matriciel non refroidi de type microbolométrique dans la bande ondes longues (7.5-13 μm) et une caméra CEDIP Jade 3 équipée d'un détecteur matriciel refroidi en InSb dans la bande ondes moyennes (3-5 μm).

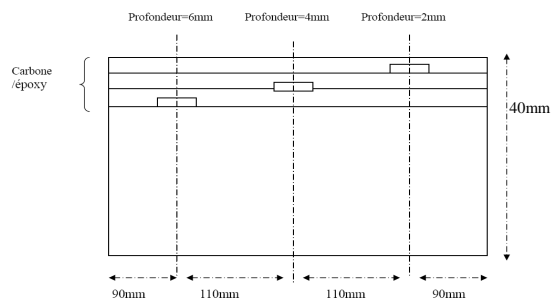


Fig. 5. Lateral view scheme of sample n°3

Fig 6 presents a view of the sample realized for laboratory experiments.



Fig. 6. Concrete specimen reinforced with bonded CFRP plates (3 layers)

3.2 Laboratory experimentation

The experimental step heating bench for testing samples 1 and 2 (Fig. 7) uses two halogen lamps of 500 W and a third one of 300 W can also be added on the bench.



Fig. 7. View of the step heating test bench

The step heating phase lengths were of 5, 10 and 60 s. The heat flux density of the excitation during trials was assumed to be constant. Two infrared cameras were used during trials. These infrared cameras were a FLIR A320 un-cooled Long Wave band microbolometer Focal Plane Array and a CEDIP Jade 3 cooled InSb Focal Plane Array in Medium Wave Band. Each one has 320 x 240 sensitive elements.

Les caméras étaient équipées d'un détecteur matriciel de 320 x 240 éléments.

Pour le troisième échantillon les excitations thermiques ont été réalisées par une couverture chauffante industrielle. Seule la phase de relaxation thermique pouvait alors être suivie et analysée en raison de l'opacité de la couverture dans le spectre infrarouge. La caméra utilisée n'était pas positionnée sur un pied photo.

3.3. Localisation des défauts

Un exemple de localisation de défauts par thermographie de phase pulsée est présenté sur les figures 8 et 9.

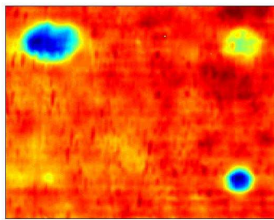


Fig. 8. Carte des phases à $f = 1.10^{-2}$ Hz pour une durée de créneau de 60 s sur l'échantillon n°1

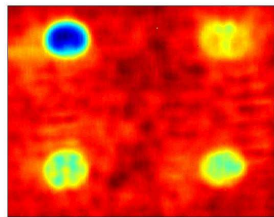


Fig. 9. Carte des phases à $f = 1.10^{-2}$ Hz pour une durée de créneau de 60 s sur l'échantillon n°2

Pour l'échantillon n°1, les défauts de 40 et 30 mm de diamètre peuvent être facilement localisés de même que celui de 20 mm. Le plus petit (diamètre 10 mm) est plus difficile à détecter. Pour l'échantillon n°2 les quatre défauts sont facilement détectés et le niveau des déphasages pour chaque défaut est en accord avec leur pourcentage de vide respectif.

L'analyse des cartes d'amplitudes conduit à un même constat. Une analyse par décomposition sur une base de polynômes ou en valeurs singulières permettrait d'obtenir des résultats similaires mais en réduisant le nombre de cartes à analyser.

Cependant, une attention particulière doit être portée lors du chauffage.

La figure 10 présente deux images thermiques acquises après enlèvement de la couverture chauffante sur l'échantillon n°3.

For the third sample a heating blanket was used in laboratory to generate the thermal solicitation. In that case only the thermal relaxation phase can be analysed due to the infrared opacity of the blanket in the infrared spectrum. In that case infrared camera was not skewed on a pod.

3.3 Localization of defects

Example of results for defects localization on samples 1 and 2 using pulse phase thermography analysis is provided in Fig 8 and Fig 9.

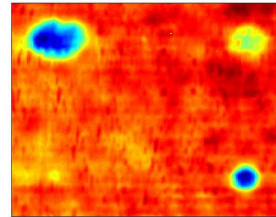


Fig. 8. Phase maps at $f = 1.10^{-2}$ Hz for a pulse heating duration of 60 s on Sample n°1

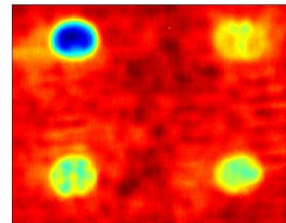


Fig. 9. Phase maps at $f = 1.10^{-2}$ Hz for a pulse heating duration of 60 s on Sample n°2

For sample 1 defects of 40 and 30 mm are easily detected even the 20 mm diameter defect. The smallest one (diameter 10 mm) is more difficult to detect. For sample 2 the fourth defect are easily detected and the range of the phase values for each defect is in agreement with percentage of vacuum of each one.

Magnitude maps drives to similar results. Furthermore, analysis by using polynomial interpolation approach or singular value decomposition drives to similar results but with fewer maps to be analysed.

Nevertheless care must be taken when heating the surface, for instance Fig. 10 shows two thermal images obtained after retrieving the thermal blanket on sample 3.

L'image du haut a été acquise juste après avoir enlevé la couverture et celle du bas 52 s après. Ces images permettent d'observer la non homogénéité de la chauffe lors de cet essai.

The upper one was taken just after leaving the blanket and the lower one 52 s after. One will notice the non homogeneity of the heating in this example of experiment.

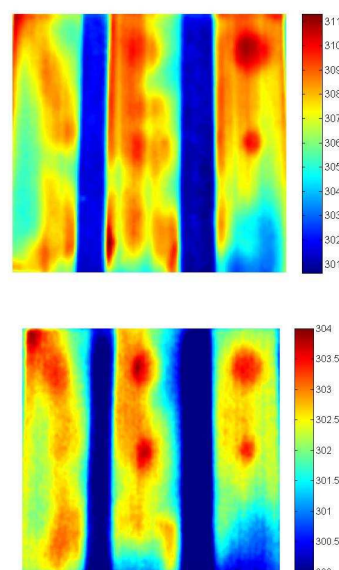
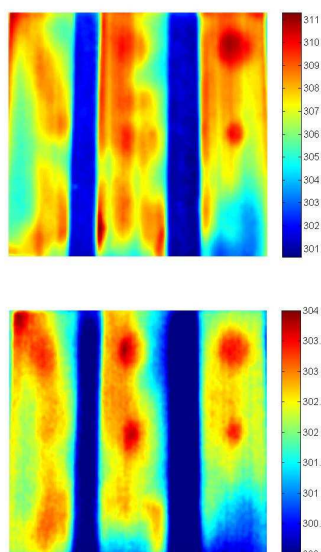


Fig. 10. Images thermiques en début de relaxation et après 52 s.

Fig. 10. Thermal images at the beginning of thermal relaxation and after 52 s.

La figure 11 présente le résultat obtenu en utilisant la décomposition en valeurs singulières d'une séquence d'images thermiques acquise sur l'échantillon n°3.

Fig. 11 presents results obtained by Singular Value Decomposition applied on thermal images sequence acquired on sample n°3.

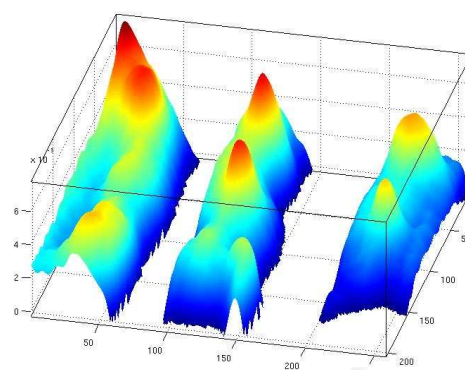
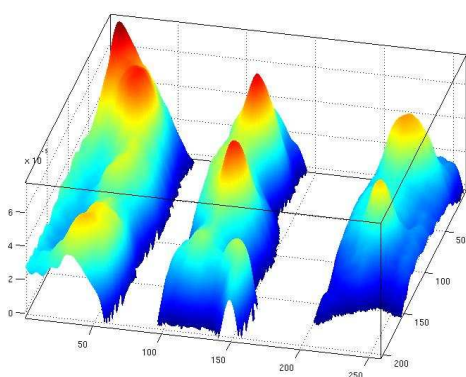


Fig. 11. Vue 3D d'une carte d'une fonction empirique orthogonale obtenue sur l'échantillon n°3

Fig. 11. 3D view of an Empirical Orthogonal Function Map obtained for Sample n°3

L'utilisation de cette approche lors de l'analyse des séquences d'images thermiques acquises permet de restreindre significativement le nombre de cartes à analyser pour détecter les défauts. De plus, la décomposition en valeurs singulières permet dans ce cas de corriger en partie les effets de non homogénéité du chauffage.

The use of such approach for analysing the sequence of thermal images acquired drives to fewer images to be analysed to localize defect. Furthermore, singular value decomposition in that case partly corrects effects of the non homogeneity of the previous heating.

4. ESSAIS IN SITU

Le transfert de l'approche précédente sur le terrain a été réalisé lors du contrôle du chantier de renforcement par collage de composites sur le pont de Toutry. Une illustration de ce chantier est présentée sur la figure 12.



Fig. 12. Renforcement du pont de Toutry

La figure 13 illustre la procédure d'inspection *in situ* utilisant une caméra infrarouge portable non refroidie couplée à une excitation thermique par lampe infrarouge.



Fig. 13. Inspection par thermographie infrarouge

La figure 14 présente des vides d'air détectés par thermographie infrarouge sous les couches des composites. La détection de défauts a été conduite par analyse visuelle des images.

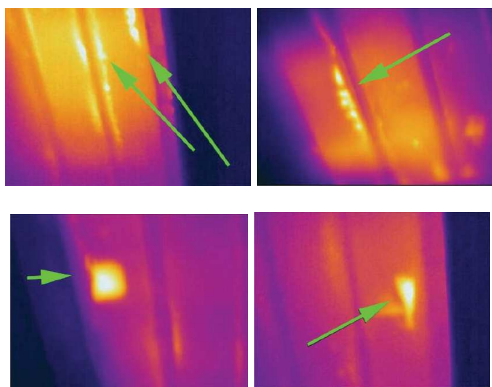


Fig. 14. Exemple de vides d'air détectés en sous face des lamelles composites

Le deuxième exemple d'auscultation, présenté ci-après, concerne un tissu en fibre de carbone collé sur un élément de structure. Le même protocole d'inspection a été utilisé. La figure 15 montre la configuration géométrique de la zone inspectée. L'excitation thermique a également été réalisée avec une lampe infrarouge.

4. IN SITU TESTING

The transfer of this innovative method into the field application was accomplished during the control of the CFRP strengthening of the Toutry viaduct. Fig 12 shows an illustration of the Toutry bridge and of the reinforcement in progress.



Fig. 12. view of Toutry bridge under reinforcement

Illustration of the *in situ* inspection procedure tested is presented in Fig. 13. It leaned on the use of an uncooled infrared camera coupled with a thermal excitation realized with an infrared lamp.



Fig. 13. Illustration of the *in situ* infrared survey

Results of IR imaging showing air voids between multiple plies are presented in Fig. 14. In that case analysis was done by visual analysis of thermal images acquired.

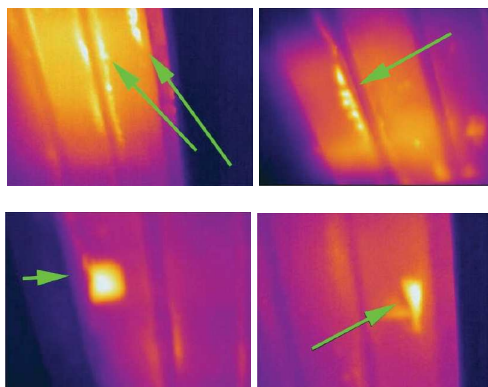


Fig. 14. Example of air void detected on glued CFRP plates

A second example of survey for a glued CFRP wrap on part of a civil engineering structure is presented hereafter. Same inspection procedure was used. Fig. 15 shows the geometrical configuration of the area controlled. The thermal solicitation is also obtained with an infrared lamp.

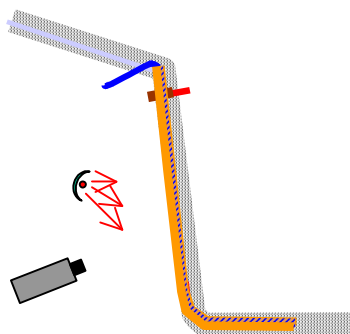


Fig. 15. Représentation schématique de la zone inspectée

Deux exemples de défauts détectés sont représentés sur la figure 16.

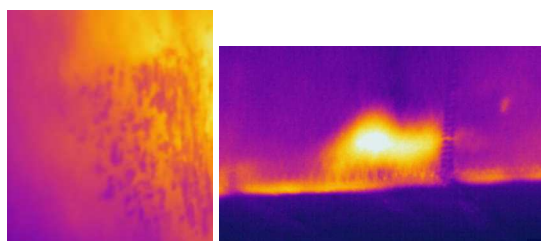


Fig. 16. Images thermiques des défauts

L'image de gauche correspond à un défaut d'enrobage et celle de droite à un vide d'air.

5. CONCLUSION

Les essais conduits en laboratoire ont permis de démontrer l'intérêt de la thermographie infrarouge active pour détecter la présence de défauts de collage de composites sur une structure en béton. De plus, il est possible à partir des séquences d'images thermiques, acquises sous sollicitation thermique puis en phase de relaxation, de caractériser les défauts détectés.

En ce qui concerne la mise en œuvre sur le terrain, les contrôles réalisés ont permis d'améliorer la procédure d'installation des renforts, en portant une plus grande attention au marouflage des plats. En effet, le contrôle par thermographie infrarouge peut être réalisé avant réticulation de la résine. Dès lors, un traitement approprié des défauts constatés peut être réalisé.

L'état d'avancement des travaux conduits dans ce domaine permet d'envisager dans un futur proche une large utilisation de la thermographie infrarouge active pour le contrôle du renforcement de structures par collage de composites.

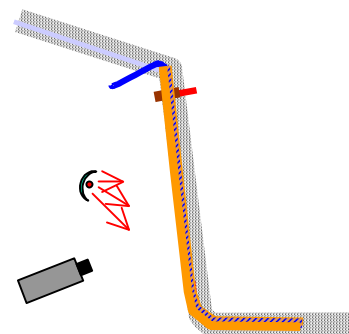


Fig. 15. Schematic representation of the survey area by active infrared thermography

Two examples of defects detected are presented in Fig. 16.

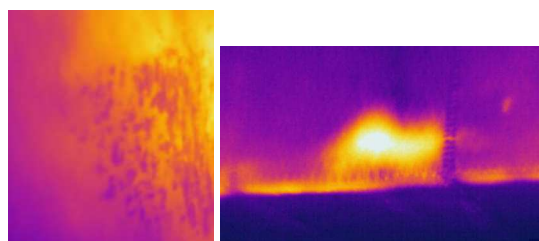


Fig. 16. Thermal images showing defect

The left image matches a wrapping defect and the right image matches a gluing defect.

5. CONCLUSION

Trials made in laboratory have permitted to demonstrate the interest of active infrared thermography for CFRP bonding defect detection on structures. Furthermore, using sequence of thermal images, acquired during thermal solicitation and during thermal relaxation, it is possible to detect and characterize sub surface defects.

About in situ trials, control realised have permitted to enhance the protocol of application during reinforcement, in particular by paying attention to remount of CFRP plates. Indeed, infrared thermography survey can be done before resine reticulation. So, defects identified can be cured by an adapted treatment.

As a perspective, works undergone in this field make us confident in considering in a close future the active infrared thermography as a widely usefull tool for nondestructive evaluation of CFRP strengthened concrete structures.

6. RÉFÉRENCES / REFERENCES

- [1] 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.
- [2] AFGC. (2007). "Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites – Recommandations provisoires", Bulletin scientifique et technique de l'AFGC. (in French).
- [3] Fib Task Group 9.3. (2001) Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, fib bulletin 14, Lausanne, Switzerland.
- [4] Maldague, X.P.V. "Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing", John Wiley & sons Inc., 2001
- [5] Ibarra-Castanedo C., González D., Klein M., Pilla M., Vallerand S., Maldague X., "Infrared Image Processing and Data Analysis" Infrared Physics and Technology, vol 46, n 1-2, pp 75-83, 2004.
- [6] Balageas D. Déom A. & Boscher D. (1987), Materials Evaluation, vol. 45, pp 461.
- [7] Rajic N., "Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures", Composite Structures, vol 58, pp 521–528, 2002.