

Détection d'endommagement de structures en matériaux composites CFRP par vibrothermographie

P. Demy⁽¹⁾, J-C. Golinval⁽¹⁾, D. Simon⁽²⁾

*(1) Université de Liège, Département d'aérospatiale et mécanique,
Bât. 52/3, LTAS - Vibrations et identification des structures,
chemin des Chevreuils 1
4000 Liège, Belgique.*

(2) V2i, 4 Boulevard de Colonster, 4000 Liège, Belgique.

1. Introduction

La vibrothermographie (VT) est une technique de thermographie active basée sur le fait que, sous l'action de vibrations mécaniques induites dans une structure, les défauts peuvent se comporter comme des sources de chaleur internes suite à leur interaction avec les ondes élastiques. Ces vibrations peuvent être générées notamment par un excitateur piézoélectrique. La dissipation d'énergie au niveau des singularités liées à la présence de défauts est détectable par une caméra thermique infrarouge. Parmi les mécanismes physiques sous-jacents du phénomène, on relève essentiellement les pertes par friction et hystérésis plastique [1,2]. Des recherches plus approfondies prenant en compte divers facteurs comme les non linéarités de couplage font actuellement l'objet de divers travaux afin de mieux comprendre le phénomène et d'améliorer la fiabilité de la méthode [3,4].

L'objectif de cet article est l'évaluation des potentialités de la vibrothermographie, menée sur différents échantillons en matériaux composites CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) utilisés en aéronautique. La technique est prometteuse dans le domaine des essais non destructifs (CND), et apporte une complémentarité aux méthodes conventionnelles utilisables sur ce type de matériaux, comme la radiographie X, les ultrasons ou encore l'interférométrie de speckle [5]. En effet, avec la VT, la détection de défauts est indépendante de leurs orientations dans le spécimen. De plus, des défauts internes relativement profonds peuvent être détectés, y compris sur des échantillons de géométries complexes. C'est pourquoi la VT est particulièrement utile pour la détection de fissures et de délaminations dans les CFRP [6]. Une comparaison expérimentale avec des résultats obtenus par thermographie pulsée optique (stimulation thermique par lampes chauffantes) est également présentée.

2. Expérimentation

L'excitation vibratoire est réalisée par un shaker piézoélectrique de type Wilcoxon modèle F7. Les tests suivants ont été menés sous excitation sinusoïdale pure. La tête du shaker est directement collée au moyen d'une colle cyanoacrylate sur un morceau de Kapton adhésif appliqué sur l'échantillon. Il n'y a pas de point de fixation, ce qui assure que l'énergie vibratoire injectée dans la pièce reste dans celle-ci. En outre, le contact rigide avec le shaker permet d'éviter le phénomène de chaos acoustique, rendant le test facilement reproductible car on élimine ainsi les non-linéarités de couplage [7,8].

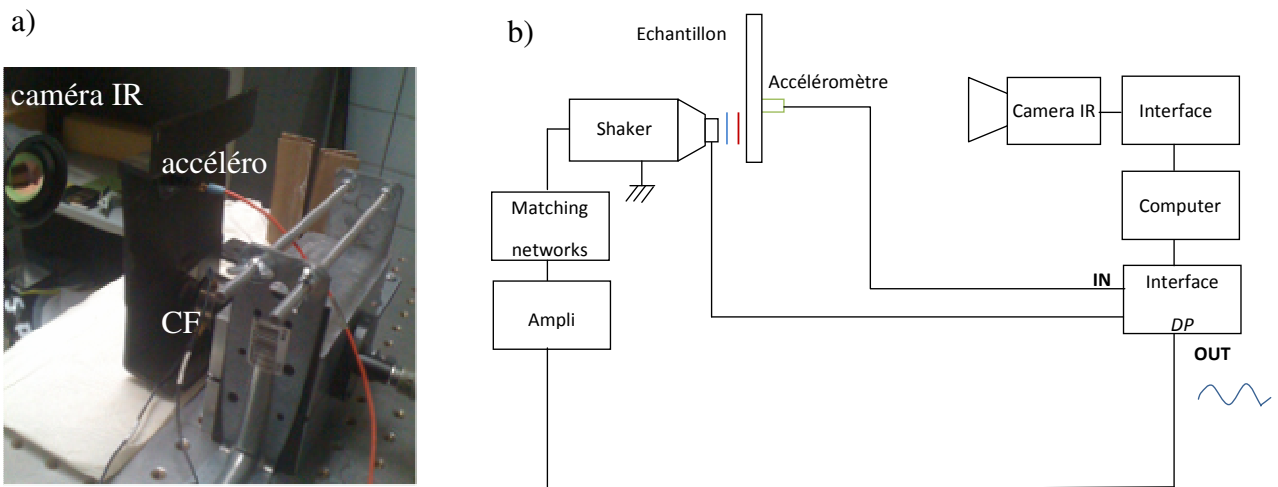


Figure 1
Configuration du banc d'essai VT
a) banc de montage b) schéma du setup VT

Les signaux vibratoires fournis par un ou plusieurs accéléromètres collés sur la pièce et le capteur de force (CF) intégré dans la tête du shaker permettent de récolter les fonctions de réponses en fréquences (FRF) par un analyseur de Fourier via l'interface Data Physics (Cf. Figure 1).

Une caméra infrarouge FLIR (caractéristiques: 320 x 240 pixels, NEDT = 80 mK, Frame rate : 25 Hz) réalise les acquisitions thermiques traitées sous Matlab au moyen d'un logiciel spécifique IR-View. Des traitements d'images de type FFT (Fast Fourier Transform) ou PCT (Principal Component Thermography) sont systématiquement réalisés afin de faciliter l'interprétation humaine des images thermographiques obtenues. Les performances de chacun des traitements sont variables en fonction des caractéristiques de l'enregistrement IR. Suivant la variabilité des indications, leur taille, l'importance des phénomènes parasites (reflets,...), l'un sera plus efficace que l'autre.

3. Résultats et discussions

Nous présentons les résultats expérimentaux obtenus par vibrothermographie sur une plaque comportant un défaut d'impact de 20 Joules en son centre (Cf. Figure 2 et 3), ensuite sur une pièce de géométrie complexe de type profilé-caisson présentant quelques défauts de surface et un raidisseur central endommagé (Cf. Figure 5). Enfin une comparaison entre les résultats obtenus en VT et thermographie pulsée optique par réflexion (PT) sur une plaque comportant divers défauts de délaminage calibrés à différentes profondeurs est réalisée (Cf. Figure 6). Les résultats obtenus sur ces différents échantillons en matériaux composites CFRP sont discutés ci-après.

Premièrement, le rapport signal/bruit (SNR) détecté augmente avec le temps, ce qui rend la VT appropriée pour la détection de défauts de petites tailles (micro-cracks) et/ou profonds. La partie initiale de pente nulle de la courbe du SNR correspond à la durée de propagation du front thermique avant d'émerger en surface (Cf. Figure 2). Elle dépend des propriétés thermiques du matériau comme la diffusivité. Plus la fréquence d'excitation est élevée, plus les mécanismes de génération de la chaleur par frottement et hystérésis sont importants, à condition d'exciter une fréquence de résonance locale du

défaut. Ces fréquences particulières correspondent aux pics d'échauffement obtenus sur une série d'essais compris entre 12 et 20 kHz par pas de 500 Hz (Cf. Figure 3). On peut considérer la région d'un décollement ou d'un délaminage dans une pièce comme une zone indépendante, capable d'entrer en résonance pour des fréquences beaucoup plus élevées que les modes de résonance globaux du spécimen. Il est possible de prendre en compte chaque face du défaut comme une plaque dont les côtés sont encastrés (Cf. Figure 4). Ce modèle de résonance locale a été validé par S.S. Lin et E.G. Henneke par confrontation d'un modèle théorique et d'expérimentations menées sur des calibres en fibres de verre [9]. Les fréquences de résonance sont fonction de la morphologie du défaut et des caractéristiques de l'échantillon. Pour celui-ci, nous avons relevé les fréquences de 15 kHz, 17.5 kHz et 19.5 kHz

Ensuite, la VT permet de mettre en évidence des défauts sur des surfaces perpendiculaires à celle de l'inspection. Le renfort déchiré, situé du côté du bord sain est repérable par une zone d'échauffement observée en surface par la caméra IR. Des microfissures d'orientations diverses dans la résine époxy sont également détectées sur le bord non régulier (Cf. Figure 5). D'autres défauts non calibrés, parallèles à la surface d'inspection sont localisés. Le défaut n°2 est bien visible à la fréquence de 14,5 kHz. Le défaut n°1 est perceptible. Le défaut n°3 a été mis en évidence à la fréquence de 14 kHz et le défaut n°4 reste invisible en dessous de 20 kHz (limite supérieure du shaker). Il convient de signaler que le shaker était appliqué sur la face opposée à celle présentant des défauts. Dans le cas délicat, pour certaines techniques d'essais non destructifs, où le défaut est fermé et perpendiculaire à la surface d'inspection, des études ont montré que la technique restait applicable [8].

Enfin, la profondeur d'inspection est moins limitative qu'en thermographie pulsée optique (PT). Dans un panneau en CFRP avec défauts calibrés en taille et profondeur, tous les défauts d'inclusion de type Flash Breaker (bande autocollante) jusqu'à 2mm de profondeur sont détectés sans aucune difficulté en VT, contrairement à la PT (Cf. Figure 6). Remarquons que seuls des défauts dont les faces libres peuvent rentrer en contact sous l'action vibratoire sont détectables, ce qui est normalement le cas d'un délaminage réel. Cette condition n'est pas rencontrée avec les autres types d'inclusions (film séparateur et polyéthylène). Le détail des contours est plus précis en PT, ce qui s'explique par la différence des phénomènes physiques à l'origine des contrastes thermiques observés en surface. Ces deux techniques de thermographie active présentent des caractéristiques complémentaires.

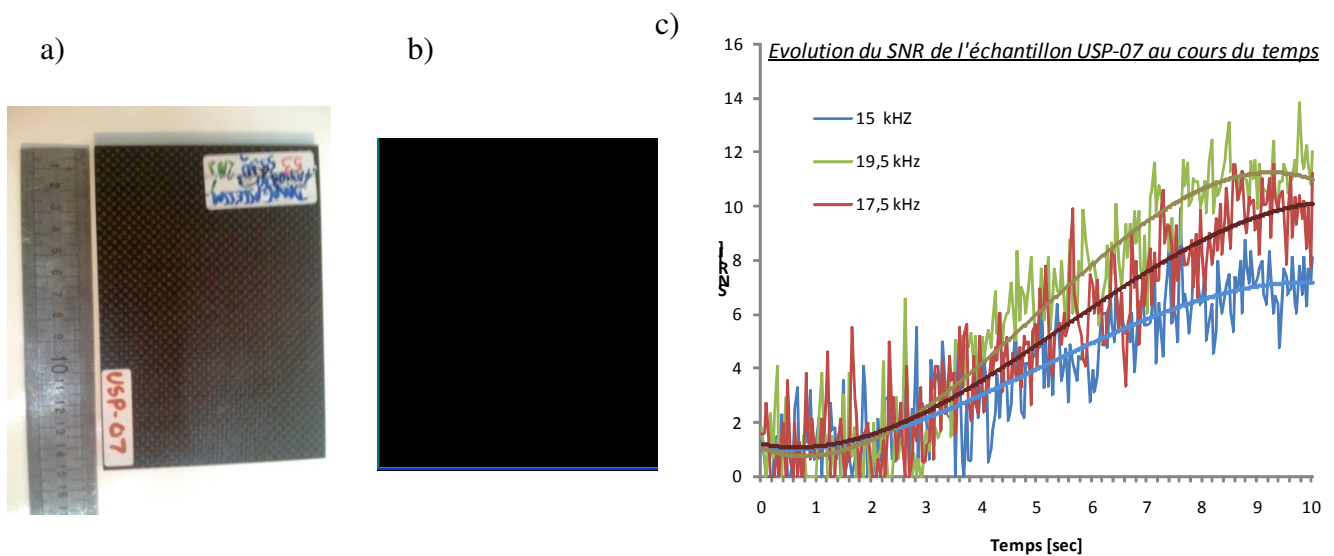


Figure 2

Plaque CFRP avec délaminage au centre (défaut d'impact de 20 Joules)

a) échantillon b) image IR c) SNR pour des fréquences de résonances locales de 15, 17.5 et 19.5 kHz

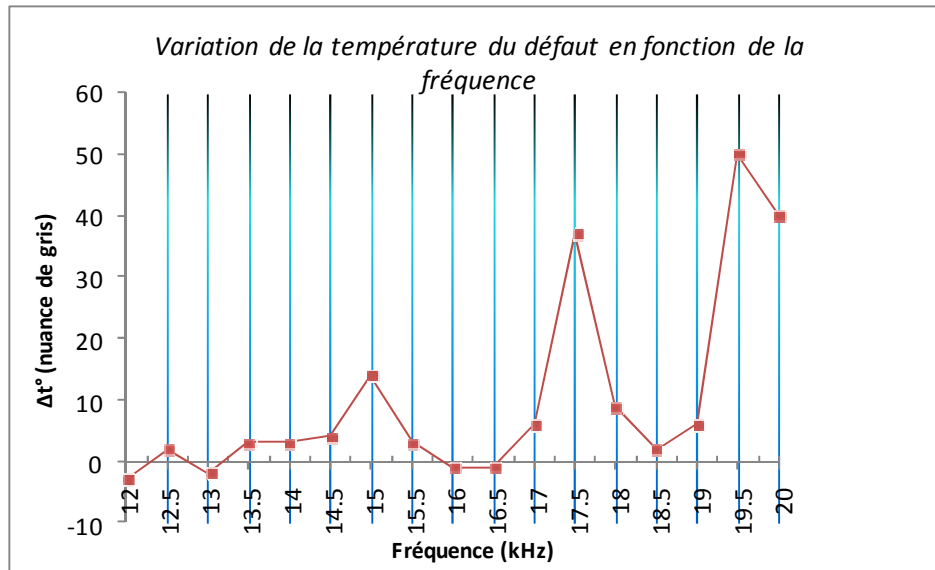


Figure 3
Mise en évidence de résonances locales du défaut de délaminage.

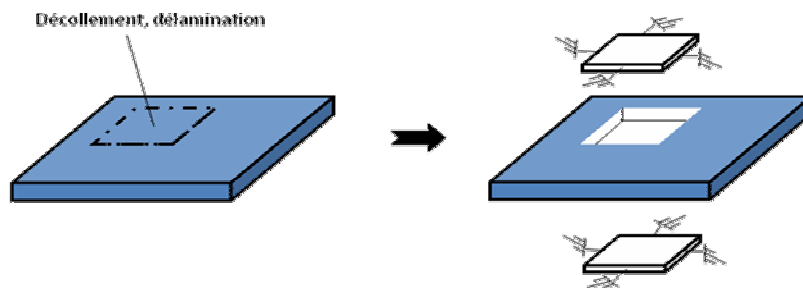


Figure 4
Modèle de résonance locale

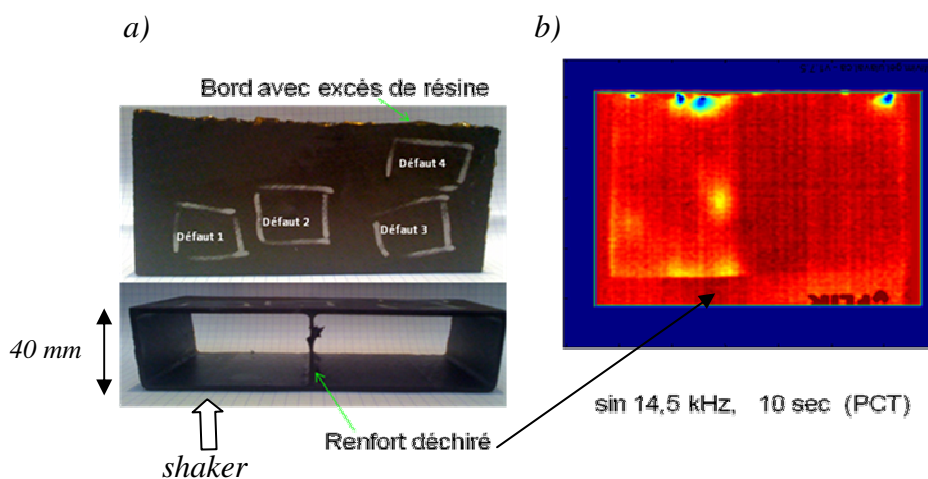


Figure 5
CFRP endommagé de géométrie complexe (délaminages par coups de marteaux)
a) profilé caisson (vues en plan et de profil) b) image IR (vue en plan)

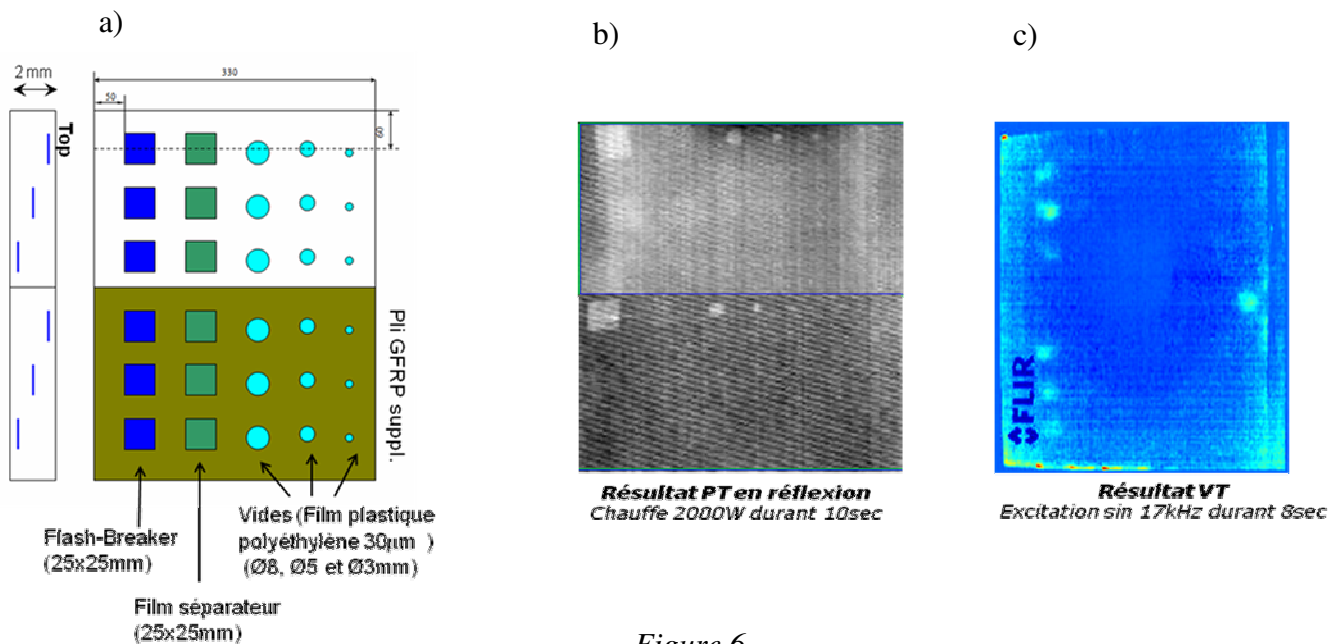


Figure 6
CFRP avec défauts calibrés de natures, de dimensions et de profondeurs différentes.
 a) calibre CFRP b) image IR en PT c) image IR en VT

4. Conclusions

La technique de vibrothermographie présente des caractéristiques peu communes dans le domaine des contrôles non destructifs.

Le rapport signal/bruit (SNR) du défaut augmente avec la durée de l'essai, ce qui rend la méthode appropriée pour la détection de défauts de petites tailles (micro-cracks) et/ou profonds. Elle possède une profondeur d'inspection plus importante que les autres techniques de thermographie active et est particulièrement apte à révéler les défauts fermés. Les techniques de thermographie optique et vibrothermographie présentent des caractéristiques complémentaires. En outre, la vibrothermographie s'applique également à tout type de matériaux comme les matériaux métalliques ou céramiques [10]. Le contrôle des géométries complexes ne pose pas de problème spécifique.

5. Bibliographie

1. J. RENSHAW, S. HOLLAND & R.B. THOMPSON, « Measurement of crack opening stresses and crack closure stress profiles from heat generation in vibrating cracks », Applied Physics letters, vol. 93, pp. 081914, 2008.
2. F. MABROUKI, M. THOMAS, M. GENEST & A. FAHR, « Frictional heating model for efficient use of vibrothermography », NDT&E International, vol 42, pp. 345–352, 2009.
3. A. SABOKTAKIN, C. IBARRA CASTANEDO, A. BENDALA & X. MALDAGUE, « Finite Element Analysis of heat generation in ultrasonic thermography », Proceeding 10th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Québec, 2010.
4. M. MORBIDINI & P. CAWLEY, « Reliable crack detection in thermosonics NDE », Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 27, pp 536-543.

5. A.K. MAJI, « Review of Noninvasive Techniques for Detecting Microfracture», Elsevier Science Inc., pp 201-209, 1995.
6. L.D. FAVRO, X. HAN, Z. OUYANG, G. SUN & R.L. THOMAS, « Sonic IR Imaging of Cracks and Delaminations », Analytical Sciences, vol. 17 Special Issue, 2001.
7. X. HAN, W. Li, Z. ZENG, L.D. FAVRO & R.L THOMAS, « Acoustic Chaos and Sonic Infrared Imaging», Applied Physics Letters, vol. 81, n°17, pp. 3188-3190, 2002.
8. S.M. SHEPARD, T. AHMED & J.R. LHOTA, « Experimental Considerations in Vibrothermography », Proceeding SPIE Thermosense, 2004.
9. S.S. LIN & E.G. HENNEKE, « Analytical and Experimental Investigations of Composites Using Vibrothermography », Composite Materials: Testing and Design, vol. 9, pp. 417-434, 1990.
10. M. MORBIDINI, P. CAWLEY, T. BARDEN, D. ALMOND & P. DUFFOUR « Prediction of the thermosonic signal from fatigue cracks in metals using vibration damping measurements », Journal of Applied Physics, vol. 100, pp. 104905, 2006.