

# Evaluation quantitative de l'amélioration apportée par la méthode TSR à la détection de défauts par thermographie stimulée impulsionnelle. Cas d'un patch composite instrumenté.

Daniel BALAGEAS\*, Bastien CHAPUIS, Geoffrey DEBAN, Françoise PASSILLY

ONERA, Département Matériaux et Structures Composites, BP 72, 92322 Châtillon

(\*auteur correspondant : balageas@onera.fr)

**Résumé** - La méthode TSR (Thermographic Signal Reconstruction) est utilisée en évaluation non destructive par thermographie stimulée impulsionnelle pour améliorer la détection des défauts. On évalue quantitativement cette amélioration dans le cas d'une structure complexe, représentative des applications pratiques : un patch composite de réparation instrumenté de transducteurs PZT contenant un défaut artificiel. Le rapport signal à bruit caractérisant la détectabilité de ce dernier est calculé et une stratégie de détection proposée.

## Nomenclature

$C_d$	contraste thermique $\Delta T_d - \Delta T_s, K$	$\Delta T(t)$	thermogramme normalisé
$Cr_d$	contraste relatif $(\Delta T_d - \Delta T_s)/\Delta T_s, K$	<i>Symboles grec</i>	
$L$	longueur caractéristique ; épaisseur de composite	$\alpha$	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
$(S/B)_d$	Rapport signal à bruit du défaut	$\sigma$	écart-type
$t$	temps, s	<i>Indices et exposants</i>	
$\Delta T$	échauffement normalisé, K	$d$	défaut
		$s$	zone saine

## 1. Introduction

La méthode TSR (Thermographic Signal Reconstruction), proposée par Shepard [1-4] est utilisée en évaluation non destructive par thermographie stimulée impulsionnelle. Elle consiste à effectuer une réduction polynomiale logarithmique du thermogramme impulsionnel et à utiliser les dérivées logarithmiques. Le thermogramme  $\Delta T(t)$  est ainsi remplacé par :

$$\log \Delta T = a_0 + a_1 \log(t) + a_2 (\log(t))^2 + \dots + a_n (\log(t))^n \quad (1)$$

Ce filtrage-lissage, particulièrement bien adapté aux réponses thermiques impulsionnelles, est parfois appelé "Logarithmic Fitting Adiabatic (LFA)" – voir [5]. Il permet :

- le remplacement de la série d'images constituant le "film" thermographique par une série de  $(n+1)$  images, conduisant à une très grande compression de données ;
- l'utilisation des dérivées logarithmiques du thermogramme,  $d \log \Delta T / d \log(t)$  et  $d^2 \log \Delta T / d \log(t)^2$  obtenues par dérivations successives du polynôme (1). Ces dérivations ont l'avantage de ne pas augmenter le bruit et d'effectuer une normalisation automatique.
- d'augmenter la détectivité des défauts par réduction du bruit temporel, augmentation du contraste entre zones saines et défectueuses, réduction des effets de conduction tridimensionnelle grâce à une détection plus précoce.

Malgré une littérature abondante, l'utilisation de la technique est restée plutôt qualitative, si l'on excepte des publications récentes [3,4], ce qui s'explique par le type d'application privilégié (CND) dans lequel une détectivité excellente est plus importante qu'une mesure précise. Dans ce contexte, cette étude, ainsi que celle présentée dans ce même congrès et focalisée sur la mesure de diffusivité flash en face avant [6], se veut résolument quantitative.

On a choisi d'appliquer la méthode à une structure complexe représentative d'applications pratiques : un patch composite instrumenté collé sur une structure aluminium. Il s'agit là d'un type de "réparation intelligente" objet d'études et réalisations en aéronautique et génie civil [7].

## 2. Structure testée

La pièce étudiée est présentée sur le schéma de la Fig. 1. On y trouvera toutes les détails des constituants de cette pièce et leurs dimensions. Le type de défaut artificiel créé dans cette structure est un trou traversant la sous-structure métallique. Il correspond approximativement à un décollement important de la réparation composite (résistance thermique de contact quasi infinie).

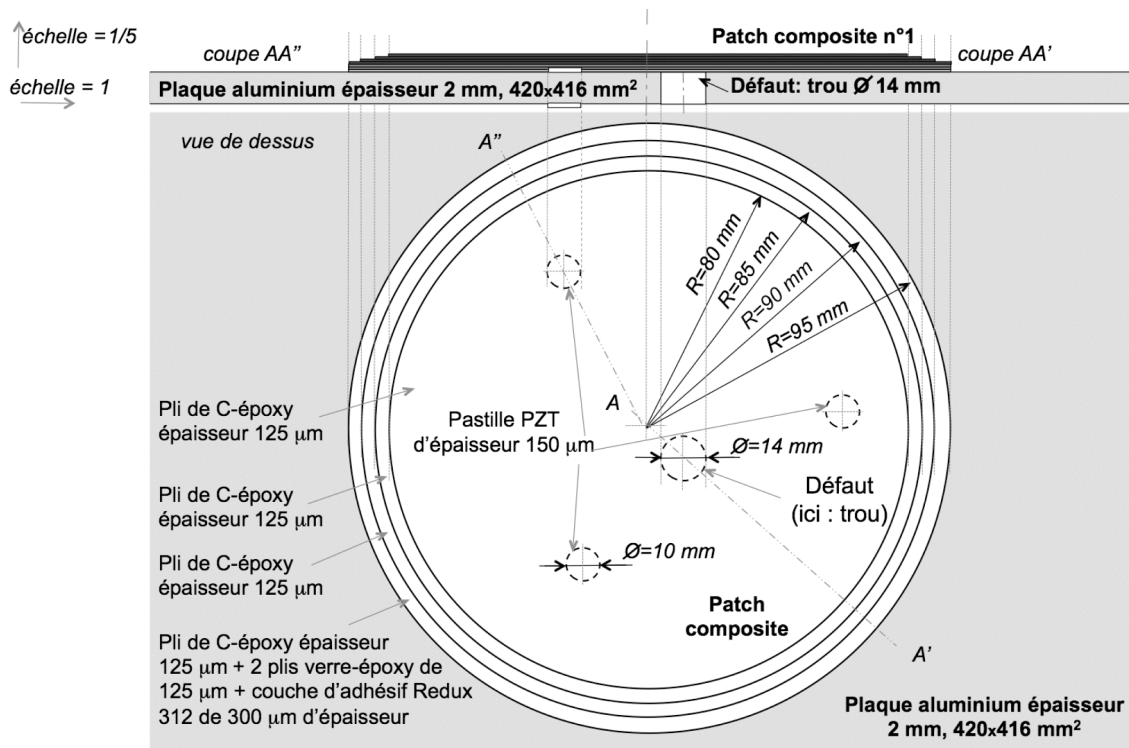


Figure 1 : Coupe schématique d'un patch représentatif d'une réparation intelligente avec un défaut artificiel (trou dans la plaque d'aluminium).

## 3. Méthode d'évaluation de la détectivité

Tant pour les thermogrammes normalisés que pour leurs deux premières dérivées (méthode TSR), on définit la détectabilité du défaut par un rapport signal à bruit, rapport du contraste entre zones défectueuse et saine à la dispersion entre les divers points de la zone saine. Le bruit est pris égal à l'écart type relevé dans une population de 16 points distribués dans la zone saine (voir Fig. 2a) et pour le contraste on considère la différence entre la température ou sa dérivée logarithmique première ou seconde au centre du défaut et la valeur moyenne des grandeurs correspondantes des 16 pixels choisis dans la zone saine de la structure.

## 4. Evaluation de la détectivité

Les thermogrammes normalisés (ici par la première image suivant l'impulsion) puis filtrés-lissés par régression polynomiale logarithmique et leurs dérivées des 16 points de la zone saine et du point central du défaut sont présentés aux Fig. 2b,c,d. Les courbes de la zone saine présentent une dispersion qui croît avec le temps et qui est amplifiée à chaque dérivation. Cette dispersion traduit un bruit spatial. En parallèle, les contrastes défaut/matériaux sains augmentent avec les dérivations.

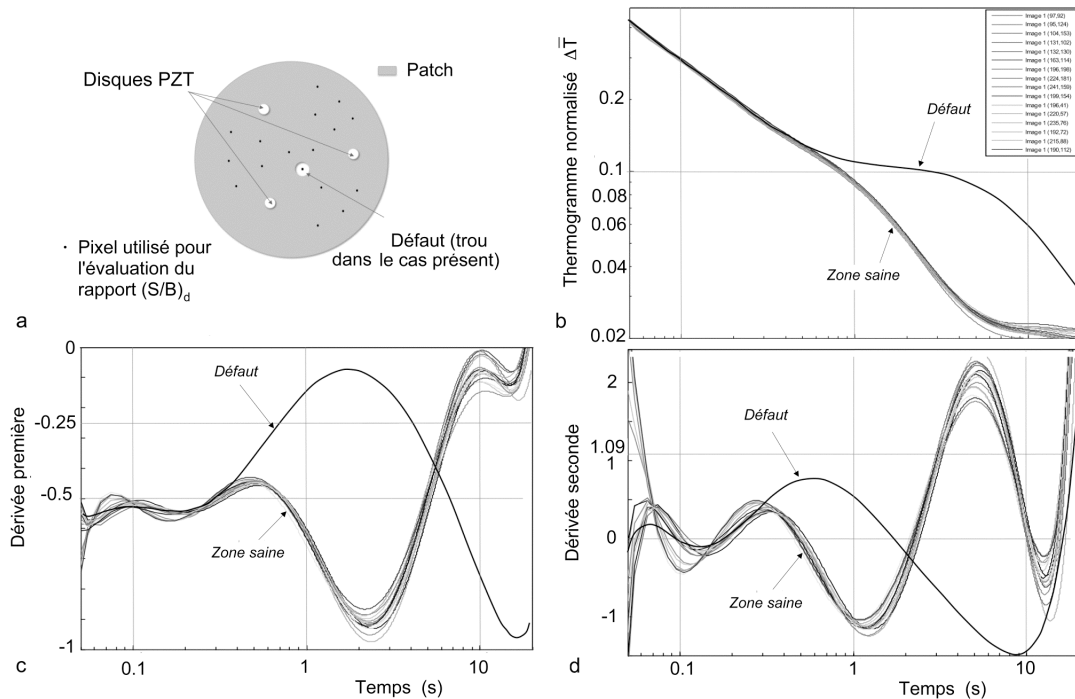


Figure 2 : a) Vue schématique d'un patch, montrant l'emplacement des pixels utilisés pour l'évaluation du rapport  $(S/B)_d$  ; b) Thermogrammes normalisés, après régression polynomiale logarithmique (méthode TSR) ; c) idem dérivées premières ; d) idem : dérivées secondes.

Les deux effets vont donc se contrarier au niveau du rapport signal à bruit, et il n'est pas évident que le maximum de contraste coïncide avec le moment optimal du point de vue de la détectivité. Les rapports  $(S/B)_d$  correspondant à ces courbes sont présentés sur la Fig. 3, ainsi que ceux correspondant à l'exploitation directe (sans régression polynomiale) des thermogrammes normalisés avec et sans utilisation du filtre passe-bas du logiciel Altair de la société CEDIP.

Les deux dernières courbes ainsi obtenues sont proches de celle correspondant aux thermogrammes filtrés/lissés par les polynômes logarithmiques, mais ils présentent un bruit important. Ce bruit temporel est bien filtré par la méthode TSR. Le filtrage passe-bas conduit à un rapport S/B maximal un peu supérieur à celui obtenu avec la méthode TSR (10% environ) mais n'apporte aucun mieux dans le domaine temporel intéressant [0.1 s - 1 s].

La comparaison des courbes de S/B obtenues après traitement TSR montrent que le rapport  $(S/B)_d$  maximum (environ 90 au temps 4 s) est obtenu par utilisation du thermogramme et non des dérivées. Pour des valeurs du temps inférieures à 3 s, par contre, les thermogrammes conduisent à des rapports S/B moindres que ceux obtenus avec les dérivées. En particulier, entre 0,4 s et 2 s, la dérivation améliore le rapport signal à bruit d'un facteur allant de 2 à 7. Or c'est dans ce domaine temporel que se trouvent les informations cherchées qui concernent les profondeurs ne dépassant pas l'interface colle/aluminium. Le très bon rapport  $(S/B)_d$  obtenu avec les thermogrammes est sans intérêt parce que trop influencé par la sous-couche métallique et trop contaminé par des effets de conduction 3-D.

On voit ainsi que fonder une stratégie d'identification sur une maximisation aveugle du contraste ou du rapport signal à bruit conduit à une impasse et qu'il faut lui préférer une optimisation basée à la fois sur la maximisation de ce rapport et de la précocité de son occurrence. Dans le cas présent on retiendra que les meilleurs moments pour effectuer des identifications se situent à 0,4 s avec les dérivées secondes et à 0,6-0,7 s avec les dérivées premières. Ces temps correspondent à une détection très précoce et ne coïncident pas avec les temps des maximums de contraste que montrent les courbes des figures 2c et 2d.

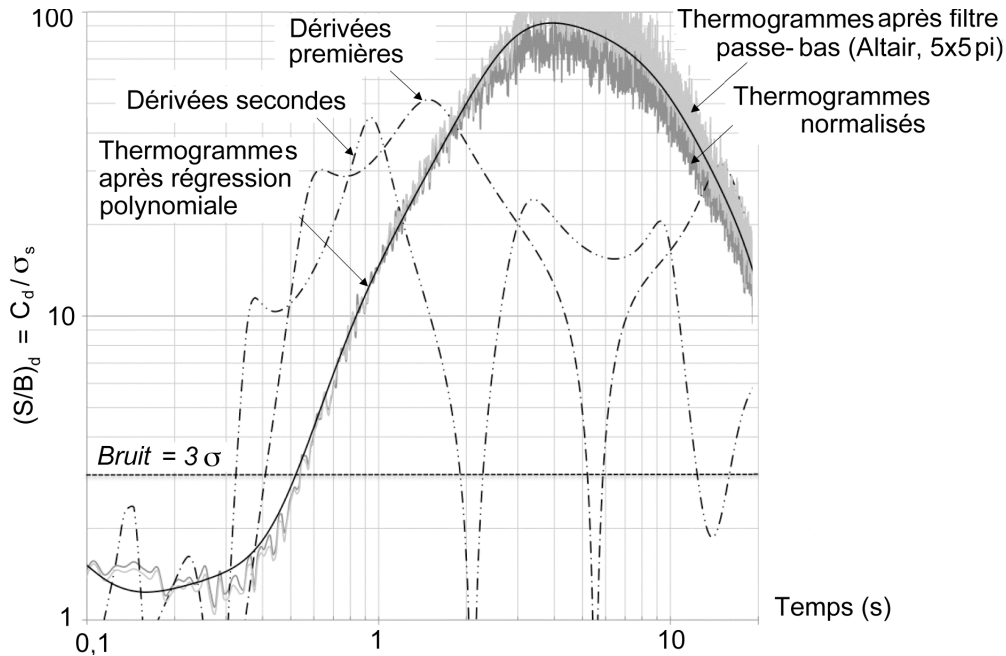


Figure 3 : Rapport  $(S/B)_d$  par la méthode TSR dans le cas du trou dans la plaque d'aluminium. Comparaison des rapport  $(S/B)_d$  obtenus à ceux résultant de l'exploitation directe des thermogrammes normalisés, avant et après filtrage passe-bas par le logiciel Altair/Cedip.

La figure 4 présente un panorama des images thermographiques prises aux temps des maximums de  $(S/B)_d$  : échauffements normalisés bruts, idem après régression polynomiale, dérivées première et seconde. On note des zones perturbées étendues autour de chaque pastille PZT qu'on n'analysera pas ici, mais on se concentrera sur la zone du défaut artificiel au centre de l'image. On constate :

- La fidélité des images obtenues par régression polynomiale par rapport aux images d'origine, avec une réduction du bruit qui apparaît progressivement au cours du temps.
- Pour le temps le plus court (0,355 s) l'absence de détection du défaut pour les images des thermogrammes et, au contraire, la détection rendue possible par les dérivations logarithmiques.
- Pour les temps suivants, la permanence de la présence du défaut pendant toute la séquence (et ceci jusqu'à la fin de l'essai de 20 s). Ceci est dû à la nature spécifique de la structure qui comprend une plaque d'aluminium de très grandes dimensions par rapport au patch et à la sévérité du défaut. A tous les temps ici présentés on constate un meilleur contraste défaut/zone saine environnante dans les images des dérivées.
- L'image des limites du défaut est d'autant plus nette que l'image est précoce. L'image la meilleure de ce point de vue est celle des dérivées secondes au temps 0,355 s. Elle permet une mesure précise du diamètre du trou. Avec les temps croissants, l'image du trou s'agrandit sous les effets de phénomènes thermiques tridimensionnels qui deviennent prédominants.

## 5. Interprétation quantitative des thermogrammes et de leur dérivées

Le trou, usiné dans l'aluminium et le joint de colle, se conduit comme un défaut de résistance infinie et on peut au début (contraste naissant) lui appliquer le modèle 1-D. La relation reliant contraste relatif naissant, diffusivité du matériau au-dessus du défaut et profondeur de ce défaut, utilisé en connaissant l'épaisseur des plis du composite, permet d'évaluer ici la diffusivité moyenne  $\bar{\alpha}$  de l'empilement (cette formule dont la démonstration est donnée dans les Réf. [8,9] est généralement utilisée pour identifier la profondeur d'un défaut connaissant la diffusivité du matériau) :

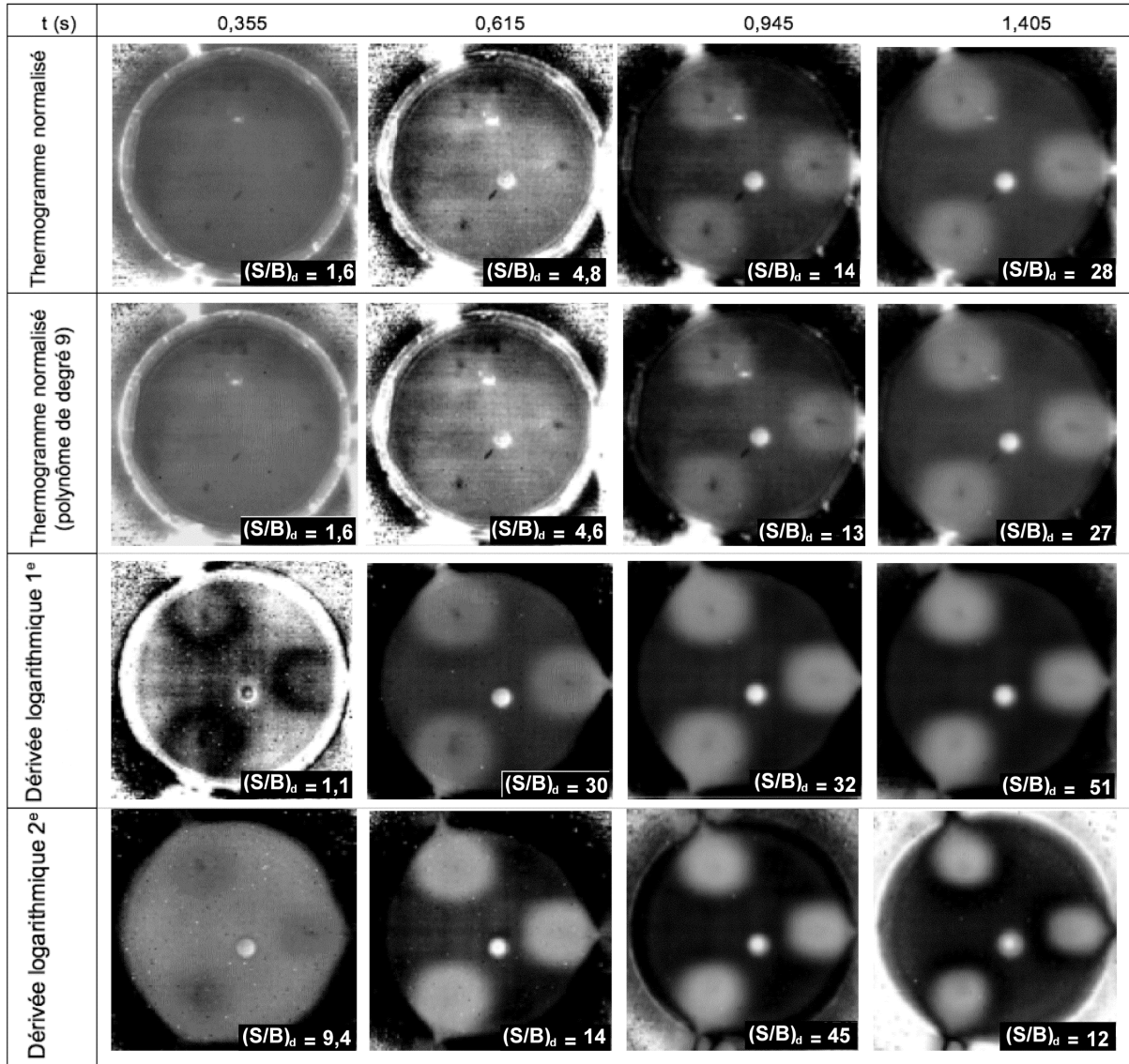


Figure 4 : Comparaison des images thermographiques obtenus par la méthode TSR pour les temps correspondant aux maxima de rapport  $(S/B)_d$ . Comparaison aux images brutes.

$$\bar{\alpha} = L^2 / [t \text{Ln}(2 / Cr_d(t))]. \quad (2)$$

On trouve ainsi, pour  $t = 0,8$  s, un contraste relatif de 14,5%, calculé à partir des thermogrammes filtrés-lissés par la méthode TSR (figure 2b), ce qui conduit, en considérant l'épaisseur totale de composite  $L = 750 \mu\text{m}$  à une diffusivité  $\bar{\alpha} = 2,64 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Cette valeur est identifiée à 5% près par cette formule (2) entre les temps 0,57 s et 1,17 s, soit pour des contrastes de 6 à 35%. On peut à partir des diffusivités, chaleurs volumiques et épaisseurs des deux composites données dans le Tabl. 1, calculer la conductivité équivalente de cet empilement à partir de sa résistance thermique, puis sa capacité thermique totale, et en déduire une diffusivité équivalente de  $2,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , corroborant parfaitement la valeur calculée à partir du contraste thermique du défaut. On peut se servir également du temps caractéristique  $t^*$  pour lequel la dérivée première passe par la valeur -0,25 (ce temps est égal à 0,70 s) pour déterminer la diffusivité équivalente à l'empilement des plis à l'aide de la formule (voir [6]):

$$\bar{\alpha} = L^2 / \pi t^* = 2,56 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}. \quad (3)$$

Cette valeur est en très bon accord avec celle trouvée à partir du thermogramme (écart de 3%). Le temps caractéristique  $t^*$  doit également correspondre théoriquement au maximum de la dérivée seconde (confère [6]). Il est égal ici à 0,605 s. Il conduit, en utilisant la même formule à une diffusivité un peu plus forte de  $2,66 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ .

Matériau	Diffusivité $\text{m}^2\text{s}^{-1}$	Chaleur spé. Vol. $\text{J m}^{-3}\text{K}^{-1}$	Conductivité $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Longueur caract. (m)	Temps diffusion $t^* = L^2/\pi\alpha$
C/époxy	3,13E-07	1,92E+06	6,00E-01	5,00E-04	2,54E-01
Verre/époxy	2,13E-07	1,55E+06	3,30E-01	2,50E-04	9,34E-02
Redux 312	1,70E-07	1,50E+06	2,50E+02	3,00E-04	1,69E-01
Aluminium	1,03E-04	2,43E+06	2,50E-01	2,00E-03	1,24E-02

Tableau 1: Propriétés thermiques de constituants du patch.

## 6. Conclusion

La méthode TSR a été appliquée avec succès à la détection du défaut artificiel introduit dans un patch de réparation composite. On a pu quantifier la détectivité de la méthode thermographique reposant sur la méthode TSR et vérifier les points suivants : i) importante réduction du bruit temporel, ii) amélioration de la détection visuelle par les dérivations logarithmiques, iii) amélioration de la précocité de la détection du défaut, ce qui est de première importance pour une caractérisation quantitative du défaut (localisation en profondeur et étendue) et n'est souvent pas suffisamment mis en avant. Il reste que ce défaut est particulier et d'une grande sévérité, ce qui, joint à la nature spécifique de la structure testée, conduit à des détectivités très grandes perdurant pendant une longue période, trait que l'on ne doit pas retrouver dans le cas de défauts plus subtils. Ceux-ci seront étudiés à l'avenir.

## Références

- [1] Shepard S.M., Ahmed T., Rubadeux B.A., Wang D., Lhota J.R., Synthetic processing of pulsed thermographic data for inspection of turbine components, *Insight*, Vol. 43, No 9, Sept. 2001, pp. 587-589.
- [2] Shepard S.M., "Flash Thermography of Aerospace Composites", *4<sup>th</sup> Pan American Conf. for NDT*, Oct. 2007, Buenos Aires, Argentina - <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/132.pdf>
- [3] Shepard S.M., Hou J., Lhota J.R., Golden J.M., "Automated processing of thermographic derivatives for quality assurance", *Opt. Eng.* Vol. 46, No 5, May 2007.
- [4] Shepard S.M., Lhota J.R., Ahmed T., "Measurement limits in flash thermography", SPIE Thermosense XXXI<sup>th</sup> Conference, *Proc. SPIE Conf. Vol. 7299*, 2009.
- [5] Vavilov V., *Nondestructive Testing Handbook*, Vol. 5, Book 1: Thermal/infrared testing, Spektr Publishing House, Moscow, 2009.
- [6] Balageas D., Mesure de diffusivité ou d'épaisseur par expérience flash en face-avant en utilisant l'approche TSR, *Actes Congrès Franç. Thermique 2010*, Le Touquet.
- [7] Chapuis B., Terrien N., Royer D., Déom A., Smart composite repairs using PZT discs as actuators/sensors, *Structural Health Monitoring 2008*, DEStech Publ. Inc., pp. 665-672.
- [8] Krapez J.-C., Balageas D., Déom A., Lepoutre F., "Early detection by stimulated infrared thermography", *Advances in Signal Processing for Nondestructive Evaluation of Materials*, X.V. Maldague Ed., Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1994, pp. 303-321.
- [9] Krapez J.-C., Balageas D., Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography, *QIRT 94*, Ed. Européennes Thermique et Industrie, Paris, 1994, pp. 260-266.