

Les images de coefficients de la méthode TSR (Thermographic Signal Reconstruction) : un moyen simple et efficace de détecter et imager les défauts

Daniel BALAGEAS^{1*}, Jean-Michel ROCHE², François-Henry LEROY²

¹Dépt. TREFLE, I2M de Bordeaux (UMR 5295)

Univ. Bordeaux, CNRS, Arts et Métiers ParisTech, F-33400 Talence, France.

² ONERA, Dept. Matériaux et Structures Composites, BP 72, 92322 Châtillon cedex

* (auteur correspondant : daniel.balageas@u-bordeaux1.fr)

Résumé – D’importants progrès en thermographie impulsionnelle ont été réalisés grâce à la méthode TSR. Dans un contexte d’amélioration de cette dernière, l’utilisation des images des coefficients des polynômes logarithmiques de filtrage-lissage est proposée pour détecter et imager les défauts d’une façon simple et rapide. Les résultats sont comparés, dans le cas du contrôle non destructif d’une plaque de C/époxy contenant des défauts artificiels, à d’autres méthodes éprouvées, démontrant l’efficacité de la méthode proposée.

Nomenclature

A_d	arête du défaut de forme carrée	z_d	profondeur d’un défaut, m
a_k	coefficient de rang k du polynôme	$\pm k/n$	étiquette de l’image des coefficients de rang k des polynômes de degré n
n	degré du polynôme de lissage		
$T, \Delta T$	température, échauffement, K	<i>Symboles grecs</i>	
t	temps, s	κ	diffusivité, m^2s^{-1}

1. Introduction

Grâce à quatre décennies de recherches pour améliorer la détectivité et la précision des caractérisations de défauts [1], la thermographie stimulée impulsionnelle est aujourd’hui la méthode la plus sophistiquée des méthodes de CND thermique [2]. La méthode dite TSR [3,4] en est la plus récente amélioration. Elle met le CND thermique au niveau des méthodes les plus employées, telles que les ultrasons, les rayons X, le ressuage ou les courants de Foucault. Cette technique est remarquable par ses performances en détection de défauts grâce à l’utilisation des dérivées logarithmiques qui produisent des images de défauts de bonne qualité. Cependant, la connaissance et l’expérience des transferts de chaleur restent pour l’utilisateur une nécessité pour optimiser le moment d’observation. Afin de simplifier la procédure d’obtention des images de défauts et d’en améliorer encore la qualité, une nouvelle approche est proposée, utilisant les seules images des coefficients des polynômes logarithmiques à l’aide desquels la méthode TSR effectue le filtrage-lissage des thermogrammes, première étape du traitement.

2. Rappel sur la méthode TSR

La méthode TSR consiste en:

- un **filtrage-lissage** des thermogrammes par des polynômes logarithmiques de degré n :

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

expression dans laquelle ΔT est l’échauffement du pixel (i,j) au temps t .

- une **compression des données** drastique par le remplacement du “film” thermographique des échauffements, $\Delta T(i,j,t)$, par les $(n+1)$ images des distributions spatiales des coefficients

$a_0(i,j), \dots, a_n(i,j)$ (Fig. 1), permettant en particulier de reconstruire la séquence thermographique complète (d'où le nom de la technique TSR).

- une **amélioration de la détection des défauts** par l'utilisation des dérivées logarithmiques premières et secondes, la dérivation étant réalisée à partir des polynômes, donc avec un accroissement limité du bruit. Cette détection requiert l'observation du "film" complet des dérivées (Fig. 1), la détection optimale des défauts dépendant de leur profondeur pour le rapport signal/bruit et de sa précocité pour la netteté de leur image [1,5].

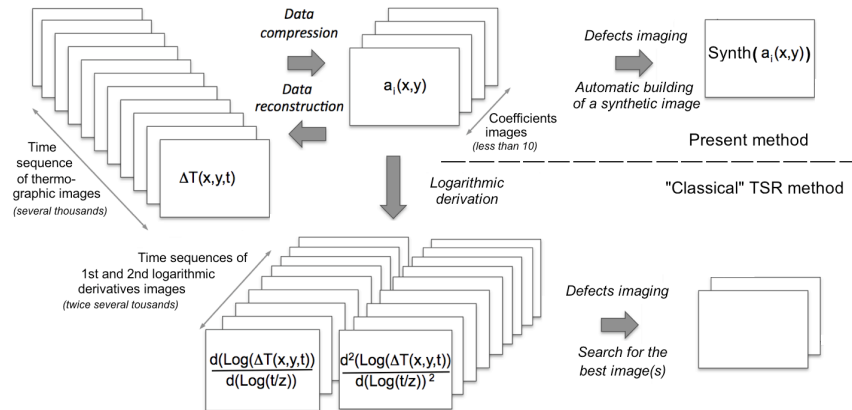


Figure 1. Méthode TSR classique et présente méthode.

3. Une méthode simple pour une détection rapide et efficace des défauts

Jusqu'alors, les $(n+1)$ images donnant la distribution des coefficients des polynômes de lissage n n'étaient exploitées que pour une détection directe des défauts. Les coefficients n'étaient considérés que comme des intermédiaires dans le procédé de traitement. Pourtant ces images mettent en lumière la quasi-totalité des défauts, bien que ceux-ci soient situés à des profondeurs variées, ce qui, si l'on reste au niveau purement qualitatif, rend inutile le calcul et l'observation d'images des dérivées logarithmiques à des moments en relation avec les profondeurs des défauts. L'avantage réside donc dans le fait que le nombre d'images à observer est très limité (n images), voire réduit à une seule image si l'on réussit à faire une image synthétique à partir de ces n images, en comparaison avec les milliers d'images des dérivées.

Le présent travail a trait à la description quasi-empirique de ces images et à l'optimisation de la méthode en vue de son application pratique. Il vise à répondre aux questions suivantes : i) comment l'information se distribue-t-elle parmi les images des divers coefficients ?; ii) quel est le degré optimal pour obtenir les meilleures images des défauts ?; iii) ces images sont-elles de meilleure qualité que celles des dérivées logarithmiques ou celles produites par d'autres méthodes de référence comme l'analyse en composantes principales; iv) quel est le meilleur moyen d'obtenir une image synthétique unique, si possible sans intervention de l'expérimentateur...?

Pour répondre à ces questions, une approche purement empirique a été appliquée à l'analyse d'un essai réalisé sur une structure contenant des défauts artificiels situés à des profondeurs connues simulant d'une façon réaliste des délaminages.

4. Elaboration empirique de la méthode des images de coefficients

L'éprouvette étudiée est une plaque de composite C/époxy de $270 \times 200 \times 5.25 \text{ mm}^3$, utilisée par le passé pour plusieurs études [6,7], de diffusivité $4.2 \pm 0.2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, et contenant des

inserts de Téflon[®] de 80 μm d'épaisseur, de tailles et profondeurs variées, placés entre les plis durant la fabrication. Deux zones contiennent une paire de défauts superposés à deux profondeurs. Les caractéristiques des défauts sont données sur la Fig. 2. Les défauts sont numérotés, le premier chiffre étant lié à la taille, le second à la profondeur.

Pour ces essais, deux lampes flash Elinchrom délivrent une énergie électrique de 6 kJ en 4 ms. La température de la face avant est mesurée par une caméra CEDIP Jade LWIR, durant 60 s, à la fréquence 200 Hz, avec un temps d'intégration de 332 μs . Les images ont une résolution spatiale de 320 x 256 pixels. Deux plaques de Plexiglas[®] interposées entre les sources et l'éprouvette évitent un échauffement parasite de cette dernière par le rayonnement IR des lampes après le flash. L'éprouvette est revêtue d'une couche fine de noir de carbone et, afin d'éliminer la non-uniformité du chauffage, une normalisation des images est effectuée au temps 35 ms pour lequel les thermogrammes ne sont pas encore influencés par les défauts les plus superficiels. La Fig. 3 présente l'évolution après le flash ($t = 0$) de l'échauffement de la plaque au centre du défaut #1-1 et dans la zone saine (moyenne de 8 points). Le bruit devient important après 20 s et pour les défauts les plus profonds, non représentés sur cette figure, le contraste entre zones saines et défectueuses peut être noyé dans le bruit, rendant nécessaire le filtrage-lissage par polynômes logarithmiques.

4.1. Constitution des images de coefficients

Les images de coefficients sont présentées en nuances de gris, obtenues en attribuant la couleur noire aux pixels correspondant au minimum en valeur algébrique des coefficients et la blanche au maximum. Les 256 niveaux de gris sont attribués dans une échelle linéaire entre les valeurs extrêmes des coefficients, les régions saines correspondant à des nuances de gris moyen. Afin d'éviter une distorsion de l'échelle de gris, les pixels isolés morts ou anormaux sont remplacés par une combinaison de leurs voisins (filtre médian par exemple).

4.2. Choix d'un degré optimal des polynômes logarithmiques

Pour être intéressante, la méthode doit produire des images contenant le plus grand nombre possible des défauts présents dans la structure. L'optimisation de la méthode demande de bien comprendre l'influence combinée du degré du polynôme et du rang du coefficient. Aussi faut-il réaliser une analyse détaillée des images en faisant varier ces deux paramètres. Pour la présente expérience on a fait varier le degré n entre 3 et 11. Les images des coefficients de rang 0 à n ont été examinées pour chaque degré (voir Fig. 4). Chaque image est identifiée par une éti-

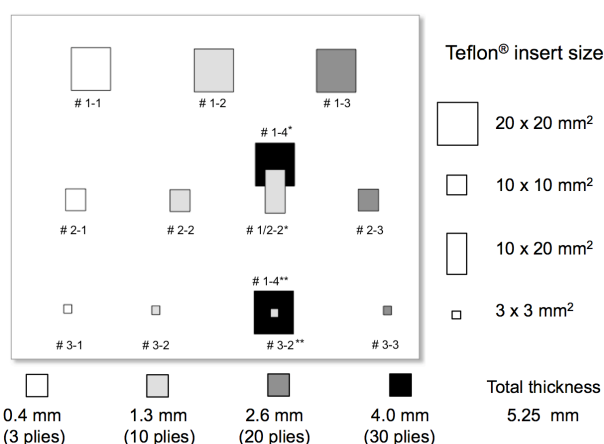


Figure 2. Distribution des défauts artificiels dans la plaque de C/époxy.

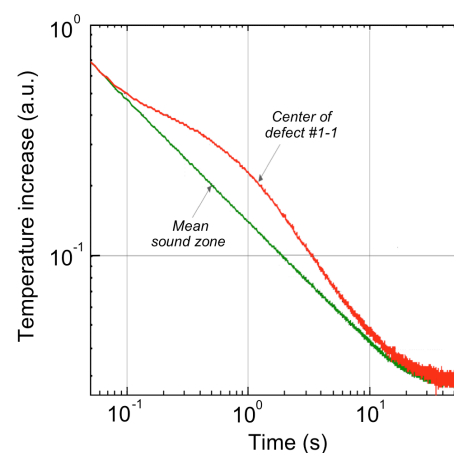


Figure 3. Thermogrammes de la zone saine et au droit du centre du défaut 1-1 (normalisation au temps 35 ms).

quette dont le signe indique si l'échelle de gris a été inversée (-) ou non (+), ceci afin de rendre les images des défauts les plus comparables possibles. Deux nombres indiquent successivement le rang du coefficient et le degré du polynôme. Ainsi l'image étiquetée "-4/8" est la distribution (x,y) des coefficients a_4 des polynômes de degré $n=8$, après inversion de l'échelle de gris et l'image "5/6" celle des coefficients a_5 des polynômes de degré 6.

La comparaison des images présentées en Fig. 4 permet de définir les grandes tendances :

i) Pour rendre mieux comparables les images, il y a lieu d'inverser une fois sur deux l'échelle de gris en considérant séparément les rangs pairs et les rangs impairs et en attribuant des signes opposés aux deux premières images (rang 0 et 1). On obtient ainsi les suites d'images suivantes : $-0/n, 1/n, 2/n, -3/n, -4/n, 5/n, \dots$

ii) Les images des coefficients de rangs pairs sont toujours plus floues que celles des coefficients de rangs impairs, quel que soit l'ordre du polynôme.

iii) Il y a, le plus souvent, davantage de défauts détectés dans les images des coefficients d'ordres impairs que dans les images des coefficients d'ordres pairs précédents ou suivants.

iv) Plus le défaut est profond, plus son image est floue. Ceci est toujours vérifié. Pour des profondeurs importantes, l'image du défaut devient évanescence.

v) Les profondeurs croissant, les contrastes créés par les défauts changent de signe, parfois plusieurs fois.

vi) Les défauts situés à la même profondeur présentent toujours le même niveau de gris, au moins pour des polynômes de degré inférieurs à 9, et pour des degrés de polynômes supérieurs à 8, la texture des images des défauts peut devenir complexe.

vii) Il existe une tendance, quelque peu erratique, à l'accroissement du nombre de défauts détectés lorsque le rang des coefficients croît.

viii) Le bruit de l'image croît lorsque le degré des polynômes croît.

ix) Plus le rang des coefficients est faible, plus les images donnent des informations sur les zones superficielles : les coefficients a_0 et a_1 font respectivement apparaître le premier pli, orienté à -45° , puis le deuxième, à 45° . Pour les coefficient suivants, les plis orientés à 90° et 0° apparaissent, mais mélangés et peu à peu noyés dans le bruit. Ainsi exploitée, la thermographie impulsionnelle effectue une sorte de tomographie dont la résolution spatiale décroît lorsque la profondeur explorée croît.

Pour trouver le degré n optimal, un examen visuel de l'ensemble des images de la Fig. 4 est réalisé. Pour chaque image, on compte le nombre de défauts détectables sans ambiguïté. En ce qui concerne le nombre total de défauts à détecter, on ne tient pas compte des défauts #3-2, #3-2** et #3-3 qui ne font que $3 \times 3 \text{ mm}^2$ et sont situés à des profondeurs z_d égales à 1,3 mm pour les deux premiers et à 4 mm pour le dernier ($A_d/2/z_d = 1.15, 1.15$ et 0.58 respectivement). Si on compare les valeurs de ce ratio à la règle empirique couramment admise ($r_d/z_d \geq 0.5$ [8] ou $r_d/z_d \geq 1$ [9] pour un défaut de forme circulaire), on voit que ces défauts sont à la limite de détection par la méthode. Ils ne seront donc pas comptés, ramenant le nombre maximal de défauts à détecter à 10. On caractérise ainsi quantitativement la qualité de la détection propre à chaque image par un nombre unique. L'ensemble de ces nombres est présenté en bas à gauche de la Fig. 4. Le nombre en caractère gras en bas de chaque colonne indique le nombre de défauts détectés en considérant l'ensemble des images correspondant au polynôme. Il ressort ainsi que pour toutes les valeurs explorées de n les 10 défauts sont détectés. Si l'on désire avoir une image unique contenant les 10 défauts, il faut considérer un degré au moins égal à 5 (image -4/5). Cependant, dans cette image, par ailleurs d'une très grande netteté, les défauts #3-1, #1-2, #2-3, et #1-4** ont un faible rapport S/B. De fait, il faut atteindre le degré 7 pour trouver des images clairement complètes. Les polynômes de degré 7 et 8 sont les seuls à présenter plusieurs images complètes (respectivement 2 et 3 images). Parmi ces 5 images complètes, celle de la meilleure qualité est l'image -7/7. Des images complètes sont

encore trouvées pour les degrés $n = 10$ et 11 , mais plus bruitées. On peut conclure que le degré n optimal pour la détection des défauts est 7 ou 8 - le choix n'est pas pointu -, et finalement en considérant le niveau de bruit, que le degré 7 est le meilleur choix.

Compte tenu de la bonne représentativité des défauts réalisés, et ce contrairement aux classiques trous borgnes usinés en face arrière, on peut penser que ce critère est de portée générale.

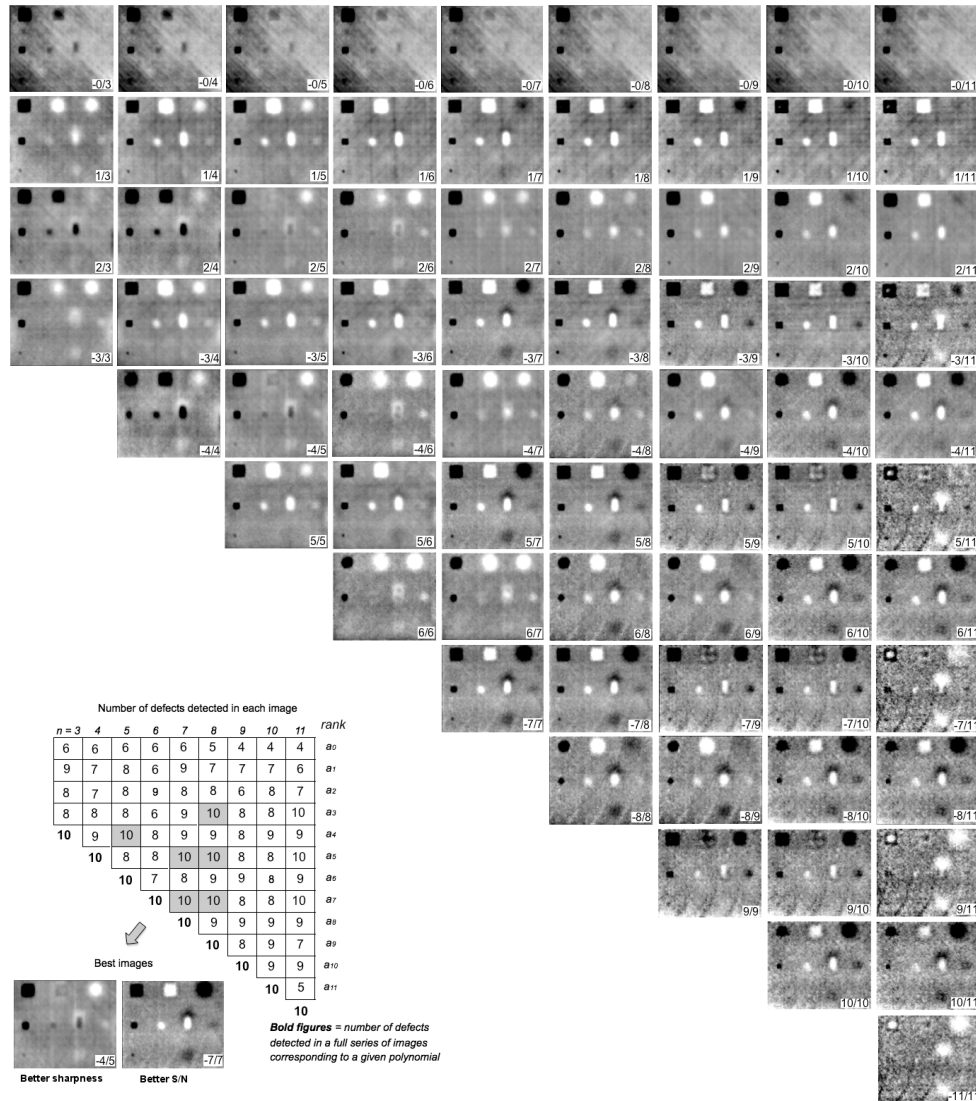


Figure 4. Images des coefficients pour un degré n des polynômes de 3 à 11, montrant l'influence de ce dernier et celle du rang du coefficient et conduisant à considérer le degré 7 comme optimal pour l'imagerie des défauts.

4.3. Obtention d'une image unique et synthétique des défauts

La méthode décrite plus haut est un progrès par rapport à la méthode classique dans la mesure où le nombre d'images à analyser est considérablement plus réduit : quelques-unes au lieu de plusieurs milliers. La méthode serait encore plus attractive si elle conduisait à une image unique obtenue sans aucune intervention humaine.

Ayant choisi le degré optimal du polynôme, fixé à 7, considérons séparément les images de rangs pairs (-0/7, 2/7, -4/7 et 6/7) et impairs (1/7, -3/7, 5/7 et -7/7). Pour chaque série on effectue la normalisation entre 0 (noir) et 255 (blanc) des quatre images en échelle de gris, puis on constitue une image moyenne arithmétique, pixel par pixel, de ces images. Les Fig. 5a-5b présentent les deux images synthétiques ainsi obtenues. On vérifie bien que les coefficients pairs

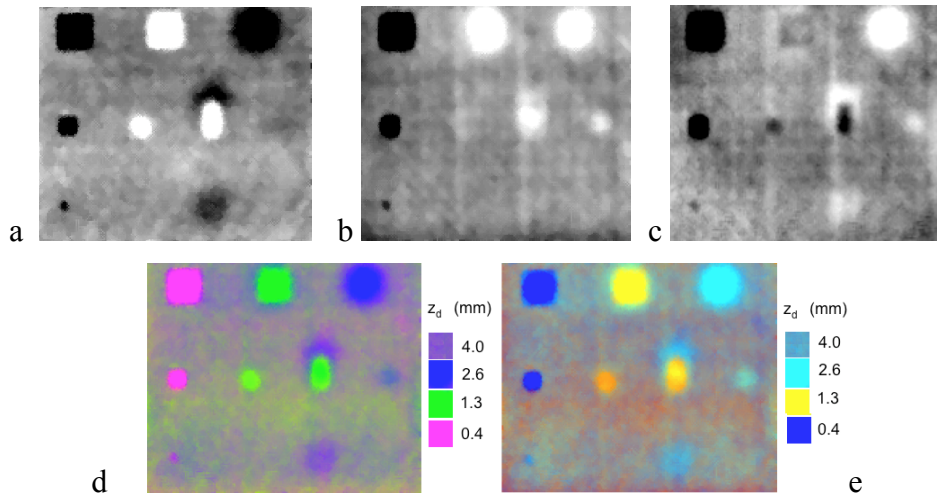


Figure 5. Résultats de la présente approche. 1) Images moyennes des coefficients impairs (a) et pairs (b) alternés. 2) Meilleure image du point de vue netteté (image -4/5, présentée en Fig 5c). 3) Images des coefficients (4/7, 5/7, 7/7) et (5/7, 6/7, 7/7) projetées dans une base (RVB) (respectivement en Fig. 5d et 5e). Connaissant les profondeurs des défauts, on a restitué l'échelle colorée des profondeurs.

conduisent à une image plus floue, qu'on serait donc tenté d'écarter, mais ils révèlent mieux le défaut #2-3 qui est à la limite de la détection avec les coefficients impairs.

Au vu de ces résultats il apparaît que : i) il vaut mieux garder les deux types d'images au niveau de l'examen final par l'expérimentateur, ii) la mise en lumière des différences de profondeur entre défauts est aisée avec l'image des coefficients de rangs impairs si l'on prend en compte simultanément le niveau de gris et la netteté de l'image des défauts ; iii) ce dernier type d'évaluation est beaucoup plus ambigu avec l'image des coefficients de rangs pairs. En définitive il faut garder les deux images, mais donner plus de poids à la première. Ceci conduit à proposer une solution permettant de concilier résolution spatiale et exhaustivité des images des défauts détectés. Elle consiste à considérer une série de trois images, deux de rang impair et une de rang pair, en donnant la préférence aux rangs les plus élevés puisqu'ils contiennent le plus d'informations, notamment sur les défauts profonds bien qu'ils conduisent à des images plus floues et plus bruitées. On choisira ainsi les trios 5/7, 7/7 et 4/7 ou 6/7. Les trois images normalisées entre 0 et 255 niveaux de gris sont projetées dans une base (R,V,B). On obtient une image unique, synthétique et bien adaptée à l'analyse visuelle, permettant de bien discerner les niveaux de profondeur des défauts. On voit, Fig. 5d-5e, que l'arbitraire qui a présidé au choix du coefficient de rang pair ne conduit pas à des images très différentes. La première est préférable, car la couleur est la même pour tous les défauts situés à 1.3 mm quelle que soit leur taille, et les contours des défauts sont moins flous que dans la seconde.

En conclusion, on propose de retenir la seconde approche qui conduit à une image finale plus synthétique et plus riche d'information, bien adaptée au contrôle visuel, et d'obtention facilement automatisable.

Cette recherche a été guidée par l'idée d'obtenir des images de défauts avec un très bon rapport S/B et dans l'optique d'un processus automatisable. Cependant, une autre piste reste à explorer qui privilégierait la netteté des images, quitte à perdre en contraste. Elle n'a pas été explorée ici parce que le manque de bases théoriques et le fait qu'une seule éprouvette ait été utilisée rendraient hasardeuse la généralisation des conclusions. Elle conduirait, dans le cas présent, à désigner comme meilleure image des défauts l'image -4/5 qui montre les 10 défauts et est la seule à donner avec une grande exactitude, proche de celle des ultrasons, les contours des défauts superposés #1-4* et #1/2-2*. Elle est présentée sur la Fig. 5c après une augmentation de 100% du contraste, et comparées aux images obtenues précédemment.

4.4. Comparaison à d'autres méthodes de traitement de données

A titre de comparaison les mêmes données thermographiques ont été exploitées par la méthode TSR classique (sélection des images de dérivées logarithmiques première et seconde donnant le plus grand nombre de défauts) et par deux autres méthodes de référence projetant les thermogrammes sur des bases non polynomiales (PPT [10], PCT [11]).

Avec l'approche TSR classique, le choix des temps optimaux d'observation repose sur l'analyse des contrastes relatifs entre les valeurs de dérivées polynomiales correspondant aux défauts et celles de la zone saine moyenne. Une fois les images obtenues (une image de dérivée première et une image de dérivée seconde par profondeur de défauts), les deux images révélant le plus grand nombre de défauts sont sélectionnées (Fig. 6a et 6b). Les résultats obtenus sont satisfaisants, surtout pour l'image de dérivée première qui permet l'identification des 10 défauts ; l'image de dérivée seconde en revanche ne permet une visualisation de tous les défauts à la fois, le défaut #3-1 n'étant pas visible. Quoiqu'il en soit, aucun apport n'est constaté par rapport à la technique des coefficients.

L'approche PPT (Pulse Phase Thermography) projette les thermogrammes sur une base sinusoïdale par transformée de Fourier discrète. Pour notre exemple, l'information la plus intéressante est contenue dans l'une des 5 images de phase relatives aux fréquences les plus basses (Fig. 6e). On distingue les 10 défauts mais de façon moins marquée (cf. #1-4*).

La méthode PCT (Principal Component Thermography) définit une base de projection empirique optimale obtenue par décomposition en valeurs singulières (SVD) des signaux. On s'intéresse habituellement à une base spatiale et à ses premières composantes (composantes #2 et #3 en Fig. 6c et 6d) mais il faut bien voir que cette base est implicitement liée à l'extraction d'une base temporelle pour les thermogrammes. Les résultats confirment la qualité de cette méthode de référence sans pour autant lui donner d'avantage décisif.

Ces comparaisons, certes non-exhaustives, sont donc plutôt à l'avantage de la méthode des coefficients pour sa simplicité numérique et sa capacité de détection dans notre application.

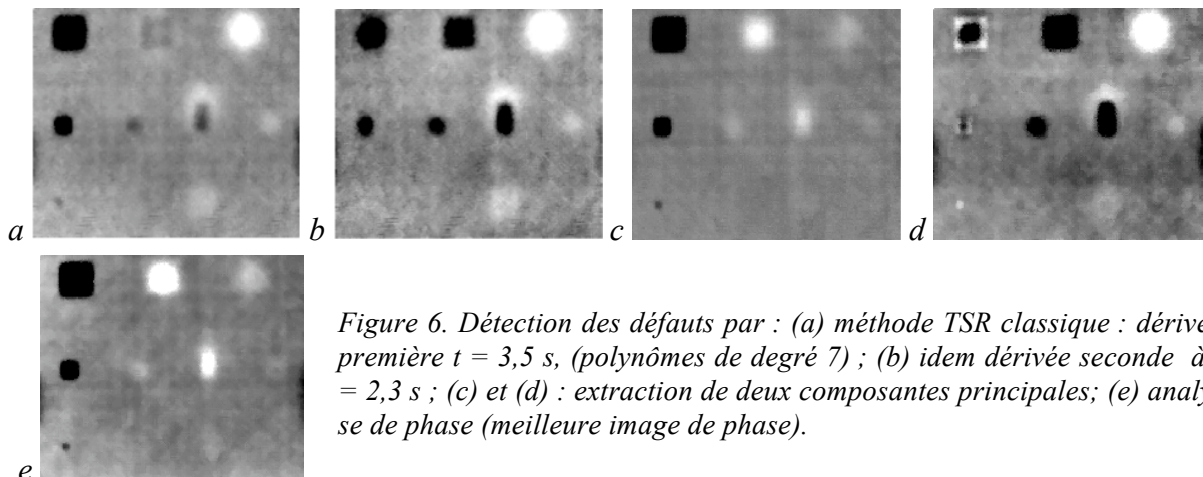


Figure 6. Détection des défauts par : (a) méthode TSR classique : dérivée première $t = 3,5$ s, (polynômes de degré 7) ; (b) idem dérivée seconde à $t = 2,3$ s ; (c) et (d) : extraction de deux composantes principales ; (e) analyse de phase (meilleure image de phase).

4.5. Comparaison à d'autres techniques d'évaluation non destructives

La Fig. 7 présente les résultats obtenus précédemment sur la même éprouvette par diverses techniques : absorption ultrasonore en double transmission, holographie sous dépression [12] et thermographie IR avec impulsion longue (2 s) et utilisation du contraste maximum. Les ultrasons permettent de voir les 13 défauts, l'holographie 10 et la thermographie à l'aide d'une caméra IR monodétecteur (Agema 880 LW) en voit 8.

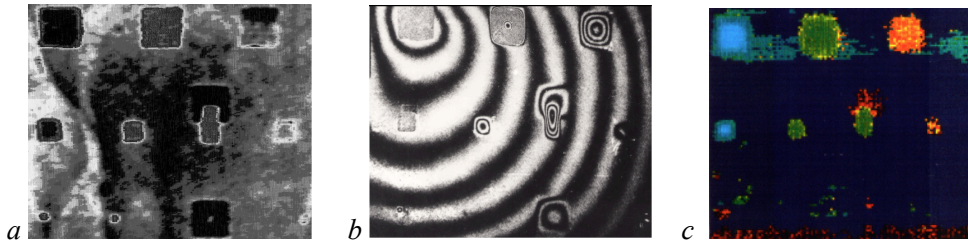


Figure 7. Détection des défauts de la même éprouvette par d'autres techniques : (a) Absorption ultrasonore en double transmission ; b) Holographie de l'éprouvette en dépressurisation [12] ; c) Image de profondeur de défaut obtenue par thermographie stimulée par impulsion longue (2 s).

5. Conclusions

Faute de place, les présents résultats n'ont pu être suffisamment commentés (notamment la comparaison à d'autres méthodes). On retiendra que l'approche proposée avec ses variantes conduit à des résultats qui se comparent favorablement aux autres méthodes de traitement de données, donnant à l'examen thermographique un ensemble d'attraits que les autres techniques ne réunissent pas, à savoir : absence de contact, rapidité de l'expérience, brièveté et simplicité du traitement pouvant être totalement automatisé. Il resterait à vérifier la généralisation des procédures proposées et les asseoir sur des bases théoriques.

La méthode des coefficients doit être considérée comme une variante de la méthode TSR, utile pour du contrôle non destructif qualitatif, la méthode TSR classique quant à elle permettant d'envisager des analyses plus fines et des développements plus quantitatifs, mais nettement plus laborieux.

Références

- [1] Balageas, D.L., "Defense and Illustration of Time-Resolved Thermography for NDE", QIRT Journal, Vol. 9, No 1, pp. 5-38, 2012.
- [2] Spring, R., R. H. Huff and M. Schwoegler, "Infrared Thermography: a Versatile Nondestructive Testing Technique", Mat. Eval., Vol. 69, No. 8, 2011, pp. 934-942.
- [3] Shepard, S.M., J.R. Lhota, B.A. Rubadeux, Wang D., T. Ahmed, "Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences", Opt. Eng., Vol. 42, No 5, 2003, pp. 1337-1342.
- [4] Shepard, M., "Thermography of Composites", Mat. Eval., Vol. 65, No. 7, 2007, pp. 690-696.
- [5] Krapez, J.C., D. Balageas, "Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography", Conf. QIRT 94. Open Arch.: <http://qirt.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=56>.
- [6] Balageas D.L., A.A. Déom D. M. Boscher, "Characterization and non destructive testing of carbon-epoxy composites by a pulsed photothermal method", Mat. Eval., Vol. 45, n°4, 461-465, 1987.
- [7] Krapez J.-C., D. Boscher, Ph. Delpech, A. Déom, G. Gardette, D. Balageas, "Time-resolved pulsed stimulated infrared thermography applied to carbon-epoxy non destructive evaluation". Conf. QIRT 92. Open Archives: <http://qirt.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=55>.
- [8] Maldague X. General Approaches and Techniques of Infrared and Thermal Testing. In: Nondestructive Handbook, Infrared and Thermal Testing, ASNT Press, Columbus, Ohio, 2001.
- [9] Vavilov, V., "Nondestructive Testing Handbook, Vol. 5, Book 1: Thermal/infrared testing", Spektr Publishing House, Moscow, 2009, page 122.
- [10] Maldague X., Marinetti S., "Pulse phase infrared thermography", J. Appl. Phys. 79, p.2694, 1996.
- [11] Rajic N., "Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures", Composite Structures 58 (2002) pp. 521-528
- [12] Lamarque T., "Caractérisation de délaminages par interférométrie de speckle avec sollicitation thermique ou mécanique", Thèse doctorat, Univ. Paris VI, 1998.