

# Imagerie quantitative TSR-RVB : de la détection de défauts au D-scan thermique

Jean-Michel Roche<sup>1</sup>, Daniel Balageas<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>ONERA, Département Matériaux & Structures Composites, BP 72, 92322 Châtillon cedex, France

<sup>2</sup>Univ. Bordeaux, I2M, Département TREFLE, UMR 5295, F-33400 Talence, France

\* (auteur correspondant : daniel.balageas@wanadoo.fr)

**Résumé** - L'efficacité de la méthode TSR pour l'amélioration de la détection de défauts par thermographie impulsionnelle est indiscutable. Il a de plus été montré récemment qu'il était possible d'imager les défauts tout en compressant l'information de façon optimale, par la projection dans une base RVB de trois images de coefficients des polynômes logarithmiques, simplifiant ainsi grandement la recherche de défauts, l'opérateur ayant une image unique à analyser. Il est alors apparu que les variations de couleurs observées sur la cartographie correspondaient à des changements de profondeurs. La cartographie TSR-RVB donne ainsi une information relative sur la profondeur des défauts. La pertinence de cette approche, validée jusqu'ici pour la détection de défauts calibrés, de profondeurs connues, doit encore être évaluée pour la caractérisation de défauts réels, créés dans des structures composites au cours de leur procédé d'élaboration ou par des événements accidentels de type impact, survenus au cours de leur utilisation.

Deux types de composites ont été soumis à des essais de thermographie impulsionnelle : i) une plaque à fibres de carbone et matrice à base de silicone, élaborée dans le cadre d'un procédé de fabrication en plusieurs étapes, ii) une plaque de carbone/époxy quasi isotrope de 16 plis, endommagée par un impact de 28 J.

Le traitement des données suit les trois étapes suivantes : i) identification des zones endommagées par application du filtrage/lissage TSR par des polynômes logarithmiques, sélection des trois "meilleures" images de coefficients, et synthèse de leurs informations en une image composite, par projection dans une base RVB ; ii) estimation locale de la profondeur des défauts détectés sur l'image TSR-RVB, en se plaçant aux contrastes émergents ; iii) établissement d'une échelle de couleur graduée en profondeur de défaut et par là même obtention d'un D-scan thermique, gradué en profondeur. Pour la deuxième étape, à partir des thermogrammes lissés par TSR, les temps d'émergence des contrastes relatifs par rapport à une zone supposée saine,  $t_i$ , sont déterminés localement pour chaque défaut. L'épaisseur  $e$  de la pièce étant supposée uniforme et connue et le milieu thermiquement homogène, la profondeur des défauts,  $z_{di}$ , peut alors être estimée par la relation : 
$$z_{di} = e \sqrt{t_i / t_{f\text{ond}}}$$
  $t_{f\text{ond}}$  étant le temps d'émergence du contraste créé par la face arrière de la pièce dans sa zone saine par rapport au thermogramme du milieu semi-infini.

Deux types de constatations expérimentales viennent confirmer que l'image TSR-RVB est une carte de profondeur, véritable D-scan : i) l'obtention de profondeurs identiques pour des zones de même couleur ; ii) des mesures de profondeur faites sur une même zone, à partir des deux faces de l'éprouvette, dont la somme est égale à l'épaisseur totale de l'échantillon.

Les mesures effectuées sur des éprouvettes contenant des défauts naturels ont confirmé la relation entre leurs couleurs et leurs profondeurs, dans la mesure où il n'y a pas d'effets induits par la superposition éventuelle de défauts, comme c'est le cas dans les multi délaminages causés par des impacts ou lorsque les défauts sont d'extension suffisamment limitée pour induire des effets de conduction latérale non négligeables. Le potentiel de la procédure ici proposée est donc confirmé, permettant d'envisager l'obtention rapide et fiable de D-scans thermiques d'une qualité s'approchant de celle des D-scans ultrasonores.

## Nomenclature

$e$  épaisseur de l'échantillon observé,  $m$   
 $t$  temps,  $s$   
 $L$  profondeur de défaut,  $m$   
 $T$  température,  $K$

### Symboles grecs

$\Delta T$  Echauffement,  $K$   
 $\Delta \bar{T}$  Echauffement normalisé

### Indices et exposants

$d_i$   $i^{\text{e}}$  défaut  
 $fond$  face arrière  
 $s$  zone saine

### Acronymes

*RVB* Rouge-Vert-Bleu  
*TSR* Thermographic Signal Reconstruction

## 1. Introduction

La technique TSR (*Thermographic Signal Reconstruction*), initialement proposée par Shepard [1] pour le traitement des données issues d'essais de thermographie active, a prouvé son efficacité pour la détection de défauts calibrés, que ce soit par l'utilisation des images de dérivées logarithmiques ou, comme proposé plus récemment, d'une image en couleur issues de la projection RVB (Rouge-Vert-Bleu) d'un trio d'images de coefficients des polynômes logarithmiques [2]. On veut montrer que cette dernière variante, ici appliquée à l'inspection de matériaux et de structures composites présentant des défauts apparus dès la fin du procédé d'élaboration ou induits au cours de leur vie (par impact, par exemple), conduit à la production de véritables D-scans thermiques. Pour ce faire, une procédure en trois étapes est proposée et validée : (i) analyse de la cartographie TSR-RVB pour identification des zones endommagées, (ii) analyse des thermogrammes associés à ces zones et estimation des profondeurs correspondantes par un algorithme simple appliqué localement en quelques points, (iii) graduation de la cartographie TSR-RVB en échelle de profondeur.

## 2. Rappel sur les premières constatations de l'existence d'une relation couleur/profondeur dans les images composites TSR-RVB

Dès l'obtention des premières images composites RVB qui concernaient des défauts artificiels, de résistances thermiques analogues et de profondeurs diverses et connues, il est apparu que les couleurs des défauts étaient corrélées à leur profondeur. La possibilité de considérer de telles images comme de véritables D-scans a ainsi pu être envisagée.

On donne sur la Figure 1<sup>1</sup> la validation de cette idée grâce à une expérience de thermographie impulsionnelle sur une plaque de carbone-époxy contenant des inserts de Teflon<sup>®</sup> situés à des profondeurs différentes et connues [2,3]. Dans le cas de défauts de profondeur inconnue la profondeur du défaut pourra être obtenue par une détermination locale du temps d'émergence du contraste créé par le défaut (voir Section 4). On remarquera sur la Figure 1 de légères variations de teinte pour des défauts de petite taille par rapport à celle des défauts de même profondeur mais de taille plus conséquente (voir par exemple les défauts #1-2 et #2-2). Ceci traduit l'influence des transferts conductifs latéraux sur l'amplitude des contrastes créés. De même, lorsqu'il y a chevauchement de deux défauts, la teinte est altérée dans la zone de chevauchement. C'est ainsi le cas des défauts #1-2-2\* et #1-4\*. Aussi est-il nécessaire de passer à des expérimentations sur des défauts représentatifs d'endommagements réels rencontrés dans les structures composites. C'est la raison du travail présenté à la suite.

---

<sup>1</sup> Toutes les figures de cet article sont en couleur, nécessité imposée par la nature même de la méthode qui repose sur une projection d'images en échelle de gris dans un espace RVB. Dans la version en noir et blanc des actes de la conférence, elles ne sont pas significatives. Pour juger de leur qualité, se reporter au fichier pdf de la clé USB.

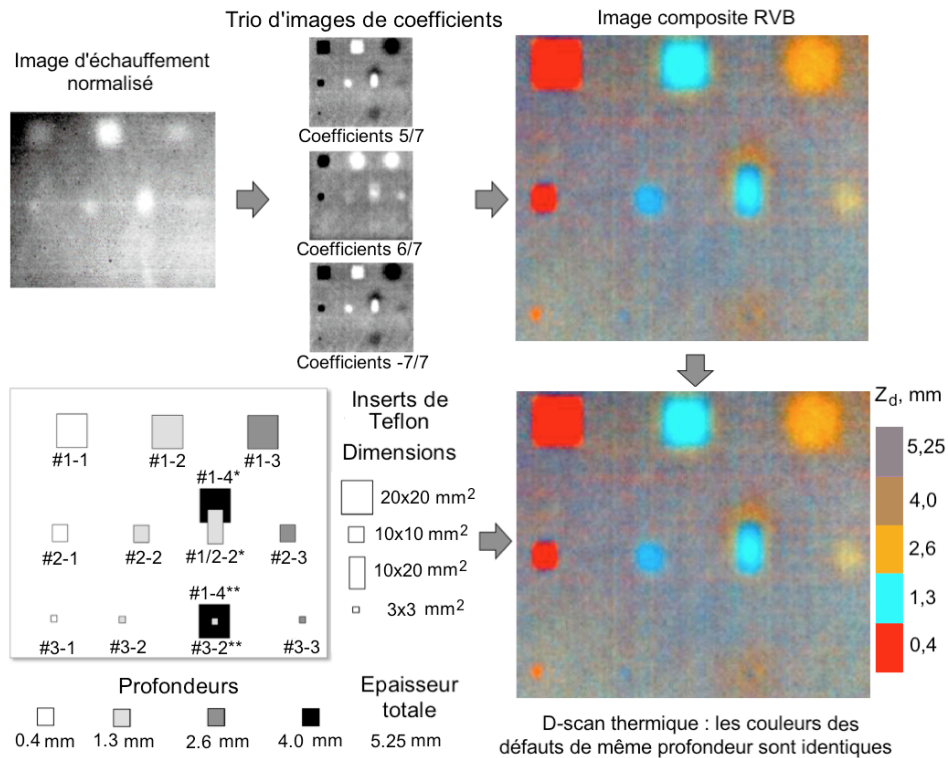


Figure 1 : Étapes de traitement de données faisant successivement passer de l'image thermographique brute à l'image composite TSR-RVB, puis à un D-scan thermique.

### 3. Dispositif expérimental, structures testées, stratégie de l'étude

Deux types de composites ont été étudiés :

- une plaque de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ , de 6 mm d'épaisseur, en fibres de carbone et résine à base de silicone, élaborée dans le cadre d'un procédé de fabrication en plusieurs étapes (moulage par injection, pyrolyse et infusion) ;
- une plaque carbone/époxy de  $150 \times 150 \text{ mm}^2$ , de 4,16 mm d'épaisseur (16 plis d'orientation  $[(45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ)_2]_s$ ), endommagée par un impact de 28 J.

Les essais de thermographie impulsionnelle ont été réalisés au moyen de deux lampes flash et d'une caméra infrarouge FLIR X6540sc (3-5  $\mu\text{m}$ ,  $640 \times 512$  pixels, 20 mK de sensibilité), avec une fréquence d'acquisition de 100 images/seconde. Pour la plaque impactée, des données ultrasonores (D-scan) sont également disponibles, pour comparaison.

Le traitement des données suit les trois étapes suivantes :

- application du filtrage/lissage TSR par des polynômes logarithmiques, sélection des trois "meilleures" images de coefficients, et synthèse de leurs informations en une image composite, par projection dans une base RVB [2,3] ;
- estimation locale de la profondeur des défauts détectés en quelques points sur l'image TSR-RVB, en se plaçant aux contrastes émergents [4] ;
- analyse de la corrélation existant entre les couleurs de l'image composite et les profondeurs des défauts et obtention d'un D-scan thermique.

La procédure est alors validée par comparaison avec les résultats obtenus à partir de l'essai équivalent effectué face opposée. Il est vérifié en effet que pour les défauts isolés, non superposés à d'autres, la somme des profondeurs estimées par les deux essais restitue bien l'épaisseur totale de l'échantillon, l'épaisseur des défauts étant supposée nulle.

#### 4. Estimation locale des profondeurs en vue d'étalonner les couleurs

Pour estimer localement la profondeur des défauts sans pénaliser la rapidité d'obtention du D-scan, on propose ici une méthode simple applicable dans le cas d'éprouvettes d'épaisseur connue.

Comme rappelé dans [4], le contraste naissant créé par un défaut à une profondeur  $z_d$ , s'exprime comme une fonction du nombre de Fourier  $Fo_d$  rapporté à la profondeur dudit défaut ( $Fo_d = \alpha t / z_d^2$ ,  $\alpha$  étant la diffusivité du matériau sain) :

$$Cr \cong 2 \exp(-1 / Fo_d) \quad (1)$$

On peut se fixer arbitrairement une valeur de contraste naissant  $Cr^*$ , par exemple 1%, et ainsi déterminer les temps  $t^*$  d'émergence des contrastes correspondants. Si l'on applique cette procédure au contraste du 1<sup>er</sup> défaut et à celui créé par la face arrière, on obtient :

$$Cr_{d_i}^* = Cr_{f_{ond}}^* = \alpha t_{d_i}^* / z_{d_i}^2 = \alpha t_{f_{ond}}^* / z_{f_{ond}}^2 \quad (2)$$

d'où l'expression de la profondeur du 1<sup>er</sup> défaut,  $z_{f_{ond}}$  étant connue et égale à  $e$  :

$$z_{d_i} = e \sqrt{t_{d_i}^* / t_{f_{ond}}^*} \quad (3)$$

#### 5. Résultats obtenus pour des défauts de fabrication

La Figure 2 synthétise l'ensemble de la procédure appliquée à la plaque composite carbone/silicone. Les thermogrammes des pixels choisis sont lissés par des polynômes logarithmiques d'ordre 7, suivant les recommandations de la référence [2]. Après le choix d'un trio de coefficients, la projection RVB des trois images conduit à l'image composite de la figure 2b. A partir des thermogrammes lissés par des polynômes d'ordre 10 (Figure 2a), les temps d'émergence des contrastes relatifs par rapport à une zone supposée saine sont déterminés pour chaque défaut et pour la face arrière. L'épaisseur de la pièce,  $e$ , étant supposée uniforme et connue et le milieu thermiquement homogène, les profondeurs des défauts,  $z_{d_i}$ , peuvent être estimées localement par la relation (3). On est alors en mesure de bâtir une échelle de couleur graduée en profondeur de défaut.

Les mêmes opérations sont ensuite effectuées pour un essai identique sur la face opposée, conduisant aux résultats présentés sur les Figures 2c-2d. La comparaison des échelles de couleur des deux images composites ainsi obtenues montre que la relation entre couleur et profondeur est très voisine pour les deux échelles, ce qui confirme que les couleurs traduisent bien des profondeurs. Notons que les échelles obtenues sont discontinues, le nombre de niveaux étant directement lié au nombre de zones défectueuses détectées. Une automatisation complète de l'évaluation des contrastes émergents, pour *chaque* pixel de l'image, permettrait d'avoir une échelle plus facilement lissable. Cependant, le fait d'avoir une échelle continue n'est pas essentiel ; la principale difficulté est plutôt que l'opération de projection RVB ne permet pas d'avoir un contrôle sur le choix absolu des couleurs.

Une autre vérification de l'hypothèse formulée sur la corrélation couleur/profondeur, consiste à faire la somme des profondeurs relevées sur les deux faces pour un même pixel et à vérifier que celle-ci est égale à l'épaisseur de l'éprouvette. La plupart des points ainsi sondés conduisent à des sommes proches de l'épaisseur de 6 mm, ce qui valide l'obtention d'un véritable D-scan thermique. Cependant, certaines zones vérifient moins bien cela, ce qui peut s'expliquer par les deux raisons suivantes :

- La faible étendue du défaut conduit à des effets de conduction latérale faussant le calcul de profondeur, lequel repose sur une hypothèse de conduction 1-D à travers l'éprouvette. Ces effets sont obligatoirement dissymétriques sauf si le défaut se situe à mi-profondeur.

- Le défaut (délaminage, cavité) peut avoir une épaisseur non négligeable, faisant en sorte que la somme des deux profondeurs, chacune étant calculée à partir de l'une puis l'autre interface composite/vide, soit inférieure à l'épaisseur globale de l'échantillon.

Il faut par ailleurs remarquer que les couleurs obtenues n'ont pas une valeur universelle. Elles dépendent de l'épaisseur et de la nature du matériau, de la durée de la fenêtre temporelle choisie pour l'analyse, du degré des polynômes, du rang des coefficients choisis, de l'ordre de projection des trois images sur la base RVB et vraisemblablement de la sévérité des défauts.

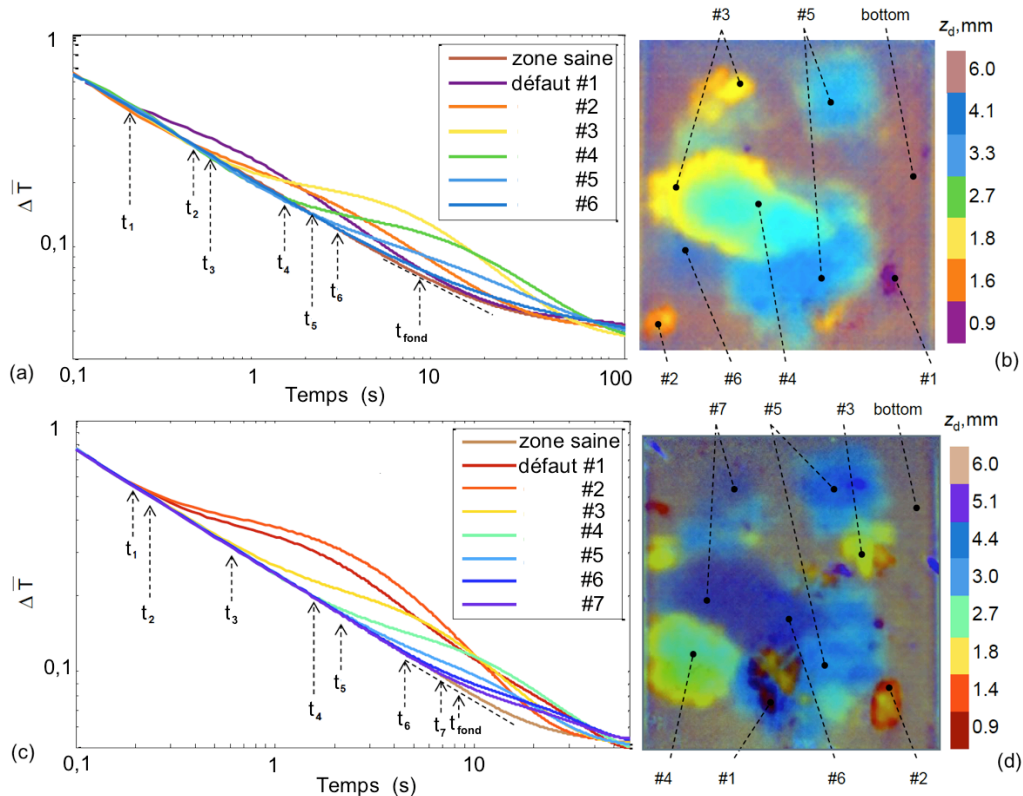


Figure 2 : Détection et caractérisation de défauts de fabrication d'une plaque de composite C/silicone de dimensions 300x300 mm<sup>2</sup>, face avant (a, b) et face opposée (c, d). Les cartographies thermiques RVB (b) et (d) sont obtenues à partir de polynômes logarithmiques de degré 7. Les thermogrammes normalisés (a) et (c) sont lissés par des polynômes logarithmiques de degré 10 et permettent une estimation propre des instants d'émergence de contraste, et donc une graduation en profondeur de l'image RVB. La cartographie face opposée est affichée après application d'un effet miroir. Figures tirées des références [5,6].

## 6. Résultats obtenus pour des multi-délaminages créés par impact

Les images composites RVB obtenues en effectuant l'examen thermographique des deux faces de l'échantillon de carbone-époxy impacté à 28 J sont présentées sur la Figure 3 (Fig. 3b et 3d). La profondeur locale des délaminages identifiés est évaluée à l'aide de la formule (3) afin de bâtir une échelle de couleur graduée en profondeur.

Cette fois, l'interprétation de la correspondance entre les échelles de profondeurs estimées à partir de chaque face n'est pas aussi instantanée que dans le premier exemple. L'endommagement

d'impact est en effet plus complexe, les délaminages créés aux interfaces successives des plis étant recouvrants (partiellement ou totalement) et d'extensions variables. Il s'ensuit que la vérification de l'épaisseur globale de l'échantillon à partir de profondeurs estimées ne peut être pertinente que dans une zone affectée par un seul délaminage. C'est le cas pour la partie périphérique du délaminage #4 dont les profondeurs calculées à partir des deux faces (1,7 mm et 2,3 mm) conduisent à une somme de 4 mm, proche de l'épaisseur totale de la plaque. Pour les autres défauts détectés, il faut noter que l'allure des thermogrammes normalisés diffère de celle observée pour la plaque C/silicone : les contrastes apparaissent et se développent au fur et à mesure que le signal thermique atteint des couches de plus en plus profondes, mais sans s'atténuer. Il en résulte que l'information obtenue à partir de la température surfacique enregistrée par la caméra infrarouge se décorrèle progressivement des profondeurs individuelles des défauts. Or, les coefficients des polynômes logarithmiques TSR à partir desquels se constituent les images composites RVB sont essentiellement liés à la forme globale de ces thermogrammes : la corrélation couleur/ profondeur ne peut donc qu'être différente pour les mesures sur les deux faces et, du point de vue qualitatif, les images tendent à perdre en netteté.

Par ailleurs, comme l'illustre la Figure 4, l'image composite RVB de la face avant est en bon accord avec l'image ultrasonore, qualitativement, le pattern d'endommagement en « ailes de papillon » étant proprement restitué, et quantitativement, les valeurs de profondeurs des délaminages les moins profonds étant quasi-identiques.

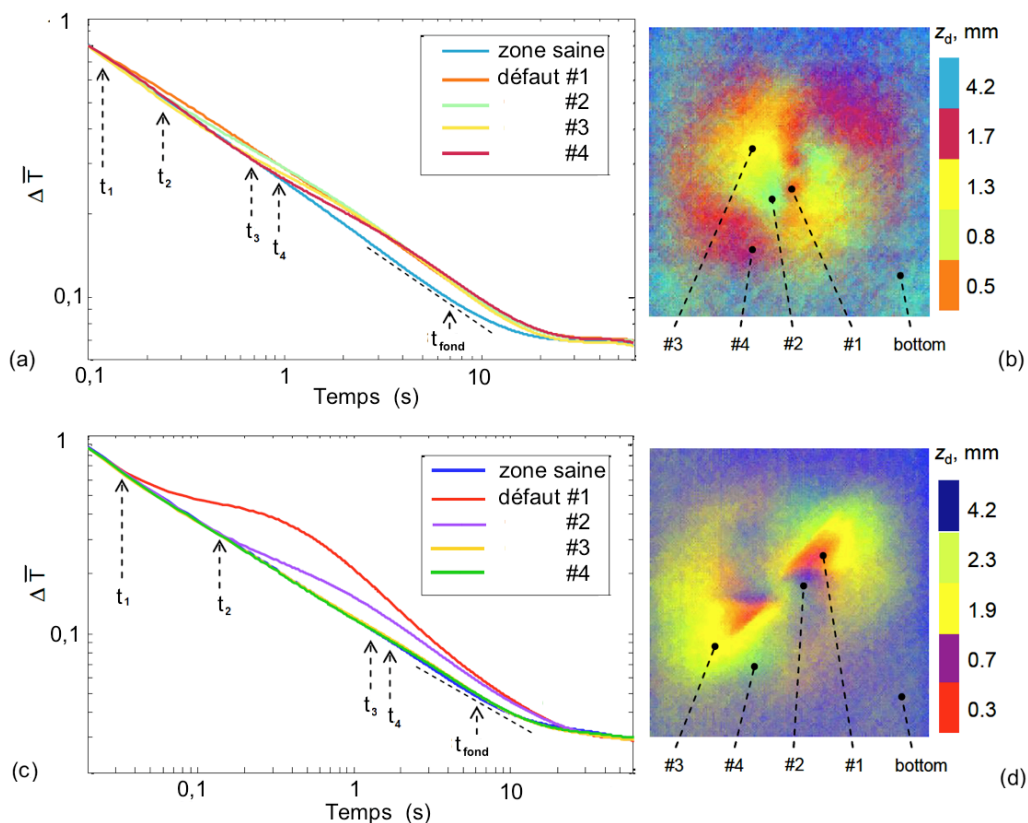


Figure 3 : Détection et caractérisation d'un multi-délaminage créé par un impact de 28 J sur une plaque de composite C/époxy de  $150 \times 150 \text{ mm}^2$ , faces avant (a, b) et opposée (c, d) ; dimensions de la zone observée :  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ . Les cartographies thermiques RVB (b) et (d) sont obtenues à partir de polynômes logarithmiques de degré 7. Les thermogrammes normalisés (a) et (c) sont lissés par des polynômes logarithmiques de degré 10 et permettent une estimation propre des instants d'émergence de contraste, et donc une graduation en profondeur de l'image RVB. La cartographie face opposée est affichée après application d'un effet miroir. Figures tirées de [5].

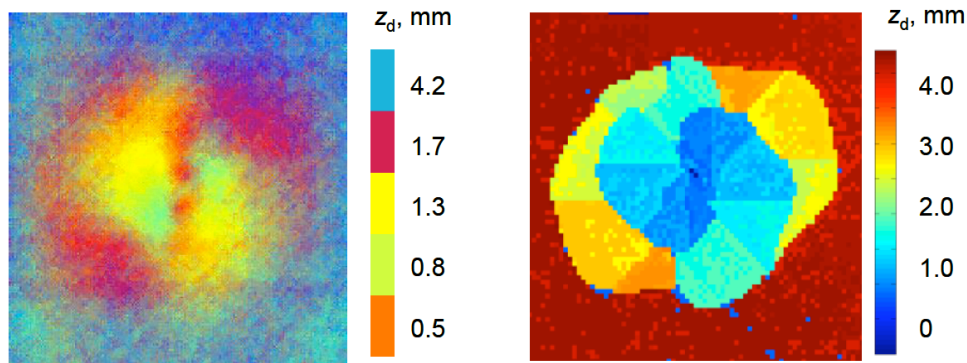


Figure 4 : Comparaison entre les D-scans thermique (gauche) et ultrasonore (droite) de la face avant du composite stratifié impacté à 28 J. Zone observée de dimensions  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ .

## 7. Conclusion

L'applicabilité et la pertinence des cartographies thermiques "TSR-RVB", obtenues par projection RVB des coefficients polynomiaux TSR, sont vérifiées pour des défauts réels dans des structures composites : la corrélation entre les couleurs et les profondeurs est confirmée. Ces résultats ont été atteints grâce à l'alliance d'une condensation maximale de l'information par l'établissement de l'image RVB mixant les informations de trois images de coefficients TSR et de l'utilisation d'une méthode simple et rapide d'évaluation des profondeurs locales permettant d'étalonner les couleurs en profondeur de défaut. La méthode est applicable pour toute éprouvette plane dont l'épaisseur est connue.

Le point dur, au regard de l'automatisation de la procédure, consiste en la mise au point d'une méthode de sélection des trois images de coefficients TSR générant l'image RVB optimale, ce qui est d'autant plus complexe qu'il a été constaté empiriquement qu'un tel optimum dépendait aussi des profondeurs des défauts à détecter.

Néanmoins, le potentiel de la procédure ici proposée est validé du point de vue de sa rapidité, de sa fiabilité, la qualité des cartographies obtenues s'approchant de celle des D-scans ultrasonores de référence, et donc de son applicabilité en conditions industrielles.

## Références

- [1] S. M. Shepard, Advances in pulsed thermography. *Thermosense XXIII, Proc. SPIE. 4630* (2001), 511–515.
- [2] J.-M. Roche, F.-H. Leroy, D.L. Balageas, Images of TSR coefficients: a simple way for a rapid and efficient detection of discontinuities, *Materials Evaluation, Vol. 72, No.1*, 73-82, 2014.
- [3] J.-M. Roche, F.-H. Leroy, D.L. Balageas, Information condensation in defect detection using TSR coefficients images, QIRT 2014 (Bordeaux, 7-11 juillet 2014), Papier QIRT 2014-002. Téléchargeable sur le site: <http://www.qirt.org/archives/qirt2014>.
- [4] Balageas D.L., Defense and illustration of time-resolved pulsed thermography for NDE. *QIRT Journal, Vol. 9, No. 1*, 3-32, 2012.
- [5] J.-M. Roche, D.L. Balageas, Detection and characterization of composite real-life damage by the TSR-polynomial coefficients RGB-projection technique, QIRT 2014 (Bordeaux, 7-11 juill. 2014), Papier QIRT 2014-010. Téléchargeable sur le site : [www.qirt.org/archives/qirt2014](http://www.qirt.org/archives/qirt2014).
- [6] J.-M. Roche, D.L. Balageas, Advance thermal imaging techniques for quantitative damage mapping of composite materials, 6<sup>th</sup> Int. Symposium on NDT in Aerospace (Madrid, Espagne, 12-14 nov. 2014). Téléchargeable sur le site : [www.ndt.net/app.aeroNDT2014](http://www.ndt.net/app.aeroNDT2014).