

Défense et illustration de la thermographie stimulée impulsionnelle en évaluation non destructive

Daniel BALAGEAS

ONERA, Départ. Matériaux & Systèmes Composites, BP 72, 92322 Châtillon, France
balageas@onera.fr

Résumé - La méthode d'END thermographique impulsionnelle classique souffre à l'heure actuelle d'incompréhension et de dénigrement. On s'attache ici à montrer qu'utilisée avec discernement et en s'appuyant sur les acquis de recherches publiées depuis de très nombreuses années, elle permet la détection et la caractérisation les plus simples et les plus rigoureuse des défauts cachés dans les structures. Ceci est illustré par quelques cas choisis pour leur représentativité de la réelle complexité des structures de la vie pratique.

Nomenclature

e	effusivité, $J s^{-1/2} m^{-2} K^{-1}$	$\Delta \bar{T}_{x,y}(t)$	échauffement normalisé
$Ca_{x,y}(t), Cr_{x,y}(t)$	contrastes thermiques, $K, s.d.$	<i>Symboles grec</i>	
$(S/B)_d$	Rapport signal à bruit du défaut	σ	écart-type du bruit dans la zone saine
Q	fluence (densité d'énergie absorbée), Jm^{-2}	<i>Indices</i>	
t, t'	temps, temps de normalisation, s	d, s	défaut, zone saine

1. Introduction

Depuis de nombreuses années, dans la littérature de l'évaluation non destructive (END), c'est devenu un lieu commun de dire que la thermographie stimulée impulsionnelle (Pulse Thermography, PT) [1-4], dont les résultats consistent en des images d'amplitude ou de contraste d'amplitude d'échauffement, a une faiblesse rédhibitoire lorsqu'on la compare à la thermographie modulée à détection synchrone (ou Lock-in Thermography, LT) [5] et à la méthode dite Pulsed-Phase Thermography (PPT) [6] qui consiste à appliquer une transformée de Fourier discrète au thermogramme impulsionnel. Contrairement à la méthode PT, ces deux dernières méthodes permettent d'établir des images de phase et de contraste de phase de l'échauffement.

La faiblesse reprochée à la méthode PT résiderait dans la forte dépendance du signal d'amplitude de l'échauffement à la variabilité spatiale des propriétés optiques (absorption et émission) de la structure insolée et aux inhomogénéités du flux imposé, et dans le fait qu'elle serait sans remède efficace. Cette pétition de principe est parfois confortée par des comparaisons biaisées dans lesquelles une technique conduisant à des images de phase est comparée avantageusement à la technique stimulée impulsionnelle appliquée avec un traitement de données peu sophistiqué produisant des images d'amplitude mal normalisées (voir par exemple [7]). En parallèle à cette approche peu rigoureuse du problème, on note que la production scientifique apparaissant dans la littérature de ce domaine est aujourd'hui nettement moins quantitative que celle des années 90 et cela malgré la mise en œuvre parfois de post-traitements sophistiqués tels les ondelettes [8], la décomposition en composantes principales [9], les réseaux de neurones [10], ou l'utilisation des diagrammes de corrélation [11]. Ces deux raisons sont la motivation du présent travail.

On montre d'abord qu'une technique de normalisation des thermogrammes existante [12,13], simple dans son principe et efficace pour peu qu'elle soit appliquée avec discernement, est possible et constitue un remède drastique à cette faiblesse. Ceci est illustré par son application à une structures complexe contenant divers types de défauts [14,15]. Une autre faiblesse reprochée à l'ensemble des méthodes (PT, LT et PPT) est la nécessité de définir une zone saine permettant de

définir par contraste les zones défectueuses. Certains palliatifs ont été proposés [16]. On montre qu'il ne sont pas d'un emploi universel, mais strictement applicables à des plaques monolithiques.

Dans une troisième partie, on définit les meilleures conditions d'application de la méthode PT, en insistant, à contre-courant de la pratique générale identifiant les défauts à partir du contraste maximum, sur l'intérêt de les détecter et caractériser le plus précocement possible. Ceci nous amène en dernier lieu à montrer tout l'intérêt de l'approche TSR (Thermographique Signal Reconstruction, [17]), non seulement pour ses capacités de très importante compression des données et de réduction significative du bruit, mais surtout parce qu'elle aide à la précocité de la détection et de la caractérisation quantitative par l'opération de dérivation des thermogrammes.

2. La normalisation des images thermographiques

2.1. Remarque liminaire concernant l'échauffement et le contraste thermique

Dans la méthode PT, la détection et la caractérisation d'un défaut reposent sur celles d'un contraste d'échauffement *relatif*, Cr , entre zone suspecte et zone supposée saine. Il faut être rigoureux dans la définition du contraste à utiliser. En particulier, compte tenu de la faiblesse possible du contraste comparé au bruit temporel et spatial de l'échauffement en fin d'essai, on ne doit pas se contenter, comme le font de nombreux auteurs, de l'hypothèse simpliste de l'isothermicité initiale de l'échantillon (au temps $t = 0^{-\epsilon}$). Les grandeurs à considérer sont :

- l'échauffement, $\Delta T_{x,y}(t) = T_{x,y}(t) - T_{x,y}(0^{-\epsilon})$,
- le contraste relatif : $Cr_{x,y}(t) = Ca_{x,y}(t) / \Delta T_{s,x,y}(t)$, (1)

avec $Ca_{x,y}(t)$, le contraste absolu entre zone défectueuse (indice d) et zone saine (indice s) :

$$Ca_{x,y}(t) = \Delta T_{d,x,y}(t) - \Delta T_{s,x,y}(t) = [T_{d,x,y}(t) - T_{d,x,y}(0^{-\epsilon})] - [T_{s,x,y}(t) - T_{s,x,y}(0^{-\epsilon})]. \quad (2)$$

Le problème de la définition de la zone saine prise comme référence est abordé plus loin. Le contraste relatif est sans dimension. D'une façon générale l'analyse de la réponse impulsionnelle ne nécessite pas de mesure absolue de température. Il suffit que le signal électrique délivré par la caméra soit proportionnel à la température, ce qui demande de ne considérer que des échauffement de quelques degrés permettant un linéarisation de la courbe d'étalonnage.

2.2. Une normalisation simple et efficace

Dans les premiers instants du refroidissement suivant l'imposition d'un dirac de flux, et sauf dans le cas où le défaut serait en surface même de la structure, on peut considérer que celle-ci se comporte localement comme un milieu homogène thermiquement semi infini, d'effusivité e . L'évolution de l'échauffement surfacique répond alors à la formule très simple :

$$\Delta T_{x,y}(t) = Q_{x,y} / (e \sqrt{\pi} \sqrt{t}). \quad (3)$$

Lorsque l'influence des défauts se faire sentir, l'évolution de la température devient plus complexe et différente d'un point à l'autre de la structure [3]. Néanmoins, l'interprétation des thermogrammes en vue de la détection/caractérisation de défauts nécessite que les échauffements locaux soient comparables, c'est à dire qu'ils correspondent à des fluences identiques, ce qui est difficilement réalisable dans la pratique (imperfection de l'illumination, variabilité des propriétés optiques de la surface). La solution consiste alors à effectuer une normalisation des échauffements locaux en les divisant par ceux obtenus aux mêmes endroits, à un temps t' suffisamment proche de l'impulsion, pour que la loi (3) s'applique encore [18] :

$$\Delta \bar{T}_{x,y}(t) = \Delta T_{x,y}(t) / \Delta T_{x,y}(t'). \quad (4)$$

Ceci revient à donner en tout point, au temps t' , la valeur unité à l'échauffement de surface, éliminant l'influence de $Q_{x,y}/e$, facteur inconnu et variable d'un point à l'autre de la surface. Remarquons que les $Cr_{x,y}(t)$ évalués à partir des échauffements bruts et normalisés ne sont pas identiques.

La partie droite de la Fig. 1 illustre l'effet spectaculaire d'une telle normalisation dans le cas de patches de réparation en composites collés sur plaque d'aluminium, faisant passer du graphe inférieur au graphe intermédiaire, et rendant comparables non seulement les thermogrammes enregistrés en deux points d'une même éprouvette, l'un sain, l'autre défectueux, mais également ceux obtenus lors de plusieurs essais sur trois éprouvettes identiques, mais affectées de défauts différents.

2.3. Optimisation de la normalisation

Pour que la normalisation soit valable l'équation (3) doit s'appliquer au temps t' . Ce n'est possible que si le matériau est homogène dans une épaisseur égale à la longueur de diffusion correspondant au temps t' . Dans le cas d'un composite, par sa nature même le matériau n'est pas homogénéisable à l'échelle des fibres de renforcement, voire d'un pli. Ceci explique que pour des temps $t < 0,4$ s dans le cas des patches l'ensemble des thermogrammes du diagramme intermédiaire ne sont pas strictement confondus. La normalisation avait été effectuée à $t' = 0,05$ s. Si on réalise cette opération pour un temps double ($t' = 0,1$ s), correspondant à une épaisseur de diffusion plus importante pour laquelle le matériau est mieux homogénéisable, l'ensemble des thermogrammes est bien confondu en une seule et même droite de pente $-1/2$ pour $t < 0,4$ s (graphe supérieur) et l'évaluation et la comparaison des contrastes peut s'effectuer dans de meilleures conditions.

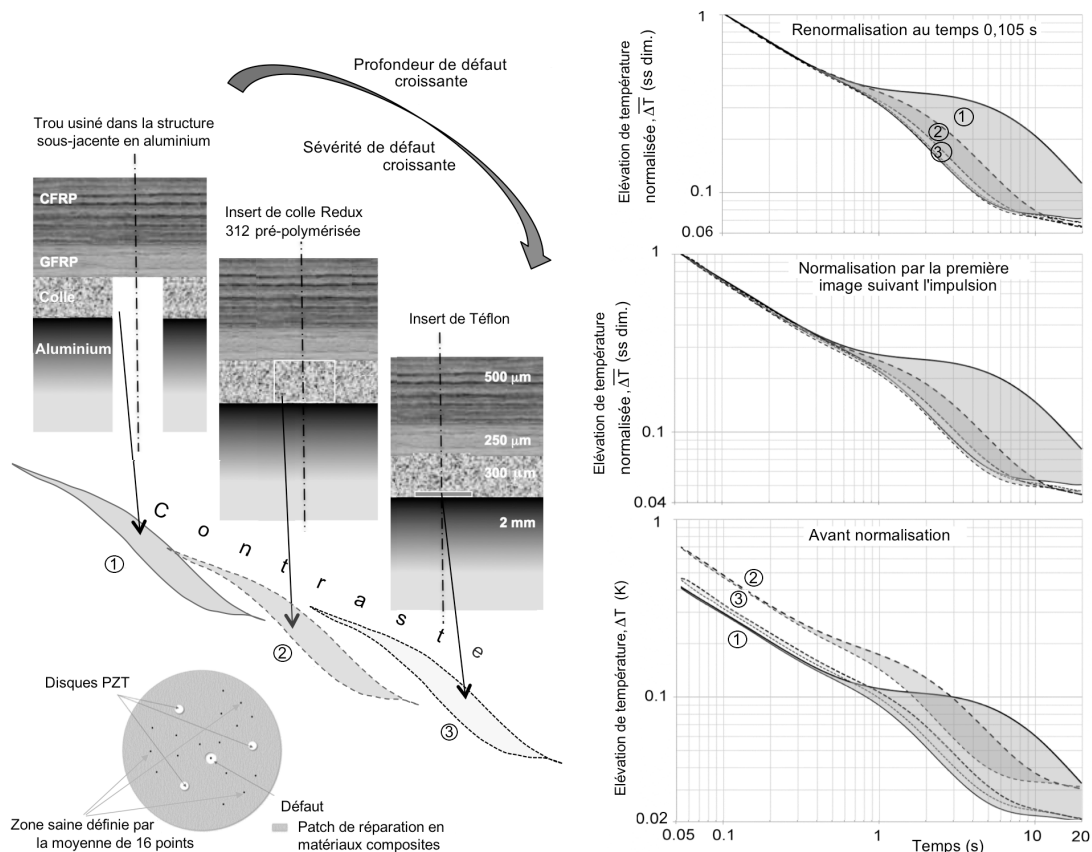


Figure 1 : Thermogrammes impulsions bruts et normalisés montrant l'efficacité de la normalisation, permettant la comparaison du comportement en divers points d'une même structure au cours d'un essai unique ou celle de divers essais sur des structures identiques affectées de défauts différents. L'influence bénéfique d'une re-normalisation plus tardive est également montrée. Les thermogrammes ont fait l'objet d'un traitement par la méthode TSR (Thermographic Signal Reconstruction), [17]).

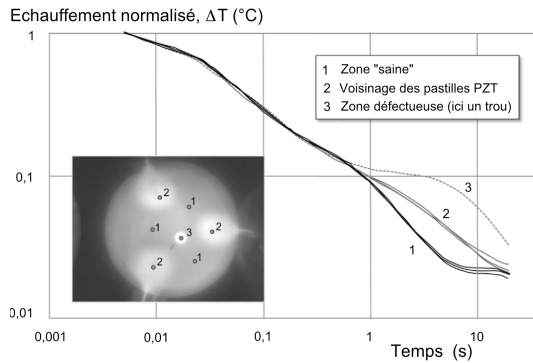


Figure 2 : Relativité de la notion de zone saine (cas du patch de réparation de la Fig. 1, d'après [15]).

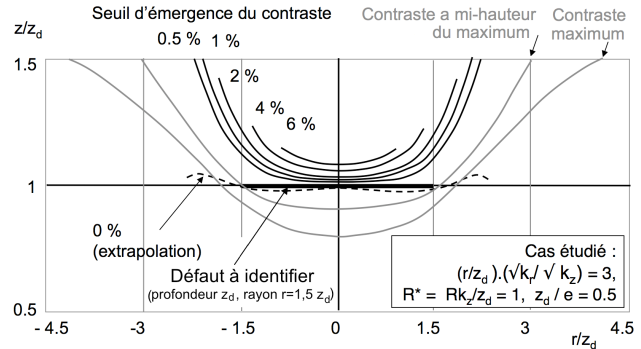


Figure 3 : Identifications comparées de la profondeur d'un défaut fondées sur la détection précoce et sur le maximum de contraste, d'après [20] (simulation).

3. Un problème commun à toute méthode d'END : la définition d'une zone saine

Le problème de la définition de la zone saine servant de référence pour détecter les défauts se pose à toutes les méthodes. Une solution [16] consiste à supposer qu'une zone saine doit continuer à suivre la loi (3) avec le facteur Q/e identifié au temps t' . Tout écart est considéré comme un contraste manifestant la présence d'un défaut. L'application est limitée à des plaques monolithiques homogènes contenant des défauts éloignés de la face arrière. Dans un cas pratique comme celui des patches composites, les propriétés thermiques du matériau sain passant d'un carbone/résine à un verre-résine évoluent avec la profondeur, rendant inapplicable la méthode. La structure peut aussi varier d'une zone à l'autre (voir Fig. 2 les zones perturbées par des pastilles de PZT, sans défaut, mais différant de la zone saine définie loin des PZT). Il faut alors définir une seconde zone saine si l'on veut rechercher des défauts proches des PZT. D'une façon générale, la détection de défaut dans une structure ne peut se faire sans prise en compte de sa complexité interne.

4. L'optimisation de la méthode impulsionnelle passe par une détection précoce

De tout temps les utilisateurs de la méthode impulsionnelle se sont focalisés sur le contraste maximum pour effectuer l'identification de la profondeur des défauts, partant de l'idée *a priori* justifiée, que cela correspondait au meilleur rapport S/B. Ce choix, qui se comprenait lorsque les performances des caméras étaient limitées (NETD de 100 mK), est en fait malheureux. Dès le début des années 90 nous avons attiré l'attention sur le fait qu'il valait mieux considérer le contraste naissant (détection précoce) [19,20] et cela pour deux raisons : i) l'occurrence du maximum de contraste intervient tardivement, donc à un moment où les transferts thermiques latéraux prennent de l'importance et faussent les résultats des modèles directs et inverses 1-D (modèles simples qu'il faut utiliser pour limiter les temps calcul des traitements d'images), ii) à ce moment le thermogramme est aussi sensible à la profondeur qu'à la résistance thermique. Au contraire, l'émergence du contraste se produit beaucoup plus tôt, d'où une réduction très importante des effets 3-D, et le thermogramme est alors seulement influencé par la profondeur.

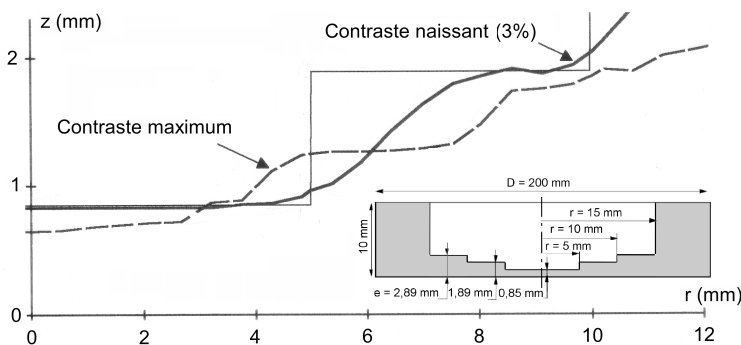


Figure 4 : Restitutions comparées de l'épaisseur suivant que l'on part du contraste naissant ou du contraste maximum, d'après [19] (résultats expérimentaux).

La supériorité de la détection précoce est évidente que ce soit pour localiser en profondeur un défaut de dimensions finies (Fig. 3) ou déterminer une loi d'épaisseur sur une éprouvette de forme complexe (Fig. 4). Ces exemples ne seront pas commentés ici faute de place, mais ils parlent d'eux-mêmes. Le contraste naissant a son pendant dans la méthode PPT : la "fréquence aveugle" pour laquelle la phase de la zone défectueuse commence à se différencier de celle de la zone saine [21]. Cependant, la détermination de l'émergence du contraste d'amplitude est précise, alors que celle de la "fréquence aveugle" repose sur des formules empiriques peu précises dépendant du matériau.

5. Où l'approche TSR permet l'utilisation optimale de la méthode impulsionnelle

Le bruit croissant avec le temps affectant les thermogrammes impulsionnels est souvent mis en avant par les utilisateurs de la méthode LT. Ce bruit peut effectivement devenir très grand, mais ceci est compensé, si un lissage est effectué, grâce au nombre croissant de points expérimentaux acquis par tranche de temps. C'est ce que fait la méthode TSR [17] qui apporte, grâce au filtrage-lissage des thermogrammes par polynômes logarithmiques, $\text{Log}(\Delta T) = \sum_0^n a_i [\text{Log}(t)]^n$, une réduction très notable du bruit ainsi qu'une compression remarquable des données. Elle a par ailleurs le grand mérite, grâce à l'utilisation des dérivées logarithmiques première et seconde, $d\text{Log}(\Delta T)/d\text{Log}(t)$ et $d^2\text{Log}(\Delta T)/d\text{Log}(t)^2$, de permettre une détection et une caractérisation des défauts plus précoces qu'avec les seuls thermogrammes. Ainsi sur la Fig. 5 gauche on voit que pour le patch de réparation composite avec le second type de défaut présenté en Fig. 1 on obtient avec ces dérivées des rapports S/B du défaut non seulement meilleurs qu'avec le thermogramme, mais surtout pour des temps beaucoup plus petits que le temps du $(S/B)_d$ maximum du thermogramme. Ceci se voit qualitativement sur la Fig. 5 droite où sont comparées les meilleures images des thermogrammes et des dérivées logarithmiques. La dérivée première en particulier conduit à une image aussi bonne que celle des ultrasons, faisant apparaître des défauts inattendus entre le défaut artificiel et un PZT, avec un netteté remarquable traduisant l'absence de transferts 3-D dans la structure au temps $t = 0,6$ s. En comparaison l'image du thermogramme à 2,2 s (proche du maximum de contraste) est floue. Il faut donc, pour optimiser la méthode, considérer à la fois le contraste (où mieux le rapport signal à bruit du défaut $(S/B)_d$), et son temps d'occurrence.

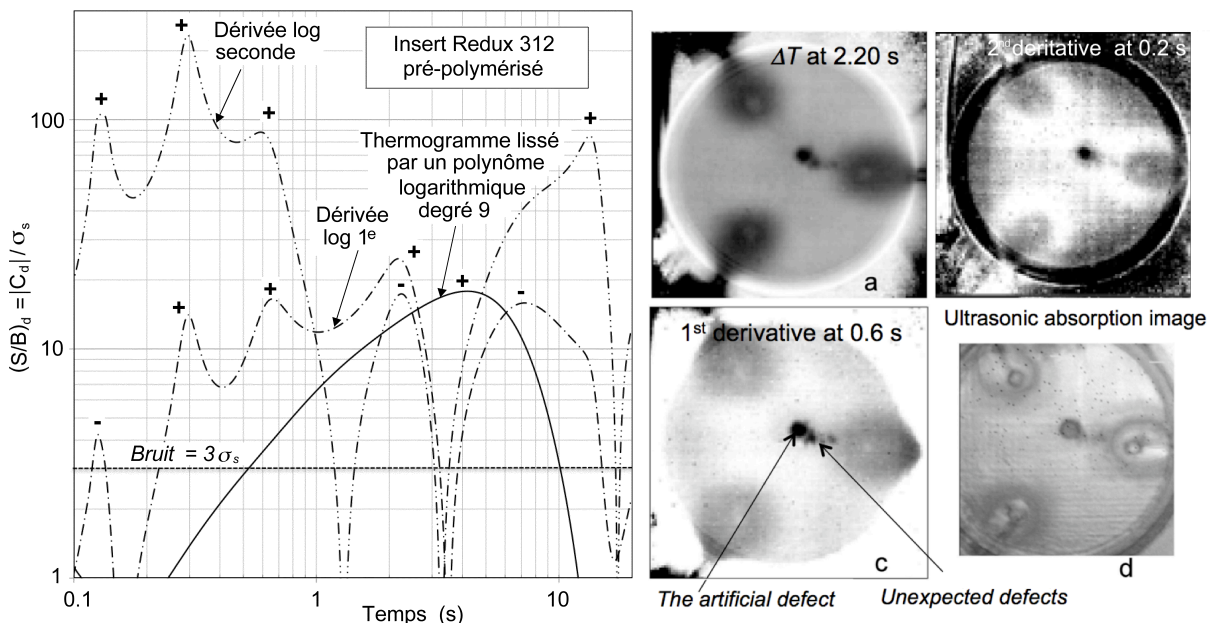


Figure 5 : (A gauche) : S/B du défaut obtenu à partir du thermogramme et des ses dérivées logarithmiques première et seconde (+ : contraste positif, - : contraste négatif) ; (à droite) : meilleures images thermographiques et comparaison à un contrôle ultrasonore, d'après [15].

6. Conclusion

Pour la méthode impulsioneille l'influence de l'hétérogénéité de l'illumination et des propriétés optiques peut être efficacement éliminée par une normalisation simple à appliquer. L'optimisation de la méthode passe par une détection précoce du contraste, un filtrage lissage par polynôme logarithmique et l'utilisation des polynômes dérivés (méthode TSR). Dans ces conditions, cette méthode reste le meilleur choix pour réaliser une évaluation non destructive vraiment quantitative. Une présentation beaucoup plus développée du présent travail sera publiée très prochainement [22].

Références

- [1] Milne JM, Reynolds WN, The non-destructive evaluation of composites another materials by thermal pulse video thermography, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 1985, pp. 119–122.
- [2] Vavilov V., Ivanov A., Pulse thermal testing of multilayer specimens, *Sov. J. NDT*, 1984, N°6, pp. 39-47.
- [3] Balageas D.L., Krapez J.C., Cielo P., Pulsed photothermal modelling of layered material, *J. Appl. Phys.*, vol. 59, 1986, n°2, pp. 348-357, 1986.
- [4] D.L. Balageas, A.A. Déom et D.M. Boscher, Characterization and non destructive testing of Carbon-epoxy composites by a pulsed photothermal method, *Mat. Eval.*, vol. 45, n°4, pp. 461-465, 1987.
- [5] G. Busse, D. Wu, W. Karpen, Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography, *J. Appl. Phys.*, vol. 71, n°8, pp. 3962-3965, 1992.
- [6] Maldague X., Marinetti S., Pulse phase infrared thermography, *J. Appl. Phys.*, vol. 79, n°8, pp. 2694-2698, 1996.
- [7] G.M. Revel, S. Rocchi, "Defect detection in ceramic materials by quantitative infrared thermography", *Proc. Conf. QIRT 2006*, Padoue, 2006. Téléchargement : <http://qirt.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=38>.
- [8] R. Olbrycht, B. Wiecek, G. Gralewicz, T. Swiateczak, G. Owczarek, Comparison of Fourier and wavelet analyses for defect detection in lock-in and pulse phase thermography, *QIRT Journal*, vol. 4, n°2, pp. 219-232, 2004.
- [9] M. Genest, Image Processing for Automated Flaw Detection in Pulsed Thermography, *Proc. 6th Int. Workshop on Advances in Sign. Process. for N.D.E. of Mat.*, London, Ontario, Canada, 26-27 août 2009.
- [10] T. D'Orazio, M. Leoa, A. Distanto, V. Pianese, G. Borzacchiello, G. Cavaccini, A neural approach for thermographic image analysis, *Proc. QIRT 2006 Conf.* Téléchargement : <http://qirt.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=38>.
- [11] C. Spiessberger, A. Gleiter, G. Busse, Data fusion of lock-in thermography phase images for innovative on-destructive evaluation, *QIRT Journal*, vol. 6, n°2, pp.149-161, 2009.
- [12] Boscher D.M., Balageas D.L., Déom A.A., Gardette G., Non-destructive evaluation of carbon/epoxy laminates using transient infrared thermography, *Proc. 16th NDE Symp.*, San Antonio, avril 21-23, 1987.
- [13] Déom A., Boscher D., Balageas D.L., Pulsed photothermal non destructive testing. Application to carbon epoxy laminates, *Rev. of Progress in Quant. NDE*, Vol. 9A, pp. 525-531, 1990.
- [14] D. Balageas, B Chapuis, G. Deban, F. Passilly, "Évaluation quantitative de l'amélioration apportée par la méthode TSR à la détection de défauts par thermographie stimulée impulsioneille. Cas d'un patch composite instrumenté, *Actes du Congrès Français de Thermique 2009*, éditeur : SFT, pp. 651-657
- [15] D. Balageas, B. Chapuis, G. Deban, F. Passilly, Improvement of the detection of defects by pulse thermography thanks to the TSR approach in the case of a smart composite repair patch, *QIRT J.*, Vol. 7, N° 2, 2010, pp 167-187.
- [16] M. Pilla, M. Klein, X. Maldague, A.Salerno, New absolute contrast for pulsed thermography, *Proc. Conf. QIRT 2002*, pp. 53-58, téléchargement : <http://qirt.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=44> (QIRT 2002-004).
- [17] 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.
- [18] Balageas D.L., Delpech Ph., Boscher D., Déom A., New developments in stimulated infrared thermography applied to nondestructive testing of laminates, *Rev. of Progress in QNDE*, vol. 10A, pp. 1073-1081, 1991
- [19] Krapez J.-C., Lepoutre F., Balageas D., Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated thermography, *J. de Physique IV*, 4 (C7), pp. 47-50, juill. 1994
- [20] Krapez J.C., Balageas D., Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography, *Actes Conf. QIRT 1994*, Ed. Européennes Thermique et Industrie, Paris, 1995, pp. 260-266.
- [21] Ibarra-Castaneda C., Maldague X., Pulsed phase thermography reviewed, *QIRT J.*, Vol. 1, No 1, 2004, pp. 47-70.
- [22] Balageas D., Defense and illustration of time-resolved pulsed thermography for NDE, *Thermosense XXXIII, Proc. of SPIE*, Vol. 8013, Paper 8013-31, 2011.