



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/6614>

To cite this version :

Daniel BALAGEAS, Jean-Michel ROCHE - Détection précoce et caractérisation de défauts par thermographie stimulée par échelon de flux et comparaison à la méthode impulsionnelle - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Détection précoce et caractérisation de défauts par thermographie stimulée par échelon de flux et comparaison à la méthode impulsienne

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

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 – L'approche de la détection précoce développée pour la thermographie impulsienne, utilisant le concept de contraste émergent, est appliquée à la thermographie stimulée par chauffage en échelon. Une procédure d'identification des paramètres des défauts (profondeur et résistance thermique) est proposée et comparée à celle utilisée pour la thermographie impulsienne. La précision et la précocité de l'identification dans ces deux cas sont précisées, avec un avantage pour la thermographie impulsienne.

Nomenclature

e	effusivité, $J s^{-1/2} m^{-2} K^{-1}$	t	temps, s
Cr	contraste relatif	ΔT	échauffement, K
Fo	nombre de Fourier	z	profondeur, m
k	conductivité thermique, $W m^{-1} K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
q	densité de flux, $W m^{-2}$	κ	diffusivité, $m^2 s^{-1}$
R	résistance thermique, $W^{-1} m^2 K$	<i>Indices inférieurs</i>	
R^*	résistance therm. normalisée du défaut	$*, d, s, L$	défaut, zone saine, épaisseur de la plaque

1. Rappel sur l'intérêt de la thermographie stimulée par chauffage en échelon

A côté de la thermographie impulsienne, un autre type de stimulation thermique a été proposé pour réduire l'amplitude de l'échauffement de la structure testée et sonder des épaisseurs plus importantes de matériau : la thermographie stimulée par chauffage en échelon [1,2]. Une synthèse des travaux effectués dans ce domaine dans la dernière décennie du siècle dernier a été publiée en 1998 par Oslander et Spicer [3], qui montre la grande variété des applications, en particulier en évaluation non destructive.

2. Travaux récents de Badghaish et Fleming (méthode à deux points)

Plus récemment Badghaish et Fleming [4,5] s'intéressant au problème de l'identification de défauts de type résistance thermique remarquent que le *temps d'émergence du contraste* (appelé *temps de séparation* par ces auteurs) dépend de la seule profondeur du défaut et reconnaissent le besoin d'établir un critère rigoureux pour définir ce temps caractéristique. Cette problématique est identique à celle de la détection précoce en thermographie impulsienne, résolue au début des

années 90 [6-8]. Badghaish et Fleming décrivent une procédure pour déterminer cette profondeur et la résistance thermique en utilisant une corrélation à deux points. En fait, ils considèrent des temps pour lesquels le contraste relatif $Cr = (\Delta T_d - \Delta T_s) / \Delta T_s$ (ΔT_d et ΔT_s étant respectivement les échauffements des zones saines et défectueuses) créé par un défaut est égal à 1% et 5%. Ils vérifient que pour ces deux temps il existe une combinaison unique de profondeur et de résistance du défaut. Cette méthode d'identification à deux points repose sur un modèle multicouche 1-D et suppose donc l'inexistence de transferts thermiques 3-D. Il y a une certaine analogie entre cette approche et celle de Degiovanni [9] pour la mesure de la diffusivité par méthode flash.

3. Proposition d'une nouvelle méthode d'identification analogue à celle développée pour la thermographie stimulée impulsionnelle

La méthode d'identification par détection précoce du contraste émergent proposée pour la thermographie impulsionnelle [6-8] a été récemment mise en perspective et améliorée [10-12].

Comme la référence [11] l'indique, la détection précoce est une séquence de six opérations : i) choix d'un modèle, généralement 1-D, plus simple que la configuration réelle ii) choix d'une fenêtre temporelle précoce pour l'analyse des thermogrammes, en sorte que très peu de paramètres (un seul si possible) aient de l'influence, iii) résolution dans ces conditions du problème inverse, iv) analyse de l'évolution temporelle du paramètre ainsi identifié pour évaluer sa précision, v) choix d'une fonction de lissage, vi) extrapolation à un contraste nul pour obtenir l'estimée la plus précise possible.

Une procédure identique est ici appliquée au cas de la thermographie à stimulation en échelon. Le modèle choisi est 1-D (défaut d'extension latérale infinie) et le domaine d'analyse temporel est limité à des contrastes relatifs de quelques pourcents.

4. Modélisation de l'échauffement en face avant dû à un stimulus en échelon

Les configurations suivantes sont considérées : milieu semi infini homogène et adiabatique, mur homogène et adiabatique d'épaisseur finie (équivalent à un milieu semi infini contenant un défaut de résistance thermique infinie), mur d'épaisseur finie avec un défaut étendu de résistance thermique finie.

4.1. Milieu homogène semi infini

L'échauffement en face avant d'un milieu semi infini ou d'un mur épais dû à l'imposition d'un flux en échelon est donné par la formule simple suivante :

$$\Delta T = \frac{2q}{e} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}}, \quad (1)$$

où q est la densité du flux imposé, e l'effusivité du milieu et t le temps.

4.2. Mur homogène d'épaisseur finie

Dans le cas d'un mur homogène adiabatique d'épaisseur finie L la température de la face avant est donnée par :

$$\Delta T = \frac{2q}{e} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} \left[1 + \sqrt{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} 2 \operatorname{ierfc} \left(\frac{n}{\sqrt{Fo_L}} \right) \right], \quad (2)$$

où $ierfc$ est l'intégrale de la fonction erreur complémentaire $erfc$ et Fo_L le nombre de Fourier relatif à l'épaisseur L : $Fo_L = \kappa t / L^2$, κ étant la diffusivité.

Une formulation adimensionnelle de cette équation peut s'écrire :

$$\frac{\Delta T}{qL/k} = 2 \frac{\sqrt{Fo_L}}{\sqrt{\pi}} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{n^2}{Fo_L}\right) - \frac{n\sqrt{\pi}}{\sqrt{Fo_L}} erfc\left(\frac{n}{\sqrt{Fo_L}}\right) \right] \right\}, \quad (2')$$

où k est la conductivité thermique.

Comme pour la méthode impulsionnelle, la rectification du thermogramme est réalisée par tracé du thermogramme dans un diagramme log-log (Fig. 1), faisant apparaître deux asymptotes, l'une de pente 1/2 aux temps courts, l'autre de pente 1 aux temps longs.

Ce thermogramme est identique à celui obtenu au droit d'un défaut de grande extension latérale et de résistance thermique infinie, placé dans un mur d'épaisseur finie, pas trop près de la face arrière. Ceci correspond à la configuration classique du défaut artificiel réalisé par usinage en face arrière d'un trou borgne à fond plat. Le domaine de nombre de Fourier Fo_L intéressant pour l'évaluation non destructive est celui de la transition entre ces deux asymptotes. Pour de plus grands nombres de Fourier la sensibilité du thermogramme au défaut cesse et les pertes prennent de l'importance.

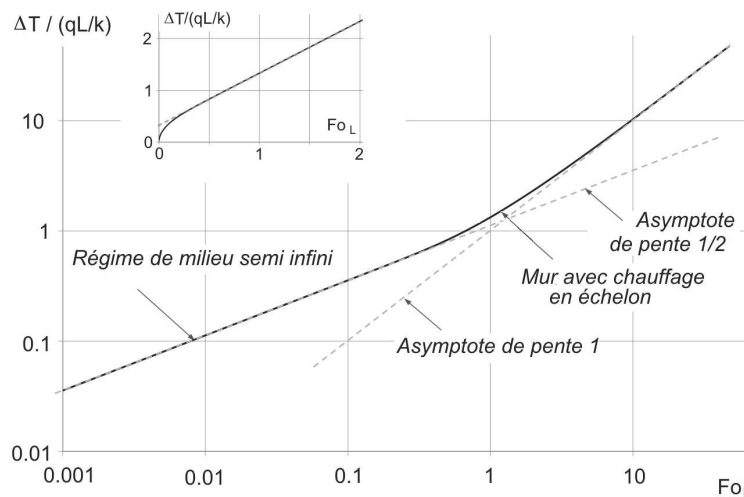


Figure 1. Echauffement de la face avant d'un mur d'épaisseur finie stimulé par un échelon de flux.

L'évolution du *contraste relatif émergent* créé par un défaut de résistance thermique infinie et de grande extension est la différence entre l'échauffement du mur adiabatique donné par l'équation (2) et celle du milieu semi infini (Eq. (1)), normalisée par ce dernier :

$$Cr_{\infty} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{n^2}{Fo_L}\right) - \frac{n\sqrt{\pi}}{\sqrt{Fo_L}} erfc\left(\frac{n}{\sqrt{Fo_L}}\right) \right]. \quad (3)$$

L'évolution du contraste relatif avec le nombre de Fourier est donnée en Fig. 2 (courbe en tireté) pour des contrastes entre 1 et 6%.

4.3. Mur d'épaisseur finie avec défaut de type résistance thermique

Finalement, pour une plaque avec un défaut situé à la profondeur z_d , équivalent à une résistance thermique R_d , une solution peut être trouvée par utilisation de la méthode des quadripôles [13]. Cette approche est celle suivie dans les références [4,5] dans lesquelles le contraste créé par le défaut est pris comme la différence entre cette solution de la plaque avec

défaut, ΔT_d , et la solution de l'équation (1) du milieu semi infini sans défaut, ΔT_s . Ceci explique pourquoi un contraste est attribué au défaut de résistance nulle, cette anomalie étant due à l'influence de la face arrière. Si l'on se limite à un domaine temporel relatif à des contrastes inférieurs à 5% (contrastés émergents), dans le cas présent les contrastes calculés ne sont pas contaminés par cet effet. La Fig. 2 présente dans un diagramme log-log l'évolution du contraste relatif Cr avec le nombre de Fourier, $Fo^* = \kappa t / z_d^2$, pour plusieurs valeurs de la résistance thermique normalisée du défaut, $R^* = z_d R_d / k$. On vérifie que l'influence de la résistance diminue lorsque le contraste tend vers zéro. Cependant cette convergences de toutes les courbes du réseau vers la solution asymptotique (la courbe pour R^* infinie donnée par (3)) n'est pas aussi rapide que dans le cas du chauffage impulsif [10-12] (voir Fig. 3).

Considérons le domaine limité du contraste émergent [1% - 5%]. Par analogie avec l'expression asymptotique ($R^* = \infty$) établie pour le cas impulsif,

$$Cr \approx 2 \exp(-1 / Fo^*), \tag{4}$$

l'expression suivante est proposée pour la loi asymptotique du chauffage en échelon :

$$Cr \approx 0.470 \exp(-1.225 / Fo^*). \tag{5}$$

Pour $R^* \neq \infty$ l'expression empirique suivante est proposée :

$$Cr \approx 0.470 \exp(-1.225 / Fo^*) [1 - \sqrt{Fo^*} / (R^* + \sqrt{Fo^*})], \tag{6}$$

similaire à celle du cas impulsif [10,12] :

$$Cr \approx 2 \exp(-1 / Fo^*) [1 - 2Fo^* / (R^* + 2Fo^*)]. \tag{7}$$

L'évolution du contraste relatif en fonction du nombre de Fourier, calculée à l'aide des formules (5,6) est également présentée sur la Fig. 2 pour comparaison avec la solution exacte. La différence entre les deux solutions est dans la plupart des cas inférieure à $\pm 5\%$.

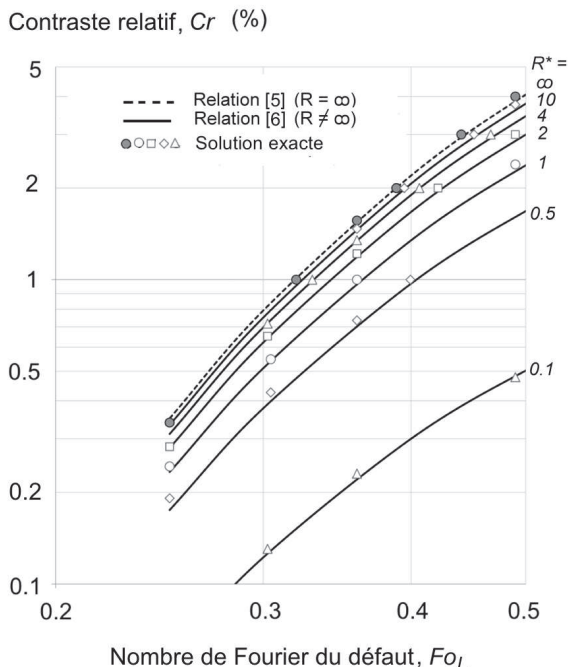


Figure 2. Contraste relatif émergent dans le cas d'un chauffage en échelon et comparaison entre solution exacte et les formules empiriques (5,6).

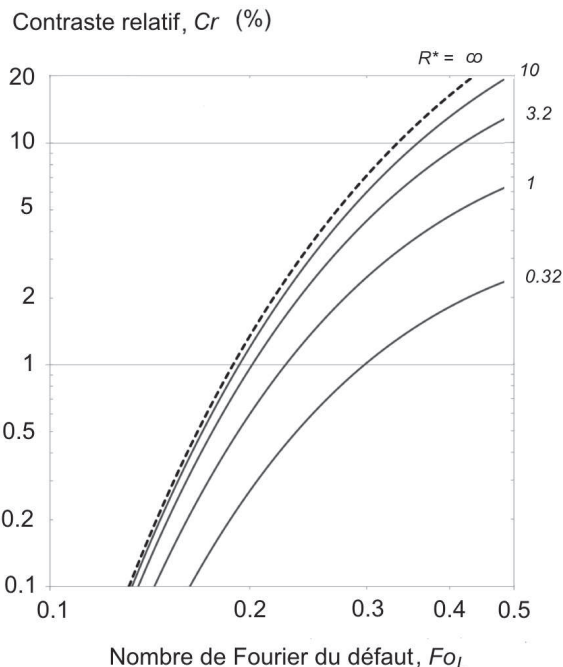


Figure 3. Contraste relatif émergent dans le cas d'un chauffage impulsif (tiré des références [10-12]).

5. Identification de la profondeur du défaut

De l'équation (5), puisque $Fo^* = \kappa t / z_d^2$, on peut exprimer la profondeur du défaut :

$$z_d = 0.903 \sqrt{\kappa t \text{Ln}(0.470 / Cr(t))}. \tag{8}$$

expression similaire à celle établie pour l'échauffement impulsionnel :

$$z_d = \sqrt{\kappa t \text{Ln}(2 / Cr(t))}. \tag{9}$$

La comparaison de la courbe asymptotique aux autres courbes du réseau de la Fig. 2 permet d'évaluer la précision de la profondeur de défaut ainsi identifiée. Les résultats sont présentés sur la Fig. 4, montrant : i) que pour des résistances thermiques de plus en plus faibles, l'Eq. (8) supposant infinie la résistance thermique du défaut conduit à identifier des profondeurs de moins en moins exactes ; ii) que, comme dans le cas de l'échauffement impulsionnel, l'erreur sur la profondeur croît linéairement avec le contraste pour une résistance thermique donnée.

Une extrapolation linéaire jusqu'au contraste nul des profondeurs identifiées pour divers contrastes permet d'atteindre l'estimation la plus précise. L'erreur est alors l'ordonnée à l'origine des droites de régression calculées aux moindres carrés pour le domaine de contraste [1%-5%]. Une relation simple entre cette erreur résiduelle, évaluée en %, et la résistance thermique est proposée (voir Fig 5) :

$$\text{Log}_{10}(\Delta z_d / z_d)_{Cr \rightarrow 0} = 0.59 - 0.88 \text{Log}_{10}(R^*). \tag{10}$$

Cette loi est présentée sur la Fig.5 et comparée aux résultats de la même approche appliquée au cas de la stimulation impulsionnelle (résultats tirés des références [10-12]). La précision de la profondeur de défaut identifiée dans le cas impulsionnel est 2,4 fois meilleure que celle obtenue pour la stimulation en échelon.

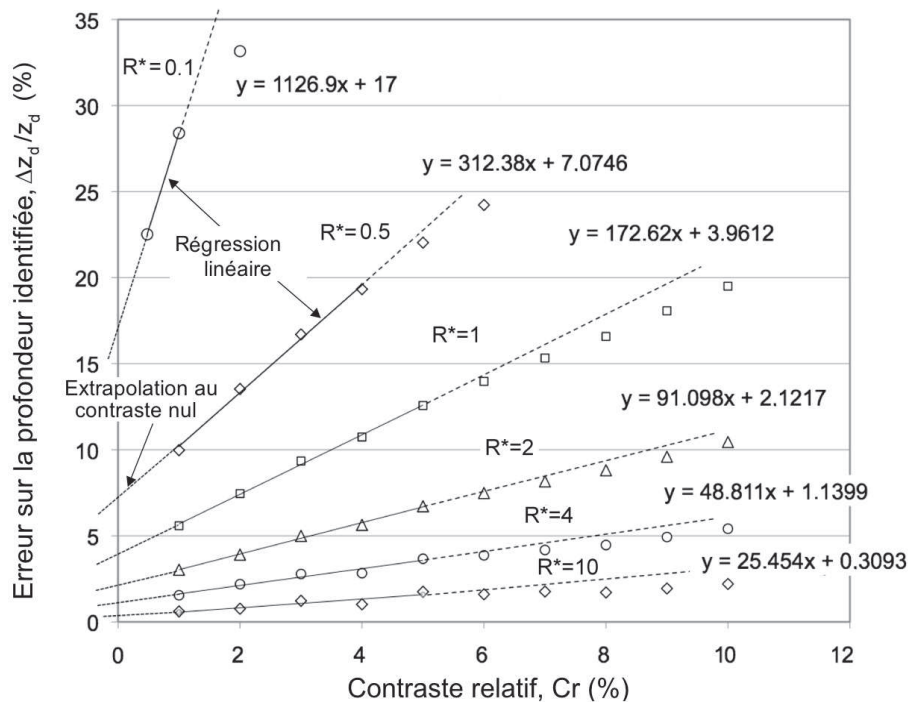


Figure 4. Erreur sur la profondeur de défaut évaluée par la relation (8) dans le cas du chauffage en échelon et extrapolation linéaire pour un contraste nul de ces valeurs.

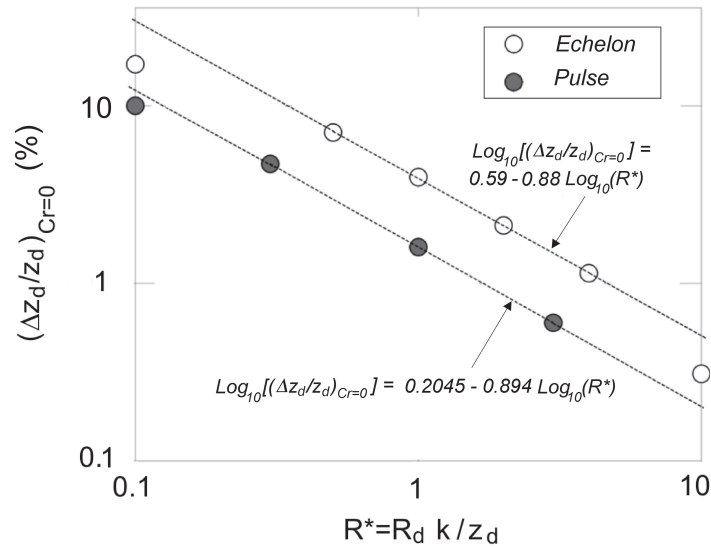


Figure 5. Erreur sur la profondeur du défaut identifiée par la formule (5) et après extrapolation au contraste nul par régression linéaire. Comparaison à la même approche appliquée à la stimulation impulsionnelle.

En ce qui concerne la précocité de l'identification de la seule profondeur par extrapolation au contraste nul, si l'on considère une résistance normalisée $R^*=1$ (résistance de défaut égale à celle du matériau situé au-dessus), celle-ci intervient dans le cas de la stimulation en échelon à un temps adimensionné $Fo^* < 0.36$ (valeur correspondant au contraste $Cr = 1\%$) alors que pour la stimulation impulsionnelle elle se produit pour $Fo^* < 0.22$ (voir Fig. 2 et 3). La méthode est donc également la plus performante du point de vue de la précocité.

6. Identification de la résistance thermique

De la relation (6), l'expression de la résistance thermique normalisée se déduit :

$$R^* = Cr \sqrt{Fo^*} / [0.47 \exp(-1.225 / Fo^*) - Cr] \quad (11)$$

et finalement celle de la résistance thermique dans laquelle intervient la profondeur du défaut évaluée par la relation (8) :

$$R = R^* z_d / k = Cr(t) \sqrt{t} e^{-1} [0.47 \exp(-1.225 z_d^2 \kappa^{-1} t^{-1}) - Cr(t)]^{-1} \quad (12)$$

dans laquelle les propriétés thermiques k , κ , et e sont celles du matériau au-dessus du défaut.

Pour cette identification de la résistance thermique, les valeurs expérimentales du contraste relatif à considérer doivent être choisies *a priori* plus fortes que pour l'identification de la profondeur (pour laquelle au contraire on effectue une extrapolation à contraste nul), mais pas trop de façon à ce qu'elles ne soient pas trop contaminées par les effets 3-D.

Pour mieux définir les conditions optimales pour l'identification de la résistance thermique la précision sur la valeur identifiée de R^* a été évaluée en utilisant la relation (11) pour diverses valeurs du nombre de Fourier, Fo^* , et du contraste relatif, Cr . Les résultats sont présentés sur la Fig. 6. Ils montrent que : i) les erreurs sur R^* sont nettement plus importantes que celles sur z_d ; ii) l'identification doit être menée pour des valeurs de contraste relatif supérieures à 3% pour garantir des erreurs inférieures à 50% ; iii) les erreurs obtenues ici sont plus importantes que celle correspondants à la stimulation impulsionnelle comme montré sur la Figure 7 tirée des références [10-12] ; iv) le fait que les erreurs passent par un minimum puis

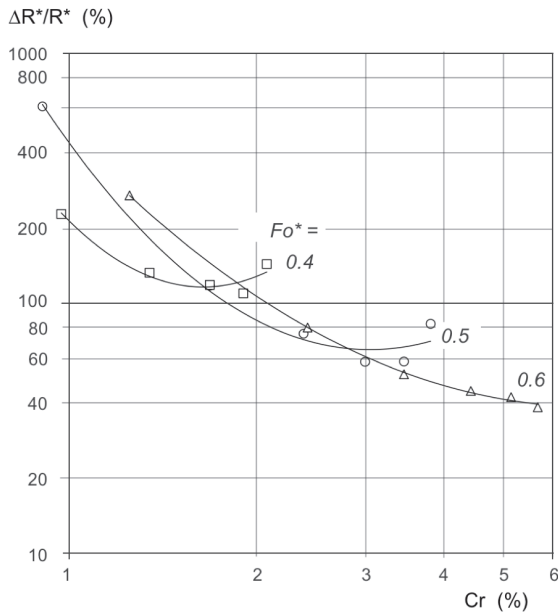


Figure 6. Précision sur la résistance thermique identifiée dans le cas de la stimulation en échelon.

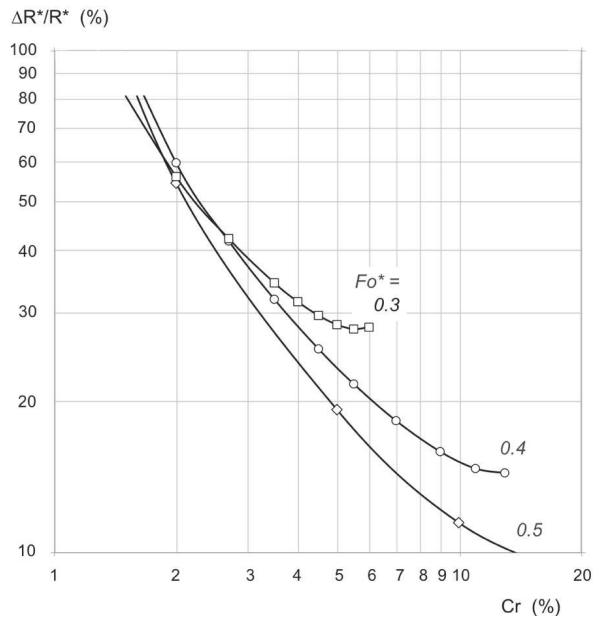


Figure 7. Précision sur la résistance thermique identifiée dans le cas impulsionnel, d'après [10-12].

remontent lorsque le contraste s'accroît corrobore ce qui est dit plus haut, à savoir que l'identification doit être effectuée pour des contrastes pas trop élevés (cet optimum dépendant du nombre de Fourier pour lequel il se produit, c'est à dire en définitive de la profondeur à laquelle gît le défaut).

7. Amélioration de la précision par itérations

Une fois la résistance thermique identifiée, on peut estimer l'erreur sur la profondeur à l'aide de la relation (10). La soustraction de cette erreur améliore la précision du résultat et cette nouvelle valeur de profondeur peut être introduite dans la relation (11) pour obtenir une meilleure valeur de la résistance thermique du défaut. Le processus étant convergent peut être effectué plusieurs fois.

8. Comparaison entre la méthode à deux points et la méthode proposée

La méthode à deux points de Badghaish et Fleming [4,5] et la présente méthode sont deux variantes de la même approche qui consiste à identifier le plus précocement possible l'apparition du contraste créé par le défaut. La présente approche, bénéficiant de l'expérience acquise dans la mise au point de la méthode de détection précoce pour la méthode impulsionnelle, nous semble cependant plus rigoureuse et doit être plus précise de par l'extrapolation au contraste nul proposé pour la détermination de la profondeur de défaut. L'étude de précision sur les deux grandeurs identifiées, la profondeur et la résistance du défaut, montre que le choix d'un contraste relatif à limité à 5% est pertinent du point de vue précision, tout au moins pour la résistance thermique.

9. Conclusion

La théorie d'une approche d'identification précoce des caractéristiques d'un défaut de type résistif par application de la thermographie stimulée à l'aide d'un flux en échelon est présentée. L'approche est tout à fait similaire à celle proposée précédemment pour la thermographie stimulée

impulsionnelle, laquelle a été validée par application à des thermogrammes expérimentaux et à des simulations numériques. La comparaison des deux méthodes montre un avantage pour la méthode impulsionnelle tant du point de vue précision que précocité. Cela ne doit pas pour autant écarter la seconde méthode qui *a priori* a l'avantage de permettre la détection de défauts plus profonds.

Il reste à valider la méthode présentée ici par applications à des données expérimentales et/ou simulées. Il sera par ailleurs intéressant de la comparer à la méthode proposée récemment par Badghaish et Fleming pour juger des mérites respectifs des deux méthodes, en particulier sur le plan de la précision et celui de la sensibilité aux effets tridimensionnels.

Références

- [1] Aamodt L.C., Maclachlan Spicer J.W., Murphy J.C., "Analysis of characteristic thermal transit times for time-resolved infrared radiometry studies of multilayered coatings", *J. Appl. Phys.*, Vol. 68, No 12 pp. 6087-6098, 1990.
- [2] Maclachlan Spicer J.W., Kerns W.D., Aamodt L.C., Murphy J.C., "Measurement of coating physical properties and detection of coating dibonds by time-resolved infrared radiometry", *J. Nondestructive Eval.*, Vol. 8, No 2, pp 107-120, 1989.
- [3] Osiander R. and Spicer J.W.M., "Time-resolved infrared radiometry with step-heating – A review", *Rev. Gen. Thermique*, Vol. 37, No 8 pp. 680-692, 1998.
- [4] Badghaish A.A., Fleming D.C., "Quantitative characterization of resistive defects in thick composites using step heating thermography", *Thermosense XXX Proc.*, edit. V.P. Vavilov, D. Burleigh, *Proc. SPIE Vol. 6939*, pp. 693916-1 - 693916-12, 2008a.
- [5] Badghaish A.A., Fleming D.C., "Non-destructive inspection of composites using step heating thermography", *J. of Composite Materials*, Vol. 42, No 13, pp. 1337-1357, 2008b.
- [6] Krapez, J.C., Balageas, D., "Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography", *Proc. Conf. QIRT 94*, Ed. Europ. Thermique et Industrie, 260-266, 1994a.
QIRT Open Archives: <http://qirt.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=50>, paper QIRT 1994-039.
- [7] Krapez, J.-C., Balageas, D., Déom, A., Lepoutre, F., "Early detection by stimulated infrared thermography. Comparison with ultrasonics and holo/shearography", *Advances in Signal Processing for Nondestructive Evaluation of Materials, NATO ASI Series E*, vol. 262, edit. X.P.V. Maldague, Kluwer Acad. Publ., pp. 303-321, 1994b.
- [8] 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, July 1994 (1994c).
- [9] Degiovanni A., "Identification de la diffusivité thermique par l'utilisation des moments temporels partiels", *High Temp. - High Press.*, Vol. 17, pp. 683-689, 1985 (in French).
- [10] Balageas D.L., "Defense and illustration of time-resolved thermography for NDE", *Thermosense XXXIII, Proc. SPIE, Vol 8013*, pp. 8013V-1 – 8013V-20, 2011a.
Revised version at: <http://publications.onera.fr/exl-php/cadcgcp.php>, TP 2011-339.
- [11] Balageas D., "In search of early time – An original approach in the thermographic identification of thermophysical properties and defects", *11th Int. Workshop on Advanced Technology and Applications (AITA 2011)*, L'Aquila (Italy), 7-9 Sept. 2011b.
Post-conference version at: http://publications.onera.fr/exl-doc/DOC398304_s1.pdf
- [12] Balageas D., "Defense and illustration of time-resolved pulsed thermography for NDE", accepted for publication in *QIRT Journal*, Vol. 9, N° 1, 2012.
- [13] Maillet D., André S., Batsale J.-C., Degiovanni A., Moyne C., *Thermal quadrupoles: Solving the heat equation through integral transforms*, Wiley, London, 2000