

Contrôle non-destructif par segmentation d'images infrarouges

AHMED KABOURI^{1,3}, ABDELHAMID KHABBAZI², HUSSEIN YOULAL³

¹ Laboratoire d'analyse des systèmes, traitement de l'information et du management intégré (LASTIMI)

² Laboratoire énergétique, matériaux et environnement (LEME)

Université Mohammed V-Rabat, EST Salé, 227 Avenue Prince Héritier Sidi Mohammed, Salé, Maroc

³ Unité de formation et recherche en automatique et traitement de l'information (UFR-ATI)

Université Mohammed V-Rabat, Faculté des Sciences de Rabat, BP 1014 – Rabat Maroc

¹akabouri@hotmail.com, ²abdelhamidkab@hotmail.com, ³youlal@fsr.ac.ma

Résumé - Dans cet article, nous présentons une approche avancée pour caractériser les défauts dans des matériaux homogènes, basée sur la segmentation d'images infrarouges. Il s'agit principalement de la détection et la caractérisation des défauts par la méthode flash thermique couramment utilisée pour estimer la diffusivité thermique des matériaux. Les images infrarouges générées en face arrière sont segmentées afin d'extraire toutes les zones des défauts présentant des hétérogénéités. Ensuite, on estime pour chaque défaut détecté, la taille de leur surface correspondante, la valeur moyenne de leur champ de température et leur gradient maximal de température par rapport à la zone homogène. Les résultats obtenus montrent que les capacités de caractérisation des défauts internes peuvent être améliorées par l'utilisation des techniques avancées de la segmentation d'image infrarouge.

Abstract - In this paper, an advanced approach to characterize defects in homogeneous materials based on infrared image segmentation is presented. This is mainly the detection and characterization of defects by the thermal flash method commonly used to estimate the materials thermal diffusivity. The infrared images generated on the rear face are segmented in order to extract all zones of the defects presenting heterogeneities. Thereafter we estimate for each detected defect, the size of their corresponding surface, the mean value of their temperature field and their maximum temperature gradient with respect to the homogeneous zone. The obtained results show that the characterization capabilities of internal defects can be improved by the use of advanced techniques of infrared image segmentation.

1 Introduction

L'utilisation du contrôle non-destructif (CND) par thermographie infrarouge en tant que solution pour l'inspection des matériaux considérés comme homogènes, a connu un essor considérable au cours des dernières années, grâce aux progrès technologiques du matériel d'acquisition et de traitement des données. Cette technique consiste à soumettre le matériau à inspecter à une excitation thermique extérieure, et ensuite à enregistrer l'évolution de la température à sa surface à l'aide d'une caméra infrarouge. L'analyse des images infrarouges de la réponse du phénomène de transmission de la chaleur dans le volume du matériau, permet de mettre en évidence des défauts surfaciques ou internes telles que des fissures, des délaminages, de l'infiltration d'air ou de la corrosion.

Dans le domaine du CND par thermographie infrarouge active, la localisation et la caractérisation physique des défauts détectés ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche [1-3]. Le relevé de ces caractéristiques nécessite dans la plupart des matériaux étudiés, une séparation des zones de défauts de la zone homogène à partir des images thermiques réponses. A cet effet, différents outils utilisant des techniques avancées en traitement d'images sont mises en œuvre. Parmi celles-ci, on peut citer la segmentation d'image basée sur l'analyse multi-résolution par transformée d'ondelettes [4]. Un des principaux avantages d'un tel traitement réside dans sa capacité de produire des coefficients forts

dans les zones où le signal est irrégulier et des coefficients très bas dans le cas contraire. Cette technique avancée a été appliquée afin de fournir des informations importantes sur la détection, la localisation et la caractérisation des zones présentant des hétérogénéités dans les matériaux permettant ainsi la mise en place d'un système thermique de détection des défauts.

Dans cette étude, le principe que nous avons adopté est basé sur la méthode flash thermique en mode transmission, initialement introduite par Parker [5] pour mesurer la diffusivité thermique des matériaux solides. Cependant, nous avons conçu et réalisé un dispositif expérimental qui utilise un imageur thermique infrarouge pour enregistrer l'évolution temporelle de la température de la face arrière du matériau à inspecter. L'autre face avant reçoit un flash thermique provenant d'une source d'excitation constituée de lampes halogènes de 1000 W.

Dans cet article, les images thermiques délivrées par l'imageur infrarouge, sont utilisées dans le but d'estimer la taille superficielle des défauts détectés en appliquant la segmentation par analyse multi-résolution. Ensuite, on sépare le champ de température de chaque zone de défaut afin d'estimer leurs contrastes thermiques qui représentent les gradients maximaux de la température par rapport à la zone homogène. Ces dernières grandeurs jouent un rôle fondamental dans l'estimation de certaines propriétés des défauts détectés.

2 Chaîne d'acquisition et méthode

Le principe du dispositif expérimental que nous avons conçu pour la détection des défauts dans les matériaux homogènes est représenté sur la figure 1 et illustrée en vue tridimensionnelle sur la figure 2. Il est constitué d'un banc de la méthode flash thermique formé de deux chambres, une pour l'excitation thermique de l'échantillon et l'autre pour l'acquisition des images réponses à l'aide d'une caméra infrarouge de type ca 1880. Ces deux chambres sont thermiquement isolées afin d'éviter les perturbations de chaleur avec l'environnement extérieur. Rappelons que nous sommes intéressés aux images capturées au voisinage de l'instant t_{pic} , après l'excitation du flash, où la température de la face arrière atteint son maximum. A cet instant, nous avons un maximum de chaleur transmise à travers le volume du matériau et donc un maximum d'information utile.

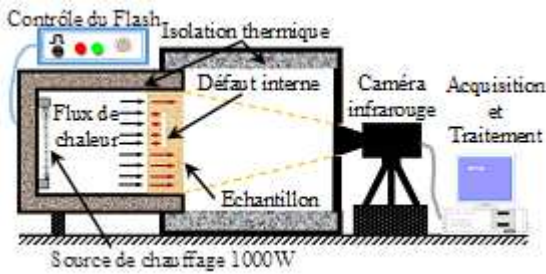


Figure 1 : Principe du banc de CND par thermographie



Figure 2 : Dispositif expérimental en vue 3D

3 Détecteurs de contours multi-échelles

En traitement d'image, la détection des contours constitue une part important de l'amélioration de la lisibilité des images visant à leur segmentation et à la reconnaissance automatique de leur contenu. Dans ce travail, nous avons mis en œuvre des méthodes de détection des contours, basées sur l'analyse multi-résolution par transformée en ondelettes pour le contrôle non destructif des matériaux à partir des images infrarouges.

Selon Mallat et co-auteur [4], dans le cas d'une image f , le principe de base de l'algorithme de détection des contours multi-échelles, est la recherche des maxima locaux de coefficients d'ondelettes. En effet, On fait intervenir deux ondelettes dérivées d'une fonction gaussienne $\phi(x,y)$ selon la direction horizontale et verticale comme suit :

$$\psi^H(x,y) = \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial x}, \text{ et } \psi^V(x,y) = \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial y} \quad (1)$$

Si s est le facteur dilation, alors :

$$\psi_s^H(x,y) = \frac{1}{s^2} \psi^H\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right), \text{ et } \psi_s^V(x,y) = \frac{1}{s^2} \psi^V\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (2)$$

On définit ainsi deux transformées en ondelettes, l'une détectant les singularités horizontales et l'autre les singularités verticales de l'image f , dont les valeurs à l'échelle s sont :

$$W_s^H f(x,y) = f * \psi_s^H(x,y), \text{ et } W_s^V f(x,y) = f * \psi_s^V(x,y) \quad (3)$$

Dans l'optique de trouver les points de contours, il est très pratique d'utiliser à chaque échelle s , la représentation module-orientation définie par :

$$\begin{cases} M_s(f) = \sqrt{|W_s^H(f)|^2 + |W_s^V(f)|^2} \\ A_s(f) = \text{Arg}(W_s^H(f) + iW_s^V(f)) \end{cases} \quad (4)$$

où $M_s(f)$ le module de la transformée en ondelettes de $f(x,y)$ et $A_s(f)$ l'angle du vecteur du gradient avec la direction horizontale. Les points de forte variation de $(f * \phi_s)(x,y)$ sont l'ensemble des points (x,y) où le module de $M_s(f)$ a des maxima locaux dans la direction du gradient donnée par $A_s(f)$. La ligne formée par les (x,y) le long de cette direction représente le contour.

Une comparaison avec le détecteur de canny [6] utilisant un seuillage par hystérésis qui réduit l'effet du bruit sur les contours détectés sera présentée dans la section suivante.

4 Résultats expérimentaux et discussion

4.1 Acquisition de données expérimentales

Afin de valider expérimentalement l'efficacité de la segmentation d'image infrarouge à détecter les défauts dans les matériaux, on a effectué une série d'expériences sur un échantillon homogène de bois massif de dimension $10 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$. Huit défauts internes artificiels (D_1 à D_8) de formes cylindriques ont été créés dans des zones localement connues (Figure 3). Ces défauts ont des diamètres égaux à 6 mm, et des profondeurs variables (Tableau 1). Deux types de défauts ont été créés. Les premiers (D_1 à D_4) sont de l'étain d'une conductivité thermique supérieure au bois et les seconds (D_5 à D_8) sont de la laine de verre de conductivité thermique inférieure. Dans ce cas, La transmission de la chaleur dans les défauts d'étain est plus rapide que celle dans la zone homogène du bois. Par contre, il est moins rapide dans les défauts constitués par la laine de verre. Nous avons excité la face avant de l'échantillon avec une source de chaleur constituée de deux lampes flash à halogène de 1000w. Le temps d'excitation $t_0 = 8 \text{ s}$ est fixé à l'aide du contrôle de flash. Notons que la température moyenne mesurée à la surface arrière à l'aide de la caméra infrarouge juste avant l'application du flash est environ égale à 24.36°C .

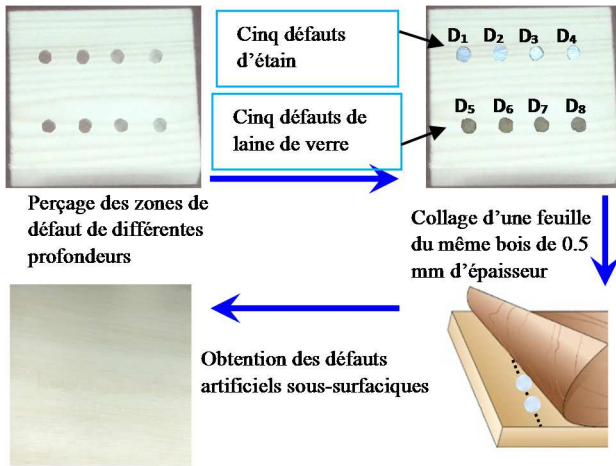


Figure 3 : Procédure de préparation de l'échantillon de test

La figure 4-a illustre l'image thermique capturée à l'instant $t_{pic} = 1337s$ après le flash, lorsque la température de la face arrière atteint son élévation maximale. À cet instant, nous avons un maximum d'informations transmises à travers l'échantillon à tester. Les huit défauts sont bien détectés en formant des taches de couleurs différentes à celles de la zone homogène de l'échantillon. Les contrastes de couleur changent avec la nature et la profondeur des défauts. En image thermique, chaque pixel représente une température à la scène acquise. La figure 4-b représente le profil 3D de la température avec le tracé des contours. On constate l'existence des zones plus chaudes et plus froides par rapport à une large zone homogène. Plus la profondeur du défaut est importante, plus son gradient de température par rapport à la zone homogène est grand.

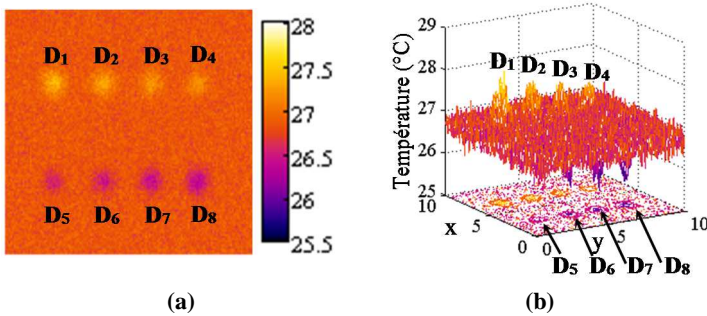


Figure 4 : (a) Image thermique réponse capturée à l'instant $t_{pic}=1336s$ et (b) son profil 3D de température

L'image thermique capturée est de taille ($M \times N = 273 \times 247$) sur une surface de $S = 10 \times 10 \text{ cm}^2$. Le calcul de sa résolution spatiale est $r = S/(M \times N) = 0.148 \text{ mm}^2/\text{pixel}$. Dans la suite, on segmente cette image thermique par détection des contours afin d'extraire certaines caractéristiques physiques des défauts détectés.

4.2 Détection des contours d'image infrarouge

Dans cette section, on cherche à caractériser les défauts détectés dans les matériaux par segmentation d'images thermiques. L'objectif visé est la séparation de de chaque zone de défaut de la zone homogène et par la suite, estimer la taille de sa surface correspondante, sa température moyenne et son contraste thermique maximal par rapport à la zone homogène.

Les figures (5.a) et (5.b) illustrent le résultat de la segmentation en appliquant respectivement les détecteurs de contours de Mallat à trois niveaux de décomposition et de canny utilisant un seuillage par hystérésis. Les contours détectés des zones de défauts sont projetés sur l'image thermique capturée de la figure (4.a). On constate que toutes les zones de défauts ont été séparées du fond de la zone homogène, mais les tailles de ses surfaces apparaissent différentes à cause de la profondeur des défauts. Plus le défaut est profond, plus la taille de sa surface est large.

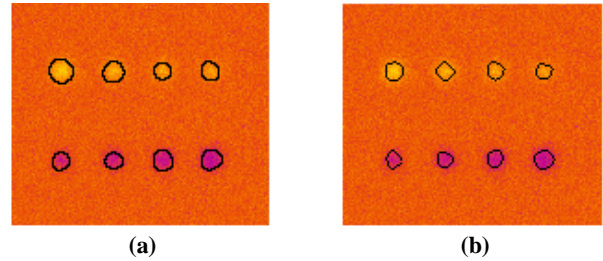


Figure 5 : Projection des contours sur l'image thermique capturée : (a) détecteur de Mallat, (b) détecteur de Canny

Les figures (6.a) et (6.b) représentent les histogrammes uniquement pour les points des contours détectés respectivement par les détecteurs de Mallat et de Canny. Tous les pixels des contours sont concentrés dans deux lobes séparés. Le premier inférieur caractérise les défauts isolants de la laine de verre (D_5 à D_8) et le second supérieur caractérise les défauts conducteurs de l'étain (D_1 à D_4). Le reste des pixels non représentés et situés entre les deux lobes, constitués la zone homogène de l'échantillon.

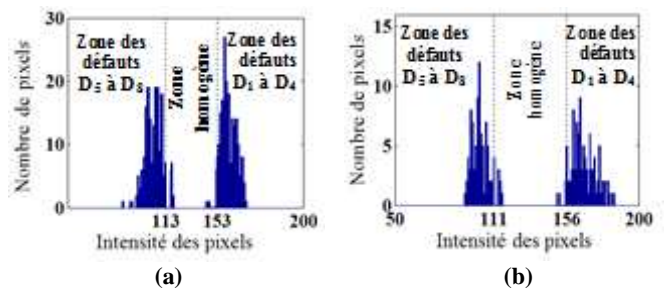


Figure 6 : Histogrammes des contours des défauts : (a) détecteur de Mallat, (b) détecteur de Canny

L'inspection des matériaux homogènes par thermographie infrarouge conduit à des réponses sous formes d'images thermiques de topographie plate (surface isotherme). La température en chaque pixel, varie autour d'une valeur moyenne dont l'écart-type dépend de l'équipement de mesure utilisé. L'existence de zones de défauts internes ou de surface dans le matériau influencera le phénomène de transmission de la chaleur dans ces zones et modifiera la topographie des images thermiques capturées et les pixels des contours détectés constitués leurs limites externes.

Dans la suite, Nous visons l'extraction de toutes les zones de défaut détectées de la zone homogène en utilisant un seuillage sur les histogrammes de la figure 6. Pour chaque zone de défaut on sélectionne un seuil. Pour les défauts chauds D_1 à D_5 , les contours correspondant représentent leurs parties les plus froides. Le seuil choisi

correspond à la valeur minimale du lobe supérieur de l'histogramme (153 ou 156). Pour les défauts froids D_5 à D_8 , les contours correspondant représentent leurs parties les plus chaudes. Le seuil choisi correspond à la valeur maximale du lobe inférieur de l'histogramme (113 ou 111). Les images binaires illustrées sur les figures (7.a) et (7.b) sont obtenues en sélectionnant les seuils (113 et 153) et (111 et 156) respectivement dans le cas du détecteur de Mallat et de Canny. Pour chaque détecteur, la zone homogène correspond aux pixels situés entre les deux seuils choisis. Par contre, les zones des défauts correspondent aux restes des pixels.

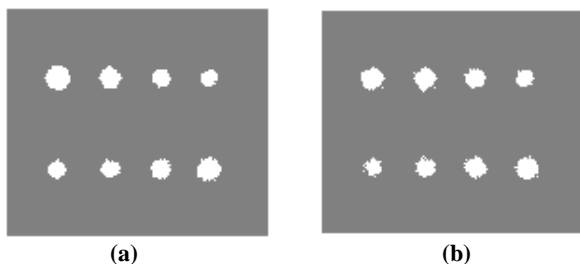


Figure 7 : Binarisation, image segmentée : (a) détecteur de Mallat, (b) détecteur de Canny.

La séparation des défauts détectés après binarisation est obtenue en projetant les lignes et les colonnes de l'image binaire respectivement sur l'axe vertical et horizontal. Cette technique est appliquée aux images de la figure 7 afin d'obtenir des sous-images binaires contenant un seul défaut D_k ($k=1, \dots, 8$). Cependant, pour chaque sous-image D_k , on peut compter le nombre N_{D_k} des pixels correspondant au défaut D_k puis on estime sa surface $S_{D_k} = r \cdot N_{D_k}$ ($r = 0.148 \text{ mm}^2/\text{pixel}$ est la résolution spatiale), sa valeur moyenne \bar{T}_{D_k} de la température ($\bar{T}_{D_k} = \frac{1}{N_k} \sum_{(i,j) \in D_k} T(i,j)$) et son contraste thermique $\Delta T_{D_k \max}$ défini comme étant la valeur absolue de l'écart maximal entre la température T_{D_k} dans la zone de défaut D_k et la valeur moyenne de la température \bar{T}_H dans la zone homogène ($\Delta T_{D_k \max} = |T_{D_k} - \bar{T}_H|_{\max}$).

Le tableau 1 résume les résultats obtenus de la caractérisation des défauts détectés en utilisant la segmentation par détection des contours d'images infrarouges. Tous les défauts créés ont la même surface ($S = \pi \cdot 3^2 = 28.26 \text{ mm}^2$), mais de profondeurs variables. Rappelons qu'on a deux types de défauts, conducteurs (étain : D_1 à D_4) et isolants (laine de verre : D_5 à D_8). Puisque la zone homogène est constituée plus 98% de la surface de l'échantillon, alors la température moyenne correspondante, calculée en considérant uniquement les pixels gris, est $\bar{T}_H = 26.71 \text{ }^\circ\text{C}$ pour l'approche de Mallat et $26.75 \text{ }^\circ\text{C}$ pour l'approche de Canny. La température dans cette zone est considérée comme uniforme avec un écart-type mesuré inférieur à $0.128 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour les contrastes thermiques, plus les D_k sont profonds, plus les $\Delta T_{D_k \max}$ sont importants. L'estimation de la surface de chaque défaut D_k , est effectuée en utilisant la résolution spatiale ($S_{D_k} = r \cdot N_{D_k}$). Les résultats trouvés sont assez comparable pour les deux approches de Mallat et de Canny. Pour les défauts profonds, on obtient un léger

dépassement des surfaces estimées, dû au problème de transfert de chaleur transversal dans les faces latérales de ces défauts provoquant une augmentation de la température dans son entourage.

Tableau I : résultats expérimentaux

	Profondeur mm	Température moyenne ($^\circ\text{C}$) \bar{T}_{D_k}		Contraste thermique ($^\circ\text{C}$) $\Delta T_{D_k \max}$		Surfaces (mm^2) S_{D_k}	
		Mallat	Canny	Mallat	Canny	Mallat	Canny
D_1	13.2	27.14	27.11	1.08	1.03	32.26	32.08
D_2	9.7	27.08	27.06	0.79	0.74	28.35	28.11
D_3	7.2	27.02	27.03	0.57	0.55	23.53	22.87
D_4	3.4	26.94	26.95	0.38	0.35	20.48	20.16
D_5	3.8	26.45	26.47	0.34	0.32	19.98	19.45
D_6	7.4	26.40	26.38	0.57	0.53	24.78	23.93
D_7	10.3	26.34	26.33	0.49	0.48	26.12	25.89
D_8	13.7	26.27	26.28	0.94	0.91	28.24	27.69

5 Conclusion

Dans cette communication, nous avons présenté une contribution à l'application de la segmentation d'images thermiques pour la détection et la caractérisation des défauts dans des matériaux homogènes. Deux types de défauts conducteurs et isolants sont testés afin d'estimer les contrastes thermiques, la taille des surfaces et la répartition du champ de la température surfacique. Ces paramètres sont essentiels pour la caractérisation des défauts dans les matériaux. Les résultats obtenus sont comparables avec une légère amélioration pour la méthode de Mallat. Ces résultats encourageants ouvrent des perspectives vers la caractérisation 3D des défauts dans matériaux en combinant les bases du traitement d'image et la caractérisation thermophysique des matériaux.

Références

- [1] C. Meola, S. Boccardi and G. M. Carlomagno 'Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials - Infrared Thermography to Composites' Woodhead Publishing, Elsevier (2017)
- [2] A. Kabouri, A.Khabbazi, H. Youlal, and M. Janati-Idrissi 'Local detection of defects in materials by thermal analysis - flash method' Eur. Phys. J. Appl. Phys., May 2016
- [3] M.S. Benmoussat, M. Guillaume, Y. Caulier, K. Spinnler 'Automatic metal parts inspection: Use of thermographic images and anomaly detection algorithms' Infrared Physics & Technology 61 (2013) 68–80.
- [4] S. G. Mallat, S. Zhong, Characterization of signals from multiscale edges, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14 (7) (1992) 710–732.
- [5] Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P. and Abbott G.L., "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity", J. Appl. Phys., 32, 9, 1961, 1679-1684.
- [6] J. Canny, "A computational approach to edge detection," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. vol. 8, pp. 679-698, (1986).