

Contrôle Non Destructif (CND) thermique par méthode de type « Flying spot »

L. Gavérina^{1*}, J. C. Batsale¹, D. Mourand², A. Sommier¹, J. Morikawa³ et C. Pradere¹

¹ I2M-TREFLE, UMR CNRS 5295, Esplanade des arts et métiers 33405 Talence Cedex, France

² Epsilon Fahrenheit, ENSAM, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex, France

³ Tokyo Institute of Technology, Department of Organic and Polymeric Materials, Tokyo, Japon

* (auteur correspondant : ludovic.gaverina@u-bordeaux.fr)

Résumé Les récents progrès dans le domaine de l'optique, des diodes lasers et des caméras infrarouges permettent aujourd'hui de réaliser des mesures transitoires de champs de température dans le but d'estimer les propriétés thermophysiques. Dans ce papier, une méthode d'analyse de la réponse thermique du champ de température résultante d'une excitation laser de type flying spot est proposée. Le travail est focalisé sur l'étude du logarithme spatial de la solution analytique du champ de température dans le plan pour mesurer les diffusivités thermiques associées et la position de la sollicitation laser.

Nomenclature

L	largeur, m	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
l	longueur, m	x_0, y_0	centre de la tache laser, m
t	temps, s	$\beta_2(t)$	coefficient d'ordre 2 du polynôme du logarithme de la température, m^{-2}
T	température, K	$\beta_1(t)$	coefficient d'ordre 1 du polynôme du logarithme de la température, m^{-1}
a_x, a_y, a_z	diffusivité thermique selon les directions x, y et z , $m^2.s^{-1}$	$\beta_0(t)$	coefficient d'ordre 0 du polynôme du logarithme de la température
H	pertes thermiques, $W.m^{-2}.K^{-1}$		
Q	énergie de la tache laser, $J.m^{-2}$		
C_p	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$		

1. Introduction

Si, de nombreuses études ont émergées dans le domaine du CND (Contrôle Non Destructif) peu d'études s'attachent à la caractérisation. En CND, l'objectif n'est pas forcément une détermination quantitative des propriétés thermique. Le principe s'apparente plus à un problème de diffusion où la réponse en température à une excitation de type flux de chaleur (flash, laser...) est analysée. Ces méthodes, basées sur le principe que l'excitation thermique est homogène dans le plan de l'échantillon, supposent que le transfert de chaleur est unidirectionnel (dans l'épaisseur) et seul le transfert 1D est étudié [1-2]. Principalement deux approches sont développées, une basée sur des excitations périodiques [3-4] et l'autre sur une excitation flash de type Dirac [5-7]. Cette méthode (flash) apparue dans les années 60 [7] s'apparente à une référence dans le domaine de la caractérisation notamment. Basé sur ce principe, peu de travaux ce sont orientés vers l'étude de transferts complexes dans des milieux hétérogènes [8-13]. Dans ce travail, un nouveau type de scanner basé sur des miroirs galvanométriques qui permettent le déplacement contrôlé d'un spot laser à la surface de l'échantillon. Il est alors possible de développer une nouvelle méthode de type flying spot comme une alternative aux autres méthodes qui sont basées sur un déplacement continu ou à vitesse constante [9-11]. Ici, il est proposé d'analyser la réponse du champ de température transitoire à partir de l'expression analytique. Une telle méthode peut être comparée à la méthode Thermographic Signal Reconstruction (TSR) utilisée dans le cas d'un flash 1D

expérimentation [1], parce que l'analyse se fait par une étude en échelle logarithmique de la réponse en température en fonction du logarithme du temps. Dans ce papier, les premiers résultats expérimentaux et la validation de la méthode d'estimation seront présentés. Cet ensemble permet une estimation simultanée des diffusivités thermiques dans le plan (a_x et a_y), ainsi que de la position initiale de la sollicitations thermique.

2. Considération théorique sur un cas simple analytique

L'expression analytique face avant ($z = 0$) de la réponse thermique du champ de température due à une excitation thermique ponctuelle d'un échantillon homogène et semi-infini peut s'écrire de la façon suivante:

$$T(x, y, z=0, t) = \frac{Q}{4\rho C_p} \frac{\exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{4a_x t}\right)}{\sqrt{\pi a_x t}} \frac{\exp\left(-\frac{(y-y_0)^2}{4a_y t}\right)}{\sqrt{\pi a_y t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_z t}} \quad (1)$$

Une autre expression peut être considérée dans un cas simple où la distribution de température selon la direction z est uniforme et avec des pertes en ($z = 0$).

L'expression que l'on obtient s'écrit de la façon suivante:

$$T(x, y, z=0, t) = \frac{Q}{4\rho C_p} \frac{\exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{4a_x t}\right)}{\sqrt{\pi a_x t}} \frac{\exp\left(-\frac{(y-y_0)^2}{4a_y t}\right)}{\sqrt{\pi a_y t}} \exp(-Ht) \quad (2)$$

Une telle expression peut être exprimée comme le produit de trois champs de température relatifs à des problèmes de diffusion 1D.

Les moyennes marginales selon les directions x et y de l'expression (2), s'expriment de la façon suivante:

$$\begin{cases} \langle T(x, y, t) \rangle_y = \frac{1}{l} \int_0^l T(x, y, z=0, t) dy \\ \langle T(x, y, t) \rangle_x = \frac{1}{L} \int_0^L T(x, y, z=0, t) dx \end{cases} \quad (3)$$

Avec $0 \ll x \ll L$ et $0 \ll y \ll l$ où L et l sont les dimensions d'un domaine rectangulaire selon les directions x et y .

Le logarithme des expressions précédentes (3) donne:

$$\begin{cases} \langle T(x, y, t) \rangle_y = \ln\left(\frac{k}{t^\alpha}\right) - \frac{(x-x_0)^2}{4a_x t} \\ \langle T(x, y, t) \rangle_x = \ln\left(\frac{k}{t^\alpha}\right) - \frac{(y-y_0)^2}{4a_y t} \end{cases} \quad (4)$$

Où :

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{l}{2} & \text{pour un milieu mince selon la direction } z \\ \alpha = -l & \text{pour un milieu semi-infini selon la direction } z \end{cases}$$

Avec k une constante arbitraire

L'expression peut être assimilée à l'expression d'une parabole, telle que:

$$\begin{cases} \ln\left(\langle T(x, y, t) \rangle_y\right) = \beta_0(t) + \beta_1(t)x + \beta_2(t)x^2 \\ \ln\left(\langle T(x, y, t) \rangle_x\right) = \beta_0(t) + \beta_1(t)y + \beta_2(t)y^2 \end{cases} \quad (5)$$

Où :

$$\begin{cases} \beta_2(t) = -\frac{l}{4a_x t} \text{ ou } -\frac{l}{4a_y t} \\ \beta_1(t) = \frac{x_0}{2a_x t} \text{ ou } \frac{y_0}{2a_y t} \\ \beta_0(t) = -\frac{x_0^2}{4a_x t} + \ln\left(\frac{k}{t^\alpha}\right) \text{ ou } -\frac{y_0^2}{4a_y t} + \ln\left(\frac{k}{t^\alpha}\right) \end{cases} \quad (6)$$

Plusieurs commentaires peuvent être faits à partir des expressions précédentes:

- Le paramètre $\beta_2(t)$ dépend seulement des diffusivités thermiques a_x et a_y . Il est ainsi possible de vérifier si le milieu étudié est isotrope ou anisotrope localement pour chaque pas de temps.
- Une fois que les diffusivités thermiques ont été estimées, il est possible d'estimer la position du centre du spot laser x_0 et y_0 à partir du paramètre $\beta_1(t)$.

3. Différentes étapes pour traiter le champ de température et estimer les paramètres

3.1. Etapes préliminaires pour traiter le champ de température

A partir des expressions précédentes et des considérations théoriques, il est nécessaire de valider différentes étapes.

- Estimation de l'offset :
Le niveau de l'offset initial doit être estimé avec une grande précision parce que l'échelle logarithmique n'est définie que pour des valeurs strictement positives.
- Séparation spatiale :
Il est important de vérifier que le champ de température est séparable, tel que:

$$T(x, y, t) = T(x, t) * T(y, t). \quad (7)$$

- **Seuillage:**

Le champ de température étant très bruité, il faut extraire du bruit de mesure la partie du signal qui est parabolique. Plusieurs méthodes telles que la corrélation entre la dérivé spatiale et temporelle [13] peuvent être utilisées. Dans notre cas, il est proposé de traiter seulement la partie du signal où la dérivée de la moyenne marginale du signal est non nulle selon les deux directions x et y.

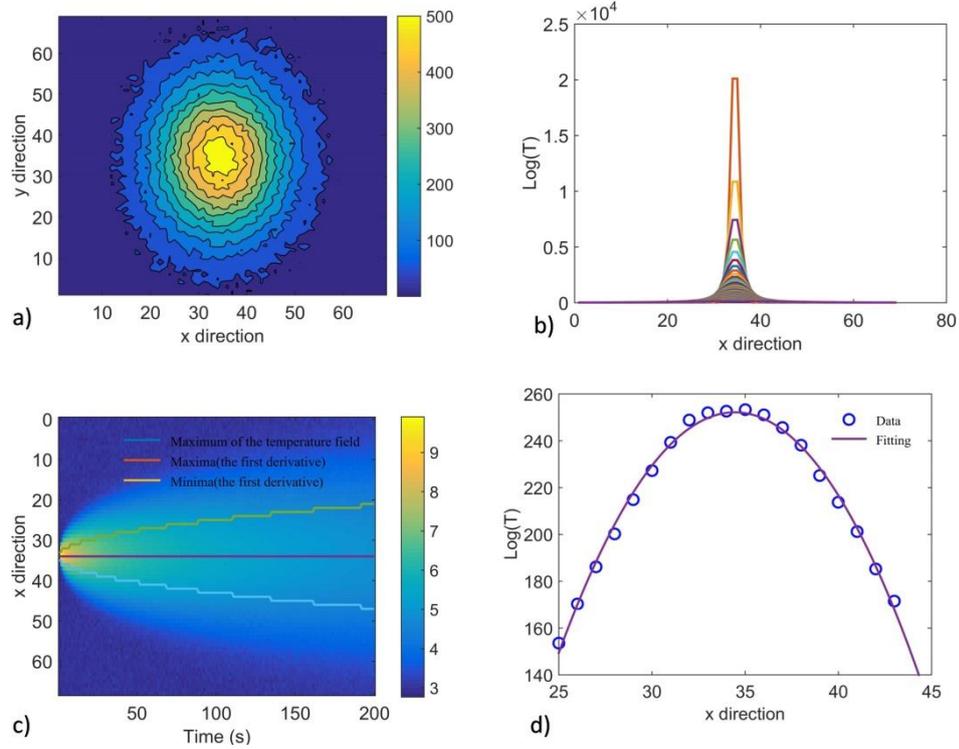


Figure 1 : *Seuillage dynamique pour chacune des images thermiques. a) Champ de température de la réponse thermique, b) Le profil du champ de température selon l'axe x, c) Le seuillage de la gaussienne du bruit de mesure après le traitement, d) le logarithme de la partie extraite de la gaussienne qui a été ajusté par une parabole.*

3.2. Etapes préliminaires pour traiter le champ de température

Posons l'hypothèse que le bruit de mesure est considéré comme uniforme, tel que:

$$\hat{T}(x, t_i) = T(x, t_i) + e_{T(x, t_i)} \quad (8)$$

Avec $e_{T(t_i)}$: Un bruit aléatoire qui est superposé au signal $T(x, t_i)$. Il est considéré de moyenne nulle, d'écart-type constant et sa matrice de covariance est diagonale.

A partir de l'expérience, un polynôme peut être ajusté pour chaque pas de temps. Le paramètre $\hat{\beta}_i$ peut être estimé par l'utilisation des moindres carrés linéaire. Il est alors possible d'écrire une combinaison linéaire du logarithme du champ de température $\ln(\hat{T}(x, t))$ avec les $\hat{\beta}_i$ paramètres, telle que : $\ln(\hat{T}(x, t)) = X\hat{\beta}$, où X est la matrice de sensibilité.

$$\begin{bmatrix} \ln(\hat{T}_1) \\ \vdots \\ \ln(\hat{T}_i) \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} 1 & x_i & x_i^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & x_i & x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0(t) \\ \hat{\beta}_1(t) \\ \hat{\beta}_2(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

L'estimation optimale est de la forme:

$$\begin{bmatrix} \hat{\beta}_0(t) \\ \hat{\beta}_1(t) \\ \hat{\beta}_2(t) \end{bmatrix} = (X^t X)^{-1} X^t [\ln(\hat{T})] \quad (10)$$

4. Validation expérimentale de la méthode d'estimation

4.1. Montage expérimental

Le laser est une diode infrarouge de longueur d'onde 976 nm et de puissance 330 mW. Le faisceau est collimaté via une lentille convergente. Le déplacement selon x et y du faisceau est effectué via un Dual-Axis Scanning GalvoSystems (Thorlabs GVS112/M). Le principe de la déviation du faisceau est détaillé (Fig.2). Pour focaliser le faisceau laser, une lentille f-theta de distance focale 192 mm est utilisée, elle permet d'obtenir un diamètre du spot laser à la sortie de 26 μm (minimum). Un miroir dichroïque est utilisé pour emmener le faisceau perpendiculairement à la surface de l'échantillon. Ce miroir réfléchissant à la longueur d'onde de la diode est semi transparent aux longueurs d'ondes de la caméra. Pour mesurer la réponse en température, une caméra infrarouge de type MCT (FLIR SC7000, 320*256 pixels, pitch 30 μm , gamme spectrale 7 à 14 μm) est utilisée avec un objectif IR de focale 25 mm qui permet d'obtenir une résolution spatiale d'environ 200 μm par pixel.

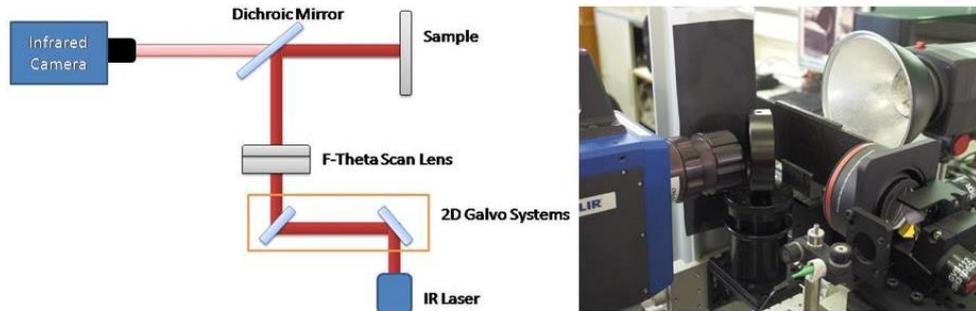


Figure 2 : Montage expérimental.

4.2. Résultats et discussion: Essai sur un matériau homogène et isotrope

Une validation expérimentale a été réalisée avec la configuration précédente. La résolution spatiale de la caméra infrarouge est de 118 μm par pixel et la fréquence d'acquisition est de 100 Hz. L'échantillon de Plexiglas a une épaisseur de 3 mm, une longueur de 60 mm et une largeur de 40 mm. La diffusivité thermique transverse est $1.25 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. L'échantillon étant transparent, il a été peint d'une couche mince de peinture thermique noire mat qui a une émissivité de 0.83.

Le champ de température est séparable selon les directions de x et y, les moyennes marginales sont telles que:

$$\begin{cases} \langle T(x, y, t) \rangle_y = \frac{1}{L} \int_0^L T(x, y, z=0, t) dy \\ \langle T(x, y, t) \rangle_x = \frac{1}{L} \int_0^L T(x, y, z=0, t) dx \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \langle T(x, y, t) \rangle_y = \frac{k}{t^\alpha} e^{\left(-\frac{(x-x_0)^2}{4a_x t} \right)} \\ \langle T(x, y, t) \rangle_x = \frac{k}{t^\alpha} e^{\left(-\frac{(y-y_0)^2}{4a_x t} \right)} \end{cases} \quad (11)$$

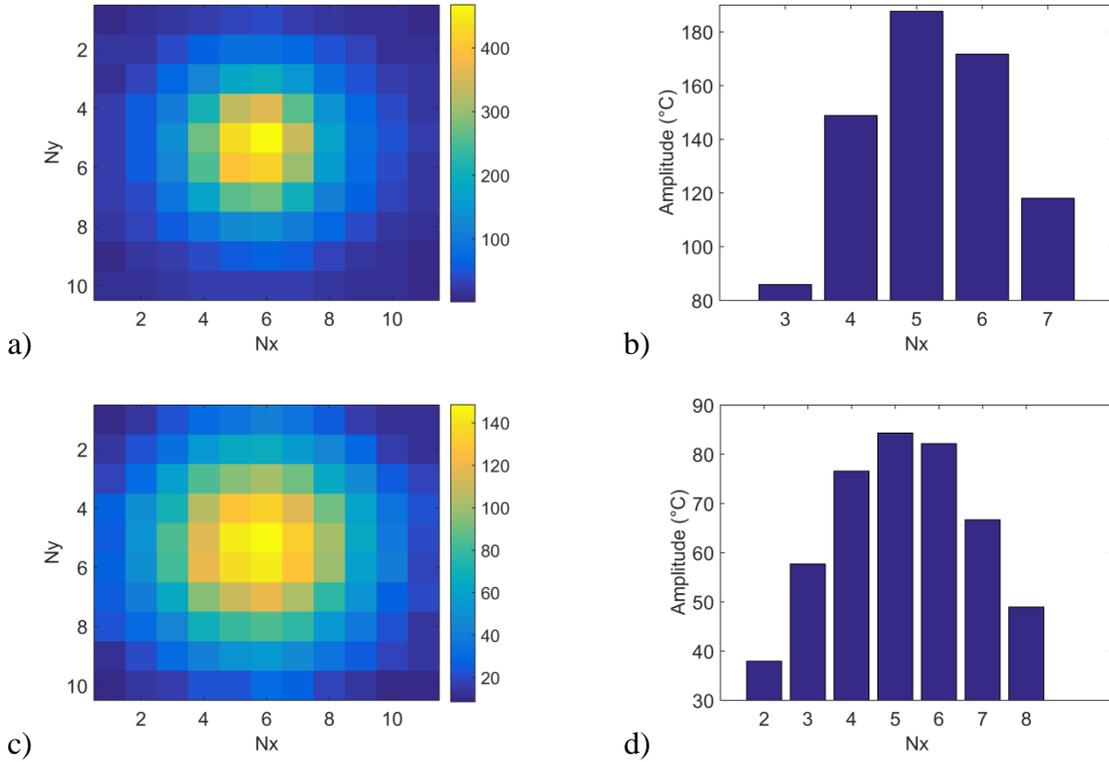


Figure 3 : Champ de température mesuré pour une impulsion laser de type flash avec une fréquence d'acquisition de la caméra de 100Hz: (a) Après le flash laser, (c) Pendant la relaxation thermique. Profil du champ de température selon les directions x et y: (b) Après le flash, (d) Pendant la relaxation thermique.

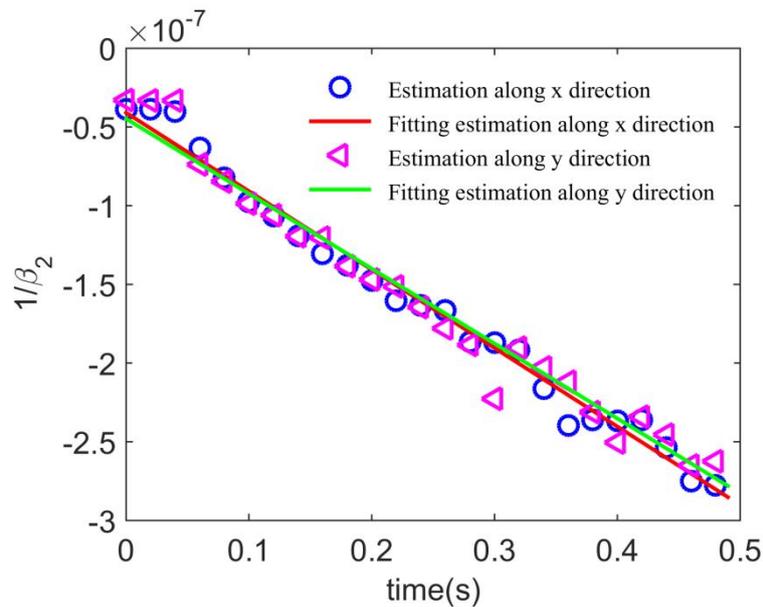


Figure 4 : Coefficient du terme quadratique (cercle bleu) selon les directions x et y . A partir des pentes du graphique, les diffusivités thermiques dans le plan peuvent être estimées.

A partir des mesures infrarouges, on peut estimer les paramètres $\beta_i(t)$ selon les deux directions (voir figs.4 et 5), ce qui nous permet d'obtenir les diffusivités thermiques dans le plan ($a_x = 1.21.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ avec une erreur d'estimation de 3.2% et $a_y = 1.29.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ avec une erreur d'estimation de 3.2%), et la position spatiale du centre du spot laser ($x_0 = 1.2 \text{ mm}$ avec une erreur d'estimation de 1.9% et $y_0 = 1.3 \text{ mm}$ avec une erreur d'estimation de 5.9%). De plus, les résultats (a_x et a_y) peuvent être comparés pour vérifier que le milieu est isotrope.

Il peut être ajouté que l'estimation des paramètres est réalisée pour chaque pas de temps. Aux temps très courts, l'estimation est erronée car le diamètre du spot laser est inférieur à la résolution spatiale de la caméra, ainsi il faut attendre la relaxation thermique pour avoir une meilleure estimation des propriétés thermiques. Et de plus, au temps très longs, le rapport signal sur bruit diminue, ce qui augmente l'erreur sur l'estimation des propriétés thermiques.

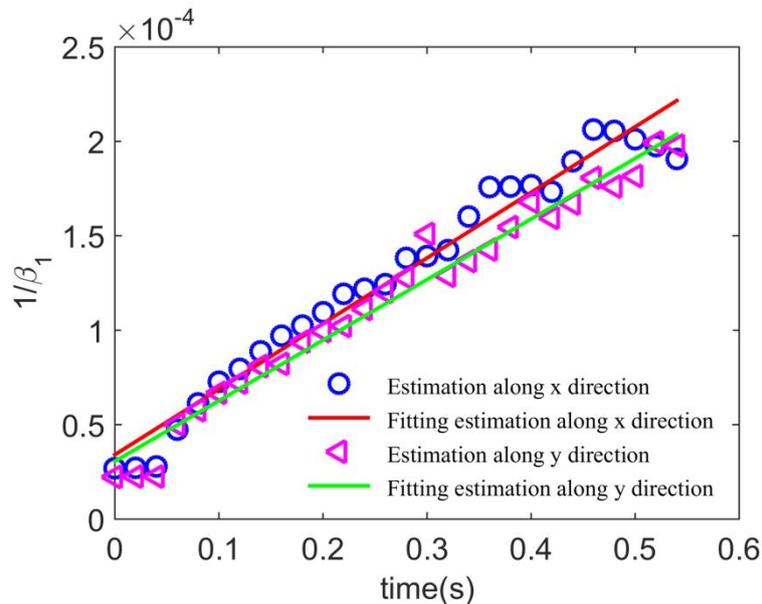


Figure 5 : Coefficient du terme linéaire (cercle bleu) selon les directions x et y . A partir des pentes du graphique, la position du centre de la tache laser peut être estimée.

5. Conclusion

Les résultats présentés dans ce papier sont des résultats préliminaires dans la validation d'une nouvelle méthode de type point source. Le traitement de la méthode peut être considéré comme une extension spatiale et dans le plan de la méthode de Shepard [1] parce que l'estimation est faite en représentation logarithmique de la réponse en température en fonction du logarithmique du temps.

Les diffusivités dans le plan et la position du centre de la tache laser sont estimés indépendamment du transfert thermique transverse par une analogie polynomiale.

Dans le futur, la méthode pourra être utilisée pour pouvoir détecter une dissymétrie ou une anomalie de la gaussienne en augmentant l'ordre du polynôme. Les perspectives de ce travail sont nombreuses : (i), tester la méthode sur des échantillons présentant des fissures

perpendiculaires ou parallèles à la surface d'observation et des interfaces, (ii), aller vers l'études de milieux hétérogènes et (iii), d'obtenir des cartographies de propriétés thermophysiques dans le plan.

Références

- [1] Shepard, S. M., J. R. Lhota, B. A. Rubadeux, D. Wang D. and T. Ahmed, "Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences", *Optical Engineering*, Vol. 42, No. 5, pp. 1337-1342, 2003.
- [2] Balageas D., *Contrôle Non Destructif des matériaux composites par thermographie infrarouge*, La Revue des Laboratoires d'essai, pp 12-17, 1993.
- [3] G. Busse, D. Wu, W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography", *J. Appl. Phys.* Vol. 71 (8), p3962-3965, 1992.
- [4] Wu D., Wu C. Y., Busse G., Investigation of resolution in lock-in thermography: Theory and experiment, Eurotherm Quantitative Infrared Thermography QIRT'96, Stuttgart Mesures de propriétés thermophysiques par photoréflexivité.
- [5] Hay B., Filtz J. R., Batsale J.C., « Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash, » (Measurement of thermal diffusivity by the flash technique), *Techniques de l'ingénieur : Mesures et contrôle (Engineering Techniques : Measurements and Control)*, RC3[R2955] 1- 12 (2004).
- [6] D. Maillet, S. André, A. Degiovanni, - Les erreurs sur la diffusivité thermique mesurée par méthode flash : Confrontation théorie-expérience - *J. Phys. III France*, 1993, vol. 3, p. 883-909.
- [7] W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butter, G.L. Abbot, "Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity," *J. Appl. Phys.*, 32[9] 1679–1684 (1961).
- [8] I. Philippi, Mesure de diffusivité thermique, dans le référentiel du laboratoire, de plaques en mouvement - Thèse de l' INPL, Octobre 1994, Nancy.
- [9] Gruss C, Balageas D. Theoretical and experimental applications of the flying spot camera. Proc. QIRT 92 Conference (Seminar Eurotherm No 27). D Balageas, G Busse, GM Carlomagno eds. Editions Européennes Thermique et Industrie, Paris. 1992. pp 19-24 Disponible sur QIRT Open Archives: www.qirt.org/dynamique/index.php?idD=55, Paper QIRT 1992-004.
- [10] Krapez JC. Spatial resolution of the flying spot camera with respect to cracks and optical variations. In: Proceedings of the 10th international conference on photoacoustic and photothermal phenomena; Vol. 463. AIP Publishing; 1999. p. 377-379.
- [11] Wang Y, Kuo P, Favro L, Thomas R. A novel flying-spot infrared camera for imaging very fast thermal-wave phenomena. In *Photoacoustic and Photothermal Phenomena II*. Springer Series in Optical Sciences. pp 24-26. 1990.
- [12] Bamford M, Batsale JC. Analytical singular value decomposition of infrared image sequences: microcrack detection on ceramic composites under mechanical stresses. *ComptesRendusMécanique*. 2008;336(5):440-447.
- [13] Pradere C, Morikawa J, Toutain J, Batsale JC, Hayakawa E, Hashimoto T. Microscale thermography of freezing biological cells in view of cryopreservation. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2009;6(1):37-61.