

# Identification par thermographie infrarouge et méthode inverse des pertes thermiques d'une éprouvette mécanique

Toufik BOUACHE\*, Hervé PRON et Christian BISSIEUX

Université de Reims Champagne-Ardenne, URCA/GRESPI/Thermo-mécanique

\* (auteur correspondant: toufik.bouache@univ-reims.fr)

**Résumé** – La présente étude est consacrée à l'évaluation des pertes thermiques aux extrémités d'une éprouvette métallique, *in situ* sur une machine d'essai de fatigue, en présence d'une excitation photo-thermique simulant les sources micro-plastiques observées lors d'essais mécaniques. Les champs de température transitoires en surface de l'éprouvette sont mesurés par thermographie infrarouge. Des modèles numériques direct et inverse (1D transitoire) de conduction de la chaleur ont été élaborés, afin d'identifier les pertes conductives, en tenant compte des flux radiatifs mesurés par une photo-diode.

## Nomenclature

$d$	direction de descente	<i>Symboles grecs</i>	
$e$	épaisseur ( $m$ )	$\alpha$	diffusivité thermique ( $m^2.s^{-1}$ )
$h_a$	coefficient d'échange de chaleur ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	$\beta$	longueur de descente
$L$	longueur ( $m$ )	$\lambda$	conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$S$	fonctionnelle d'erreur	$\theta(x,t)$	température ( $^{\circ}C$ )
$t$	coordonnée de temps ( $s$ )	$\theta_a$	température ambiante ( $^{\circ}C$ )
$t_f$	temps final ( $s$ )	$\delta\theta(x,t)$	fonction de sensibilité
$x$	coordonnée d'espace ( $m$ )	$\varphi(x)$	densité de flux ( $W.m^{-2}$ )
$Y_i(t)$	températures mesurées ( $^{\circ}C$ )	$\Phi_1, \Phi_2$	densités de flux thermique, haut et bas
		$\psi(x,t)$	multiplicateur de Lagrange

## 1. Introduction

Ces dernières décennies, un nombre croissant d'études ont été motivées par la recherche d'une méthode d'estimation rapide de la limite de fatigue des métaux, à partir de mesures de température, réalisées soit par des thermocouples, soit par une caméra de thermographie infrarouge [1-4]. Les échantillons sont alors testés sur des machines de fatigue, sous chargements cycliques uniaxiaux ou même multiaxiaux [5, 6], nécessitant une forte liaison et un fort serrage par les mandrins massifs de ces machines. Inévitablement, ces robustes contacts mécaniques conduisent à des pertes thermiques importantes, en même temps que les sources de chaleur micro-plastiques sont produites dans l'échantillon.

Comme cela a été souligné de façon pertinente par plusieurs auteurs [7-13], la quantité significative pour l'analyse mécanique est la dissipation de la chaleur, plutôt que de la température. En outre, la température stabilisée résulte d'un équilibre entre les sources de chaleur et les pertes thermiques. Mis à part les premiers instants de chaque palier de chargement [13], l'identification des sources implique donc celle des pertes.

La présente étude consiste en l'identification des pertes conductives par les mors de la machine, lesquelles doivent être évaluées in situ, en raison des conditions variables de fixation de l'éprouvette, donc de résistances thermiques variables au niveau des mors. Dans ce but, une technique photo-thermique a été développée : une excitation optique utilisant un projecteur à lampe halogène éclaire l'éprouvette en place sur la machine de traction, tandis que le flux radiatif excitateur est mesuré à l'aide d'une photo-diode. Les flux conductifs sont identifiés, en régime transitoire ou stabilisé, puis les coefficients d'échange équivalents au niveau des mors. La résolution du problème inverse est basée sur l'optimisation, par la méthode des gradients conjugués, d'un critère des moindres carrés entre la température mesurée par thermographie infrarouge et la température calculée à partir du modèle direct.

## 2. Problème direct

Nous considérons un problème unidimensionnel, où les transferts thermiques sont décrits par l'équation (1), dans laquelle les échanges thermiques latéraux sont pris en compte par un terme d'ailette ( $m^2 = h_a P / \lambda S_c$ );  $P$  et  $S_c$  étant respectivement le périmètre et la section de l'éprouvette.

$$\frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} - m^2(\theta(x,t) - \theta_a) = - \frac{\varphi(x)}{e \cdot \lambda} \quad (1)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\Phi_1(t) \quad \text{et} \quad \lambda \left. \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} = \Phi_2(t) \quad \text{sur} \quad [0, t_f] \quad (2, 3)$$

$$\theta(x,0) = \theta_a \quad \text{dans} \quad [0, L] \quad (4)$$

Une discrétisation par la méthode des différences finies avec un schéma explicite est utilisée pour résoudre le système d'équation (1-4). On obtient au final l'expression récurrente de l'équation (5), qui peut s'écrire sous la forme matricielle de l'équation (6).

$$-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \theta_{i-1}^{k+1} + \left( 1 + 2 \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} + m^2 \alpha \Delta t \right) \theta_i^{k+1} - \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \theta_{i+1}^{k+1} = \theta_i^k + \frac{\varphi_i}{e \lambda} \alpha \Delta t + m^2 \alpha \Delta t \theta_a \quad (5)$$

Où  $\Delta x$  est le pas spatial, et  $\Delta t$  est le pas de temps.

$$A \theta^{k+1} = \theta^k + B, \quad k = 1, n_t \quad (6)$$

A est une matrice carrée de dimension  $N_c \times N_c$  et B un vecteur à  $N_c$  composantes,  $N_c$  étant le nombre de points discrétisés.

## 3. Problème inverse

Nous avons considéré que les conditions aux limites  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  à identifier étaient fonction du temps. Le champ de température à la surface de l'échantillon est disponible à partir des mesures par thermographie infrarouge. Le problème inverse est formulé comme un problème d'optimisation d'une fonctionnelle au sens des moindres carrés (Eq. 7).

$$S(\Phi_1, \Phi_2) = \int_0^{t_f} \sum_{m=1}^{N_c} [\theta_i(t, \Phi_1, \Phi_2) - Y_i(t)]^2 dt \quad (7)$$

où  $\theta_i(t, \Phi_1, \Phi_2)$  et  $Y_i(t)$  représentent respectivement les températures estimée et mesurée.

De nombreuses méthodes sont disponibles dans la littérature [14-16] pour résoudre la fonctionnelle (7). Nous avons utilisé la méthode des gradients conjugués [16,17], très efficace

en termes de nombre d'itérations. Pour les problèmes non linéaires, certaines variantes de cet algorithme sont disponibles dans la littérature [17], et sa mise en œuvre conduit à introduire un problème adjoint (8-11) et un problème de sensibilité (12-15).

$$\frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} - m^2 \psi(x,t) = 2[\theta_i(t, \Phi_1, \Phi_2) - Y_i(t)] \text{ dans } [0, L] \times [0, t_f] \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \text{ sur } [0, t_f] \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \text{ sur } [0, t_f] \quad (10)$$

$$\psi(x,0) = 0 \text{ dans } [0, L] \quad (11)$$

Ces équations adjointes sont résolues à rebours dans le temps. Les termes sources  $2[\theta_i(t, \Phi_1, \Phi_2) - Y_i(t)]$  sont ponctuels et situés aux emplacements de chaque mesure de température, où l'amplitude et la source sont proportionnelle à l'écart entre les valeurs mesurées et calculées par le modèle. La fonction de sensibilité est définie comme la dérivée directionnelle de  $\theta$  par rapport aux variations de  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ . On en déduit l'équation (12) associée aux conditions initiales et limites (13-15).

$$\frac{\partial^2(\delta\theta(x,t))}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial(\delta\theta(x,t))}{\partial t} - m^2(\delta\theta(x,t)) = 0 \text{ dans } [0, L] \times [0, t_f] \quad (12)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial(\delta\theta(x,t))}{\partial x} \right|_{x=0} = -\delta\Phi_1(t) \text{ sur } [0, t_f] \quad (13)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial(\delta\theta(x,t))}{\partial x} \right|_{x=L} = \delta\Phi_2(t) \text{ sur } [0, t_f] \quad (14)$$

$$\delta\theta(x,0) = 0 \text{ dans } [0, L] \quad (15)$$

Quand  $\theta$  est solution des équations du modèle, le lagrangien est égal au critère des moindres carrés  $\xi(\theta, \Phi_1, \Phi_2, \psi) = S(\theta, \Phi_1, \Phi_2)$ , et les composantes du gradient du critère s'obtiennent sous la forme des équations (16) et (17).

$$\frac{\partial S}{\partial \Phi_1} = \frac{\partial \xi}{\partial \Phi_1} = \int_0^{t_f} \frac{\psi(0,t)}{\lambda} \delta\Phi_1 dt, \quad \frac{\partial S}{\partial \Phi_2} = \frac{\partial \xi}{\partial \Phi_2} = \int_0^{t_f} \frac{\psi(L,t)}{\lambda} \delta\Phi_2 dt \quad (16, 17)$$

Le choix des pas de temps et l'espace sont justifiés par le schéma numérique explicite utilisé. Pour que la méthode converge, il faut vérifier la stabilité du schéma par la formule :  $\alpha\Delta t/\Delta x^2 \leq 0.5$ . Les autres données du problème sont récapitulées dans le tableau 1.

$\lambda(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$\alpha(m^2 \cdot s^{-1})$	$e(mm)$	$L(mm)$	$h_a(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	$\theta_a(^{\circ}C)$
45	$1.27 \cdot 10^{-5}$	10	183.8	16	20

Tab. 1 : données physiques

Connaissant l'évolution transitoire des deux densités de flux de chaleur  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  et les températures des deux extrémités de l'éprouvette, ainsi les températures des deux mors, nous

pouvons calculer l'évolution transitoire des deux conductances thermiques  $HTC_1$  et  $HTC_2$  par les formules (18) et (19). Contrairement aux résultats de l'identification de  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ , et, les valeurs inverses identifiées de  $HTC_1$  et  $HTC_2$  sont relativement constantes, excepté aux premiers instants de l'identification. Cela est dû à l'amplification des erreurs d'estimation de  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ , du fait des faibles écarts initiaux de température aux deux extrémités de l'éprouvette et d'autre part au choix du pas de temps.

$$HTC_1(t) = \frac{\Phi_1(t)}{T(0,t) - T_{mors1}} \quad \text{et} \quad HTC_2(t) = \frac{\Phi_2(t)}{T(L,t) - T_{mors2}} \quad (18, 19)$$

#### 4. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'une machine de sollicitation dynamique d'une capacité de charge dynamique de 25 kN, d'une caméra de thermographie matricielle CEDIP Titanium (512 x 640 pixels), et d'un projecteur de puissance maximale 1000 W. Afin d'améliorer les mesures de température par la caméra, nous avons mis au point un étalonnage pixel à pixel, associant la température de chaque pixel du capteur de la caméra à son niveau numérique par un polynôme d'ordre 4. L'éprouvette est peinte avec une peinture noire, afin d'uniformiser son émissivité, mais aussi pour améliorer l'absorption du flux lumineux. Les essais sont réalisés à température ambiante, sur une éprouvette en acier (XC10) d'une section de 10 x 10 mm<sup>2</sup> et d'une longueur totale de 300 mm, avec une distance libre entre les deux mandrins de 183,3 mm. La figure 1 présente a) la répartition spatiale du flux mesuré, b) la géométrie de l'éprouvette et son image thermique obtenue par thermographie infrarouge.

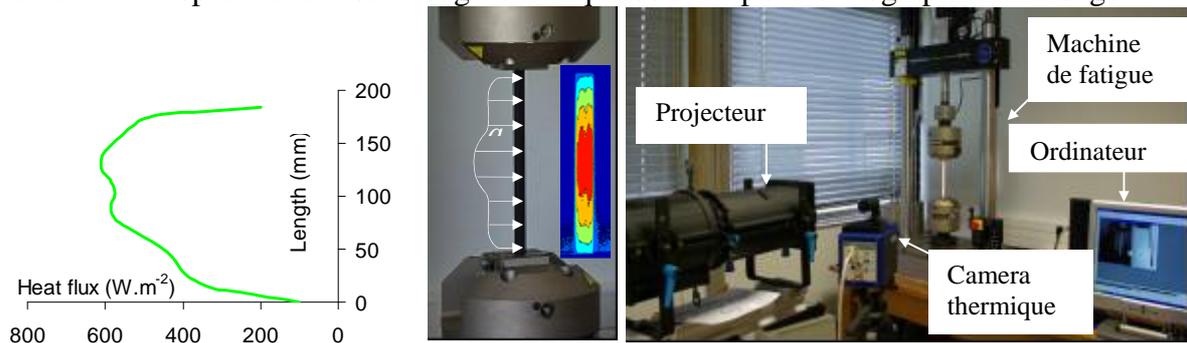


Fig. 1: a) flux de chaleur mesuré, b) image thermique en surface de l'éprouvette, c) dispositif expérimental.

#### 5. Résultats

Pendant les expériences, nous avons enregistré les champs de température à intervalles réguliers, soit  $T(x,y,t)$  ( $x$ : longueur,  $y$ : largeur,  $t$ : temps) pour trois jeux de serrage des mandrins (configuration A: mors haut et bas serrés, configuration B: seul le mors haut est serré, configuration C: seul le mors bas est serré). Les champs de température mesurés  $T(x,y,t)$  sont réduits à un profil unidirectionnel  $T(x,t)$  en moyennant les températures selon la largeur de l'éprouvette (figures 2, 3 et 4).

Pour les trois configurations de serrage étudiées, nous avons observé un échauffement en surface de l'éprouvette d'environ 4°C, maximum vers le centre. La procédure d'inversion de l'équation de la chaleur a permis d'identifier les pertes thermiques conductives transitoires dans les mors. Dans le cas où les mors sont serrés, les pertes conductives sont naturellement plus élevées : de 2700 à 3200 W.m<sup>-2</sup> pour le mandrin haut et de 2000 à 2500 W.m<sup>-2</sup> pour le mandrin bas.

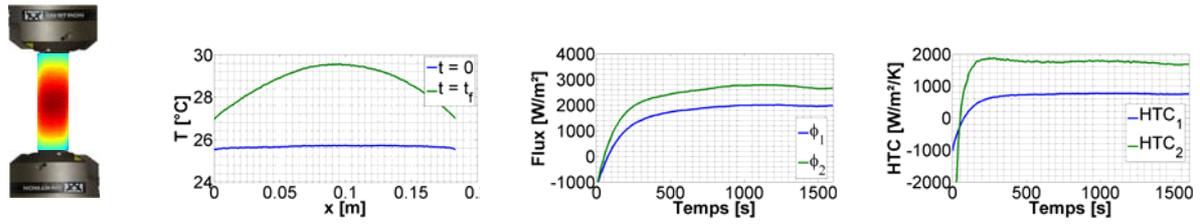


Figure 2 : config. A – Serrage haut et bas de l'éprouvette

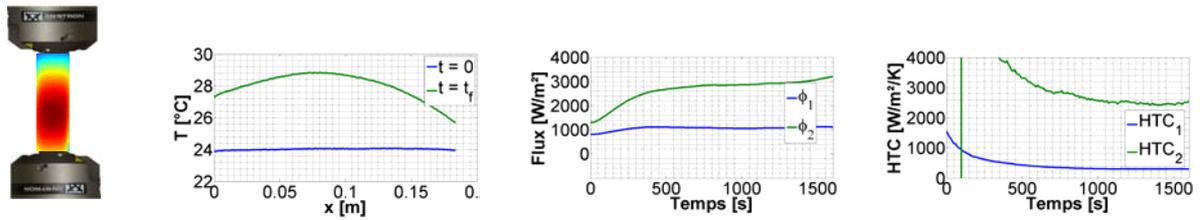


Figure 3 : config. B : Serrage haut de l'éprouvette

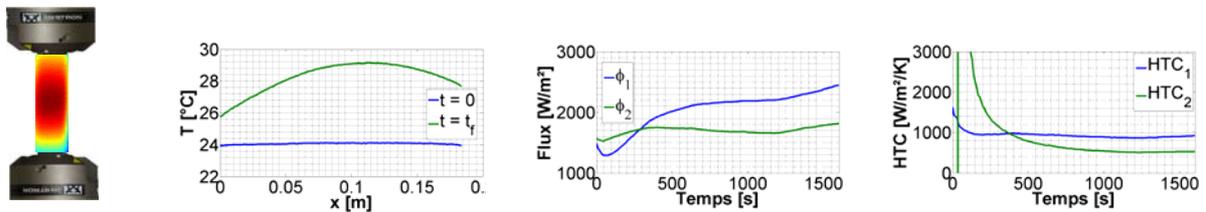


Figure 4 : config. C : Serrage bas de l'éprouvette

Quand les mandrins sont desserrés, les pertes conductives sont plus faibles, ce qui était prévisible, mais restent importantes. Cela peut s'expliquer par le fait que les deux bases de l'éprouvette sont en contact permanent avec les mors (haut et bas). La conductance thermique équivalente est évaluée entre 1700 et 2500  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  dans le cas d'un serrage haut, et entre 750 et 1100  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  dans le cas d'un serrage bas (voir tableau 2).

	configuration A		configuration B		configuration C	
Mandrins	haut	bas	haut	bas	haut	bas
Serrage	oui	oui	oui	non	non	Oui
Température (°C)	25.37	24.27	24.33	23.35	24.11	23
$\phi(t=t_f)$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	2700	2000	3200	1150	1800	2500
$HTC(t=t_f)$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ )	1700	750	2500	300	550	1100

Tableau 2 : flux et conductances identifiés

## 6. Conclusion

Nous avons utilisé ici la thermographie infrarouge, couplée à une procédure inverse de conduction thermique, pour la reconstruction de conditions aux limites complexes. L'objectif est d'évaluer les pertes conductives d'une éprouvette aux mors d'une machine de fatigue, représentées par des conditions aux limites de deuxième ou de troisième espèces. Nous avons

ainsi pu identifier des coefficients d'échange équivalents qui tendent à se stabiliser au bout de quelques minutes, avec des valeurs de 300 à 2500 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> selon les conditions de serrage. L'objectif est ensuite d'utiliser une telle procédure d'identification des pertes conductives, en simultané avec celle des sources thermo-mécaniques pendant les essais de fatigue.

## Références

- [1] M.P. Luong, Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique, *Mechanics of Materials* 28, (1998) 155-163
- [2] G. La Rosa, A. Risitano, Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components, *International Journal of Fatigue* 22 (2000), 65-73.
- [3] B. Yang, P.K. Liaw, H. Wang, L. Jiang, J.Y. Huang, R.C. Kuo, J.G. Huang, Thermographic investigation of the fatigue behavior of reactor pressure vessel steels, *Materials Science and Engineering A314* (2001), 131-139.
- [4] C. Doudard, S. Calloch, Influence of hardening type on self-heating of metallic materials under cyclic loadings at low amplitude, *European Journal of Mechanics A28* (2009), 233-240.
- [5] M. Poncelet, C. Doudard, S. Calloch, F. Hild, B. Weber, A. Galtier, Prediction of self-heating measurements under proportional and non-proportional multiaxial cyclic loadings, *C.R. Mécanique* 335 (2007), 81-86.
- [6] C. Doudard, M. Poncelet, S. Calloch, C. Boue, F. Hild, A. Galtier, Determination of a HCF criterion by thermal measurements under biaxial cyclic loading, *International Journal of Fatigue* 29 (2007), 748-757.
- [7] A. Chrysochoos, H. Louche, An infrared image processing to analyse the calorific effects accompanying strain localisation, *International Journal of Engineering Science* 38 (2000) 1759-1788.
- [8] T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier, Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steel, *International Journal of Fatigue* 26 (2004), 221-229.
- [9] G. Meneghetti, Analysis of the fatigue strength of a stainless steel bases on the energy dissipation, *International Journal of Fatigue* 29 (2007), 81-94.
- [10] B. Berthel, B. Watrisse, A. Chrysochoos, A. Galtier, Thermographic analysis of fatigue dissipation properties of steel sheets, *Strain* 43 (2007) 273-279
- [11] B. Berthel, A. Chrysochoos, B. Watrisse, A. Galtier, Infrared image processing for the calorimetric analysis of fatigue phenomena, *Experimental Mechanics* 48 (2008) 79-90.
- [12] F. Maquin, F. Pierron, Heat dissipation measurements in low stress cyclic loading of metallic materials : from internal friction to micro-plasticity, *Mechanics of Materials* 41 (2009) 928-942.
- [13] D. Fraux, H. Pron, P. Laloue, C. Bissieux, Etude par thermographie infrarouge des échanges thermiques d'une éprouvette au cours d'un essai de fatigue cyclique, congrès SFT09, Vannes, 26-29 mai 2009, pp. 645-650
- [14] O.M. Alifanov, *Inverse Heat Transfer Problems*, Springer, Berlin, 1994.
- [15] U.M. Ascher, E. Haber, A multigrid method for distributed parameter estimation problems, *Electron. Trans. Numer. Anal.* 15 (2003) 1-17.
- [16] H.W. Engl, M. Hanke, A. Neubauer, *Regularization of Inverse Problems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.
- [17] J. Nocedal, S.J. Wright, *Numerical Optimization*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1999.