

Analyse thermographique du comportement en fatigue d'une tôle d'acier

Bruno Berthel^{1,2}, André Chrysochoos¹, Bertrand Wattrisse¹ et André Galtier

¹LMGC - UMR 5508,
Université MONTPELLIER II, CC 048 Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier cedex 5
Berthel@lmgc.univ-montp2.fr

²ARCELOR RESEARCH, Voie Romaine, BP 30320
37283 Maizières-lès-Metz

Résumé :

Cet article présente une utilisation combinée de deux méthodes de traitement d'image permettant d'analyser les effets calorimétriques et cinématiques induits par la fatigue des aciers. La thermographie infrarouge permet d'estimer séparément les champs sources de couplage thermoélastique et de dissipation à partir d'images obtenues par caméra infrarouge. La corrélation d'images de granularité fournit des champs de déformation et, moyennant quelques hypothèses, de contrainte. Ces deux techniques s'appuient sur l'approximation locale des champs et l'estimation de différents opérateurs différentiels. La dissipation moyenne par cycle est alors comparée au taux moyen d'énergie de déformation obtenue à partir de la mesure des aires d'hystérésis mécanique. Une différence entre ces deux puissances est observée et interprétée comme une variation d'énergie interne induite par la fatigue.

Abstract :

This paper presents a combined use of two image processing techniques developed to study calorific and kinematical effects accompanying material fatigue. Infrared thermography enables us to separately estimate patterns of thermoelastic and dissipative sources. Digital image correlation gives strain and stress field measurements if some hypotheses are admitted. Both methods are based on a local approximation of experimental data used to estimate the different partial derivative operators. The mean dissipation per cycle is then compared to the mean deformation energy rate derived from the hysteresis area of the stress-strain curve. A difference between these two energy rates is observed and interpreted as a variation of internal energy due to the fatigue phenomenon.

Mots-clefs :

Dissipation ; thermographie infrarouge ; fatigue

1 Introduction

La cause la plus fréquente de rupture de pièces ou de structures en fonctionnement normal est due au phénomène de fatigue. Cette rupture, qui arrive généralement de façon brutale est en fait le résultat d'un mécanisme cinétiquement lent qui se caractérise dès les premiers cycles par l'apparition de phénomènes microstructuraux irréversibles. Ces irréversibilités s'accompagnent de dissipations qui ont pour effet d'augmenter la température de la matière. C'est pourquoi depuis plusieurs années de nombreuses équipes de recherche ont misé sur les mesures d'autoéchauffement pour développer des méthodes de détermination rapide de la limite de fatigue. De façon non exhaustive, nous pouvons citer les travaux de : Charle *et al.* (1975), Gomaa (1980), Luong (1995), La Rosa et Risitano (2000). Même si parfois ces méthodes donnent de bons résultats, elles restent toutefois encore très empiriques (Mabru *et al.* (2001), Morabito *et al.* (2004)). Ceci est dû au fait que l'évolution de la température n'est pas intrinsèque au matériau, elle dépend de l'intensité et de la distribution de sources de chaleur, des

conditions aux limites et de la conduction dans le matériau. De plus, du fait de cette conduction, les champs de température restent très réguliers même dans le cas de sources de chaleur très hétérogènes. C'est pour cela que nous avons choisi de travailler en terme de sources de chaleur plutôt qu'en terme de température. Nous avons donc développé une méthode de détermination des sources de chaleur accompagnant le mécanisme de fatigue. Cette méthode s'appuie sur la mesure de champs de températures en surface d'une éprouvette obtenus à l'aide d'une caméra infrarouge à plan focal. Ces sources de chaleur peuvent avoir, au moins, deux origines. Les premières sont induites par la thermodilatabilité du matériau et correspondent au couplage thermoélastique. Les secondes entraînent des échauffements de nature dissipative associés aux transformations microstructurales irréversibles qui, cycle après cycle, conduisent à la ruine de la structure. La difficulté majeure pour estimer séparément ces deux types de sources vient du fait que l'amplitude des sources thermoélastiques est le plus souvent très grande devant la puissance moyenne dissipée durant un cycle (rapport souvent entre 100 et 1000 pour les grandes durées de vies).

2 Estimation des sources de chaleur

L'équation de la chaleur menant à la définition des différentes sources est écrite dans le cadre de la Thermodynamique des Processus Irréversibles. Elle est déduite des deux équations locales des principes de la Thermodynamique. Dans le cas d'essais de fatigue sur un acier, moyennant un certain nombre d'hypothèses sur le plan thermique et cinématique, nous obtenons une écriture simplifiée de celle-ci (Boulangier *et al.* (2004)). Notre méthode s'appliquant aux cas d'éprouvettes issues de tôles d'aciers (*cf.* Figure 1) d'épaisseur inférieure à 3mm ayant une très bonne conduction thermique, nous pouvons en première approximation supposer que le champ de température en surface reste très proche du champ moyen dans l'épaisseur. Dans ce cas, nous pouvons considérer le problème de diffusion 2D obtenu en intégrant l'équation de la chaleur suivant l'épaisseur de l'éprouvette (Chrysochoos & Louche (2000)) :

$$\rho C \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\bar{\theta}}{\tau_{th}^{2D}} - \frac{k}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} \right) \right) = \bar{d}_1 + \bar{s}_{the} \quad (1)$$

où $\bar{\theta} = \bar{T} - \bar{T}_0$ est la variation de température moyenne dans l'épaisseur par rapport à la température d'équilibre \bar{T}_0 , k la conductivité thermique supposée isotrope, ρ la densité volumique, C la chaleur spécifique du matériau, τ_{th}^{2D} la constante de temps caractérisant les fuites par convection sur les faces avant et arrière de l'éprouvette, \bar{s}_{the} le champ de sources thermoélastiques et \bar{d}_1 champ de dissipations intrinsèques, ces deux champs étant moyennés dans l'épaisseur.

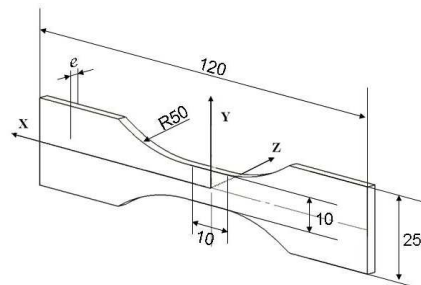


FIG. 1 – Epreuve de fatigue utilisée

Afin de réduire l'influence du bruit sur les données thermiques dans le calcul des sources de chaleur, nous avons employé une méthode de lissage spatiotemporel qui utilise la fonction locale d'approximation suivante de la température :

$$\theta_{app}(t, x, y) = P_1(x, y) \cos(2\pi f_L t) + P_2(x, y) \sin(2\pi f_L t) + P_3(x, y)t + P_4(x, y) \quad (2)$$

où f_L est la fréquence de sollicitation et les P_i sont des polynômes de degré deux en x et y . Cette expression rend compte, dans le cas d'un chargement en contrainte harmonique, de la partie périodique des effets thermoélastiques et une dérive linéaire temporelle associée aux effets dissipatifs, aux effets thermoélastiques instationnaires et aux, toujours possibles, dérives de la température d'équilibre.

L'équation aux dérivées partielles (1) et les conditions aux limites étant linéaires nous pouvons étudier séparément l'influence des sources de chaleur. Nous introduisons ainsi la partie sinusoïdale de la température dans l'équation (1) afin d'obtenir l'amplitude des sources thermoélastiques Δs_{the} .

En ce qui concerne l'analyse des irréversibilités de microstructure, nous considérons que la dégradation de la microstructure est suffisamment lente sur un petit nombre de cycles pour être caractérisées par une dissipation moyenne par cycle. Pour déterminer celle-ci, nous utilisons le fait que l'énergie thermoélastique s'annule à la fin de chaque cycle complet de chargement (Boulangier *et al.* (2004)) :

$$\tilde{w}_{the} = \int_0^{f_L^{-1}} s_{the} dt = 0 \quad (3)$$

Nous intégrons donc l'équation (1) sur un nombre entier de cycles n afin d'estimer une dissipation moyenne par cycle :

$$\tilde{d}_1 = n^{-1} f_L \int_0^{nf_L^{-1}} \bar{d}_1 dt \quad (4)$$

Des tests numériques ont montré les capacités mais aussi les limites de cette approche calorimétrique dans Berthel *et al.* (2007). Nous avons une bonne estimation quantitative et qualitative des deux types de sources malgré leurs ordres de grandeurs très différents. La méthode échoue naturellement lorsque les dissipations sont très faibles, pour des bruits thermiques trop importants ou des fréquences d'acquisition trop basses.

3 Détermination de l'énergie de déformation

La méthode de corrélation d'image nous donne l'évolution spatiotemporelle de différentes variables cinématiques à la surface de l'éprouvette (déplacement, vitesse, déformation, vitesse de déformation, accélération...). Le traitement d'image se fait en deux étapes. La première consiste à estimer le champ de déplacement suivant x et y (*cf.* Figure 1) *via* une méthode de corrélation d'images. Durant la seconde, nous déterminons les champs de déformation (ou vitesse de déformation) par une dérivation spatiale (et/ou temporelle) du champ de déplacement. Pour chaque étape nous utilisons une méthode numérique basée sur une approximation locale par les moindres carré déjà développée dans Wattrisse *et al.* (2001). Nous atteignons une résolution de l'ordre 5.10^{-2} pixel dans le calcul du déplacement ce qui correspond à une précision de 1.10^{-4} dans le calcul de la déformation, même dans le cas où les gradients de déformation sont importants (localisation).

Nous nous plaçons dans le cas de contraintes planes. Elles sont déterminées à partir des équations d'équilibre, des données cinématiques et de quelques hypothèses sur la distribution des contraintes (Chrysochoos *et al.* (2000)). On obtient, après intégration :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx}(x,t) = \frac{f(t)}{S_0} \exp(\varepsilon_{xx}(x,t)) \\ \sigma_{xy}(x,y,t) = -\sigma_{xx}(x,t) \frac{\partial \varepsilon_{xx}(x,t)}{\partial x} y \\ \sigma_{yy}(x,y,t) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma_{xx}(x,t)}{2} \frac{\partial \varepsilon_{xx}(x,t)}{\partial x} \right) \left(\frac{l(x,t)^2}{4} - y^2 \right) \end{array} \right. \quad (5)$$

où σ est le tenseur des contraintes, ε le tenseur des déformations, $f(t)$ l'effort appliqué à l'éprouvette enregistré durant l'essai, S_0 la section initiale de la partie utile de l'éprouvette et $l(x,t)$ sa largeur.

Le taux d'énergie de déformation par unité de volume s'exprimant par :

$$\dot{w}_{def} = \sigma : \dot{\varepsilon} \quad (6)$$

nous utilisons les champs de déformation et de contrainte pour déterminer localement, le taux d'énergie de déformation volumique moyen par cycle correspondant à l'aire d'hystérésis moyenne par bloc A_h :

$$f_L A_h(x,y) = \frac{f_L}{N_C} \int_0^{N_C f_L^{-1}} \sigma(x,y,t) : \dot{\varepsilon}(x,y,t) dt \quad (7)$$

En divisant $f_L A_h$ par la capacité volumique ρC du matériau, nous obtenons un taux d'énergie de déformation volumique par cycle exprimé en °C/s. Cette opération permet de définir, pour chaque type de puissance, une vitesse d'échauffement équivalent dans le cas d'un processus thermique monotone et adiabatique, ce qui facilite les comparaisons.

5 Résultats expérimentaux

Nous avons réalisé les essais sur un acier Arcelor laminé à chaud, le DP600 ($R_{p0.2}=400\text{MPa}$; $R_m=610\text{MPa}$), à l'aide d'une machine servo-hydraulique. Le chargement en fatigue est constitué de deux séries de cinq blocs de 2400 cycles, chaque bloc étant caractérisé par les paramètres suivants : l'étendu de contrainte $\Delta\sigma$ variant de 178MPa à 570MPa, la fréquence de sollicitations prise égale à $f_L=30\text{Hz}$ et enfin le rapport de charge choisi constant de $R_\sigma = -1$. Entre les deux séries de blocs, un bloc de 100 000 cycles à $\Delta\sigma=570\text{MPa}$ a été réalisé.

Les mesures infrarouges sont faites tout au long de chaque bloc de chargement. La méthode développée permet de travailler avec des mesures thermiques sous-échantillonnées (par rapport au critère de Shannon). La fréquence d'acquisition a été fixée à $f_S=19\text{Hz}$. Pour ce qui est des mesures cinématiques, nous réalisons un essai plus lent à la fin de chaque bloc, $f_L=5,55 \cdot 10^{-3}\text{Hz}$ afin d'améliorer les mesures permettant le calcul des aires d'hystérésis A_h . La comparaison des énergies dissipées et mécaniques sur un cycle n'est alors possible que si l'on suppose les mécanismes dissipatifs indépendants du temps.

Sur la figure 2 est représenté le champ des amplitudes thermoélastiques lors du dernier bloc de chargement. Nous pouvons observer que la distribution reste, en bonne première approximation, spatialement uniforme ce qui n'est pas surprenant dans le cas d'un chargement cyclique uniaxial d'un matériau homogène. La valeur moyenne des sources est de 92.5°C/s pour un écart type de 0.3°C/s.

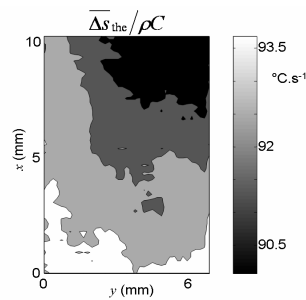
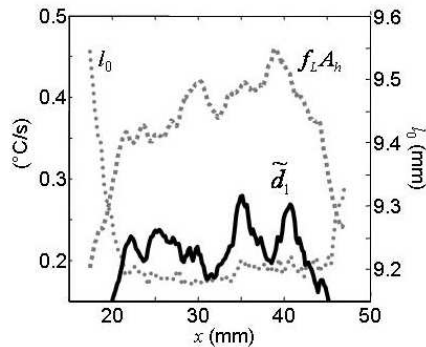
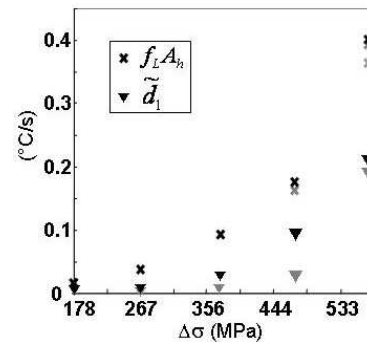


FIG. 2 – Champ moyen des amplitudes thermoélastiques correspondant au dernier bloc.

FIG. 3 – comparaison entre $f_L A_h(x, y=0)$ et $\tilde{d}_1(x, y)$ moyenné sur le dernier bloc.FIG. 4 – comparaison entre $f_L A_h$ et \tilde{d}_1 moyenné sur toute la partie utile de l'éprouvette et pour chaque bloc.

Nous avons comparé la dissipation moyenne par cycle au taux moyen d'énergie de déformation par cycle. Sur la figure 3, les profils moyennés suivant la largeur de la dissipation et du taux d'énergie de déformation calculés pour le dernier bloc sont représentés. Nous pouvons observer que le taux d'énergie de déformation est deux fois plus grand que la dissipation. Nous avons également représenté la variation de la largeur de l'éprouvette l_0 (avant essai) afin de repérer la partie utile de l'éprouvette et vérifier la géométrie de l'éprouvette.

Sur la figure 4, ce résultat a été généralisé pour tous les blocs en intégrant la dissipation moyenne par cycle et le taux d'énergie de déformation sur toute la partie utile de l'éprouvette. Ce résultat mérite quelques commentaires dans la mesure où l'aire d'hystérésis est souvent associée à l'énergie dissipée. La combinaison de l'écriture locale des deux principes de la thermodynamique conduit à :

$$\sigma : \dot{\epsilon} = \rho \dot{e} + d_1 - \rho C \dot{T} + s_{the} + s_{ic} \quad (8)$$

où e représente l'énergie interne et s_{ic} les sources de couplage interne.

L'intégration de l'Eq.(8) sur un cycle mécanique donne l'aire de la boucle d'hystérésis A_h . Dans le cas d'un acier DP600 nous avons vu que l'énergie thermoélastique s'annule à la fin de chaque cycle complet de chargement (cf. équation (3)). Nous pouvons également négliger les sources de couplage interne s_{ic} (pas d'influence de l'autoéchauffement sur l'état interne, Boulanger *et al.* (2004)). L'aire d'hystérésis est alors due dans notre cas à la variation d'énergie interne et à l'énergie dissipée dès que la température évolue de façon périodique (après quelques centaines de cycles. Nous pouvons alors interpréter cette différence entre l'aire d'hystérésis et la dissipation moyenne par cycle comme la variation d'énergie interne due aux irréversibilités induite par les mécanismes de fatigue, la boucle d'hystérésis ne représentant alors plus un cycle thermodynamique.

Conclusion

Nous avons présenté une utilisation combinée de techniques de détermination de sources de chaleur à partir d'image infrarouge et de mesure de champs de déformation par corrélation d'images. Elles nous ont permis de déterminer la dissipation moyenne par cycle d'une part et le taux d'énergie de déformation d'autre part. Nous avons alors observé que le taux moyen d'énergie de déformation déduit des boucles d'hystérésis mécaniques était toujours supérieur à la dissipation moyenne par cycle. Une analyse thermomécanique nous a conduits à interpréter cette différence comme une variation de l'énergie interne du matériau due au phénomène de fatigue. Conscients des conséquences que peuvent avoir un tel résultat sur la modélisation des cinétiques de fatigue, nous voulons rappeler le fait qu'ils correspondent à de tous premiers essais. Ils sont donc à prendre avec précaution. Des contrôles et des essais complémentaires doivent être réalisés dans un futur proche notamment en comparant les aires d'hystérésis obtenues *via* les équations d'équilibre avec celles obtenues par une méthode inverse (*cf.* communication de Félix Latourte *et al.*). Il reste cependant que leur caractère prometteur est très encourageant.

Remerciements

Les auteurs remercient Arcelor Research et Nippon Steel Corporation pour leur soutien technique et financier lors de cette étude. Les auteurs remercient également Bastien Weber pour les discussions fructueuses échangées à propos de ce sujet.

Références

- Berthel, B., Chrysochoos, A., Wattrisse, B. & Galtier, A. 2007 Champs de sources de dissipation et de couplage en fatigue des métaux. Proceedings Colloque National MECAMAT, Aussois, 306-310.
- Boulanger, T., Chrysochoos, A., Mabru, C., & Galtier, A. 2004 Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels. *Int. J. of Fatigue*, **26**, 3, 221-229.
- Charles, J. A., Appl, F. J. & Francis, J. E. 1975 Using the scanning infrared camera in experimental fatigue studies. *Experimental Mechanics*, **15**, 4, 133-138
- Chrysochoos, A. & Louche, H. 2000 An infrared image processing to analyse the calorific effects accompanying strain localisation. *Int. J. of Engineering Science*, **38**, 16, 1759-1788.
- Chrysochoos, A., Muracciole, J.M. & Wattrisse, B. 2000 Experimental Analysis of stain and damage localisation. Continuous Damage and Fracture, Cachan, 23-27/10, Elsevier, 41-51
- Gomaa, A. H. 1980 Corrélation entre la dissipation thermique d'une éprouvette en torsion alternée et sa limite d'endurance en fatigue. Thèse de l'université Bordeaux I.
- La Rosa, G. & Risitano, A. 2000 Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *Int. J. of Fatigue*, **22**, 1, 65-73.
- Luong, M. P. 1995 Infrared thermographic scanning of fatigue in metal. *Nuclear Engineering and Design*, **158**, 363-376.
- Mabru, C. & Chrysochoos, A. 2001 Dissipation et couplages accompagnant la fatigue de matériaux métalliques. Proceedings, Photomécanique, 375-382.
- Morabito, A.E., Chrysochoos, A., Dattoma, V. & Galietti, U. 2004 Analysis of thermoelastic and dissipative effects related to the fatigue of 2024-T3 aluminium alloy. *J. of Quantitative Infrared Thermography*, **1**, 1, 99-116.
- Wattrisse, B., Chrysochoos, A., Muracciole, J.M. & Némoz-Gaillard, M. 2001 Analysis of strain localisation during tensile test by digital image correlation, *J. of Experimental Mechanics*, **41**, 1, 29-39