



**HAL**  
open science

## Analyse calorimétrique de la fatigue des aciers

Bruno Berthel, Andre Chrysochoos, Bertrand Wattrisse, Bastien Weber

► **To cite this version:**

Bruno Berthel, Andre Chrysochoos, Bertrand Wattrisse, Bastien Weber. Analyse calorimétrique de la fatigue des aciers. Doctiss 2007 : Journée des doctorants “ Information, Structures et Systèmes ” 2007, 2007, Montpellier, France. hal-00572353

**HAL Id: hal-00572353**

**<https://hal.science/hal-00572353v1>**

Submitted on 22 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

# ANALYSE CALORIMETRIQUE DE LA FATIGUE DES ACIERS

BRUNO BERTHEL<sup>1,2</sup>, ANDRE CHRYSOCHOOS<sup>1</sup>, BERTRAND WATTRISSE<sup>1</sup>, BASTIEN WEBER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LMGC - UMR 5508  
Université MONTPELLIER II, CC 048 Place Eugène Bataillon  
34095 Montpellier cedex 5

<sup>2</sup> ARCELOR RESEARCH, Voie Romaine, BP 30320  
37283 MAIZIERES-LES-METZ

[BERTHEL@LMGC.UNIV-MONTP2.FR](mailto:BERTHEL@LMGC.UNIV-MONTP2.FR)  
[HTTP://WWW.LMGC.UNIV-MONTP2.FR/](http://WWW.LMGC.UNIV-MONTP2.FR/)

**Résumé**— Cet article présente une méthode de traitement d'image infrarouge que nous avons développé pour analyser les effets calorimétriques induits par la fatigue des aciers. Cette méthode permet d'estimer séparément les champs de sources thermoélastiques et de dissipation. Elle s'appuie sur une approximation locale du champ de température et l'estimation des différents opérateurs différentiels présents dans l'équation locale de la chaleur. Différents résultats expérimentaux sont proposés.

**Mots clés**—fatigue, dissipation, thermoélasticité, thermographie infrarouge.

## I. INTRODUCTION :

La cause la plus fréquente de rupture de pièces ou de structures en fonctionnement normal est due au phénomène de fatigue. Ce phénomène se caractérise par la rupture du matériau suite à un chargement variable et répété dont la valeur maximale est inférieure à la résistance à la traction du matériau. Aucun signe précurseur n'annonçant la rupture imminente des pièces mécaniques, celle-ci arrive généralement de façon brutale bien qu'elle résulte d'une évolution lente mais souvent indétectable par des moyens standards de l'endommagement du matériau. Les premières investigations sur ce phénomène datent de la première révolution industrielle avec le développement de machines utilisant des pièces mécaniques en mouvement et notamment avec l'avènement du chemin de fer. Ce phénomène se révèle d'ailleurs au grand public par l'accident ferroviaire de Versailles en 1842, dû à la rupture brutale d'un essieu après plusieurs mois de fonctionnement durant lesquels aucun problème ne fut détecté [1]. Cet accident coûta la vie à 60 passagers. Ce n'est qu'en 1860 qu'August Wöhler proposa le premier un protocole d'essai permettant d'obtenir un diagramme reliant le nombre de cycles à rupture à la charge appliquée à un essieu (cf. Figure 1). Ce diagramme caractérise encore aujourd'hui le comportement en fatigue des matériaux. Depuis cette époque de nombreux critères et modèles ont vu le jour mais rien qui ne puisse satisfaire pleinement les attentes industrielles modernes. Certains

dimensionnements en fatigue se font encore à partir d'essais sur des structures entières, ce qui coûte énormément de temps et d'argent. En effet, Les facteurs influençant sur le phénomène de fatigue sont nombreux (état de surface, température, corrosion, contraintes résiduelles...) [3] et comme il est impossible de réaliser deux essais dans des conditions identiques, les résultats de telles campagnes sont très dispersés. Ils doivent être obligatoirement traités à l'aide des outils de la statistique. De plus, il peut s'écouler plusieurs jours ou même plusieurs mois avant la fin d'un essai. Par exemple à 20Hz, il faudra environ 6 jours pour avoir un point à  $10^7$  cycles sur la Figure 1 et 60 jours pour une éprouvette non rompue ( $10^8$  cycles)...

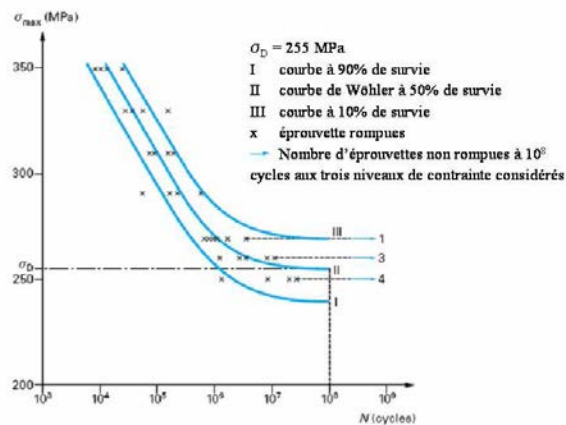


Fig. 1 : courbe de Wöhler pour un acier XC10 [2]

Les domaines concernés par la fatigue sont vastes, nous pouvons citer de façon non exhaustive les pipelines (transfert d'hydrocarbures,...), l'automobile (bielles, triangles de suspension,...), l'aéronautique (trains d'atterrissages, disques de turbines,...), les trains (roues, essieux,...) et la production d'énergie (rotors de centrale EDF,...). 150 ans plus tard, les catastrophes dues à la rupture de fatigue font encore parler d'elles, comme en témoigne l'accident de train du 3 Juin 1998 à Eschede en Allemagne dû à la rupture d'une roue qui a fait 101 victimes.

## II. LA THERMOGRAPHIE APPLIQUEE A LA FATIGUE

Cette rupture brutale de fatigue est en fait le résultat d'un mécanisme cinétiquement lent qui se caractérise dès les premiers cycles de chargement 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 de variation de température lors d'un essai de fatigue (autoéchauffement) pour développer des méthodes de détermination rapide de la limite de fatigue. Le but de ces méthodes étant de déterminer la limite de fatigue d'un matériau ou d'une structure à partir d'une seule éprouvette en un seul essai ne durant que quelques minutes [4-6]. Cette méthode consiste à reporter sur un graphique la température stabilisée lors d'un essai de fatigue (cf. Figure 3) pour différentes amplitudes de chargement. On observe alors un changement de pente sur cette courbe (cf. Figure 2) qui a été empiriquement relié à la limite de fatigue.

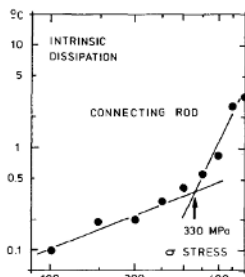


Fig. 2 : exemple de détermination rapide de la limite de fatigue pour une bielle automobile [4]

Même si parfois ces méthodes donnent de bons résultats, elles restent toutefois encore très empiriques [7-8]. Ceci est dû au fait que l'évolution de la température n'est pas intrinsèque au comportement du matériau, elle dépend non seulement de l'intensité et de la distribution de sources de chaleur mais aussi de la conduction dans le matériau et par conséquent des conditions aux limites. De plus, les champs de température restent spatialement très réguliers à cause de la diffusion, 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. Ces sources de chaleur peuvent avoir, au moins, deux origines. Les premières sont induites par la thermodilatabilité du matériau et correspondent au couplage thermoélastique. Pour un métal cela se traduit par le fait que si on le chauffe, il se dilate et si on le refroidit, il se rétracte. De façon duale, si on le comprime, il se réchauffe et si on l'étire, il se refroidit. Lors d'un essai de fatigue, cela se caractérise donc par une oscillation de la température de même fréquence que la

sollicitation (cf. Figure 3). Les secondes entraînent des échauffements de nature dissipative associés aux transformations microstructurales irréversibles qui, cycle après cycle, conduisent à la ruine de la structure. Dans ce cas, cela se caractérise par une augmentation globale de la température de l'éprouvette (cf. Figure 3).

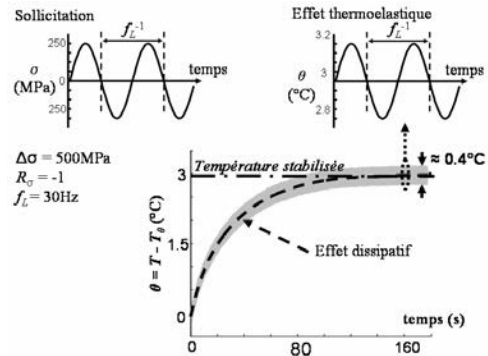


Fig. 3 : évolution de la température lors d'un essai de fatigue.

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). En effet, si nous nous référons à l'exemple de la Figure 3, la variation la plus importante de température est due à l'effet dissipatif, c'est-à-dire une augmentation globale de la température de l'éprouvette de 3°C en 160s, à laquelle se superpose une variation sinusoidale de la température d'étendue bien moindre, 0.4°C, et battant à une fréquence de 30Hz. Du point de vue des puissances mises en jeu l'ordre de grandeur s'inverse et est très différent. En effet, la puissance nécessaire pour faire varier la température de la matière de 0.4°C tous les 1/60 de seconde est bien plus importante que celle nécessaire pour élever la température de 3°C en 160s.

## III. ESTIMATION DES SOURCES DE CHALEUR

En combinant le premier et second principe de la thermodynamique et moyennant un certain nombre d'hypothèses sur le plan thermique et cinématique, nous déduisons une écriture simplifiée de l'équation de diffusion de la chaleur [9]:

$$\rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} - k \Delta \theta = d_1 + s_{the} \quad (1)$$

où  $\theta = T - T_0$  représente la variation de température par rapport à la température d'équilibre  $T_0$ ,  $k$  la conductivité thermique supposée isotrope,  $\rho$  la densité volumique  $C$  la chaleur spécifique du matériau,  $d_1$  la dissipation intrinsèque volumique et  $s_{the}$  la source thermoélastique volumique.

Nos éprouvettes étant issues de tôles d'épaisseur inférieure à 3mm et 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 simplifier l'équation de la chaleur comme cela a déjà été développé dans [10]:

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

où  $\bar{\theta}$  est la variation de température moyenne dans l'épaisseur,  $\tau_{th}^{2D}$  la constante de temps caractérisant les fuites par convection sur les faces avant et arrière de l'éprouvette,  $s_{the}$  le champ de sources thermoélastiques et  $\bar{d}_1$  champ de dissipations intrinsèques, ces deux champs étant moyennés dans l'épaisseur.

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 (« Star Trek » fitting method) [11], qui utilise la fonction locale d'approximation de la température suivante:

$$\theta_{app}(t, x, y) = P_1(x, y) \cos(2\pi f_L t) + P_2(x, y) \sin(2\pi f_L t) + P_3(x, y)t + P_4(x, y) \quad (3)$$

où  $f_L$  la fréquence de sollicitation et  $\{P_1, P_2, P_3, P_4\}$  sont des polynômes de degré deux en  $x$  et  $y$ . Cette expression rend compte 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 (2) et les conditions aux limites étant linéaires nous pouvons étudier séparément l'influence des sources de chaleur sur le champ de température en le décomposant en une variation de température induite par l'effet thermoélastique et un échauffement induit par la dissipation. La partie sinusoïdale de la température permet d'obtenir l'amplitude des sources thermoélastiques  $\Delta s_{the}$ , la dérive pouvant être reliée à la dissipation quand les fenêtres de lissage correspondent à un nombre entier de cycles [9].

En supposant que sur un faible nombre de cycles la dégradation de la microstructure est faible (phénomène de fatigue), nous avons choisi la dissipation moyenne par cycle  $\tilde{d}_1$  afin de caractériser la cinétique de fatigue.

Des tests numériques ont montré les capacités mais aussi les limites de cette approche calorimétrique [12]. 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.

#### IV. DEMARCHE EXPERIMENTALE

Nous utilisons une caméra infrarouge JADE III (CEDIP), possédant une matrice de détecteurs de 240 par 320 pixels. Avec un tel système la résolution spatiale peut atteindre jusqu'à 0.16mm/pixel. Sa fréquence maximale d'acquisition est de 250Hz (quart d'image). Afin d'améliorer les mesures infrarouges nous avons mis en place un étalonnage pixel à pixel qui consiste à établir une loi d'étalonnage pour chaque pixel du détecteur de la caméra plutôt que de ne considérer qu'une loi unique pour tous les pixels s'appuyant sur la réponse moyenne du détecteur (méthode usuelle du constructeur). Ce type d'étalonnage nous permet de mieux gérer les « pixels défectueux » (bad pixels) et d'avoir une meilleure précision sur la mesure de température.

Nous avons réalisé nos essais sur un acier Arcelor laminé à chaud, le DP600 (limite élastique à 0.2%  $R_{p0.2}=400\text{MPa}$ ; limite à la rupture  $R_m=610\text{MPa}$ ), à l'aide d'une machine servo-hydraulique. Le chargement en fatigue est constitué de blocs de cycles, chaque bloc étant caractérisé par les paramètres suivants: l'amplitude de contrainte est prise entre 40MPa et 260MPa, la fréquence de sollicitations va de 3Hz et 30Hz, enfin le rapport de charge est choisi constant  $R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -1$  (cf. Figure 3).

#### V. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Avant l'apparition d'une fissure de fatigue, il a été observé que la distribution des amplitudes des sources thermoélastiques reste, en bonne première approximation, spatialement uniforme durant l'essai (cf. Figure 6), ce qui n'est pas surprenant dans le cas d'un chargement cyclique uniaxial d'un matériau homogène. Ces amplitudes augmentent linéairement avec la fréquence de sollicitation et l'amplitude de contrainte comme le prévoit la théorie classique de la thermoélasticité linéaire et isotrope.

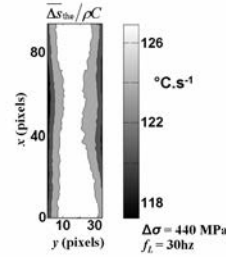


Fig. 6: champ d'amplitude thermoélastique

Notons que nous divisons les sources de chaleur par  $\rho C$  afin qu'elles soient exprimés en  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Cette opération permet de définir, pour chaque type de sources, une vitesse d'échauffement équivalent dans le cas d'un processus thermique monotone et adiabatique, ce qui facilite la comparaison entre la source de couplage et la dissipation.

Nous observons des distributions de dissipation moyenne par cycle spatialement hétérogènes (cf. Figure 7) mais temporellement constante pour un niveau de chargement donné. L'absence ou quasi-absence d'évolution

dans le temps, pour un bloc de 50 000 cycles, est en accord avec le fait que la fatigue est un phénomène à évolution lente, sauf en fin de vie de l'éprouvette où les effets de structure deviennent prépondérants. Des essais complémentaires ont montré que ces champs étaient bien liés aux défauts microstructuraux [13]. Les valeurs atteintes diffèrent d'un niveau de chargement à un autre mais la distribution des hétérogénéités dans le champ de dissipation reste quasiment la même (cf. Figure 7). Il en est de même lorsque la fréquence de sollicitation varie.

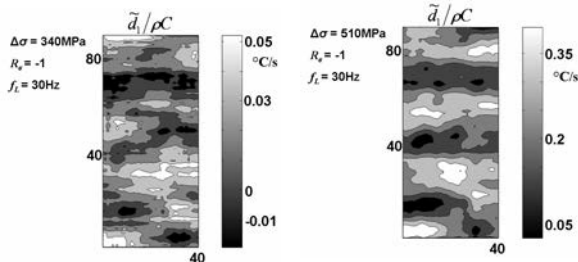


Fig. 7: champ de dissipation pour différentes étendues de contrainte

Lors des derniers cycles précédant la rupture du matériau, la dissipation augmente fortement dans une zone très localisée de l'éprouvette, donnant naissance à une fissure macroscopique. Cette zone correspondant à l'amorçage de fissure s'avère être une zone où la dissipation était déjà élevée même pour de faibles niveaux de chargement. Notre méthode permet donc de visualiser les zones potentielles de fissuration des milliers de cycle avant son amorçage.

## VI. CONCLUSION

Nous avons développé une méthode de traitement d'images infrarouges qui permet de déterminer séparément les sources de couplage thermoélastique et de dissipation accompagnant les mécanismes de fatigue. En terme de conception mécanique, cette méthode peut aider à déterminer les zones qui peuvent potentiellement s'endommager par fatigue *via* l'analyse des champs de dissipation. En ce qui concerne l'étude de comportement du matériau, une mesure quantitative de la puissance dissipée peut être combinée à des critères de fatigue qui utilisent la notion d'énergie dissipée critique [14-15]. Enfin, notre objectif final est de combiner mesures de dissipation et mesures de champs de déformation, afin de construire des bilans locaux d'énergie [16] et estimer les éventuelles variations d'énergie interne (d'écrouissage) induites par les mécanismes de fatigue.

## VII. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Arcelor Research et Nippon Steel Corporation pour leur soutien technique et financier lors de cette étude.

## REFERENCES.

- [1] J. Lemaitre, «Petite histoire de l'expérimentation en mécanique du solide», Meccanica, 2001, Kluwer Academic Publishers
- [2] P. Rabbe, H.P. Lieurade et A. Galtier, «Essais de fatigue Partie I», Technique de l'ingénieur, 2000, M4 170
- [3] J. LU, «Fatigue des alliages ferreux : facteurs d'influences», Technique de L'ingénieur, 2003, BM5043
- [4] Luong M. P., «Infrared thermographic scanning of fatigue in metal», Nuclear Engineering and Design, 1995, **158**, 363-376.
- [5] Krapez J.C., Pacou D., et Bertin C., «Application of lock-in thermography to rapid evaluation of fatigue limit in metal», 5th Int. Workshop on advanced infrared technology and applications, 1999
- [6] La Rosa G. and Risitano A., «Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components», Int. J. of Fatigue, 2000, **22**, 1, 65-73.
- [7] Mabru C. et Chrysochoos A., «Dissipation et couplages accompagnant la fatigue de matériaux métalliques», Proceedings, Photomécanique, 2001, 375-382.
- [8] Morabito A.E., Chrysochoos A., Dattoma V., et Galietti U., «Analysis of thermoelastic and dissipative effects related to the fatigue of 2024-T3 aluminium alloy», J. of QIRT, 2004, **1**, 1, 99-116.
- [9] Boulanger T., Chrysochoos A., Mabru C., et Galtier A., «Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels», Int. J. of Fatigue, 2004, **26**, 3, 221-229.
- [10] Chrysochoos A. et Louche H., «An infrared image processing to analyse the calorific effects accompanying strain localisation», Int. J. of Engineering Science, 2000, **38**, 16, 1759-1788.
- [11] N. Meyer, «Star Trek 6: The Undiscovered Country», I2S film, 1991
- [12] Berthel B., Chrysochoos A., Wattrisse B. et Galtier, A. «Champs de sources de dissipation et de couplage en fatigue des métaux» Proceedings Colloque National MECAMAT, 2007, Aussois, 306-310
- [13] Berthel B., Chrysochoos A., Wattrisse B. et Galtier, A. «Analyse thermographique du comportement en fatigue de l'acier DP600» Proceedings Colloque National MECAMAT, 2006, Aussois, 4p
- [14] Charkaluk E., Bignonnet A., Constantinescu A., et Dang Van K., «Fatigue design of structures under thermomechanical loadings», 2002, **25**, 12, 1199-1206.
- [15] Doudard C., Calloch S., Cugy P., Galtier A., et Hild F., «A probabilistic two-scale model for high-cycle fatigue life predictions», Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2005, **28**, 3, 279-288.
- [16] Chrysochoos A., Muracciole J.-M., Wattrisse B., «Experimental analysis of strain and damage localization, Symposium on continuous damage and fracture», Cachan, 2000, 41-51.