

# Détermination par analyse thermique des seuils d'amorçage des fissures sous chargement de fretting

**A.R. Moustafa<sup>a</sup>, B. Berthel<sup>a</sup>, S. Fouvry<sup>a</sup> et E. Charkaluk<sup>b</sup>**

a. *Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), Ecole Centrale de Lyon, 36 Avenue Guy de Collongue, Ecully 69134 Cedex (France)*

b. *Labortatoire de Mécanique de Lille (LML), CNRS-UMR 8107 Cité Scientifique, boulevard Paul Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France)*

*abdel-rahman.moustafa@ec-lyon.fr, bruno.berthel@ec-lyon.fr, siegfried.fouvry@ec-lyon.fr, eric.charkaluk@univ-lille.fr*

## Résumé :

*Le but de cette étude est de développer une nouvelle méthode expérimentale basée sur la réponse thermique des matériaux pour déterminer les seuils d'amorçage des fissures sous chargement de Fretting. L'évolution de la température lors d'un test de Fretting à paramètres de chargement constants, a montré que cette dernière peut être décomposée en trois parties : une dérive thermique globale, un signal périodique de même fréquence que la sollicitation  $f_L$  et un signal périodique à deux fois cette fréquence  $2f_L$ . Les résultats montrent que la valeur stabilisée de la dérive et des amplitudes des signaux périodiques de la température peuvent être empiriquement liés au seuil d'amorçage des fissures déterminée par les méthodes destructives.*

## ABSTRACT:

*The aim of this study is to develop a new experimental method to measure temperature field during a fretting test in a cylinder on flat contact configuration. Analyze of temperature evolution during a fretting test with constant loading shows that this latter can be decompose on a global warming and a sum on two periodic signal at  $f_L$  and  $2f_L$ , where  $f_L$  is the loading frequency. Analyze of the thermal signal during a fretting test with step by step increasing of tangential force enable us to develop an empirical method to determine the crack nucleation conditions.*

## 1 Introduction

Le Fretting est un mouvement oscillatoire de faible amplitude, qui peut se produire entre des surfaces en contact soumises à des vibrations ou des contraintes cycliques. Le Fretting est donc rencontrés dans plusieurs assemblages mécaniques et concerne un large éventail d'industries (les hélicoptères, les avions, les trains, les bateaux, les camions et les connecteurs électriques). Localement, il peut être considéré comme un chargement cyclique multiaxial. L'endommagement généré par ce type de sollicitation sur la surface de contact est contrôlé par l'amplitude de glissement [1]. Dans le cas du glissement partiel, l'endommagement prépondérant est la fissuration. La détermination des conditions d'amorçages de fissure passe par des méthodes expérimentales destructives très coûteuses en temps, matériaux et donnant des résultats dispersés [2]. Le but de notre étude est de développer une nouvelle méthode expérimentale basée sur la réponse thermique des matériaux, à l'image de celles s'appuyant sur les courbes d'auto-échauffement en fatigue [3], [4].

## 2 Dispositif Expérimental

### 2.1 Machine de Fretting

Une configuration de contact cylindre/plan et deux alliages d'acier traité thermiquement été choisie pour cette étude. Les essais ont été réalisés à l'aide d'un dispositif expérimental spécialement conçu au LTDS (figure 1 (a)) [5]. Un effort normal constant  $P$  est appliquée sur le contre corps provoquant ainsi une distribution de une pression elliptique de valeur maximale  $p_{max}$  sur la zone de contact (figure 1 (b)). Un déplacement cyclique relatif  $\delta$  est imposée donnant naissance à une force macroscopique tangentielle  $Q$  et une distribution contrainte de cisaillement à la surface présentant une valeur maximal  $q_{max}$  à la jonction entre la la zone collée et la zone glissante (figure 1 (b)).  $P$ ,  $Q$  et  $\delta$  sont enregistrées durant les essais. Les valeurs  $p_{max}$ ,  $q_{max}$  et la fréquence de chargement  $f_L$  ont été choisis pour caractériser nos essais.

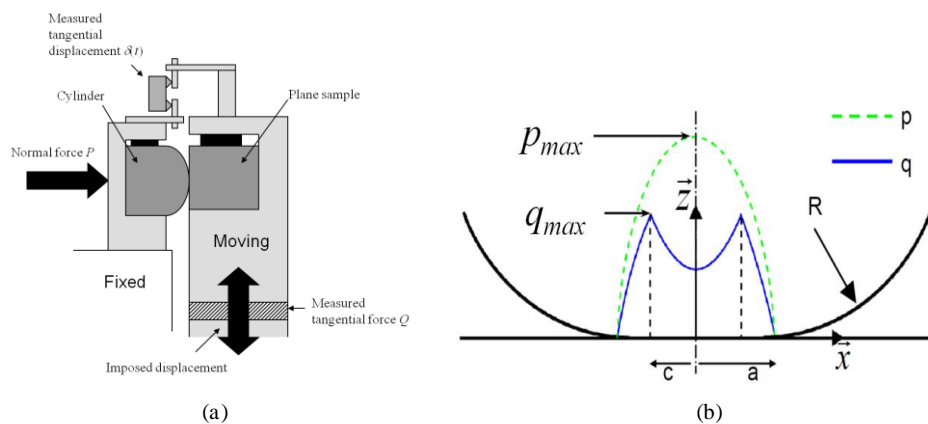


Fig 1 – (a) Dispositif de Fretting, (b) Distribution de pression et de cisaillement sur le contact.

### 2.2 Procédure expérimentale destructifs

Des essais préliminaires ont été effectués afin de déterminer le seuil d'amorçage des fissures par une méthode conventionnelle. Cette méthode consiste à localisé le seuil d'amorçage en faisant varier les amplitudes de la charge tangentielle  $Q_a$  entre deux essais pour un chargement normale  $P$  donné. L'échantillon est ensuite découpé suivant le plan perpendiculaire au chargement. Après découpage, la nouvelle surface est polie et observée avec un microscope optique (figure 2). La longueur de la fissure et la profondeur des fissures sont mesurées. La phase de polissage et d'observation est répétée trois fois dans le but d'évaluer l'homogénéité des données de fissures. Seules les longueurs maximales des fissures sont présent en compte. Par conséquent, une longueur de fissure à amorçage est définie et celle-ci est fixée à  $10 \mu m$ .

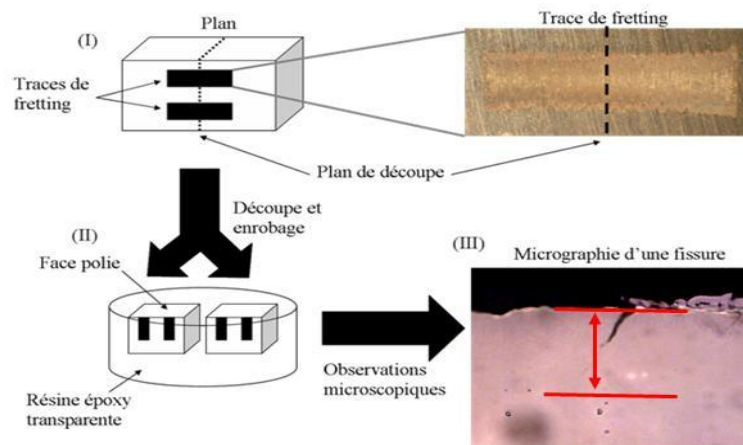


Fig 2 – Procédure expérimental destructif.

### 3 Méthode thermique

#### 3.1 Mesure thermique

La caméra utilisée dans ce travail est une FLIR SC7600 MWIR 2,5-5  $\mu\text{m}$ , équipée d'un capteur InSb avec 640x512 pixels. L'objectif utilisée à une longueur focale 25 mm. La fréquence maximale d'acquisition  $f_a$  est de 380 Hz et résolution est inférieure à 25 mK. Dans cette étude, la taille d'un pixel est d'environ 0.16x0.16 mm<sup>2</sup>. lors des essais, l'axe de la caméra est maintenue fixée et perpendiculaire à la surface latérale de l'échantillon (figure 3 (a)). Etant donnée que le facteur de conductivité thermique des aciers est élevé, nous pouvons supposer que le champ thermique observé est très proche de la température sous le contact. Enfin, une peinture noir mate est appliquée sur les surfaces latérales des échantillons afin d'augmenter leurs émissivités.

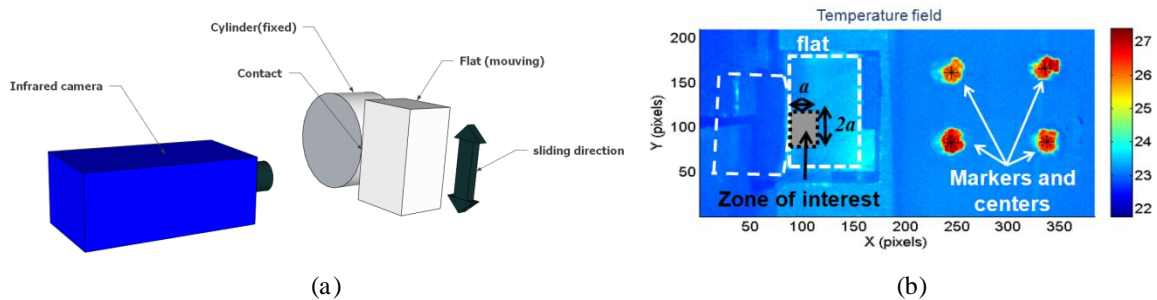


Fig 3- (a) Schéma du positionnement de la caméra thermique, (b) Champ de température.

Pour ces premiers essais dans ce projet, une échelle macroscopique a été choisie. A cette échelle, les déformations des échantillons peuvent être négligées. La température est moyennée sur une zone d'intérêt (ZI) (figure 3 (b)). La taille de cette zone est proche de la taille du contact est caractérisée par  $a$  la demi taille d'un contact hertzien. Les vibrations et la souplesse du dispositif expérimental impose un mouvement solide rigide (rotation et translation) sur l'échantillon. Une méthode de suivi de marqueur est employée pour éliminer ces mouvements (figure 3 (b)).

#### 3.2 L'évolution des températures au cours d'un essai de Fretting à charge constante

La figure 4 (a) montre la variation de la température moyenne sur la ZI,  $\theta = T - T_0$  où  $T_0$  est la température d'équilibre au début de l'essai, pour  $p_{max} = 800 \text{ MPa}$ ,  $q_{max} = 520 \text{ MPa}$ ,  $f_L = 1 \text{ Hz}$  et  $f_a = 100 \text{ Hz}$ . Nous pouvons observer un échauffement de l'ordre de 0,15 °C, superposé à une variation oscillatoire de la température d'une amplitude maximale d'environ 0,02 °C. Une stabilisation de la température est atteinte après un certain nombre de cycles. Les figures 4 (b) et (c) présentes les analyses spectrales obtenues par transformation rapide de Fourier discrète des déplacements et de la variation de température mesurés. Deux niveaux d'amplitudes des déplacements peuvent être observés: un niveau d'amplitude élevée à une fréquence  $f_L = 1.4 \text{ Hz}$  et un autre inférieure à une fréquence  $f_L' = 4.2 \text{ Hz}$ . L'analyse du spectre de variation de la température montre deux niveaux d'amplitudes importants, un à la fréquence  $f_L$ , un autre à une fréquence  $2f_L$  qui se superposent alors à la dérive thermique globale. Nous pouvons supposer que l'amplitude de la fréquence  $f_L$  est induite par les effets thermoélastique alors que celle à  $2f_L$  et la dérive sont induites par plusieurs effets dissipatifs comme la plasticité et le frottement dans la zone de glissement du contact.

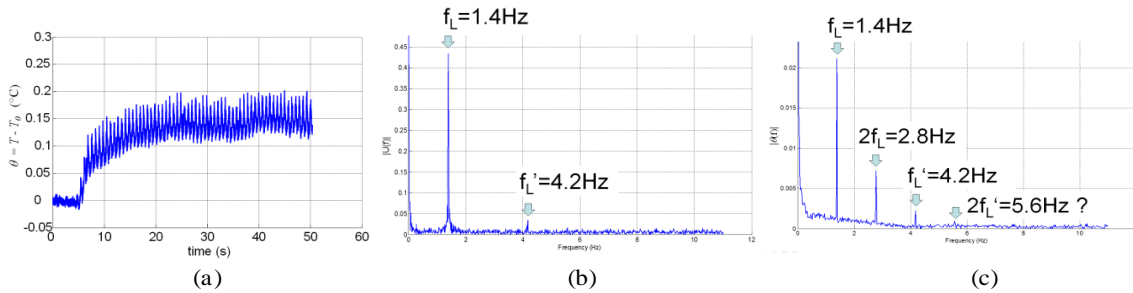


Fig 4- (a) Evolution de la température, (b) Spectre du signal de déplacement, (c) Spectre du signal de la température.

Pour analyser le signal thermique, une méthode de lissage local de ce signal par une méthode des moindres carrés a été choisie dans ce travail comme dans [6] et [7]. Le fonction d'approximation de la température prend en considération les propriétés spectrales présentés précédemment. La fonction locale de lissage  $\theta^{fit}$  est définie comme ceci :

$$\theta^{fit}(t) = \underbrace{p_1 \cos(2\pi f_L t) + p_2 \sin(2\pi f_L t)}_{\text{Signal périodique à } f_L} + \underbrace{p_3 \cos(4\pi f_L t) + p_4 \sin(4\pi f_L t)}_{\text{Signal périodique à } 2f_L} + \underbrace{p_5 + p_6 t}_{\text{dérive linéaire}}$$

où le fonction périodiques à  $f_L$  décrit la partie périodique des effets thermoélastiques tandis que la dérive linéaire en temps et la partie périodique à  $2f_L$  prennent en compte les effets transitoires dues à aux échanges avec l'extérieur, la dissipation et les dérivés éventuelles de la température d'équilibre.

Les amplitudes des signaux périodiques à  $f_L$  et  $2f_L$ , respectivement  $A_f$  et  $A_{2f}$ , peut être défini par:

$$A_f = \sqrt{p_1^2 + p_2^2} \text{ et } A_{2f} = \sqrt{p_3^2 + p_4^2}$$

La figure 5 montre l'évolution de la dérive  $\theta_d$ ,  $A_f$  et  $A_{2f}$  qui atteignent une valeur constante et stabilisée après plusieurs cycles.

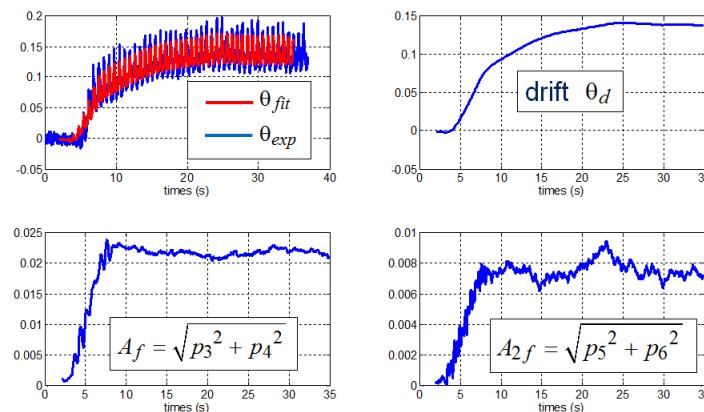


Fig 5 - Evolution de la dérive  $\theta_d$ ,  $A_f$  et  $A_{2f}$ .

### 3.3 Évolution de la température au cours d'un test de Fretting à P constante

Des essais par blocs de cycles durant lesquels la charge normale  $P$  est maintenue constante sont réalisés. Le nombre de cycles par bloc doit être suffisant pour atteindre la stabilisation de la température. D'un bloc à un autre l'amplitude de déplacement relatif ( $\delta_a$ ) augmente jusqu'à ce que le contact passe à un glissement totale ( $Q_a = \mu P$ ) (figure 6 (a)). Au cours de chaque étape, l'évolution de la température à la surface est enregistré par la caméra infrarouge. La variation de la température moyenne sur la ZI est tracé dans la figure 6 (b) pour  $p_{max} = 1000 \text{ MPa}$ . On remarque la présence au

début de certains bloc d'un petit nombre de cycles en glissement totale qui peut être expliqué par l'instabilité du contact. Ces variations introduit de courtes augmentation de température qui peuvent être observé sur la même figure.

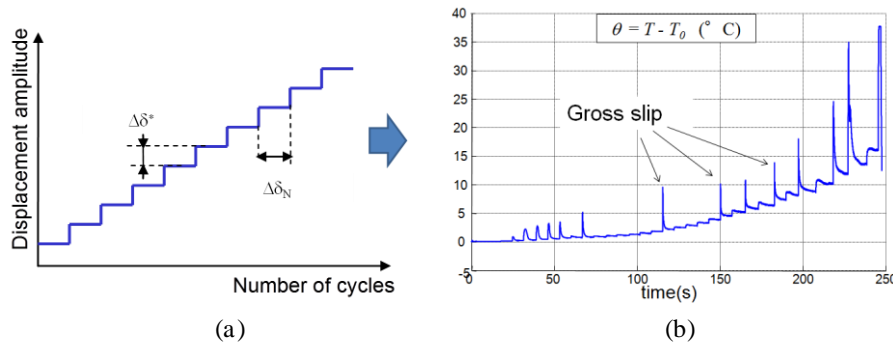


Fig 6 - (a) Essais par blocs, (b) Evolution de la température pendant un essai par blocs pour  $p_{max} = 1000 \text{ MPa}$ .

Pour chaque cycles, les valeurs stabilisés  $\theta_d^{sta}$ ,  $A_f$  et  $A_{2f}$  sont alors reportées sur des graphiques en fonction du cisaillement comme le montre la figure 6. Des évolutions de température sont obtenus simulant un contact où le seul effet dissipatif est celui induit par le frottement sont superposées aux résultats expérimentaux. La comparaison des ordres de grandeurs entre les données expérimentales et les résultats numériques montrent que pour chaque valeur stabilisée, les données expérimentales sont plus élevés lorsque  $q_{max}$  dépasse une valeur seuil (figure 7). Cette différence de comportement peut être liée à la plasticité du matériau. Ainsi, les évolutions de  $\theta_d^{sta}$ ,  $A_f$  et  $A_{2f}$  peuvent être considérés comme des indicateurs du comportement microplastique du matériau et donc des indicateurs d'amorçage de fissure. Le changement rapide de pente qui apparait dans ces évolutions est alors empiriquement relié à une limite critique de cisaillement  $q_{max \text{ th}}$  donnant naissance à une fissure.

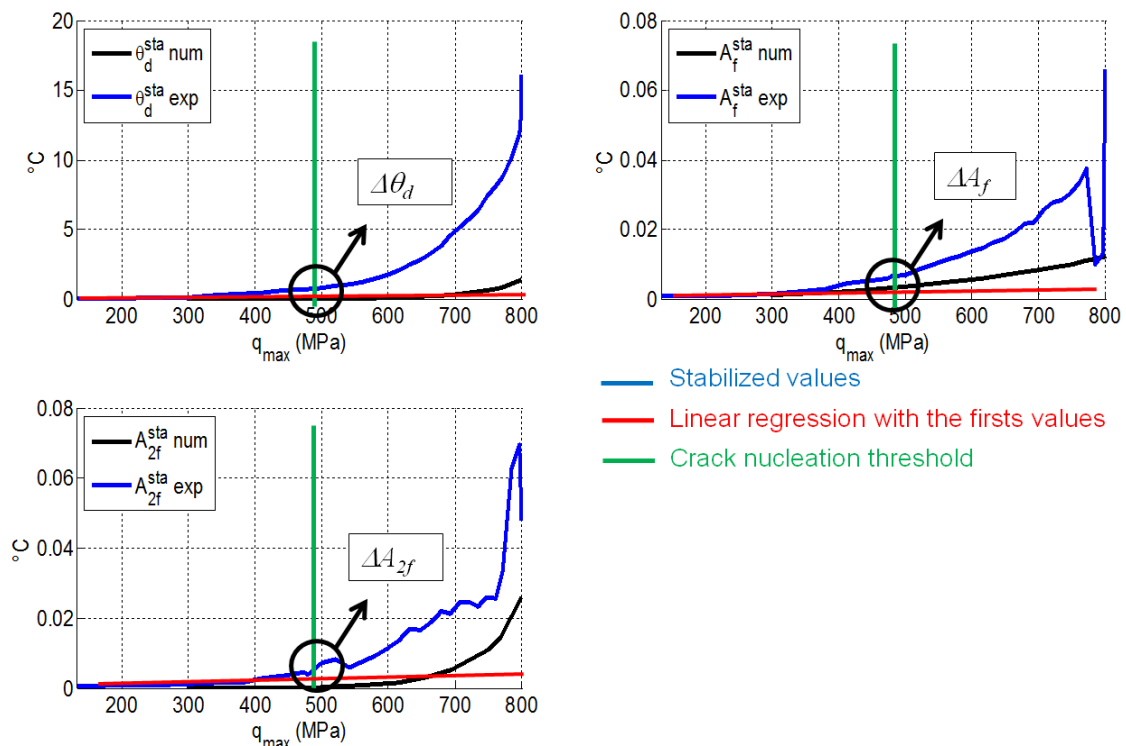


Fig 7 - Valeurs stabilisées de  $\theta_d$ ,  $A_f$  et  $A_{2f}$  et les offset associés ( $\Delta\theta_d^{sta}$ ,  $\Delta A_f$ ,  $\Delta A_{2f}$ ).

Trois offsets ( $\Delta\theta_d^{sta}$ ,  $\Delta A_f$ ,  $\Delta A_{2f}$ ) sont déterminés correspondant à la différence entre la régression linéaire obtenue sur les premiers valeur de  $\theta_d^{sta}$ ,  $A_f$ ,  $A_{2f}$  et les données expérimental pour  $p_{max} = 1000$

MPa (figure 7). Pour les autres essais nous cherchons ensuite la contrainte de cisaillement maximal donnant lieu aux mêmes offsets Cette valeur de  $q_{max}$  est alors considérée comme le seuil de fissuration obtenue par la méthode thermique  $q_{th}$ .

La figure 8 montre la comparaison entre les résultats obtenus avec la méthode destructive et la méthode thermique développée dans cet article pour quatre niveaux de  $p_{max}$ . Les différences entre les deux méthodes restent inférieures à 10 %.

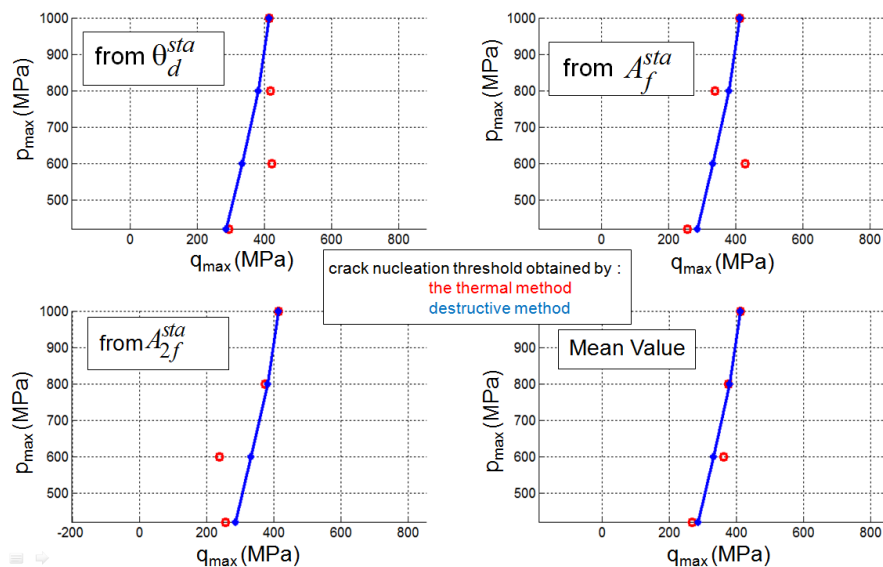


Fig 7 - Comparaison entre les résultats obtenue par méthode thermique et la méthode destructive.

## 4 Conclusion

Dans cet article, un dispositif expérimental utilisant une caméra infrarouge qui permet l'estimation des effets thermiques accompagnant le chargement de Fretting dans une configuration de cylindre/plan de contact sur un alliage d'acier a été présenté. La mesure thermique a été couplée avec une méthode de suivi des marqueurs pour éliminer les mouvements de solide rigide induits par la rigidité du dispositif de Fretting. Lors d'un test de Fretting à paramètres de chargement constants, l'évolution de la température moyennée sur une zone d'intérêt (ZI) peut être décomposée en trois parties, une dérive thermique globale, un signal périodique de même fréquence que la sollicitation  $f_L$  et un signal périodique à deux fois cette fréquence  $2f_L$ . La dérive et les amplitudes des signaux périodiques atteignent rapidement une valeur stabilisée. Les résultats montrent que la valeur stabilisée de la dérive et les amplitudes des signaux périodiques de la température moyenne sur la ZI peuvent être empiriquement lié au seuil d'amorçage des fissures déterminée par les méthodes destructives. Les différences entre les deux méthodes restent inférieures à 10 %.

## 5 REFERENCES

- [1] Vincent L., Berthier Y., and Godet M., 1992, "Testing methods in fretting fatigue: a critical appraisal," ASTM, 1159, pp. 33-48.
- [2] Proudhon H., Fouvry S., and Yantio G., 2006, "Determination and prediction of the fretting crack initiation: introduction of the (P, Q, N) representation and definition of a variable process volume," International Journal of Fatigue, 28(7), pp. 707-713.
- [3] Luong M. P., 1998, "Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique," Mechanics of Materials, 28(1-4), pp. 155-163.
- [4] Doudard C., Poncelet M., Calloch S., Boue C., Hild F., and Galtier A., 2007, "Determination of an HCF criterion by thermal measurements under biaxial cyclic loading," International Journal of Fatigue, 29(4), pp. 748-757.
- [5] Fouvry S., Kapsa P., and Vincent L., 2000, "A multiaxial fatigue analysis of fretting contact taking into account the size effect," ASTM, 1367, pp. 167-183.

[6] Berthel B., Wattrisse B., Chrysochoos A., and Galtier A., 2007, “Thermographic analysis of fatigue dissipation properties of steel sheets,” *Strain: An International Journal for Experimental Mechanics*, 43(3), p. 273.

[7] Boulanger T., Chrysochoos A., Mabru C., and Galtier A., 2004, “Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels,” *International Journal of Fatigue*, 26(3), pp. 221-229.