

## Suivi de fissuration de matériaux par thermographie

Djedjiga Ait Aouit, Abdeldjalil Ouahabi \*

Signal & Image Group, Ecole polytechnique de l'université de Tours, 7, avenue Marcel-Dassault, 37200 Tours, France

Reçu le 31 mars 2008 ; accepté après révision le 28 mai 2008

Disponible sur Internet le 3 juillet 2008

Présenté par André Zaoui

---

### Résumé

L'objet de ce travail est la proposition d'une nouvelle stratégie de suivi de l'endommagement d'un matériau par fatigue. L'approche proposée s'appuie sur l'exploitation des courbes thermiques acquises en temps réel pendant des essais de fatigue. Une telle stratégie consiste à suivre l'évolution des champs de température le long de l'axe de symétrie horizontale d'une éprouvette entaillée. Ce procédé permet de détecter in situ la croissance de fissures par fatigue, notamment la taille critique de la fissure et sa vitesse de propagation sur une large gamme de matériaux indépendamment de leur conductivité et de leur texture. **Pour citer cet article : D. Ait Aouit, A. Ouahabi, C. R. Mecanique 336 (2008).**

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Monitoring crack growth using thermography.** The purpose of this work is to present a novel strategy for real-time monitoring crack growth of materials. The process is based on the use of thermal data extracted along the horizontal axis of symmetry of single edge notch tension (SENT) specimens, during fatigue tests. These data are exploited using an implemented program to detect in situ the growth of fatigue crack, with the critical size and propagation speed of the crack. This technique has the advantage to be applicable to a wide range of materials regardless of their electrical conductivity and their surface texture. **To cite this article: D. Ait Aouit, A. Ouahabi, C. R. Mecanique 336 (2008).**

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés* : Fatigue ; Endommagement ; Suivi de fissure ; Vitesse de propagation ; Thermogramme ; Cycles de fatigue

*Keywords* : Fatigue ; Damage ; Crack monitoring ; Crack speed ; Thermogram ; Fatigue cycles

---

### Abridged English version

#### Introduction

In this work we provide an alternative strategy for real-time monitoring fatigue crack growth based on thermographic measures applicable to a wide range of materials regardless of their electrical conductivity and their surface texture [3]. Compared to the optical and electrical potential monitoring cracks techniques [1,2] (see. Fig. 1), this new technique requires a relatively short processing time because only one dimensional thermal profiles extracted from

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [ouahabi@univ-tours.fr](mailto:ouahabi@univ-tours.fr) (A. Ouahabi).

the thermograms are used by the proposed algorithm. The crack speed values obtained in the case of non-reinforced and reinforced (with carbon black) elastomeric materials show high precision and new opportunities for this type of application.

#### Data acquisition process

The measuring instrument in this study is an infrared camera CEDIP LWIR which measures the radiation emitted by the specimen during the dynamic fatigue tension [4]. The acquisition frequency is 50 Hz.

Crack propagation tests using a Dynamic Mechanical Analyzer system (DMA 2980) have been carried out under following fatigue mechanical conditions: frequency  $f = 10$  Hz and strain  $\varepsilon = \pm 20\%$ . For the crack propagation study, we used pre-cracked or shape V-notched specimens. The elastomeric sample dimensions are: 12 mm of length  $\times$  8.86 mm of width  $\times$  2 mm of thickness. The experimental process is shown in Fig. 2.

Thermographic analysis consists of extracting thermal curves along the horizontal axis of symmetry of the notched specimens during the fatigue test. The room temperature field issued from the crack propagation is indexed by  $a_N$  on the thermograms (see Figs. 3(a), (c), (e) and (g)) and the thermal curves for each fatigue cycle (see Figs. 3(b), (d), (f) and (h)).

#### Crack size and propagation speed calculation using thermal threshold technique

The room temperature field bounded by the tip of the crack grows as the crack propagates. This corresponds to the crack size growth (see Fig. 4).

As the temperature of the work environment is influenced by the radiation emitted by the sample during the fatigue test, we have measured the temperature fluctuations of the field in the vicinity of the ambient temperature “AT” during the lifetime of specimens (see Fig. 5). We noted that this temperature increases up to  $(AT + 0.9)^\circ\text{C}$  and then decreases at the life-end of the material because of the diminution of the emitting surface.

An algorithm has been implemented for numerical exploitation of temperature curves. The principle of monitoring cracks is based on thermal threshold given on the thermal curves to calculate the length of the segment analysis  $a$  at the moment  $N$  taking into account the dissipation of the specimen:

$$a = \begin{cases} a_0 & \text{if } N = 0 \text{ (initial condition = pre-crack size)} \\ a_0 + \Delta a & \text{with } \Delta a = a_{N+1} - a_N \text{ if } T^\circ(a_{N+1}) \leq (AT \pm 1)^\circ\text{Celsius} \end{cases}$$

The obtained results show that the lifetime of the reinforced elastomeric material is about 2 times higher than that of non-reinforced elastomeric and cracking speeds are lower. In the case of the non-reinforced elastomeric the crack initiation is detected after 3920 fatigue cycles with a speed of  $1.275 \mu\text{m}/\text{cycle}$  and from 5000 cycles the crack propagation is accelerated with speed of  $18.592 \mu\text{m}/\text{cycle}$  (see Fig. 6). Conversely, in the case of the reinforced elastomeric, the crack is initiated at 6060 cycles with crack speed of  $0.306 \mu\text{m}/\text{cycle}$  and propagated with speed of  $1.768 \mu\text{m}/\text{cycle}$  to the final rupture of the material (see Fig. 6).

This technique is found to be promising for fatigue crack monitoring.

We summarize in Table 1, the estimated error of the proposed measurement technique. The average estimation error, close to  $8 \mu\text{m}$ , was evaluated by referring to the measures taken by scanning electron microscope before each fatigue test.

#### Conclusion

Since infrared thermography is a non-destructive technique, light and used friendly, it is very attractive for monitoring damaged of materials. We have expanded these applications by providing this new strategy for continuous monitoring crack based on threshold thermal.

Crack size and its propagation speed in the case of non-reinforced and reinforced elastomeric materials reveal the efficiency of the algorithm. Indeed, the discriminating power of our approach is an advance in the field of measurement, crack monitoring and fracture prediction. The application areas of the proposed strategy is a growing interest in the automotive industry, aerospace and nuclear power plants.

## 1. Introduction

L'étude de la propagation d'une fissure dans un matériau est encore de nos jours un domaine complexe et difficile à aborder. En effet, la prédiction des cinétiques de croissance des fissures nécessite de disposer de données quantitatives corrélées avec l'amorçage et la vitesse de propagation de la fissure dans un matériau. Ces données sont généralement

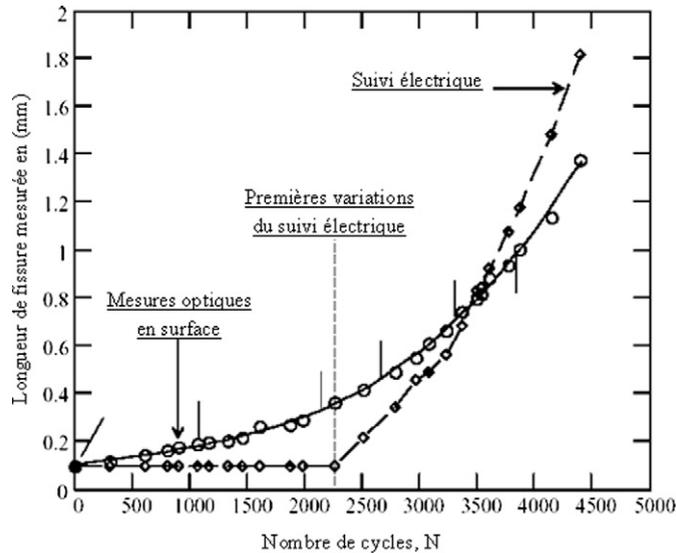


Fig. 1. Suivi de fissures de fatigue d'éprouvettes entaillées symétriques de l'alliage N18 à l'aide de deux techniques : suivi de potentiel électrique et suivi optique. D'après Sansoz [1].

Fig. 1. Fatigue cracks growth in notched specimens of N18 alloy, monitored using two techniques: optical technique and electrical potential one. Following Sansoz [1].

déterminées à partir d'essais de laboratoire menés sur des éprouvettes normalisées de type mécanique de la rupture. Afin de faciliter le processus de propagation de la fissure, les éprouvettes utilisées sont entaillées d'une longueur  $a_0$ .

Classiquement, au cours d'un essai de fissuration, l'évolution de la longueur,  $a$ , de la fissure en fonction du nombre,  $N$ , de cycles appliqués est déterminée par un dispositif optique [1], ou par des techniques plus évoluées, comme par exemple la variation du potentiel électrique [2]. La Fig. 1 montre les résultats de suivi de fissuration sur des éprouvettes entaillées symétriques d'alliage N18, obtenus en appliquant les deux techniques précédentes.

Bien que ces deux techniques soient très utilisées, elles présentent des restrictions liées à la nature du matériau et/ou des conditions d'application et de mise en œuvre particulières.

En effet, la technique optique nécessite une installation complexe, et est souvent exploitée en utilisant un algorithme de corrélation d'images numériques qui pose quelques difficultés d'identification de la fissure. Lorsque la texture du matériau est très homogène ou périodique, l'algorithme risque de converger vers un minimum local ne correspondant pas au vrai déplacement. Le choix de la taille d'une fenêtre d'analyse plus large, peut améliorer cette situation mais devient pénalisant dans les zones à fort gradient. Ce paramètre reste délicat à régler et dépend du problème traité [3]. En général, il est préférable de réaliser un marquage artificiel par projection d'un mouchetis de peinture sur la surface du matériau. De plus, compte tenu du grand nombre de séquences vidéo acquises, les algorithmes de suivi nécessitent des traitements coûteux en temps de calcul.

Quant à la technique du potentiel électrique, elle est restreinte à des applications sur des matériaux conducteurs. Dans le cas des élastomères, cette technique n'est pas exploitable. En outre, la décharge électrique envoyée peut influencer le comportement mécanique du matériau.

En conséquence, dans ce travail nous apportons une alternative fondée sur des mesures thermographiques applicable à une très large gamme de matériaux indépendamment de leur conduction. De par sa simplicité, cette nouvelle technique nécessite un temps de traitement relativement court puisque seul des profils (1D) extraits des cartes thermiques sont exploités en temps réel et donc sans interruption de l'essai par l'algorithme développé. Les résultats obtenus dans le cas de matériaux élastomères renforcés et non renforcés sont d'une grande précision et ouvrent des perspectives nouvelles pour ce type d'application.

## 2. Description du processus et des conditions d'acquisition

L'instrument de mesure dans cette étude est une caméra infrarouge de type CEDIP LWIR qui permet d'évaluer les rayonnements émis par l'éprouvette pendant l'essai de fatigue dynamique en traction uniaxiale [4]. La fréquence d'ac-

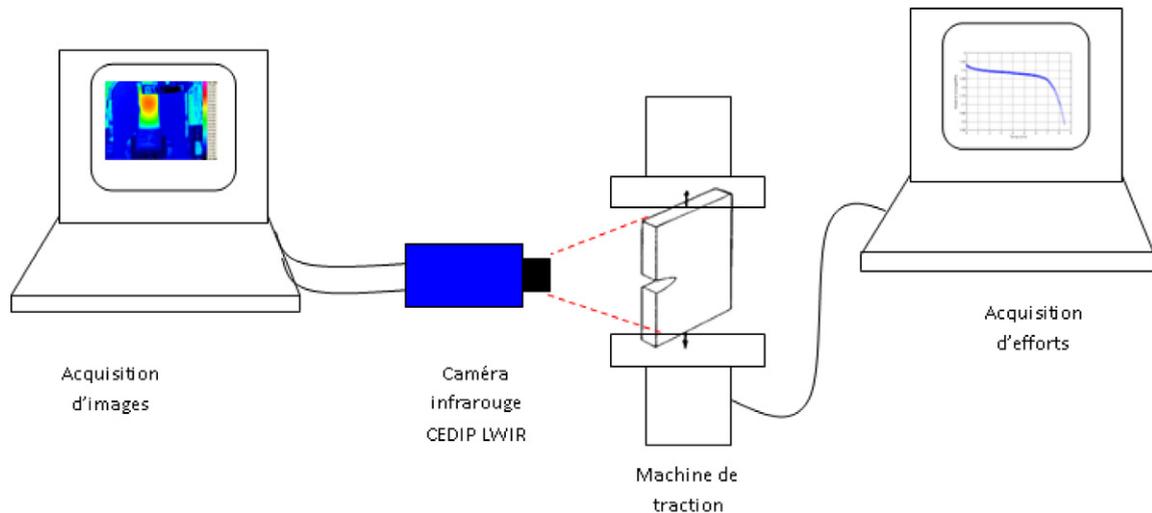


Fig. 2. Processus expérimental de l'essai de traction et acquisition des thermogrammes.

Fig. 2. Experimental process of dynamic tension test and thermograms acquisition.

quisition est de 50 Hz. Les essais de fatigue sont menés sur des éprouvettes entaillées de deux matériaux élastomères de dimension moyenne (12 mm de longueur  $\times$  8,86 mm de largeur  $\times$  2 mm d'épaisseur), à entaille latérale de dimension environ 1 mm. Ces dimensions sont confirmées par des mesures prises au microscope électronique à balayage avant chaque essai. L'amplitude moyenne d'étirement pendant les essais de traction est  $\pm 2,4$  mm et la fréquence de sollicitation est égale à 10 Hz. La Fig. 2 montre le processus expérimental utilisé dans cette étude.

Pour évaluer l'efficacité de la technique proposée, nous étudions un matériau élastomère – non renforcé et le même matériau renforcé par des charges de noir de carbone – destiné à la fabrication de courroie d'automobile.

Dans cette partie d'analyse thermographique, nous exploitons des courbes thermiques prises le long de l'axe de symétrie horizontale d'éprouvettes entaillées. Le champ de température de l'air ambiant (sous l'effet des radiations de l'éprouvette durant l'essai) issu de la propagation de la fissure est indexé par  $a_N$  sur l'ensemble des thermogrammes (cf. Fig. 3(a), (c), (e) et (g)) et sur les courbes thermiques pour chaque cycle de fatigue (cf. Fig. 3(b), (d), (f) et (h)).

### 3. Calcul de la taille de la fissure et de sa vitesse de propagation par seuillage thermique

L'ensemble des courbes thermiques pour différents cycles de fatigue est représenté en Fig. 4. Le champ de température ambiant délimité par la pointe (angle d'attaque) de fissure croît au fur et à mesure que la fissure se propage.

L'évolution de la longueur du segment d'analyse  $a_N$  prélevé sur ce champ en fonction du nombre de cycle de fatigue correspond à la taille instantanée de la fissure.

Sur le plan thermique, pendant la durée de vie des éprouvettes du matériau élastomère (cf. Fig. 5), les fluctuations de température du champ, indexé par  $a_N$ , autour de la température ambiante « TA » ont été évaluées. La Fig. 4 montre que cette température augmente jusqu'à atteindre  $(TA + 0,9)$  °C ensuite elle chute vers la fin de vie de l'éprouvette en raison de la diminution de la surface de dissipation lors de la propagation de la fissure.

La mesure de la croissance du champ durant l'essai de fatigue en fonction du nombre de cycles correspond à l'évolution de la taille de la fissure.

Un algorithme de calcul a été mis en œuvre pour une exploitation numérique des courbes de température. Le principe de suivi de fissure est fondé sur un seuil thermique fixé sur les courbes thermiques permettant de calculer la longueur du segment  $a$  à l'instant  $N$  en tenant compte de la dissipation de l'éprouvette :

$$a = \begin{cases} a_0 & \text{pour } N = 0 \text{ (condition initiale = dimension de l'entaille)} \\ a_0 + \Delta a & \text{avec } \Delta a = a_{N+1} - a_N \text{ si } T^\circ(a_{N+1}) \leq (TA \pm 1) \text{ °Celsius} \end{cases}$$

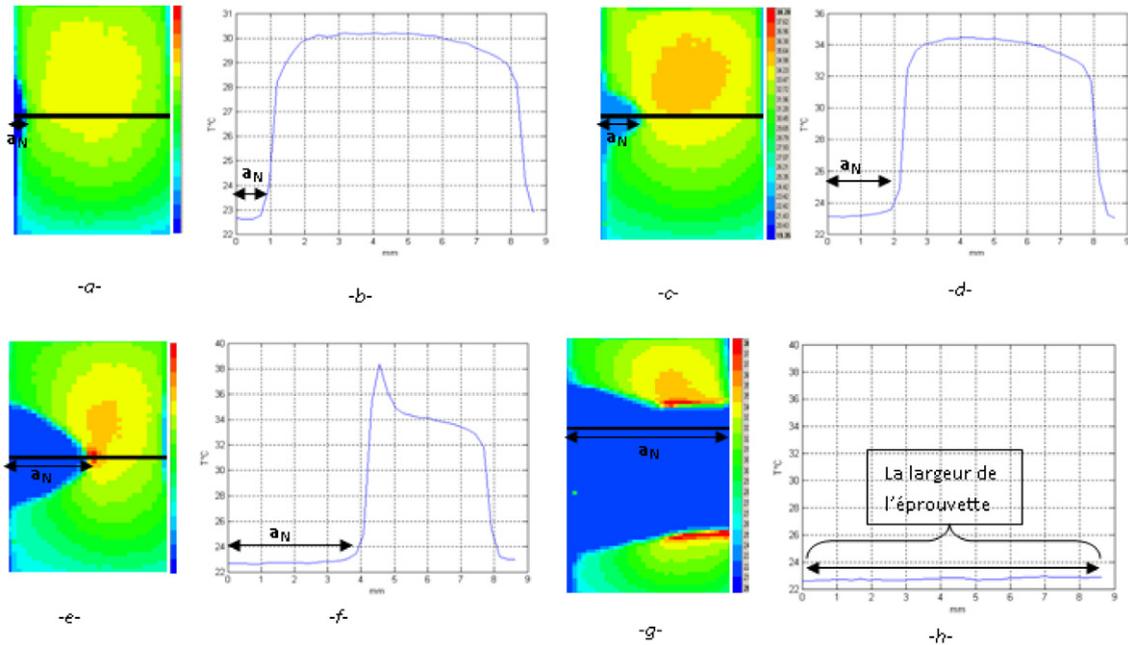


Fig. 3. Evolution du champ de température ambiant indexé par  $a_N$  sur les thermogrammes ((a), (c), (e), (g)). La zone d'intérêt est montrée avec le même indice sur les courbes de température ((b), (d), (f), (h)) à différents cycles de fatigue  $N$  : (a), (b) 601 cycles ; (c), (d) 4800 cycles ; (e), (f) 5065 cycles ; et (g), (h) 5070 cycles (rupture finale).

Fig. 3. Evolution of the room temperature field issued from the crack propagation, indexed by  $a_N$  on the thermograms ((a), (c), (e), (g)) and on the thermal curves ((b), (d), (f), (h)) at different fatigue cycles  $N$  : (a), (b) 601 cycles ; (c), (d) 4800 cycles ; (e), (f) 5065 cycles ; and (g), (h) 5070 cycles (final fracture).

#### 4. Résultats et discussion

Pour le matériau élastomère non renforcé, la fissure s'amorce à partir d'un défaut artificiel (l'entaille) après 3920 cycles de fatigue à une vitesse de  $1,275 \mu\text{m}/\text{cycle}$ , et à partir de 5000 cycles elle s'accélère pour mener le matériau à la rupture à une vitesse de  $18,592 \mu\text{m}/\text{cycle}$  (cf. Fig. 6). La vitesse de rupture atteint 18 fois la vitesse d'amorçage. Lorsque la taille de fissure atteint 47,22 % de la largeur de l'éprouvette, on se trouve au stade critique de la fissuration. La rupture finale de l'éprouvette se déroule à 5 cycles après ce stade critique.

Concernant l'élastomère renforcé, la fissure s'amorce à 6060 cycles avec une vitesse de  $0,306 \mu\text{m}/\text{cycle}$  (cf. Fig. 6), et à partir de 9000 cycles elle s'accélère pour mener le matériau à la rupture avec une vitesse de  $1,768 \mu\text{m}/\text{cycle}$  (cf. Fig. 6). La vitesse de rupture atteint environ 6 fois la vitesse d'amorçage.

Les résultats obtenus montrent que la durée de vie du matériau élastomère renforcé est pratiquement 2 fois plus élevée que celle de l'élastomère non renforcé alors que les vitesses de fissuration sont faibles. Cette technique offre à l'évidence des performances significatives pour le suivi de fissure de matériaux.

Pour évaluer la précision de la technique, nous récapitulons dans le Tableau 1, l'erreur d'estimation de la longueur de l'entaille pour 5 éprouvettes de l'élastomère renforcé. Celle-ci, étant la principale source d'erreur de la technique proposée. L'erreur moyenne d'estimation, de l'ordre de  $8 \mu\text{m}$ , a été évaluée en nous appuyant sur des mesures prises au microscope électronique à balayage avant chaque essai de fatigue.

#### 5. Conclusion

Le fait que la thermographie infrarouge soit une technique non invasive, légère et simple d'emploi est d'un grand intérêt pour son application dans le suivi de l'endommagement de matériaux. Nous avons élargi ces applications en proposant une nouvelle stratégie de suivi de fissure en temps réel fondée sur le seuillage thermique.

Les résultats obtenus dans le cas de matériaux élastomères renforcés et non renforcés révèlent l'efficacité de l'algorithme proposé. Dans le cas du matériau non renforcé les vitesses de fissuration sont plus élevées, ce qui semble

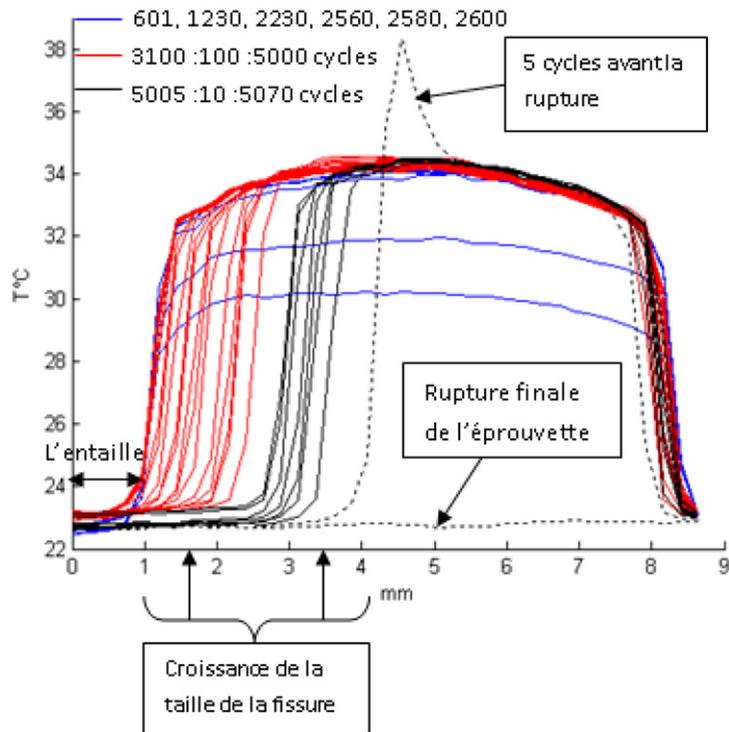


Fig. 4. Exemples de courbes thermiques prises sur l'axe horizontal de symétrie d'une éprouvette entaillée pour différents cycles.

Fig. 4. Examples of thermal curves extracted along the horizontal axis of symmetry of single edge notch tension (SENT) specimen at different cycles.

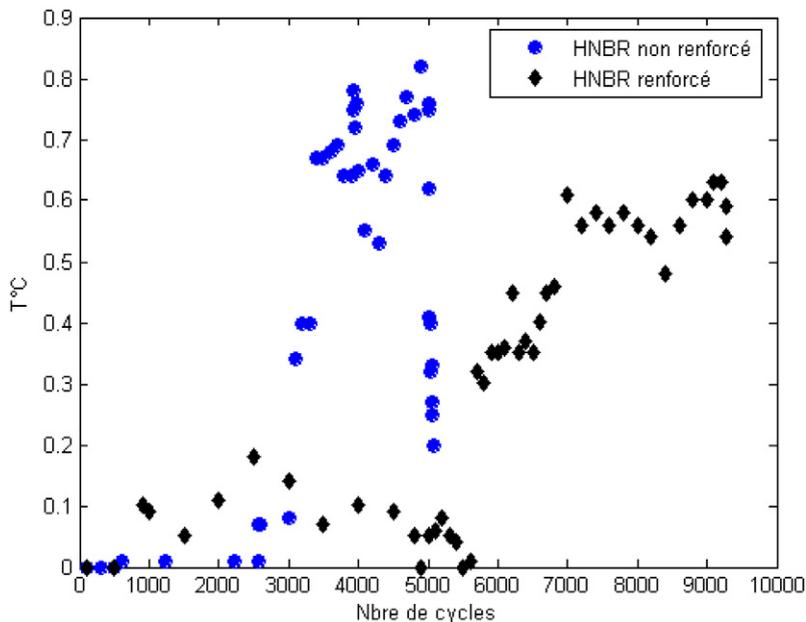


Fig. 5. Fluctuation des écarts de températures du champ  $a_N$  due à la dissipation de l'éprouvette en essai de traction : autour de 22,40 °C dans le cas de l'élastomère non renforcé et autour de 22,27 °C pour le matériau renforcé.

Fig. 5. Fluctuating temperature variations of room temperature field  $a_N$  due to the dissipation of the specimen during tension test: in the vicinity of 22.40 °C in the case of non-reinforced elastomeric and 22.27 °C for the reinforced material.

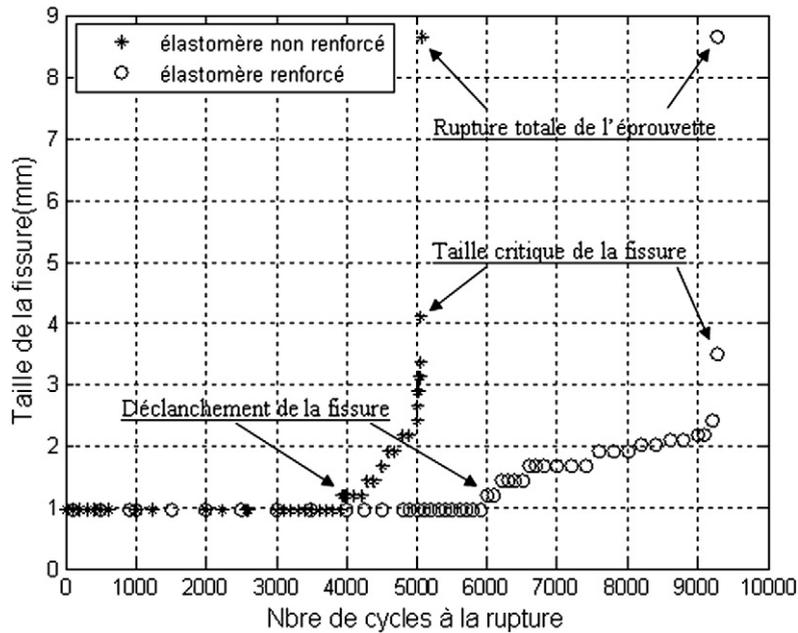


Fig. 6. Longueur de la fissure en fonction de nombre de cycles de fatigue.

Fig. 6. Crack length as a function of the number of fatigue cycles.

Tableau 1

Erreur d'estimation de la longueur de l'entaille

Table 1

Estimation error of the pre-crack size

Eprouvette	Durée de vie	Déclenchement de fissure à	Longueur d'entaille (mm)	Erreur d'estimation (mm)
EP1	10 140 cycles	7840 cycles	0,960	+0,005
EP2	9860 cycles	7540 cycles	0,959	+0,004
EP3	9040 cycles	6730 cycles	0,968	+0,013
EP4	8600 cycles	6280 cycles	0,970	+0,015
EP5	7180 cycles	4870 cycles	0,950	-0,005

prévisible. Toutefois, le pouvoir discriminant de notre approche est incontestablement une avancée dans le domaine de la mesure, du suivi de fissuration ainsi que la prédiction de la rupture, ce domaine étant sensible dans l'industrie automobile et aéronautique ainsi que dans les centrales nucléaires.

## Références

- [1] F. Sansoz, Propagation des petites fissures de fatigue dans les zones de concentration de contraintes dans le superalliage N18, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines, Paris, 2002.
- [2] G. Hartman, D. Johnson, D-C electric-potential method applied to thermal/mechanical fatigue crack growth, *Experimental Mechanics* 27 (1987) 106–112.
- [3] D. Lévêque, K. Longuet, A. Mavel, G. Le Besnerais and F. Champagnat, Interet des mesures de champs dans la caracterisation experimentale du comportement des composites stratifiés ; *Experimental investigation of composite laminates behavior with full-fiel measurements*, in : Journées Nationales sur les Composites 15, Marseille, France, 2007.
- [4] R. Steinberger, T.-I. Valadas Leitao, E. Ladstätter, G. Pinter, W. Billinger, R.-W. Lang, Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing, *International Journal of Fatigue* 28 (2006) 1340–1347.