Effets dissipatifs en fatigue : étude de l'influence de la fréquence de sollicitation

Antoine Blanche, Ngoc-Lam Phung, Nicolas Ranc, Véronique Favier, André Chrysochoos

▶ **To cite this version:**

Antoine Blanche, Ngoc-Lam Phung, Nicolas Ranc, Véronique Favier, André Chrysochoos. Effets dissipatifs en fatigue : étude de l'influence de la fréquence de sollicitation. 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. pp.Clé USB. hal-00859654

HAL Id: hal-00859654
https://hal.science/hal-00859654

Submitted on 9 Sep 2013

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.

Effets dissipatifs en fatigue : étude de l'influence de la fréquence de sollicitation

A. BLANCHE[a,b], N.-L. PHUNG[b], N. RANC[b], V. FAVIER[b], A. CHRYSOCHOOS[a]

a. *Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), Université Montpellier 2, CNRS, Place Eugène Bataillon, 34090 MONTPELLIER*

b. Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM), UMR CNRS 8006, Arts et Métiers Paristech, 151 boulevard de l'Hôpital 75013 PARIS

Résumé :

Ce travail vise à caractériser la nature des effets dissipatifs produits lors d'essais de fatigue dans le cuivre pur. L'exposé présente deux dispositifs de fatigue. Le premier dispositif comprend une machine hydraulique fonctionnant à des fréquences de quelques dizaines de Hertz. Le second système exploite le phénomène de résonance et permet d'effectuer des essais dynamiques à une fréquence de 20 kHz. Dans les 2 cas, un dispositif thermographique est utilisé pour mesurer des champs de température à la surface de l'échantillon. L'exploitation des champs permet alors d'accéder aux sources de chaleur et plus particulièrement, à la dissipation intrinsèque. Les énergies dissipées par cycle, issues des deux types d'essais, sont finalement comparées. Ces premiers résultats mettent en évidence une quasi-indépendance de l'énergie dissipée en fonction de la fréquence, illustrant des mécanismes de déformations irréversibles indépendants de la vitesse de déformation.

Abstract :

This work aims at studying the nature of dissipative effect in pure copper during fatigue test. Two mechanical setups are presented. The first one includes a servo-hydraulic machine working at a conventional loading frequency (50 Hz). The second one uses the principle of resonance and works at a higher loading frequency (20 kHz). In both cases, a thermal imaging camera is used to measure the temperature field at the specimen surface. Heat sources including intrinsic dissipation are then derived from these experimental data. Dissipated energies per cycle obtained in each case are finally compared. The results show that the dissipated energy per cycle is frequency-independent, reflecting the strain-rate independence of irreversible deformation mechanisms.

Mots clefs : fatigue, dissipation, thermographie infrarouge, effet fréquence

1 Introduction

L'étude de l'influence de la vitesse de déformation sur la réponse mécanique des matériaux est un axe de recherche classique. Cet aspect du comportement se traduit dans le cadre de la fatigue des métaux par la question du rôle de la fréquence de sollicitation sur le comportement cyclique [1]. Les travaux qui s'intéressent à ces aspects consistent généralement à étudier le matériau en le sollicitant à différentes vitesses de déformation/fréquences de sollicitation en ayant (*i*) soit un regard mécanique (*e.g.* observation des réponses mécaniques [2] ou des courbes SN « Stress vs. Number of cycles » [3]) (*ii*) soit un regard métallurgique (e.g. études de faciès de rupture, des mécanismes d'amorçage de fissures [4]). Le présent travail s'intéresse au rôle de la fréquence de sollicitation sur la réponse énergétique du matériau et plus particulièrement sur l'énergie dissipée dans des cycles de chargement effectués à différentes fréquences de sollicitation. Le travail consiste tout d'abord à réaliser des essais de fatigue à « basse » et « haute » fréquence de sollicitation (*i.e.* 50 et 20000 Hz). Les champs de températures sont relevés durant ces deux types d'essais, par thermographie infrarouge (TIR), puis utilisés afin d'estimer, *via* une équation de diffusion de la chaleur, les puissances calorimétriques mises en jeu dans chacune des situations expérimentales. Une comparaison des énergies dissipées par cycle est enfin réalisée afin d'analyser le caractère dépendant ou non de l'évolution des irréversibilités matérielles à la vitesse de déformation.

L'article est présenté de la manière suivante : tout d'abord, les deux dispositifs de sollicitation (basse et haute fréquence) ainsi que le matériau et le dispositif thermographique sont décrits, puis les différents modèles de diffusion de la chaleur nécessaires à la détermination des effets dissipatifs et leur traitement d'image associé

sont ensuite brièvement rappelés, enfin, le papier se termine par une étude comparative des résultats expérimentaux dont les conséquences en terme de comportement sont rapidement discutées.

2 Dispositifs expérimentaux

2.1 Matériau

Le matériau étudié est un cuivre pur CuOF (Cu>99.95%). Un traitement thermique à 250°C pendant 60 minutes est réalisé sur les échantillons afin de diminuer les contraintes résiduelles. La taille de grain obtenue est de l'ordre de 50 µm. Le module de Young est estimé à 130 GPa et la limite d'endurance à 10^{10} cycles pour une amplitude de contrainte de 93 MPa [5].

2.2 Dispositif thermographique

La caméra infrarouge (IR) utilisée dans ce travail est équipée d'un capteur InSb d'une taille de 512x640 pixels. Durant l'essai, l'axe de la caméra est perpendiculaire à la surface de l'échantillon. Un revêtement de peinture noire est appliqué sur la surface de l'échantillon pour que son émissivité soit proche de 1. La résolution spatiale obtenue est alors typiquement de l'ordre de 0.1 mm/pixel. A l'aide d'un corps noir, un étalonnage pixel à pixel est réalisé avant chaque série d'essais [6]. Cet étalonnage permet alors de convertir les signaux numériques délivrés par la caméra IR en température. La fréquence d'acquisition reste en général entre 10 et 20 Hz.

2.3 Dispositifs mécaniques

La réalisation d'essais de fatigue traditionnelle (50 Hz) et ultrasonique (20 kHz) implique l'utilisation de deux dispositifs expérimentaux différents.

2.3.1 Fatigue quasi-statique

Le premier dispositif utilisé dans le cadre de la fatigue traditionnelle (quasi-statique) est une machine servo-hydraulique MTS équipée d'une cellule de charge 25 kN. Afin de réaliser ces essais quasi-statiques à des niveaux de contrainte «constants», un asservissement en force du système est choisi. La géométrie des échantillons se caractérise ici par une zone utile de 10 mm de largeur et 10 mm de longueur et d'épaisseur 3 mm (voir Figure 1). La fréquence de sollicitation est de 50 Hz.

2.3.2 Fatigue dynamique

Le second dispositif utilisé dans le cadre des essais de fatigue ultrasonique (dynamique) est un système piézoélectrique. Dans le cadre de ces essais, la fréquence de sollicitation est alors de 20 kHz. Cette machine ultrasonique de fatigue est composée de 3 parties [7, 8] (voir Figure 2) : (i) un convertisseur piézoélectrique qui transforme un signal électrique en un déplacement (de l'ordre de quelques µm), (ii) une sonotrode dont la géométrie permet d'amplifier ce déplacement, (iii) un échantillon fixé à la sonotrode par une vis à une extrémité et libre de contrainte à son autre extrémité.

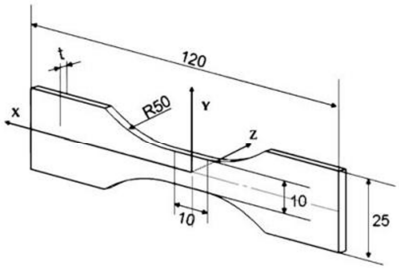

FIG. 1 – Dimension de l'échantillon (50 Hz)

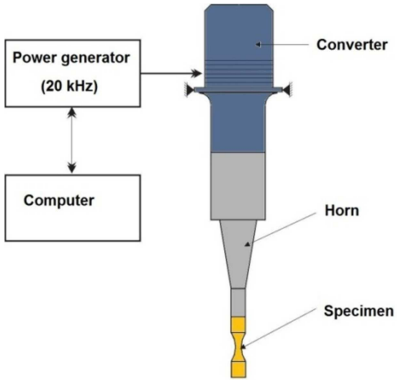

FIG. 2 – Machine ultrasonique de fatigue (20 kHz)

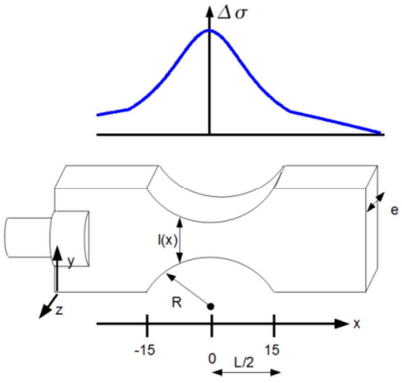

FIG. 3– Profil de contrainte le long de l'échantillon (20 kHz)

L'ensemble de ce système est dimensionné en faisant l'hypothèse d'un comportement élastique (*i.e.* pas de dissipation !) afin que son premier mode de vibration longitudinal soit de l'ordre de 20 kHz. Une fois le dimensionnement réalisé, il est possible de déterminer la distribution de contrainte le long de l'échantillon (voir Figure 3). On constate ici que plus la section est faible et plus la contrainte est élevée.

Il est intéressant de noter que, contrairement aux essais de fatigue quasi-statiques pratiqués dans notre étude, ces essais dynamiques sont asservis en déplacement. La contrainte appliquée est ici connue à l'aide de l'hypothèse de comportement élastique que l'on considère valable compte tenu des niveaux de contrainte choisis qui restent en général bien inférieurs à la limite d'élasticité macroscopique et de la limite d'endurance du matériau.

2.4 Description des essais

Les essais consistent à réaliser des blocs de cycles à amplitude de contrainte constante. L'objectif de ces essais est d'obtenir, pour chaque situation, un ordre de grandeur des effets dissipatifs. Dans le cas de la fatigue traditionnelle, l'échantillon subit successivement 5 blocs de 3000 cycles à une fréquence de 50 Hz pour des amplitudes de contraintes allant de 20 à 80 MPa (Figure 4). Concernant les essais ultrasoniques, le nombre de cycles des 10 blocs est de 10^6 cycles pour des amplitudes de contraintes allant de 20 à 90 MPa (Figure 5) à une fréquence de sollicitation de 20 kHz. Il faut noter que le rapport de charge est de $R_\sigma = \sigma_{min}/\sigma_{max} = -1$ dans les deux cas.

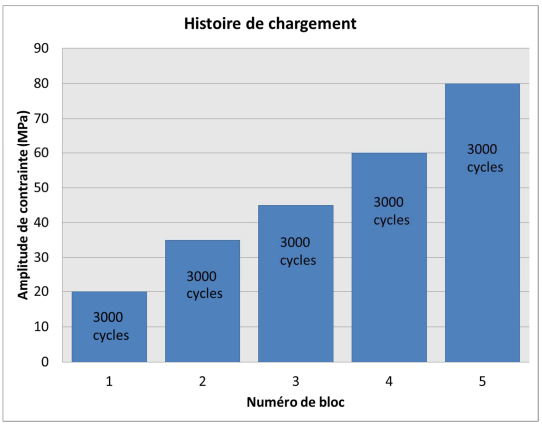

FIG. 4 – Essais à 50 Hz

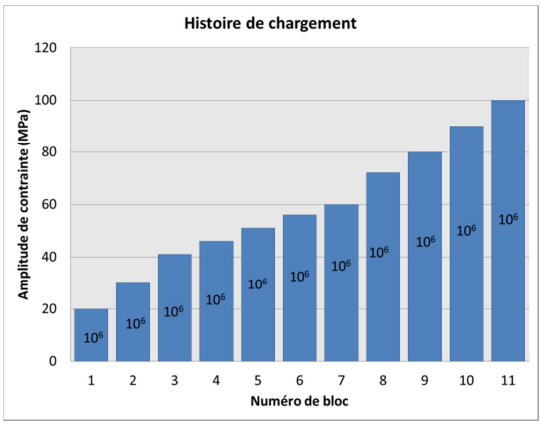

FIG. 5 – Essais à 20 kHz

3 Des températures aux sources

Le passage des températures aux sources de chaleur se fait en utilisant un modèle de diffusion de la chaleur. Deux modèles de diffusion ont été utilisés dans ce qui suit. On les présente brièvement ainsi que le traitement des données expérimentales conduisant au calcul des sources de chaleur.

3.1 Modèles de diffusion

L'équation de la chaleur s'obtient en combinant les expressions locales du premier et second principe de la thermodynamique. Elle peut s'écrire, sous certaines conditions [9], sous la forme suivante :

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

où ρ, C et k désignent respectivement la masse volumique, la capacité calorifique et la conductivité thermique du matériau. La caméra fournit des champs de température de surface. L'équation (1) n'est donc par directement opérationnelle pour estimer les sources. Pour la rendre opérationnelle plusieurs voies sont possibles.

Une première possibilité consiste à intégrer l'Eq. (1) sur chaque section droite $S(x) = e.l(x)$ pour obtenir un modèle de diffusion de la chaleur 1D [10, 11] :

$$\rho C \left(\frac{\partial \bar{\bar{\theta}}}{\partial t} + \frac{\bar{\bar{\theta}}}{\tau^{1D}} \right) - k \left(\frac{\partial^2 \bar{\bar{\theta}}}{\partial \mathrm{x}^2} + \frac{\partial \bar{\bar{\theta}}}{\partial \mathrm{x}} \frac{S'}{S} \right) = \bar{\bar{d}}_1 + \bar{\bar{s}}_{the} \tag{2}$$

où $\bar{\bar{\theta}}(x,t)$, $\bar{\bar{d}}_1(x,t)$ et $\bar{\bar{s}}_{the}(x,t)$ représentent respectivement la variation de température, la dissipation et la source thermoélastique, moyennées sur chaque section droite de l'échantillon. La constante de temps $\tau^{1D}(x) = \frac{\rho C\, S(x)}{2h(e+l(x))}$ caractérise les échanges thermiques avec l'environnement sur les faces latérales de l'échantillon par convection, conduction et radiation. Cette constante dépend des caractéristiques du matériau, de la géométrie de l'échantillon et du coefficient d'échange thermique h entre l'éprouvette et l'air environnant.

Une seconde possibilité, souvent utilisée, suppose que le champ de sources est homogène dans le volume de la zone utile et que les fuites à la frontière de cette zone restent linéaires en température. Ces hypothèses (fortes) permettent d'aboutir à une équation différentielle de diffusion suivante (modèle 0D) [12] :

$$\rho C\left(\frac{d\theta}{dt}+\frac{\theta}{\tau^{0D}}\right)=d_1+s_{the} \tag{3}$$

où $\theta(t), d_1(t)$ et $s_{the}(t)$ représentent respectivement la variation de température, la dissipation intrinsèque et la source thermoélastique au centre de l'échantillon.

On peut noter ici que les deux modèles précédents font apparaitre des constantes de temps (τ^{1D} et τ^{0D}) qui ne sont pas connues. La détermination expérimentale de ces constantes, non détaillée ici, se fait généralement, par exemple, lors de retour à l'équilibre thermique [13].

3.2 Calcul des sources de chaleur

Dans le cas des essais à 50 Hz, le traitement numérique conduisant aux sources *via* Eq. (3), consiste à approximer localement, au sens des moindres carrés, la température expérimentale par une fonction θ_{app} de la forme suivante [14] :

$$\theta_{app}(t)=P_1t+P_2+P_3\sin(2\pi ft)+P_4\cos(2\pi ft) \tag{4}$$

où P_i sont des constantes et f la fréquence de sollicitation. Cette fonction d'approximation peut se décomposer en deux parties, la première permettant de décrire les effets dissipatifs P_1t+P_2 et la seconde illustrant les effets thermoélastiques $P_3\sin(2\pi ft)+P_4\cos(2\pi ft)$. Il est alors possible d'accéder à la dissipation moyenne par cycle $\tilde{d}_1(t)$ et à l'amplitude de la source thermoélastique Δs_{the}.

En ce qui concerne les essais à 20 kHz, la fréquence d'acquisition de la caméra IR (10 Hz) et le temps d'intégration (1000 µs=20 cycles) ne permettent pas de mesurer les effets thermoélastiques. En effet, la température mesurée est, dans ce cas, une température moyenne sur plusieurs cycles. Il est par contre possible d'accéder à un profil de dissipation moyenne par cycle $\tilde{d}_1(x,t)$. Compte tenu de la fréquence de sollicitation (20 kHz), les échauffements en jeu lors de ces essais sont, cette fois, très importants. Il a donc été choisi ici d'estimer la puissance dissipée à partir du modèle de diffusion 1D en utilisant une fonction d'approximation de la forme suivante :

$$\bar{\bar{\theta}}_{app}(x,t)=P_1(x)t+P_2(x) \tag{5}$$

où $P_i(x)$ représentent des polynômes de degré 2 en x.

4 Résultats

Dans la suite, les puissances thermo-élastique et dissipée (en W/m^3) ont été divisées par ρC afin de les exprimer en (°C/s). Cette unité facilite l'interprétation des résultats et leur comparaison. Les figures 6 et 7 présentent la source thermo-élastique et la dissipation intrinsèque issues des essais quasi-statiques (50 Hz). On constate, sur la figure 6, que la source thermo-élastique est linéaire par rapport à l'amplitude de contrainte. Ce résultat est cohérent avec un comportement thermo-élastique linéaire. La figure 7 présente quant à elle la réponse dissipative du matériau pour plusieurs échelons de contraintes. On constate que la dissipation augmente fortement pour une amplitude de contrainte supérieure à 50 MPa. Il est également intéressant de noter que les effets thermo-élastiques sont plus importants, sur un plan calorimétrique, (e.g. 45 °C/s à 90 MPa), que les effets dissipatifs moyens par cycle (e.g. 0.2°C/s à 90 MPa).

En dessous de 50 MPa (à 50 Hz), la dissipation se révèle délicate à estimer, les échauffements en jeu sont en effet très faibles. De plus une adaptation élastique (i.e. comportement non dissipatif « elastic shakedown ») est envisageable. L'utilisation d'une machine ultrasonique (20 kHz) se révèle intéressante dans cette situation, en effet la fréquence élevée permet de provoquer de forts échauffements plus faciles à mesurer et ainsi de constater l'existence ou non d'une adaptation élastique.

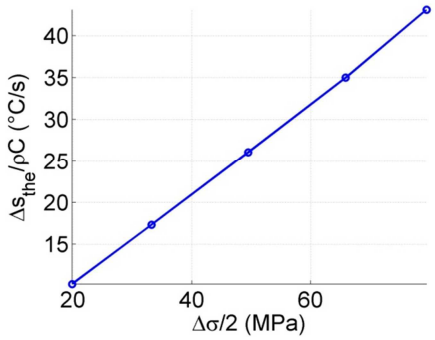

FIG. 6 – Essais à 50 Hz : source thermoélastique

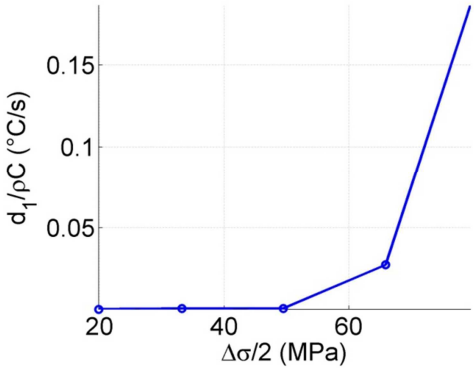

FIG. 7– Essais à 50 Hz : dissipation intrinsèque

Les résultats issus des essais ultrasoniques ont permis de construire deux figures. La première (figure 8) représente la dissipation moyenne au centre de l'échantillon $< d_1 >= \frac{1}{x_0}\int_{-x_0/2}^{x_0/2} d_1\, dx$ en fonction de l'étendue de contrainte $\Delta\sigma$ avec x_0 = 2 mm la distance au centre de l'échantillon sur laquelle la dissipation est moyennée (cf. figure 9). On constate (figure 8), cette fois-ci, que la dissipation est positive et non nulle, quelle que soit l'amplitude de contrainte. Il n'y a pas d'adaptation élastique même en dessous de 50 MPa.

La figure 9 représente la distribution de la dissipation le long de l'échantillon lors d'un essai à 80 MPa d'une durée de 10^6 cycles, trois mesures ont été réalisées pendant la durée de cet essai. On remarque ici que la dissipation est plus forte à proximité du centre de l'échantillon ce qui est cohérent avec le champ de contrainte (Figure 3). On peut tout de même mentionner que des résultats expérimentaux indiquent parfois un maximum de dissipation éloigné du centre de l'échantillon et qui se révèle d'ailleurs par la suite être la zone de rupture [13]. Si l'on compare les trois mesures (0,3.10^5 cycles, 0,3.10^5 cycles et 10^6 cycles) faites durant cet essai, on constate que la dissipation augmente, il n'y a donc pas (non plus) d'accommodation plastique (i.e. non évolution de l'état du matériau cycle après cycle => énergie dissipée par cycle constante « plastic shakedown »). Le même type de résultat a été constaté à des niveaux de contrainte plus faibles.

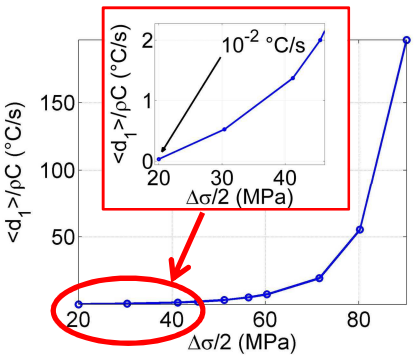

FIG. 8 – Essais à 20 kHz

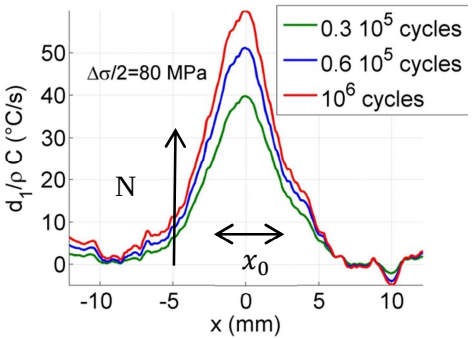

FIG. 9– Essais à 20 kHz

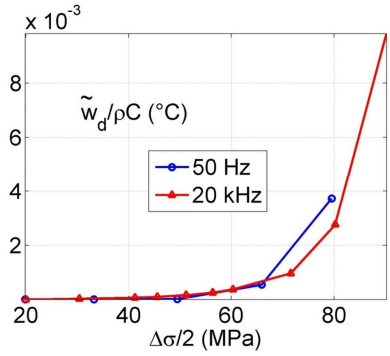

FIG. 10 – Comparaison 50 Hz et 20 kHz

Si on compare les figures 7 et 8, on observe, naturellement, que les puissances dissipées à 20 kHz sont beaucoup plus importantes qu'à 50 Hz. Toutefois, si l'on considère, cette fois, les énergies dissipées par cycle $\tilde{w}_d = \tilde{d}_1/f$ à 50 Hz et 20 kHz, la figure 10 montre que ces énergies sont du même ordre de grandeur. Il semble donc que les irréversibilités qui accompagnent la fatigue du matériau restent peu sensibles à la fréquence de sollicitation.

5 Conclusion

Les techniques thermographiques ont été ici adaptées à l'analyse des effets de la fréquence sur la réponse énergétique en fatigue d'un cuivre pur. Les énergies dissipées ont été estimées en utilisant les champs de température et un traitement d'images lors d'essais de fatigue réalisés à des fréquences de chargement de 50 Hz et 20 kHz.

Les résultats calorifiques ont montré qu'il n'y avait ni de réelle adaptation élastique ni même d'accommodation plastique. Ce résultat est important car l'existence d'un cycle mécanique stabilisé est couramment utilisée dans les critères de fatigue des matériaux [14]. Enfin, la comparaison des énergies dissipées par cycle montre qu'il n'y a pas d'effet significatif de fréquence sur le comportement du matériau. Les irréversibilités pourraient donc être décrites dans le cadre de la (micro) plasticité indépendante du temps.

Une première perspective à ce travail sera de réaliser des essais de fatigue à une autre « très haute » fréquence de sollicitation (30 kHz) pour confirmer ce premier comparatif de mesures. Il convient de rappeler que cette étude comparative des énergies dissipées avait déjà été réalisée par Berthel et al. [15] pour des fréquences allant de quelques Hz à quelques dizaines de Hertz. Un système piézoélectrique fonctionnant à 30 kHz est en cours de fabrication.

Une seconde perspective, plus délicate, est de mesurer l'énergie mécanique fournie au matériau à chaque cycle afin de réaliser par la suite des bilans énergétiques et d'accéder à l'énergie stockée par le matériau. Des travaux ont d'ailleurs été réalisés sur ce point dans le cadre des essais quasi-statiques [16].

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Agence Nationale de la Recherche portant la référence ANR-09-BLAN-0025-01.

Références

[1] Ebara, R., The present situation and future problems in ultrasonic fatigue testing - Mainly reviewed on environmental effects and materials' screening, International Journal of Fatigue 28(11), 1465 – 1470, 2006.
[2] Avril, S.; Pierron, F.; Sutton, M. A. & Yan, J., Identification of elasto-visco-plastic parameters and characterization of Lüders behavior using digital image correlation and the virtual fields method, Mechanics of Materials 40(9), 729 – 742, 2008.
[3] Furuya, Y.; Matsuoka, S.; Abe, T. & Yamaguchi, K., Gigacycle fatigue properties for high-strength low-alloy steel at 100 Hz, 600 Hz, and 20 kHz, Scripta Materialia 46(2), 157 – 162, 2002.
[4] Tsutsumi, N.; Murakami, Y. & Doquet, V., Effect of test frequency on fatigue strength of low carbon steel, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 32(6), 473-483, 2009.
[5] Stanzl-Tschegg S. ,Mughrabi H., Schönbauer B., Life time and cyclic slip of copper in the VHCF regime, International Journal of Fatigue, 29, 2050-2059, 2007.
[6] Honorat, V.; Moreau, S.; Muracciole, J.; Wattrisse, B. & Chrysochoos, A., Calorimetric analysis of polymer behaviour using a pixel calibration of an IRFPA camera, Quantitative InfraRed Thermography Journal 2, 153 – 171, 2005.
[7] Bathias, C. & Paris, P., Gigacycle fatigue in mechanical practice, CRC Press, 2004.
[8] Bathias, C., Piezoelectric fatigue testing machines and devices, International Journal of Fatigue 28(11), 1438 – 1445, 2006.
[9] Berthel, B.; Wattrisse, B.; Chrysochoos, A. & Galtier, A., 'Thermographic Analysis of Fatigue Dissipation Properties of Steel Sheets', Strain 43(3), 273-279, 2007.
[10] Boulanger, T.; Chrysochoos, A.; Mabru, C. & Galtier, A. , Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels, International Journal of Fatigue 26(3), 221 – 229, 2004.
[11] Doudard, C.; Calloch, S.; Hild, F. & Roux, S., Identification of heat source fields from infra-red thermography: Determination of 'self-heating' in a dual-phase steel by using a dog bone sample, Mechanics of Materials 42, 55 – 62, 2010.
[12] Chrysochoos, A., Analyse du comportement des matériaux par thermographie infrarouge, Photomécanique 1995 : Étude du comportement des matériaux et des structures, pp. 203 – 211, 1995.
[13] Blanche, A., Effets dissipatifs en fatigue a grand et très grand nombre de cycles, Thèse, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2012.
[14] Charkaluk, E. & Constantinescu, A., Dissipative aspects in high cycle fatigue, Mechanics of Materials 41(5), 483 – 494, 2009.
[15] Berthel, B.; Chrysochoos, A.; Wattrisse, B. & Galtier, A., Infrared Image Processing for the Calorimetric Analysis of Fatigue Phenomena, Experimental Mechanics 48, 79-90, 2008.
[16] Chrysochoos, A.; Wattrisse, B.; Muracciole, J.-M. & El Kaïm, Y. , Fields of stored energy associated with localized necking of steel, Mechanics of Materials and Structures 4(2), 245–262, 2009.