

CARACTERISATION DE CHAMPS THERMOMECHANIQUES AU COURS D'ESSAIS DE FATIGUE THERMIQUE A GRAND NOMBRE DE CYCLES

A. Charbal* ***, L. Vincent ***, F. Hild*, M. Poncelet*, S. Roux* and D. Farcage**

* LMT Cachan, UMR 8535, 61 av. du Président Wilson, F-94235 Cachan cedex, France, poncelet@ens-cachan.fr, hild@lmt.ens-cachan.fr, stephane.roux@lmt.ens-cachan.fr

** CEA, DEN, DPC, SEARS, F-91191, Gif sur Yvette cedex, France, daniel.farcage@cea.fr

***CEA, DEN, DMN, SRMA, F-91191 Gif sur Yvette cedex, France, ali.charbal@cea.fr, ludovic.vincent@cea.fr

Mots clés : Corrélation d'images numériques, thermographie infrarouge, fatigue thermique

1. INTRODUCTION

Dans les réacteurs nucléaires actuels ou futurs, des variations locales de température dans le fluide caloporteur peuvent engendrer des dilatations empêchées génératrices de contraintes. Lorsque ces sollicitations sont répétées un grand nombre de fois, un endommagement puis une fissuration du matériau peuvent apparaître (Robert et al.). On parle alors de fatigue thermique du matériau. Pour la caractériser, plusieurs types d'essais ont été réalisés par le passé. D'une part, des essais de fatigue uniaxiaux et isothermes pour construire une courbe de fatigue mécanique du matériau et, d'autre part, des essais sur plusieurs dispositifs expérimentaux de fatigue thermique développés pour s'approcher des conditions de service (Fissolo et al. 2009). L'interprétation de ces derniers essais passe par l'estimation des champs de température et de déplacement de la structure à partir de quelques mesures ponctuelles de température par thermocouples.

Un nouveau dispositif de fatigue thermique a été proposé permettant de suivre de manière plus globale les champs thermiques et cinématiques (Vincent et al. 2013). L'intérêt de ce dispositif est aussi qu'il pallie certaines faiblesses des dispositifs de fatigue thermique actuels en conciliant la réalisation d'un grand nombre de cycles de fatigue (supérieur au million) avec une grande stabilité dans le temps du chargement imposé et une meilleure estimation du chargement d'origine thermique. Un laser de puissance pulsé est ainsi utilisé pour imposer des flux de chaleur cycliques d'amplitude constante en surface d'un acier inoxydable austénitique, tout en observant cette surface au moyen de deux caméras, l'une travaillant dans le spectre infrarouge et l'autre dans le spectre visible. La première permet de mesurer le champ de température en surface d'échantillon au cours des impulsions laser sous réserve d'avoir pu au préalable déterminer l'émissivité de cette surface. La seconde caméra permet de mesurer le champ de déplacement par Corrélation d'Images Numériques (CIN), puis par dérivation, de déterminer le champ de déformation, que l'on peut comparer à celui obtenu par méthode des éléments finis. Compte tenu des faibles durées d'impulsion (typiquement 50 ms), une acquisition stroboscopique a par ailleurs été mise en place pour obtenir suffisamment d'images thermiques et « cinématiques » au cours d'une impulsion laser. Ces essais ont été menés sur deux échantillons, jusqu'à l'amorçage et le suivi des premiers stades de propagation de fissure. Nous présentons tout d'abord le dispositif expérimental utilisé et le matériau étudié, suivi d'une synthèse des principaux résultats expérimentaux sur en termes de champs cinématiques et thermiques d'une part et de l'endommagement d'autre part.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET MATERIAU ETUDIE

Un laser pulsé (TruPulse 156 fabriqué par Trumpf, $\lambda = 1064\text{nm}$ - Figure 1a (1)) est utilisé pour imposer des chargements thermiques cycliques au centre d'un échantillon (Figure 1a (2)). La fréquence des tirs est de 2 Hz, la durée d'impulsion est de 50 ms et la puissance du faisceau incident est adaptée pour imposer une variation de température en surface de 200°C (soit 300 W environ). Le faisceau a un diamètre de 5 mm et une densité spatiale de puissance sous la forme d'un chapeau haut de forme (« *top-hat* »). La faible absorptivité de la surface de l'échantillon à l'état poli miroir puis pré-oxydée nous contraint à incliner le faisceau laser par rapport à la normale à cette surface. Un détecteur de puissance est alors utilisé pour non seulement enregistrer la puissance moyenne réfléchie et estimer ainsi l'absorptivité de la surface (Figure 1a (3)), mais également pour capter le faisceau réfléchi pour des raisons de sécurité.

Deux pyromètres rapides (KGA740-LO fabriqués par Kleiber GmbH, $\lambda = [1550 \text{ nm} - 2200 \text{ nm}]$, Figure 1a (4)) nous permettent de mesurer sur un diamètre de 2.5 mm la température au centre de la zone impactée. Enfin pour avoir accès à des mesures de champs en surface d'échantillon, une caméra infrarouge (x6540sc fabriquée par FLIR, définition 640×512 pixels, $\lambda = [3 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}]$, Figure 1a (5)) est utilisée pour mesurer les champs de température au cours des cycles. Pour les champs de déplacement, la technique de Corrélation d'Images Numériques (CIN) est utilisée sur les images enregistrées par une caméra rapide (MIRO M320S fabriquée par Vision Research, définition 1920×1080 pixels, Figure 1a (6)). Afin de protéger les capteurs des caméras d'éventuelles réflexions parasites du faisceau laser, des filtres passe haut et passe bas sont utilisés (Figure 1a (7 et 8)) respectivement pour la caméra IR et la caméra visible. Deux lampes Dedocool 250W sont utilisées pour éclairer la surface de l'échantillon et produire la luminosité nécessaire dans les images visibles pour l'application la CIN (Figure 1a (9)). Les distances de travail pour la caméra IR et visible sont respectivement de 18 cm et 25 cm. Les tailles physiques de pixel sont de $60 \mu\text{m}$ et de $12.5 \mu\text{m}$ respectivement pour la caméra IR et la caméra visible. L'échantillon est chauffé à 400°C par contact sur sa face arrière avec une résistance électrique dont la température, mesurée par un thermocouple, est régulée (Figure 1a (10)).

L'échantillon étudié est un acier inoxydable austénitique de type 316L qui a pour dimension $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$. Pour mesurer les champs de déplacement par CIN, il est nécessaire d'avoir un motif de niveaux de gris à la surface de l'objet observé. Le mouchetis est obtenu simplement en effectuant un polissage suivi d'une préoxydation au four de l'échantillon pendant 48 h à 400°C (Figure 1b).

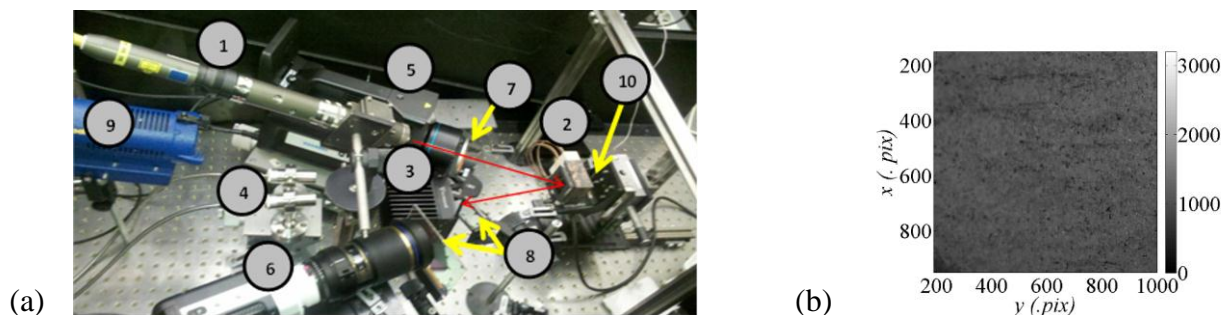


Figure 1 : (a) Configuration expérimentale (voir le texte principal pour les descriptions de chaque élément numéroté) (b) Surface d'échantillon avec une surface pré-oxydée et les niveaux de gris correspondants (la taille physique d'un pixel est de $10 \mu\text{m}$)

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Pour pouvoir mesurer les champs thermiques et cinématiques aux mêmes instants de sollicitation, une synchronisation des caméras a été utilisée. Pour pallier la relativement faible cadence d'acquisition de la caméra IR (180 Hz), une acquisition stroboscopique a été mise en place afin de reconstruire un cycle de choc thermique à l'aide de quatre cycles successifs. Après reconstruction, le nombre d'images enregistrées lors de la montée en température est de 36 et le nombre total d'images (pour la montée et la descente) est alors de 360 images.

3.1 Mesure de champs thermiques

Les mesures sans contact de champs de température ont été réalisées à l'aide des pyromètres et de la camera IR qui délivrent un signal (tension ou niveau numérique) proportionnel au flux radiatif reçu. Une première étape d'étalonnage face à un corps noir à cavité a été menée afin d'associer les signaux bruts de ces appareils de mesure à une température corps noir connue. Pour mesurer ensuite la température des échantillons de fatigue, il est nécessaire au préalable de déterminer l'émissivité de leur surface (Vincent et al. 2013; A. Charbal et al.). Cette émissivité a été estimée en comparant le flux émis par la zone d'intérêt et celui émis par

une zone voisine préalablement recouverte d'une peinture à forte émissivité et résistante à haute température. Pour confirmer la haute valeur d'émissivité de la zone peinte, un thermocouple a été soudé en surface d'échantillon avant d'être recouvert de peinture, ceci dans le but d'avoir une autre référence de la température de surface. L'écart entre la température de la zone peinte mesurée par thermocouple et par rayonnement infrarouge en supposant une émissivité égale à 1 n'excédait pas 10 °C (A. Charbal et al.). Une émissivité de 0.36 à une longueur d'onde de 4 µm (caméra IR) et de 0.51 à [1.55 ; 2.2 µm] (pyromètre) a ainsi été obtenue pour l'état initial de la zone qui subit les chocs thermiques. Périodiquement, les essais sont interrompus pour vérifier que l'émissivité de la surface n'a pas évolué et si tel est le cas, alors celle-ci est mise à jour à la fois pour les mesures par pyrométrie et par caméra IR. Les mesures ponctuelles de température par pyrométrie sont par la suite utilisées pour réguler la puissance crête du laser au cours des cycles tandis que les champs de température issus de la caméra IR sont utilisés dans un processus d'identification du chargement thermique pour les simulations numériques. Ces derniers aspects ne seront pas traités ici, mais le lecteur peut se référer à (A. Charbal et al.).

3.2 Mesures de champs cinématiques

La technique de CIN utilisée est celle proposée par Tomičević *et al.* (2013), basée sur une minimisation d'une fonctionnelle à la fois optique (résolution d'un problème de CIN classique) et mécanique (résolution d'un problème élastique). A grande échelle la solution du problème de CIN prend le pas, tandis qu'en dessous d'une longueur de régularisation donnée, la solution du problème d'élasticité domine. Le mouchetis utilisé sur l'acier 316L permet le choix d'une taille d'éléments triangulaires (T3) de 20 pixels. La stratégie de calcul CIN est de d'abord d'imposer une longueur de régularisation initiale de 100 pixels et de 50 pixels sur les bords. Puis lors d'une deuxième étape, en donnant comme déplacements initiaux ceux précédemment calculés, une longueur de régularisation plus faible (40 pixels au centre et 20 pixels sur les bords) est choisie. Les champs de déplacement au maximum du chargement d'un cycle sont représentés sur la Figure 2. Les amplitudes sont de l'ordre de 0.3 pixel soit 3 µm dans la zone impactée.

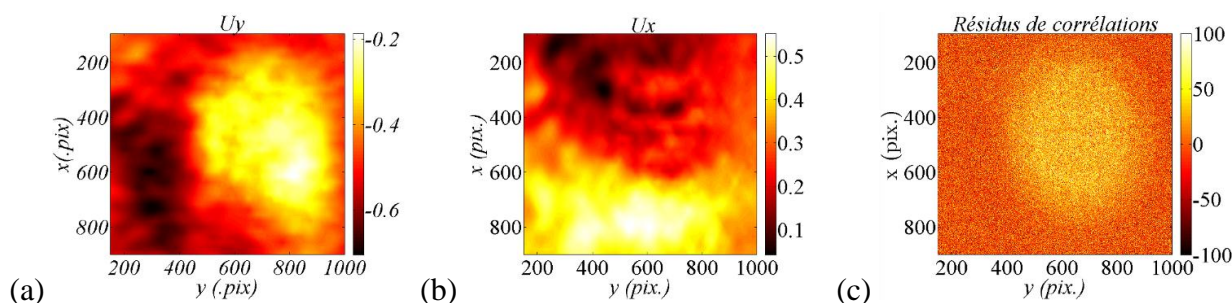


Figure 2 : Champs de déplacement en pixel selon les axes X(a) et Y(b) entre une image juste avant un tir laser et une image à la fin du tir et (c) les résidus de corrélation en niveaux de gris (dynamique de l'image de 4096 niveaux de gris)

Malgré la pauvreté du mouchetis obtenu par oxydation (faible gradient), les mesures fournissent les tendances attendues, à savoir des champs de déplacement similaires à ceux observés lors d'essais biaxiaux.

3.3 Amorçage et premiers stades de propagation de fissures

Un essai de fatigue a été réalisé jusqu'à 95 000 cycles. L'échantillon est maintenu à une température de 380 °C et le chargement thermique (variation de température) imposé est de 200 °C. Grâce à la synchronisation externe des caméras, les images sont toujours prises au même instant dans le cycle de chargement thermique, quel que soit le nombre de cycles atteint. Ceci permet d'appliquer la CIN entre deux états censés être identiques, en début et en fin d'essais par exemple, dans le but de ne faire ressortir du champ de déformation (ou de déplacement) que l'évolution de l'endommagement surfacique de l'échantillon. Les longueurs finales des fissures observées après 95 000 cycles sont de l'ordre de 3 mm avec une ouverture avoisinant les 5 µm (voir Figure 3c). La forme en étoile du réseau de fissures formée est caractéristique d'un chargement biaxial.

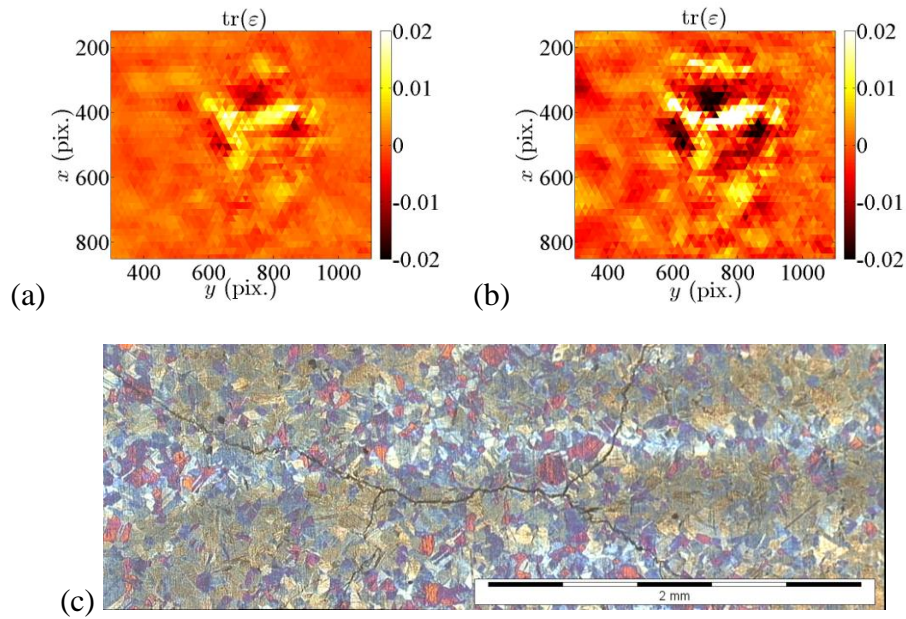


Figure 3 : Trace des déformations planes de corrélation entre images prises juste avant le déclenchement d'un tir, en fonction du nombre de cycles (a) entre le 6 500^{ème} et le 30 000^{ème} cycles (b) entre le 6 500^{ème} et le 95 000^{ème} cycles. 1 pixel = 10 μ m (c) la fissure observée au microscope optique après 95 000 cycles.

4. CONCLUSIONS

Des essais de fatigue thermique ont été réalisés sur un acier inoxydable austénitique en appliquant des pulses d'énergie par laser. L'usage de caméras visible et IR permet de mesurer des champs (globaux) cinématiques et thermiques au cours des chocs thermiques. L'essai est poursuivi jusqu'à ce que se développe un réseau de fissures caractéristique de chargements biaxiaux. L'utilisation de la CIN entre deux images prises à un même instant des cycles laser mais espacés de plusieurs milliers de cycles, permet de détecter l'évolution de l'endommagement au cours des cycles. La taille finale observée par microscopie optique est de 3 mm.

5. REFERENCES

- A. Charbal, L. Vincent, F. Hild, M. Poncelet, S. Roux, and D. Farcage. "Characterization of Temperature and Strain Fields during Cyclic Laser Shocks." In . 12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, QIRT, Bordeaux, France, 2014.
- A. Fissolo, S. Amiable, O. Ancelet, F. Mermaz, J.M. Stelmaszyk, A. Constantinescu, C. Robertson, L. Vincent, V. Maillot, and F. Bouchet. 2009. "Crack Initiation under Thermal Fatigue: An Overview of CEA Experience. Part I: Thermal Fatigue Appears to Be More Damaging than Uniaxial Isothermal Fatigue." *International Journal of Fatigue* 31 (3): 587–600.
- N. Robert, J. Economou, F. Cornuel, O. Volte, and J.-M. Stephan. "Investigations of Mixing Zones Subject to Thermal Fatigue." In . International symposium on the Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs, Fontevraud, France, 2006.
- Z. Tomicevic, F. Hild, and S. Roux. 2013. "Mechanics-Aided Digital Image Correlation." *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 48 (5): 330–43.
- L. Vincent, M. Poncelet, S. Roux, F. Hild, and D. Farcage. 2013. "Experimental Facility for High Cycle Thermal Fatigue Tests Using Laser Shocks." *Fatigue Design 2013, International Conference Proceedings* 66 (0): 669–75.