



HAL
open science

Essai de fatigue thermique par chocs laser

A. Charbal, L. Vincent, F. Hild, M. Poncelet, D. Farcage, Stéphane Roux

► **To cite this version:**

A. Charbal, L. Vincent, F. Hild, M. Poncelet, D. Farcage, et al.. Essai de fatigue thermique par chocs laser. 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. cea-02500836

HAL Id: cea-02500836

<https://cea.hal.science/cea-02500836>

Submitted on 6 Mar 2020

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.

Essai de fatigue thermique par chocs laser

A. Charbal^{a,b}, L. Vincent^a, F. Hild^b, M. Poncelet^b, S. Roux^b and D. Farcage^c

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

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

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

Résumé :

Un nouveau dispositif expérimental est utilisé pour étudier les phénomènes de fatigue thermique dans les matériaux de structures de centrales nucléaires au travers de chocs thermiques cycliques par un laser de puissance. Un essai de fatigue, sur un acier AISI 316 L(N), est mené jusqu'à apparition de fissure (800µm) avec une température initiale de l'échantillon de 380°C et une variation cyclique de température de 200°C à une fréquence de 1.5 Hz. Les champs de température et de déformation dans la zone d'impact sont mesurés expérimentalement sans contact. Grâce à la synchronisation des caméras et à la méthode de corrélation d'image numérique, les premiers stades d'amorçage et de propagation peuvent être estimés.

Abstract :

A new experimental setting is used to study thermal fatigue phenomenon occurring in structures of nuclear power plants. The cyclic thermal shocks are performed by a laser. A thermal fatigue test is presented on an A316L(N) stainless steel. The initial temperature is 380°C and the thermal loading is of 200°C imposed at a frequency of 1.5 Hz. The thermal fatigue test is performed till a crack is formed (of 800µm). The thermal and kinematic fields are measured owing to an infrared and a visible camera. Thanks to the synchronization of both cameras and to the digital image correlation method used, the initiation and propagation of the crack can be approximated.

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 [1]. 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 [2]. 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 [3]. 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 simulation aux 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 en termes de champs cinématiques et thermiques d'une part et d'endommagement d'autre part.

2 Dispositif expérimental et matériau étudié

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 1.5 Hz, la durée d'impulsion est de 50 ms et la puissance crête 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 réfléchiée 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 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 dimensions $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$. 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 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figure 1b).

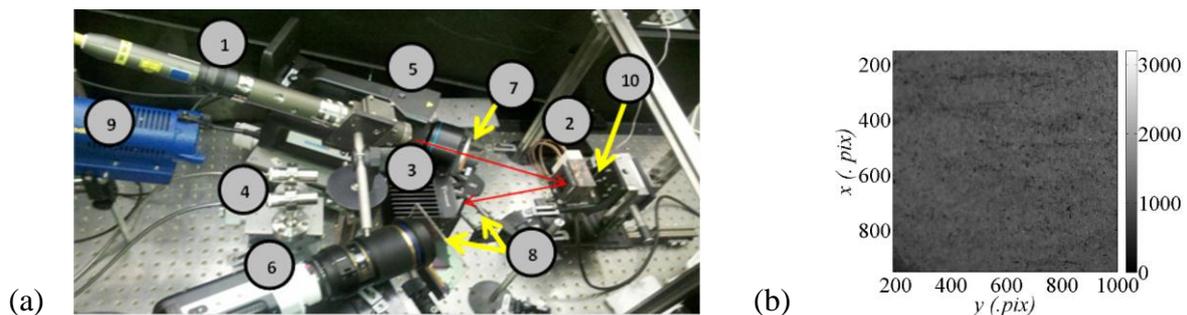


Figure 1 : (a) Configuration expérimentale (voir le texte principal pour les descriptions de chaque élément numéroté) (b) Surface d'échantillon avec une surface pré-oxydée et les niveaux de gris correspondants (la taille physique d'un pixel est de $10 \mu\text{m}$)

3 Résultats expérimentaux

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 trois cycles successifs. Après reconstruction, le nombre d'images enregistrées lors de la montée en température est de 27 et le nombre total d'images (pour la montée et la descente) est alors de 359 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 caméra 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 [3], [4]. 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 (pour une température moyenne de 400°C). Une émissivité de 0.31 à une longueur d'onde de 4 μm (caméra IR) et de 0.26 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 (Figure 2) pour les simulations numériques. Ces derniers aspects ne seront pas traités ici, mais le lecteur peut se référer à [4].

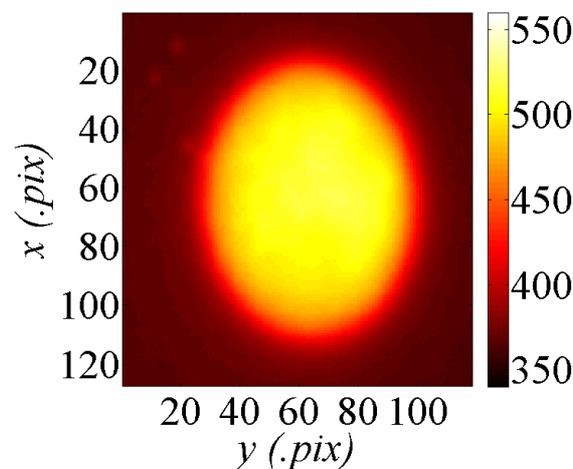


Figure 2 : Chargement thermique au maximum de la sollicitation

La Figure 3(a-b) montre qu'après un régime transitoire durant lequel la température moyenne en surface augmente, on atteint un régime stabilisé où l'amplitude et la valeur moyenne du chargement thermique restent très stables.

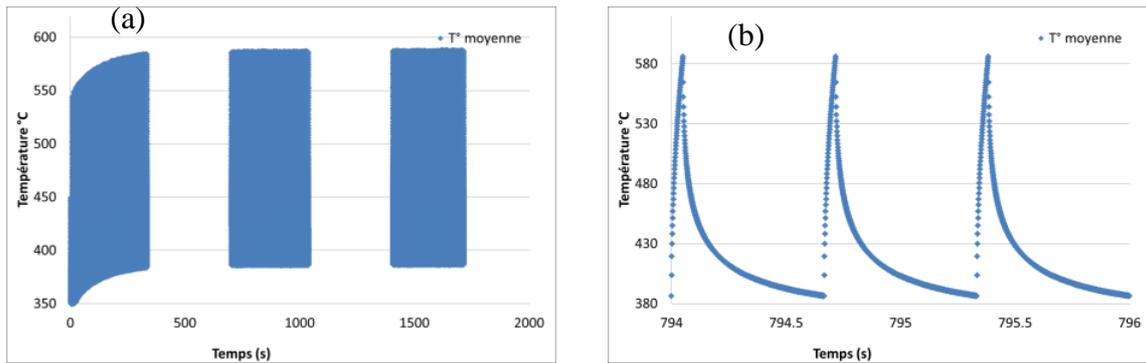


Figure 3 : Evolution du chargement thermique enregistré par les pyromètres au cours des cycles de fatigue thermique pendant une séquence de (a) 3400 cycles et (b) un zoom sur trois cycles

Néanmoins il est nécessaire lorsqu'on sollicite l'échantillon sur plus de 5000-10000 cycles de vérifier son état de surface. En effet les mesures par calorimétrie montrent que l'absorptivité de la surface évolue sur le long terme. Cette évolution et celle de la puissance laser imposée (qui décroît en fonction de l'état de surface) pour maintenir un chargement thermique constant sont représentées ci-dessous.

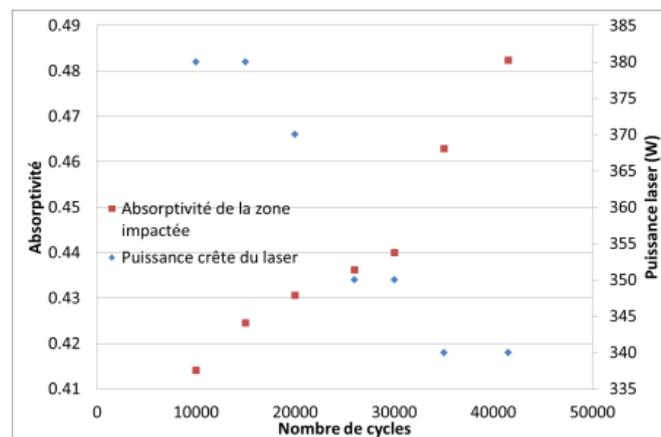


Figure 4: Evolution de l'absorptivité de la zone impactée et de la puissance crête imposée au cours des cycles de fatigue thermique

De même les émissivités mesurées par pyrométrie évoluent de 0.26 à 0.31 entre le début et la fin de l'essai. Ceci est en adéquation avec l'évolution de l'absorptivité.

3.2 Mesures de champs cinématiques

La technique de CIN utilisée est celle proposée par [5], 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 d'imposer une longueur de régularisation de 50 pixels. Les champs de déplacement au maximum du chargement d'un cycle sont représentés sur la Figure 5. Les amplitudes sont de l'ordre de 0.25 pixel soit 2.5 μm dans la zone impactée.

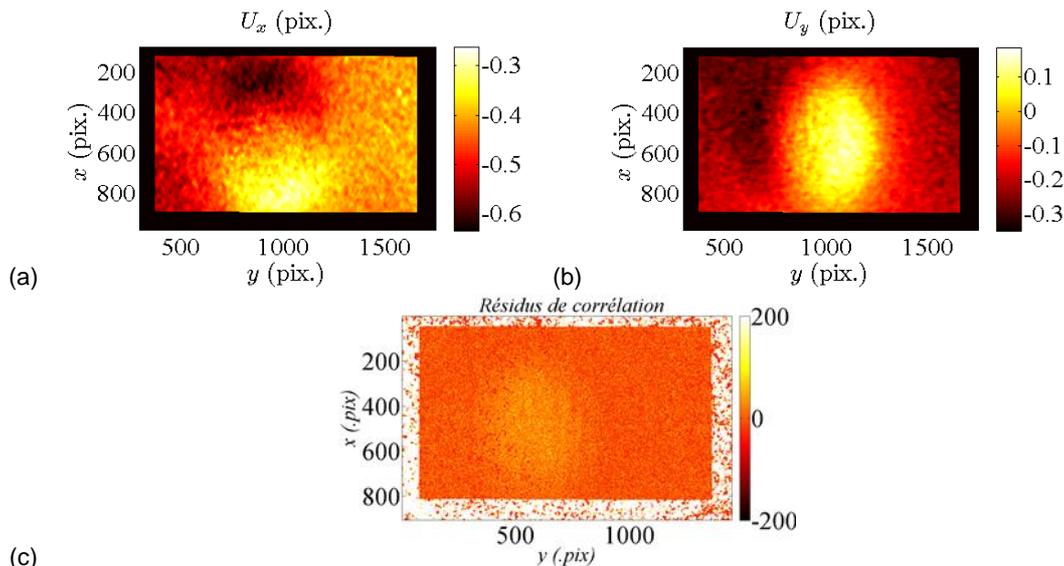


Figure 5 : Champs de déplacement en pixel selon les axes X(a) et Y(b) entre une image juste avant un tir laser et une image à la fin du tir et (c) les résidus de corrélation en niveaux de gris (dynamique de l'image de 4096 niveaux de gris)

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

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. Il est alors possible d'observer l'apparition de fissures au cours des cycles. En effet si on compare une image où l'état de surface n'est pas endommagé à une image avec une fissure, on doit trouver des champs de déplacement décrivant les modes d'ouverture de cette fissure. Si rien ne se passe, comme lorsqu'on compare les tout premiers cycles entre eux, alors les champs de déplacement devraient être à un mouvement de corps rigide près nuls.

L'évolution de l'endommagement à l'aide de la déformation ε_{xx} est illustrée sur la Figure 6.

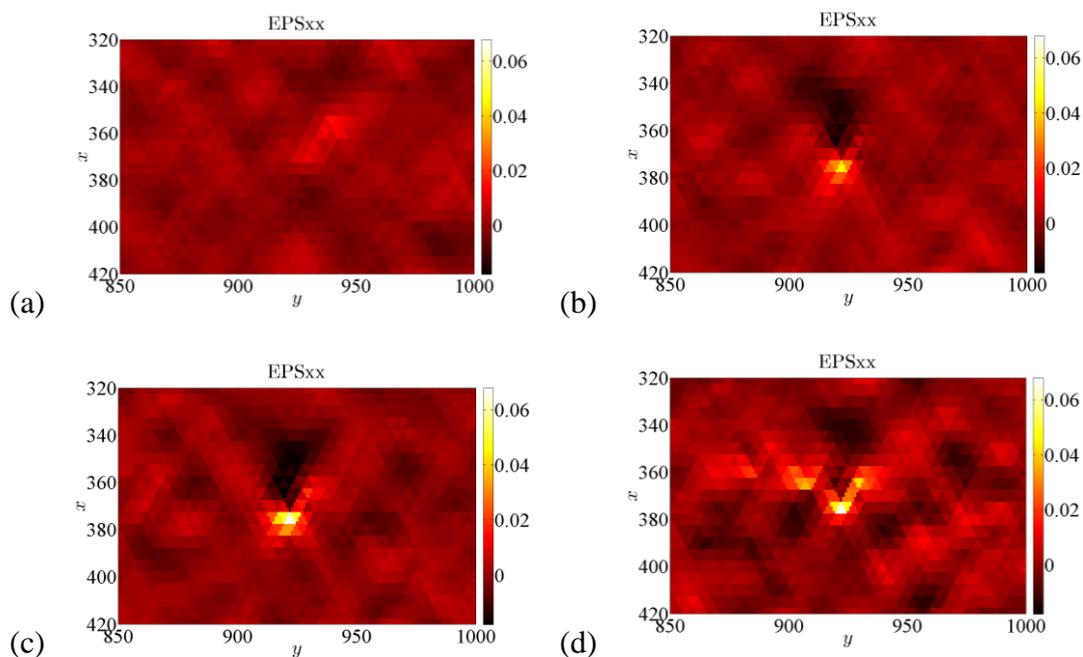


Figure 6 : Evolution du champ de déformation selon x permettant de révéler une fissure (a) 50000°-53000° (pas de fissure), (b) 53000°-61000°, (c) 53000°-63000° et (d) 53000°-75000° cycles

On sait que les plus fortes déformations auront lieu dans la direction perpendiculaire à la direction de l'orientation de la fissure. On voit qu'au départ on observe un champ quasi homogène, ce qui laisse croire qu'entre le 50000° et le 53000° cycle, rien ne se passe. Ensuite entre le 53000° et le 61000° cycle une zone de localisation se distingue avec une taille de 10-15 pixels (selon l'axe horizontal y) soit 100-150 μm . Puis en comparant l'image du 53000° cycle à celle prise au 63000° la zone de localisation évolue vers 20-30 pixels soit 200-300 μm et enfin si on compare l'image du 53000° au 75000° cycle on trouve 70-90 pixels soit 700-900 μm environ. Ces résultats peuvent ensuite être comparés à l'image prise au microscope optique à la fin de l'essai soit au 75000^{ème} cycle (Figure 7).

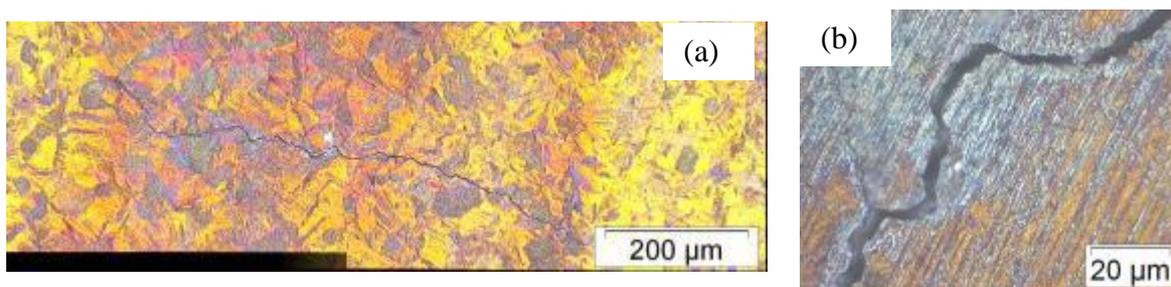


Figure 7 : Observation au microscope optique après 75000 cycles de (a) la fissure principale et (b) son ouverture (de 2-3 μm)

On peut observer que l'ouverture de la fissure est de 2-3 μm (Figure 7-(b)). Ceci explique d'une part les difficultés rencontrées lors de la détection de fissure par CIN. En effet la taille physique des pixels étant de 10 μm et la taille des éléments T3 choisis pour cette étape étant de l'ordre 100 μm une description fine des phénomènes d'amorçage et propagation est rendue difficile. Néanmoins la fissure qui entraîne une perte de raideur de la zone impactée engendre des champs de déplacement qui lui sont propres. Une autre difficulté est que la zone d'impact, subissant des variations de températures entre 380°C et 580°C, connaît une évolution du mouchetis naturel. Ce dernier effet peut provoquer l'apparition de phénomènes de localisation « fantômes » générés seulement par l'évolution de l'oxyde.

D'autres stratégies sont en cours d'analyse pour améliorer la détection de l'amorçage et le suivi de la propagation de fissures.

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'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 800 μ m.

Références

- [1] N. Robert, J. Economou, F. Cornuel, O. Volte, and J.-M. Stephan, "Investigations of mixing zones subject to thermal fatigue," presented at the International symposium on the Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs, Fontevraud,.
- [2] A. Fissolo, S. Amiable, O. Ancelet, F. Mermaz, J. M. Stelmaszyk, A. Constantinescu, C. Robertson, L. Vincent, V. Maillot, and F. Bouchet, "Crack initiation under thermal fatigue: An overview of CEA experience. Part I: Thermal fatigue appears to be more damaging than uniaxial isothermal fatigue," *Int. J. Fatigue*, vol. 31, no. 3, pp. 587–600, Mar. 2009.
- [3] L. Vincent, M. Poncelet, S. Roux, F. Hild, and D. Farcage, "Experimental Facility for High Cycle Thermal Fatigue Tests Using Laser Shocks," *Fatigue Des. 2013 Int. Conf. Proc.*, vol. 66, no. 0, pp. 669–675, 2013.
- [4] A. Charbal, L. Vincent, F. Hild, M. Poncelet, S. Roux, and D. Farcage, "Characterization of temperature and strain fields during cyclic laser shocks," presented at the 12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, QIRT, Bordeaux, France, 2014.
- [5] Z. Tomicevic, F. Hild, and S. Roux, "Mechanics-aided digital image correlation," *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 48, no. 5, pp. 330–343, 2013.