HAL
open science

Développement d'une technique de couplage de Corrélation d'Images et de Méthode des Éléments Finis appliquée à la fissuration en fatigue

Jérôme Hosdez, Médéric Langlois, Jean-Francois Witz, Nathalie Limodin, Denis Najjar, Eric Charkaluk

To cite this version:

Jérôme Hosdez, Médéric Langlois, Jean-Francois Witz, Nathalie Limodin, Denis Najjar, et al.. Développement d'une technique de couplage de Corrélation d'Images et de Méthode des Éléments Finis appliquée à la fissuration en fatigue. 13e colloque national en calcul des structures, Université Paris-Saclay, May 2017, Giens, Var, France. hal-01926335

HAL Id: hal-01926335

https://hal.science/hal-01926335v1

Submitted on 19 Nov 2018

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.

CSMA 2017
13ème Colloque National en Calcul des Structures
15-19 Mai 2017, Presqu'île de Giens (Var)

Développement d'une technique de couplage de Corrélation d'Images et de Méthode des Éléments Finis appliquée à la fissuration en fatigue

J. Hosdez[1], M. Langlois[1], J-F. Witz[1],
N. Limodin[1], D. Najjar[1], E. Charkaluk[2]

[1] *LML, Centrale Lille, {jerome.hosdez, mederic.langlois, jean-francois.witz, nathalie.limodin, denis.najjar}@ec-lille.fr*
[2] *LMS, École Polytechnique, charkaluk@lms.polytechnique.fr*

Résumé — Dans cette étude, des couplages de techniques de corrélation d'images avec des calculs par éléments finis ont permis d'étudier la plasticité se produisant en pointe de fissure durant un essai de propagation de fissure de fatigue. La méthodologie consiste en l'application, sous forme de conditions aux limites de type Dirichlet, des champs de déplacement expérimentaux obtenus par corrélation d'images à un modèle éléments finis élasto-plastique. L'évolution de la plasticité, se produisant en pointe de fissure, passant d'un état confiné à généralisé, a pu être observée et quantifiée.
Mots clés — Fatigue, Plasticité, Méthode des Éléments Finis, Corrélation d'Images Numériques

1 Introduction

En phase de propagation des fissures de fatigue, la plupart des prédictions de durée de vie sont basées sur des concepts théoriques où le milieu est supposé élastique [1] et les déplacements/contraintes peuvent alors être exprimés à proximité de la pointe de fissure [2] [3]. Il s'agit du cadre général de la Mécanique Linéaire de la Rupture (MLR) qui peut être étendue à la fatigue à grand nombres de cycles pour les métaux, car la plasticité est suffisamment confinée. Néanmoins, cette hypothèse peut rapidement s'avérer insuffisante en particulier lors des essais de fissuration à charge maximale constante (augmentation du facteur d'intensité des contraintes) avec une plasticité devenant rapidement généralisée. La plasticité va induire une compétition entre les mécanismes d'endommagement se produisant au front de la fissure et les phénomènes de fermeture de fissure. Ces derniers effets sont donc directement liés au comportement élasto-plastique cyclique du matériau pour les matériaux métalliques [4]. En effet, la déformation plastique conduit notamment à des contraintes résiduelles modifiant de façon significative le comportement de la fissure et produisant des effets d'histoire dans la croissance de la fissure [5]. Ce phénomène va augmenter lorsque la structure est soumise à des surcharges ponctuelles induisant des contraintes résiduelles plus importantes dans la zone plastique. Pour prédire la durée de vie de fatigue dans ce cadre précis, la prise en compte de la plasticité se produisant en pointe de fissure constitue donc un enjeu majeur en particulier dans les cas de chargements complexe ou aléatoire. Le travail présenté est l'élaboration d'une méthode d'identification de la plasticité en pointe de fissure par les méthodes de Corrélation d'Images et des Éléments Finis. La technique utilisée consiste à appliquer, sous forme de conditions aux limites de type Dirichlet, des champs de déplacement expérimentaux obtenus par corrélation d'images à un modèle éléments finis élasto-plastique. La première partie expose le formalisme de la technique employée permettant une identification précise et rapide de la plasticité se produisant en fond de fissure. Dans la seconde partie, cette méthodologie sera appliquée au cas d'une propagation de fissure par fatigue pour un effort maximal constant.

2 Méthodologie d'identification

La première étape consiste en l'estimation du facteur d'intensité des contraintes à partir des champs de déplacement mesurés par corrélation d'images. Une approche projective a été retenue, consistant en la projection des champs expérimentaux sur une base spécifique à savoir le modèle de Williams [3] qui décrit la cinématique en pointe de fissure à travers des séries numériques [6] [7]. La procédure a été

totalement automatisée pour fournir la position de la pointe de fissure et l'ensemble des coefficients de la série de Williams pour chaque cycle analysé. A partir des coefficient identifiés, les champs numériques peuvent être déterminés et comparés avec les champs expérimentaux à travers le résidu d'identification, correspondant à la différence entre champs expérimentaux et numériques. Comme les séries de Williams supposent un milieu infini, élastique, homogène et isotrope, cela permet de souligner les écarts par rapport à ces hypothèses. Ainsi, la figure 1 montre l'évolution des résidus, dans les deux directions principales, en trois instants différents de fissuration et met en évidence des écarts significatifs et croissants au niveau du front de fissure.

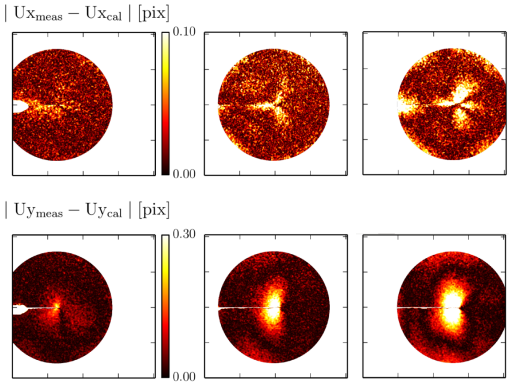

FIGURE 1 – En partie supérieure, l'évolution des résidus dans la direction horizontale et en partie inférieure, les résidus dans la direction de chargement en différents instants de la propagation de la fissure de fatigue (1 pixel = 5,25 μm).

La localisation de ces écarts en amont de la fissure et leur forme permettent de conclure que l'on a une image de la plasticité cyclique. Néanmoins, cette approche ne permet pas d'avoir des données quantitatives de cette déformation plastique. Ainsi l'idée est de combiner la précision et la quantité d'information permise par la corrélation d'images avec l'étendue des possibilités permises par des calculs éléments finis. Les champs numériques sont retenus, car ils permettent de s'affranchir du bruit susceptible d'être présent sur les champs expérimentaux, ils sont donc utilisés comme conditions aux limites de type Dirichlet pour des calculs éléments finis (Fig. 2). Cette approche est permise, car ces champs ont été identifiés dans la zone de K-dominance.

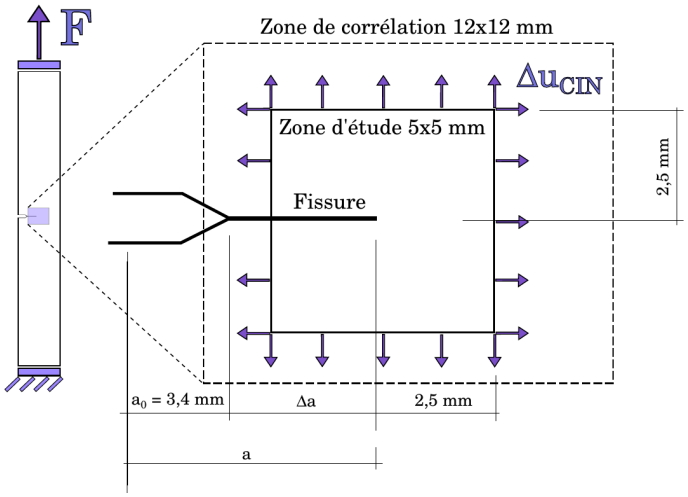

FIGURE 2 – Géométrie de l'éprouvette avec les domaines de corrélation d'images et du modèle éléments finis retenus.

Le calcul éléments finis peut alors être lancé sur un nombre de cycles correspondant à la fréquence d'acquisition des images, et à la fin de celui-ci, les contraintes résiduelles et les déformations plastiques sont enregistrées. Le domaine considéré est alors déplacé à la nouvelle position de pointe de fissure. L'approche considérée suppose donc une géométrie de maillage constante dans le temps. Le maillage

est juste «translaté» pour l'application des nouvelles conditions limites liées à la nouvelle position de la pointe de fissure. Ainsi, le modèle est mis à jour avec les nouvelles conditions limites en déplacement. Les contraintes résiduelles et déformations plastiques du calcul précédent sont interpolées sur le maillage décalé pour les ajouter au nouveau modèle (Fig. 4).

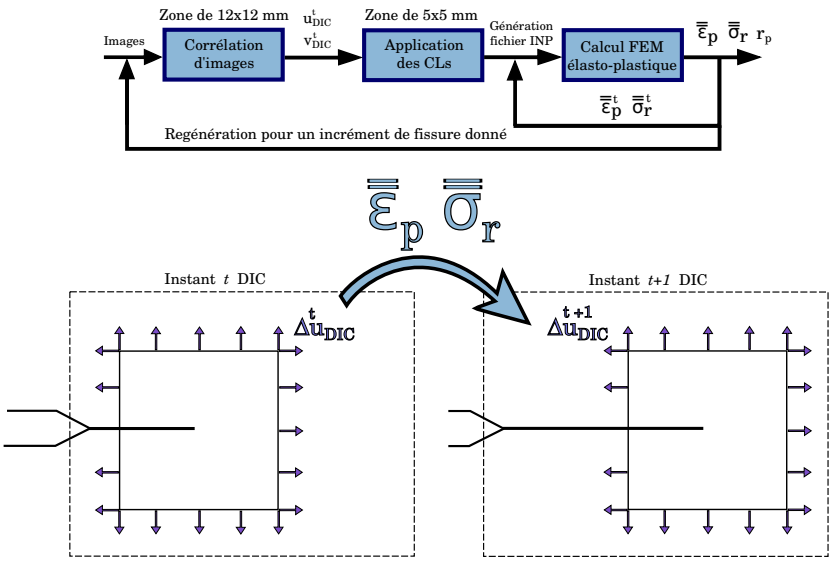

FIGURE 3 – Les différentes grandes étapes de la stratégie proposée. La procédure transporte les quantités d'intérêts à savoir les déformations plastiques et les contraintes résiduelles du précédent calcul vers le nouveau.

Le modèle éléments finis a été réalisé avec le code EF ABAQUS et l'hypothèse de contraintes planes a été retenue. Ainsi, il s'agit d'un modèle 2D, correspondant à une plaque carrée de dimensions 5x5mm, avec une fissure centrée sur le modèle où le maillage est fortement raffiné avec une taille d'éléments de quelques microns. Des éléments de type triangles à trois noeuds sont retenus pour des considérations de temps de calculs. Cette procédure a été entièrement automatisée en utilisant un script Python dans Abaqus, le traitement du cas d'une condition limite dure quelques minutes.

Pour valider l'approche, l'une des possibilités s'avère d'observer la distribution des résidus d'identification de la même manière que sur la figure 1 où la plasticité avait été mise en évidence. Ici, on peut constater comme sur la figure 4 une diminution significative de ces résidus en pointe de fissure.

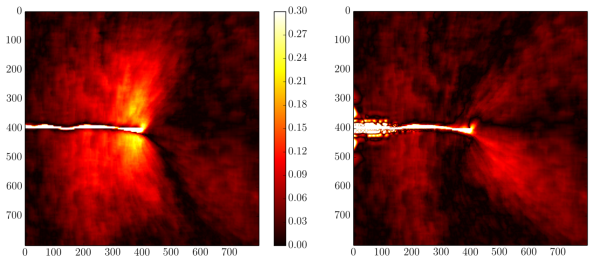

FIGURE 4 – Résidus d'identification des déplacements verticaux pour la méthode projective avec les séries de Williams (à gauche) et avec les couplages CIN-FEM (à droite) pour une longueur de fissure de 9 mm.

3 Application à un essai de fissuration par fatigue

3.1 Matériau

Le matériau étudié est une fonte à Graphite Sphéroïdal (GS), enrichie en Molybdène et Silicium, couramment utilisée pour des pièces de moteur comme le collecteur d'échappement. Les éprouvettes sont extraites de barreaux de fonderie coulés par gravité d'une longueur de 200 mm et d'un diamètre de 20 mm. Ce matériau présente une microstructure hétérogène avec une matrice ferritique et des inclusions de graphite ayant la forme de nodules sphériques. Ces nodules sont distribués de façon homogène dans le volume et ont un diamètre proche de 25 microns. La composition chimique est présentée dans le tableau 1.

	C	**Si**	**Mo**	**Mn**	**P**
GS	3,4	3,89	0,57	0,15	0,025

TABLE 1 – Composition chimique de la fonte à graphite étudiée (% masse).

Le comportement constitutif élasto-plastique du matériau a été caractérisé en amont par des essais de fatigue. Un modèle élasto-plastique avec un simple écrouissage cinématique linéaire a été retenu et les paramètres pour la simulation sont reportés dans le tableau 2.

Module d'Young E (GPa)	180
Coefficient de Poisson ν	0,28
Limite élastique σ_y (MPa)	300
Paramètre d'écrouissage cinématique C (GPa)	33

TABLE 2 – Les paramètres élasto-plastique retenus pour l'étude.

3.2 Conditions d'essai

Des éprouvettes de type Single Edge Notch Tension (SENT) ont été extraites du matériau précédent, avec une épaisseur de 3,8 mm, une longueur de 140 mm et une largeur de 18 mm. Une entaille traversante d'une longueur de 3,4 mm environ a été réalisée. L'éprouvette a été préfissurée à travers une procédure dite de « load shedding », consistant à maintenir le facteur d'intensité des contraintes constant lors de la croissance de fissure [8], *via* une méthode de suivi électrique de type Direct Current Potential Drop (DCPD).

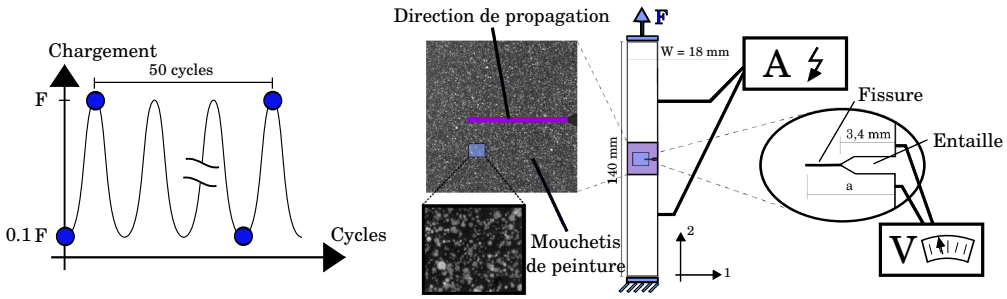

FIGURE 5 – A gauche, le profil de chargement appliqué avec mise en évidence des instants de prise de photographies pour la corrélation d'images et à droite, le mouchetis de peinture pour la zone étudiée accompagné d'un schéma de l'éprouvette instrumentée.

L'éprouvette a été montée sur une machine hydraulique équipée d'un capteur d'effort de 25 kN. L'avancée de la fissure a été suivie à la fois par corrélation d'images et par mesures électriques. Des images de la surface étudiée ont été prises périodiquement tous les 50 cycles aux instants où l'effort

atteint son minimum et son maximum pour le cycle considéré (Fig. 5). Comme il l'a été précisé, un suivi électrique par méthode DCPD a été mené en phase de pleine ouverture de la fissure à chaque cycle.

3.3 Essai de propagation de fissure par fatigue à F_{max} constant

Un essai de propagation à effort maximal constant a été réalisé. La rupture de l'éprouvette a été constatée vers 80 000 cycles. La procédure a pu être appliquée à cet essai, les champs de contraintes et les déformations plastiques peuvent être calculés au cours de la propagation de la fissure de fatigue. Ainsi, sur la figure 6, les contraintes, selon le critère de von Mises, sont représentées en phase d'ouverture et de fermeture, en trois instants différents correspondant à des ΔK de 13, 19 et 30 $MPa\sqrt{m}$. On constate une croissance importante de la contrainte résiduelle équivalente, qui doit jouer un rôle important sur la propagation de la fissure.

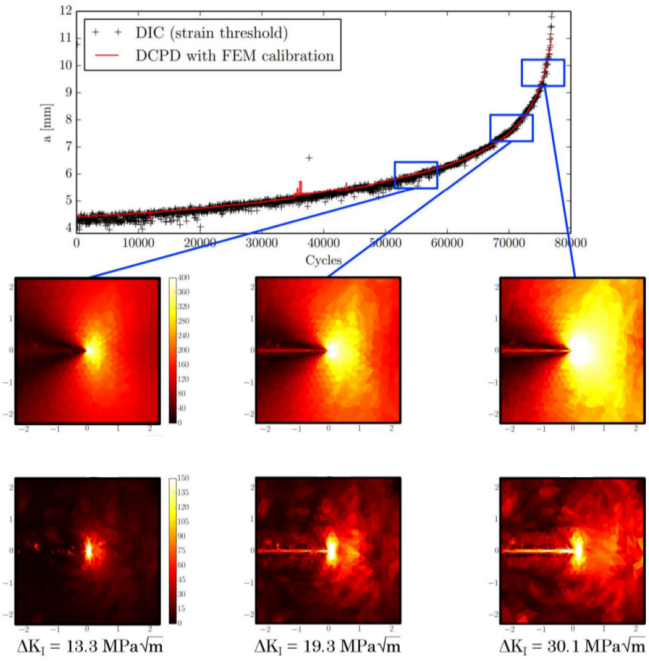

FIGURE 6 – Les contraintes équivalentes de von Mises en charge (partie supérieure) et à décharge (partie inférieure) en différents instants de la propagation de la fissure de fatigue.

La déformation plastique peut également être représentée à différentes positions de la pointe de fissure (Fig. 7). On constate une déformation plastique qui croît continuellement avec un sillage plastique atteignant rapidement une dimension proche du millimètre. En fin d'essai, la taille de la zone plastique est proche de 2 mm.

Ainsi, l'ensemble de l'approche permet de mesurer des conditions limites expérimentales, durant la quasi-totalité de l'essai de fissuration, pour les appliquer au modèle éléments finis pour être au plus près de la réalité et observer la croissance de la plasticité d'un état confiné à généralisé.

4 Conclusions et perspectives

Pour le dimensionnement en fatigue, la zone plastique est bien souvent négligée malgré le fait qu'elle puisse jouer un rôle important sur la vitesse de fissuration. Ainsi, l'approche développée permet d'observer et quantifier l'importance de cette zone en se basant sur deux méthodes complémentaires, à savoir la corrélation d'images et la méthode des éléments finis. Il pourrait s'avérer tout à fait pertinent par la suite d'inclure dans la démarche, une procédure d'identification inverse de type FEMU-U [9] afin d'affiner davantage l'obtention des paramètres matériau. En effet, le cadre général de l'approche développée dans cette étude et celui de la FEMU-U sont identiques, consistant à appliquer des conditions limites en déplacements sur la surface étudiée.

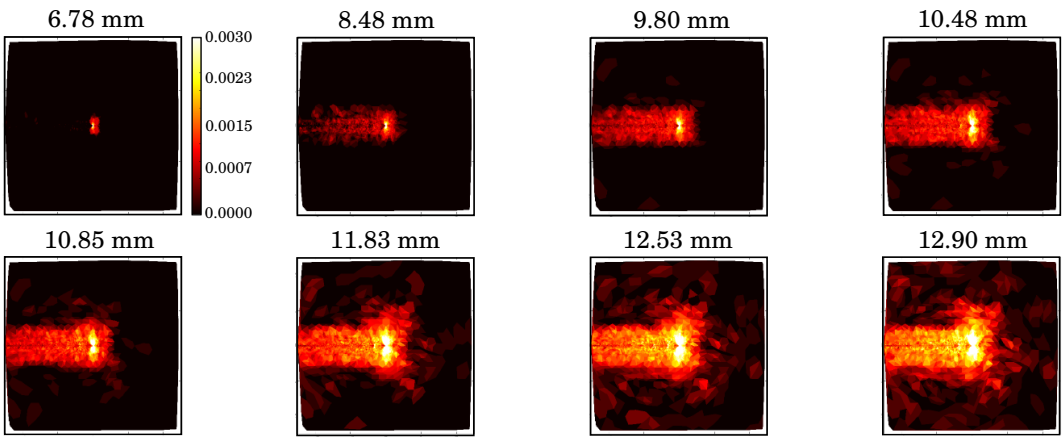

FIGURE 7 – Évolution de la déformation plastique équivalente.

Références

[1] A.A. Griffith. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1921.

[2] H. Westergaard. Bearing pressures and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, 6, 1939.

[3] M. Williams. On the stress distribution at the base of a stationary crack. *ASME J. Appl. Mech.*, 24, 1957.

[4] S. Pommier. Arching effect in elastic polycrystals : implications for the variability of fatigue lives. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 25(4) :331–348, 2002.

[5] S. Suresh. Fatigue of materials, cambridge solid state science series. *Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge*, 1991.

[6] R. Hamam, F. Hild, and S. Roux. Stress intensity factor gauging by digital image correlation : Application in cyclic fatigue. *Strain*, 43(3) :181–192, 2007.

[7] F. Mathieu, F. Hild, and S. Roux. Identification of a crack propagation law by digital image correlation. *International Journal of Fatigue*, 36(1) :146–154, 2012.

[8] ASTM International, editor. *ASTM Standard. E647-11 : standard test method for measurement of fatigue crack growth rates*. West Conshohocken (PA, USA), 2003.

[9] S. Avril, M. Bonnet, A-S. Bretelle, M. Grediac, F. Hild, P. Ienny, F. Latourte, D. Lemosse, S. Pagano, E. Pagnacco, et al. Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements. *Experimental Mechanics*, 48(4) :381–402, 2008.