

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

J. Hosdez^a, M. Langlois^a, J-F. Witz^a,
N.Limodin^a, D. Najjar^a et E. Charkaluk^b

a. LML, Centrale Lille, {jerome.hosdez, mederic.langlois, jean-francois.witz, nathalie.limodin, denis.najjar}@centralelille.fr

b. LMS, École Polytechnique, charkaluk@lms.polytechnique.fr

Résumé :

Dans cette étude, des couplages de techniques de calculs par éléments finis avec la corrélation d'images ont permis d'étudier la plasticité se produisant en pointe de fissure durant un essai de propagation de fissure de fatigue. Les champs de déplacements expérimentaux obtenus par corrélation d'images sont appliqués, sous forme de conditions aux limites à un modèle éléments finis élasto-plastique. La plasticité, passant d'un état confiné à généralisé, est observée et quantifiée.

Abstract :

In this study, digital image correlation and finite elements calculations are coupled in order to study the cyclic-plasticity close to the crack tip. Experimental displacement fields obtained with digital image correlation are applied in the form as boundary conditions into an elastic-plastic finite elements model. The plasticity evolution has been observed and quantified from confined to generalized case.

Mots clefs : Plasticité, Fatigue, Corrélation d'Images Numériques, Méthode des Éléments Finis

1 Introduction

Pour la propagation de fissures de fatigue, la plupart des prédictions de durée de vie sont basées sur des concepts théoriques où le milieu est supposé élastique [1]. 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 qui peut être étendue à la fatigue à grand nombres de cycles pour les métaux, en raison d'une plasticité suffisamment confinée. Cependant, cette hypothèse peut rapidement s'avérer fautive en particulier lors d'essais de fissuration à charge maximale constante avec une plasticité devenant rapidement généralisée.

L'étude présentée 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 utilisée dans le cas d'une propagation de fissure par fatigue pour un effort maximal constant.

2 Méthodologie d'identification

Dans un premier temps, les facteurs d'intensité des contraintes sont déterminés à partir des champs de déplacement mesurés par corrélation d'images. Une approche projective, consistant en la projection des champs expérimentaux sur une base spécifique à savoir le modèle de Williams [3] a été retenue. Ce dernier décrit la cinématique en pointe de fissure à travers des séries numériques [4] [5]. La procédure a été 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 coefficients 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. 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.

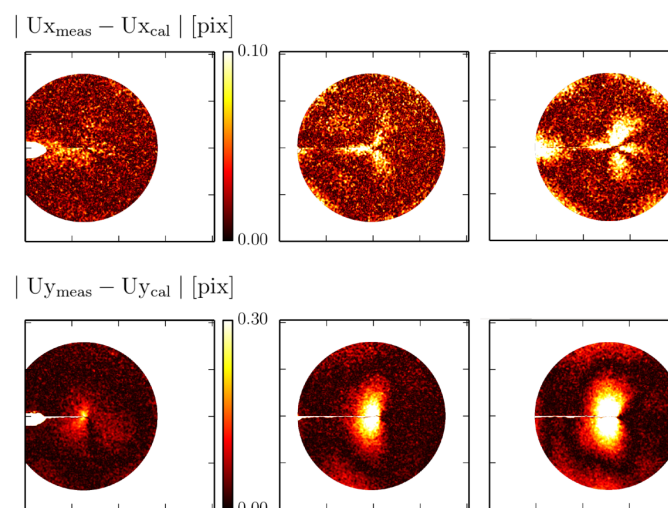


FIGURE 1 – En partie supérieure, l'évolution des résidus dans la direction horizontale et en partie inférieure, les résidus dans la direction de chargement en différents instants de la propagation de la fissure de fatigue (1 pixel = 5,25 μm).

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. L'idée est alors 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. Cette approche est permise, car ces champs ont été identifiés dans la zone de K-dominance.

Le calcul éléments finis peut alors être lancé sur un nombre de cycles correspondant à la fréquence d'acquisition des images, les contraintes résiduelles et les déformations plastiques sont enregistrées à son terme. 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 domaine est «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.

Le modèle éléments finis a été réalisé avec le code EF Abaqus et l'hypothèse de contraintes planes a été retenue. Il s'agit d'un modèle 2D, correspondant à une plaque carrée de dimensions $5 \times 5 \text{ mm}^2$, avec une fissure centrée sur cette dernière où le maillage est fortement raffiné avec une taille d'éléments de quelques microns. La structure présente 13 000 éléments, il s'agit de triangles à trois nœuds pour des considérations de temps de calculs (Fig. 2).

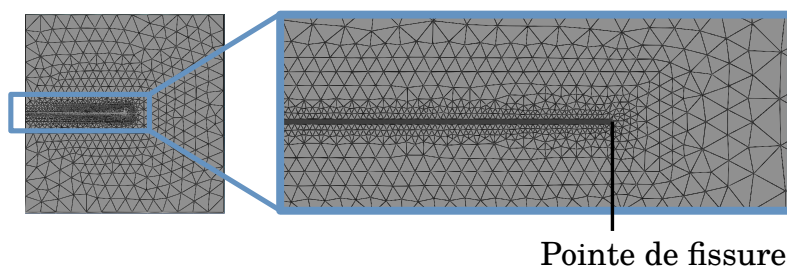


FIGURE 2 – Maillage de l'ensemble du modèle ($5 \times 5 \text{ mm}^2$) et détails du raffinement de maillage en pointe de fissure ($100 \times 40 \text{ } \mu\text{m}^2$ environ).

La procédure est entièrement automatisée en utilisant un script Python dans Abaqus, le traitement du cas d'une condition limite dure quelques minutes.

3 Application à un essai de fissuration par fatigue

3.1 Matériau

Le matériau étudié est une fonte à graphite sphéroïdal, 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. Pour les calculs, un comportement élasto-plastique avec un simple écrouissage cinématique linéaire a été retenu et les paramètres pour la simulation sont reportés dans le tableau 1.

3.2 Conditions d'essai

Des éprouvettes de type Single Edge Notch Tension 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

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

TABLE 1 – Les paramètres élasto-plastique retenus pour l'étude.

longueur de 3,4 mm environ a été réalisée. L'éprouvette a été préfiissurée sur 1 mm à travers une procédure dite de *load shedding*, consistant à maintenir le facteur d'intensité des contraintes constant lors de la croissance de fissure [6], via une méthode de suivi électrique de type *Direct Current Potential Drop* (DCPD).

L'éprouvette a été montée sur une machine hydraulique équipée d'un capteur d'effort de 25 kN. Elle est sollicitée pour un effort maximal de 7 kN pour un rapport de charge de 0,1 et une fréquence de 2 Hz. L'avancée de la fissure est 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. Un suivi électrique par méthode DCPD a été mené en phase de pleine ouverture de la fissure à chaque cycle.

3.3 Résultats

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. Sur la figure 3, les contraintes, selon le critère de von Mises, sont représentées en phase d'ouverture et de fermeture, en quatre instants différents correspondant à des ΔK_I de 21, 24, 30 et 34 $\text{MPa}\sqrt{m}$ environ. On constate une croissance importante de la contrainte résiduelle équivalente, qui doit jouer un rôle important sur la propagation de la fissure.

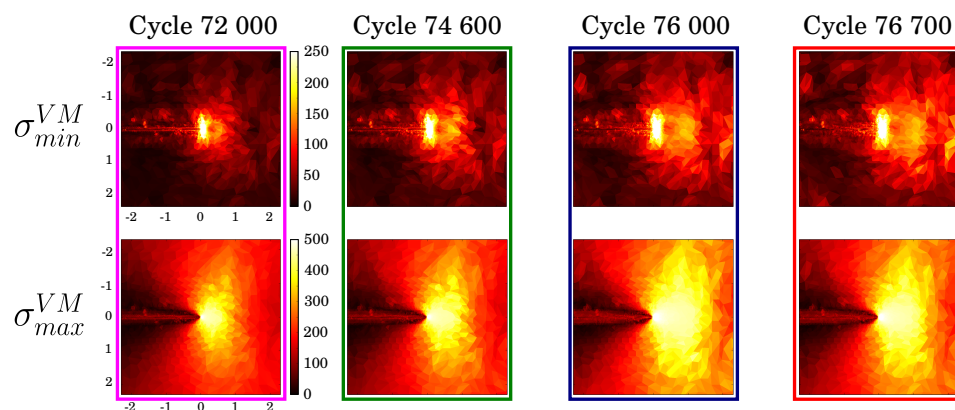


FIGURE 3 – Les contraintes équivalentes de von Mises en décharge (partie supérieure) et à charge (partie inférieure) en différents instants de la propagation de la fissure de fatigue.

Les champs de contraintes, qui sont parfaitement définis, laissent entrevoir la possibilité d'en extraire les contours plastiques. Ainsi sur la figure 4, pour les quatre instants étudiés, sont tracés les contours plastiques centrés sur la pointe de fissure du modèle. On observe comme espéré une croissance de la zone plastique pour la montée progressive du facteur d'intensité des contraintes. Un impact du déraffinement du maillage semble néanmoins constaté.

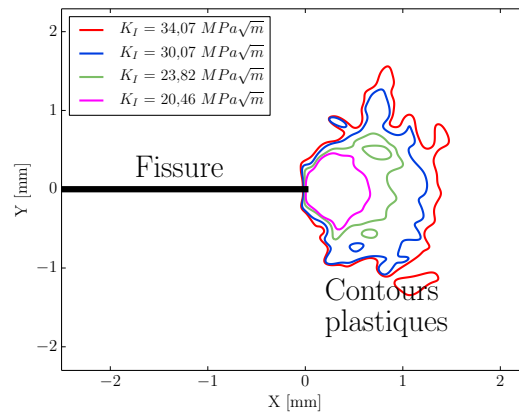


FIGURE 4 – Contours des zones plastiques, où la contrainte de von Mises dépasse la limite élastique, centrés sur la pointe de fissure.

4 Conclusion

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. L'approche développée permet d'observer et de 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 [7] afin de déterminer plus précisément les paramètres mécaniques du matériau.

Références

- [1] Griffith, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 221, 163-198, 192.
- [2] Westergaard, H. M. Bearing pressures and cracks. Journal of Applied Mechanics, 6 :49–53, 1939.
- [3] Williams, M. L. The bending stress distribution at the base of a stationary crack. Journal of Applied Mechanics, 28(1) :78–82, 1961.
- [4] Hamam R., Hild F., and Roux S. Stress intensity factor gauging by digital image correlation : Application in cyclic fatigue. Strain, 43(3) :181–192, 2007.
- [5] Mathieu F., Hild F., and Roux S. Identification of a crack propagation law by digital image correlation. International Journal of Fatigue, 36(1) :146–154, 2012.
- [6] Durif E., Fregonese M., Réthoré J., et Combescure A. Development of a digital image correlation controlled fatigue crack propagation experiment. In EPJ Web of Conferences, volume 6, page 31012. EDP Sciences, 2010.
- [7] Avril S., Bonnet M., Bretelle A. S., Grediac M., Hild F., Jenny P., Latourte F., Lemosse D., Pagano S., Pagnacco E., et al. Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements. Experimental Mechanics, 48(4) :381–402, 2008.