



HAL
open science

Étude de l'amorçage en fatigue d'un acier par corrélation d'images

Pierre Feissel, Thierry Roland, Marion Risbet, Delphine Brancherie,
Jean-Marc Roelandt

► To cite this version:

Pierre Feissel, Thierry Roland, Marion Risbet, Delphine Brancherie, Jean-Marc Roelandt. Étude de l'amorçage en fatigue d'un acier par corrélation d'images. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391354

HAL Id: hal-03391354

<https://hal.science/hal-03391354>

Submitted on 21 Oct 2021

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.

Étude de l'amorçage de fissures en fatigue d'un acier par corrélation d'images

T. ROLAND , P. FEISSEL, M. RISBET, D. BRANCHERIE, J.-M. ROELANDT

Université de Technologie de Compiègne, Centre de Recherches de Royallieu, 60200 COMPIEGNE

Résumé :

Dans un contexte de développement d'un modèle numérique capable de définir la durée de vie en fatigue d'une structure au plus proche de la réalité, la prise en compte de la phase d'amorçage et de propagation des micro-fissures est nécessaire. Ce papier présente donc les moyens expérimentaux à mettre en œuvre pour appuyer un tel développement. L'approche est basée sur un suivi de l'endommagement en fatigue via des mesures de champs de déplacement couplées à des observations de la microstructure. Un outil spécifique de filtrage est aussi présenté pour minimiser les erreurs commises lors de l'opération de dérivation donnant accès aux déformations.

Abstract :

In a context of development of a numerical model, to accurately predict the fatigue lifetime of a structural component, it is fundamental to consider both the initiation stage and the propagation stage of micro-cracks. Thus, this paper presents the experimental means that need to be used for such a development. The approach is based on the analysis of the fatigue damage through displacement field measurements by digital image correlation coupled with microstructural observations. A specific filtering tool is also presented to minimize the committed errors when derivative operation is performed for strain calculation.

Mots clefs : corrélation d'images, approximation diffuse, essais mécaniques, fatigue.

1 Contexte et objectifs

Maîtriser la tenue en service tout en estimant la durée de vie de structures mécaniques dès la phase de conception constitue une préoccupation industrielle majeure. Dans une philosophie de conception basée sur la tolérance au dommage, le comportement des structures en présence de défauts ou de fissures doit pouvoir être analysé à l'aide de modèles numériques robustes et représentatifs des phénomènes physiques mis en œuvre. Dans une première approche, les prédictions de durée de vie s'appuient sur la prise en compte de la phase de propagation de la fissure, en négligeant la phase d'amorçage, ce qui conduit parfois à sous-estimer les durées. Pour affiner les estimations, la maîtrise simultanée de l'amorçage et de la propagation des fissures apparaît une étape importante, qui permet d'évaluer la criticité de ces fissures tout en définissant des procédures de contrôle plus précises et de prévoir la réparation en prenant en compte la sécurité, l'environnement et le coût.

Cependant, les outils de modélisation capables de décrire efficacement et simultanément les phases d'amorçage et de propagation sont très rares. En effet, les modèles associés à chacune de ces phases sont de nature très différente, et ne font pas appel aux mêmes outils. Ainsi, la propagation des fissures ou défauts à l'échelle de la structure est régie par la mécanique de la rupture linéaire ou non-linéaire, qui peut être décrite par des outils numériques (Éléments de frontière, X-FEM, par exemple).

En revanche, ces méthodes demeurent inappropriées pour la description de la phase d'initiation ou plus généralement dans le cas des fissures courtes. La description de la phase d'initiation nécessite une analyse fine à l'échelle de l'élément de volume. Dans ce contexte, les méthodes de modélisation issues de la mécanique de l'endommagement continu sont les mieux adaptées. Une difficulté de l'utilisation de ces modèles dans des simulations de type éléments finis est la dépendance pathologique de la solution à la discrétisation. L'utilisation de modèles à discontinuité forte [1] permet de s'affranchir de ces écueils et

devrait aboutir à la description de l'initiation de la fissuration en modélisant objectivement le comportement de l'élément de volume depuis l'apparition des zones de localisation jusqu'à la création de fissures macroscopiques précurseurs de la ruine de la structure.

Le travail présent s'inscrit donc dans un projet global, dont la finalité est de proposer une stratégie de modélisation numérique de la rupture allant de l'initiation jusqu'à la propagation de la fissure, pour une structure soumise à une sollicitation cyclique. Une telle approche suppose le développement de modèles s'appuyant sur une compréhension fine issue d'observations expérimentales des phénomènes mis en jeu. Ces observations doivent par conséquent remplir des objectifs multiples et complémentaires : permettre une détection précoce et fiable de l'amorçage des fissures tenant compte de l'hétérogénéité du matériau, suivre la progression de ces fissures tout au long de l'essai, et permettre l'acquisition de données quantitatives réutilisables ultérieurement dans un modèle d'amorçage (par exemple, longueur de la fissure, déformations locales). Pour toutes ces raisons, une stratégie expérimentale spécifique doit être mise en place, s'appuyant sur le suivi optique de la surface de l'éprouvette sollicitée cycliquement. Les enjeux et les premiers résultats propres à cette démarche sont d'abord présentés. Les images obtenues expérimentalement sont traitées par des algorithmes de corrélation [2], pour avoir accès dans un premiers temps aux déplacements, puis à leurs gradients. Une approche particulière a été développée pour ce faire, en se basant sur les méthodes d'approximation diffuse dans le but de maîtriser, lors de l'opération de dérivation, le filtrage du bruit de mesure et de quantifier et limiter les erreurs induites par celui-ci. Une particularité supplémentaire du traitement consiste en la prise en compte du facteur temporel propre à la sollicitation cyclique. Tous ces éléments seront développés dans un deuxième temps.

2 Procédure Expérimentale

2.1 Cadre expérimental : matériau modèle

Le matériau étudié est un acier inoxydable austénitique 316L de structure CFC, dont la limite d'élasticité, déterminée expérimentalement, est égale à 280MPa.

D'une manière générale, l'endommagement en fatigue consiste en trois événements principaux qui sont, l'initiation d'une fissure, la propagation des fissures courtes et la propagation constante des fissures longues. Il est admis que 90% de la durée de vie en fatigue d'un matériau est occupée par l'étape d'initiation des fissures et de propagation de ces micro-fissures. Pour la propagation des fissures longues, la microstructure n'a qu'un rôle mineur et la durée de vie en fatigue est usuellement estimée par l'utilisation de la loi de Paris en mécanique de la rupture. Au contraire, l'étape d'initiation et de propagation d'une micro-fissure est fortement conditionnée par la microstructure du matériau [3]. Ces micro-fissures peuvent alors s'initier sur des inclusions, le long de bandes de glissement à l'intérieur des grains ou encore aux joints de grains ou de phases.

L'acier inoxydable austénitique étudié (CFC) caractérisé par une énergie de défauts d'empilement relativement faible ($\sim 25\text{mJ.m}^{-2}$), a tendance à se déformer via des bandes de glissements persistantes (BGP) et un maillage plus ou moins prépondérant en fonction de l'intensité (amplitude et vitesse) de déformation. En fatigue, les mécanismes d'endommagement restent nettement dépendants de l'amplitude de la sollicitation. L'importance des joints de macles pour l'initiation de fissures a particulièrement été étudiée par Henz et Neumann [4] pour la fatigue à grand nombre de cycles. A faible amplitude, des BGP peuvent apparaître le long des joints de macles et leur plus grande activité plastique peut mener à l'initiation précoce d'une fissure. Plusieurs modèles existent parmi lesquels on peut citer celui de Henz et Neumann [4] ou encore celui de Essmann, Gosele et Mughrabi [5].

À plus grande amplitude de déformation, les sites d'initiation de fissures deviennent fortement dépendants de la texture du matériau et de la meso-texture de l'échantillon. Une fois la micro-fissure apparue aux joints de macles, celle-ci se propage de manière trans-cristalline [6].

L'investigation de l'influence des paramètres cristallographiques sur l'initiation d'une fissure est donc primordiale dans le cadre de notre étude. De même, les mécanismes élémentaires de propagation inter-cristalline et trans-cristalline des micro-fissures selon les paramètres cristallographiques mais aussi en fonction des amplitudes de sollicitation sont à considérer. Une description du protocole expérimental envisagé pour décrire ces phénomènes est détaillée dans la section suivante.

2.2 Démarche expérimentale

L'objectif de la démarche proposée est d'assurer un suivi de l'essai suffisamment riche pour obtenir des mesures redondantes permettant à la fois de caractériser les phénomènes et de valider l'approche.

À partir d'une plaque laminée de 300 mm de côté et d'épaisseur 2mm, deux types d'éprouvettes sont fabriqués, l'un dans le sens du laminage (R) et l'autre dans son sens transverse (T). La figure 1 présente la géométrie utilisée, ainsi que le montage expérimental. De façon à permettre un suivi de l'endommagement jusqu'à l'amorçage des fissures en fatigue, une encoche circulaire de 12 mm de diamètre est réalisée. Cette géométrie permet une localisation de l'endommagement sur une zone de l'ordre de $4 \times 3 \text{ mm}^2$, par concentration de contraintes. Les essais de fatigue seront réalisés via une machine hydraulique Instron de capacité 25kN, à température ambiante, en condition de traction-traction à une fréquence de 1Hz et contrôlés en amplitude de déformation plastique. De manière à se placer dans le domaine de la fatigue oligocyclique, une amplitude de déformation plastique de $\epsilon_{pa} = 10^{-3}$ sera imposée. D'autres amplitudes sont envisageables pour analyser leurs influences sur les micro-mécanismes d'endommagement mis en jeu. Cette déformation sera mesurée à l'aide d'un extensomètre de 10 mm de base de mesure.

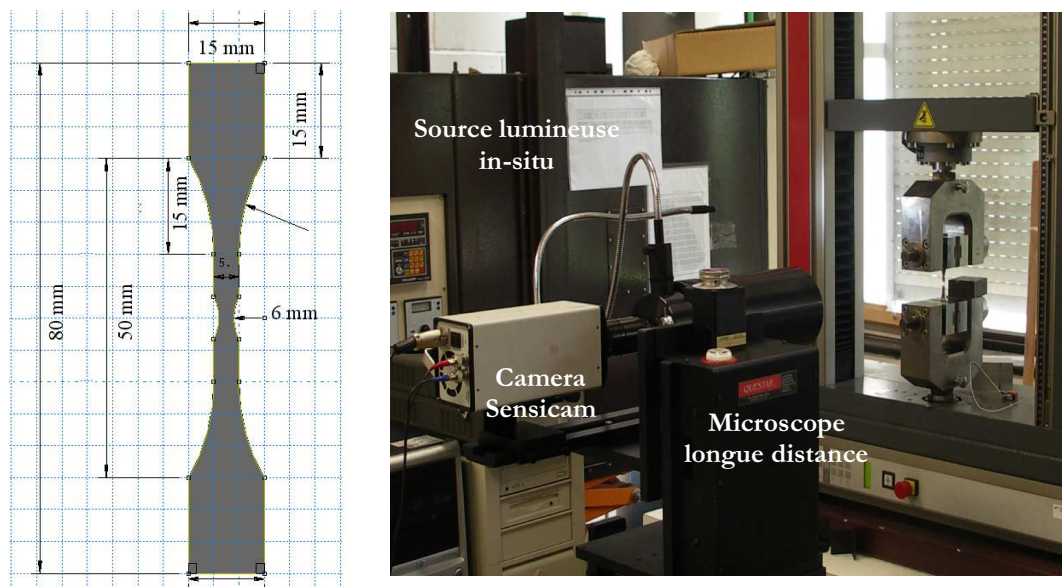


FIG 1. Géométrie et taille des éprouvettes plates étudiées, montage expérimental

Au cours de l'essai, le suivi de l'endommagement se fera *in-situ*, par l'intermédiaire de plusieurs techniques complémentaires. La technique principale est un suivi optique à une échelle suffisamment fine pour révéler l'endommagement en fatigue (échelle des grains) et est décrite au §2.3. Ce suivi permettra la reconstruction des déplacements puis des déformations par corrélation d'image [2] sur une zone de l'ordre de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$. Cette technique sera complétée par un suivi par émission acoustique et électrique, afin de confronter ces différentes approches et de juger de leur pertinence dans le cas étudié. Plusieurs zones seront étudiées sur l'éprouvette.

Afin de caractériser la microstructure de la zone suivie au cours de l'essai, des mesures de l'orientation des grains seront réalisées par EBSD avant l'essai de fatigue. Une zone d'environ 2 mm^2 autour de l'encoche sera scannée pour être suffisamment représentative de la texture en incluant plusieurs centaines de grains. De plus, des analyses en cours d'essai et après l'essai pour compléter les observations optiques, seront réalisées au MEB.

2.3 Suivi optique *in situ*

L'un des points clé de l'étude expérimentale est le suivi optique de l'essai de fatigue à une échelle suffisamment fine pour permettre de caractériser l'amorçage des fissures. L'idée est de s'appuyer sur les

techniques de corrélation d'image (DIC) pour avoir accès aux champs de déplacement sur la zone étudiée. Ces outils fournissent une information beaucoup plus riche que de simples jauges de déformation qui ne fournissent qu'une valeur moyenne sur une zone donnée.

Les outils de corrélation d'images, tels que Correli [2], sont d'autant plus efficaces que l'image sur laquelle ils s'appuient est constituée d'un motif aléatoire. Aux échelles macroscopiques, l'usage de mouchetis de peinture permet d'obtenir de bons résultats. Toutefois, avec des tailles de grains du mouchetis de l'ordre de quelques microns dans les cas les plus fins [7], l'utilisation de mouchetis de peinture ne semble pas envisageable aux échelles de notre étude. De plus, le fait de déposer une couche de peinture, d'épaisseur non négligeable peut avoir un effet sur les phénomènes d'amorçage, qui sont par nature liés à l'état de surface du matériau. La corrélation d'image s'appuiera donc sur la texture naturelle du matériau. Afin d'améliorer la texture en vue de la corrélation d'image, plusieurs techniques peuvent être utilisées dans le but de générer un motif à l'échelle réduite, telles que la déposition de nanoparticules fluorescentes [7] ou encore l'emploi de méthodes de dépôts chimiques (CVD) ou physiques (PVD) [8]. Notre choix se porte sur un électropolissage des échantillons suivant un mélange d'acides spécifiques: les joints de grains, la forme particulière de l'austénite et les macles multidirectionnelles doivent suffire à la création d'un contraste tel un motif.

Par ailleurs, il est nécessaire d'obtenir les images numériques à partir de systèmes permettant un fort grossissement. Dans ce contexte, un microscope à force atomique a été utilisé dans [9] ou encore un microscope électronique à balayage dans [10]. Avec ce dernier, pour une résolution de $0.179\mu\text{m}$, une erreur sur les mesures de déplacements équivalente à seulement 0.026 pixels a été atteinte. Toutefois, ces deux outils restent délicats à mettre en œuvre et ne permettent de travailler que sur un espace réduit, inadapté à notre problématique. En outre, ils rendent impossible le suivi de l'endommagement *in situ* sur une machine d'essai classique. Les résultats obtenus par [11-13] nous laissent envisager l'utilisation d'un microscope optique comme une possibilité pour le suivi de l'endommagement à l'échelle des grains d'un matériau tel que l'acier inoxydable 316L. Pour cela, un microscope longue distance de type Questar QM100 est utilisé permettant une résolution spatiale de l'ordre de $0.29\mu\text{m}$ à une distance de travail de 15 cm, pour une zone d'étude de l'ordre de $300 \times 300\mu\text{m}^2$. Doté d'un système de positionnement suivant les trois principales translations, avec une rotation suivant l'axe vertical et un tilt parallèle à cet axe, il est particulièrement adapté pour le suivi d'un mécanisme de déformation à l'échelle de la microstructure. En particulier, la procédure de corrélation d'images, à une telle échelle, nécessite d'une part que l'image soit finement ajustée et d'autre part qu'au cours des chargements, on puisse relocaliser les observations sur une même zone prise comme référence (de façon à minimiser les erreurs liées à la distorsion spatiale). Elle suppose donc l'utilisation d'un système de positionnement de la caméra parfaitement réglable. Pour l'acquisition des images une caméra CCD 12-bit est utilisée.

Cette démarche expérimentale a été initiée sur un matériau test et sera mise en œuvre sur l'acier de l'étude (316L).

3 Filtrage des mesures en temps par Approximation Diffuse

3.1 Motivation pour un filtrage des mesures

Comme décrit au point 2, les essais de fatigue menés dans cette étude sont suivis par caméra numérique. Les images issues de l'essai sont traitées par corrélation d'image à l'aide de Correli [2], nous disposons donc du champ de déplacements sur une zone entourant la zone d'amorçage de la fissure pour un nombre important d'instantanés de l'essai. Les champs de déplacement sont utiles pour caractériser la fissure, une fois celle-ci apparue, puisqu'elle correspond à un saut des déplacements (idéalement, il faudrait en tenir compte dès la corrélation d'image). Toutefois, pour la phase d'amorçage, l'étude du champ de déformation nous apportera sûrement davantage d'informations et il est donc nécessaire d'effectuer l'opération de dérivation permettant de passer des déplacements aux déformations. Cette opération est alors très sensible aux perturbations sur les mesures et cette difficulté doit être prise en compte.

Dans [14], une méthode de filtrage basée sur l'approximation diffuse [15] a été proposée. Les résultats sur des mesures simulées et réelles ont montré la capacité de cette méthode pour contrôler l'erreur commise lors de l'étape de dérivation des déplacements. La capacité de filtrage est réglée par le rayon d'influence des mesures, dont dépend également l'erreur d'approximation commise sur le champ reconstruit. Un compromis doit donc être trouvé pour régler ce paramètre de filtrage. Comme nous disposons d'un grand nombre

d'images, l'idée ici est de ne plus filtrer chaque image séparément, mais de filtrer plusieurs images à la fois en tenant compte de l'évolution en temps. Ceci devrait permettre de réduire le rayon d'influence en espace et donc conduire à de meilleurs champs de déformation.

3.2 Principe de l'approximation diffuse spatio-temporelle

Pour chaque image, les données sont connues sur une grille régulière de points en espace. Chaque image correspondant à un instant donné, l'assemblage des différentes grilles spatiales permet de construire un ensemble de points de données en espace et en temps. Ainsi, les données sont situées sur N points, M_j de coordonnées (\underline{x}_i, t_j) et rangées dans deux vecteurs: $\{U_{exp}\}$ et $\{V_{exp}\}$, correspondant respectivement aux composantes longitudinale et transversale du déplacement. L'objectif de l'approche proposée est de reconstruire les champs de déplacement $U(x,y,t)$ et $V(x,y,t)$ et leurs gradients en tout point $X = (\underline{x}, t)$ à partir de $\{U_{exp}\}$ et $\{V_{exp}\}$, afin d'exploiter l'essai. La méthode proposée s'appuie sur l'utilisation de moindres carrés locaux [16]. Ici, l'outil de régression locale utilisé est l'Approximation Diffuse [15]. Le paramètre régularisant est alors le rayon d'influence de chaque point de mesure, nous différencierons le rayon d'influence en espace R_x et celui en temps R_t . L'intérêt d'une telle approche est de fournir directement un champ de déplacements continu ainsi que ses dérivées au sens diffus. Le champ reconstruit est cherché en tout point $X = (\underline{x}, t)$ de S , comme solution du problème de minimisation :

$$\min_{a(\underline{x}, t)} \frac{1}{2} \left(P\{a\} - \tilde{U} \right)^T W \left(P\{a\} - \tilde{U} \right) \quad \text{avec,} \quad P = \begin{bmatrix} p(\underline{X}_1 - \underline{X}) \\ \dots \\ p(\underline{X}_N - \underline{X}) \end{bmatrix}_{i \in V(\underline{X})} \quad (1)$$

$p(X)$ est le vecteur ligne des monômes de la base d'approximation, qui n'est pas nécessairement polynomiale. Le choix ici est de prendre une base polynomiale de degré 2 (10 monômes en dimension 3, 2 en espace 1 en temps). Ce choix s'est avéré, dans [14] en espace uniquement, être un bon compromis entre approximation mécanique et filtrage. Ainsi, les termes $a_2(X)$ et $a_3(X)$ représentent les dérivées premières en espace au point X au sens diffus. $V(X)$ représente l'ensemble des points de mesure pris en compte pour la reconstruction en X et sa taille dépend directement de (R_x, R_t) . La matrice W est formée de la diagonale des fonctions poids $w(X, X_i)$ et assure la continuité de la solution. La minimisation (1) conduit à un problème linéaire qui est résolu pour tout $X = X_{ij}$.

3.3 Illustration

L'objectif ici est de comparer la qualité du filtrage de cette nouvelle approche qui inclut le temps par rapport à l'approche précédente [3], uniquement en espace. En supposant les perturbations de mesures $\{\delta u\}$ issues d'un bruit blanc Gaussien d'écart-type σ_b et vu que l'opérateur de reconstruction est linéaire, il est possible de décrire $\delta \epsilon_b$, erreur liée au bruit directement liée à la reconstruction du bruit seul, comme une variable Gaussienne dont on veut caractériser l'écart-type. En notant M_ϵ l'opérateur de reconstruction de la déformation, $\delta \epsilon_b$ a pour matrice de covariance :

$$cov(\delta \epsilon_b) = \langle \delta \epsilon_b \delta \epsilon_b^T \rangle = \langle M_\epsilon \{ \delta u \} \{ \delta u \}^T M_\epsilon^T \rangle = \sigma_b^2 M_\epsilon M_\epsilon^T \quad (2)$$

Dans le cas où l'hypothèse de bruit blanc sur les déplacements est trop forte mais que la covariance du bruit a été caractérisée comme dans [2], cette matrice peut être prise en compte dans l'estimation par (2) de la variance sur les déformations reconstruites.

La Figure 2 présente la variance sur le premier gradient en fonction du paramètre de filtrage en échelle log, pour un bruit d'entrée de variance unité. La Figure 2-(a) compare le filtrage en fonction du rayon en espace pour différents rayons en temps. L'augmentation du rayon en temps améliore le filtrage pour un rayon d'espace fixé. Cela signifie également que pour un niveau de filtrage donné, l'augmentation du rayon en temps permet de diminuer le rayon en espace et ainsi réduire les erreurs d'approximation. La figure 2-(b) présente l'évolution de la variance en fonction du rayon en temps.

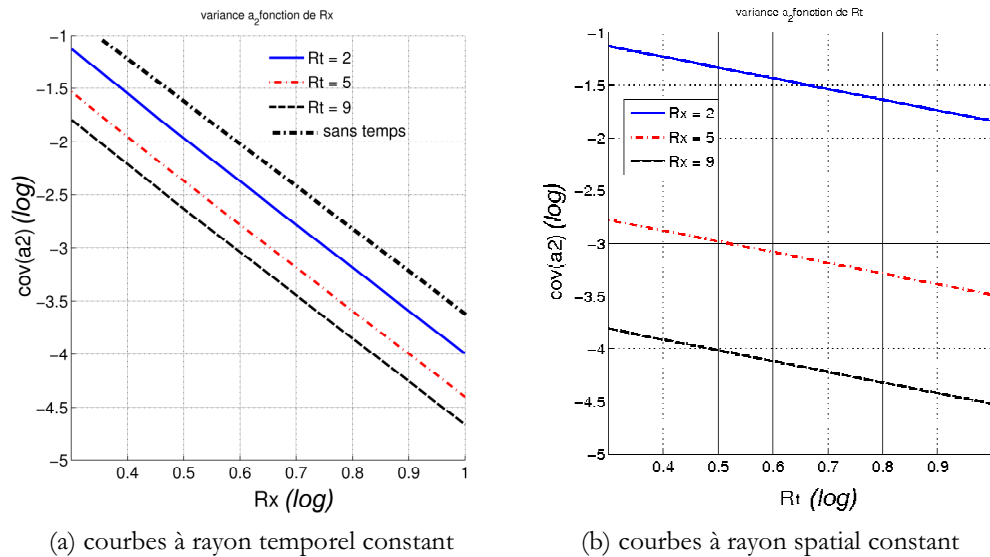


FIG 2 variance du premier gradient en fonction des rayons d'influence ($\sigma_b = 1$)

4 Conclusion

Dans ce papier, nous avons présenté la démarche en cours de mise en place pour caractériser expérimentalement l'amorçage et la propagation de la fissuration en fatigue. Ceci devrait nous permettre de nourrir la modélisation en vue de développer une modélisation prédictive de ces phénomènes. Notre approche s'appuie fortement sur les mesures de champs obtenues à l'aide d'une caméra numérique à des échelles fines, afin de mettre en évidence les phénomènes entrant en jeu. Ceci nous a poussés à adapter notre outil de filtrage des mesures de champs par approximation diffuse au cas des essais de fatigue où nous disposons d'un grand nombre de mesures, en développant un filtrage en espace et en temps. Nous avons illustré les capacités de filtrage que permet cette nouvelle approche.

Références

- [1] Brancherie D., Ibrahimbegovic A., Novel anisotropic continuum-discrete damage model capable of representing localized failure of massive structures. part I : theoretical formulation and numerical implementation. Engineering Computations, accepté, 2009.
- [2] Besnard G., Hild F., Roux S.. Expl Mechanics, 46 (6) 789–804, 2006.
- [3] Miller K., J. Fatigue Eng. Mater. Struct. 5 (1982) 223–232.
- [4] Heinz A., Neumann P., Acta Metall. Mater. 18 (1990) 1933–1940.
- [5] Essmann U., Gosele U., Mughrabi H., Phil. Mag. A 44 (1981) 405–426.
- [6] Blochwitz C., Mater. Sci. Eng. A141 (1991) 49–51.
- [7] Berfield T. A., Patel J. K., Shimmin R. G., Braun P. V., Lambros J., and Sottos N. R., Expl Mechanics 47 (2007) 51–62.
- [8] Scrivens W. A., Luo Y., Sutton M. A., Collette S.A., Myrick M. L., Miney P., Colavita P. E., Reynolds A. P., and Li X., Expl Mechanics 47(1) 2007 63–77.
- [9] Knauss W. G., Chasiotis I., Huang Y., Mechanics of Mater, 35 (2003) 217–231.
- [10] Sutton M. A., Li N., Joy D. C., Reynolds A. P., Li X., Expl Mechanics, 47 (2007) 775–787.
- [11] El bartali A. et al., Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 31 (2) (2008) pp. 137-151
- [12] Sutton M.A. et al., STP 1343, ASTM (1999), pp. 145-156.
- [13] Hamam R. et al., Strain 43 (2007) pp. 181-192
- [14] Avril S., Feissel P., Pierron F., Villon P., Revue Européenne de Mécanique Numérique, Lavoisier, 17.5–7,857 868 2008.
- [15] Nayroles B., Touzot G., Villon P., La méthode des éléments diffus. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre, 313-2, 133 138, 1991.
- [16] Cleveland W.S., Loader C., Smoothing by local regression : principles and methods, Springer, 1995.