

Génération de données grâce à la corrélation d'images pour la mécanique de l'endommagement et de la rupture

S. Feld-Payet*, V. Bonnard

*DMAS, ONERA, Université Paris-Saclay, 92320, Châtillon, France
sylvia.feld-payet@onera.fr, vincent.bonnard@onera.fr*

Résumé — Afin d'obtenir des données expérimentales qui puissent servir à la modélisation de l'endommagement et la fissuration, les auteurs proposent une stratégie empirique pour détecter les fissures en post-traitement. Cette stratégie s'appuie notamment sur un algorithme de corrélation d'images de type variation totale pour exploiter les champs cinématiques au voisinage de la fissure et sur une étude de stabilité temporelle des points avec fort gradient de déplacement. La stratégie est appliquée pour un essai de fatigue biaxiale sur une éprouvette en croix en superalliage base nickel.

Mots clés — détection de fissure, amorçage, corrélation d'images.

1 Introduction

Afin de construire des modèles prédictifs d'endommagement et de mécanique de la rupture, il est nécessaire de disposer de données expérimentales sur la localisation des déformations et sur l'évolution des fissures. Pour obtenir ces données, les mesures de champs denses sont une piste prometteuse. Toutefois, l'analyse d'images infrarouges ou la corrélation d'images numériques globale s'appuyant sur les éléments finis (sans connaissance du comportement du matériau) ont une résolution limitée. L'utilisation de cette dernière méthode est adaptée lorsque l'on étudie des champs élastiques suffisamment loin de la fissure en omettant totalement la zone d'élaboration. Le principe est alors de déterminer, en utilisant le premier terme super-singulier de la série de Williams [1, 2, 3, 4, 5, 6], la position d'une pointe de fissure dite équivalente ou élastique, le long d'un chemin de fissure potentiel. Cette approche est valable tant que les hypothèses de la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture (MLER) sont vérifiées, autrement dit dans le cas où une fissure suffisamment longue se propage dans un milieu qui peut globalement être considéré comme élastique. Cependant, si ces hypothèses ne sont pas vérifiées, la position observée de la pointe de la fissure peut être différente de la position équivalente.

Dans cette étude, nous présentons une méthodologie pour obtenir directement des données locales sur l'endommagement et la fissuration plus précises en analysant la zone d'élaboration. Cette méthodologie est empirique de sorte à fournir des données indépendantes du matériau ou du chargement qui puissent être utilisées pour proposer de nouveaux modèles ou identifier les paramètres de modèles existants. Le principal intérêt de cette approche est de fournir des données pour nourrir des modèles lorsque les hypothèses de la MELR ne sont plus valables. C'est notamment le cas lorsque la plasticité n'est pas confinée ou lorsque l'on considère l'amorçage de fissure.

2 Description de l'essai

La stratégie proposée a été mise en place à partir de résultats d'essais et est ici illustrée également à partir de résultats d'un essai brièvement décrit dans cette partie.

2.1 Description du montage et des conditions d'essai

Cet essai fait partie d'une série d'essais réalisés avec une installation de fatigue planaire biaxiale de traction-compression servohydraulique. Cette machine servohydraulique MTS est composée d'un cadre

rigide avec 4 cylindres capables de fournir 250kN par axe. Un mode centroïde permet de maintenir le centre de l'échantillon à un endroit fixe afin d'éviter les moments de flexion parasites.

Les essais de fatigue oligocyclique biaxiale ont été réalisés sur des éprouvettes en croix présentées dans [7] de dimension $200 \times 200 \times 9,6$, mm en Inconel 718. L'épaisseur initiale de la zone cylindrique plane, où les fissures apparaissent, est de 1 mm, avec une finition polie. Les éprouvettes sont testées à température ambiante à force imposée avec une fréquence de 1 Hz. Les rapports de charge sont de 0,05 pour chaque axe. Pour l'essai considéré, le rapport de biaxialité est $R_b = \frac{F_1^{max}}{F_2^{max}} = 0,4$. Une telle configuration d'essai ne permet pas une détection suffisante de la fissure par la méthode du potentiel électrique ou par des mesures de déplacement ponctuelles. La mesure des champs cinématiques par corrélation d'images est donc privilégiée.

2.2 Instrumentation optique et acquisition de données

Pour la corrélation des images, un mouchetis est préalablement obtenu en pulvérisant une peinture noire sur un fond blanc, comme le montre la figure 1, et ce sur chaque face de l'échantillon.

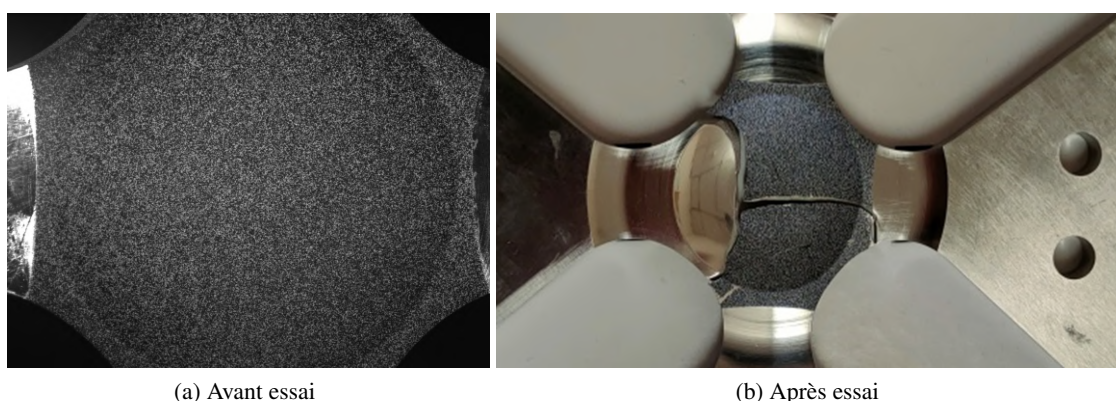


FIGURE 1 – a : Image de l'échantillon avant l'essai, utilisée comme référence pour la corrélation des images numériques. b : Image de l'échantillon après l'essai. Extrait de [8].

Le dispositif expérimental est équipé de caméras. Sur la face avant, un système de stéréocorrélation est utilisé (GOM avec des caméras de 4 Mpx), tandis qu'une caméra PCO (2560×2160 px) avec un objectif de 50 mm de longueur focale fixe est utilisé pour surveiller la face arrière. Les systèmes sont réglés pour avoir des résolutions spatiales similaires d'environ $17,5 \mu\text{m}$ par pixel (sachant que la taille des grains du matériau considéré est d'environ $8 \mu\text{m}$). Les captures d'images des deux systèmes sont synchronisées avec le signal de réponse le long de l'axe de chargement principal. Elles sont déclenchées tous les 50 cycles. Dans le cas présent, les images prises avec le système de stéréocorrélation permettent d'attester que la fissure apparaît d'abord du côté observé par la caméra PCO. Par conséquent, seules les 207 images de la caméra PCO prises à la charge maximale sont analysées. Notons que l'observation de la surface est suffisante pour analyser l'amorçage de la fissure pour l'essai considéré puisqu'une analyse fractographique a montré que l'amorçage de la fissure a eu lieu en surface.

3 Description de la stratégie

3.1 Stratégie générale

La stratégie pour détecter des fissures à partir de champs cinématiques mesurés expérimentalement est tout à fait similaire à celle qui est employée pour déterminer la géométrie d'une fissure à partir d'un champ d'endommagement pour une simulation numérique. Dans les deux cas, il faut :

1. Estimer un chemin potentiel ou support de fissure. Ce dernier coïncide en partie avec le chemin de fissure mais peut s'étendre au-delà.
2. Évaluer la position de la pointe de fissure le long du chemin potentiel.

3.2 Champ scalaire d'intérêt

Qu'il s'agisse de calcul ou d'analyse d'images, différents champs peuvent être considérés pour chacune de ces deux étapes. Cependant, dans le cas présent, nous proposons d'utiliser le même champ scalaire pour déterminer un chemin potentiel et la position de la pointe de fissure : la composante maximale (en valeur absolue) du gradient des déplacements, comme dans [9], notée g_m . Tout comme un champ d'endommagement, ce champ scalaire présente une crête là où la fissure est localisée. Pour obtenir ce champ à partir d'images d'une surface d'éprouvette mouchetée, les auteurs proposent d'utiliser une méthode de type variation totale et en particulier l'algorithme DeepFlow [10]. L'intérêt de ce type de méthode est la très bonne résolution qu'elle permet près de la fissure. Il est en effet important d'avoir une résolution satisfaisante pour la mesure du champ dense, car l'approche locale de la rupture repose sur des données locales. La composante maximale est ensuite calculée en chaque pixel par différences finies à partir des déplacements au niveau des pixels adjacents :

$$g_m = \max(\|\mathbf{u}_{i,j+1} - \mathbf{u}_{i,j}\|, \|\mathbf{u}_{i+1,j} - \mathbf{u}_{i,j}\|, \|\mathbf{u}_{i+1,j+1} - \mathbf{u}_{i,j}\|, \|\mathbf{u}_{i-1,j+1} - \mathbf{u}_{i,j}\|) \quad (1)$$

où $\mathbf{u}_{i,j}$ désigne le vecteur déplacement pour le pixel à la ligne i et la colonne j .

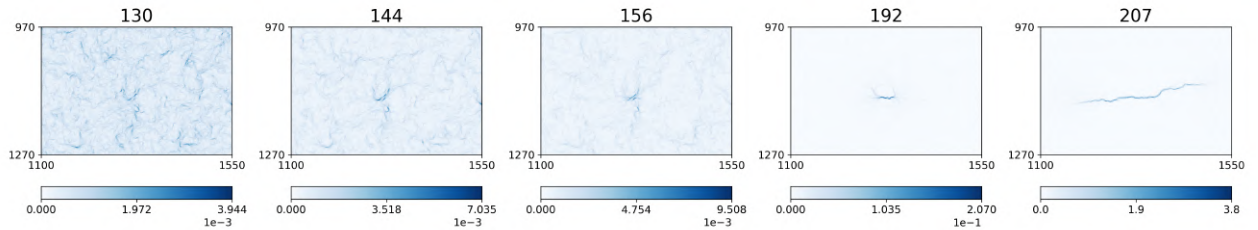


FIGURE 2 – Cartes de composante maximale des gradients de déplacement, g_m , pour 5 images : 130, 144, 156, 192 et 207. Extrait de [8].

L'observation des cartes de composante maximale du gradient des déplacements g_m permet de bien mettre en valeur les fissures, comme illustré figure 2.

3.3 Construction du chemin potentiel

La première étape consiste à définir le support de la trajectoire de la fissure ou chemin potentiel. Dans ce travail, une méthode d'apprentissage non supervisée (DBSCAN) est utilisée pour déterminer les groupes de pixels présentant des gradients de déplacement élevés. L'un des paramètres clés de cette méthode est le choix du seuil de gradient des déplacements. Les auteurs proposent de fixer ce seuil grâce à une procédure automatique qui le fait croître graduellement jusqu'à trouver un seul groupe de pixels dont la taille est relativement faible par rapport au nombre de pixels de l'image. Cela permet de sélectionner un petit groupe de pixels correspondant à la zone de localisation des déformations et d'estimer l'orientation de la fissure à l'aide d'une approximation linéaire. Un ajustement local peut être effectué pour obtenir une meilleure approximation de la forme de la fissure en cherchant la position du maximum du champ g_m dans la direction orthogonale à l'approximation linéaire (voir figure 3). Cette détermination du chemin potentiel peut se faire pour chaque image ou uniquement sur la dernière image considérée (pour un post-traitement notamment). Dans ce dernier cas, que nous considérons ici pour plus de simplicité, une approximation du support de la fissure finale est obtenue. Pour cette approximation, une discrétisation avec un pas de 1 pixel est recommandée pour une meilleure précision.

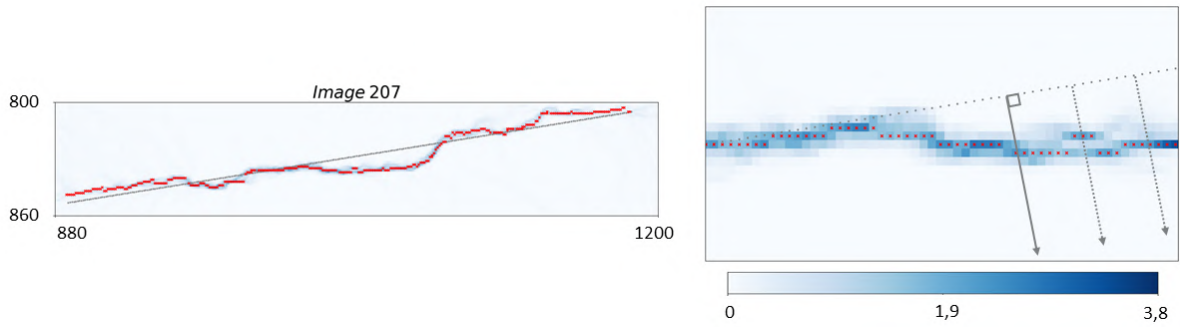


FIGURE 3 – A gauche : carte de la composante maximal du gradient de déplacement g_m pour la dernière image considérée (image 207) avec l’approximation linéaire en gris et l’approximation optimisée qui s’appuie sur la valeur maximale dans la direction orthogonale en rouge. A droite : vue rapprochée permettant de visualiser les directions de recherche pour l’approximation optimisée.

3.4 Positionnement de la pointe de fissure

Dans un deuxième temps, des critères empiriques sont utilisés pour déterminer la position du front de la fissure le long de ce support. Pour ce faire, l’idée est d’étudier l’évolution d’une quantité d’intérêt le long du support la confronter à un seuil. Les auteurs ont suggéré dans [9] de s’intéresser à l’évolution de l’écart type calculé dans des fenêtres de relativement petite taille. Cette taille peut être adaptée automatiquement de sorte à inclure la bande de localisation des gradients de déplacement autour de la fissure. Ainsi, en parcourant le chemin potentiel, on devrait observer un écart type important dans les zones où il y a de forts gradients localisés (donc au niveau de la fissure) et un écart type plus faible et localement constant dans les zones où le milieu est continu. Le challenge est alors de trouver le seuil qui marque la transition entre les deux zones et qui correspond à la position de la pointe de fissure.

Un point important est que la valeur du seuil doit être déterminée localement et pour chaque image. Les auteurs proposent donc de déterminer ce seuil en se servant de la valeur de l’écart type en un point proche de la fissure dont on peut raisonnablement penser qu’il ne fait pas partie de la fissure. Initialement, les auteurs ont proposé de regarder les valeurs des points à une courte distance de la pointe de fissure, ce qui nécessitait une première approximation de la position de la pointe grâce à l’évaluation du gradient de l’écart type [9]. Cette proposition a donné des résultats très satisfaisants lorsque la fissure est suffisamment longue. Elle avait notamment été validée par comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus avec la méthode de la différence de potentiel et par une comparaison visuelle avec une pointe de fissure émoussée due à de grandes déformations. Cependant, la première estimation peut ne pas être satisfaisante pour les fissures très courtes lorsque la différence d’écart type est trop faible sur un trop petit nombre de points de fissure.

Dans ce cas, les auteurs proposent d’étudier l’évolution des points correspondants à des gradients de déplacement élevés dans le temps pour déterminer des points qui ne font pas partie de la fissure et qui peuvent servir pour évaluer le seuil. L’hypothèse émise par les auteurs est que les champs de déformations localisées dans le milieu continu peuvent encore évoluer avec le temps alors que les phénomènes irréversibles tels que les fissures ne peuvent plus évoluer.

Afin de comparer les positions des points à fort gradients de déplacement pour une série d’images, les auteurs proposent de considérer l’approximation linéaire de la fissure finale discrétisée avec un pas de 1 pixel (voir ligne grise figure 4). Pour chaque image et chaque point de cette approximation, on recherche la position du maximum du champ g_m dans la direction orthogonale à l’approximation linéaire comme décrit dans 3.3. L’évolution dans le temps de la position des points dans la direction orthogonale peut ensuite être analysée (de manière indépendante pour chaque point de l’approximation). Les points qui continuent à évoluer avec le temps ne font pas partie de la fissure à l’image considérée. Pour définir ce que signifie *évoluer dans le temps*, il faut choisir une référence. Les auteurs proposent de choisir comme référence en post-traitement la position de la fissure finale. En théorie, les points stables devraient donc se situer sur la fissure finale. En pratique, il est nécessaire de prendre en compte le fait qu’il y a toujours une certaine incertitude associée aux mesures, ce qui affecte également l’estimation de la position de la fissure finale. Le choix d’un algorithme de type variation total permet de réduire cette incertitude sans

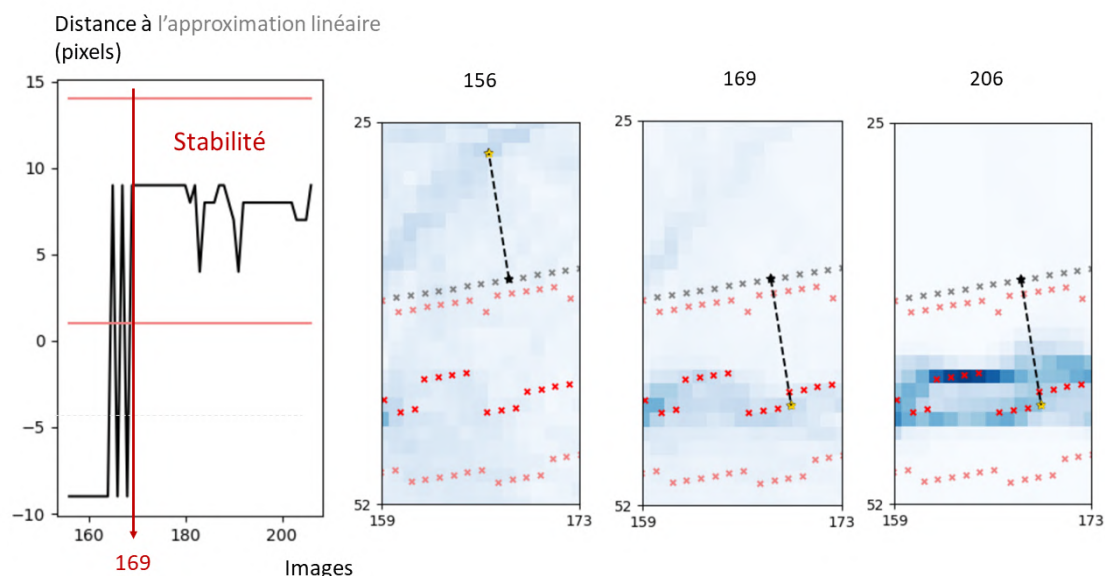


FIGURE 4 – Etude de l'évolution dans le temps de la distance entre un point de l'approximation linéaire représentée en gris et le point situé au maximum de g_m dans la direction orthogonale à l'approximation linéaire, représenté en jaune sur les cartes de composante maximal du gradient des déplacements pour trois images : 156, 169 et 206. La fissure finale est représentée en rouge et les limites de la zone d'incertitude autour de cette fissure finale en rose. Le point considéré est stable à partir de l'image 169 car il reste entre les bornes d'incertitude.

pour autant l'éliminer. Une bande de localisation des déformations est donc estimée autour de la fissure finale et un point est considéré comme stabilisé s'il reste dans cette bande de localisation pour toutes les images suivantes.

Les auteurs proposent alors de prendre pour le seuil la plus haute valeur d'écart type de g_m parmi ces points qui sont qualifiés d'instables, comme illustré figure 5. Les points en-dessous du seuil correspondent à des niveaux d'écart type qui ont été associés à des points instables. Ils font probablement partie d'une zone de déformation localisée dans le milieu continu.

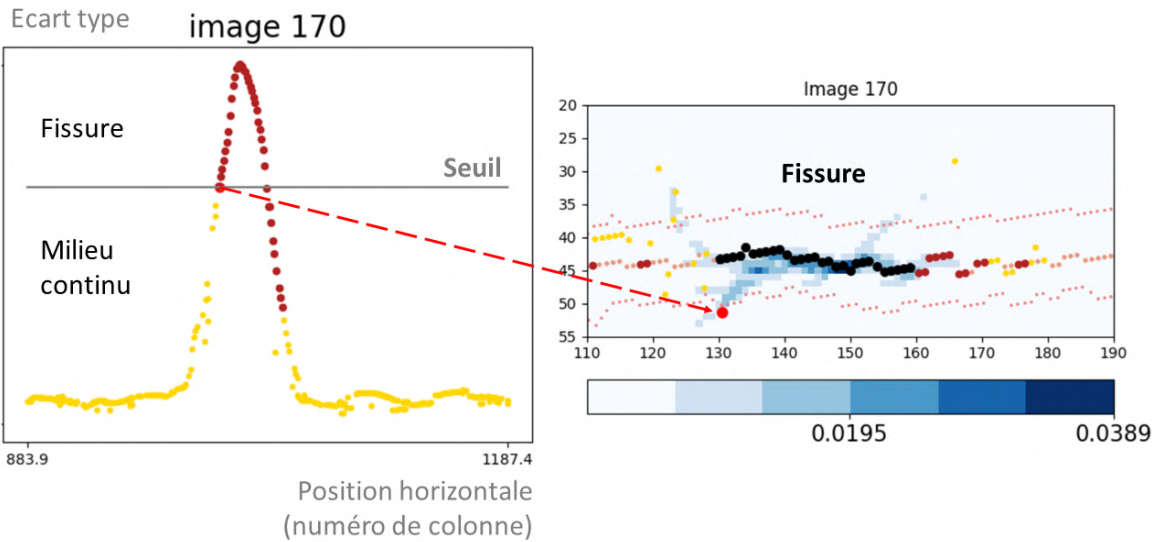


FIGURE 5 – Gauche : évolution de l'écart type de g_m le long du chemin potentiel au voisinage de la micro-fissure pour l'image 170. A droite : Position des points ayant servi à l'évaluation sur la carte de composante maximale du gradient des déplacements. Dans les deux cas, les points considérés comme instables sont représentés en jaune et les points stables sont représentés en rouge foncé. Le point en rouge clair est le point instable avec l'écart type le plus important et sert donc pour fixer le seuil. Les points dont l'écart type est au-dessus du seuil sont considérés comme appartenant à la fissure, représentée en noir.

4 Applications

Cette stratégie utilisant l'évolution temporelle a été appliquée à l'essai de fatigue sur éprouvette en croix décrit dans la section 2. Elle a permis d'observer l'amorçage d'une micro-fissure due à des concentrations de déformations qui semblent d'abord dépendre de la micro-structure (voir figure 6). Puis, lorsque la fissure croît, la localisation des déformations semble plus dépendre de la position des pointes de fissure. Ces dernières peuvent être utilisées pour avoir une estimation de la longueur de fissure.

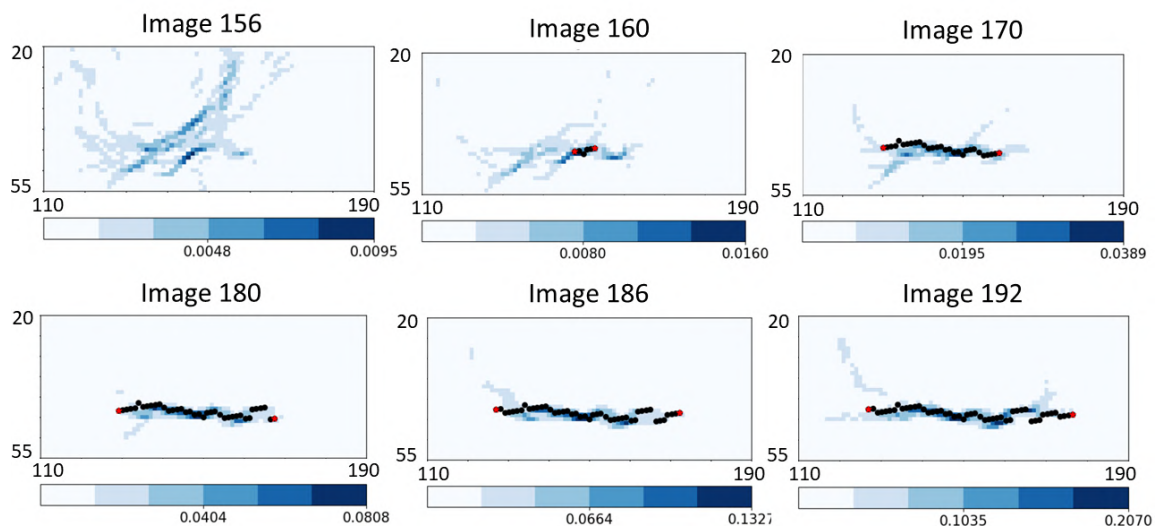


FIGURE 6 – Evolution de la fissure (en noir) représentée sur les cartes de composante maximale du gradient des déplacement g_m pour 6 images : 156, 160, 170, 180, 186 et 192.

5 Conclusion et perspectives

La stratégie proposée s'appuie sur la détermination d'un support de fissure et l'évaluation des écarts types le long de ce chemin pour déterminer la position de la pointe de la fissure. Cette dernière est associée à un seuil sur les écarts types dont la détermination est la principale originalité de ce travail. Elle repose sur l'utilisation d'un critère sur la stabilité temporelle des points présentant un gradient de déplacement très important pour déterminer les niveaux d'écart type correspondant au milieu continu. Les points dont l'écart type est supérieur au seuil sont supposés faire partie de la fissure. Cette stratégie permet de suivre l'évolution de très petites fissures, avant même le stade où leur évolution ne dépend plus de la microstructure.

La stratégie proposée est ici décrite en post-traitement mais elle peut également être adaptée pour une détection automatique des fissures en cours d'essai.

À l'avenir, les données obtenues pourraient être comparées à des simulations basées sur une approche continue-discontinue, notamment en termes de position et de longueur de fissure. Des procédures d'optimisation pourraient alors être envisagées pour identifier les paramètres du modèle numérique, notamment pour les paramètres associés à des outils numériques de transition endommagement-fissure.

Financement

Les auteurs tiennent à remercier Safran pour son soutien financier, en particulier pour la partie expérimentale. Les résultats présentés dans ce travail ont été obtenus dans le cadre du projet ATLAAS, qui a été financé par l'Union Européenne, le gouvernement français et la DGAC.

Références

- [1] J. Réthoré. *Automatic crack tip detection and stress intensity factors estimation of curved cracks from digital images*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 103(7), 516-534, 2015.
- [2] R. Hamam, F. Hild, S. Roux. *Stress intensity factor gauging by digital image correlation : Application in cyclic fatigue*, Strain, 43(3), 181-192, 2007.
- [3] C. Henninger, S. Roux, F. Hild. *Enriched kinematic fields of cracked structures*, International Journal of Solids and Structures, 47(24), 3305-3316, 2010.
- [4] P. Leplay, J. Réthoré, S. Meille, M. C. Baietto. *Identification of damage and cracking behaviours based on energy dissipation mode analysis in a quasi-brittle material using digital image correlation*, International journal of fracture, 171(1), 35-50, 2011.
- [5] E. Durif, J. Réthoré, A. Combescure, M. Fregonese, P. Chaudet. *Controlling stress intensity factors during a fatigue crack propagation using digital image correlation and a load shedding procedure*, Experimental mechanics, 52(8), 1021-1031, 2011.
- [6] J. Réthoré, R. Estevez. *Identification of a cohesive zone model from digital images at the micron-scale*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 61(6), 1407-1420, 2013.
- [7] P. Selva, B. Lorrain, J. Alexis, A. Seror, A. Longuet. *Multiaxial fatigue analysis of a high performance Nickel-based superalloy*, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering 9, 544-549, 2015.
- [8] S. Feld-Payet, V. Bonnand, D. Pacou. *Exploiting global digital image correlation for crack initiation*, Fracture, Damage and Structural Health Monitoring, 2020.
- [9] S. Feld-Payet, G. Le Besnerais, V. Bonnand, D. Pacou, L. Thiercelin. *Crack path tracking from full field measurements : A novel empirical methodology*, Strain, 56, e12333 10.1111/str.12333, 2020.
- [10] P. Weinzaepfel, J. Revaud, Z. Harchaoui, C. Schmid. *DeepFlow : Large displacement optical flow with deep matching*, IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2013.