

Mécanismes d'endommagement et prédiction des durées de vie en fretting-fatigue

A. Belloula^a. M. Nait Abdelaziz^a. A. Amrouche^b. N. Benseddiq^a

a. Université Lille Nord de France. Université Lille 1. Laboratoire de Mécanique de Lille. UMR CNRS 8107. F-59650 Villeneuve d'Ascq. France.

b. Université Lille Nord de France. Université d'Artois. Laboratoire de Génie Civil et GéoEnvironnement (LGCgE). EA 4515.
Amar.Belloula@polytech-lille.fr

Résumé :

Dans ce travail, nous analysons les mécanismes d'endommagement induits par le fretting-fatigue. Après avoir mis au point un dispositif expérimental adapté sur un banc multiaxial de fatigue. Des essais ont été menés sur un alliage d'aluminium de la série 6082-T6. Les résultats montrent un abatement de la durée de vie par rapport à la fatigue classique. Les sites d'amorçage des fissures ont été identifiés par analyse micrographique. La modélisation de la prédiction de la durée de vie est conduite en utilisant des critères basés sur les plans critiques couplés à un calcul par éléments finis montrent le rôle important joué par la contrainte normale dans le plan critique.

Abstract :

The damage mechanisms induced by fretting fatigue were analyzed. An experimental device was first designed and adapted on a multiaxial fatigue apparatus. Tests were conducted on an aluminum alloy of the serie 6082-T6. The fretting fatigue life is lower compared to classical fatigue under the same loading conditions.. The crack initiation sites were identified by micrographic analysis. Prediction of the fatigue life by using different parameters indicates the major role played by the normal stress in the maximum shear plane.

Mots clefs : fretting fatigue, Endommagement, modélisation.

1 Introduction

La sollicitation de fretting (contacts soumis à des micro-déplacements alternés) est à l'origine de nombreuses avaries, de pertes de fonctionnalité et dans le cas extrême de ruptures catastrophiques. L'action conjuguée du fretting et de la fatigue peut provoquer une réduction de la résistance à la fatigue. Cet endommagement est observé dans de nombreux assemblages mécaniques, tels que les assemblages boulonnés ou rivetés, accouplement rainure-arbre, les assemblages aube/disque des machines tournantes [1-2]. Les champs des contraintes et des déformations dans la zone de contact lors du fretting fatigue étant multiaxiaux et complexes, l'étude de l'endommagement induit par fretting fatigue doit tenir compte des ces champs et des paramètres locaux liés à l'état du contact (phénomène d'écrouissage) et des paramètres opératoires. Ainsi, la prédiction de la durée de vie en fretting fatigue est faite à partir des approches multiaxiaux de fatigue (SWT, FS, SSR, MSSR, etc...) [3-4-5].

La présente étude traite les mécanismes d'endommagement et la prédiction de la durée de vie sous sollicitation de fretting fatigue en couplant deux approches expérimentale et numérique. Trois critères de fatigue de type plan critique on été utilisés pour la prédiction de la durée de vie : Smith-Watson-Topper (SWT) [7], paramètre tenant compte du cisaillement (Shear Stress Range SSR) [9] et le paramètre tenant compte du cisaillement et de la contrainte normale (Modified Shear Stress Range MSSR) [11]. Ceci en utilisant un code de calcul ABAQUS.

2 Procédure expérimentale et résultats

Un dispositif expérimental d'un essai mono-contact avec un seul pion a été mis au point et est schématisé sur la figure 1. Il consiste à appliquer un effort normal de 1 KN sur une éprouvette de fatigue à l'aide d'un vérin hydraulique. Le pion (frotteur) est de forme cylindrique de rayon $R = 12,7$ mm. Le chargement cyclique appliqué à l'éprouvette est réalisé par un deuxième vérin piloté en charge avec un rapport de chargement de 0,1 et de fréquence $f = 20$ Hz (figure 1). Deux cellules de force sont placées aux extrémités de l'éprouvette sur l'axe de chargement afin de mesurer l'effort tangentiel. Pour minimiser voire éviter la flexion de l'éprouvette sous l'effet de l'effort normal, un roulement a été placé en vis à vis du pion sur la face opposée de l'éprouvette. L'éprouvette de fatigue, conforme à la norme E466-96 [6], est en alliage d'aluminium 6082-T6 dont le module de Young $E_1 = 69000$ MPa et de coefficient de Poisson $\nu_1 = 0,33$. Le pion est en acier à outil Z160CDV12 avec $E_2 = 207000$ MPa et $\nu_2 = 0,3$.

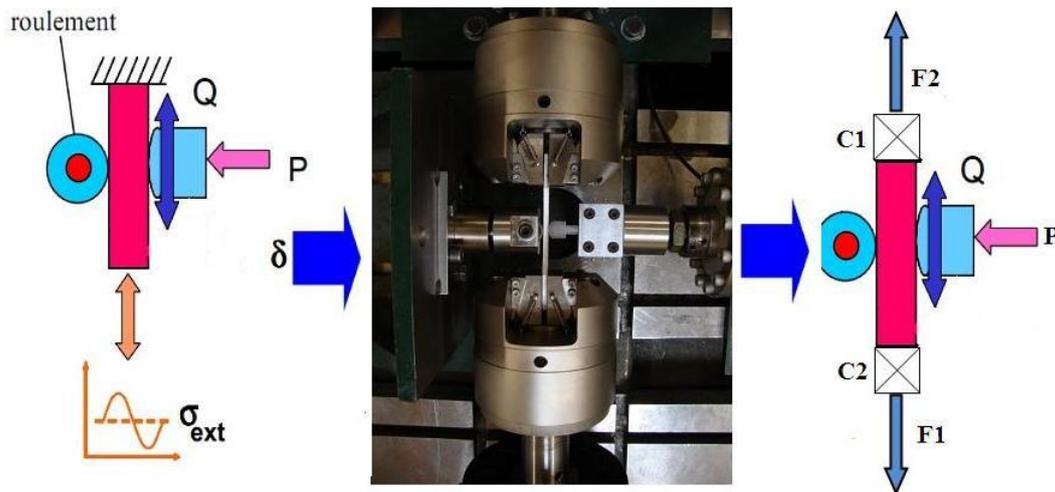


FIG. 1 – Dispositif expérimental de fretting-fatigue (configuration cylindre/plan).

2.1 Résultats expérimentaux

La figure 2 montre les résultats de fatigue et de fretting fatigue sous les conditions citées auparavant. Pour des chargements élevés la durée de vie en Fretting fatigue présente une diminution comparativement au cas de la fatigue. Aux faibles chargements (correspondant aux grands nombres de cycles), les durées de vie sont similaires.

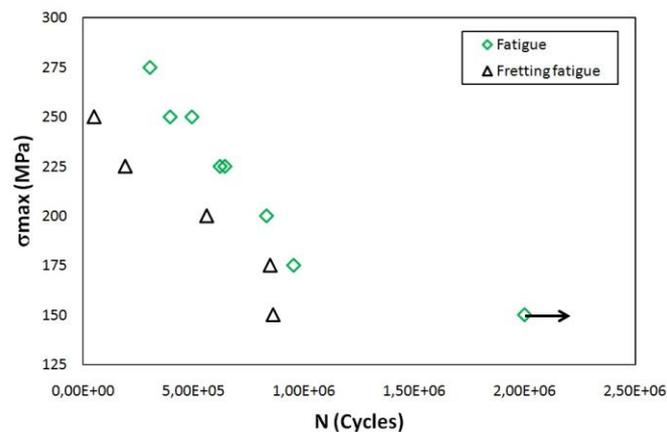


FIG. 2 – Courbes S-N de fatigue et de fretting fatigue avec un rapport de charge $R=0,1$.

La mesure différentielle ($F_{C1} - F_{C2}$) des efforts aux extrémités de l'éprouvette de fatigue (figure 1) permet l'enregistrement en temps réel de la valeur de l'effort tangentiel Q imposé au niveau du contact et le calcul du rapport : $\mu = \frac{Q}{P}$. Les figures 3a et 3b, montrent l'évolution de Q et μ en fonction du nombre de

cycle. L'effort tangentiel et le rapport μ présentent une stabilité après une période initiale d'environ 2000 cycles qui correspond à l'adaptation des matériaux en contact (FIG 3).

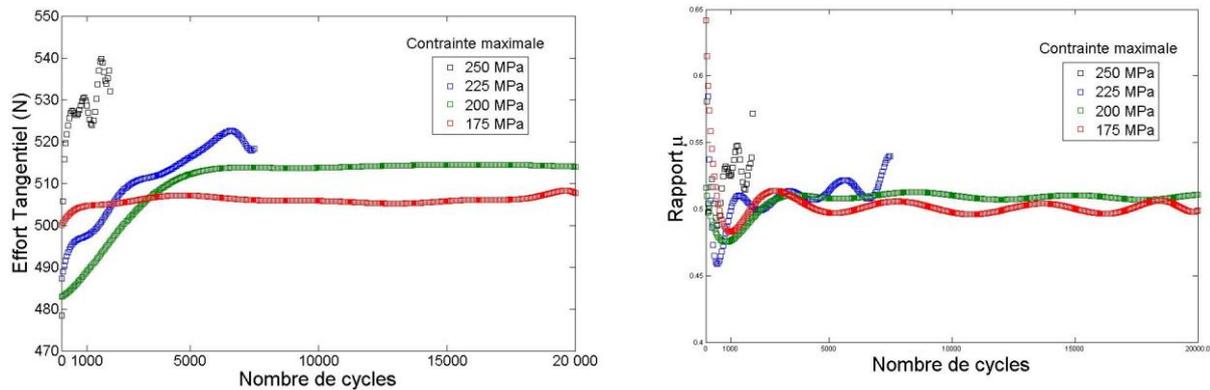


FIG. 3 – Evolution de (a) l'effort tangentiel Q (b) rapport $\mu = \frac{Q}{P}$ en fonction du nombre de cycles.

2.2 Modélisation par éléments finis

Le code de calcul ABAQUS a été utilisé pour la détermination des contraintes et des déformations dans la zone de contact entre le pion et l'éprouvette. La figure 4 présente le modèle EF où des éléments rectangulaires à quatre nœuds (1 point de Gauss) sont utilisés. Un raffinement du maillage dans la zone de contact est également réalisé afin de mieux rendre compte des gradients de déformation et de contrainte au niveau du contact. Celui-ci est modélisé selon la technique dite des nœuds maître/esclave, l'ensemble des nœuds extérieurs est intelligemment séparé en différents groupes de nœuds. Le coefficient de frottement est fixé à 0,5. Le déplacement dans la direction x du pion dans sa partie supérieure (loin du contact) est bloqué, la rotation autour de l'axe z est libre.

Le chargement s'effectue en trois étapes : on applique d'abord l'effort normal, puis l'effort cyclique maximal correspondant à la contrainte uniaxiale σ_{\max} dans un deuxième temps et finalement dans la dernière étape, l'effort cyclique minimal correspondant à σ_{\min} . Le comportement de l'alliage d'aluminium est supposé élastoplastique avec écrouissage isotrope. Le pion est considéré comme purement élastique.

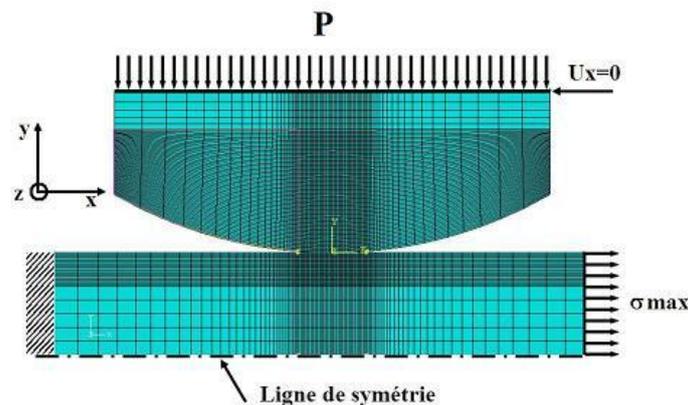


FIG. 4 – Modèle EF de l'essai en configuration cylindre/plan.

3 Résultats

3.1 Isovaleurs σ_{xx} , σ_{yy} et σ_{eq}

La figure 5 montre les isovaleurs des contraintes (σ_{xx} , σ_{yy} et σ_{eq}) dans la zone de contact, pour une contrainte maximale de fatigue de 250 MPa. Les valeurs maximales calculées sont respectivement de 160, 50 et 146 MPa. Ces figures montrent aussi l'étendue de la zone de contact qui est le siège d'un champ de

contraintes multiaxial. Les résultats de ce calcul E.F et les valeurs dans la zone de contact couplés aux résultats expérimentaux permettront de prédire les durées de vie dans le cas du fretting fatigue.

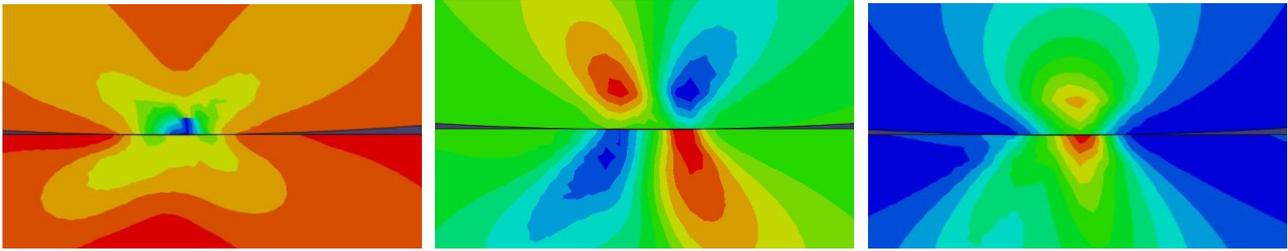


FIG 5 : Isovaleurs (a) σ_{xx} (b) σ_{xy} (c) $\sigma_{\text{équivalente}}$ pour une contrainte maximale de fatigue de 250 MPa.

3.2 Détermination des durées de vie

Trois approches ont été utilisées pour déterminer la durée de vie, le site et l'angle d'orientation de la fissure à l'initiation. Les contraintes et les déformations, dans la zone de contact, sont obtenues par éléments finis.

Le paramètre SWT

Le paramètre Smith-Watson-Topper (SWT) [7] est défini comme le produit de l'amplitude de déformation ε_a , et la contrainte normale maximale σ_{\max} (équation 1). Ce paramètre est calculé dans un plan orienté par un angle qui varie de $-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ$ avec un pas de $0,1^\circ$. La position correspondant à $\theta = 0^\circ$ est perpendiculaire à la direction de la contrainte cyclique appliquée.

$$SWT = \sigma_{\max} \cdot \varepsilon_a = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N)^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' (2N)^{b+c} \quad (1)$$

avec $\sigma_f' = 485 \text{ MPa}$, $b = -0,0695$, $\varepsilon_f' = 0,733$ et $c = -0,827$ sont des paramètres matériau relevés dans la littérature et mesurés en fatigue oligo-cyclique [8].

Paramètre tenant compte du cisaillement (Shear stress range SSR)

Le paramètre SSR [9] est basé sur le cisaillement dans un plan critique (éq 2). Il est calculé dans un plan orienté par un angle qui varie de $-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ$ avec un pas de $0,1^\circ$. Ce cisaillement est représenté par sa variation $\Delta\tau = (\tau_{\max} - \tau_{\min})$. Les contraintes τ_{\max} et τ_{\min} représentent la contrainte maximale et minimale de cisaillement dans le plan critique. Elles sont obtenues par l'application de la contrainte axiale de fatigue maximale et minimale. L'effet de la contrainte moyenne ou de rapport de charge est pris en compte en utilisant la formule proposée par Walker [10]:

$$SSR = \Delta\tau_{\text{crit}} = \tau_{\max} (1 - R_\tau)^m \quad (2)$$

Avec R_τ est le rapport de contrainte de cisaillement dans le plan critique et m est un paramètre de lissage. La figure 6b présente l'évolution de ce paramètre dans zone de contact.

Paramètre tenant compte du cisaillement et de la contrainte normale (Modified shear stress range MSSR)

Le paramètre de la contrainte de cisaillement SSR a été modifié pour prendre en compte l'effet de la contrainte normale maximale sur le plan critique de cisaillement [11]. Il est exprimé par :

$$MSSR = A \cdot \Delta\tau_{\text{crit}}^B + C \cdot \Delta\sigma_{\max}^D \quad (3)$$

Les constantes A , B , C et D sont obtenues par une procédure de régression aux moindres carrés.

L'évolution des différents paramètres permet de mettre en évidence les différentes zones de contact (adhésion, glissement).

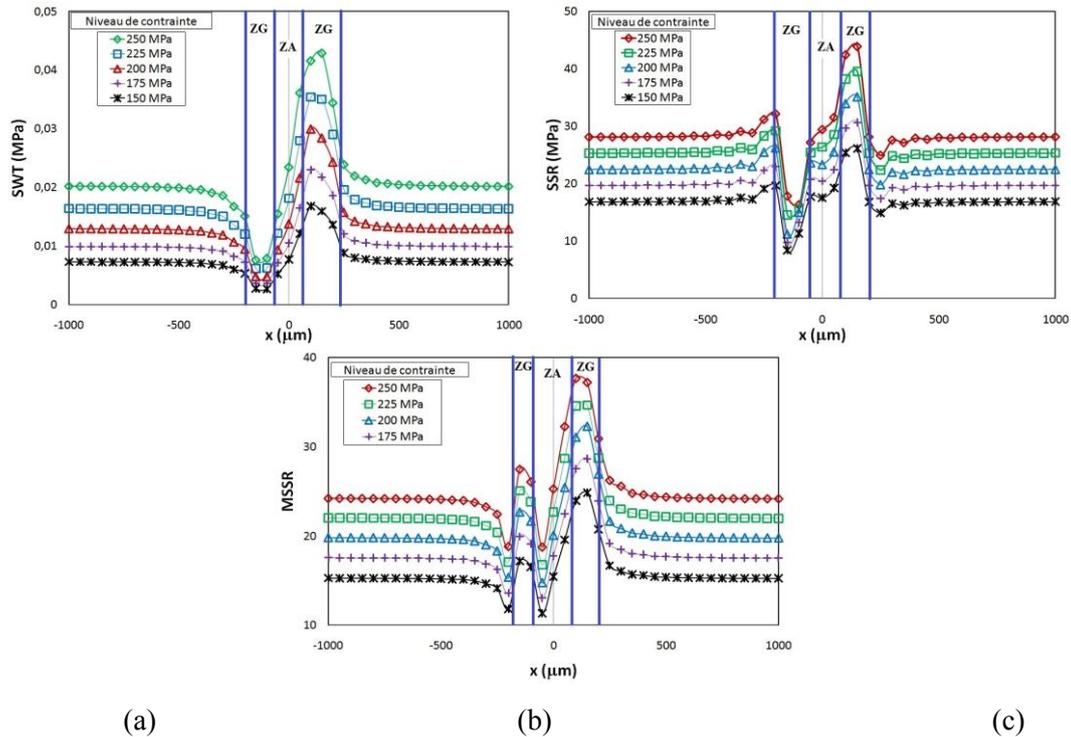


FIG. 6 – Maximum du paramètre (a) SWT (b) SSR (c) MSSR dans la zone de contact.

Courbe de durée de vie

En couplant les résultats expérimentaux en fatigue et les résultats de calcul par éléments finis, les paramètres SWT, SSR et MSSR identifiés dans le paragraphe précédent sont utilisés pour la détermination de la durée de vie en fretting fatigue (fig 7 a,b, c). Les résultats de la figure 7, montrent les capacités des différents paramètres à prédire la durée de vie en fretting fatigue. Il est clair que la prise en compte de la contrainte normale dans le paramètre (MSSR) conduit à une meilleure corrélation avec les résultats expérimentaux. Les écarts entre les résultats en fatigue et en fretting fatigue des paramètres SWT et SSR restent importants. Afin de confirmer ces résultats, Il est nécessaire de compléter la base de données expérimentale.

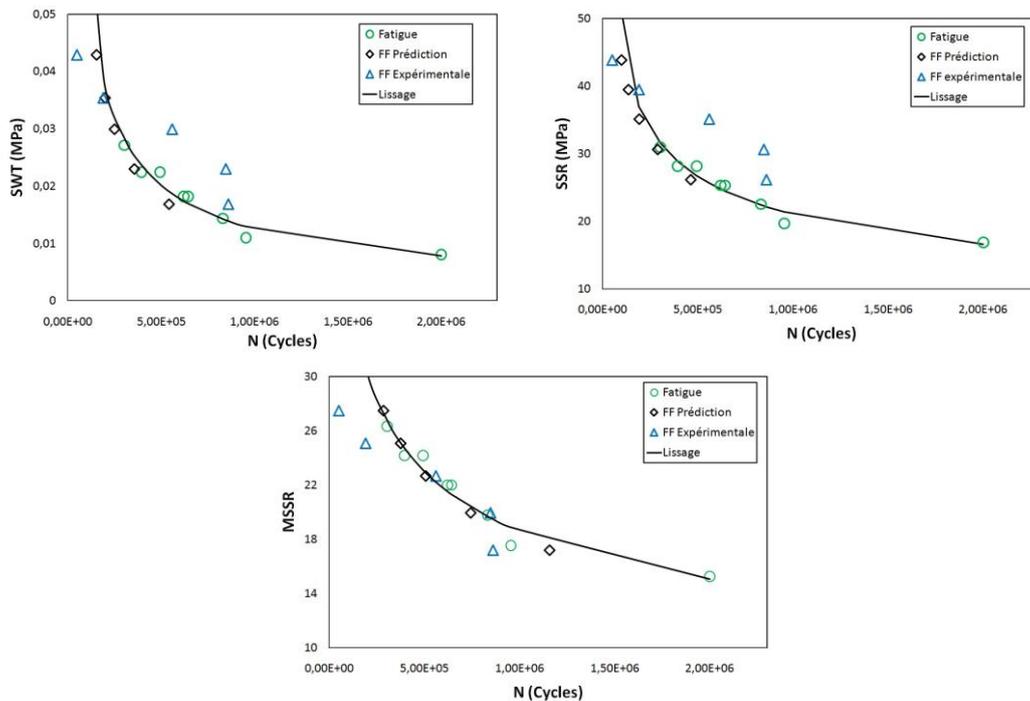


FIG. 7 – Maximum du paramètre (a) SWT (b) SSR (c) MSSR en fonction du nombre de cycles.

3.3 Observations micrographiques

Les observations micrographiques par microscopie optique de la zone de contact mettent en évidence une différence de l'étendue des deux zones de glissement (250 et 20 μm) et qui entourent la zone d'adhésion d'environ 1 mm (Fig 8 a). Dans la zone de glissement à forte épaisseur, la présence d'une fissure principale qui s'est initiée à l'interface (adhésion-glissement) et d'autres fissures secondaires qui sont localisées dans la zone de glissement (Fig 8 b) sont mises en évidence.

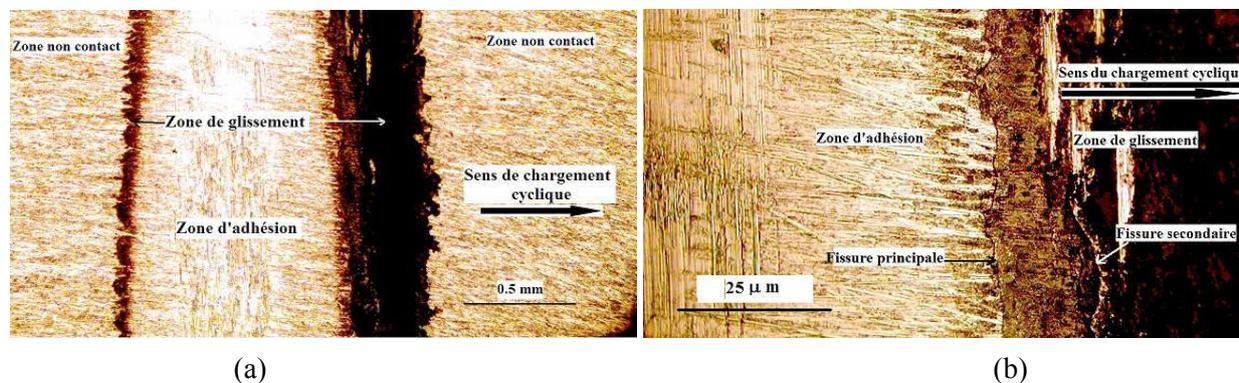


FIG. 8 – Images microscopiques de trace de fretting.

4 Conclusion

L'objectif de cette étude est d'examiner différentes approches de fatigue de type plan critique pour la prédiction de la durée de vie en fretting fatigue : SWT, SSR et MSSR. Le critère semblant donner une tendance convergente avec les résultats expérimentaux est celui qui prend en considération la contrainte normale dans le plan de la contrainte de cisaillement maximal (MSSR). Cependant, au-delà des dispersions expérimentales inhérentes à la fatigue (liées à la précision de la mesure de la durée de vie sur un critère d'apparition de fissure), ce modèle nécessite d'être affiné. Des essais supplémentaires seront nécessaires pour valider la pertinence de cette approche.

References

- [1] Hoepfner DW, Chandrasekaran V, Elliot CB, editors. Fretting fatigue: current technology and practices. ASTM STP 1367. American Society for Testing and Materials; 2000 (ISBN 0-8031-2851-7).
- [2] Hammouda MMI, Pasha PA, Fayed A. Modelling of cracking sites/development in axial dovetail joints. *Int J Fatigue* 2007; 29:30–48.
- [3] J. Ding, G. Bandak, S.B. Leen, E.J. Williams, P.H. Shipway. Experimental characterisation and numerical simulation of contact evolution. *Tribology International*. Vol. 42 (2009) 1651–1662.
- [4] J.A. Araujo a, D. Nowell. The effect of rapidly varying contact stress fields on fretting fatigue. *International Journal of Fatigue* vol. 24 (2002) 763–775.
- [5] M. Sabsabi, E. Giner, F.J. Fuenmayor. Experimental fatigue testing of a fretting complete contact and numerical life correlation using X-FEM. *International Journal of Fatigue*. Vol. 33 (2011) 811–822.
- [6] ASTM E 466. (1996). Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic material.
- [7] Smith R. N., Watson P. and Topper T. H. (1970). A stress-strain function for the fatigue of metals; *JMLSA. J. Mater.* 5. 767-778.
- [8] Wu H., Modélisation de l'extension de la durée de vie des structures fissurées après réparation par technique de perçage. 2009. Thèse, université de Lille1.
- [9] Lykins C. D., Mall S. and Jain V. K. (2001). A shear stress-based parameter for fretting fatigue crack initiation. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 24. 461-472.
- [10] Walker K. (1970). The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum. In: *Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life*. PA STP 462. ASTM. Philadelphia. USA. 1-14.
- [11] Namjoshi S.A., Mall S., Jain V. K. and Jin O. Fretting fatigue crack initiation mechanism in Ti-6Al-4V. (2002). *Fatigue Fract Engng Mater Struct*. Vol. 25. 955-964.