

Analyse de la vitesse de propagation de fissures de fatigue en plasticité généralisée en conditions de chargement biaxial

Mariem TRABELSI^a, Alain KÖSTER^a, Vincent MAUREL^a

- a. MINES ParisTech, PSL Research University, MAT- Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87, 91003 Evry, France.
mariem.trabelsi@mines-paristech.fr

Résumé :

Cette étude consiste à caractériser expérimentalement et à modéliser la propagation de fissure en plasticité généralisée sous sollicitations biaxiales. La conception d'un essai original de propagation de fissure à haute température est développée pour des chargements biaxiaux coplanaires. Nous présentons dans cet article la méthodologie expérimentale mise en place ainsi que les premiers résultats de cette campagne d'essais. Enfin, la modélisation des essais de propagation de fissure est réalisée afin de quantifier le rôle de la multiaxialité du chargement sur la vitesse de propagation de fissure.

Abstract :

This study consists in experimentally characterizing and modeling crack propagation in large scale yielding conditions under biaxial loading. The design of an original high temperature crack propagation test is developed for coplanar biaxial loadings. We present here the experimental methodology as well as the first experimental results. Finally, the modeling of crack propagation tests is carried out in order to quantify the role of the multiaxial loading on crack propagation rate.

Mots clefs : plasticité généralisée ; propagation de fissure; fatigue thermomécanique ; bifurcation de fissure

1 Introduction

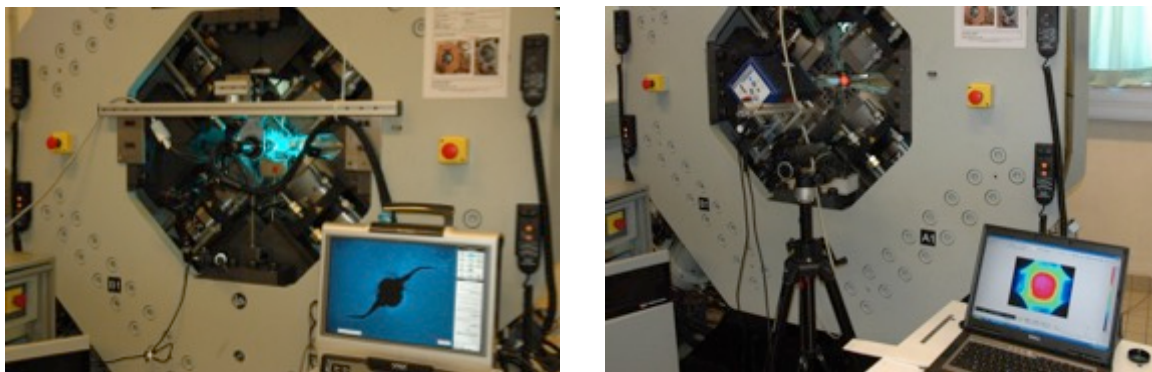
Sous les conditions de hautes températures, certaines pièces aéronautiques subissent des chargements sévères nécessitant de prendre en compte la propagation de fissures de fatigue pour optimiser le dimensionnement et la sécurité des pièces. C'est par exemple au niveau des zones perforées de chambres de combustion, zones de concentration de contraintes, que les fissures peuvent s'amorcer et se propager en un faible nombre de cycles. L'intensité des chargements et des températures provoque une forte plastification dans la zone de propagation de fissures rendant inopérantes les méthodes de modélisation de la propagation de fissures en condition de plasticité confinée. Ainsi une étude sous les

conditions de plasticité généralisée s'impose. Le matériau de l'étude est un superalliage à base de Cobalt, le HAYNES 188, utilisé principalement pour les chambres de combustion aéronautiques.

2 Méthodologie expérimentale

2.1 Présentation du dispositif expérimental

Un dispositif expérimental a été développé pour réaliser les essais de fissuration sous chargement de fatigue oligocyclique à haute température. Ce dispositif est constitué d'une machine de fatigue biaxiale coplanaire, d'un microscope optique permettant l'observation *in situ* de la fissuration et d'un système de chauffage par induction.

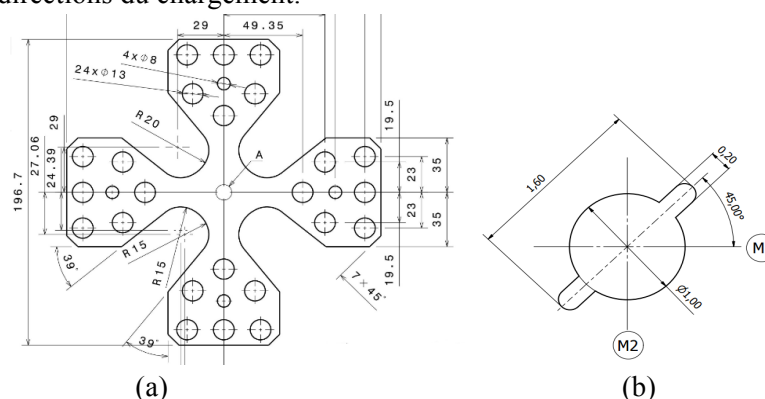


(a)

(b)

Figure 1. Dispositif d'essai (a) observation optique *in situ* de la fissuration et (b) Calibration thermique du chauffage par induction

Les essais ont été réalisés sur une machine bi-axiale cruciforme INSTRON 8800 (figure 1), composée de quatre vérins disposés à 90° l'un par rapport à l'autre, munis de cellules de charge de 100 kN et d'une course de +/- 20mm. Les quatre vérins définissent les deux axes de la machine: A1-A2 et B1-B2 qui sont les deux directions du chargement.



(a)

(b)

Figure 2. (a) Plan de l'éprouvette cruciforme et (b) plan de l'entaille

Les essais sont effectués sur des éprouvettes cruciformes (figure 2(a)) usinées à partir de tôles laminées à chaud par électroérosion à fil et perçage conventionnel sans modification de l'épaisseur de l'éprouvette, d'une valeur nominale de 3 mm. L'éprouvette est entaillée de part et d'autre d'un trou central. Le trou central, d'un diamètre de 1 mm, permet le passage du fil utilisé pour l'électroérosion

des entailles. Les entailles forment un angle de 45° par rapport aux directions du chargement (figure 2(b)). Les repères M1 et M2 correspondent respectivement aux axes B1-B2 et A1-A2.

Un microscope optique numérique KEYENCE VHX-1000 VH-Z00W (figure 1) est disposé face à l'éprouvette à l'aide d'un support solide du bâti de la machine d'essai. L'acquisition d'images *in situ* permet de déterminer la position de la pointe de la fissure en surface de l'échantillon avec une précision de quelques microns et ainsi de suivre le chemin de fissuration au cours des phases d'amorçage, de propagation et de bifurcation des fissures. En se basant sur les photos capturées *in situ*, une mesure de la longueur de la fissure propagée a en fonction du nombre de cycles de chargement N , a été déterminée. La connaissance de l'évolution de la longueur de fissure $a(N)$, permet de déduire la vitesse de propagation de fissure en faisant l'approximation $da/dN \cong \Delta a / \Delta N$. La vitesse est calculée pour un incrément de longueur de fissure de $200 \mu\text{m}$.

Compte tenu des conditions d'utilisation en service de ces matériaux, et à fin de comparaison avec des études précédentes effectuées sur ce matériau pour des sollicitations unidirectionnelles [1, 2, 3], la température d'essai est choisie à 900°C . Il a été choisi un système de chauffage par induction pour atteindre cette température [1]. Le but étant d'obtenir un champ thermique uniforme au niveau de la surface utile de l'éprouvette, nous avons conçu un inducteur spécifique du type *pancake* [4]. Une mesure par thermographie infrarouge a été utilisée pour caractériser le champ thermique obtenu. Cette vérification a montré que l'inducteur spécifique permet de réduire l'écart de température à $\Delta T = \pm 20^\circ\text{C}$ au niveau de la zone utile dans un disque de diamètre 20 mm [4].

2.2 Conditions de chargement

A l'aide du dispositif expérimental présenté dans le paragraphe précédent, des essais de fissuration en fatigue oligocyclique à haute température ont été réalisés sous sollicitations biaxiales en charge ou en déplacement imposé à l'aide de capteurs LVDT à une fréquence égale à 1 Hz . Les capteurs LVDT permettent de mesurer l'amplitude de déplacement de l'éprouvette sans contribution de la rigidité de la machine. Ces capteurs sont montés au niveau des mors de la machine sur la face arrière du montage (côté inducteur). Des tiges en alumine ont été insérées entre les LVDT pour ne pas perturber le chauffage par induction, Figure 3.

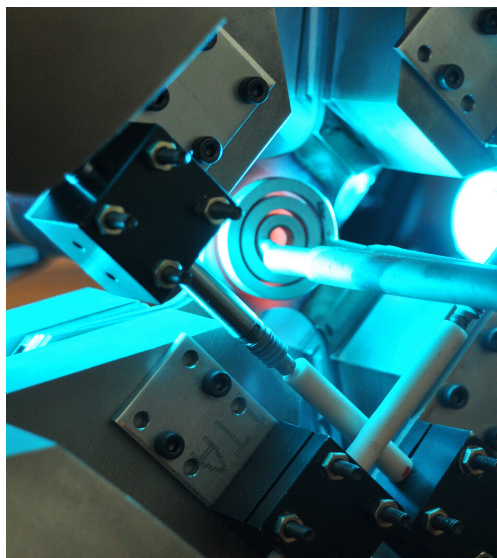


Figure 3. Inducteur et capteurs LVDT

On définit le taux de biaxialité en déplacement $R_U=U_1/U_2$ ou en effort $R_F=F_1/F_2$. Une première séquence sous sollicitation équibiaxiale, $R_U=U_1/U_2=1$ ou $R_F=F_1/F_2=1$, pour des essais pilotés en déplacement ou en charge respectivement, donne naissance à une fissure se propageant le long de la bissectrice de l'éprouvette correspondant à la direction d'entaille. Ensuite, un changement du taux de biaxialité entre les deux axes de la machine ($R_{U, F} \neq 1$), induit la bifurcation de fissure. C'est cette deuxième séquence qui permet l'étude de l'influence du taux de biaxialité sur la vitesse de fissuration. C'est la transition entre ces deux séquences à taux de biaxialité différents qui permettra ultérieurement l'étude de la bifurcation de fissure en condition de chargement multiaxial en plasticité généralisée, elle ne sera pas détaillée ici.

L'ensemble des conditions essais est décrit dans le tableau 1.

Tableau 1. Conditions des essais biaxiaux

	Seq 1	Seq 2	Seq 3	Seq 4
SB01	F1=F2=25 kN	F1=25 kN F2=15 kN		
SB02	F1=F2=20 kN	F1=28 kN F2=16 kN		
SB03	F1=F2=20 kN	U1=U2=0,1 mm	U1=0,2 mm U2=0,1 mm	
SB04	F1=F2=25 kN	U1=U2=0,2 mm		
SB05	F1=F2=13 kN	U1=U2=0,1 mm	U1=0,2 mm U2=0,1 mm	U1=U2=0,2 mm

2.3 Analyse des résultats de fissuration

Nous présentons figure 4 la dernière photo enregistrée à l'aide du microscope optique à la fin de chacun des essais. Les fissures obtenues présentent une large ouverture et une zone de plasticité mettant en évidence le chargement en plasticité généralisée. On observe en condition de cisaillement le développement d'un réseau de microfissures pour SB02, figure 4(c), et un important sillage plastique pour SB03, Figure 4(f).

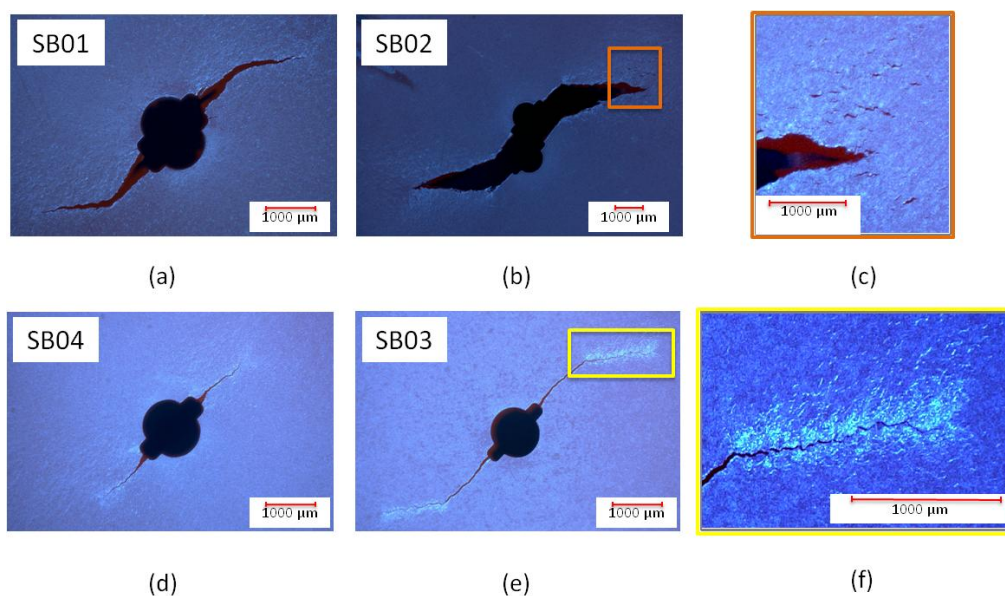


Figure 4. Fissuration sous sollicitation biaxiale en plasticité généralisée à haute température

Ces observations sont proches des mécanismes observés pour des essais de propagation de fissure en plasticité généralisée effectués sous sollicitations uniaxiales (éprouvettes de type SENT) à 900°C pour le même matériau (figure 5) [3,5].

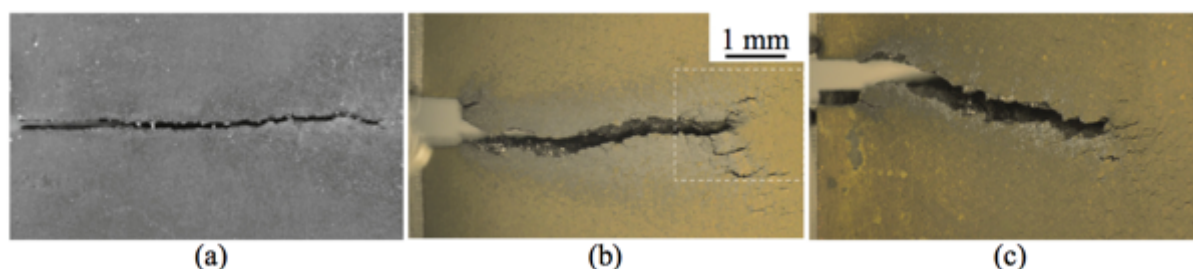


Figure 5. (a) $\Delta\varepsilon/2 = 0,0625\%$, (b) $\Delta\varepsilon/2 = 0,25\%$ et (c) $\Delta\varepsilon/2 = 0,45\%$

Fissuration sous sollicitation uniaxiale en plasticité généralisée à 900°C éprouvette SENT à $R\varepsilon=0$ [5]

Notons que les vitesses obtenues pour un chargement équi-biaxial correspondent aux faibles vitesses observées pour les essais en condition uniaxiales contrôlés en déformation. Dès que la phase de cisaillement commence, on observe dans tous les cas une nette accélération de la vitesse de propagation, Figure 6.

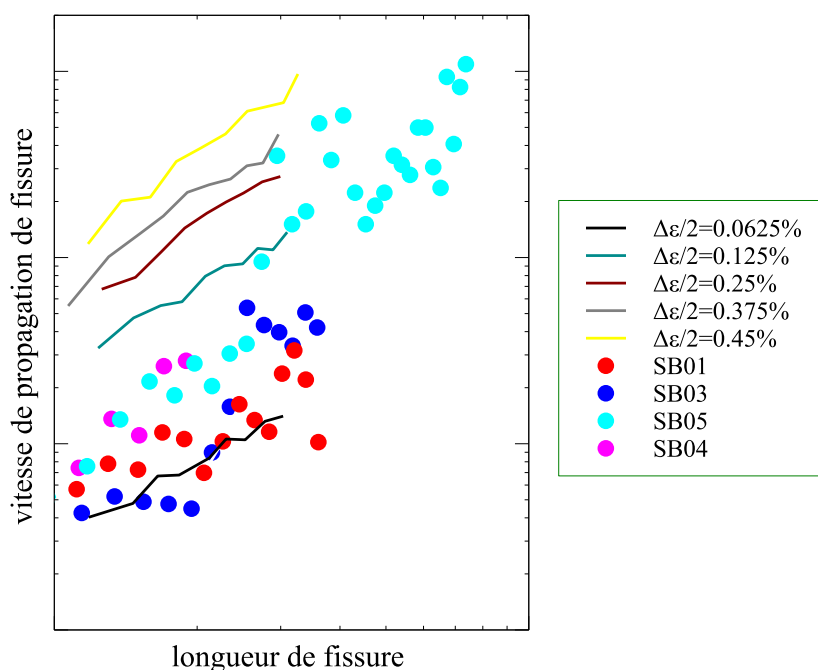


Figure 6. Comparaison des vitesses de fissuration expérimentales: résultats 2D (points) et résultats 1D (traits continus [3])

3 Analyse numérique par éléments finis

Nous menons une étude par éléments finis pour déterminer un modèle de propagation de fissure en conditions multiaxiales ainsi que les conditions mécaniques conduisant à la bifurcation de fissure en plasticité généralisée. Ces calculs sont effectués à l'aide d'un maillage EF 3D représentant la géométrie de l'éprouvette et de l'entaille sans représentation de la fissure. Le matériau est supposé homogène et

isotrope, son comportement étant modélisé à l'aide d'une loi élasto-visco-plastique à deux écrouissements cinématiques non-linéaires [6]. Une première séquence de préchauffage de l'éprouvette a été utilisée pour atteindre la température de consigne, $T=900^{\circ}\text{C}$, au niveau de la zone utile. Ce champ thermique numérique a été issu du champ expérimental obtenu par calibration thermique. Deux cycles de chargement mécanique suivent l'étape de préchauffage en maintenant le gradient de température constant. En première approche, toutes les séquences ont été simulées à effort imposé, les efforts correspondant aux efforts mesurés expérimentalement. Pour les séquences à déplacement imposé cette hypothèse n'est pas critique pour un faible nombre de cycles simulés. A partir de ces simulations cycliques, on applique un post-processeur permettant de définir:

- les énergies de déformations élastique et inélastique à chaque point de Gauss d'une zone située en fond d'entaille w_e et w_p
- de déterminer l'énergie moyenne associée à ce volume d'analyse : \bar{w}_e et \bar{w}_p
- de déduire la vitesse de propagation de fissure associée :

$$1/\lambda da/dN = (\bar{w}_e a / \gamma_e)^{m_e} + (\bar{w}_p a / \gamma_p)^{m_p} [7].$$

où λ , γ_e , m_e , γ_p et m_p sont les paramètres du modèle. Ce modèle a été développé afin de décrire la transition entre faible et forte plasticité pour des essais de fatigue oligocyclique. Il a été validé sur des éprouvettes de type SENT, donc en conditions de sollicitation uniaxiales, pour le matériau de l'étude [5]. Un des paramètres importants de cette analyse est lié au choix de la zone d'analyse des grandeurs énergétiques fixée ici à $250 \mu\text{m}$.

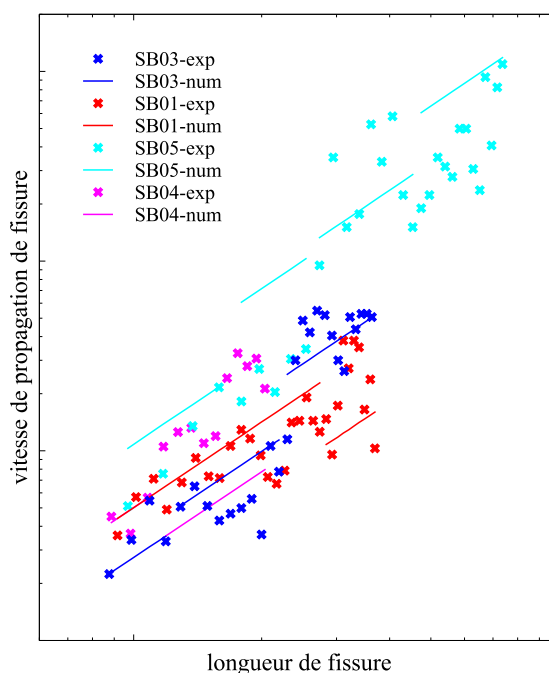


Figure 7. Vitesses de fissuration expérimentales et numériques

L'application directe du modèle montre, que sans réajuster les paramètres du modèle, les vitesses de fissuration sont correctement estimées, Figure 7, en condition équi-biaxiale ou en condition de cisaillement pour des essais pilotés en déplacement ou en effort imposés. Ceci valide globalement la démarche initialement proposée pour un calcul macroscopique [7]. D'un point de vue de la simulation, il conviendra de prendre en compte de la rigidité de la machine afin de simuler plus précisément les séquences expérimentales à déplacement imposé.

4 Conclusion

Une méthodologie expérimentale originale, permettant de réaliser des essais de fissuration en fatigue oligocyclique sous sollicitations biaxiales à haute température, a été présentée dans cet article. Ainsi, des essais de fissuration sous chargement équibiaxial ou en condition de cisaillement pour des essais pilotés en déplacement ou en effort imposés ont pu être réalisés. La comparaison avec des essais uniaxiaux a montré la cohérence des mécanismes de fissuration et des vitesses de propagation de fissure observés sous sollicitation biaxiale.

Enfin, un post-processeur EF permet de décrire efficacement la vitesse de fissuration en estimant l'énergie de déformation en fond d'entaille dans un volume de taille finie.

Remerciements

Cette étude est effectuée dans le cadre du projet ANR SEMAFOR (ANR-14-CE07-0037) porté par Vincent Chiaruttini (*ONERA*) que nous remercions. Le projet ANR SEMAFOR réunit l'*ONERA*, *Mines ParisTech*, *LMT Cachan* et *Safran* que nous remercions également.

Références

- [1] Huaidong Wang, Fissuration par fatigue sous sollicitations multiaxiales, rapport d'avancement du programme de recherches concertées (PRC) « Structures Chaudes », Centre des matériaux - Mines Paristech, 2013
- [2] Flora Salgado Goncalves, Caractérisation expérimentale et modélisation des interactions entre fissures et perçage multiples à haute température en élastoplasticité généralisée ou confinée, Thèse de doctorat, Mines ParisTech, 2013
- [3] Vincent Fontanet, Propagation et bifurcation de fissures en plasticité généralisée, rapport de stage du Master MAGIS, Centre des Matériaux - Mines ParisTech, 2015
- [4] M.Trabelsi, Rapport de première année du projet ANR-SEMAFOR, Thème A: Essais de fissuration en plasticité sous chargement thermomécanique de fatigue, Activités expérimentales du Centre des Matériaux, Juin 2016
- [5] V.Maurel, A.Köster, L.Rémy, M.Rambaudon, D.Missoum-Benziane, V.Fontanet, F. Salgado-Goncalves, A.Heudt, H.Wang, M.Trabelsi, "Fatigue crack growth under large scale yielding condition: the need of a characteristic length scale", *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 102, p. 184 - 201.
- [6] S. Declercq, Tech. rep., Snecma - Groupe Safran (1999).
- [7] V.Maurel, L.Rémy, F.Dahmen, N.Haddar, "An engineering model for low cycle fatigue life based on a partition of energy and micro-crack growth", *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31, no 5, p. 952-961.