

Fissuration en plasticité généralisée en fatigue multiaxiale

C. Le Goff^{1,2}, T. Zanchi¹, P. Arnaud¹, J. Besson¹, V. Maurel¹

¹ Centre des matériaux, Université Paris Saclay, France, (camille.le_goff, pierre.arnaud, jacques.besson, vincent.maurel)@minesparis.psl.eu

² Safran Tech, Digital Sciences & Technologies Department, Rue des Jeunes Bois, Châteaufort, 78114 Magny-Les-Hameaux, France

Résumé — La propagation de fissure, en fatigue oligocyclique, dans des conditions de plasticité généralisée, et sous sollicitation multiaxiale de traction/torsion, est analysée. Un dispositif expérimental dédié à la traction/torsion a été développé pour des hautes températures. Des simulations numériques, qui intègrent une représentation explicite de la fissure et qui font appel à un modèle de fissuration basé sur la partition de l'énergie de déformation entre une contribution élastique et plastique, ont été réalisées. L'objectif est de proposer un modèle de propagation basé sur une analyse non locale de l'énergie de déformation.

Mots clefs — fatigue multiaxiale, plasticité généralisée, fissuration, remaillage conforme

1. Introduction

Du fait des différentes phases lors du vol d'un lanceur spatial, les organes de combustions subissent une sollicitation thermique anisotherme en condition de gradient. L'analyse du comportement par éléments finis met en évidence des zones de sollicitation multiaxiale de type traction/torsion. Cette sollicitation thermomécanique induit une forte plasticité ce qui peut conduire en théorie à l'apparition de fissure pour des amplitudes importantes de déformation plastique. L'objectif de l'étude est de modéliser la vitesse de propagation d'une fissure éventuelle. Pour cela une démarche essai/calcul est mise en place afin de déterminer le chemin et la force motrice d'avancée de la fissure.

2. Méthode expérimentale

Le montage développé est un montage de traction/torsion adapté sur une machine de type Instron ElectroPuls E10000. Ce montage, inspiré de la littérature [2], permet de solliciter une éprouvette en traction et en torsion. Le couple de torsion est transmis à l'aide d'un V par contact, les jeux sont annulés par serrage. Ce montage a été dimensionné pour des essais dans un four et est réalisé en matériaux résistant aux hautes températures (IN100). Des boîtes à eau ont notamment été ajoutées afin de permettre de refroidir le montage, Figure 1.

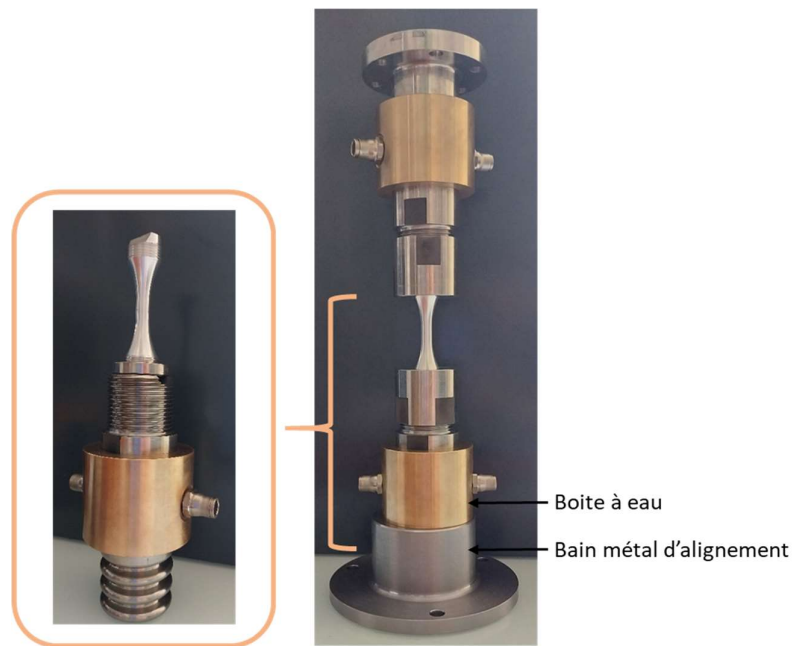


Figure 1 : Montage de traction/torsion [9]

L'éprouvette (Figure 2) a été dimensionnée en forme de sablier cylindrique et creuse. Les dimensions retenues sont le fruit d'un compromis entre la maximisation des valeurs de contraintes et la limitation du risque de flambage. La paroi de l'éprouvette est mince et le rayon extérieur de la zone utile est de 9 mm. Enfin, une entaille est réalisée au milieu de la zone utile pour permettre de générer une amorce de fissure. Cette entaille est cylindrique de diamètre 0.4 mm.

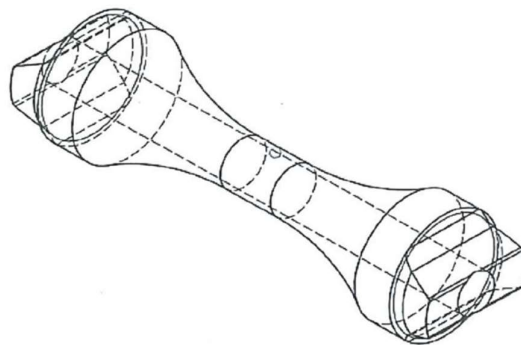


Figure 2 : Géométrie de l'éprouvette de traction/torsion

3. Méthode numérique

3.1 Modélisation par éléments finis de l'éprouvette

L'éprouvette est en alliage d'aluminium. La loi matériau choisie décrite par l'équation (1) est une loi de type Chaboche avec un écrouissage cinématique.

$$f(\underline{\sigma}) = J(\underline{\sigma} - \underline{X}) - R_0 \quad \text{avec} \quad \underline{\dot{X}} = \frac{2}{3} C \underline{\dot{\epsilon}}_p - D \underline{X} \quad (1)$$

Les paramètres sont décrits dans le Tableau 1 et correspondent aux propriétés à température ambiante.

E (MPa)	ν	R_e (MPa)	D (MPa)	C (MPa)
70 000	0.32	250	300	80 000

Tableau 1 : Paramètres de la loi matériau

L'éprouvette est entaillée et la fissure d'une longueur a est modélisée explicitement par remaillage conforme [4] grâce à l'outil Zcracks de la suite Zset, Figure 3.

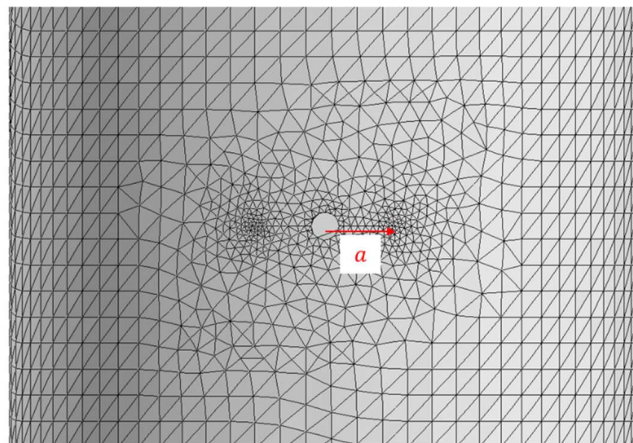


Figure 3 : Modélisation numérique de l'éprouvette, détail de la zone utile

Une étude préliminaire a montré que l'utilisation d'éléments finis linéaires ou quadratiques lors de la modélisation de la fatigue multiaxiale en condition de forte plasticité engendre de fortes oscillations de contrainte en pointe de fissure. L'utilisation d'éléments finis tétraédriques mixtes augmentés permet d'éviter cet effet de 'damier' en condition de forte plasticité, comme illustré dans la Figure 4. En effet, ces éléments mixtes possèdent quatre degrés de liberté trois en déplacement et un en pression, ils permettent d'assurer une convergence en déplacement et en pression. La Figure 4 montre aussi une bonne évaluation des contraintes avec un maximum de pression hydrostatique.

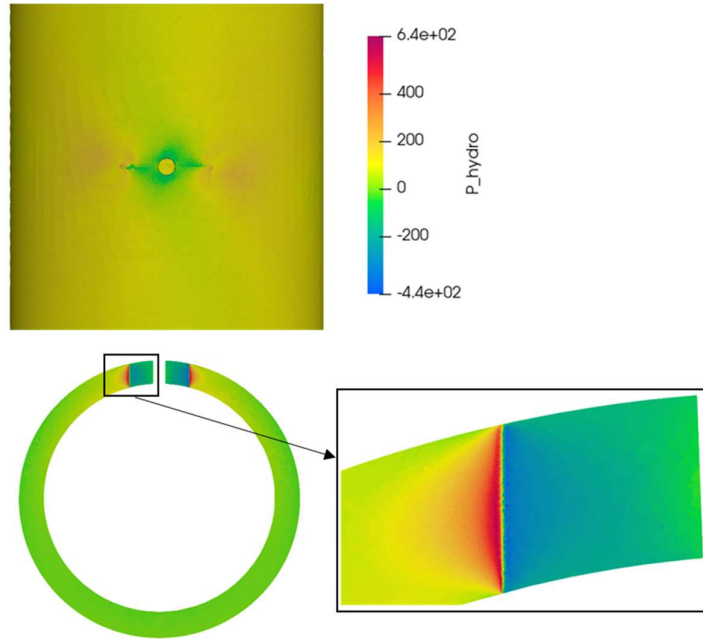


Figure 4 : Champs de pression hydrostatique avec des éléments mixtes

De plus, pour obtenir une évaluation des contraintes en plasticité la taille de maille doit être suffisamment raffinée. Pour cela, il faut mailler de façon suffisamment fine la zone plastique dont la taille peut être évaluée par l'équation (2) :

$R_p = \frac{1}{2} \frac{J}{\sigma_y} = \frac{1}{2} \frac{K^2}{E \sigma_y} \text{ avec } \sigma_y = \frac{1}{2} (\sigma_{0.2} + R_m)$	(2)
---	-----

On estime un rayon plastique de $R_p = 12 \mu\text{m}$ pour une taille de la fissure de 1 mm pour une sollicitation en déplacement de $\varepsilon_{yy} = 0.3\%$ de déformation. Pour limiter le temps de calcul, on choisit une taille de maille de 10 μm .

3.3. Modèle de propagation de fissure basé sur la partition de l'énergie de déformation

L'avancée d'une fissure peut être décrite par différentes approches : approche locale, globale et mixte locale/globale [3]. On peut citer les modèles de zone cohésive développés par Dugdale [5] et Barenblatt, [1] afin de décrire l'amorçage et la propagation de fissure dans des situations complexes. Ces modèles s'appuient sur des critères locaux en contrainte et des critères globaux en énergie. La méthode XFEM [8] permet de décrire explicitement la forme et la propagation des fissures en 3D. Les approches locales et mixtes présentent l'inconvénient d'être très coûteuses en temps de calcul. Les approches globales sont basées sur la théorie de Griffith, l'énergie consommée est la différence entre l'état énergétique avant et après fissuration [6]. Le taux de restitution d'énergie G, représente l'énergie nécessaire pour faire progresser la fissure. La plupart des modèles avec une approche globale sont soumis à des hypothèses de plasticité confinée, néanmoins, certains modèles sont valables dans le cadre de la plasticité généralisée.

V. Maurel et al a notamment développé un modèle basé sur la partition de l'énergie de déformation valide en plasticité généralisée [7]. Cette méthodologie, appropriée tant pour les fissures courtes que pour les fissures longues, repose sur la notion selon laquelle la propagation de la fissure s'effectue par le biais

de la partition de l'énergie de déformation élastique et de l'énergie de déformation plastique. Néanmoins, seule une partie de l'énergie de déformation plastique contribue à l'avancée de fissure. En effet, l'énergie de déformation plastique est aussi dissipée par auto-échauffement, en plasticité et en endommagement. Ce modèle énergétique est décrit par l'équation (3) :

$\frac{da}{dN} = \lambda \left[\left(\frac{w_e a}{\gamma_e(l_c)} \right)^{m_e} + \left(\frac{w_p a}{\gamma_p(l_c)} \right)^{m_p} \right]$	(3)
--	-----

avec a la longueur de la fissure, w_e et w_p l'énergie non local élastique et plastique, γ_e , γ_p , m_e et m_p , les paramètres du modèle et λ un paramètre pour assurer l'unité de la vitesse. La fissure est insérée en 3D et est propagée par l'outil Zcracks grâce à une technique de remaillage conforme [4]. L'approche non-locale énergétique dépend du positionnement et de la taille de la boîte l_c choisis où sont calculés les énergies élastiques et plastiques, Figure 5. Maurel et al [7] ont montré que pour une demi-sphère en avant du front de fissure, la qualité de l'analyse en vitesse est indépendante de la longueur l_c .

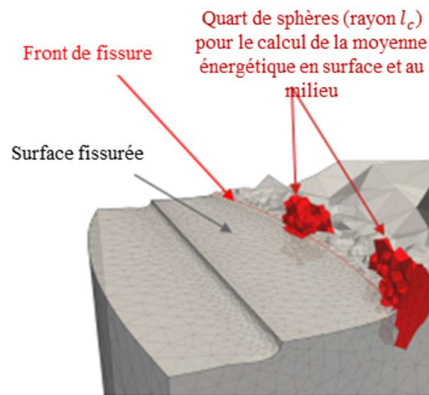


Figure 5 : Visualisation des boîtes en pointe de fissure [7]

4. Résultats et Discussion

4.1 Analyse expérimentale

L'éprouvette est pré-fissurée en fatigue uniaxiale jusqu'à une longueur initiale de fissure de 1 mm. A partir de cette pré-fissure, on réalise un essai de fatigue multiaxial proportionnel. L'essai a été piloté en déplacement axial et angulaire correspondant respectivement à une amplitude de déformation de $\Delta\varepsilon_{yy} = 0.4\%$ et de $\Delta\varepsilon_{\theta} = 0.02\%$, la fréquence de sollicitation est fixée à 2 Hz pour un rapport de charge nul. La Figure 6 (a) montre que la fissure droite dérive du plan horizontal d'un angle $\theta = 15^\circ$, la fissure gauche reste horizontale. Cela met en évidence une compétition entre les deux directions de sollicitations.

4.2 analyse numérique

Afin d'étudier plus largement l'influence de l'intensité et du type de sollicitation sur la propagation de fissure, une étude numérique a été réalisée à partir de la modélisation décrite précédemment. Pour trois

longueurs de fissures, 1mm, 1.5mm et 2mm, l'éprouvette a été soumise à une sollicitation en déplacement axial correspondant à une amplitude de déformation de 0.4%. Pour étudier l'influence de la sollicitation multiaxiale, pour un cas de traction/torsion proportionnelle en phase, une étude a été réalisée pour les même trois longueurs de fissures et pour une sollicitation en déplacement axial d'une amplitude de 0.4% et en déplacement angulaire sur une amplitude de 0.02% à 2 Hz avec un rapport de charge nul. La Figure 6 présente la comparaison du champ de déformation ϵ_{yy} pour cette sollicitation multiaxiale entre essai et modèle. Au cours de la propagation de la fissure, on observe expérimentalement que la symétrie du « papillon plastique » est modifiée par l'orientation de la fissure, Figure 6 (a). En absence de déviation de fissure, le modèle numérique n'indique pas de perte de symétrie malgré la sollicitation multiaxiale, Figure 6 (b).

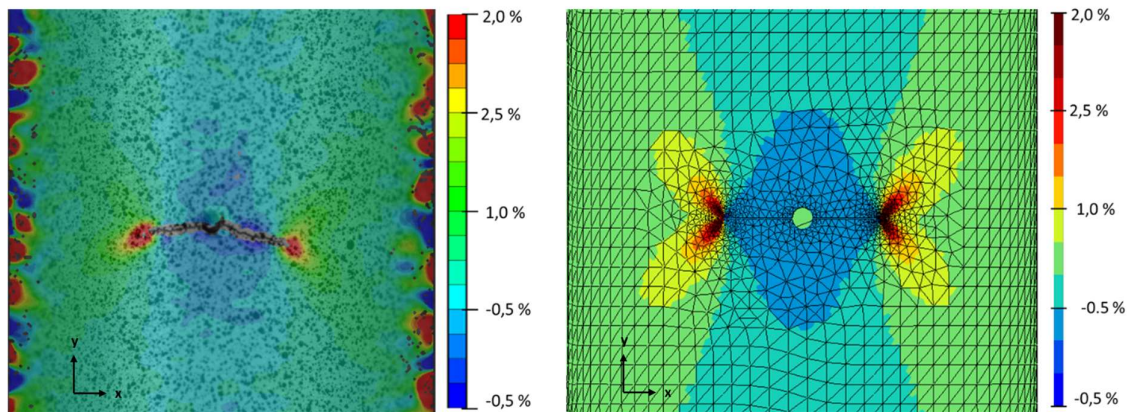


Figure 6 : Champs de déformation ϵ_{yy} pour $a = 1.5$ mm (a) expérimental (b) numérique

Dans l'objectif d'avoir une approche quantitative, le calcul numérique des énergies est réalisé suivant la procédure présentée précédemment. Pour toutes les simulations, l'énergie plastique est plus importante d'un ordre de grandeur que l'énergie élastique, Figure 7. Comme attendu, les énergies augmentent rapidement avec l'accroissement de la taille de fissure. En effet, avec la diminution de la section efficace de l'éprouvette les contraintes se concentrent et l'énergie en front de fissure augmente sensiblement. Il est à noter également que l'énergie plastique augmente plus vite que l'énergie élastique. Ainsi au travers du modèle présenté c'est l'énergie plastique qui pilote principalement la propagation de la fissure. Les énergies en traction torsion sont plus importantes d'un facteur deux par rapport aux énergies en traction simple.

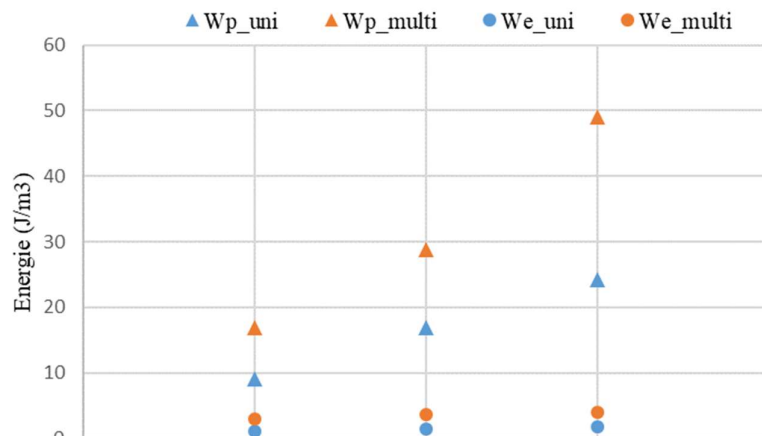


Figure 7 : Influence de la taille de fissure et de la sollicitation sur la propagation de fissure

5. Conclusion

L'approche expérimentale a été réalisée avec succès en utilisant un montage de traction-torsion original, tandis qu'un modèle FEM a été développé pour l'analyse numérique. Les résultats expérimentaux ont montré la forte influence de la multiaxialité sur le chemin de fissuration. Les simulations numériques mettent en évidence le rôle prépondérant de l'énergie plastique en condition de traction/torsion. En conclusion, cette étude fournit une compréhension approfondie du comportement de la fissuration sous des sollicitations uniaxiales et multiaxiales en plasticité généralisée, ouvrant la voie à une meilleure compréhension des mécanismes de propagation de fissures dans des matériaux soumis à des charges complexes et sévères.

Références

- [1] G. Barenblatt, The mathematical theory of Equilibrium cracks in brittle fracture, *Advances in Applied Mechanics*, p55-p129, 1962
- [2] T. Bonniot, Fissuration par fatigue en mode mixte non proportionnel des rails de chemins de fer : De l'étude expérimentale à la mise en œuvre d'un modèle, Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, 2019.
- [3] P. Bouchard, Contribution à la modélisation numérique en mécanique de la rupture et structures multimatériaux. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, 2000.
- [4] V. Chiaruttini, D. Geoffroy, V. Riolo, M. Bonnet, An adaptive algorithm for cohesive zone model and arbitrary crack propagation, *European Journal of Computational Mechanics*, p208-p218, 2012
- [5] D. Dugdale, Yielding of steel sheets containing slits, *Journal of Mechanics and Physics Solids*, p104-p104, 1960
- [6] A. Griffith, The Phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. Trans. Roy. Soc. Of London*, p163-p197, 1920
- [7] V. Maurel, A. Koster, L. Remy, M. Rambaudo, 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*, p184-p201, 2017.
- [8] R. Ribeaucourt, M.-C. Baietto-Dubourg, A. Gravouil, A new fatigue frictional contact crack propagation model with the couple X-FEM/LATIN method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, p3230-p3247, 2007
- [9] T. Zanchi, Mémoire d'alternance au Centre des Matériaux de Mines ParisTech, 2021