

## Post-doc de 12 mois au Laboratoire de Mécanique des Solides, à partir de Novembre 2019

LMS, CNRS, Ecole Polytechnique, Palaiseau, sous la direction de Véronique Doquet

### Fissuration par fatigue en mode mixte I + III non proportionnel



#### Problématique

Les lignes d'arbres des systèmes de propulsion des navires ou sous-marins, tubes d'acier supportés par des paliers (au niveau desquels s'exercent des efforts de contact avec de petits débattements à l'origine d'un amorçage de fissures par fretting-fatigue), sont également soumis:

- en "régime de croisière" à un nombre très élevé ( $\approx 10^9$  cycles) de cycles de flexion alternée, combinés à un couple de torsion et à une compression axiale (poussée, en marche avant) quasi constants, se traduisant, en présence d'une fissure circonférentielle transversale par un chargement de mode I à rapport  $R < -1$  avec superposition d'une composante statique de mode III. En présence d'une fissure semi-elliptique transversale, le chargement statique est en mode II + III, en proportions variables le long du front.

- en régime transitoire (changements d'allure, de sens de propulsion, fluctuations hydrodynamiques...) à des cycles de torsion et compression-traction axiale plus ou moins en phase dont l'amplitude est plus grande et le nombre plus faible ( $10^3$  à  $10^5$ ).

Globalement, une fissure transversale, serait soumise à un chargement non proportionnel composé d'une alternance de petits cycles de mode I + mode III statique entrecoupés, tous les  $10^4$  à  $10^5$  cycles, d'un grand cycle de mode I+ III en phase.

On souhaite pouvoir prévoir les trajets et cinétiques de propagation des fissures dans ces arbres, à partir de l'évolution calculée des facteurs d'intensité de contrainte  $K_I$  et  $K_{III}$

### Contexte scientifique

De multiples travaux menés à partir des années 80 suite à des ruptures d'arbres de turbine à gaz de centrales électriques ont montré qu'un chargement statique de mode III augmente le  $\Delta K$  seuil de fissuration par fatigue en mode I et en réduit la vitesse, à cause d'un accroissement de la rugosité des fissures (facettes d'autant plus déversées que  $K_{III}$  augmente) et des effets de fermeture associés [1-3]. Il en est de même d'un mode II statique [17] dont l'effet s'avère prévisible par des simulations prenant en compte la rugosité des fissures [10].

Des effets très importants de la rugosité et du frottement des lèvres de fissure sur la vitesse de fissuration par fatigue en mode III ont été mis en évidence. Ces effets sont amplifiés ou atténués par une contrainte normale, selon son signe [1,4]. Seul la valeur effective de  $\Delta K_{III}$ , tenant compte des effets de contact et frottement et généralement bien inférieure à la valeur "nominale" calculée pour une fissure lisse, permet de rationaliser les évolutions de la vitesse de propagation. Paradoxalement, pour les fissures courtes, une compression normale, en accentuant l'usure des aspérités des lèvres de fissure semble abaisser le seuil de propagation coplanaire en mode III [15]. La fissuration en mode III s'avérant plus rapide qu'en mode I, au dessus du  $\Delta K$  pour lequel les courbes cinétiques des deux modes s'intersectent, une propagation coplanaire en mode III au lieu de la bifurcation prévue par les critères classiques (contrainte tangentielle maximale, taux de restitution d'énergie maximal, critère de symétrie locale...) est possible, ce dont le critère de vitesse maximale [4,5] permet de rendre compte. L'application en pointe de fissure d'un modèle d'endommagement par fatigue en cisaillement (identifié à partir d'essais de torsion alternée), après un calcul élasto-plastique (nécessitant une loi d'érouissage cyclique du matériau, identifiée à partir des mêmes essais), peut permettre de prévoir la vitesse de propagation en mode III à fort  $\Delta K_{III}$  [7].

Contrairement à la vitesse de fissuration en mode I, la vitesse en mode III (tout comme en mode II) est très peu affectée par le rapport de charge et que les exposants des lois de Paris de mode II et III sont généralement plus élevés que celui de mode I [4-6] de sorte qu'utiliser, pour les chargements proportionnels, une loi cinétique de mode I (qui dépend du rapport R et de  $\Delta K$  avec l'exposant de mode I) avec un  $\Delta K_{\text{équivalent}}$  combinant les contributions des différents modes pour prévoir la vitesse de propagation en mode mixte n'en garantit pas une estimation fiable

Les chargements de mode mixte non-proportionnels posent deux problèmes supplémentaires: lorsque  $K_I$  et  $K_{III}$  évoluent indépendamment, il n'existe plus de direction de propagation où la fissure retrouve une sollicitation de mode I ou de mode III purs et il faut donc tenir compte des couplages mentionnés plus hauts. D'autre part, les amplitudes  $\Delta K_I$ ,  $\Delta K_{III}$  et rapports de charge  $R_I$  et  $R_{III}$  ne suffisent plus à prévoir l'évolution des fissures: la forme du trajet de chargement ( $K_I(t)$ ,  $K_{III}(t)$ ) joue également sur le contact-frottement des lèvres et sur la plasticité cyclique en pointe de fissure, qui contrôle la vitesse de propagation [6-8]. Il est donc important de caractériser la fissuration sous des sollicitations aussi proches que possible des sollicitations en service, non seulement en termes d'amplitude et valeur moyenne, mais aussi d'évolution temporelle. La connaissance d'une loi d'érouissage cyclique du matériau et de critères d'endommagement par fatigue de type "plan critique" à appliquer en pointe de fissure, après un calcul élasto-plastique, peut permettre de prévoir

les effets du trajet de chargement sur les trajets et cinétiques de fissuration [8,12]. En outre, le couplage des écoulements plastiques associés aux modes d'ouverture et de cisaillement en pointe de fissure jouant un rôle important: (un rochet en ouverture de fissure en mode I + II [12] ou I + III [13] réduit progressivement les effets de contact-frottement) il est bon de pouvoir l'analyser par des simulations éléments finis.

### Etude expérimentale et numérique prévue

On utilisera des éprouvettes cylindriques comportant une entaille circonférentielle pré-fissurées en traction répétée, à l'aide d'une machine de traction-compression ( $\pm 100$  KN) + torsion ( $\pm 600$  Nm). Les essais seront suivis d'examen fractographique (microscope optique numérique pour reconstruire la topographie 3D, + MEB pour une analyse fine des mécanismes (présence de stries de mode I, traces de frottement, usure...). On étudiera d'abord l'effet d'un mode III statique sur le seuil et la cinétique de fissuration en mode I à faible  $\Delta K_I$  (gamme représentative des valeurs calculées en "régime de croisière") et rapport de charge  $< -1$  puis l'effet d'une traction ou d'une compression normale statique sur la fissuration en mode III alterné, afin d'établir une courbe intrinsèque  $da/dN - \Delta K_{III}^{\text{effectif}}$ . On analysera les trajets de fissuration observés (rationalisables ou non par le critère de vitesse maximale? un autre critère?). On étudiera enfin la fissuration en mode I + III cycliques, sous des chargement représentatifs de ceux rencontrés en service. A partir de l'analyse des trajets et cinétiques de fissuration en relation avec les évolutions de  $K_I^{\text{effectif}}$ ,  $K_{III}^{\text{effectif}}$  on tentera de dégager une approche prédictive.

Il pourra s'avérer nécessaire, pour prévoir (par un calcul éléments finis en élasto-plasticité) la vitesse de fissuration en mode de cisaillement, comme dans [7], d'identifier, à l'issue d'essais de torsion alternée, une loi d'écrouissage cyclique (également utile pour estimer l'étendue de la zone plastique cyclique en pointe de fissure et s'assurer de rester en plasticité confinée) et un modèle d'endommagement en fatigue oligocyclique piloté par le cisaillement

### Références

- [1] F. Hourlier, A. Pineau, propagation of fatigue cracks under polymodal fatigue, Fat. Fract. Engng Mat. Struct 5 n°4, 1982, 287–302.
- [2] E.K. Tschegg, H.R. Mayer, M. Czegley, S.E. Stanzl, Crack face interactions and near threshold fatigue crack growth, Fat. Fract. Eng. Mat. Struct. 16-1 (1992) 71-83
- [3] M. A. Fonte, M. Freitas, Semi-elliptical fatigue crack growth under rotating or reversed bending combined with steady torsion, Fat. Fract. Eng. Mat. Struct. 20-6 (1997) 895-906
- [4] Tschegg E.K., Stanzl S.E., The significance of sliding mode crack closure on mode III fatigue crack growth. In: Basic questions in fatigue 1, Fong & Fields ed., ASTM STP 924, 1988, 214-232
- [5] Brown M.W. Hay E. Miller K.J. Fatigue at notches subjected to reversed torsion and static axial loads, Fat. Fract. Eng. Mat. Struct. 8, 1985, 243.
- [6] A material and environment-dependent criterion for the prediction of fatigue crack paths in metals, V.Doquet, G.Bertolino, Engineering Fracture Mechanics, Volume 75, N°11, July 2008, Pages 3399-3412

- [7] 3D investigation of mode II + III fatigue crack growth in rail steel, Th. Bonniot, V. Doquet, S.H. Mai, à paraître dans International Journal of Fatigue <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.01.010>
- [8] F. Fremy, S. Pommier, M. Poncelet, B. Raka, E. Galenne, S. Courtin, J.C. Le Roux. Load path effect on fatigue crack propagation in I + II+ III mixed mode conditions, Int. J. Fatigue, 62, 2014,104–118.
- [9] V. Doquet, M. Abbadi, Q.H. Bui, A. Pons, Influence of the loading path on fatigue crack growth under mixed-mode loading, Int. J. Fracture, 2009, 159, 219-232.
- [10] V. Doquet, Q.H. Bui, A. Constantinescu, Plasticity and asperity-induced fatigue crack closure under mixed-mode loading, Int. J. Fatigue, 32-10, 2010, 1612-1619.
- [11] Local approach to fatigue cracks bifurcation, V.Doquet, G.Bertolino, Int. Journal of Fatigue, Volume 30, N° 5, May 2008, 942-950
- [12] Fatigue crack growth under non-proportional mixed-mode loading in ferritic-pearlitic steel. V.Doquet, S.Pommier, Fat. Fract. Eng. Mat. Struct. 27(11), 2004, 1051-1060
- [13] M Akama and A Kiuchi, Long co-planar mode III fatigue crack growth under non-proportional mixed-mode loading in rail steel, Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit 226(5) 2012, 489–500
- [14] M.A. Ritter, M.O. Ritchie, On the calibration, optimization and use of d.c. electrical potential methods for monitoring mode III crack growth in torsionally loaded samples, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & structures 5. No. 1.(1982) 91-99
- [15] Tarantino MG, Beretta S, Foletti S and Lai J. A comparison of mode III threshold under simple shear and RCF conditions. Engng Fract Mech; 78 n°8 (2011) 1742–1755.
- [16] M.G. Tarantino, S. Beretta, S. Foletti, I. Papadopoulos, Experiments under pure shear and rolling contact fatigue conditions: Competition between tensile and shear mode crack growth
- [17] Stanzl S, Czegley M, Mayer HR, Tschegg E. Fatigue crack growth under combined mode I and mode II loading. In: Wei RP, Gangloff RP, editors. Fracture mechanics: perspectives and directions. Philadelphia: ASTM; 1989. p 479–96 [ASTM STP 1020].

**Les candidats (de nationalité française compte tenu du contexte Défense) devront être titulaires d'un doctorat en mécanique des matériaux ou des structures**, avec une expérience significative des essais mécaniques et des simulations par éléments finis. CV, liste de publications et éventuellement lettre(s) de recommandation sont à adresser à [veronique.doquet@polytechnique.edu](mailto:veronique.doquet@polytechnique.edu)