

Etude numérique de la propagation des fissures de fatigue dans un tube fissuré en acier inoxydable austénitique 304L

M. Azougagh¹, A. Nebgui¹, O. Oussouaddi¹, M. Haterbouch², A. Zegloul³

1. LEM2A, Faculté des Sciences de Meknès, Université Moulay Ismaïl, Maroc

2. M2I, ENSAM - Meknès, Université Moulay Ismaïl, Maroc

3. LEM3 UMR CNRS N°7239, Université de Lorraine - Metz, 57045, France

Résumé

Le but de ce travail est la modélisation de la propagation des fissures de fatigue dans un tube en acier inoxydable austénitique de type 304L soumis à une pression interne uniforme. Les fissures circonférentielles envisagées sont soit débouchant aux surfaces intérieure et extérieure du tube, soit débouchant à la surface moyenne de celui-ci. Pour quantifier l'endommagement par fatigue, nous adoptons un modèle associant la densité d'énergie et le modèle du plan critique. Le comportement du matériau sous chargement cyclique est modélisé en utilisant le modèle de Lemaitre et Chaboche qui associe l'écrouissage isotrope et cinématique non linéaire. Ce modèle est capable de décrire l'effet de rochet.

Le code de calcul par éléments finis ABAQUS a été utilisé lors de cette étude. Dans une première étape, une étude préliminaire qui s'inscrit dans le cadre de la mécanique linéaire élastique de la rupture a permis de calculer le facteur d'intensité de contraintes pour différents chargements. Dans une seconde étape, où le comportement est élastoplastique, nous avons déterminé la vitesse de propagation des fissures de fatigue. L'influence du rapport de charge et des surcharges sur la vitesse de propagation de fissure a été discutée.

Mots clefs : *Propagation de fissure, Fatigue oligocyclique, Acier inoxydable 304L, FEM*

1. Introduction

Grace à son excellente résistance à la corrosion et ses bonnes propriétés mécaniques, l'acier inoxydable austénitique de type 304L est très utilisé dans les domaines de l'aéronautique, de l'industrie automobile, dans le circuit de refroidissement des centrales nucléaires, etc.

La fatigue ou l'endommagement par fatigue est souvent décomposé en trois stades dont l'importance dépend du matériau et des caractéristiques des sollicitations. Le premier stade est celui de l'amorçage d'une fissure ou plusieurs microfissures de fatigue à partir d'un défaut géométrique ou métallurgique conduisant à une concentration locale de déformation ou de contrainte ; le second correspond à la phase de propagation des fissures

dans l'éprouvette et enfin la phase de la rupture brutale. Sous l'effet des sollicitations appliquées, la durée de vie relative de matériau, qui représente le nombre de cycle à l'amorçage et le nombre de cycle à la propagation de fissure, dépend du type de la fatigue (LCF, HCF). Andrew et al [1] ont étudié la vitesse de propagation de fissure sur deux nuances d'acier à pipe X52 et X100. Les essais ont été réalisés sous les conditions d'une pression d'hydrogène variant de 1,7 MPa à 48 MPa et pour un rapport de charge $R=0,5$. Les auteurs ont montré que la vitesse de propagation des fissures de fatigue pour les deux nuances d'acier pipe était significativement plus élevée dans un environnement d'hydrogène pressurisé que dans l'air. Olusegun Fatoba [2] a étudié le comportement de fatigue oligocyclique de l'acier à pipeline API 5L X65 à température ambiante. L'auteur a montré que l'augmentation de l'amplitude de déformation totale a pour effet de diminuer la durée de vie de fatigue oligocyclique, et l'amplitude de contrainte augmente avec l'amplitude de déformation plastique.

Dans ce travail, on se propose d'étudier la propagation des fissures de fatigue dans un tube sous pression interne en utilisant la méthode des éléments finis. Le comportement du matériau, sous chargement cyclique, est modélisé en utilisant le modèle de Chaboche et Lemaître à écrouissage isotrope et cinématique non linéaire [3]. L'endommagement par fatigue est quantifié à l'aide du paramètre de fatigue de Jiang-Sehitoglu [4-6] et la vitesse de propagation est déterminée en adoptant la méthode de Miner.

Les résultats des simulations sont exploités pour établir des courbes de vitesse de propagation des fissures de fatigue et discuter ainsi l'influence du rapport de charge et des surcharges.

2. Modèle des éléments finis

2.1 Conception et maillage du tube

Pour des raisons de symétrie du tube et du chargement, nous avons adopté le modèle axisymétrique pour étudier la propagation de fissure. Le tube en acier 304L a un diamètre intérieur et une épaisseur respectivement égaux à 386.4 mm et 10 mm. Pour l'étude de la propagation des fissures, la longueur du ligament ($e - a$) est relativement importante et

une pré-fissuration a/e comprise entre 0.1 et 0.4 est considérée.

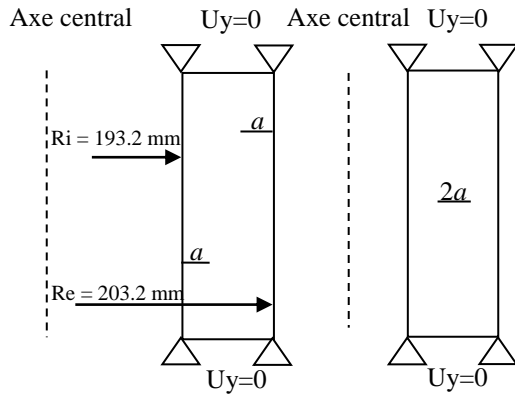


Fig.1 : Schéma du modèle axisymétrique du tube fissuré

Un maillage très fin est réalisé autour de la (des) pointe(s) de fissure avec des éléments de taille identique de $10\mu\text{m}$ nécessaire pour obtenir la convergence numérique des résultats. Le maillage dans le modèle axisymétrique contient 29770 éléments de type CAX4R et CAX3. Le maillage utilisé est montré sur la figure 2.

Le chargement appliqué est réparti uniformément sur la surface intérieure du tube. Les conditions aux limites dans le modèle axisymétrique 2D sont telles que le déplacement axial et les rotations radiales et orthoradiale sont prescrits dans les deux extrémités du tube

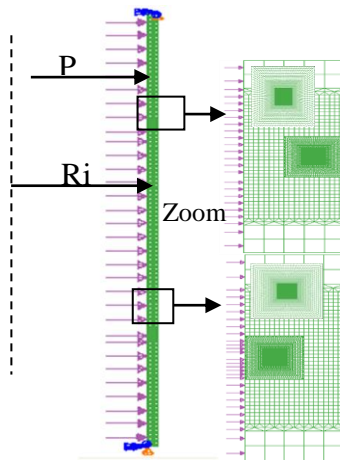


Fig. 2 : représentation du maillage de tube, du chargement et des conditions aux limites

2.2 Loi de comportement

Le modèle de chaboche-Lemaître à écrouissage isotrope et cinématique non linéaire [3], capable de reproduire divers comportements du matériau (adaptation élastique, accommodation plastique et effet de rochet) a été utilisé dans ce travail. La surface de charge du matériau est décrite par une fonction de charge qui dépend du tenseur des contraintes $\underline{\underline{\sigma}}$, de la limite élastique du matériau σ_e , de la variable d'écrouissage isotrope R et des variables d'écrouissage cinématique non linéaire $\underline{\underline{X}}$. La fonction de

charge s'écrit en utilisant le critère de Von Mises de la façon suivante :

$$f = J_2(\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{X}}) - R - \sigma_e \quad (1)$$

J_2 est le deuxième invariant du tenseur déviateur des contraintes.

La variable d'écrouissage isotrope R croît avec le taux de déformation plastique cumulée et sa loi d'évolution s'écrit :

$$\dot{R} = b(Q - R)\dot{\varepsilon}_{eq}^p \quad (2)$$

b et Q sont les paramètres de l'écrouissage isotrope qui dépendent du matériau. $\dot{\varepsilon}_{eq}^p$ est la vitesse de déformation plastique équivalente (cumulée).

Les variables d'écrouissage cinématique non linéaire sont contenues dans le tenseur $\underline{\underline{X}}$ dont l'évolution est décrite par

la relation :

$$\dot{\underline{\underline{X}}} = \frac{2}{3}C\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^p - \gamma\underline{\underline{X}}\dot{\varepsilon}_{eq}^p \quad (3)$$

C et γ sont des paramètres du matériau, $\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^p$ est le tenseur des vitesses de déformation plastique. Les paramètres du modèle de Chaboche pour l'acier inoxydable 304L sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés mécaniques et paramètres du modèle de Chaboche-Lemaître de l'acier 304L [7].

σ_y [MPa]	b	Q [MPa]	C [MPa]	γ
165	12	250	95000	7000

2.3 Modélisation de l'endommagement

Afin de quantifier l'endommagement dans le tube sous pression, nous avons utilisé le critère de Jiang et Sehitoglu [6], basé sur la densité d'énergie et la notion du plan critique et dans lequel un paramètre de fatigue FP est introduit. Ce paramètre d'endommagement est une somme pondérée des énergies associées aux sollicitations de traction / compression et de cisaillement :

$$FP = \langle \sigma_{\max} \rangle \frac{\Delta \varepsilon}{2} + J \Delta \tau \Delta \gamma \quad (4)$$

avec σ_{\max} la contrainte normale maximale au plan de fissure, $\Delta \varepsilon$ la variation de la déformation normale au plan de fissure, $\Delta \tau$ la variation de la contrainte de cisaillement et $\Delta \gamma$ la variation de la déformation par cisaillement. J est un paramètre de pondération prenant en compte le fait que le mode de rupture II (mode de cisaillement plan) est moins endommageant que le mode I (mode d'ouverture). Le plan de rupture correspond à la valeur maximale du paramètre de fatigue.

Le nombre de cycles à rupture par fatigue est déterminé à l'aide de la loi de Smith-Watson-Topper (SWT) [8] :

$$FP_{\max} = \frac{\sigma_f^2}{E} (2N_f)^{2b'} + \sigma_f' \varepsilon_f' (2N_f)^{b'+c'} \quad (5)$$

Le tableau 2 donne les valeurs des paramètres du matériau utilisés dans les simulations numériques.

Tableau 2 : Paramètres du modèle d'endommagement de l'acier 304L [9]

$E(\text{GPa})$	b'	c'	$\varepsilon_f'(\%)$	$\sigma_f'(MPa)$	J
198	-0,256	-0,494	0,302	3040	0,2

3. Résultats et discussion

3.1 Influence du rapport de charge

Les calculs de la vitesse de propagation ont été effectués sur un cycle stabilisé. La comparaison des vitesses de fissuration da/dN en fonction de ΔK_{equi} pour différents rapports de charge est montrée sur la figure 3. Il apparaît que la vitesse de propagation de fissure croît avec le rapport de charge pour un même ΔK_{equi} . Cette influence peut être expliquée par le phénomène de fermeture de fissure qui a été rapporté par Elber en 1971 [10].

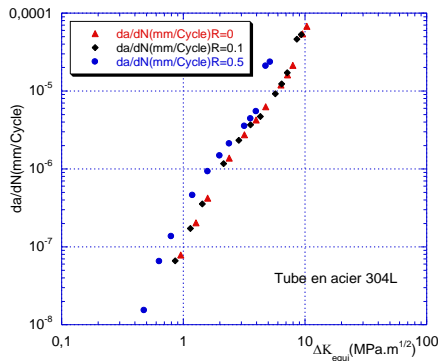


Fig.3 : courbe de propagation pour une fissure de longueur $a=3\text{mm}$ débouchant sur la surface extérieure du tube

3.2 Influence du rapport de surcharge

La figure 4 montre l'impact bénéfique de l'application d'une surcharge qui se traduit par la diminution de la vitesse de propagation par effet de retard et de fermeture de fissure et donc d'une augmentation de la durée de vie du tube sous pression.

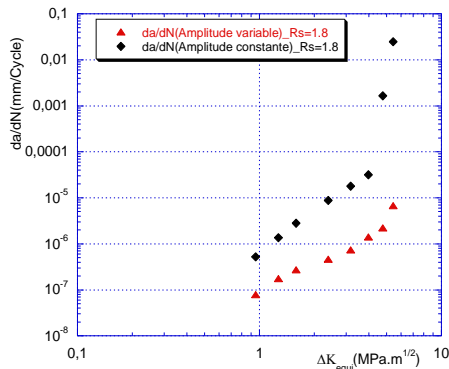


Fig. 4 : Influence d'une surcharge $R_s=1,8$ pour une fissure de longueur $a=3\text{mm}$ débouchant sur la surface extérieure du tube

4 Conclusion

Ce travail a porté sur la propagation de fissure de fatigue présente dans un tube en acier inoxydable 304L soumis à une pression interne uniforme. Une modélisation par éléments finis du chargement cyclique du tube fissuré sous pression a été développée. L'endommagement est quantifié à l'aide du paramètre de fatigue Jiang-Sehitoglu et le modèle de Miner a été utilisé pour calculer la vitesse de propagation de fissure.

Les simulations ont montré qu'il y a une influence bénéfique du rapport de charge et de surcharge sur la vitesse de propagation de la fissure. Cette influence est due à la présence d'un sillage plastique et est expliquée par le phénomène de fermeture pour le cas des rapports de charge, et par le phénomène de retard pour le cas de chargement variable.

Références

- [1] Andrew J. Slifka, Elizabeth S. Drexler, Nicholas E. Nanninga, Yaakov S. Levy, J. David McColskey, Robert L. Amaro, April E. Stevenson. *Fatigue crack growth of two pipeline steels in a pressurized hydrogen Environment*. Corrosion Science 78 (2014) 313–321.
- [2] Olusegun Fatoba, Robert Akid. *Low Cycle Fatigue Behaviour of API 5L X65 Pipeline Steel at Room Temperature*. Procedia Engineering 74 (2014) 279 – 286.
- [3] J. Lemaitre, J.L. Chaboche, *Mechanics of solid materials*, Cambridge University Press; 1990.
- [4] Sehitoglu H, Jiang Y. *Fatigue and stress analyses of rolling contact*. Technical Report, Materials Engineering-Mechanical Behavior, College of Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign 1992.
- [5] Y. Jiang, H. Sehitoglu, *Rolling contact stress analysis with the application of a new plasticity model*, Wear 191 (1996) 35–44.
- [6] Y. Jiang, H. Sehitoglu, *A model for rolling contact failure*, Wear 199;224:38–49.
- [7] Lynda Djimli, Lakhdar Taleb, Salim Meziani, *The role of the experimental data base used to identify material parameters in predicting the cyclic plastic response of an austenitic steel*, International Journal of Pressure Vessels and Piping 87 (2010) 177-186.
- [8] K.N. Smith, P. Watson, T.H. Topper, *A stress-strain function for the fatigue of metals*, J. Mater 5 (4) (1970) 767-776.
- [9] N. Luser, *Propagation par fatigue des fissures physiquement courtes dans un acier inoxydable de type 304L: rôle de la fermeture et de la plasticité*. Thèse de Doctorat : ENSMA, Poitiers, 2006.
- [10] W. Elber, *The significance of fatigue crack closure*. *Damage. Tolerance in Aircraft Structure*, ASME STP 486. Philadelphia, PA, 1971, pp. 230–242.