

# Compréhension des mécanismes d'amorçage en fatigue d'un acier à très haute résistance

Hayat ABDESSELAM<sup>a, b</sup>, T. F MORGENEYER<sup>a</sup>, J. CREPIN<sup>a</sup>,  
A-L.ROUFFIE<sup>b</sup>, A. SEROR<sup>c</sup>, L. TOURNADRE<sup>c</sup>

a MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des Matériaux, CNRS, UMR7633, 91003  
Evry, France

b Safran Tech, Pôle M&P, Rue des Jeunes Bois, Châteaufort, 78772 Magny les Hameaux,  
France

c Safran Aircraft Engines, Rond Point René Ravaud-Réau, 77550 Moissy-Cramayel, France

## Résumé

*Une grande dispersion de la durée de vie en fatigue est souvent observée pour la famille des aciers à très haute résistance (THR). Cette étude vise à comprendre les mécanismes d'amorçage et de propagation de fissure en fatigue pour un acier à très haute résistance et d'établir un lien éventuel entre la microstructure, les conditions d'essai, l'environnement, la température et les durées de vie en fatigue.*

*Des expertises de plusieurs séries de fractographies ont été réalisées au MEB pour un acier THR afin d'identifier les différents stades de propagation de la fissure. Les tailles des inclusions, de la fine zone granulaire (FGA) et des fish-eyes ont été mesurées pour les amorçages en interne des pièces. Chaque étape de la micro-propagation de la fissure a été évaluée par un facteur d'intensité des contraintes de transition calculé à partir des équations de Murakami [1].*

**Mots clés :** Acier très haute résistance ; FGA ; Mécanismes d'amorçage en fatigue

## 1. Introduction

La courbe S-N de fatigue a longtemps été considérée comme une courbe pour laquelle le nombre de cycles augmentait avec la diminution de la contrainte appliquée et qui tendait à se stabiliser autour d'une contrainte seuil définissant la limite d'endurance pour les aciers [2].

Dans le cas des aciers à très haute résistance (THR), cette courbe se décompose en deux domaines : le premier domaine correspond aux courtes durées de vie pour un niveau de contrainte élevé. Il se caractérise par une rupture du matériau sur une inclusion ou une hétérogénéité localisée en surface de la pièce. Le second correspond aux ruptures à grand nombre de cycles observées pour de faibles chargements et se caractérise par la rupture sur une inclusion ou toute autre hétérogénéité située à l'intérieur de la pièce [1].

La terminologie « duplex » qui décrit ces deux types de lieu d'amorçages en Surface et en Interne, est utilisée pour décrire le comportement typique de ces aciers.

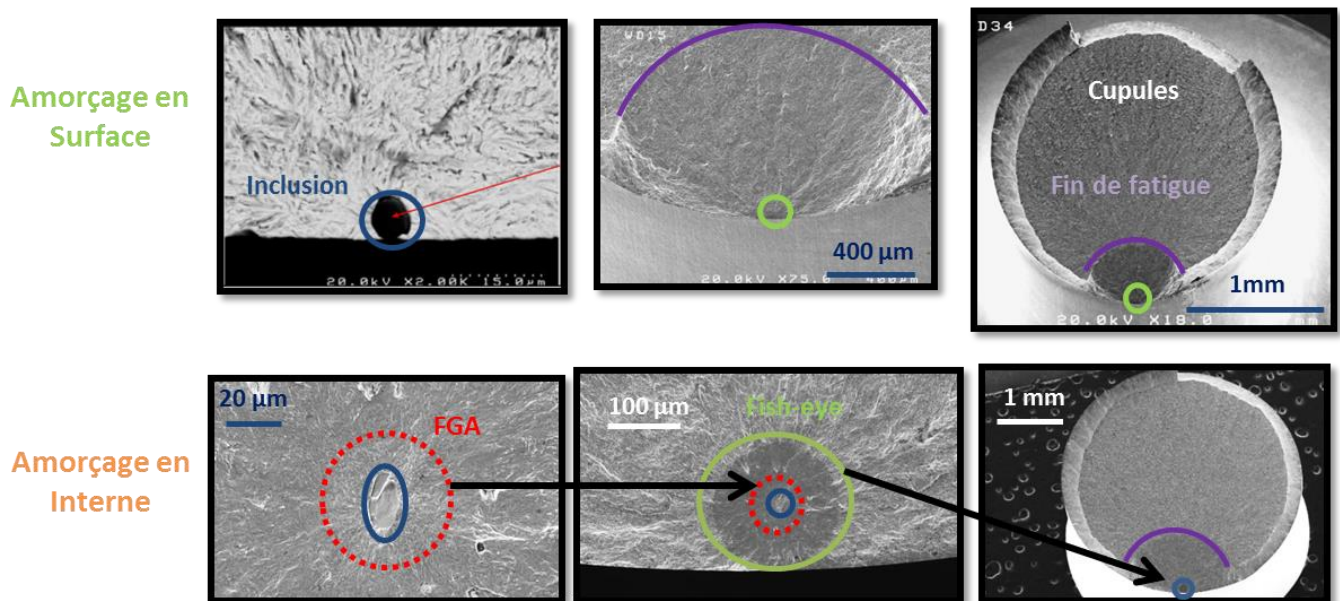
A l'heure actuelle, les liens éventuels entre les conditions d'essai, la nature chimique et la localisation du site d'amorçage et la durée de vie résultante, lors de la sollicitation en fatigue de ces aciers, n'est pas clairement identifié. Les mécanismes physiques mis en jeu ne sont pas tous bien appréhendés.

De par ce manque de compréhension, ces phénomènes ne peuvent pas être pris en compte dans les modèles de simulations des courbes de fatigue destinés à calculer les durées de vie des pièces.

## 2. Résultats

A partir des expertises réalisées sur des éprouvettes de fatigue d'un acier THR et des observations quantitatives au microscope électronique à balayage, les fractographies montrent que les fissures de fatigue sont systématiquement initiées à partir d'inclusions. On distingue deux catégories de sites d'amorçage en termes de localisation : en surface et en interne des pièces. Les durées de vie en fatigue se révèlent être plus courtes pour les sites d'amorçage en surface que ceux localisés en interne.

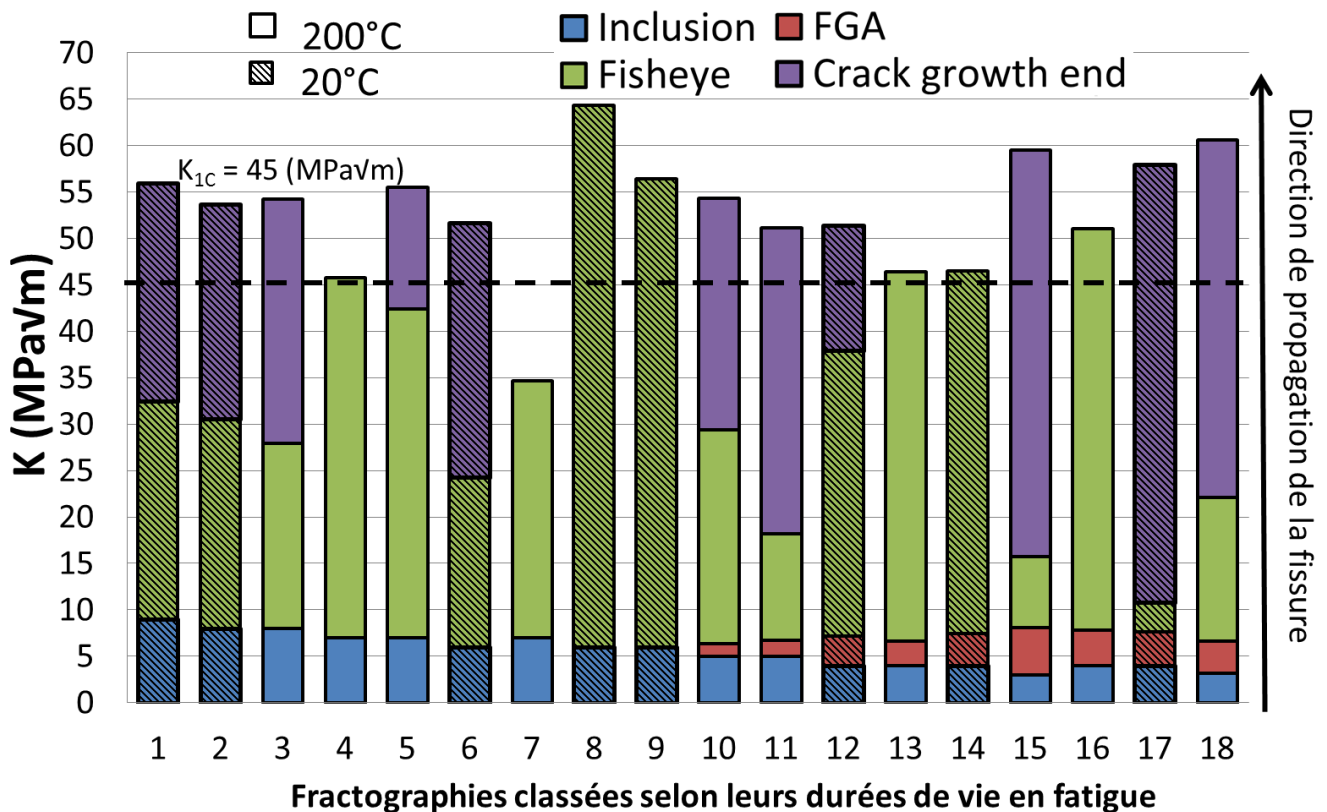
En se basant sur une revue bibliographique, les analyses fractographiques ont permis d'établir des scénarios des mécanismes d'amorçage et de propagation de fissures en fatigue décrivant les deux types d'amorçage: d'une part en surface par rupture de l'inclusion, puis propagation sous air et rupture finale lorsque la ténacité est atteinte, et d'autre part en interne par rupture de l'inclusion, formation éventuelle d'une zone granulaire fine (FGA) autour de l'inclusion [3], propagation sous vide des fissures de fatigue autour de l'inclusion initiant la forme d'un « fish-eye », propagation éventuelle sous air puis rupture finale (Fig.1).



**Figure 1.** Scénarios des mécanismes d'amorçage en surface et en interne

Le scénario des amorçages en interne a été interprété à l'aide de la mécanique linéaire de la rupture. Pour chaque stade d'avancée de fissure, un facteur d'intensité des contraintes de transition a pu être déterminé à partir des équations de Murakami [1] pour les mêmes conditions de chargement (Fig.2). Il a été observé que ce facteur varie pour le stade de « rupture sur inclusion » et pour le passage de la « formation de fish-eye » correspondant à la zone de transition entre la propagation sous vide à la propagation sous air des fissures. Ce facteur est constant pour la transition FGA / fish-eye, mais celle-ci n'est présente que pour des éprouvettes ayant rompu sur de petites inclusions, et menant à des grandes durées de vie. La taille de l'inclusion semble donc être ainsi un paramètre d'ordre 1 pour obtenir de longues durées de vie, car elle est associée à la création d'une FGA. Ces résultats sont en

accord avec les données bibliographiques [3] [4]. Cependant, les conditions de la formation de la FGA restent à être éclaircies.



**Figure 2.** Valeurs des facteurs  $K$  à chaque étape de la propagation de fissure pour 18 éprouvettes de fatigue avec un amorçage en interne

### 3. Conclusion

Les scénarios des mécanismes d'amorçages en surface et en interne ont été identifiés à l'aide de la mécanique linéaire de la rupture. L'amorçage de fissure en fatigue est systématiquement initié à partir d'inclusions. Pour les amorçages en interne, une FGA peut être observée pour des éprouvettes à grande durée de vie et pour de petites inclusions. Le  $K$  seuil de transition entre la fin de formation de FGA et début de propagation dans le fish-eye est constant et correspond à une valeur critique nécessaire pour générer une FGA.

### Références

- [1] Murakami Y. Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions, Elsevier Book 2002
- [2] Mughrabi H. Microstructural mechanisms of cyclic deformation, fatigue, crack initiation, and early crack growth, The Royal Society, Phil Trans. 2015
- [3] Sakai T, Takeda M, Shiozawa K, et, al. Experimental reconfirmation of characteristic S-N property for high carbon chromium bearing steel in wide life region in rotating bending. J. Soc. Mat. Sci. Jpn. 2000; 49: 779-785.
- [4] Wei Li, Ping Wang, Evaluation of Threshold Condition of Interior Annular Crack Growth in Gigacycle Regime, Applied Mechanics and Materials Vol. 459 (2014) pp 65-69