Comportement en fatigue-fluage d'un disque de turbine à gradient de microstructure en superalliage base-nickel

Quentin LOISEAU[1,2], Loïc SIGNOR[2], Julien DE JAEGER[1], Antoine LACOUR[1] et Patrick VILLECHAISE[2]

[1] Safran Tech - Safran Group, 78114 Magny les Hameaux
[2] Institut Pprime (UPR CNRS 3346), Département Physique et Mécanique des Matériaux, ISAE-ENSMA, 86961 Futuroscope-Chasseneuil

Points d'intérêt.

- Relation température/temps de traitement et taille de grains sur un nouveau superalliage base-nickel élaboré par métallurgie des poudres
- Caractérisation d'un gradient de microstructure (taille de grains) dans un disque de turbine
- Influence du gradient microstructural sur les propriétés de fatigue-fluage

1. Contexte et objectifs

Les superalliages base-nickel sont largement employés pour fabriquer les disques de turbines des turboréacteurs, dont les exigences croissantes de rendement conduisent à des températures et des contraintes de fonctionnement toujours plus élevées. Ces pièces subissent ainsi principalement des sollicitations de traction et de fatigue à l'alésage, alors que le fluage prédomine à la jante correspondant à la région la plus chaude (Figure 1 a). Les microstructures à grains fins procurent de meilleures propriétés de traction et de fatigue, alors qu'une microstructure à grains plus grossiers est plus résistante au fluage et propagation de fissure [1]. Ces considérations ont conduit à développer des procédés spécifiques permettant d'adapter les microstructures à la sollicitation locale prédominante. En pratique, ces traitements dits à gradient de microstructure (ou *dual*) ont pour objectif de faire croître la taille des grains dans la jante du disque tout en maintenant une taille de grains fine à l'alésage [2-4]. Les superalliages base-nickel sont principalement durcis par précipitation de phase γ′ qui leur confèrent de très bonnes propriétés en température. La croissance de grains recherchée s'obtient après un traitement thermique de mise en solution à des températures supérieures au solvus de la phase γ′ (Figure 1 b). Ce sont, en effet, les précipités γ' primaires (1 – 10 µm) qui participent au contrôle de la taille de grains en bloquant et ralentissant le mouvement des joints de grains dans de nombreux superalliages γ/γ′ forgés. Ensuite, un traitement de mise en solution sub-solvus suivi d'une trempe à vitesse de refroidissement contrôlée permet de contrôler la taille de la précipitation secondaire (50 – 400 nm). Enfin, le traitement de revenu permet aux plus petits précipités γ' intragranulaires (5 – 50 nm) d'atteindre les tailles souhaitées qui procurent les propriétés mécaniques recherchées, tout en relaxant d'éventuelles contraintes résiduelles présentes dans le composant à l'issue d'un traitement dual. Il faut distinguer les études menées sur les superalliages élaborés suivant la voie coulé-forgé et les superalliages élaborés par métallurgie des poudres. Dans le premier cas, la voie coulé-forgé conduit à des tailles de grains finales très importantes (5 à 400 µm). La Figure 1 c) donne un exemple d'évolution de la taille de grains moyenne suivant la profondeur radiale de deux disques de dimensions différentes en AD730® élaborés par la voie coulé/forgé. Le superalliage étudié est élaboré par métallurgie des poudres. Cette voie d'élaboration permet d'atteindre des amplitudes de tailles de grains moyennes mieux contrôlées et plus étroites (5 à 40 µm) lors du procédé de traitement thermique *dual*.

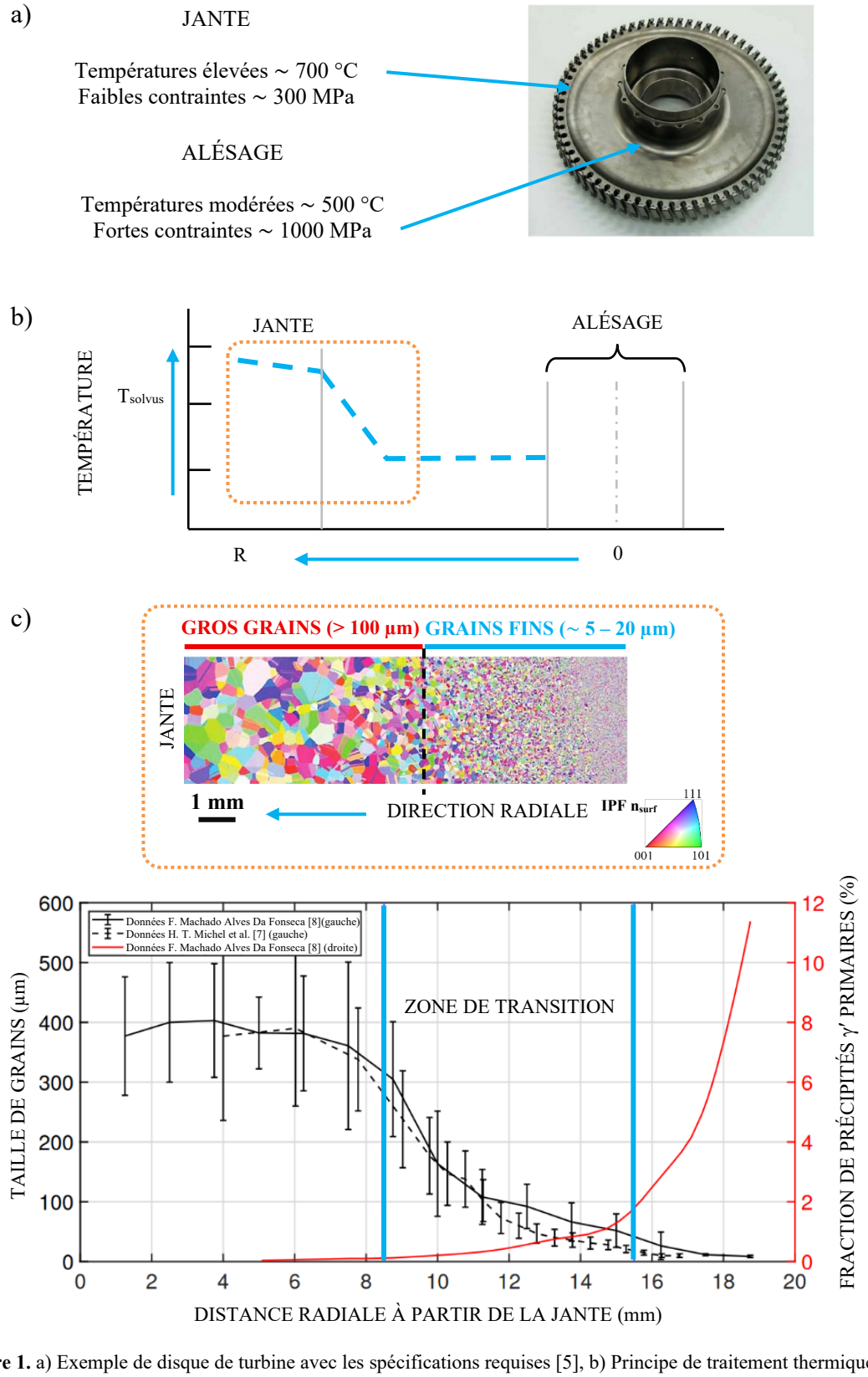


Figure 1. a) Exemple de disque de turbine avec les spécifications requises [5], b) Principe de traitement thermique appliqué à un disque dual, adapté de [6], c) Gradient de taille de grains en EBSD sur un disque *dual* en U720Li coulé-forgé (diamètre du disque 126 mm), adapté de [7] et évolution de la taille de grains moyenne et de la fraction surfacique de phase γ′ primaire sur deux disques en AD730® (H. T. Michel et al.[7] et thèse de F. Machado Alves Da Fonseca [8]).

Ce travail s'intéresse en particulier à l'influence de la distribution de tailles de grains sur le comportement en fatigue, en fluage mais également en régime d'interaction fatigue-fluage (ou fatigue-temps de maintien) plus représentatif des conditions subies. Pour cela, les travaux s'articulent autour de deux états matière, un premier qui provient de débouchures centrales prélevées à cœur de disque brut de forge et un second qui provient d'un disque traité dual avec un gradient de microstructure. Le premier état permettra, avec un suivi des traitements thermiques, d'obtenir des microstructures homogènes à taille de grains contrôlée. Avec des éprouvettes prélevées à des endroits choisis dans le disque traité, il sera possible d'étudier une microstructure industrielle et la présence d'un gradient microstructural, par comparaison avec le premier état. Les températures des essais mécaniques choisies sont 650 °C et 750 °C, représentatives des températures subies en service par les disques de turbines.

2. Traitements thermiques et caractérisation microstructurale (microstructures homogènes)

Dans un premier temps, une campagne de traitements thermiques et de caractérisation microstructurale (MEB, EBSD) a été conduite sur les échantillons provenant des débouchures d'un disque de turbine élaboré par métallurgie des poudres. L'objectif est (i) d'apporter des éléments de compréhension sur la relation entre les traitements thermiques et la microstructure, notamment le squelette granulaire et (ii) d'obtenir des éprouvettes à tailles de grains contrôlées et homogènes (sans gradient). Un ensemble de traitements de mise en solution a été effectué à différentes températures de -35 °C à +35 °C autour de la température de solvus de la phase γ′ (Figure 2 a). Ces traitements ont été suivis à l'aide de thermocouples de type S soudés en surface des échantillons. Les tailles de grains moyennes varient de 5 µm à 40 µm. La taille de grains moyenne mesurée dans l'état *as-received* est d'environ 3 µm. L'évolution de ces tailles de grains moyennes se décompose en trois régimes de croissance (Figure 2 b). Le premier régime de croissance, subsolvus (T_{solvus} -35 °C à T_{solvus} -15 °C), est caractérisé par une légère croissance de grains allant jusqu'à 5 µm. Le deuxième régime est celui des températures avoisinant le solvus γ′ (T_{solvus} -5 °C à T_{solvus} +5 °C) qui se caractérise par une évolution rapide de la taille de grains de 10 µm jusqu'à 35 µm. Au cours du dernier régime de croissance supersolvus (T_{solvus} +25 °C à T_{solvus} +35 °C), la croissance des grains semble saturer à une taille moyenne de 40 µm.

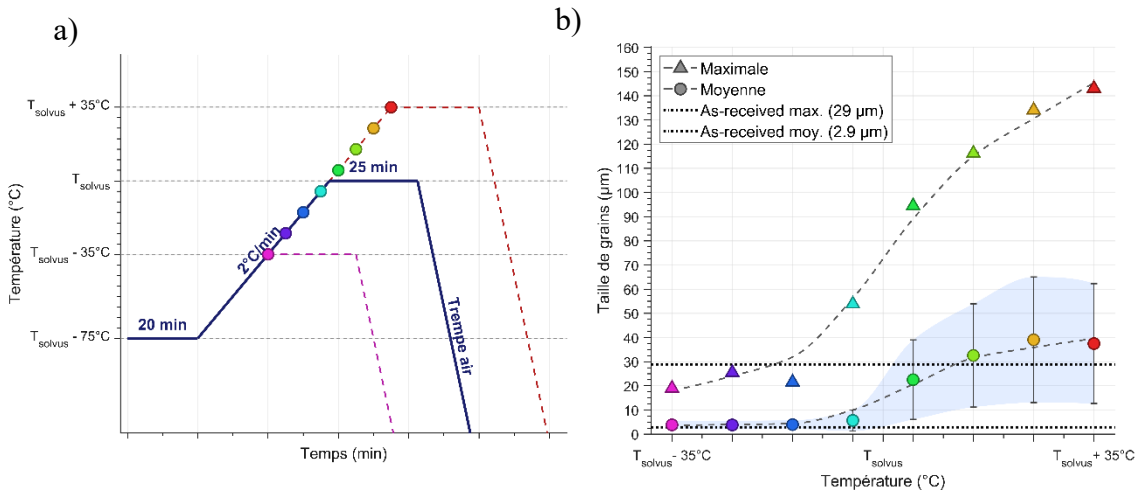


Figure 2. a) Cycle thermique réalisé sur les échantillons prélevés dans les débouchures pour 8 températures de mise en solution différentes, b) Évolution des tailles de grains moyennes et maximales (avec les macles) en fonction de la température de mise en solution appliquée.

Les caractérisations microstructurales EBSD ont permis de montrer la présence de quelques grains de taille d'environ 20 µm dans les traitements subsolvus (T_{solvus} -35 °C à T_{solvus} -15 °C), soit au-delà de la distribution principale (4 -5 µm en moyenne). Ces quelques grains de taille supérieure ont par ailleurs été observés dans l'état *as-received*. Dans la suite une attention particulière sera apportée au rôle de ces grains sur la durée de vie en fatigue. Des analyses complémentaires en KAM et GROD ont montré que ces grains sont peu maclés mais très écrouis avec des désorientations maximales au sein du grain de l'ordre de 15°, contrairement à l'ensemble des autres grains de la distribution principale. Des observations complémentaires sur ces mêmes grains en électrons secondaires montrent qu'une distribution locale particulière des précipités γ′ primaires est liée à ces gros grains. Dans la suite, l'impact d'un traitement de mise en solution sub-solvus et d'un revenu sera étudié sur l'évolution de ces précipités.

Des premiers essais de traction à une vitesse de déformation de 10^{-4} s^{-1} ont été respectivement menés sur une microstructure à grains fins (~ 5 µm) et une autre à gros grains (~ 40 µm), à 650 °C et 750 °C. Ces microstructures ont suivi le cycle thermique de la Figure 2 a) sans revenu, l'objectif est de caractériser l'influence du squelette granulaire. À 750 °C, les deux microstructures perdent environ 15 % de leur résistance maximale et 40% de leur ductilité par rapport aux essais menés à 650 °C. Les premières tendances relatives à l'effet de la taille de grains moyenne sur la limite d'élasticité suggèrent que celle-ci suit la loi de Hall-Petch avec des valeurs de paramètres typiques des superalliages base-nickel.

3. Travaux en cours, démarche de travail

3.1. Caractérisation du gradient dans le disque *dual*

Parallèlement, une caractérisation microstructurale détaillée du disque traité *dual* est en cours afin de caractériser le profil radial de taille de grains. L'objectif est de pouvoir choisir judicieusement la localisation des futurs prélèvements des éprouvettes dans et autour du gradient, en contrôlant un possible écart axisymétrique lié au procédé. Les premières observations EBSD ont montré que les tailles de grains mesurées dans le disque étaient de 5 µm dans la zone à grains fins et de 40 µm en jante du disque, soit dans la zone à gros grains. Elles correspondent parfaitement avec les tailles de grains mesurées dans le premier état matière qui provient des débouchures (Figure 2 b). Le gradient observé est plus abrupt que celui d'un superalliage élaboré par la voie coulé-forgé. On observe également le long du gradient une forte croissance d'une première population de grains pendant qu'une seconde population reste proche de la taille moyenne initiale. Une fois le gradient franchi, la population de gros grains se généralise. Seront alors présentées les caractérisations microstructurales complémentaires ainsi que les résultats préliminaires des essais mécaniques.

3.2. Essais mécaniques

Des essais mécaniques de traction, fluage, fatigue et fatigue-fluage (avec différents temps de maintien) seront réalisés à 650 et 750 °C. Une première série d'essais sera réalisée sur les microstructures homogènes décrites précédemment afin de caractériser l'influence de la taille de grains en l'absence d'un gradient. Elle permettra ensuite de cibler les conditions d'essais pertinentes pour une seconde série d'essais réalisée sur les éprouvettes directement prélevées dans le disque traité *dual*. L'objectif est de balayer finement l'évolution de taille de grains en présence d'un gradient et de mieux comprendre son influence en fatigue-fluage.

L'ensemble de cette étude vise une meilleure maîtrise des propriétés mécaniques par la recherche de la microstructure la plus appropriée, ainsi qu'une maturation du procédé.

Références

1. J. C. Williams, E. A. Starke. Progress in structural materials for aerospace systems, Acta Materialia, **51**, (2003), 5775-5799.
2. D. P. Mourer, J. L. Williams. Dual heat treat process development for advanced disk applications, The Minerals, Metals & Materials Society, (2004), 401-407.
3. R. J. Mitchell, J. A. Lemsky, R. Ramanathan, H. Y. Li, K. M. Perkins, L. D. Connor, Process development & microstructure & mechanical properties evaluation of a dual microstructure heat treated advanced nickel disc alloy, The Minerals, Metals & Materials Society, (2008), 347-356.
4. Y. Ning, Z. Yao, H. Guo, M. W. Fu, Structural-gradient-materials produced by gradient temperature heat treatment for dual-property turbine disc. Journal of Alloys and Compounds, **557** (2013), 27-33.
5. L. Connor. The Development of a Dual Microstructure Heat Treated Ni-base superalloy for turbine disc application. PhD Thesis. University of Cambridge (2009).
6. S. Ganesh, R.G. Tolbert. General Electric Company US Patent (US005527020A) : Differentially heat treated article, and apparatus and process for the manufacture thereof (1996).
7. M. Hesser Taboada, L. Sasaki Reda, G. Effgen Santos, J. Cormier, C. Dumont. Superalloys 2016, The Minerals, Metals & Materials Society, (2016) 539-548.
8. F. Machado Alves Da Fonseca. Comportement viscoplastique d'un disque de turbine en superalliage base nickel γ/γ' à gradient de microstructure. Thèse de Doctorat. École nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique (2025).