

Impact du sur-vieillessement métallurgique sur le comportement et la durabilité du superalliage base nickel pour disque de turbine René 65

Aude LAURENCE

Thèse CIFRE SAFRAN / Institut Pprime

Dans le cadre du consortium CFM international, réunissant en juillet 2008 le groupe Safran et General Electric, un accord a été renouvelé afin de concevoir une nouvelle génération de turboréacteurs destinés à remplacer la famille des CFM56 pour la motorisation des nouveaux avions A320-A321Néo et Boeing 737 MAX.

Ces nouveaux turboréacteurs LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion) sont conçus afin de réduire la consommation spécifique de 16%, de diminuer les émissions de CO₂ et de NO_x de 16% et 50% respectivement, et de réduire le niveau sonore du moteur de 15 dB. Tous ces objectifs environnementaux s'accompagnent également d'un meilleur rendement du moteur et ont pour conséquence l'augmentation des températures de fonctionnement des parties chaudes des turboréacteurs, dont les disques de turbines.

Les disques de turbine basse pression (BP) sont situés en aval de la chambre de combustion et de la turbine haute pression (HP). Ils entraînent le compresseur BP et la soufflante. Par conséquent, ils sont soumis à des sollicitations thermo-mécaniques sévères en raison des hautes températures des gaz issus de la chambre de combustion, des vibrations, de la force centrifuge, et des différentes phases de vol. En effet, les disques de turbine subissent à la fois :

- des sollicitations dépendantes du temps telles que le fluage et la fatigue-temps de maintien au niveau de la tête de disque, à des températures pouvant atteindre 700°C.
- des sollicitations cycliques au niveau de l'alésage résultant des chargements/déchargements au cours des phases transitoires de vol. La température au niveau de l'alésage peut varier, quant à elle, de 300°C à 500°C.

Grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques à hautes températures, les superalliages base nickel sont des matériaux de choix pour répondre à ces exigences. Les développements de leurs compositions chimiques ainsi que de leurs procédés d'élaboration ont contribué à l'optimisation des performances des turboréacteurs ces dernières années.

Jusqu'à présent, les disques de turbine BP étaient majoritairement fabriqués en Inconel 718. Il s'agit d'un superalliage base nickel $\gamma/\gamma'/\gamma''$ majoritairement durci par la phase γ'' , dont la température de fonctionnement maximale continue est de l'ordre de 650°C. Or, les objectifs de rendement amélioré des nouveaux moteurs LEAP, nécessitent une augmentation globale de la température de fonctionnement des matériaux employés pour les parties chaudes du moteur. Une température supérieure à 700°C pourra être rencontrée de manière transitoire en dent de disque du premier étage de turbine BP, conditions pour lesquelles l'Inconel 718 n'est plus adapté. Par conséquent, il est nécessaire de se tourner vers d'autres superalliages base nickel, plus stables et

plus résistants en température. C'est la raison pour laquelle le René 65 a été retenu pour ce type d'applications.

Cet alliage, récemment conçu par General Electric et Allvac en 2005, est un superalliage polycristallin γ/γ' élaboré par voie coulée-forgée (Figure 1). Le choix d'un alliage à durcissement γ' au lieu de γ'' a été dicté par la plus grande stabilité à hautes températures de la phase γ' .

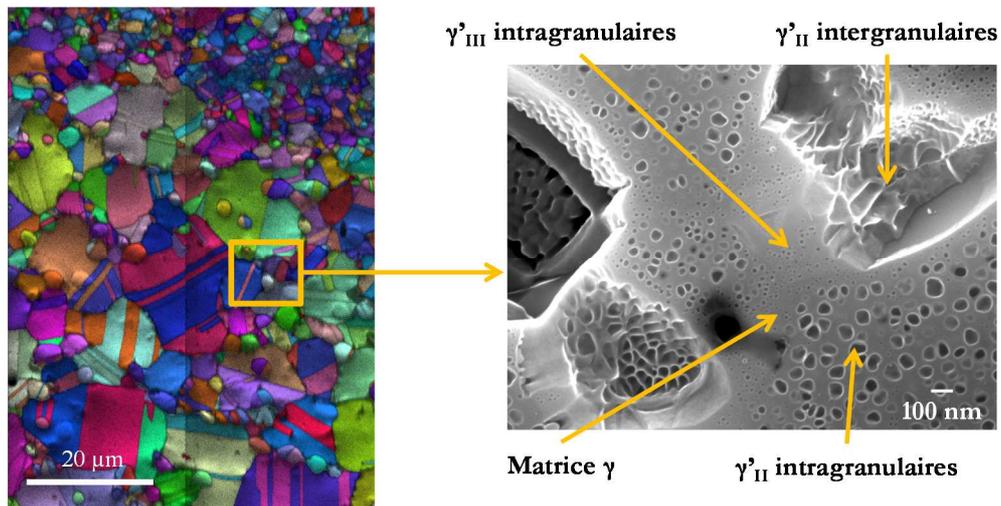


Figure 1 : Microstructure du René 65 avec à gauche le squelette granulaire (image EBSD) et à droite la microstructure de précipitation

Il convient cependant de s'assurer de la stabilité structurale de ce nouvel alliage qui sera soumis à des températures plus élevées couplées à des sollicitations mécaniques répétées au cours des cycles de vol. Ce point devient crucial dès lors qu'il s'agit de considérer la durabilité de ces alliages pour des longs temps d'exposition en température.

Cette étude s'est alors focalisée sur la compréhension des liens entre les évolutions microstructurales suite à divers sur-vieillissements thermiques et les propriétés mécaniques résultantes du René 65.

Les principaux résultats de cette étude sont synthétisés selon les deux axes suivants :

- L'impact du sur-vieillissement thermique sur la microstructure du René 65.
- L'impact des évolutions microstructurales suite au sur-vieillissement thermique sur les propriétés mécaniques à 700°C.

Afin de comprendre l'impact du sur-vieillissement thermique sur la microstructure du René 65, des traitements thermiques ont été réalisés de 700°C à 925°C sur des durées s'échelonnant de 2 à 2000 heures. Ces sur-vieillissements thermiques ont permis de mettre en évidence deux évolutions microstructurales majeures, à savoir la croissance des précipités γ'_{II} intragranulaires et la précipitation de particules intermétalliques aux joints de grains et autour des précipités γ'_{I} intergranulaires. Cette précipitation s'accompagne également d'une ségrégation de molybdène aux joints de grains.

Grâce aux observations au MEB-FEG et aux divers traitements d'images permettant une analyse quantitative des évolutions microstructurales, il s'avère que la croissance des précipités γ'_{II} suit une croissance de type LSW sur de longues durées jusqu'à 800°C. Pour des températures plus élevées, une déviation à la loi LSW est observée au cours du sur-vieillessement. De plus, un diagramme Temps-Température-Transformation des particules intermétalliques a été dressé (Figure 2).

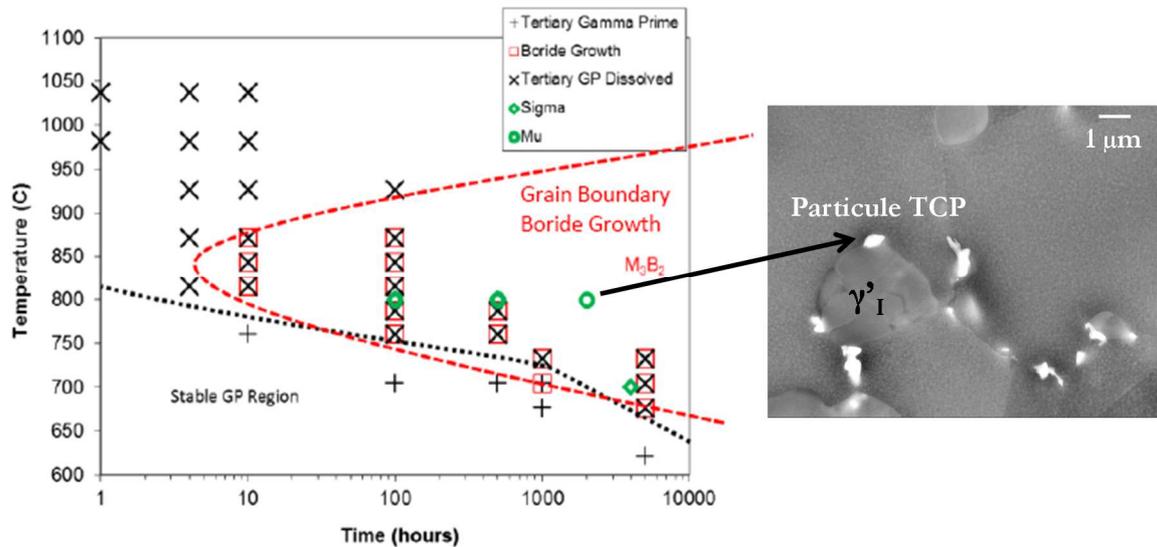


Figure 2 : Diagramme TTT des particules intermétalliques précipitant aux joints de grains.

A partir de ces résultats expérimentaux, des traitements de sur-vieillessement ont été choisis pour analyser leurs conséquences sur les propriétés mécaniques. Ces choix ont porté sur un traitement thermique long de 4000 heures à 700°C proche des conditions en service, et des traitements thermiques de 24 à 2000 heures à 800°C pour simuler l'effet des transitoires thermiques et pour faire varier la fraction des particules intermétalliques. Des analyses en microscopie en transmission et par EDS ont montré que ces particules sont des phases TCP (Topologically Closed-Packed Phase), de type σ et μ .

La compréhension des relations entre les évolutions microstructurales et les propriétés mécaniques du René 65 en traction, fluage et fatigue-temps de maintien à 700°C a constitué le cœur de ce travail. Ces deux évolutions microstructurales apparaissant toutes deux au cours du sur-vieillessement, une des difficultés de ces travaux de thèse a été de dissocier ces deux phénomènes. En effet, si l'impact de la croissance des précipités γ' intragranulaires sur les propriétés mécaniques en général est un phénomène connu, l'impact de la précipitation de particules TCP suscite encore des interrogations. Cette étape de dissociation fût alors primordiale. Cette dernière a été réalisée en mettant en place une méthodologie expérimentale originale, basée sur les connaissances acquises précédemment sur les relations entre les traitements thermiques de mise en solution et la microstructure de précipitation γ' de l'alliage. Cette méthode consiste à tester mécaniquement deux microstructures équivalentes en termes de taille de grains et de précipités γ'_{II} , une seule des deux microstructures contenant des particules TCP aux joints de grains.

Du point de vue des propriétés mécaniques, il a été observé que la croissance des précipités γ' intragranulaires impacte le comportement viscoplastique et la durabilité de l'alliage. En effet, plus les précipités γ'' grossissent, plus la vitesse minimale de déformation de l'alliage augmente, conduisant à un temps à rupture plus faible. De plus, l'observation des faciès de rupture des éprouvettes a montré que plus la précipitation intragranulaire est fine et homogène, plus le mode de rupture devient intergranulaire en fluage et fatigue-fluage avec long temps de maintien.

Grâce à la méthode mise en place pour isoler l'impact de la précipitation de particules TCP sur les propriétés mécaniques, il a été mis en évidence que la présence de ces dernières aux joints de grains (après les sur-vieillissements à 800°C) ainsi que la ségrégation de molybdène aux joints de grains affectent non seulement la durabilité de l'alliage mais aussi le comportement viscoplastique à 700°C (Figure 3). En effet, les sur-vieillissements réalisés à 800°C conduisent à un abattement de la durée de vie, à une augmentation immédiate de la vitesse de déformation et de l'allongement à rupture. Cet abattement est d'autant plus marqué que la fraction des particules TCP est grande et que le temps à contrainte maximale est long en fatigue-temps de maintien. De plus, l'observation des fûts d'éprouvettes a révélé la présence d'un grand nombre de décohésions au niveau des interfaces précipités γ' /matrice et de fissures secondaires intergranulaires.

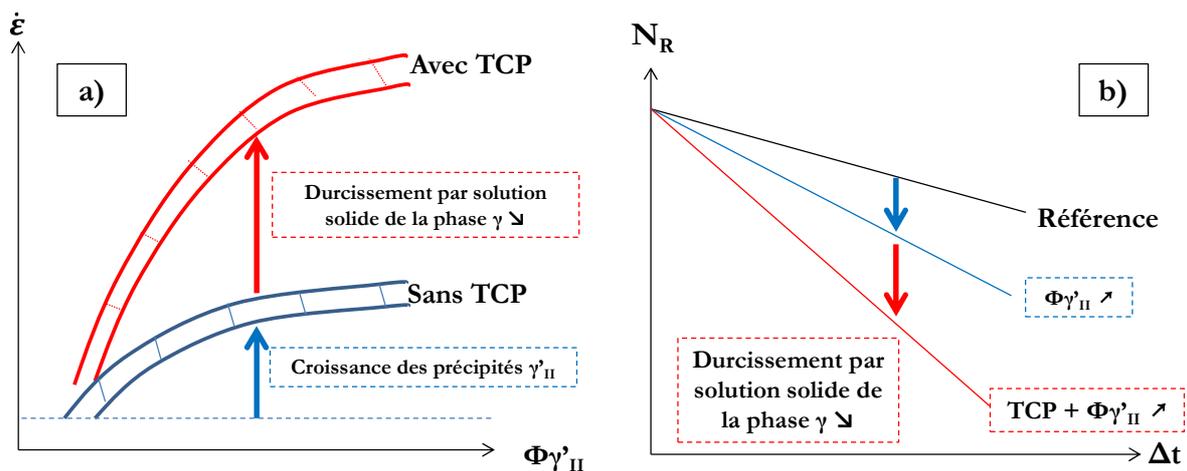


Figure 3 : Impacts de la taille des précipités γ'' et de la précipitation de particules TCP et de la ségrégation de molybdène aux joints de grains sur le comportement viscoplastique (a) et la durabilité (b) du René 65 à 700°C.

Ces derniers résultats soulignent objectivement que la précipitation de particules TCP affecte le comportement viscoplastique du matériau, ce qui n'avait jamais été reporté dans la littérature jusqu'à présent. C'est pourquoi les travaux ont ensuite été dirigés vers une compréhension plus fine du rôle des particules TCP vis-à-vis des mécanismes de déformation et d'endommagement. Des analyses en microscopie en transmission et par EDS sous MET ont permis d'aboutir à la conclusion que l'abattement additionnel des propriétés mécaniques en fluage et en fatigue-temps de maintien à 700°C des états sur-vieillis est finalement une conséquence de la nucléation des particules TCP et de la ségrégation de molybdène aux joints de grains. En effet, ces deux processus conduisent à une diminution de la concentration en éléments durcissants de la matrice

(Mo, W, Cr), ce qui l'adoucit localement sur une certaine épaisseur e le long des joints de grains (Figure 4). Cette hypothèse a finalement été validée en caractérisant quelques échantillons traités supersolvus (i.e. à forte taille de grain) pour lesquels les conséquences de cet adoucissement localisé de la matrice se sont révélées négligeables.

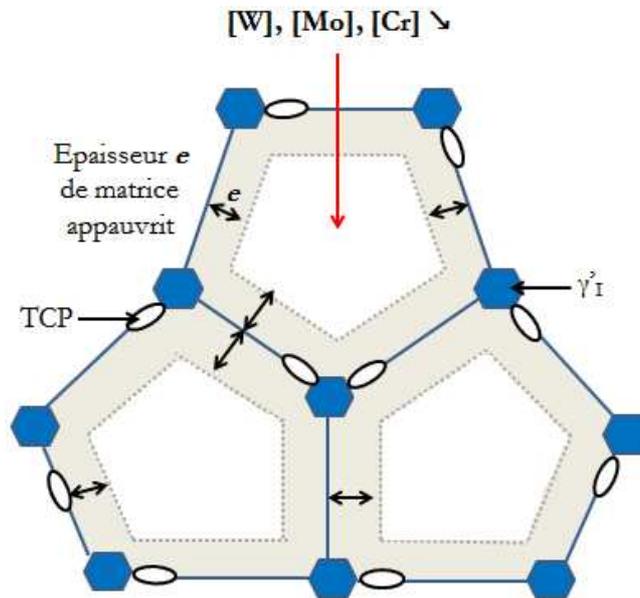


Figure 4 : Appauvrissement localisé de la matrice en éléments durcissants de solution solide (W, Mo, Cr) au niveau des joints de grains et autour des précipités γ'_1 sur une certaine épaisseur e .

En conclusion, cette étude montre l'impact significatif du sur-vieillessement thermo-mécanique du René 65 sur les propriétés mécaniques pour des températures d'exposition au-delà de 800°C. Ces travaux de thèse pourront servir à alimenter des lois de comportement/endommagement permettant de prédire la durabilité à long terme du René 65.