

Jumeaux numériques et réduction de modèle d'éprouvettes de fatigue en superalliage monocristallin base Nickel

A. Aublet^{1,2}, H. Proudhon¹, D. Ryckelynck¹, F. N'Guyen¹
C. Remacha², R. Cariou²

¹ Centre des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, {axel.aublet,henry.proudhon,david.ryckelynck}@mines-paristech.fr

² Safran Tech, Rue des jeunes Bois, 78117 Châteaufort

Résumé — Les travaux présentés ici montrent les différentes étapes d'une chaîne automatique d'aide à la sanction de dérogation. Une stratégie de jumeau numérique est présentée via la numérisation et le maillage d'éprouvettes en superalliage monocristallin utilisées au cours d'essais de Fatigue Fluage à Haute température. Un modèle thermomécanique recalé sur les mesures expérimentales permet d'alimenter un algorithme d'apprentissage couplé à de l'hyper-réduction de modèle sur l'impact de la variabilité de fabrication sur la durée de vie des pièces.

Mots clés — Superalliage monocristallin, Jumeau Numérique, Fatigue-Fluage à Haute Température, Réduction d'ordre de modèle

1 Introduction

Les enjeux écologiques modernes poussent les secteurs industriels au développement de nouvelles technologies plus respectueuses de l'environnement. Le secteur aéronautique, domaine de compétition internationale, propose le développement de nouveaux moteurs à rendement plus important. L'efficacité des turboréacteurs provient notamment de la qualité de la combustion du carburant et de la température du mélange gazeux brûlé. L'augmentation de cette température permettrait une diminution de la consommation et de l'émission de particules nocives pour l'environnement. Toutefois, cela implique une révision de l'architecture des composantes du moteur à l'image de la turbine haute pression et particulièrement des aubes mobiles. Ces innovations sont développées selon plusieurs axes de recherche tels que la conception de géométries plus complexes (circuits de refroidissement plus performants) et l'utilisation de nouveaux matériaux. On peut citer parmi eux l'arrivée des composites à matrice céramique ou encore les superalliages à base Nickel de nouvelles générations [11]. En conséquence, les méthodes de fabrication doivent également évoluer et satisfaire un ensemble de critères (dimensionnel, orientation du matériau, homogénéité métallurgique etc..) de plus en plus drastiques. Une nouvelle approche pour le traitement de ce type de pièces est l'utilisation d'un modèle de jumeau numérique en utilisant la numérisation par tomographie afin de compléter les critères dimensionnels locaux actuels. Pour appliquer cette méthodologie à un ensemble de pièces produites, une chaîne automatisée peut-être construite en utilisant une approche de réduction d'ordre de modèle pour réduire les temps de calculs actuellement coûteux. Cette chaîne utilise un modèle thermomécanique recalé sur des essais expérimentaux afin de capter l'impact de la variabilité des pièces sur leurs durées de vie. Nous nous intéresserons ici au développement de cette chaîne autour de géométries simples telles que des éprouvettes de fatigue sur lesquelles des perçages typiques des canaux de refroidissement ont été usinés. L'utilisation des techniques de jumeau numérique réduits permettent de prendre en compte, de façon accélérée, les variabilités géométriques non paramétriques et des variabilités du matériau des éprouvettes.

2 Fabrication des éprouvettes en superalliage monocristallin base Nickel

La méthodologie qui est développée ici se base sur des éprouvettes de fatigue en superalliage monocristallin à base Nickel de 3^{ème} génération, le CMSX4-PLUS[®]. Ce matériau récemment développé à l'échelle industrielle est utilisé pour les pièces telles que les aubes de turbine haute pression où les conditions de fonctionnement sont délétères : charge mécanique importante, température de l'ordre de 1500°C

(pour la veine), oxydation sévère. Cette classe de matériaux est caractérisée par une excellente tenue au fluage à très haute température notamment par leur caractère monocristallin : l'absence de joints de grains améliore significativement la durée de vie du matériau. Toutefois, la fabrication de pièces à géométrie complexe avec ce type de matériau nécessite un procédé de fonderie difficile où le gradient de température de solidification doit être contrôlé (procédé Bridgman [5]). Après la coulée, ces pièces subissent un traitement thermique afin d'obtenir une microstructure optimale pour leur application en turbine de turboréacteur. Enfin, certaines pièces creuses voient leur surface percées (perçage par électro-érosion) afin de favoriser un refroidissement interne et externe (*film cooling*) lors du refroidissement. Ces perçages sont profilés pour des raisons aérothermiques et sont appelés *Shaped Holes*. A différentes étapes, le contrôle par tomographie aux Rayons X permet la validation des pièces (contrôle métallurgique de l'état de la matière, contrôle dimensionnel) et assure un suivi volumique des pièces creuses. Enfin, l'utilisation d'un matériau monocristallin induit une anisotropie du comportement fortement liée à l'orientation du matériau au sein de la pièce. Celle-ci peut-être mesurée puis évaluée grâce à la diffraction aux Rayons X de Laue [8]. L'ensemble de cette fabrication fournit alors un jeu de données multimodale pour chaque pièce (variabilité géométrique, désorientation du matériaux, défauts etc.) susceptible d'avoir un impact direct sur la durée de vie. L'approche de jumelage numérique en accomplissant un maillage de la tomographie permet de rendre compte de la géométrie réelle de la pièce sans paramétrer géométriquement un maillage de référence (CAO par exemple). Un maillage réalisé à partir de la tomographie est présenté en Fig.1. Ces données permettent d'enrichir un modèle mécanique pour mieux apprécier le comportement réel de la pièce. Dans le cadre de ces travaux, un banc d'essai de Fatigue Fluage est développé pour étudier le comportement réel des pièces fabriquées.

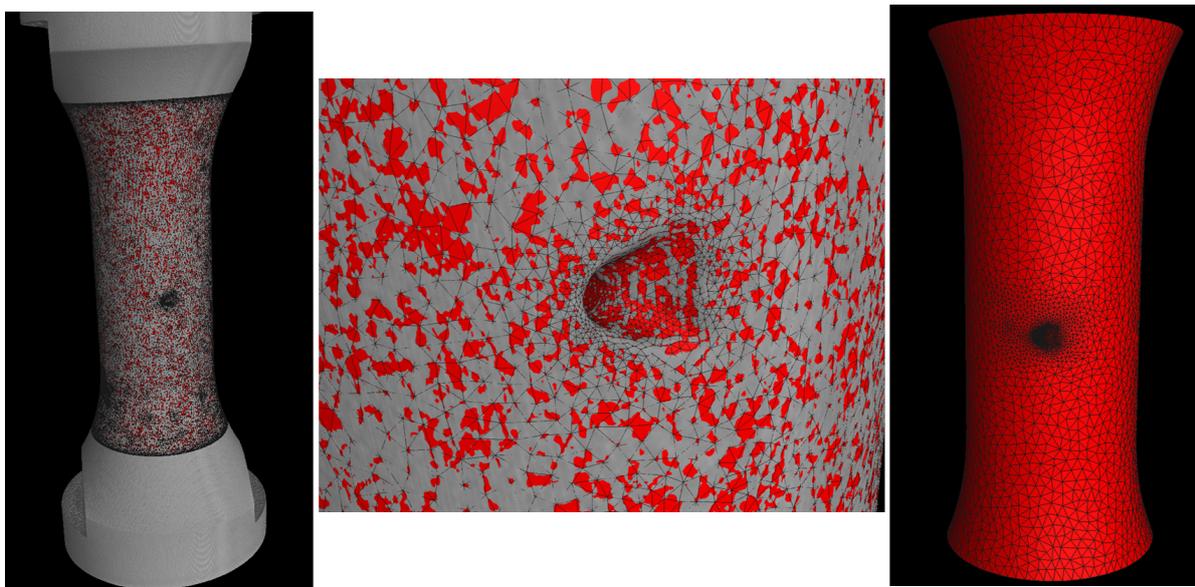


FIGURE 1 – Tomographie d'une éprouvette percée et maillage du volume segmenté.

3 Développement d'un banc d'essai de Fatigue-Fluage à gradient thermique

Les perçages Shaped Hole représentent des accidents géométriques et des sites d'amorçage de fissures privilégiés. Soumis au refroidissement par *air frais* (de l'ordre de 500°C), ces perçages représentent des zones de gradient thermique mais aussi de concentration de contraintes par leur forme profilée. Afin d'étudier l'endommagement expérimentalement, un essai représentatif simplifié de durée de vie a été développé. Le champ mécanique d'une aube de turbine est complexe et la géométrie ne répond pas de façon uniforme le long de la pièce. Malgré une rotation induisant un effort inertiel de traction, certaines zones se retrouvent en état de compression par blocage des peaux de la pale induisant un fluage important au niveau des perçages. C'est ce type de sollicitation que nous nous sommes proposés d'étudier ici. Le chargement considéré est issu d'une étude de définition d'un "palier équivalent en fluage" afin de

caractériser cette forme d'endommagement. Les essais sont de type Fatigue-Fluage en *LCF* dont le cycle unitaire est présenté en Fig 2.

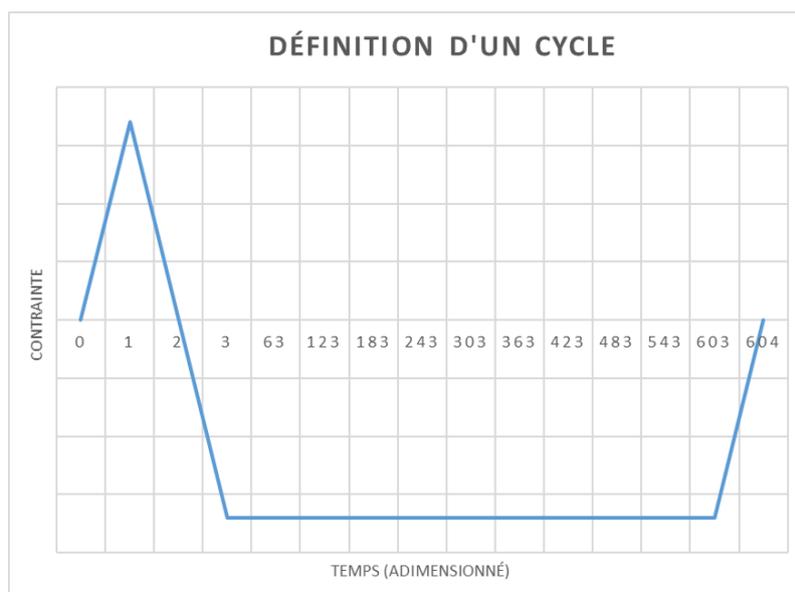


FIGURE 2 – Cycle unitaire de l'essai de Fatigue Fluage réalisé en essais.

Ce cycle représentatif est défini par un palier de fluage en compression correspondant au décollage / montée de l'avion et le pic de traction correspond à l'arrêt du moteur. A ce moment là, les zones qui ont fluées plastiquement en compression, rentrent en état de traction ce qui explique la présence du pic de traction. Le but de ces essais est de caractériser expérimentalement l'impact des variabilités de production des pièces sur le comportement mais également sur la durée de vie. Le montage expérimental est composé d'une machine de traction, d'un four radiant à empreinte ellipsoïdale et d'un système d'arrivée d'air comprimé. Le système de mesures permet d'acquérir la force appliquée (pilotage), la déformation axiale de l'éprouvette (extensomètre céramique placé sur la zone utile), le déplacement appliqué par la traverse ainsi que la température mesurée par des thermocouples. L'essai se déroule à une température constante de l'ordre de 1100°C et le refroidissement implique un gradient thermique dans la paroi de l'ordre de 50°C. Ainsi, le système de chauffage (naturellement anisotrope) et le refroidissement créent un champ thermique non-uniforme. Ces conditions sont simplifiées mais représentatives des conditions appliquées au matériau en cours de fonctionnement. Ces essais ont été développés pour comprendre la formation de fissures dites "d'amorçage" c'est à dire plus petite qu'une longueur critique de l'ordre de 300µm. Une image prise au MEB d'une fissuration post-essai est présentée en Fig. 3. On peut apercevoir sur l'image que deux fissures majeures se sont formées à l'intérieur du perçage et sont remontées le long de l'empreinte vers la surface.

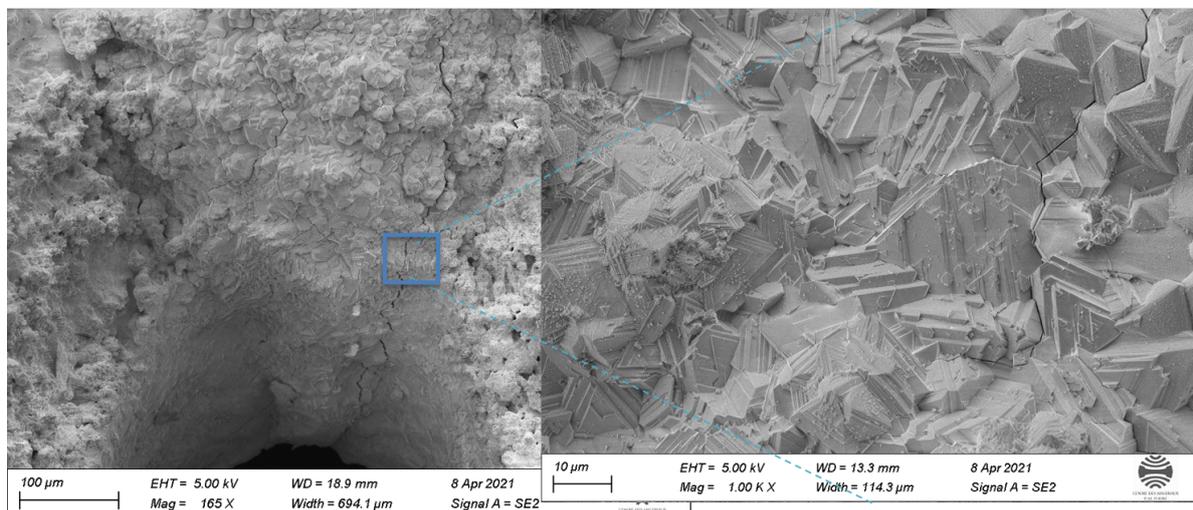


FIGURE 3 – Observation au MEB d’une fissuration au sein du perçage, cliché acquis après l’essai.

4 Modèle numérique : calcul de durée de vie et hyper réduction de modèle

A la vue du contexte de notre étude, la mise en place d’une chaîne automatique de calcul de durée de vie depuis des pièces réelles tend à être couplée avec un outil de prédiction. Les modèles de calculs thermomécaniques sont recalés par rapport aux essais mis en place. Le matériau est représenté par un modèle élasto-viscoplastique pour matériaux monocristallin de Méric-Cailletaud où la contrainte critique est résolue sur chacun des plans de glissement identifiés des familles de glissements octaédriques et cubiques [7]. Dans cette formulation, la plasticité est régie par le glissement des plans cristallins les uns par rapport aux autres. La loi d’écoulement, qui caractérise l’évolution de la vitesse de glissement selon chacun des plans, est une loi à seuil avec sommation des écrouissages. La déformation inélastique résultante est somme des vitesses de glissements calculés sur chacun des systèmes de glissement. Une interaction entre les glissements peut-être modélisée via une matrice d’interaction introduite dans le modèle d’écrouissage isotrope.

Le modèle d’endommagement utilisé dans ce cadre est le modèle appelé *Fat-Flu*, développé pour l’AM1 au cours de la thèse de Gallerneau [4]. Cette loi d’endommagement a spécialement été construite pour des applications aéronautiques à haute température, où, dans de telles conditions, les interactions entre fluage et fatigue doivent être prises en compte. Ce modèle permet de coupler de façon non linéaire l’endommagement progressif de fluage (selon un modèle de Hayhurst) ainsi que les effets de la fatigue avec un modèle différentiel développé à l’ONERA [2] couplé à une méthode d’extraction de cycles type *rainflow* de [6]. Cette loi basée sur les contraintes s’applique sur un état stabilisé et permet de prédire la fin de la phase d’amorçage de fissures. Les modèles de comportement et d’endommagement sont implémentés dans la suite Z7 Software [1] et appliqués sur la structure au niveau du perçage (concentration de l’endommagement). En effet, cette zone à gradient thermomécanique critique pour l’amorçage de fissures de fatigue. La modélisation de cet essai permet d’une part, d’alimenter un jumeau numérique de l’essai pour obtenir la durée de vie de chacune des pièces via le maillage de tomographie en tenant compte de l’impact de l’ensemble des variabilités sur cette durée de vie.

La calculs de durée de vie étant complexes et coûteux, une méthodologie d’hyper-réduction de modèle [9] est mise en place afin de capter l’influence des variabilités géométriques principales et accélérer les simulations. La méthode permet dans un premier temps d’opérer une réduction de la dimension de certains champs mécaniques d’intérêt par une méthode type POD (*Proper Orthogonalization Decomposition*) et dans un second temps, d’opérer un réduction du maillage afin de diminuer le domaine de résolution et accélérer le temps de calcul. Un exemple de l’hyper-réduction de modèle appliquée à un calcul cyclique de l’éprouvette est présenté en Fig. 4. Le but de ce travail est de pouvoir quantifier et hiérarchiser l’impact des variations géométriques des pièces fabriquées par voie de fonderie sur la durée de vie. Une stratégie abordée ici, à l’instar des travaux sur les ROM-nets par [3], est l’approximation de l’espace complet des solutions éléments finis par une technique de clustering de plusieurs petites bases réduites dites "locales". Cela constitue une approximation *par morceaux* de la variété non-linéaire par de petites

bases linéaires. L'impact de la variabilité sur la durée de vie captée par le calcul et l'hyper-réduction de modèle sera utilisée pour un algorithme d'apprentissage automatique basé sur un classificateur. On pourrait dans ce cas procéder à une hiérarchisation des défauts géométriques vis à vis de la durée de vie et donc pouvoir statuer sur l'acceptabilité d'une pièce produite.

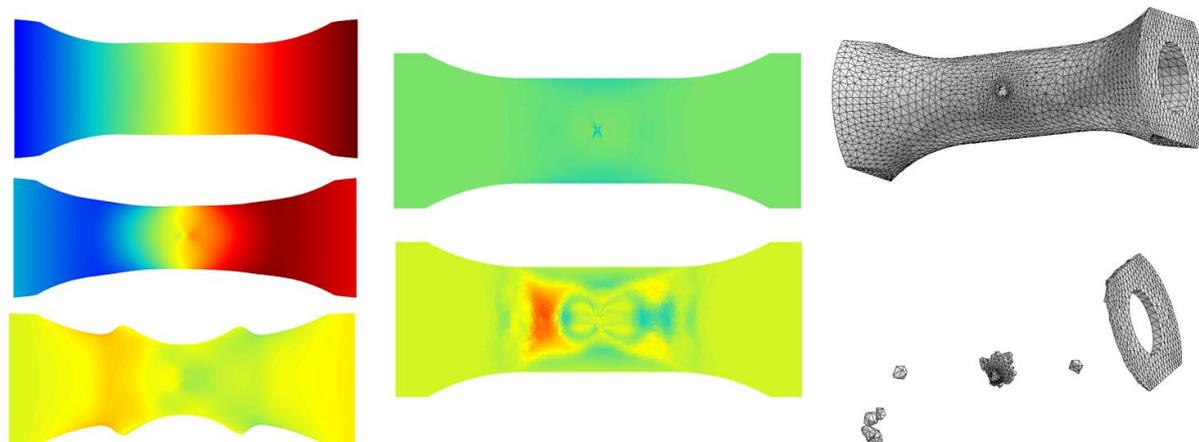


FIGURE 4 – Extraction modale et projection sur le maillage des modes du champ de déplacement axial (à gauche, modes 1,2 et 7) et du champ d'invariant du champ de plasticité (au centre, modes 1 et 2). La partie droite de l'image propose une réduction du maillage.

Références

- [1] J. Besson, R. Foerch. *Large scale object-oriented finite element code design*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 1421, p. 165 –187, 1997.
- [2] J.L. Chaboche, H. Policella, S. Savallo. *Application of the continuous damage approach to the prediction of high temperature low cycle fatigue*, High Temperature Alloys for Gas Turbines Proc. Conf. Liege, Belgium,p. 627-639, 1978.
- [3] T. Daniel. *Apprentissage statistique pour la réduction de modèle non-linéaire*, Thèse, Ecole des Mines de Paris, 2021.
- [4] F. Gallerneau. *Etude et modélisation de l'endommagement d'un superalliage monocristallin revêtu pour aube de turbine*, Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1995.
- [5] M. Gell, D.N. Duhl, A.F. Giamei. *The Development of Single Crystal Superalloy Turbine Blades*, Superalloys vol.41, 205-214, 1980.
- [6] M. Matsuishi, T. Endo. *Fatigue of metals subjected to varying stress*, Japan Society of Mechanical Engineering, 1969.
- [7] L. Méric, *Une modelisation mecanique du comportement des monocristaux*, Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1991
- [8] A. Morawiec. *Indexing of diffraction patterns for determination of crystal orientations*, Acta Crystallographica Section A, Volume 76 n°6, 716-734, 2020.
- [9] D. Ryckelynck, D. Missoum Benziane. *Hyper-reduction framework for model calibration in plasticity-induced fatigue*, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, SpringerOpen, 3 (1), pp.15, 2016.
- [10] F. Taddei, A. Pancanti, M. Viceconti. *An improved method for the automatic mapping of Computed Tomography numbers onto Finite Element models*, Medical Engineering Physics n°26, Elsevier, 61–69, 2004.
- [11] J. Wahl, K. Harris. *CMSX-4® Plus (SLS) : An Improved 3rd Generation Single Crystal Alloy*, Volume 8 : Industrial and Cogeneration ; Manufacturing Materials and Metallurgy ; Marine ; Microturbines, Turbochargers, and Small Turbomachines, ASME, 2020.