



HAL
open science

Modélisation de la propagation de fissure en fatigue dans les superalliages base Nickel par une approche locale de la rupture

Olivier Voreux, Serge Kruch, Sylvia Feld-Payet, Pascale Kanoute, Noémie Rakotomalala

► To cite this version:

Olivier Voreux, Serge Kruch, Sylvia Feld-Payet, Pascale Kanoute, Noémie Rakotomalala. Modélisation de la propagation de fissure en fatigue dans les superalliages base Nickel par une approche locale de la rupture. MECAMAT 2020, Jan 2020, AUSSOIS, France. hal-02470672

HAL Id: hal-02470672

<https://hal.science/hal-02470672v1>

Submitted on 7 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODELISATION DE LA PROPAGATION DE FISSURE EN FATIGUE DANS LES SUPERALLIAGES BASE NICKEL PAR UNE APPROCHE LOCALE DE LA RUPTURE

Olivier Voreux^a, Serge Kruch^a, Sylvia Feld-Payet^a, Pascale Kanouté^a, Noémie Rakotomalala^b

^a DMAS, ONERA, Université Paris-Saclay, F-92322 Châtillon - France | olivier.voreux@onera.fr

^b Safran Tech, groupe Safran, Rue des Jeunes Bois, CS 80112, 78117 Châteaufort - France

Mots-clés : fatigue ; fluage ; ductilité ; fissuration ; mécanique de l'endommagement ; approche locale ; superalliage base Nickel ; modèle incrémental ; propagation ; élasto-viscoplasticité cyclique ; régularisation, remaillage.

Résumé

Cette étude concerne l'analyse de la fissuration dans les superalliages base Nickel employés dans les turbines aéronautiques. Dans ce but, un modèle de propagation de fissure en fatigue, de type incrémental en temps et utilisant des endommagements couplés au comportement du matériau a été développé. Afin de rendre compte à la fois des phénomènes complexes présents en pointe de fissure, des éventuelles instabilités de fissuration et du type de chargement, des endommagements induits par le fluage et la ductilité peuvent interagir avec celui de fatigue. Une régularisation du problème de dépendance au maillage via une approche non-locale permet de garantir la robustesse des calculs de structures par éléments finis.

1 Contexte de l'étude

Les superalliages base Nickel présentent des propriétés mécaniques capables de garantir une bonne tenue thermomécanique dans les zones chaudes des turbomachines aéronautiques où les contraintes et températures sont les plus élevées du moteur. Ils offrent, entre autres, une bonne tenue en fatigue et fluage jusqu'à 600°C et sont donc employés pour les pièces les plus critiques dont la tenue est essentielle pour le fonctionnement du moteur et la sécurité du vol. Dans un contexte de fissuration par fatigue, la Mécanique Linéaire de la Rupture (M.L.R.) suppose des conditions de plasticité confinée en pointe de fissure seulement. Un tel cadre permet de prédire la propagation d'une fissure dans le régime de Paris de manière globale, en ne tenant cependant pas compte des non-linéarités matérielles présentes dans la *process zone*. Or, des anomalies de propagation (courbure du front, déversement du plan de fissuration) ont récemment été observées dans ces superalliages lors d'essais de fissuration en fatigue avec et sans temps de maintien [1]. Ces perturbations du front de fissure semblent étroitement liées à des effets non-linéaires et à leur interaction, à proximité des lèvres et de la pointe de la fissure. L'intensité des chargements et des températures au niveau des turbines mettent en défaut ces approches globales et nécessitent la prise en compte d'un écoulement (visco)plastique et d'une redistribution des contraintes dans le voisinage de la fissure. Afin d'étudier les anomalies et les modéliser lors de calculs sur structures par la méthode des Éléments Finis (E.F.), une approche locale de la rupture, robuste numériquement, et adaptée à la fissuration par fatigue à haute température est ici considérée.

2 Comportement élasto-viscoplastique de l'AD730[®]

Le matériau support de cette étude est l'AD730, un superalliage base Nickel récemment développé par Aubert & Duval. Une campagne de caractérisation de son comportement cyclique en régime élasto-viscoplastique (E.V.P.) a été réalisée afin d'obtenir des boucles d'hystérésis visant à être représentatif des niveaux de plasticité présents proche de la singularité. Pour ce faire, des essais incrémentaux à niveaux croissants de déformation totale, sous différents rapports de charge, à plusieurs vitesses et à plusieurs températures ont été réalisés. Après l'obtention des boucles d'hystérésis, une méthode de dépouillement précise a permis de mettre en évidence les phénomènes ayant le plus d'influence sur la réponse cyclique du matériau. L'adoucissement cyclique et la forte contribution de l'érouissage cinématique ont notamment été mis en évidence, ainsi que leur dépendance vis à

vis des niveaux de plasticité atteints. La part de la contrainte visqueuse à haute température et la présence d'un faible effet de viscosité inverse ont également été montrés. Enfin, des tracés spécifiques en lien avec la règle de Masing (FIG. 1(a)) [2] ont permis d'analyser des effets cycliques particuliers, tels que l'effet Marquis ou l'effet mémoire [3], nécessitant tous deux un couplage entre écrouissages et plasticité.

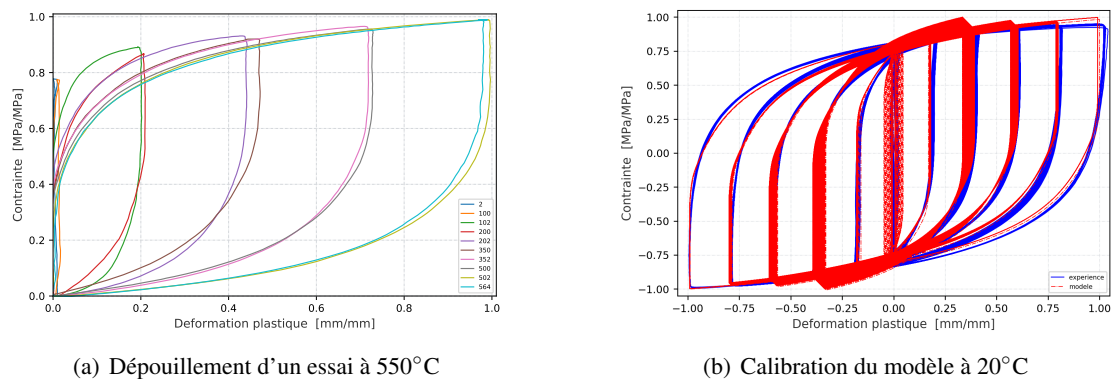


FIGURE 1 – Déroulement d'essai cyclique et calibration d'un modèle de comportement pour l'AD730 à $R_e = -1$.

La loi de comportement proposée dans cette étude et représentant le comportement cyclique de l'AD730 en régime E.V.P. est de type phénoménologique macroscopique. Elle comporte, dans le cas isotherme, une contribution élastique et une contribution (visco)plastique associée aux écrouissages. Le principe de l'état local associé à la Thermodynamique des Processus Irréversibles [3] permet l'introduction de variables internes associées aux phénomènes à étudier. Afin de rendre compte du caractère fortement non-linéaire de la réponse du matériau, une superposition d'écrouissages isotropes (scalaires) et cinématiques (tensoriels) a été introduite. Ces écrouissages permettent notamment de modéliser la forme et la taille des boucles d'hystérésis, tout en rendant compte de phénomènes liés à la plasticité cyclique (relaxation de la contrainte moyenne ou rochet). En complément, une loi de viscosité a été ajoutée de sorte à tenir compte de la contrainte visqueuse, à haute température principalement. Les équations constitutives ont ensuite été implantées dans le code de calcul *Z-set* co-développé par l'ONERA et l'École des Mines de Paris [4]. Un schéma purement implicite de type "Euler arrière", associé à une méthode de prédiction élastique / correction plastique ont été choisis afin de garantir une bonne stabilité lors de l'intégration locale de la loi non-linéaire au niveau des points de Gauss de l'E.F.

Finalement, l'estimation des paramètres de ce modèle, basée sur la physique des mécanismes et les résultats expérimentaux, a permis la calibration de la loi de comportement cyclique. Le bon accord entre simulation et expérience a été montré, quelles que soient les amplitudes de déformation investiguées (FIG. 1(b)), offrant ainsi la possibilité de considérer un couplage réaliste avec l'endommagement pilotant la fissuration.

3 Approche locale pour la fissuration par fatigue

Dans les matériaux métalliques polycristallins, il est désormais admis que l'endommagement de fatigue se manifeste généralement en surface, par l'apparition de bandes de glissements persistantes et des décohésions aux joints de grains. Un tel effet est continuellement entretenu dû aux mouvements des dislocations lors de chargements plastiques cycliques. Ainsi, un composant possédant une fissure déjà amorcée doit faire l'objet d'études en vue d'estimer sa propagation en régime de fatigue et de prévenir sa criticité. Cette propagation, dans le cas où la plasticité n'est pas seulement localisée en pointe de fissure, peut être estimée via la Mécanique de l'Endommagement Continu. Cela passe soit par un calcul d'endommagement en post-processing d'un calcul E.F., soit par une approche directement couplée lors du calcul [5]. Dans ce dernier cas, la perte de rigidité mécanique (élasticité et écrouissages) est directement associée au comportement à travers un couplage fort. L'endommagement, phénoménologique et scalaire, est alors introduit dans les équations constitutives à l'aide du principe de contrainte effective en lien avec une hypothèse d'équivalence en déformation totale [3]. Cet endommagement contient plusieurs contributions afin de rendre compte des multiples phénomènes liés au type de chargement et aux mécanismes de dégradation de la matière. L'endommagement de fatigue est ici écrit dans un formalisme incrémental en temps de sorte à simuler des cycles de chargement complexes et s'affranchir de la

notion de cycle. Il tient compte de la refermeture partielle des micro-défauts lors de l'inversion du chargement sous sollicitations alternées à l'aide d'une décomposition spectrale du tenseur des contraintes. Un tel effet rend compte d'une croissance moindre de l'endommagement lors d'écoulements plastiques en compression, ainsi que d'un regain en rigidité élastique par refermeture partielle des défauts ouverts lors de chargements antérieurs.

Le matériau, lors d'un cycle de vol, se voit être exposé à des temps de maintien plus ou moins longs et qui vont avoir un impact sur la propagation d'une macrofissure. L'endommagement de fatigue est alors complété par une contribution due au fluage, active lors des temps de maintien sous chargements complexes (fatigue-fluage), et traduisant la croissance de micro-cavités aux joints de grains.

Enfin, le fort niveau de plasticité présent au niveau de la singularité induit la présence d'effets ductiles qui doivent également être pris en compte pour rendre compte de la croissance de micro-cavités et de leur coalescence.

Les équations constitutives (lois d'état et d'évolution) ont donc été couplées de manière forte avec cet endommagement total, tant au niveau de l'élasticité que de la (visco)plasticité. Le caractère incrémental en temps des lois d'évolution propres à chaque variable interne, y compris pour l'endommagement de fatigue, a permis l'unification du schéma de discrétisation temporelle, purement implicite, valable quel que soit le type de chargement (fatigue / fatigue-fluage). La convergence de la loi à l'échelle d'un VER a ensuite été vérifiée.

Il est néanmoins bien connu que l'utilisation de ce type d'approche couplée induit un adoucissement de la réponse mécanique piloté par l'endommagement. Cela entraîne une perte d'ellipticité des équations, et donc, la perte d'unicité de la solution du problème d'équilibre couplé. Un moyen de remédier à cela a consisté à proposer une formulation non-locale du modèle pour garantir la robustesse des calculs de structures par E.F.

4 Vers une formulation non-locale du modèle couplé

Afin de traiter le phénomène de dépendance au maillage dans le calcul de structures par la méthode des E.F., le modèle local a été modifié à l'aide d'une formulation à gradient de variable interne de type implicite similaire à celle donnée par l'équation (1-a). Cette formulation enrichie est associée à une nouvelle condition limite non standard donnée par l'équation (1-b). Une telle modification offre la possibilité de tenir compte de l'interaction entre un point matériel et son voisinage. L'enrichissement est possible au moyen de la longueur interne l , caractéristique du matériau, ajoutée aux paramètres du modèle [6], [7]. La formulation des E.F. utilisés dans les calculs a donc été complétée, au niveau nodal, par la variable non-locale choisie, et la loi de comportement endommageable a ainsi été modifiée de sorte à fournir l'évolution des variables flux ($\underline{\sigma}$, \mathcal{V}) associées aux variables forces imposées ($\underline{\varepsilon}$, \mathcal{V}_{nl}). Les équations constitutives du modèle ont donc été modifiées en lien avec l'introduction de la variable non-locale, puis les matrices Jacobienne et tangente consistante ont été recalculées de sorte à garantir la bonne convergence du schéma d'intégration implicite.

$$\mathcal{V}_{nl} - l^2 \nabla^2 \mathcal{V}_{nl} = \mathcal{V} \quad \text{sur } \Omega \quad \vec{\nabla} \mathcal{V}_{nl} \cdot \vec{n} = 0 \quad \text{sur } \partial\Omega \quad (1)$$

La vérification de l'étape de régularisation du problème adoucissant a finalement été effectuée à l'aide d'une étude de convergence en maillage (FIG. 2) en veillant à conserver une largeur de bande de localisation contenant suffisamment d'éléments. Cette étape induisant des coûts de calcul importants, un estimateur d'erreur basé sur un champ scalaire a alors été mis en place de sorte à optimiser le compromis coût / précision. Des étapes d'adaptation de maillage ont alors été réalisées à cet effet. Elles sont basées sur des cartes de tailles de mailles optimisées au regard des zones où les gradients mécaniques sont importants et peu réguliers [7].

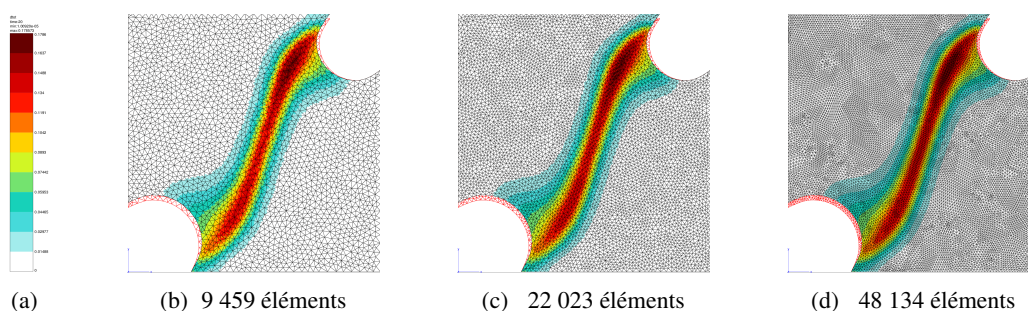


FIGURE 2 – Étude de convergence en maillage du modèle d'endommagement non-local (endommagement total).

5 Conclusion de l'étude et perspectives

A ce stade de l'étude, un modèle de comportement cyclique endommageable adapté au superalliage AD730 a été proposé. Ce modèle, calibré d'un point de vue comportement et adoucissant de par le couplage à l'endommagement, souffre d'une dépendance pathologique à la discrétisation spatiale lors de calculs par la méthode des E.F.. Pour remédier à cela, le modèle a été régularisé à l'aide d'une approche non-locale à gradient de variable interne. La convergence en maillage a été validée et des outils d'adaptation de maillage ont également été mis en place afin de limiter les coûts de calcul et accroître la précision dans les zones à forts gradients.

Dans la suite des travaux, le passage à la propagation de fissure repose sur l'utilisation d'un algorithme de suivi de crête [8], dont le support est un champ scalaire régularisé et lissé, permettant le passage d'une formulation continue à l'insertion d'une discontinuité dans le calcul de structure. A cet effet, des outils d'intersection de maillage [9] et de transfert de champs [7] développés à l'ONERA, couplés à des outils de génération de maillage développés par l'INRIA, seront employés pour rendre compte de la fissure réelle dans la structure et la propager. Sur le plan expérimental, il est prévu de réaliser des essais de comportement cycliques et de relaxation de contrainte supplémentaires afin d'enrichir la base expérimentale déjà disponible. Des essais de fissuration à chaud en fatigue pure et fatigue-fluage sur AD730 à des températures d'intérêt sont également prévus afin de rechercher le(s) seuil(s) de propagation et d'étudier les effets du rapport de charge.

Enfin, le modèle (non-local) d'endommagement incrémental sera calibré pour la fissuration en fatigue à l'aide des essais et simulations réalisés (validation des choix initiaux et modifications éventuelles). L'enrichissement de la contribution liée à l'endommagement ductile (dans la *process zone*, en pointe de fissure) pourra également permettre d'apporter des réponses quant aux anomalies de fissuration observées expérimentalement et jusqu'ici non modélisées dans les calculs de fissuration par fatigue. A cet effet, un critère local déterminant la transition entre un mode de fissuration dominé par la traction et un autre mode combinant la traction et le cisaillement [10] pourra être considéré pour rendre compte du déversement de la fissure en mode mixte.

Finalement, la comparaison des courbes de fissuration obtenues par ce modèle basé sur la Mécanique de l'Endommagement et les courbes issues de la Mécanique Linéaire de la Rupture permettra de valider l'approche locale ici proposée, tout en mettant en évidence ses éventuelles limites. Une validation dans un cas de plasticité généralisée pourra également être envisagée avec cette même démarche.

Remerciements

Cette étude est effectuée dans le cadre du PR MEANDRES porté par Vincent Bonnard (ONERA) que nous remercions. Les auteurs tiennent également à remercier le groupe SAFRAN via Safran Tech son pôle de R&T (*Computational Solid Mechanics*) pour le support financier accordé à ces travaux.

Références

- [1] E. Fessler. Étude des interactions fatigue-fluage-environnement lors de la propagation de fissure dans l'Inconel718 DA, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2017.
- [2] J.-L. Chaboche. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity, *International Journal of Plasticity*, 2 (2), p. 149-188, 1986.
- [3] J. Lemaitre et R. Desmorat. Engineering Damage Mechanics : ductile, creep fatigue and brittle failures, *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, 2005.
- [4] Armines, ONERA, Northwest Numerics and Modeling, Inc. Z-set – Non-linear material and structure analysis suite, <http://zset-software.com/>.
- [5] J. Lemaitre, J.-L. Chaboche, A. Benallal, R. Desmorat. Mécanique des matériaux solides - 3^{ème} édition, *Dunod*, 2009.
- [6] R.H.J. Peerlings, R. de Borst, W.A.M. Brekelmans, J.H.P. de Vree. Gradient enhanced damage for quasi-brittle materials, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39 (19), p. 3391-3403, 1996.
- [7] S. Feld-Payet. Amorçage et propagation de fissures dans les milieux ductiles non locaux, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010.
- [8] S. Feld-Payet, V. Chiaruttini, J. Besson, F. Feyel. A new marching ridges algorithm for crack path tracking in regularized media, *International Journal of Solids and Structures*, 71, p. 57-69, 2015.
- [9] V. Chiaruttini, F. Feyel, J.-L. Chaboche. A robust meshing algorithm for complex 3D crack growth simulation, *Proceedings of the IV European Conference on Computational Mechanics*, Paris, France, 2010.
- [10] J.-B. Esnault. Étude expérimentale et numérique en trois dimensions du développement en fatigue d'une fissure déversée dans une tôle mince, Thèse de doctorat, École Polytechnique, Palaiseau, 2014.