

Modélisation de l'impact des procédés de fabrication sur la durée de vie en fatigue oligocyclique : application au perçage du TA6V

K. Chenegrin¹, F. Fauvin¹, G. Surdon², E. Feulvarch¹

¹ Univ. Lyon, École Centrale de Lyon-ENISE, LTDS UMR CNRS 5513, 58 rue Jean Parot, 42023 Saint-Étienne Cedex 2, France, {kevin.chenegrin, francoise.fauvin, eric.feulvarch}@enise.fr

² Dassault Aviation, 54 avenue Marcel Dassault BP 24, 33701 Mérignac Cedex, France, gilles.surdon@dassault-aviation.com

Résumé — Les exigences de réduction de poids dans l'industrie aéronautique contraignent les acteurs de ce secteur à maîtriser l'impact des procédés de fabrication sur la durée de vie en fatigue oligocyclique. Pour les composants percés soumis à des chargements thermomécaniques cycliques, les contraintes en service dépendent des contraintes internes induites par le procédé. Par une double approche expérimentale et numérique, l'objectif de ces travaux est de modéliser l'impact du procédé de perçage sur la durée de vie en fatigue oligocyclique de l'alliage de titane TA6V.

Mots clés — Perçage, Titane, Couplages multi-physiques, Fatigue oligocyclique.

1 Introduction

Dans l'industrie aéronautique, le perçage de matériaux métalliques occupe une place importante dans la fabrication de composants de structure civils et militaires. Lorsque ces composants sont soumis à des chargements thermomécaniques cycliques, les contraintes en service dépendent des contraintes internes induites par le procédé. Dans le cas où les cycles de chargement conduisent à plastifier la structure, la répartition de ces contraintes internes peut fortement modifier l'évolution cyclique de la contrainte normale sur le plan critique [1], qui est un paramètre essentiel pour l'estimation de la durée de vie en fatigue [2]. De fait, le procédé de perçage peut présenter une influence significative sur la localisation des zones de rupture ainsi que sur la vitesse de propagation des fissures.

Malheureusement, l'étude expérimentale de ce procédé est très difficile en raison de l'environnement confiné dans lequel se produisent les mécanismes de coupe. La simulation numérique apparaît donc comme un moyen privilégié pour modéliser et appréhender l'impact thermomécanique d'une opération de perçage sur la durée de vie en fatigue d'un composant métallique. En effet, la simulation numérique peut être utilisée comme un outil de compréhension permettant de suivre l'évolution géométrique du trou percé en cours de process. De plus, celle-ci peut fournir de précieuses données à proximité de la zone de coupe située dans un environnement confiné.

Au sein de la communauté scientifique, la simulation numérique du perçage s'est peu à peu développée avec l'accroissement des capacités de calcul. Ainsi, ces dernières années ont vu apparaître l'émergence de modèles 3D capables de représenter les phénomènes mis en jeu dans un trou percé, notamment grâce à la mise en œuvre de formalismes partiellement ou totalement Lagrangien. C'est notamment le cas de Nan *et al.* [3] qui simulent le perçage d'une pièce en acier AISI 1045 à l'aide de ce type de formalisme. Toutefois, le temps simulé n'est que de 30 millisecondes ce qui correspond à une profondeur de perçage d'environ 50 μm . Dans des travaux plus récents, Pang *et al.* [4] évaluent la performance d'outils différemment revêtus au cours du perçage du superalliage Inconel 718. Le modèle numérique permet entre autres de prédire le champ de température dans la pièce et sur le foret en cours de perçage (voir Fig. 1).

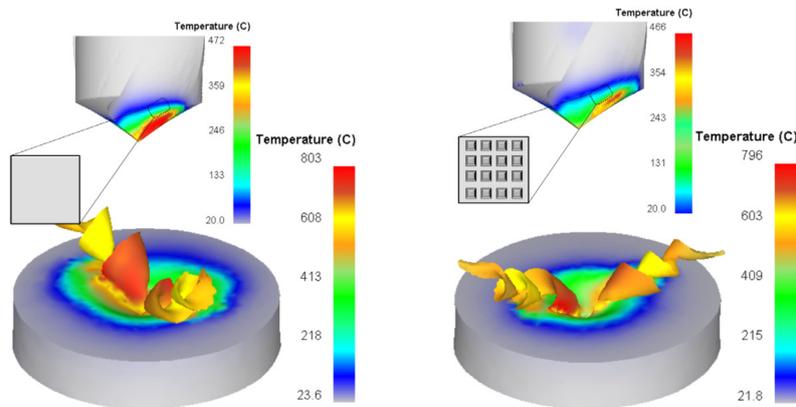


FIGURE 1 – Champ de température (°C) simulé au cours du perçage de l’Inconel 718 [4].

Dans un registre similaire, Bonnet *et al.* [5] développent un modèle de perçage en 3D pour évaluer les chargements thermomécaniques générés par le perçage d’un trou de 2 mm dans un alliage de titane TA6V. Les travaux de thèse de Lacombe [6] constituent également une source de données récente sur la simulation des conséquences thermomécaniques induites par une opération de perçage. Une étude expérimentale permet notamment de montrer l’influence de ce procédé sur la tenue en fatigue de pièces en alliage d’aluminium 2024-T351.

L’étude de la littérature montre que la mise en œuvre de formalismes partiellement ou totalement Lagrangien conduit à des profondeurs simulées ne dépassant pas plus de 2 mm pour les modèles en 3D. En effet, les très hauts taux de déformation mis en jeu par le processus de coupe induisent des opérations de remaillage périodiques, généralement très coûteuses en temps de calcul, et qui limitent les profondeurs simulées. À la connaissance des auteurs, la modélisation de l’impact du perçage sur la tenue en fatigue de composants n’a pas encore fait l’objet de travaux de recherche dans la littérature.

Afin d’éviter le traitement complexe de l’enlèvement de matière, les travaux présentés dans cet article s’appuient sur la stratégie de simulation 3D proposée par Chenegrin *et al.* [7]. Celle-ci consiste à traiter de façon purement Eulérienne la zone de coupe présentant de hauts taux de déformation, de manière à éviter les distorsions du maillage. Cette formulation est couplée à une stratégie de déplacement du maillage qui permet d’être conforme à la géométrie du procédé et aux conditions aux limites tout au long de la simulation. De cette manière, l’évolution transitoire des transferts de chaleur en cours de perçage peut être simulée pour des trous de grande profondeur sans restriction. L’objectif de ces travaux étant de modéliser l’impact du perçage sur la durée de vie en fatigue oligocyclique d’une pièce en TA6V, les conséquences mécaniques induites par le procédé sont ensuite modélisées à l’aide d’une simulation thermo-élastoplastique en 3D. Finalement, ces résultats sont exploités pour une analyse en fatigue basée sur un calcul cyclique représentatif du comportement de la pièce en service.

2 Modélisation thermomécanique de l’opération de perçage

2.1 Calibration d’un modèle viscoplastique de Norton-Hoff

En s’appuyant sur la modélisation physique développée par Chenegrin *et al.* [7] pour le procédé de perçage, nous proposons de mettre en œuvre un modèle de comportement viscoplastique pour représenter l’écoulement matériel du TA6V à l’état solide. L’intérêt de ce type de modèle est de ne pas faire intervenir l’histoire mécanique vécue par le matériau au cours du procédé. Dans ces travaux, le comportement viscoplastique du matériau est modélisé sous la forme tensorielle suivante :

$$\mathbf{S} = 2\eta\mathbf{D} \quad (1)$$

où η et \mathbf{D} représentent respectivement la viscosité dynamique et le tenseur des taux de déformation.

En considérant la prédominance des déformations plastiques dans la zone d'enlèvement de matière, les déformations thermiques et élastiques dans cette zone sont négligées. Dans ce cas, le tenseur des taux de déformation plastique \mathbf{D}^p équivaut au tenseur des taux de déformation \mathbf{D} , lui-même défini à partir du champ de vitesse \mathbf{v} de la matière :

$$\mathbf{D}^p \approx \mathbf{D} = \frac{1}{2} (\mathbf{grad}(\mathbf{v}) + \mathbf{grad}^T(\mathbf{v})) \quad (2)$$

Afin de modéliser le caractère visqueux du TA6V à haute température, nous proposons de définir l'évolution de la viscosité dynamique η à partir du modèle de Norton-Hoff, telle que :

$$\eta = K \left(\sqrt{3} \dot{\epsilon}^p \right)^{m-1} \quad (3)$$

avec $\dot{\epsilon}^p$ le taux de déformation plastique équivalent. Les paramètres K et m représentent respectivement la consistance du matériau et la sensibilité de la contrainte au taux de déformation.

Dans ces travaux, les paramètres K et m sont identifiés au moyen de courbes contrainte-taux de déformation, dans une gamme de température comprise entre 25 et 800°C (voir Fig. 2b). Ces courbes sont obtenues à partir du modèle de Johnson-Cook et des données expérimentales issues des travaux de Seo *et al.* [8] sur l'alliage de titane TA6V (voir Fig. 2a).

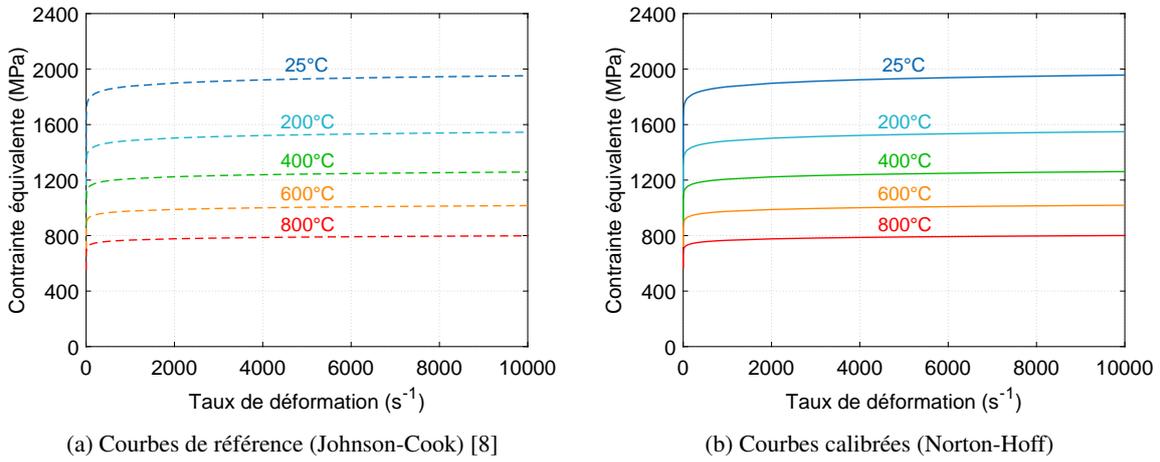


FIGURE 2 – Courbes contrainte-taux de déformation identifiées pour l'alliage de titane TA6V.

La consistance K identifiée pour le TA6V décroît linéairement d'une valeur de 950 à 400 MPa.s^m entre 25 et 800°C. Quant au coefficient de sensibilité au taux de déformation m , celui-ci présente une valeur constante de 0,0191 dans la gamme de température considérée.

2.2 Simulation numérique des transferts de chaleur

En perçage, les déformations plastiques induites par l'enlèvement de matière provoquent une forte élévation de la température en pointe de foret. Au sein du modèle numérique, les échanges thermiques sont régis par l'équation de la chaleur qui s'écrit dans le cas transitoire :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{v}_{cv} \cdot \mathbf{grad} \theta \right) = \mathbf{div}(\lambda \cdot \mathbf{grad} \theta) + \alpha \mathbf{S} : \mathbf{D} \quad (4)$$

où ρ est la masse volumique du matériau, C_p la chaleur spécifique et λ la conductivité thermique. Les propriétés physiques du TA6V utilisées dans ces travaux dépendent de la température θ et sont extraites du manuel sur les propriétés des alliages de titane [9]. Du fait de la configuration Eulérienne de l'écoulement matériel, l'équation (4) intègre un terme de transport supplémentaire $\mathbf{v}_{cv} \cdot \mathbf{grad} \theta$ où \mathbf{v}_{cv} décrit la vitesse de convection de la matière.

Le facteur α représente le coefficient de Taylor-Quinney qui peut prendre une valeur comprise entre 0 et 1. Celui-ci traduit la proportion de la puissance mécanique dissipée sous forme de chaleur. Ainsi, de par le terme $\alpha \mathbf{S} : \mathbf{D}$, nous considérons dans le modèle que l'échauffement généré par l'enlèvement de matière provient d'une partie de la puissance mécanique mise en jeu dans la zone de coupe. D'après les travaux de Rittel *et al.* [10], le coefficient de Taylor-Quinney du TA6V vaut en moyenne 0,4 dans une gamme de taux de déformation comprise entre 1500 et 7000 s⁻¹.

Afin de simuler l'évolution transitoire des transferts de chaleur en cours de perçage, la stratégie de simulation 3D proposée par Chenegrin *et al.* [7] a été mise en œuvre dans ces travaux à l'aide du code de calcul commercial SYSWELD® [11]. De cette manière, l'évolution du champ de température est simulée dans une pièce percée en TA6V de 9 mm d'épaisseur (voir Fig. 3a). Le temps de calcul CPU est compatible avec une utilisation industrielle puisque celui-ci est seulement de quelques heures sur une machine de calcul standard. D'autre part, le maillage de la pièce est construit de manière à capter les très forts gradients de température à proximité du trou percé (voir Fig. 3b).

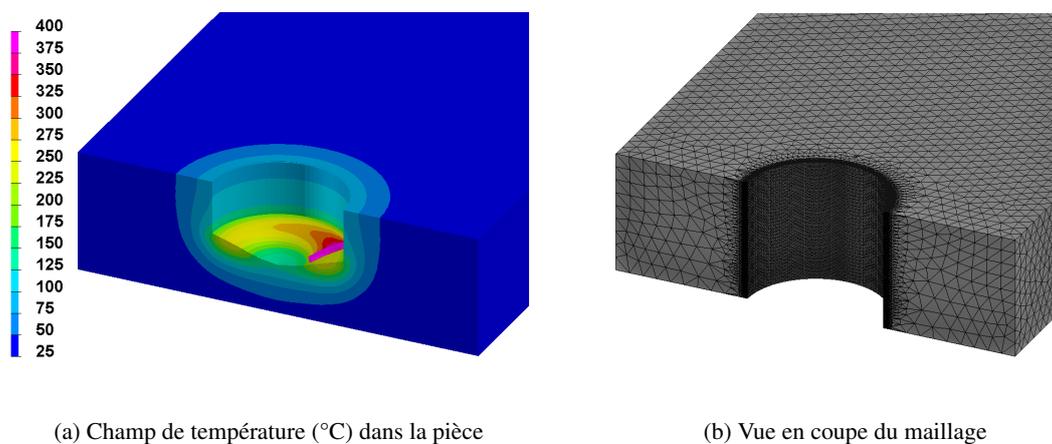


FIGURE 3 – Simulation des transferts de chaleur au cours du perçage de l'alliage de titane TA6V.

3 Impact du perçage sur la durée de vie en fatigue oligocyclique

3.1 Conséquences mécaniques induites par le procédé

Le modèle thermo-viscoplastique présenté dans la section précédente n'est pas en mesure de simuler les conséquences mécaniques induites par le procédé. En effet, le modèle de comportement mis en œuvre ne fait pas intervenir de variables internes liées à l'élasticité du matériau. C'est pour cette raison que nous proposons de simuler les conséquences mécaniques induites par l'opération de perçage au moyen d'un modèle thermo-élastoplastique 3D. Cette simulation est réalisée avec un maillage correspondant à la géométrie finale de la pièce percée (voir Fig. 4). Pour ce faire, le champ de température simulé dans la section précédente est projeté sur ce maillage. Afin de modéliser l'impact du perçage sur la durée de vie en fatigue oligocyclique d'une structure percée, les résultats obtenus sont exploités dans le cadre d'une analyse en fatigue.

3.2 Modélisation de la durée de vie en fatigue

Dans le cadre de ces travaux, nous proposons de modéliser la durée de vie en nombre de cycles d'une pièce percée soumise à un chargement cyclique multiaxial, en se plaçant dans une configuration de fatigue oligocyclique. Cette configuration tient compte de la plasticité importante induite par le procédé à proximité du trou percé. Dans ce contexte, une approche de type plan critique est mise en œuvre.

Pour notre cas d'étude, nous faisons le choix d'utiliser le critère de Fatemi-Socie [12]. Sur la facette correspondant au plan critique, la possible présence d'une contrainte d'ouverture est prise en compte dans la fonction d'endommagement. La durée de vie en nombre de cycles N_f peut ainsi être estimée de la manière suivante :

$$\frac{\Delta\gamma}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_y} \right) = f(N_f) \quad (5)$$

où $\Delta\gamma$ représente l'amplitude de déformation en cisaillement, $\sigma_{n,\max}$ la contrainte normale maximale, σ_y la limite d'élasticité et k un paramètre intrinsèque au matériau.

L'analyse en fatigue de la pièce percée est basée sur un calcul cyclique représentatif du comportement de la pièce en service. À partir de ce calcul cyclique, l'amplitude de déformation en cisaillement sur le plan critique est évaluée en mettant en œuvre l'approche numérique développée par Fauvin *et al.* [1]. Cette approche présente l'avantage d'être peu coûteuse en temps de calcul CPU comparé aux algorithmes classiquement utilisés dans la littérature pour le calcul de l'amplitude de déformation en cisaillement. De cette manière, la cartographie de la durée de vie en nombre de cycles est estimée pour la structure percée (voir Fig. 4).

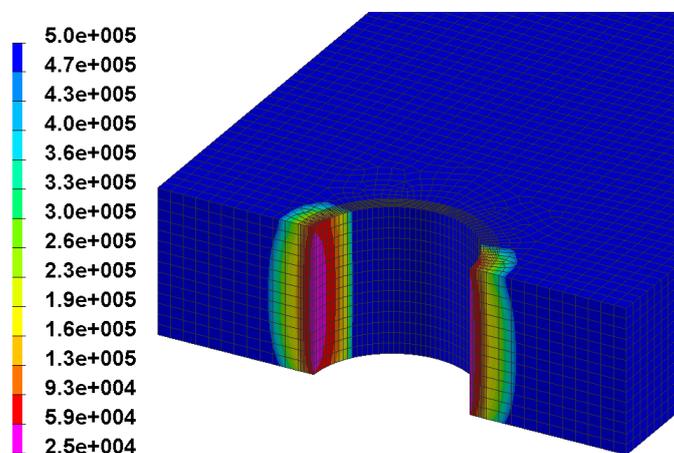


FIGURE 4 – Cartographie de la durée de vie en nombre de cycles d'une structure percée.

Remerciements

Les auteurs remercient le CORAC (Conseil pour la Recherche Aéronautique Civil) et Dassault Aviation pour le soutien de cette étude intégrée dans le projet NOUGAT (NOUvelle Génération d'Assemblage AéronauTique) de la plateforme UAF (Usine Aéronautique du Futur).

Références

- [1] F. Fauvin, J.-C. Roux, P. Monnet, and E. Feulvarch. Fast estimation of the shear stress amplitude for fatigue life analysis of metals. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 80 :103928, 2020.
- [2] K. Dang-Van, A. Bignonnet, and J.-L. Fayard. Assessment of welded structures by a structural multiaxial fatigue approach. *European Structural Integrity Society*, 31 :3–21, 2003.
- [3] X. Nan, L. Xie, and W. Zhao. On the application of 3D finite element modeling for small-diameter hole drilling of AISI 1045 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9-12) :1927–1939, 2016.
- [4] K. Pang and D. Wang. Study on the performances of the drilling process of nickel-based superalloy Inconel 718 with differently micro-textured drilling tools. *International Journal of Mechanical Sciences*, 180 :105658, 2020.

- [5] C. Bonnet, T. Pottier, and Y. Landon. Development of a multi-scale and coupled cutting model for the drilling of Ti-6Al-4V. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 35 :526–540, 2021.
- [6] A. Lacombe. *Influence du procédé de perçage sur l'intégrité de surface et la tenue en fatigue de pièces percées en AA2024-T351*. PhD thesis, Univ. Toulouse, 2021.
- [7] K. Chenegrin, J.-C. Roux, C. Helfenstein-Didier, C. Pouvreau, M. Girinon, H. Karaouni, J.-M. Bergheau, and E. Feulvarch. 3D numerical simulation of heat transfer during dry drilling of Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, 64 :1143–1152, 2021.
- [8] S. Seo, O. Min, and H. Yang. Constitutive equation for Ti-6Al-4V at high temperatures measured using the SHPB technique. *International Journal of Impact Engineering*, 31(6) :735–754, 2005.
- [9] R. Boyer, G. Welsch, and E.W. Collings. *Materials Properties Handbook : Titanium Alloys*. ASM International, 1994.
- [10] D. Rittel, L.H. Zhang, and S. Osovski. The dependence of the Taylor–Quinney coefficient on the dynamic loading mode. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 107 :96–114, 2017.
- [11] ESI Group. Manuel de référence, 2021.
- [12] A. Fatemi and D. F. Socie. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 11(3) :149–165, 1988.