

Modélisation de l'impact des contraintes résiduelles sur la durée de vie en fatigue : application au perçage aéronautique de l'alliage 2024

Q. Duclos^{1,2}, V. Bonnard¹, P. Kanoute¹, E. Deletombe¹, E. Feulvarch³

¹ ONERA, 29 Av. de la Division Leclerc, 92320 Châtillon, France,
{quentin.duclos,vincent.bonnard,pascale.kanoute,eric.deletombe}@onera.fr

² Univ. Lille, LaMcube, UMR 9013 CNRS, Bâtiment ESPRIT, Cité Scientifique, Villeneuve-d'Ascq, France

³ Univ. Lyon, Ecole Centrale de Lyon, LTDS, UMR 5513 CNRS, 58 rue Jean Parot, F-42023 Saint-Etienne cedex 2, France,
eric.feulvarch@enise.ec-lyon.fr

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. Pour les composants percés soumis à des chargements mécaniques cycliques, les contraintes en service dépendent des contraintes internes initiales introduites 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 de composants en alliage d'aluminium 2024.

Mots clés — Perçage, Alliage 2024, Contraintes résiduelles, Fatigue.

1 Introduction

De nos jours les perçages industriels sont automatisés. Cela a pour avantage d'améliorer la répétabilité de l'opération et par conséquent, une meilleure maîtrise de la durée de vie des composants assemblés. Dans des domaines comme l'aérospatial l'estimation de cette durée de vie est importante. En effet on cherche à prévoir quand pourront apparaître des fissures par fatigue induites par la répétition de chargements thermomécaniques plus ou moins complexes. L'enjeu industriel est de planifier les maintenances préventives, prévenir l'amorçage de fissures et ainsi assurer la sécurité des avions. Cependant, connaître cette durée de vie en fatigue, implique des campagnes expérimentales longues et coûteuses. Il faut également prendre en compte les paramètres influençant cette durée de vie et notamment les contraintes résiduelles induites par le perçage. Malgré le fait que le perçage soit l'une des plus anciennes opérations d'usinage, elle reste l'une des plus difficiles à étudier compte tenu des mécanismes mis en jeu. Grâce aux progrès constants des outils numériques, il devient possible d'approfondir l'étude des paramètres critiques impliqués dans le processus de perçage, tels que la géométrie, les contraintes et les conditions opératoires, qui ont un impact direct sur la résistance à la fatigue des pièces assemblées. 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.* [1] 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.* [2] 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.

Dans un registre similaire, Bonnet *et al.* [3] 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 [4] 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.

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.* [5]. 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 (Fig. 1).

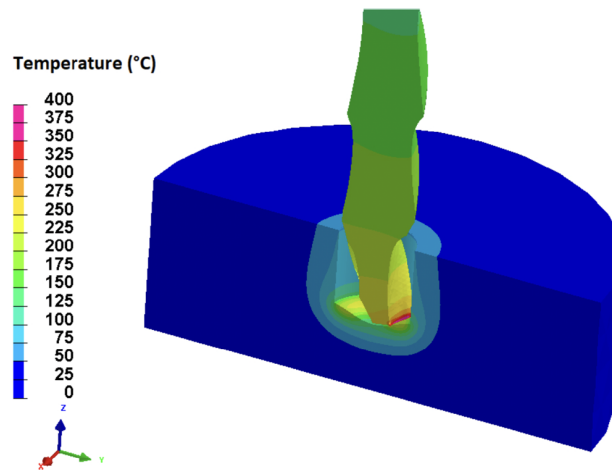


FIGURE 1 – Champ de température (C) simulé au cours du perçage de l'Inconel 718 [5].

L'objectif de ces travaux étant de modéliser l'impact du perçage conventionnel sur la durée de vie en fatigue d'une pièce en alliage d'aluminium 2024, les conséquences thermomécaniques induites par le procédé sont ensuite modélisées à l'aide d'une simulation thermo-elasto-plastique en 3D. Ces résultats sont exploités par une analyse en fatigue basée sur l'emploi d'un modèle d'endommagement en fatigue développé à l'Onera.

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 dans [5] pour le procédé de perçage conventionnel, nous proposons de mettre en œuvre un modèle de comportement viscoplastique pour représenter l'écoulement matériel de l'alliage AA2024. 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 de l'alliage AA2024 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.

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 de l'alliage 2024 utilisées dans ces travaux dépendent de la température θ . 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.

Afin de simuler l'évolution transitoire des transferts de chaleur en cours de perçage, la stratégie de simulation 3D proposée par Chenegrin *et al.* [5] a été mise en œuvre dans ses travaux à l'aide du code de calcul SYSWELD® [6]. De cette manière, l'évolution du champ de température est simulée dans une pièce percée en alliage d'aluminium 2024 de 3 mm d'épaisseur ayant un diamètre de 4 mm (Fig. 2).

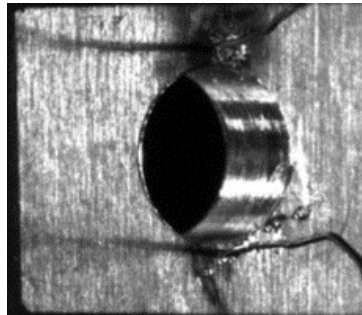


FIGURE 2 – Observation du trou percé.

3 Impact du perçage sur la durée de vie en fatigue

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 contraintes résiduelles 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 contraintes résiduelles 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. Pour ce faire, le champ de température simulé dans la section précédente est projeté sur ce maillage. Ce modèle thermo-élastoplastique permet d'obtenir les contraintes résiduelles dans la pièce après perçage. Afin de modéliser l'impact de ce procédé sur la durée de vie en fatigue d'une pièce percée, l'état de contraintes résiduelles simulé est exploité 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 nous proposons d'étudier la durée de vie à l'amorçage d'une pièce percée soumise à un chargement cyclique. Cette configuration tient compte de la plasticité importante induite par le procédé à proximité du trou percé qu'il faut retranscrire avec une loi de comportement adéquate. Le matériau présente en effet plusieurs phénomènes identifiés à l'aide d'essais cycliques réalisés à niveau croissant de déformation : durcissement cyclique, dissymétrie traction/compression, anisotropie plastique évanescence avec le cyclage. Un modèle de comportement spécifique est donc considéré. Une analyse de durée de vie est alors réalisée en post-traitement d'un calcul cyclique sur éprouvettes percées. Différents modèles de durée de vie peuvent alors être considérés de type plan critique ou d'endommagement continu. Une exploitation avec un modèle d'endommagement de fatigue multiaxial développé à l'Onera est menée pour veiller à rendre compte du chargement local en bord du trou percé. Pour éprouver la pertinence des différentes briques du chainage, une campagne d'essais spécifique est mise en place sur éprouvettes percées. Les essais de fatigue jusqu'à rupture sont conduits en effort imposé à un rapport de charge $R=0.1$. La technique de corrélation d'images est mise en œuvre afin de valider les champs locaux calculés avec la loi de comportement. Un effort est mis également sur la détection au plus tôt de l'amorçage d'une fissure. Pour ce faire, sont combinés la méthode du potentiel électrique exploitée en écart à la linéarité et la visualisation rapprochée de l'alésage par caméra. Une visualisation du dispositif expérimental est donnée à la Figure 3.

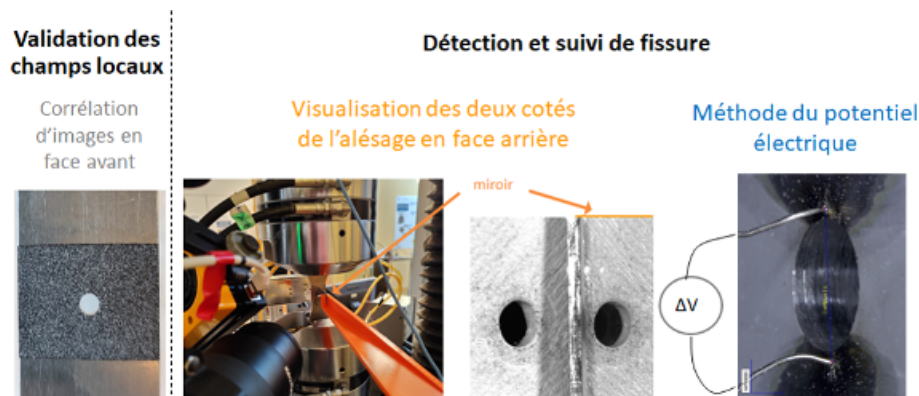


FIGURE 3 – Illustration du dispositif expérimental mise en place lors des essais de fatigue sur éprouvettes percées.

Avec cette méthodologie, la cartographie du nombre de cycles à l'amorçage estimée, à partir de celle d'endommagement (Fig. 4), est comparée à la durée de vie expérimentale pour la structure percée.

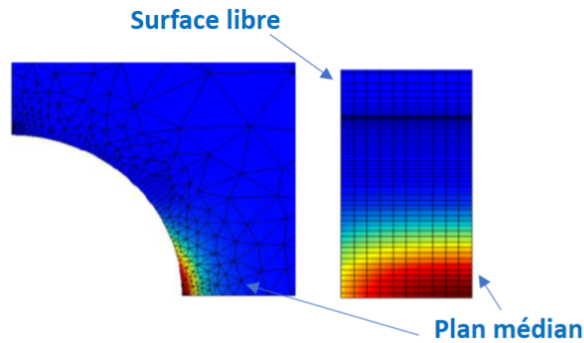


FIGURE 4 – Exemple de cartographie d’endommagement obtenue en zone de trou percée.

3.3 Conclusions

Avec la méthodologie proposée, la cartographie du nombre de cycles à l’amorçage peut être estimée à partir de celle de l’endommagement (Fig. 4), et être comparée à la durée de vie expérimentale de la structure percée. Des résultats expérimentaux et numériques illustrant cette approche seront présentés, la méthodologie évaluée, et des perspectives envisagées.

Références

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] K. Chenegrin, J.-C. Roux, C. Helfenstein-Didier, C. Pouvreau, M. Girinon, H. Karaoui, 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.
- [6] ESI Group. Manuel de référence, 2021.
- [7] 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.
- [8] 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.