

Développement d'une méthode d'analyse numérique en fatigue autour d'un pore tueur sur des éprouvettes en Titane Ti 6Al 4V issues de la fabrication additive.

J. Vermorel¹, P. Bocher², F. Fauvin¹, E. Feulvarch¹

¹ Univ. Lyon, Ecole Centrale de Lyon-ENISE, LTDS UMR CNRS 5513, 58 rue Jean Parot, 42023 Saint-Etienne Cedex 2, France, {julien.vermorel, francoise.fauvin, eric.feulvarch}@enise.fr

² Département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure, Montréal H3C 1K3, Canada, philippe.bocher@etsmtl.ca

Résumé — La fabrication additive présente des performances en fatigue plus décevantes que pour les procédés plus conventionnels. Un des facteurs principaux de cette diminution de performance est la présence de défauts qui occasionnent l'apparition de fissures pouvant se développer. Il serait intéressant d'estimer la durée de vie en fatigue de pièces issues de la fabrication additive en réalisant une simulation numérique prenant en compte ces défauts grâce à la tomographie. Dans cette démarche, l'estimation de la durée de vie est abordée par un critère de fatigue multi-axiale de type plan critique.

Mots clefs — Fabrication additive, plan critique, fatigue multi-axiale.

1. Introduction

La fabrication additive est un procédé qui présente de nombreux avantages avec la possibilité de réaliser des pièces à géométries complexes tout en réalisant une économie de matière. Ces géométries complexes vont favoriser l'optimisation topologique et le gain de poids des systèmes. Toutefois, bien que la fabrication additive soit une technologie prometteuse en regard du contexte énergétique et écologique, les performances mécaniques en fatigue peuvent être plus décevantes que pour des pièces obtenues par des procédés plus conventionnels. Un des facteurs principaux de la diminution de performance pour les pièces obtenues par fabrication additive est la présence de défauts [1] qui occasionnent l'apparition de fissures pouvant se développer. Ces défauts peuvent être identifiés grâce à la tomographie, une méthode d'identification non destructive. La tomographie permet, via des rayons X, de reconstituer en 3 dimensions les pores contenus dans l'éprouvette au micron près. Pour garantir un nombre de cycles avant rupture, la réalisation de tests dans des conditions similaires à celles du fonctionnement réel s'avère essentielle. Ces essais sont destructifs, long et coûteux ce qui est problématique pour l'industrie. Prédire ces essais à l'aide de la simulation numérique basé sur la prise en compte des défauts se révélerait un outil puissant puisqu'économique en matière d'énergie, de temps et d'argent. L'objectif global du projet s'inscrit dans ce contexte puisqu'il s'agit de proposer une démarche numérique qui permettrait de prédire quel pore va engendrer la rupture d'une éprouvette en Titane Ti 6Al 4V issue de la fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre et d'estimer sa durée de vie en fatigue. Cette démarche prend en compte la géométrie des pores issus de la tomographie dans les calculs et utilise un critère de fatigue de type plan critique. L'enjeu est d'obtenir une bonne adéquation entre les résultats numériques et les premiers essais expérimentaux de fatigue polycyclique sous chargement uniaxial.

2. Cadre de travail

Un lot d'éprouvettes en Titane Ti 6Al 4V est soumis à un chargement cyclique en R0,1 uniaxial suivant l'axe Z, en dessous de la limite d'élasticité du matériau. Pour chaque essai expérimental le pore qui a engendré la fissure (pore tueur) est localisé et le nombre de cycles avant rupture enregistré.

L'objectif est de retrouver par une analyse numérique en fatigue la localisation de l'initiation de fissure sur le pore tueur sur chaque éprouvette et d'établir une loi de durée de vie.

3. Démarche numérique

3.1. Extraction des pores par tomographie

La tomographie permet d'établir une cartographie 3D des éprouvettes. Via un logiciel de traitement d'images, il est possible de visualiser cette carte et d'en extraire les pores, voir [Figure 1](#). Dans une première étape du projet, on s'intéresse uniquement au défaut qui a engendré la rupture de la pièce (*le pore tueur*). Les géométries extraites étant en voxels, un lissage Laplacien est appliqué sur la géométrie.

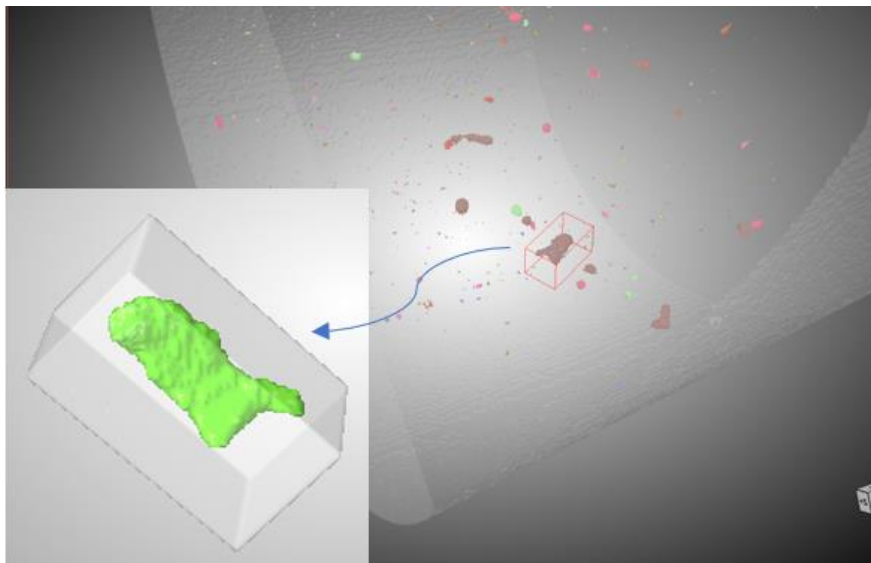


Figure 1 : Reconstitution des pores à l'aide d'un logiciel de traitement d'images

3.2. Simulation numérique

La porosité numérique représentant le *pore tueur* est positionnée de manière fidèle à la porosité expérimentale (taille, orientation suivant l'axe de chargement, distance de la surface). Le volume élémentaire représentatif de l'éprouvette est un cylindre comportant le même diamètre que la zone utile de l'éprouvette (2,47mm) et une hauteur de 2,47mm. On choisit un maillage 2D triangulaire et 3D tétraédrique. Afin d'optimiser les temps de calcul tout en ayant une bonne convergence des résultats, le maillage est raffiné près de la porosité, voir [Figure 2](#).

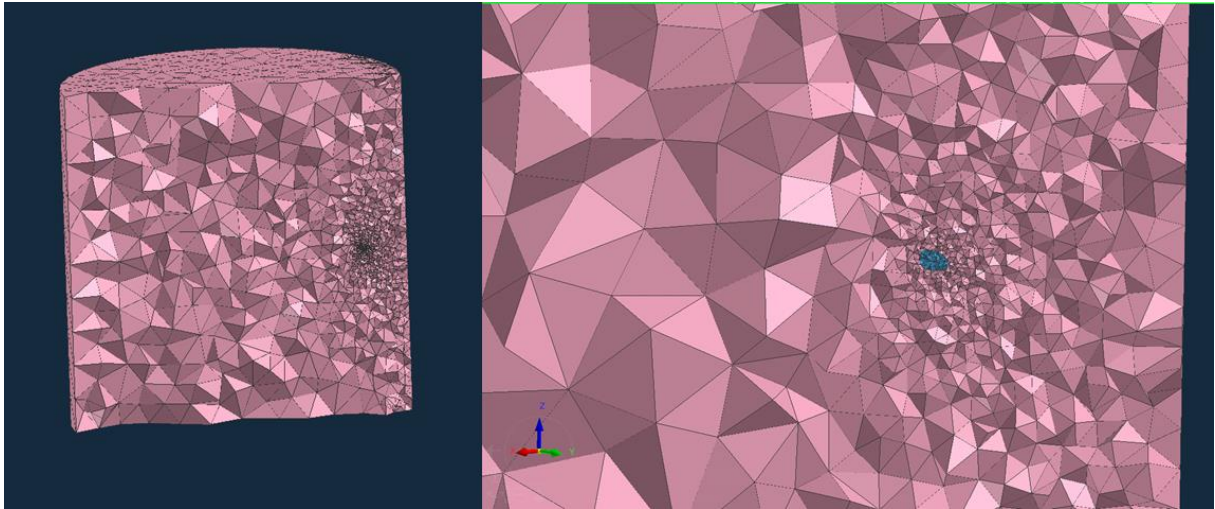


Figure 2 : Maillage d'une porosité

Le chargement appliqué reste inférieur à la limite d'élasticité, mais le pore va générer des concentrations de contraintes qui vont augmenter le chargement localement et induire de la plasticité [Figure 3](#). On se place donc dans le domaine de la fatigue polycyclique. Pour définir cette plasticité une loi de comportement de type Chaboche-Marquis [2] a été utilisé dont voici le critère de plasticité :

$$f = \|\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{X}}\| - R - \sigma_y = \sqrt{\frac{3}{2}(\underline{\underline{\sigma}}' - \underline{\underline{X}}') : (\underline{\underline{\sigma}}' - \underline{\underline{X}}')} - R - \sigma_y \leq 0 \quad (1)$$

Concernant les conditions aux limites, les nœuds de la face inférieure du cylindre sont encastés. Les nœuds de la face supérieure du cylindre ont un degré de liberté suivant l'axe Z afin de piloter le déplacement équivalent à la charge expérimentale. Plusieurs cycles sont effectués jusqu'à obtenir un cycle stabilisé. Un calcul par éléments finis permet d'obtenir le tenseur des contraintes et déformations en chaque point d'intégration du maillage et à chaque instant du cycle stabilisé.

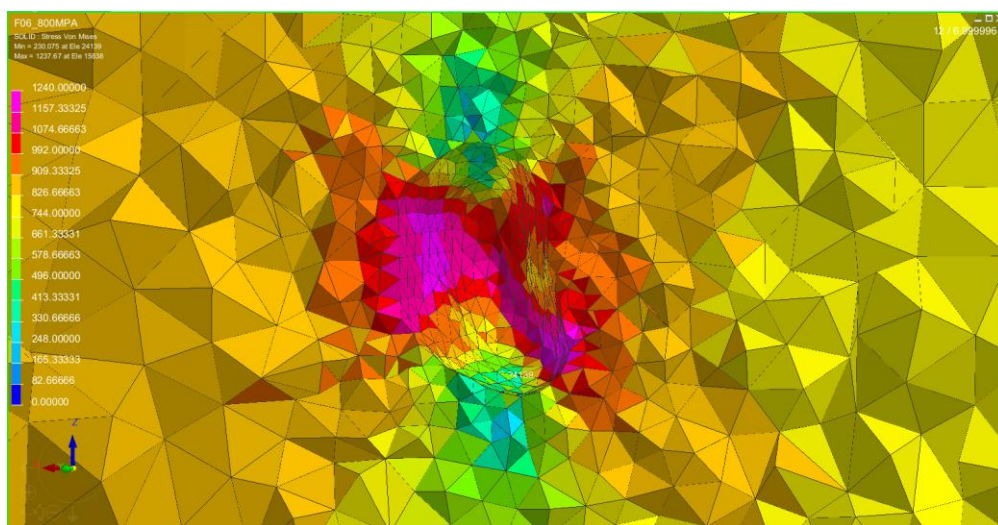


Figure 3 : Vue en coupe de la porosité tueuse : la contrainte de von Mises (1200MPa) est supérieure à la limite d'élasticité (950MPa) localement pour un chargement polycyclique (800 MPa)

3.3. Calcul d'un critère de fatigue de type plan critique

Dans les domaines d'utilisation des pièces issues de la fabrication additive, il est commun d'avoir des chargements localement multiaxiaux même sur des pièces sous chargement uniaxial du fait des géométries complexes ou des défauts créés lors de la fabrication additive. Un critère de fatigue multi-axial est donc nécessaire afin d'estimer la durée de vie de notre structure. Dans cette démarche, on s'intéresse aux critères de type *plan critique*. Le plan critique est le plan suivant lequel va s'initier la fissure. Ce plan a été observé expérimentalement comme le plan où l'amplitude de déformation de cisaillement est maximale. Dans les travaux de Fauvin et al. [3], une méthode rapide et efficace est développée dans l'espace des déviateurs pour obtenir une estimation de l'amplitude de déformation de cisaillement maximale et l'orientation des plans critiques. Il est alors possible de calculer un paramètre de fatigue typique des critères de type plan critique. On s'intéresse dans ce travail plus particulièrement au paramètre de Fatemi-Socie [4,5] qui combine l'amplitude maximale de déformation de cisaillement associé avec la contrainte normale maximale au plan critique.

$$\frac{\Delta\gamma_{max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_n}{\sigma_y} \right) \quad (2)$$

où $\Delta\gamma_{max}$ est l'amplitude de déformation en cisaillement maximale, σ_n est la contrainte normale maximale sur le plan critique, σ_y est la limite d'élasticité et k un facteur compris entre 0.5 et 1.

D'après le critère de Fatemi-Socie, plus la valeur de ce paramètre est élevée, plus la durée de vie de la pièce est faible.

On obtient ainsi une cartographie du paramètre de Fatemi-Socie sur l'ensemble du maillage en quelques minutes pour 10^5 éléments (voir Figure 4).

4. Confrontation avec l'expérimental

Le faciès de rupture pour chaque éprouvette est observé au niveau du défaut qui a engendré la rupture. La localisation des initiations de fissure est repérée par les flèches rouges Figure 4. Une comparaison du faciès de rupture avec une cartographie du paramètre de Fatemi-Socie autour du pore tueur semble prédire fidèlement cette localisation. En effet, des vues en coupe du faciès et du maillage montrent que les valeurs maximales du paramètre de Fatemi-Socie, en rose sur la Figure 4, sont localisées de manière cohérente avec les initiations de fissure observées expérimentalement.

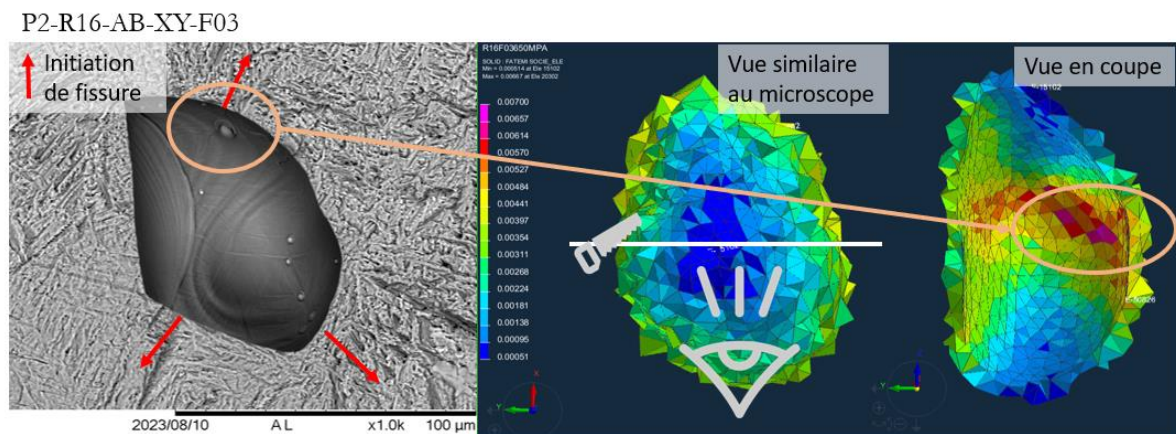


Figure 4 : Faciès de rupture et cartographie du paramètre de Fatemi-Socie au niveau du pore tueur

On a représenté dans un repère log-log sur la [Figure 5](#) la valeur maximale du paramètre de Fatemi-Socie en fonction du nombre de cycles à la rupture obtenu expérimentalement pour chacune des 7 éprouvettes testées. La courbe de tendance associée à ces points est tracée. Le coefficient de détermination très proche de 1, indique que la dispersion des points calculés par rapport à la courbe est très faible. Une loi de type puissance semble se dégager. Ainsi, le paramètre de Fatemi-Socie semble être un indicateur intéressant pour estimer la durée de vie d'éprouvettes obtenues par fabrication additive.

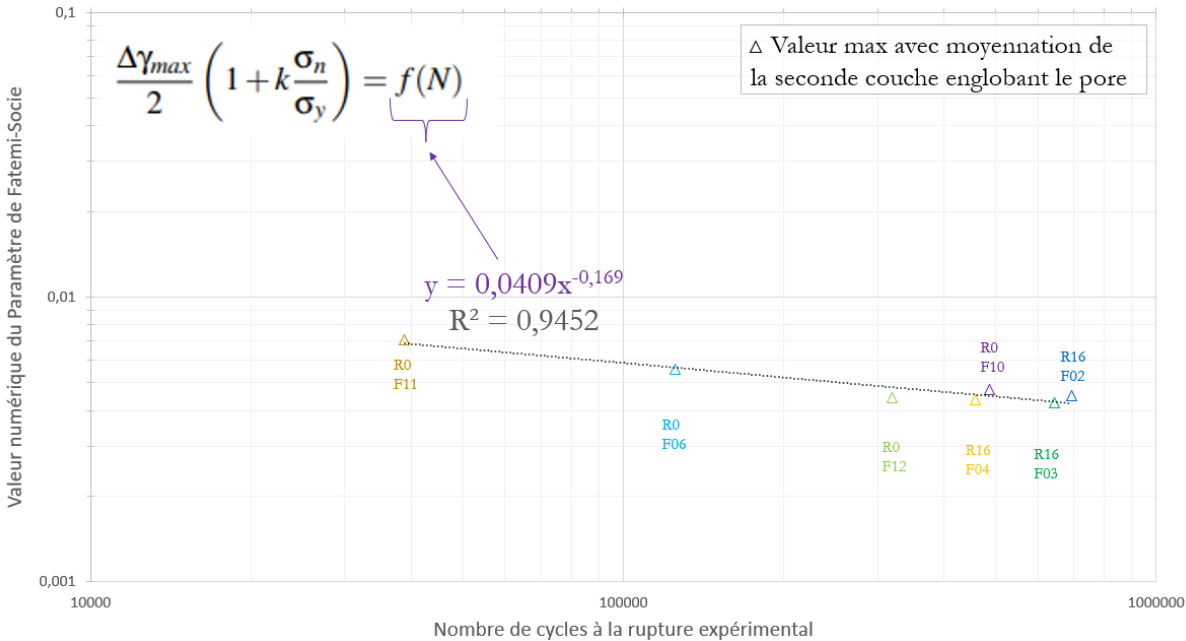


Figure 5 : Nombre de cycle avant rupture en fonction de la valeur numérique du paramètre de Fatemi-Socie

Pour prouver la robustesse de cette loi de durée de vie, d'autres essais numériques doivent être confrontés à l'expérimental avec notamment une diversification des chargements.

5. Conclusion et perspectives

Ce travail montre que le paramètre de Fatemi-Socie semble pertinent dans l'étude en fatigue de pièces en Titane Ti 6Al 4V obtenues par fabrication additive. La vitesse de traitement numérique de la démarche proposée permet d'envisager un volume élémentaire représentatif contenant un plus grand nombre de porosités. Les projets futurs sont de vérifier si le calcul d'un tel paramètre, combiné à d'autres considérations de type géométrique ou de positionnement à l'intérieur de l'éprouvette, et sous des chargements variés, permettrait d'identifier le pore tueur parmi tous les pores contenus dans l'éprouvette. Un objectif à terme serait d'établir une loi similaire à celle de la [Figure 5](#), afin d'estimer la durée de vie à l'échelle de l'éprouvette.

Références

- [1] SANAEI, Niloofar et FATEMI, Ali. Defects in additive manufactured metals and their effect on fatigue performance: A state-of-the-art review. *Progress in Materials Science*, 2021, vol. 117, p. 100724.
- [2] Jean-Louis Chaboche. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *International journal of plasticity*, 2008, vol. 24, no 10, p. 1642-1693
- [3] F. Fauvin, B. Agard, J.-C. Roux, E. Feulvarch. Fast estimation of the shear stress amplitude for fatigue life analysis of metals. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 80 :103928, March 2020. ISSN 09977538. doi : 10.1016/j.euromechsol.2019.103928. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0997753819308241>. 117, 119, 146.
- [4] A. Fatemi, D.F. Socie (1988). A Critical Plane Approach To Multiaxial Fatigue Damage Including Out-of Phase Loading, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 11(3), 149–165, 1988.
- [5] SHARIFIMEHR, S. et FATEMI, A. Evaluation of methods for estimating shear fatigue properties of steels and titanium alloys. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 122, p. 19-34.
- [6] alloys. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 122, p. 19-34.