

# Effet d'échelle et de taille de défauts sur la tenue en fatigue d'un alliage Al7050

**F. ABROUG<sup>a</sup>, E. PESSARD<sup>a</sup>, G. GERMAIN<sup>a</sup>, F. MOREL<sup>a</sup>**

a. LAMPA centre Angers – Arts et métiers ParisTech, 49035, Angers Cedex – France.

## Résumé

*L'objectif de cette étude est d'identifier l'impact de l'état de surface sur la tenue en fatigue de pièces en aluminium 7050 obtenues en fraisage UGV. Pour cela une campagne d'essais de fatigue en flexion plane est dans un premier temps réalisée sur des éprouvettes contenant 1 ou 22 défauts artificiels de tailles différentes. Ces résultats permettent de caractériser à la fois l'effet d'échelle et l'effet Kitagawa sur la tenue en fatigue de l'alliage testé.*

*Une approche probabiliste basée sur l'hypothèse du maillon le plus faible associée à une définition d'un seuil d'amorçage défini en contrainte est ensuite intégrée à un modèle éléments finis et permet de retrouver les tendances expérimentales observées.*

*Une seconde campagne conduite sur des éprouvettes possédant des états de surface représentatifs de pièces industrielles permet de discuter les prédictions de l'approche. Les états de surface caractérisés expérimentalement via un profilomètre 3D sont alors intégrés dans le modèle éléments finis. Les premiers résultats sont encourageants et permettent d'illustrer l'importance de la prise en compte de l'effet d'échelle dans le dimensionnement en fatigue de pièces usinées.*

**Mots clés :** défauts de surface; fatigue à grand nombre de cycles; maillon le plus faible

## 1. Introduction

Cette étude fait partie du projet de recherche FUI QUAUSI qui a pour objectif de maîtriser la qualité d'usinage des grandes pièces structurales destinées à l'aéronautique. Dans ce domaine les critères d'acceptation des pièces usinées en fraisage UGV portants sur l'état de surface sont drastiques et une opération de ponçage est souvent nécessaire pour éliminer le moindre défaut. L'objectif de cette partie du projet QUAUSI est de redéfinir les critères d'acceptabilité de défaut en Fatigue à Grand Nombre de Cycles en se basant sur une modélisation capable d'intégrer une large gamme de types de défaut.

Le matériau étudié dans cette étude est l'alliage d'aluminium 7050-T7451. L'usinage par le traitement thermomécanique local qu'il génère peut modifier l'intégrité de surface des pièces fabriquées et donc modifier leur tenue en fatigue. De nombreux travaux ont montré que dans le cas de nuance d'Al 7XXX usinée en UGV par fraisage en bout, l'aspect géométrique de la surface est le facteur le plus influent sur le comportement en fatigue [1] [2] [3]. Les contraintes résiduelles ainsi que les changements microstructuraux sont, dans ce cadre, localisés sur une très faible épaisseur et peuvent donc dans une première approche être négligés.

Dans la littérature l'effet de l'état de surface sur la tenue en fatigue est bien souvent traité via des critères déterministes basées sur une estimation de la concentration de contrainte locale maximale générée par les irrégularités de surface [3][4][5][6]. Notre objectif ici est d'utiliser un cadre probabiliste pour le dimensionnement en fatigue des composants aux états de surface usinés afin de considérer l'ensemble des accidents de surface comme des sites potentiels d'amorçage en fatigue [7][8].

## 2. Matériau et expérimentation

### 2.1 Caractéristiques du matériau

Les éprouvettes sont prélevées dans une tôle d'épaisseur 30 mm en alliage d'aluminium 7050-T7451 de limite d'élasticité 475 MPa et de résistance mécanique 536 MPa. Le matériau présente un taux de recristallisation important. Les grains constituant le matériau mesurent entre 5 à 300  $\mu\text{m}$  dans les sens long et travers, et de 5 à 50  $\mu\text{m}$  en profondeur. Des inclusions intermétalliques sont présentes au niveau des joints de grains et dans les grains recristallisés ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{AlCuZn}$ , etc...) et peuvent constituer des sites d'amorçage de fissures en fatigue [1].

### 2.2 Essais de fatigue

Les essais de fatigue réalisés sont de type flexion plane purement alternée ( $R=-1$ ) et conduits sur une machine de fatigue de type vibrophore à une fréquence de 70 Hz environ. La limite d'endurance est déterminée à  $2 \cdot 10^6$  cycles.

Avant d'aborder les états de surface complexes issus de l'usinage des essais de fatigue en présence de défauts artificiels de forme hémisphériques ont été réalisés. Des éprouvettes ont été polies et des défauts artificiels de 6 tailles différentes ont été introduits ( $\varnothing 60$ , 100, 200, 400, 600, et  $\varnothing 800 \mu\text{m}$ ). Afin de caractériser l'effet d'échelle, 3 éprouvettes par taille de défaut ont été testées avec 1 et 22 défauts (figure 1-a). Afin de caractériser la dispersion de la tenue en fatigue, 3 StairCases ont été conduits sur : éprouvette polie, polie avec un défaut de  $\varnothing 400$  et polie avec 22 défaut de  $\varnothing 400 \mu\text{m}$ .

### 2.3 Modèle probabiliste

Le modèle proposé est un modèle probabiliste à deux paramètres. Il est basé sur le calcul de la probabilité de rupture d'un composant dont la résistance d'un élément de surface représentatif  $S_0$  suit une fonction de distribution de Weibull [9, 10, 11]. L'hypothèse du maillon le plus faible définit la probabilité de survie du composant comme le produit des probabilités de survie de chaque surface élémentaire. La probabilité de rupture du composant peut s'écrire sous la forme :

$$1 - P_F = \prod (1 - P_0) \quad (1)$$

La probabilité cumulée de rupture dans un domaine quelconque  $\Omega$  de surface  $S_\Omega$  s'écrit alors :

$$P_F = 1 - \exp \left[ - \frac{1}{S_0} \int_{S_\Omega} \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^m dS \right] \quad (2)$$

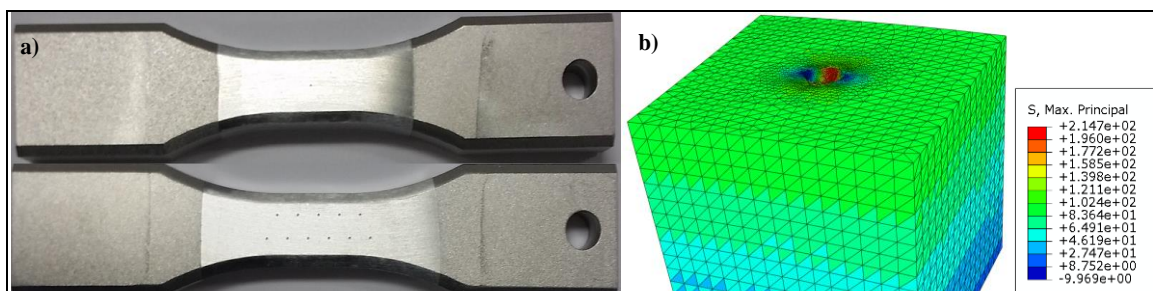
Avec  $m$  le module et  $\sigma_0$  le facteur d'échelle de la fonction de distribution,  $S_0$  correspond à la surface élémentaire représentative et  $S_\Omega$  correspond à la surface totale du composant.

$$H_m = \frac{1}{S_\Omega} \int_{S_\Omega} \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \right)^m dS \quad (3)$$

Connaissant  $\sigma_{max}$  la valeur de contrainte maximale ainsi que  $K_{tmax}$  la valeur de concentration de contrainte maximale sur la surface sollicitée, en utilisant l'expression (3) du facteur d'hétérogénéité de contrainte  $H_m$ , la limite d'endurance  $\sigma_D$  pour une probabilité de rupture donnée peut être calculée via l'expression :

$$\sigma_D = \frac{\sigma_0}{K_{tmax}} \left[ \frac{S_0 \ln\left(\frac{1}{1-P_F}\right)}{S_\Omega H_m} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

Un StairCase de 10 éprouvettes a été conduit sur des éprouvettes contenant un défaut de diamètre 400  $\mu\text{m}$ . Les valeurs de  $H_m$  et de  $K_{tmax}$  pour cette taille de défaut sont identifiées via la réalisation de simulation numérique en élasticité (Figure 1-b). La limite d'endurance moyenne ainsi que la dispersion associée sont ensuite utilisées pour identifier respectivement les paramètres  $\sigma_0$  et  $m$  du modèle probabiliste.



**Figure 1.** a) éprouvettes polies avec 1 et 22 défauts de diamètre 400  $\mu\text{m}$ , b) volume présentant un défaut hémisphérique et sollicité en flexion (à 100MPa).

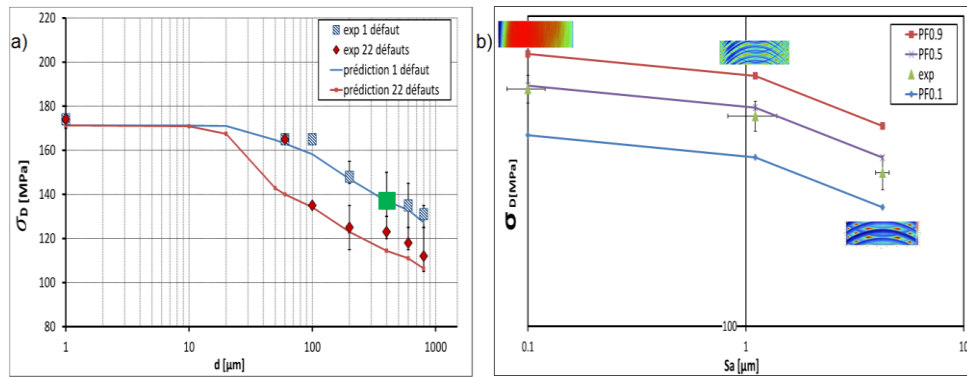
La réalisation de simulations numériques pour les autres tailles de défauts, permet alors de prédire les valeurs de  $H_m$  et  $K_{tmax}$  pour chacun des défauts et d'estimer la limite d'endurance via l'équation (4). Notons que pour l'ensemble des états de surface simulés la contrainte en surface maximale ne dépasse jamais la limite d'élasticité du matériau.

## 2.4 Résultats et analyse

L'ensemble des résultats des essais de fatigue ainsi que les prédictions associées sont présentés dans le diagramme de Kitagawa-Takahashi (figure 2-a). Le modèle proposé permet de retrouver à la fois l'effet Kitagawa (chute de la limite d'endurance avec la taille du défaut) mais également l'effet d'échelle où une baisse de l'ordre de 20 MPa est observée lorsque le nombre de défaut est multiplié par 22. Par ailleurs, via cette approche dont les paramètres ont été identifiés par un unique StairCase avec 1 défaut artificiel de  $\varnothing 400$  (point vert dans la figure 2-a), la limite d'endurance du matériau sans défaut (éprouvette polie) est également correctement prédite.

Par la suite, le modèle est appliqué sur des états de surfaces issues d'usinage UGV avec différents rugosités de surface et différents  $S_a$  (équation 5). Les simulations numériques conduites sont basées sur des scans obtenus par profilométrie 3D des états de surface réels. Les premiers résultats sont prometteurs. La figure 2-b présente une comparaison entre les résultats expérimentaux de la tenue en fatigue des différents états de surface usinés et les premiers résultats de prédiction du modèle probabiliste en fonction de  $S_a$ .

$$S_a = \frac{1}{S} \iint_S |Z(x, y)| dx dy \quad (5)$$



**Figure 2.** a) Diagramme de kitagawa avec défauts artificiels hémisphériques, b) surfaces usinées : résultats expérimentaux et prédictions de la limite en fatigue en fonction de  $Sa$ .

### 3. Conclusion

L'approche probabiliste développée basée sur le concept du maillon le plus faible permet de retrouver les résultats expérimentaux obtenus sur éprouvettes polies avec défauts artificiels et en conditions d'usinage réels. Cette approche basée sur des scans de surface 3D réels constitue un outil utile pour estimer la criticité de défaut de surface en fatigue sur des composants de tailles variées

### Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble de partenaires industriels (Dassault Aviation, Europe Technologie, Figeac Aéro, Mecachrome, Spring Technologie, Precise, GEBE2, CETIM) et académiques (IRCCyN-IUT Carquefou) du projet FUI QUAUSI.

### Références

- [1] Shahzad M., Chaussumier M., Chieragatti R., Mabru C., Rezai Aria F., 2010, Influence of surface treatments on fatigue life of Al7010 alloy, J Mater Process Technol 210, 1821–1826.
- [2] Brunet S., 1991. Thèse de doctorat: Influence des contraintes résiduelles induites par usinage sur la tenue en fatigue des matériaux métalliques aéronautiques, Paris, FRANCE: ENSAM Paris.
- [3] Suraratchai M, Limido J, Mabru C, Chieragatti R, 2008, Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminum alloy. Int J Fatigue 30, 2119-2126.
- [4] Limido J, 2008, Etude de l'effet de l'usinage grande vitesse sur la tenue en fatigue de pièces aéronautiques, Université de Toulouse.
- [5] Ås S. K, 2006 Fatigue life prediction of an aluminum alloy automotive component using finite element analysis of surface topography; Norwegian University of Science and Technology.
- [6] Souto-Label A, 2014, Rôle de l'intégrité de surface dans la tenue en fatigue d'un acier bainitique après fraisage de finition, Cachan: ENS Cachan.
- [7] Chantier – De Lima I, 2000, Tolérance aux défauts initiaux et effets de surface : dimensionnement à la fatigue de pièces de fonderie. Thèse de doctorat, ENS Cachan.
- [8] Guillemot N, 2010, Prise en compte de l'intégrité de surface pour la prévision de la tenue en fatigue de pièces usinées en fraisage, Cachan: ENS Cachan.
- [9] Weibull W., 1951, A statistical distribution function of wide applicability. Journal of Applied Mechanics, 18, pp. 293-297.
- [10] Pessard E, Abrivard B, Morel F, Abroug F, Delhay P, 2014, The effect of quenching and defects size on the HCF behaviour of Boron steel. Int J Fatigue, Issue 68, pp. 80-89.
- [10] Hild F., Billardon R., Marquis D. (1992). "Stress heterogeneity influence on failure of brittle materials." Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Serie II, 315, (1992), pp. 1293-1298.