

## Influence de gammes d'usinage sur la tenue en fatigue d'un alliage léger aéronautique

Monchaï Suraratchai<sup>1</sup>, Catherine Mabru<sup>1</sup>, Rémy Chieragatti<sup>1</sup>,

Farhad Rezai Aria<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*École Nationale Supérieure d'Ingénieur de Constructions Aéronautiques  
1, Place Émile Blouin  
31056 TOULOUSE Cedex 05*

<sup>2</sup>*École des Mines d'Albi Carmeaux  
Campus Jalard  
81013 ALBI Cédex 09*

### Résumé :

*Les gammes d'usinage en tournage et étau limeur, pratiquées respectivement sur des éprouvettes de flexion rotative et plane, ont permis de mettre en évidence les facteurs d'influence de l'état de surface sur la tenue en fatigue d'un alliage léger aéronautique. Un modèle mécanique a été développé pour établir l'origine physique de cette influence.*

### Abstract :

*This paper deals with the influence of surface conditions on the fatigue resistance of an aeronautical aluminium alloy. Different machining conditions were used to produce two types of specimen tested under rotative or four points bending conditions. A mechanical modelling has been developed to confirm the physical source of the observed influence.*

### Mots clefs:

**usinage ; états de surface ; rugosité ; fatigue ; alliages d'aluminium.**

## 1 Introduction

Le contexte général de cette étude est la spécification et la fabrication des surfaces de pièces mécaniques soumises à des sollicitations de fatigue. En effet, les moyens d'usinage et donc les gammes de fabrication sont en constante évolution pour assurer une productivité toujours croissante. Or la modification des gammes d'usinage entraîne une variation des propriétés de surface et pose donc la question de la qualité en service des pièces usinées[1]. En aéronautique, la tenue en fatigue en est un des critères principaux. Il apparaît donc essentiel pour continuer à progresser en matière de productivité tout en garantissant une qualité connue des pièces, de fournir au concepteur, les critères d'influence sur la tenue en fatigue des pièces liés au processus de fabrication. Cet article présente les premiers résultats d'essais de fatigue réalisés sur des éprouvettes usinées selon quatre gammes sur un alliage d'aluminium de la série 7000 utilisé en aéronautique. Pour caractériser les états de surface obtenus, trois paramètres sont généralement retenus :

- un paramètre géométrique : la rugosité,
- un paramètre mécanique : les contraintes résiduelles,
- un paramètre métallurgique : la microstructure

Ces trois paramètres peuvent varier indépendamment dans un domaine restreint, par le choix de gammes d'usinage appropriées. Deux types de fabrication d'éprouvettes sont proposées : le tour, l'étau limeur. Le tour permet de réaliser les éprouvettes cylindriques destinées à explorer les rapports de charges négatifs (flexion rotative, traction compression). L'étau limeur permet de réaliser des éprouvettes de flexion plane et de prendre en compte le sens des stries d'usinage tout en utilisant un processus de coupe analogue à celui d'un tour.

À l'heure actuelle, les mesures de contraintes résiduelles sont en cours, et les mesures de microdureté et des observations métallographiques n'ont pas permis de mettre en évidence une évolution sensible de la microstructure au delà d'une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres correspondant à la résolution des méthodes utilisées. Seuls les résultats portant sur la rugosité sont présentés ici.

## 2 Le matériau : composition et microstructure

Le matériau est un alliage d'aluminium 7010-T74511 dont la composition est fournie dans le tableau ci-dessous :

<i>Elements</i>		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni	Zr	Ti
<i>Composition par poids</i>	min	-	-	1,5	-	2,1	-	5,7	-	0,1	-
	max	0,12	0,15	2,0	0,10	2,6	0,05	6,7	0,05	0,16	0,06

Il a été fourni sous la forme d'une plaque laminée de 70mm d'épaisseur. Sa microstructure est composée de grains fortement déformés dans le sens du laminage, l'orientant ainsi suivant trois axes schématisés en figure (1) :

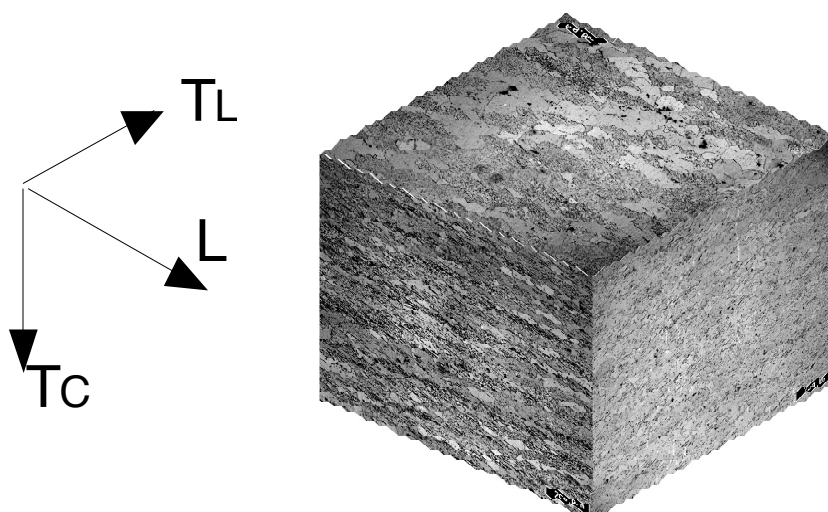


FIG. 1 -Microstructure de l'alliage 7010 -T745

-le sens long (L) suivant lequel la plaque a été laminée. Le grain y présente sa plus grande dimension,

-le sens travers long (TL) perpendiculaire au sens long et parallèle à la largeur de la plaque : les grains sont de dimension moyenne dans ce sens,

-le sens travers court (TC) orienté suivant l'épaisseur de la plaque: le grain y est le plus petit.

### 3 Les éprouvettes

#### 3.1 Les éprouvettes plates

Les éprouvettes plates sont prélevées dans la plaque de sorte que la contrainte induite par la flexion plane (4points) soit orientée parallèlement au sens travers court comme l'indique la figure (2 à gauche). La surface en traction est usinée selon les gammes indiqués en figure (2 à droite). Comme l'indique la figure (3), ces gammes se distinguent par le sens des stries qu'elles génèrent ( UL perpendiculairement à l'axe de chargement, UT parallèlement à cet axe), la rugosité qu'elles engendrent (11 et 12 faible, 21 et 22 forte) et par la vitesse de coupe utilisée qui est un indicateur des contraintes résiduelles induites.

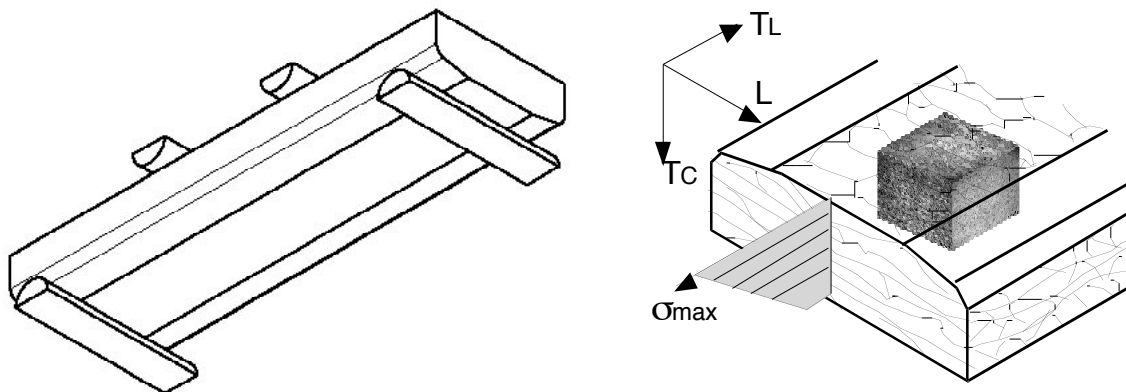


FIG. 2 – Descriptifs du chargement de l'éprouvette plate (à gauche) et du chargement par rapport à la microstructure (à droite)

référence	Ra $\mu\text{m}$	Rt $\mu\text{m}$	vitessedecoupe
UL11	0,5	2,6	12 m/mn
UL12	0,5	2,6	50m/mn
UL21	7	28	12m/mn
UL22	7	28	50m/mn

référence	Ra $\mu\text{m}$	Rt $\mu\text{m}$	vitessedecoupe
UT11	0,5	2,6	12 m/mn
UT21	7	28	12m/mn
UT22	7	28	50m/mn

référence	Ra $\mu\text{m}$	Rt $\mu\text{m}$	vitessedecoupe
UL'11	0,5	2,6	12 m/mn
UL'12	0,5	2,6	50m/mn
UL'21	7	28	12m/mn
UL'22	7	28	50m/mn

FIG. 3 – Tableau récapitulatif des gammes d'usinage en fonction du type d'essai et du type d'éprouvette

### 3.2 Les éprouvettes cylindriques

Les éprouvettes cylindriques sont prélevées de sorte que leur axe de sollicitation soit parallèle au sens travers long. Les gammes utilisées pour usiner leur fût génèrent des stries perpendiculaire à l'axe de sollicitation dont les rugosités sont analogues à celles des éprouvettes plates "UL".

### 4 Les essais mécaniques

Les essais mécaniques de fatigue ont été conduits de façon à explorer le domaine de durée de vie autour de  $10^5$  cycles et à la température ambiante. Les essais sur éprouvette plate sont réalisés en flexion quatre points à une fréquence de 10 Hz et sous un rapport de charge de "0,1". Les éprouvettes cylindriques sont sollicitées en flexion rotative, c'est à dire sous un rapport de charge égal à "-1" à une fréquence d'environ 50 Hz. Tous les essais ayant dépassé  $10^6$  cycles ont été interrompus.

### 5 Les résultats des essais mécaniques

Les résultats des essais de fatigue sont présentés en figure 4 sous la forme de diagramme de Wöhlher montrant l'évolution de la contrainte maximale appliquée en fonction du nombre de cycles à la rupture. Il apparaît que la rugosité joue un rôle primordial dans la durée de vie des éprouvettes plates aussi bien que cylindriques. On notera que les durée de vie les plus importante sont obtenues pour les gammes de type UT c'est à dire ayant généré des stries parallèles à l'axe de traction. La vitesse de coupe semble jouer un rôle notamment dans le cas des éprouvettes de cette même série. L'hypothèse soulevée par ces résultats est que la rugosité modifie la contrainte locale à la manière d'un accident géométrique. Pour vérifier cette hypothèse, un modèle très simple de calcul de contrainte locale est proposé.

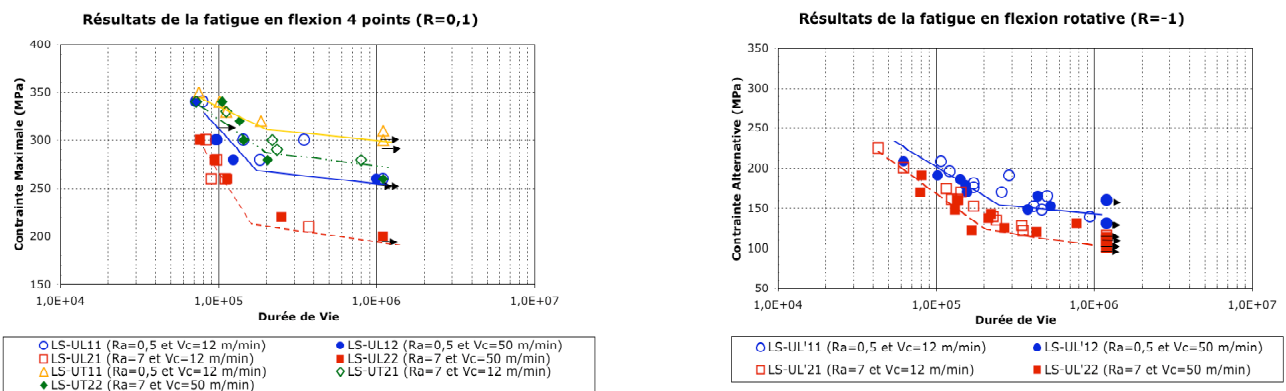


FIG.4 – Courbes d'endurances en fonction de l'état de surface et du type d'essai

## 6 Les modèles mécaniques.

La première étape a consisté à créer un modèle de surface virtuelle à partir des conditions de coupe et de la forme de l'outil. Ce modèle purement géométrique reproduit le profil laissé par un outil virtuel décrit uniquement par son rayon de bec lors de ces passages successifs fonction de l'avance par coup ou l'avance

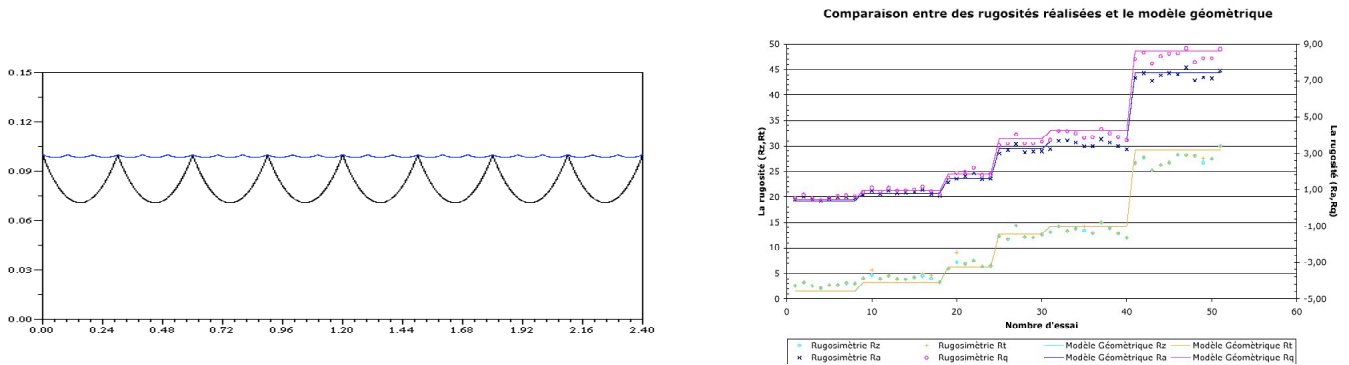


FIG. 5 – Modèle de rugosité (à gauche) et sa comparaison avec les rugosités mesurées(à droite)

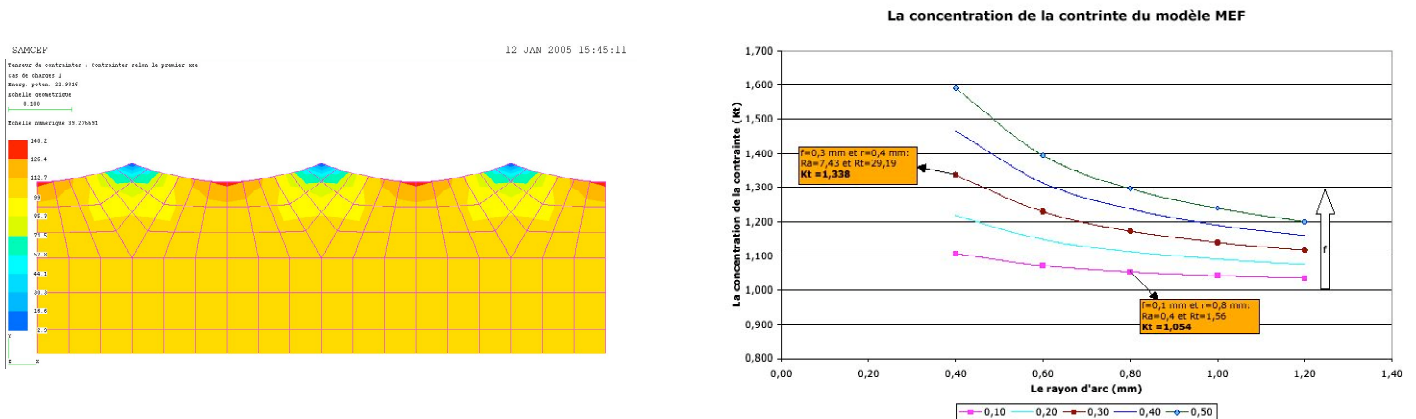


FIG. 6 – Modèle de calcul de concentration de contrainte lié à la rugosité (à gauche) et résultats en fonction du rayon de l'outil virtuel (à droite)

par tour. La figure (5 à gauche) montre un exemple de profil ainsi généré. Les rugosités virtuelles des profils virtuels ont été calculés en utilisant les mêmes modèles que ceux utilisés dans les mesures des profils réels (modèles normalisés de calcul de Ra). La figure (5 à droite) montre la comparaison entre les rugosité calculées et les rugosités mesurées sur pièces. Les écarts demeurent faibles pour toutes les gammes. La deuxième étape a consisté à construire un modèle de pièces à partir du profil virtuel défini précédemment et de la soumettre à un chargement mécanique. La figure (6à gauche) montre un exemple de calcul à partir de ce modèle. Ce modèle est bidimensionnel et prend pour hypothèse un comportement linéaire élastique du matériau. Il a été soumis à un chargement virtuel uniformément réparti aux extrémités. La contrainte maximale obtenue par le calcul a ensuite été divisée par la contrainte nominale à la manière d'un calcul de Kt classique. Les courbes de la figure (6 à droite) montrent l'évolution de ce ratio en fonction du rayon de l'outil. Cette courbe permet d'évaluer la valeur du Kt généré par chaque gamme.

## 7 Evaluation du modèle

L'évaluation du modèle repose sur l'hypothèse d'une relation entre la concentration de contrainte et la durée de vie en fatigue. Des modèles de calcul de pièces font intervenir un coefficient empirique appelé  $K_f$  qui classe les limites d'endurance de pièces entaillée en fonction du facteur de concentration de contrainte de l'entaille. Le produit de ce facteur par la contrainte appliquée permet d'estimer la limite d'endurance d'une pièce entaillée à partir de celle connue de la pièce non entaillée. Notre objectif n'étant que de comparer les courbes d'endurance d'un même matériau en fonction de différents états de surface, nous proposons de corriger les contraintes nominales appliquées par le coefficient de concentration de contrainte calculé par notre modèle. Le résultat de cette opération est traduit sur les courbes de la figure (7). Il apparaît très nettement que les écarts entre les états de surface sont largement atténués aussi bien en flexion rotative qu'en flexion plane. La plus mauvaise correction se retrouve sur les essais de flexion plane dont les stries sont parallèles à l'axe de chargement. Dans ce cas de figure, la différence de rugosité n'entraîne pas de différence de concentration de contrainte, car celle-ci reste pour les deux états de surface égale à "1". L'origine de l'écart doit donc être cherchée dans une autre direction qui pourrait être la prise en compte des contraintes résiduelles. En appliquant une correction de ce type, on peut espérer encore réduire les écarts y compris pour les autres états de surface.

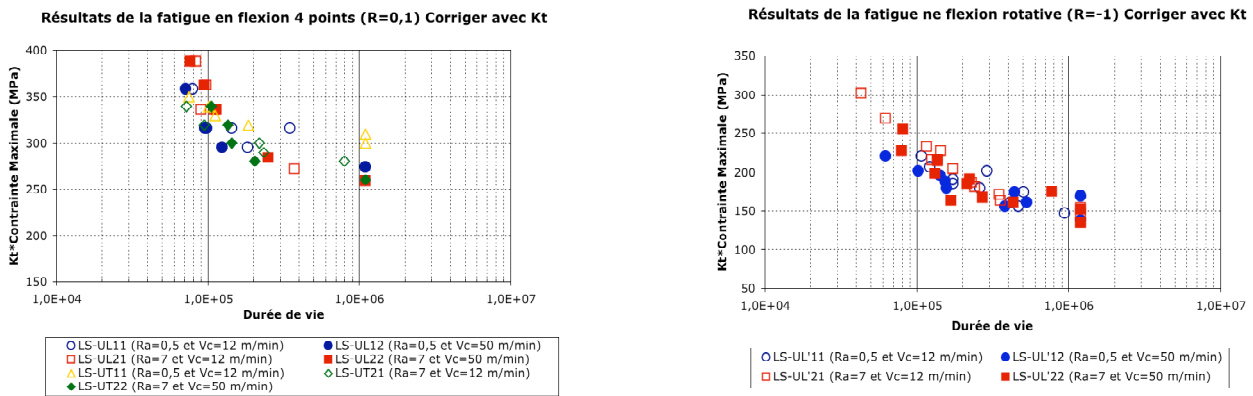


FIG. 7 – Résultat de la correction de concentration de contraintes sur les courbes d'endurance

## Références

[1] Adil Massod ALAM, "Influence de gammes de tournage sur l'état de surface et la fatigue en endurance limitée d'un acier de construction", rapport de thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse, n° d'ordre 3017, 1998.