

Etude de l'effet du revêtement sur le comportement en fretting

Eva Hériprié, Georges Cailletaud

Centre des Matériaux,
CNRS UMR 7633, Mines Paris - Paristech,
BP 87, 91003 Evry Cedex, France
eva.heriprie@ensmp.fr

Résumé :

L'étude de l'effet des propriétés mécaniques d'un revêtement sous une sollicitation de fretting-fatigue est effectuée. Un maillage du contact entre un cylindre et un plan est utilisé et deux types de revêtement à comportement élastique sont appliqués sur la surface du plan. Les résultats du calcul et l'utilisation du critère de fatigue de Dang Van permet de mettre en évidence un effet bénéfique d'un revêtement de rigidité inférieure au substrat en diminuant le risque d'amorçage des fissures.

Abstract :

The effect of the mechanical behaviour of a coating during a fretting fatigue test is studied. A cylinder-plate mesh is used and two different coatings with linear elastic mechanical behaviour cover the plate. The results of the numerical calculation and the use of Dang Van fatigue criteria show a beneficial effect of a soft coating on the fatigue crack nucleation.

Mots-clefs :

fretting ; revêtement ; modélisation E.F.

1 Introduction

Lors du fonctionnement des turbo-réacteurs, les vibrations génèrent des micro-déplacements dans les assemblages. Ces derniers entraînent un endommagement par frottement de faible amplitude - ou fretting - au niveau des pièces en contact, notamment de l'assemblage aubes / disque des turbines. Le risque d'amorçage de fissure ou d'usure est d'autant plus grand que l'alliage de titane choisi pour la fabrication des composants possède d'assez mauvaises propriétés tribologiques (adhésion, coefficient de frottement élevé). Afin de réduire cet endommagement, la solution industrielle consiste à appliquer un revêtement à faible coefficient de frottement sur l'une ou l'autre des surfaces. Un grenailage de la surface ainsi que l'application d'un revêtement, en général composé d'une couche de Cu-Ni-In déposée par projection plasma et d'une couche de lubrifiant solide permet de diminuer les risques liés à la fatigue de contact. Le but de cette étude est d'analyser par une modélisation par éléments finis, l'influence de cette couche protectrice, afin de mieux contrôler les différentes étapes de sa dégradation, et de proposer une stratégie de maintenance.

Quelques auteurs ont étudié l'influence d'un revêtement sur le comportement en contact par éléments finis en faisant varier la géométrie, la valeur du chargement ainsi que les propriétés mécaniques des différents composants en élasticité tels que Morrow *et al.* (1999) ou en élasto-plasticité tel que Sun *et al.* (1995). Cependant ces travaux ont été réalisés pour un chargement en pression de contact simple. Afin de mieux comprendre l'effet du revêtement sur la résistance à l'usure des composants, on propose ici une modélisation par éléments finis du fretting entre un cylindre et une plaque revêtue. On utilise des lois de comportement adaptées, représentant

finement le comportement (visco-)plastique des différents matériaux en présence, ce qui permet de mettre en évidence différents régimes de fonctionnement local (zone élastique, adaptation, accommodation, rochet). Après la présentation de la géométrie et du calcul par éléments finis, les résultats numériques sont présentés pour deux types de chargement et de comportement du matériau (élastique ou élasto-viscoplastique).

2 Maillage et conditions aux limites

Le maillage utilisé pour l'étude de l'effet du revêtement de deux pièces sollicitées en régime de fretting-fatigue est représenté sur la figure 1.

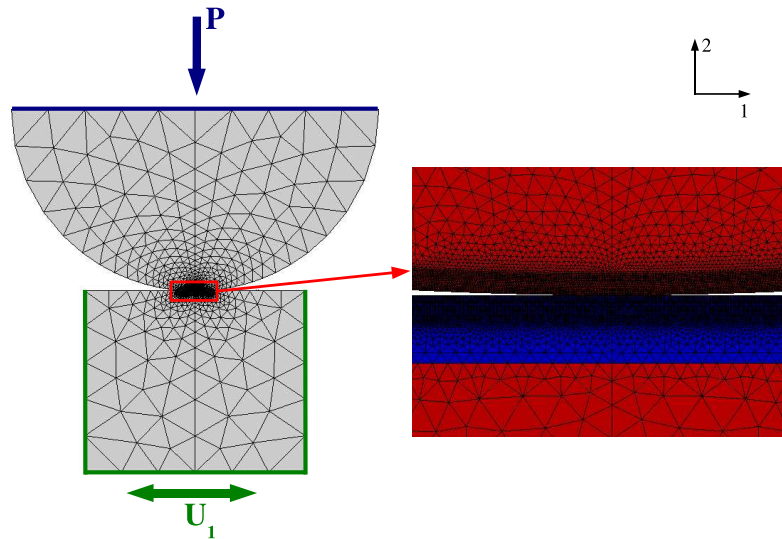


FIG. 1 – Maillage 2D du contact cylindre-plan et conditions aux limites.

Il s'agit d'un demi-cylindre de rayon 10 mm en contact avec un plan semi-infini. La taille des éléments, de nature quadratique, dans la zone de contact est égale à $5 \mu\text{m}$. Dans le cas de la plaque revêtue, l'épaisseur du revêtement est égale à $175 \mu\text{m}$. Une pression P est appliquée sur le bord haut du demi-cylindre en imposant un déplacement uniforme sur tous les noeuds du bord. Un chargement alterné Q est appliqué sur les bords de la plaque comme indiqué sur la figure 1 en imposant des déplacements de manière cyclique suivant la direction 1.

Le choix des conditions aux limites a été basé sur la carte de réponse du matériau sous sollicitation de fretting établie par Fridrici (2002) pour l'alliage de titane (cf. fig. 2) mettant en évidence l'influence du chargement de fretting (Pression / Amplitude de déplacement) sur le mode d'endommagement de la zone en contact. Cette carte permet, pour une sollicitation unidirectionnelle, d'identifier en plus des régimes de glissement (partiel ou total), les modes de dégradations observés (fissuration, compétition entre fissuration et usure ou usure). Etant donné que l'usure n'est pas prise en compte dans ces premiers calculs, deux conditions de chargement (représentées sur la carte de fretting, fig.2) ont été étudiées :

- $P = 333 \text{ N/mm}$; $\Delta U_1 = 10 \mu\text{m}$
- $P = 133 \text{ N/mm}$; $\Delta U_1 = 6 \mu\text{m}$

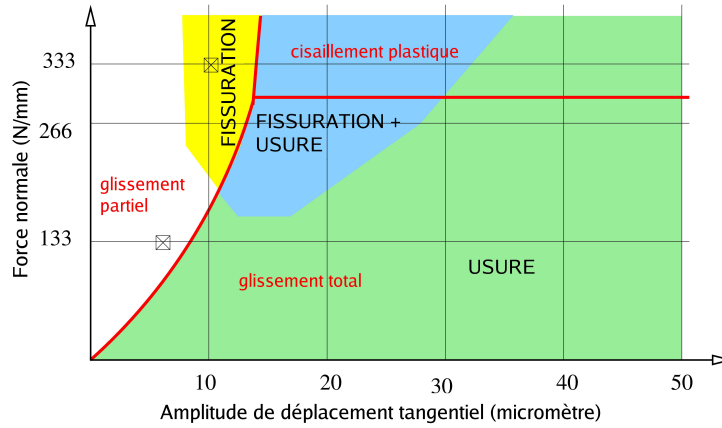


FIG. 2 – Carte de fretting obtenue par Fridrici (2002) pour un alliage de titane.

Potentiel viscoplastique	$\Omega = \frac{K}{n+1} \left\langle \frac{J(\underline{\sigma} - \underline{X}) - R - R_0}{K} \right\rangle^{n+1}$
	$J(\underline{\sigma} - \underline{X}) = \left[\frac{3}{2} (\sigma'_{ij} - X'_{ij})(\sigma'_{ij} - X'_{ij}) \right]^{1/2}$
Taux d'écoulement viscoplastique	$\dot{\underline{\epsilon}}^p = \frac{3}{2} \left\langle \frac{J(\underline{\sigma} - \underline{X}) - R - R_0}{K} \right\rangle^n \frac{\underline{\sigma}' - \underline{X}'}{J(\underline{\sigma} - \underline{X})}$
Ecrouissage cinématique non-linéaire	$\underline{X} = \sum_i \underline{X}_i ; \quad \dot{\underline{X}}_i = \frac{2}{3} C_i \dot{\underline{\epsilon}}^p - D_i \underline{X}_i \dot{p}$
Ecrouissage isotrope	$\dot{R} = b(Q - R)\dot{p} ; \quad \dot{p} = \left[\frac{2}{3} \dot{\underline{\epsilon}}^p_{ij} \dot{\underline{\epsilon}}^p_{ij} \right]^{1/2}$

TAB. 1 – Equations pour la modélisation d'un comportement viscoplastique cyclique

3 Modélisation du fretting

Le code de calcul par éléments finis *Zebulon* est utilisé avec une loi normale pour la modélisation du contact. Dans les calculs réalisés, deux types de comportement ont été étudiés. Les premiers calculs ont consisté à utiliser une loi de comportement élastique de manière à comprendre l'influence de la rigidité du revêtement sur la tenue à la fissuration. Les calculs suivants se rapprochent du comportement réel de l'alliage de titane Ti6Al4V sous sollicitation de fatigue par l'utilisation d'une loi de comportement élasto-viscoplastique à triple écrouissage cinématique comme présentée dans le tableau 1.

Les paramètres de la loi de comportement ont été identifiés à partir d'essais cycliques dans les conditions $R_\epsilon = 0$ et $R_\epsilon = -1$ et sont représentés dans le tableau 2. La procédure d'identification est décrite par Dick *et al.* (2006).

modèle	Q	b	K	n	R ₀	C ₁	D ₁	C ₂	D ₂	C ₃	D ₃
multicinématique	-240	9	251	7.41	300	105000	300	250000	1000	750000	3000

TAB. 2 – Paramètres de la loi de comportement multicinématique du Ti6Al4V

4 Résultats de la modélisation par éléments finis

Comme énoncé précédemment, deux chargements ont été testés sur trois configurations différentes : sans revêtement ($E = 119$ GPa, $\nu = 0,29$), avec revêtement dur ($E = 300$ GPa, $\nu = 0,15$) et avec revêtement mou ($E = 55$ GPa, $\nu = 0,15$) se rapprochant des caractéristiques du CuNiIn.

4.1 Comportement élastique

La figure 3 représente l'effet du revêtement sur les contraintes équivalentes équivalentes pour un chargement de pression simple sans sollicitation transversale.

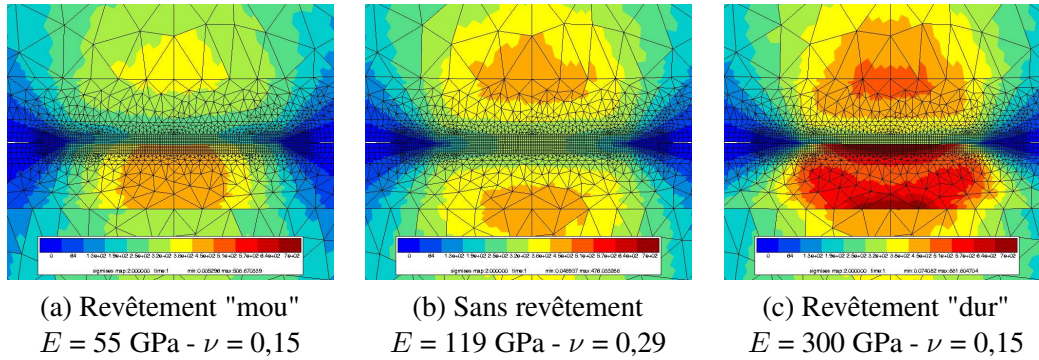


FIG. 3 – Effet du revêtement sur la distribution des contraintes équivalentes de von Mises pour le chargement suivant : $P = 333$ N/mm, $U_1 = 0$ μ m.

Pour les deux cas de chargement étudiés, une diminution des contraintes équivalentes est observée dans le cylindre et la plaque lors de l'utilisation d'un revêtement de plus faible rigidité que le substrat alors qu'une augmentation de la contrainte est observée dans le cas de l'utilisation d'un revêtement de plus forte rigidité que ce soit sous chargement de pression simple (fig. 3) ou sous chargement de fretting à charge maximale (fig. 4). Le graphique de la figure 5 représente cette évolution de la contrainte équivalente maximale dans les différentes parties du système pour le chargement en pression simple. La faible différence entre les contraintes dans le cylindre et le plan est vraisemblablement un effet de la taille de maille plus grossière dans le cas du plan. Le graphique de la figure 6 montre également l'effet du revêtement sur la distribution des contraintes équivalentes à charge maximale.

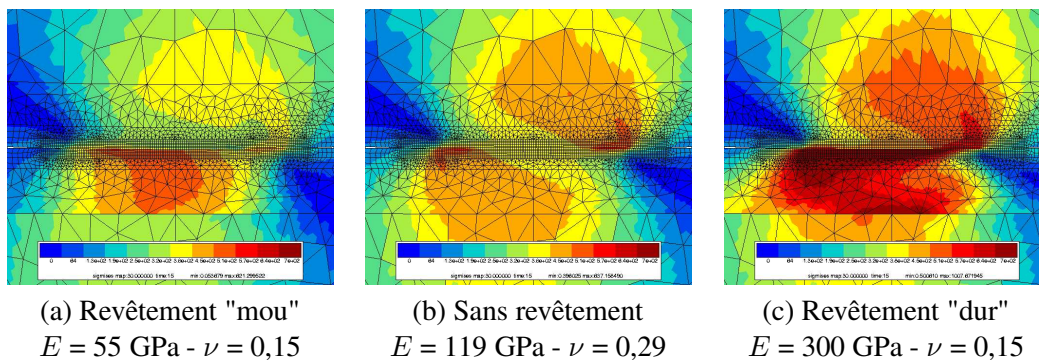


FIG. 4 – Effet du revêtement sur la distribution des contraintes équivalentes de von Mises pour le chargement suivant : $P = 333$ N/mm, $U_1 = -5$ μ m.

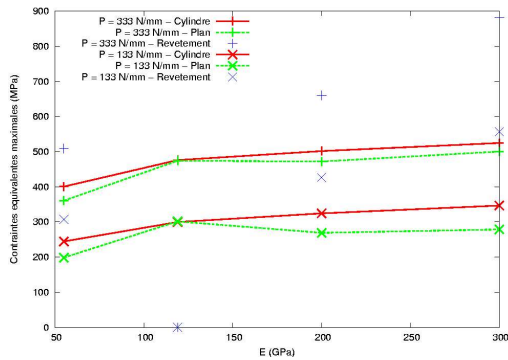


FIG. 5 – Influence de la rigidité du revêtement sur les contraintes de von Mises maximales dans le cylindre, le plan et le revêtement. ($E_{\text{Ti6Al4V}} = 119$ GPa)

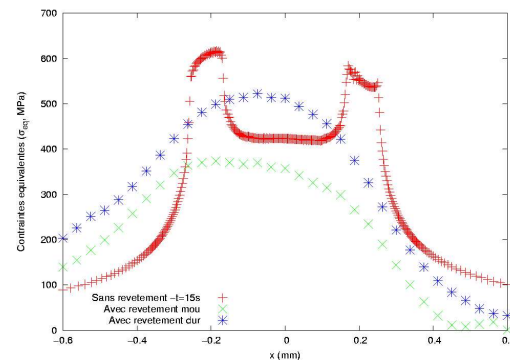


FIG. 6 – Contraintes équivalentes à la surface du plan pour le chargement $P = 333$ N/mm - $\Delta U_1 = 10 \mu\text{m}$ en charge maximale ($U_1 = 5 \mu\text{m}$).

Afin de comparer la durée de vie relative à l'amorçage avec et sans revêtement, le critère de fatigue HCF de Dang Van (1993) est utilisé. On combine linéairement une mesure de l'amplitude de cisaillement T et la pression hydrostatique p :

$$f(\sigma) = aT + p - b \quad (1)$$

a et b sont des paramètres dépendant du matériau étudié. Ici, $a = 1,956$ et $b = 864$ MPa.

En appliquant ce critère pour les 6 cas étudiés précédemment, et pour 4 cycles de charge, une amorce de fissure est obtenue pour le chargement P333-U10 sans revêtement à $X_1 = \pm 0,25$ mm alors que le chargement P133-U6 ne semble pas suffisant pour une amorce comme cela était prédit par les cartes de fretting. Lorsqu'un revêtement "mou" est ajouté, le risque de fissuration diminue étant donné qu'aucune amorce n'est prédite dans ce cas après 4 cycles. L'ajout du revêtement dur en revanche, prédit un amorçage à $\pm 0,23$ mm.

Ces résultats peuvent être mis en parallèle des résultats expérimentaux de Fridrici (2003) pour lesquels, il est montré que les frontières des différents régimes sont modifiés avec l'ajout d'un revêtement de CuNiIn ainsi que la frontière de la zone de fissuration demandant, pour une même force P , une amplitude de déplacement plus importante pour l'apparition de fissure dans le cas du matériau revêtu.

4.2 Comportement plastique

La même série de calculs a été réalisée en utilisant un comportement élasto-viscoplastique tel que décrit dans le tableau 1 pour l'alliage Ti6Al4V. La loi de comportement du revêtement reste élastique. L'utilisation de cette loi de comportement permet de bien reproduire l'effet de rochet (ou déformation progressive) au cours du chargement de fretting comme le montre la figure 7.

Lors de l'utilisation du critère de Dang Van, les mêmes résultats que dans le cas de l'élasticité sont obtenus, à savoir une diminution du risque de fissuration avec l'utilisation d'un revêtement mou alors qu'un revêtement dur ne protège que la surface qu'il recouvre mais peut générer des fissures dans la partie non revêtue du contact.

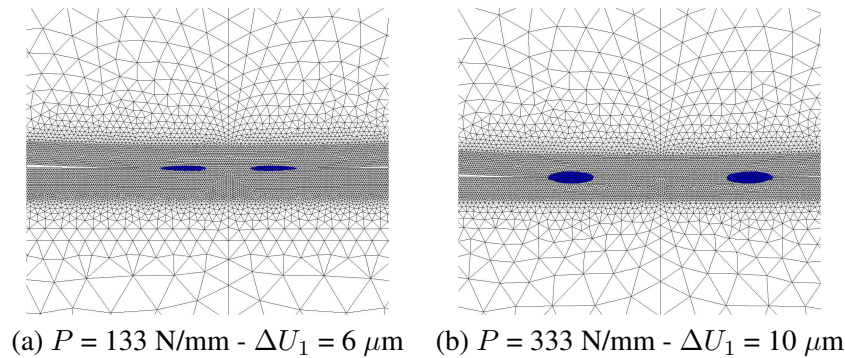


FIG. 7 – Visualisation des zones de rochet pour une sollicitation de fretting d'un système cylindre - plan non revêtu pour deux cas de chargement.

5 Conclusions

Ces premiers résultats permettent de mettre en évidence un effet bénéfique d'un revêtement mou (de rigidité inférieure à la rigidité du substrat) sur l'amorçage des fissures, alors qu'un revêtement dur ne protège que la surface revêtue. Cependant, d'autres paramètres seraient à prendre en compte pour une étude complète de l'effet du revêtement, notamment l'influence de son épaisseur et de son comportement élastoviscoplastique. En effet, l'usure du revêtement se comportera de façon différente suivant son comportement mécanique avec notamment la création de débris avec l'utilisation d'un revêtement dur ou une déformation plastique importante lors de l'utilisation d'un revêtement mou. La prise en compte du lubrifiant solide est également envisagée ainsi que la prise en compte de sa dégradation à l'aide d'un modèle de frottement composite (Dick *et al.* (2006)).

Références

- Ambrico, J.M., Begley, M.R. 2000 Plasticity in fretting contact. *JMPS* **48** 2391-2417
- Dang Van, K. 1993 Macro-micro approach in high-cycle multiaxial fatigue. In D.L. McDowell and R. Ellis editors, *Multiaxial Fatigue*, ASTM STP 1191 pp. 120-130, Philadelphia.
- Dick, T., Paulin, C., Cailletaud, G., Fouvry, S. 2006 Experimental and numerical analysis of local and global plastic behaviour in fretting wear. *Trib. Int.* **39** 1036-1044
- Dick, T., Cailletaud, G. 2006 Analytic and FE based estimations of the coefficient of friction of composite surfaces. *Wear* **260** 1305-1316
- Fridrici, V. 2002 Fretting d'un alliage de titane revêtu et lubrifié. Application au contact aube/disque. *Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon*
- Fridrici, V., Fouvry, S., Kapsa, Ph. 2003 Fretting wear behavior of a Cu-Ni-In plasma coating *Surf. Coat. Techn.* **163-164** 429-434
- Morrow, C., Lovell, M. 1999 Numerical contact analysis of transversely isotropic coatings. *Wear* **236** 360-367
- Sun, Y., Bloyce, A., Bell, T. 1995 Finite element analysis of plastic deformation of various TiN coating/substrate systems under normal contact with a rigid sphere. *Thin Solid Films* **271** 122-131