

La fiabilité des roulements aéronautiques et le comportement en fatigue

Brigitte CHEFTEL/Gérard PATY
TURBOMECA - 64511 BORDES CEDEX FRANCE

0. ABSTRACT

Gas turbine bearings are mechanical components which influence engine performance through this reliability. They link rotating parts to stationary ones. A bearing failure may have serious consequences such as engine out of order or aerospace manoeuvrability losses.

Engine improvements through SFC and weight/power ratio lead to increase rotational speeds and other parameters such as applied loads and bulk temperature.

The figure 1 shows the N.Dm evolution of the bearings applied on TURBOMECA gas generators from the 60's year up to future generation.

As other engine manufacturers, TURBOMECA use to design bearings such to prevent typical failures observed on field.

The fatigue defect is the most important to be addressed. In this context, it has been raised that an endurance limit under which no fatigue is developed exists.

A research programme named "ELABOMM" involving bearings and turbine engines Manufacturers and University and funded by the CEC was conducted during four years in order to identify the influencing parameters and the threshold of this endurance limit in dependence of their value.

It resulted a model and a databank available at the engine manufacturer offices which can be used to design bearings with confidence relatively to the expected fatigue behaviour.

1. INTRODUCTION

Les roulements de turbines à gaz font partie de ces composants mécaniques qui contribuent directement aux performances des moteurs aéronautiques au travers de leur fiabilité. Leur rôle de liaison entre les parties fixes et mobiles fait que toute défaillance peut avoir des conséquences catastrophiques telles que pertes d'usage du moteur et de la manœuvrabilité de l'aéronef.

L'évolution constante des turbines visant à l'amélioration des rapports poids/puissance et consommation spécifique conduit bien souvent à augmen-

ter la vitesse de rotation et les autres conditions de service telles que charges appliquées et températures ambiantes.

Il est d'usage d'utiliser le N.Dm (produit de la vitesse par le diamètre primitif du roulement) pour exprimer le niveau de sévérité de fonctionnement.

Le diagramme ci-dessous montre l'évolution du N.Dm des roulements à billes de butée générateur des turbomoteurs TURBOMECA au cours de quatre décennies.

En fait, le N.Dm est un paramètre incomplet puisqu'à valeur égale il peut correspondre à des vitesses très différentes et ne pas traduire les facteurs dépendant du carré de la vitesse.

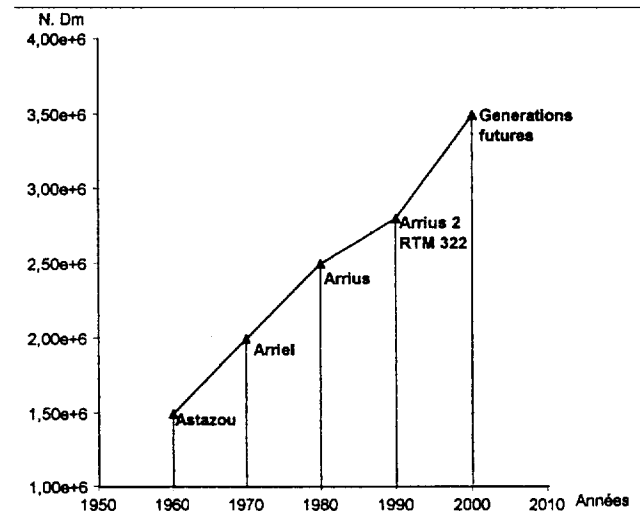


Figure 1 : TURBOMECA Gas Generator bearing N.Dm versus year

Les réglementations de navigabilité évoluent aussi en imposant une plus grande survivabilité en cas de dommages externes ou internes subis par la turbine. Les roulements doivent supporter ces conditions limites.

L'observation des modes de dégradation en service fait que TURBOMECA comme tous les autres motoristes, a identifié les modes de défaillances pouvant intervenir sur ses produits et applique des règles de conception visant à prévenir leur occurrence.

Les lignes qui suivent précisent quel rôle est joué par la maîtrise de la fatigue des roulements parmi les règles appliquées et les modèles utilisés lors de la conception des roulements.

2. LA FATIGUE DES ROULEMENTS

Ce sont les bagues des roulements dont les pistes sont soumises au passage répété des corps roulants qui subissent principalement les contraintes de fatigue (pression de Hertz).

Les fréquences de passage élevées provoquent des accumulations importantes de cycles en des temps très réduits, comme le montre l'exemple ci-dessous :

Roulement :

Diamètre primitif : 52 mm

Nombre de billes : 15

Diamètre des billes : 8,731 mm

A la vitesse de rotation de 54 100 tr/min, on atteint 10^7 cycles pour :

Bague intérieure : 22 min

Bague extérieure : 28 min

Une durée de fonctionnement de 5000 h correspond donc pour la bague intérieure de cet exemple à $1,35 \times 10^{11}$ cycles.

Cette situation et l'objectif de fiabilité placé à un très haut niveau font de la maîtrise de la fatigue un point-clé de la conception des roulements.

3. LA NOTION DE "LIMITE D'ENDURANCE" - LES PARAMETRES INFLUENTS

Pendant très longtemps les modèles et codes de calculs ont prévu des durées de vie finies quelles que soient les conditions de fonctionnement. Cette situation était réelle mais a évolué avec l'amélioration de la qualité des aciers utilisés.

Désormais, il existe des conditions qui permettent d'espérer une durée de vie infinie. Le concepteur a donc comme objectif de prévoir une définition de composant telle que les conditions de travail restent à l'intérieur de ce domaine sous limite d'endurance.

Afin de le satisfaire, il est primordial de connaître

- l'étendue du domaine d'utilisation des roulements avec précision
- la limite d'endurance des aciers utilisés et les paramètres qui influent sur cette limite

Ce dernier point a fait l'objet du programme de recherche Brite "ELABOMM" de 4 ans financé par la CEC et impliquant tous les motoristes européens (BMW-RR, MTU, HISPANO-SUIZA, RR, SNECMA, et TURBOMECA), deux fabricants de roulements (FAG, SNR) et deux universités (INSA Lyon et CETRIB/INEGI de Porto).

Les paramètres influents qui ont été évalués sont :

- le matériau utilisé
- la pression de Hertz
- les contraintes tangentielles dues au frettage des bagues et à la vitesse
- la température
- les contraintes résiduelles de surface
- la pollution du lubrifiant
- le glissement dans les contacts

4. L'ANALYSE MICROSCOPIQUE

Le projet "ELABOMM" s'est donné comme objectif d'approfondir le processus de fatigue intervenant au cœur du matériau, d'en connaître l'initiation et le développement afin de le modéliser et mieux le maîtriser. Parallèlement, une série importante d'essais appliqués sur une grande variété de matériaux a permis d'apprécier les valeurs pratiques utiles et à les corréler au modèle développé.

Le stade ultime et endommageant de la fatigue des roulements est l'écaillage provoquant la perte de matière. C'est l'aboutissement d'un phénomène initié autour d'une hétérogénéité présente dans le matériau.

Le volume de matière est soumis à un champ de contraintes qui dépend en premier lieu du contact entre deux corps.

4.1. Nature des contacts - Tribologie

Afin de déterminer un champ de contrainte réaliste, il est utile de préciser la géométrie des contacts (topographie réelle).

Les surfaces de frottements et les températures interviennent aussi dans l'élaboration des contraintes.

Enfin, une particule de pollution contenue dans le lubrifiant et circulant dans le contact contribuera aussi à déterminer une surtension locale.

C'est l'ensemble de ces paramètres qui a été pris en compte dans le modèle d'"ELABOMM" par l'INSA pour aboutir à la prédiction du champ de contrainte généré dans un contact de roulement.

4.2. Initiation et développement des fissures

L'expérience montre que les fissures se développent dans le massif soumis à une contrainte dans la zone qui contient une hétérogénéité. En effet l'inclusion (carbure par exemple) et la matrice ont des propriétés mécaniques différentes et donc des comportements sous charge différents. Ces incompatibilités de déformation sont accommodées élastiquement jusqu'à un certain seuil. Au-delà, des dislocations sont générées et se développent pour aboutir aux endommagements par fatigue.

Les laboratoires de l'INSA Lyon ont particulièrement bien mis en évidence les phénomènes que l'on observe sur les applications aéronautiques des roulements, que ce soit par méthode analytique ou par essai sur machine bi-disque.

On retiendra en particulier :

- la forme dite en papillon (voir fig. 2) observable autour d'une hétérogénéité soumise à un champ de contrainte et que l'on observe sur un grand nombre de roulements, que ce soit après quelques centaines d'heures en opération sur moteur ou bien après plusieurs milliers d'heures

Une analyse très fine du processus de formation du papillon et de son développement a permis à l'INSA Lyon d'établir que quatre étapes existent qui ont été identifiées comme des seuils successifs, H1, H2, H3 et H4.

Seuil H1 :

C'est l'état de contrainte autour de l'inclusion en dessous duquel aucune évolution ne se produit (pas de déformation plastique)

Seuil H2 :

Au-delà de H1, il y a déformation plastique autour de l'inclusion. De plus, le caractère cyclique de la sollicitation conduit à une transformation de phase (papillon de fatigue), dans le domaine où se produit cette déformation plastique. Le seuil H2 représente le niveau qui va permettre l'initiation d'une fissure le long du papillon, la déformation plastique ne permettant plus l'accommodation locale.

Seuil H3 :

Entre H2 et H3, la fissure ne se propage pas. En revanche, le dépassement du seuil H3 entraîne la propagation de la fissure qui aboutira à terme à l'écaillage.

Seuil H4 :

C'est le niveau qui entraîne la propagation de la fissure qui aboutira à terme à l'écaillage.

- L'autre point à retenir est la matérialisation de la profondeur de la contrainte maxi et sa dépendance du frottement.

La profondeur moyenne à laquelle se situe la contrainte maxi est $\sim 0,7 a_0$ (a_0 étant le 1/2 petit axe de la surface de contact). Les essais sur machines bi-disques sur du matériau M50 ont confirmé ce fait.

L'INSA Lyon a utilisé une technique d'échographie ultrasons pour détecter les fissures générées au cours d'essais avec et sans glissement dans les contacts (et pour identifier leur progression avec les cycles).

La figure 3 représente la densité de papillons/fissures détectés en fonction de la profondeur. En particulier, la zone de densité maxi est localisée à la profondeur prévue pour le calcul, de même qu'il se confirme que ce maxi se déplace vers la surface en présence de contraintes tangentielles de surface.

On retiendra de ce chapitre les points suivants :

- la limite d'endurance en fatigue d'un matériau de roulement existe
- la présence de papillons de fatigue dans le matériau représente un niveau de contrainte appliqué qui n'aboutit pas à l'écaillage si le seuil H3 n'est pas dépassé
- on peut analytiquement connaître l'influence de paramètres extérieurs sur la limite d'endurance si on sait les prendre en compte à la fois dans le champ de contrainte et dans les caractéristiques mécaniques de la matrice et des hétérogénéités (l'effet de la température par exemple a été étudié au cours du projet "ELABOMM").

5. L'ANALYSE MACROSCOPIQUE

Afin de créer une banque de données fiable et d'usage pratique pour les concepteurs, des essais de roulements ont été entrepris sur une population importante (principalement par FAG).

Les matériaux suivants ont fait l'objet d'investigations :

- 100 Cr6 (AISI 52 100)
- M 50
- M 50 - NIL
- Cronidur 30

Le tableau 1 en annexe précise le détail des essais conduits par FAG. La démarche retenue fut de soumettre chaque roulement à une durée de fonctionnement équivalente à 5×10^6 cycles, sachant que cette durée est suffisante pour générer les déformations plastiques qui sont une condition minimum de l'initiation du processus de fatigue.

Par suite, chaque roulement a été l'objet d'une mesure de contrainte résiduelle en fonction de la profondeur sous la surface de la piste de travail de la bague intérieure.

Afin de pouvoir exploiter ces résultats de manière simple et fiable, FAG a créé le paramètre intitulé : "Characteristic deformation number" (voir fig. 4). Il consiste à utiliser le profil des contraintes résiduelles d'une bague neuve en référence par rapport à celui du specimen testé et d'intégrer numériquement sur une étendue suffisante les valeurs mesurées afin de fournir une image fidèle du domaine soumis au changement d'état.

La figure 5 en annexe illustre l'influence de la pression de Hertz sur la distribution des contraintes résiduelles pour la matière 100 Cr 6 à faible vitesse. On constate l'accroissement des valeurs de contraintes de compression ainsi que le déplacement en profondeur avec l'augmentation de pression de Hertz imposée au cours de l'essai.

Ce type d'essai converti en paramètre "Characteristic deformation number" ainsi que les essais concernant les autres matériaux se résument sur la figure 6.

Un des enseignements de ce diagramme concerne l'influence de la température sur la tenue en fatigue. Il est d'usage de lier son évolution à celle de la dureté. Or, la figure 6 montre que l'hypothèse utilisée jusqu'à ce jour est fautive.

En plus de ces travaux exécutés par FAG, d'autres partenaires du programme "ELABOMM" ont effectué des essais de roulement d'application aéronautique dans leurs conditions de service (MTU, BMW-RR, SNECMA, SNR).

L'ensemble de ces travaux cumulés a permis de déterminer avec précision les limites d'endurance des matériaux sujets de l'étude ainsi que l'effet des paramètres les plus influents.

Par exemple, l'étude a conclu que la limite d'endurance du M50 si située entre 2100 et 2250 MPa pour une température de 180/200° C.

6. CONCLUSION

L'industrie aéronautique est de celles qui ont le plus besoin de connaître les limites des matériaux

qu'elle utilise afin de toujours mieux optimiser ses produits.

L'application des roulements aux turbines suppose que tous les modes de défaillances sont connus et que leur conception est dirigée pour s'écarter au maximum des conditions qui les exposent à ces risques.

Dans le domaine de la fatigue, la connaissance du seuil d'endurance en dessous duquel aucune rupture ne se développe est essentielle.

Au cours de ces 5 dernières années, les motoristes européens se sont associés avec le support de la CEC afin de faire évoluer leurs connaissances dans ce domaine et ont obtenu des valeurs de référence primordiales pour concevoir les roulements d'applications futures avec un maximum de confiance.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet BRITE "ELABOMM", Contrat BRE 2 - CT 92 - 0209, financé par la CEC.

Les partenaires de ce programme sont remerciés pour l'autorisation donnée aux auteurs de présenter leurs résultats, en particulier FAG et l'INSA Lyon, ainsi que BMW-RR, HISPANO-SUIZA, MTU, RR, SNECMA et le CETRIB/INEGI de PORTO.

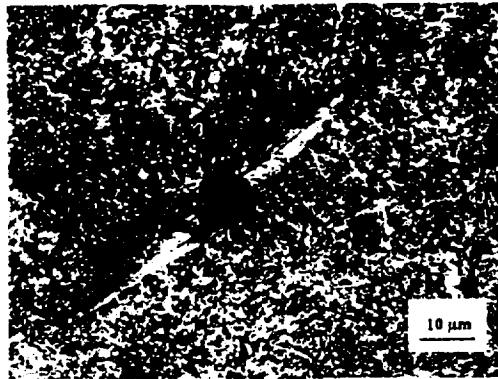
7. REFERENCES

[1] P. LAMAGNERE, R. FOUGERES, G. LORMAND, A. VINCENT, D. GIRODIN, G. DUDRAGNE, F. VERGNE "A Physically Based Model for Endurance Limit of Bearing Steels", ASME Journal of Tribology, January 1998, Vol. 120, p. 1-6.

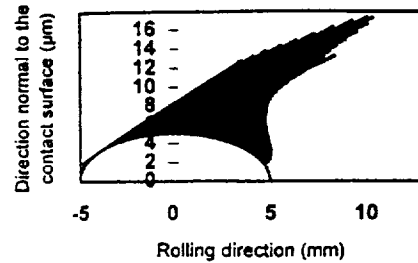
[2] D. NELIAS, M.L. DUMONT, F. CHAMPIOT, A. VINCENT, D. GIRODIN, R. FOUGERES, L. FLAMAND "Role of Surface Roughness and Operating Conditions on Rolling Contact Fatigue", soumis pour publication dans ASME, Journal of Tribology, 1998.

Type of experiment	Rotational speed	D*N [mm/min]	Hoop stresses	Oil-in temp.	M50	M50 NIL	Cronidur 30	100 Cr 6	Total
Not loaded	-	-		-	1	1	1	1	4
Basic	2500 rpm	$0,42 \cdot 10^6$	60 MPa	80°C	8	8	8	6	30
Basic	2500 rpm	$0,42 \cdot 10^6$	60 MPa	160°C	8	8	8	6	30
Basic	2500 rpm	$0,42 \cdot 10^6$	60 MPa	185°C	8	8	8	6	30
Basic	2500 rpm	$0,42 \cdot 10^6$	60 MPa	210°C	8	8	8	0	24
Tight interference fit	2500 rpm	$0,42 \cdot 10^6$	350 MPa	185°C	5	5	6	6	22
High speed	14000 rpm	$2,36 \cdot 10^6$	110 MPa	70°C	6	6	8	6	26
High speed	14000 rpm	$2,36 \cdot 10^6$	110 MPa	110°C	6	6	8	0	20
Total					50	50	55	31	186

Table 1 : Overview of the performed test runs



a) Optical micrograph of the W.E.A. observed around an aluminum oxide inclusion found at 0.6 mm beneath the surface (the shear stress is maximum at 0.38 mm beneath the surface)

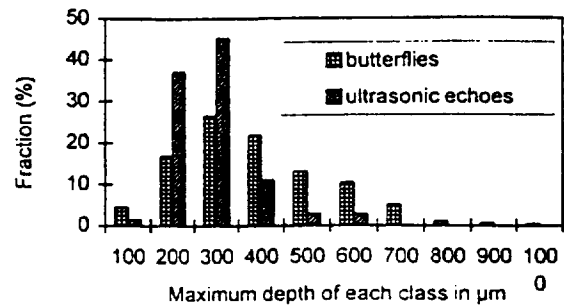


b) Calculated domain (only half of the system is represented)

Figure 2 : Comparison between an experimental W.E.A. and the corresponding calculated domain swept by dislocations ($P_H = 4.5 \text{ GPa}$; 52 100 steel)



(a) Example of inclusion (alumina-calcium aluminate)/W.E.A./microcrack observed by S.E.M. at the location where an ultrasonic echo was detected (depth 1100 μm); M50 steel



(b) Comparison between distributions of butterflies (optical microscopy) and ultrasonic echoes versus depth; Hertzian pressure 3.5 GPa; $5 \cdot 10^7$ cycles; M50 steel

Figure 3 : Butterflies and ultrasonic echoes versus depth

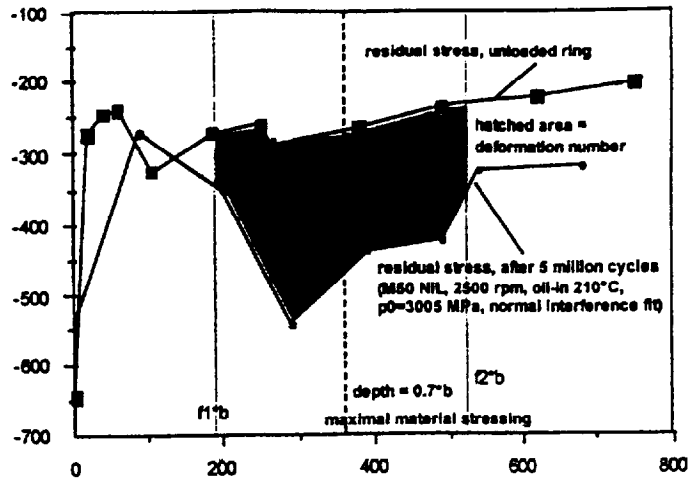


Figure 4 : Definition of the characteristic deformation number

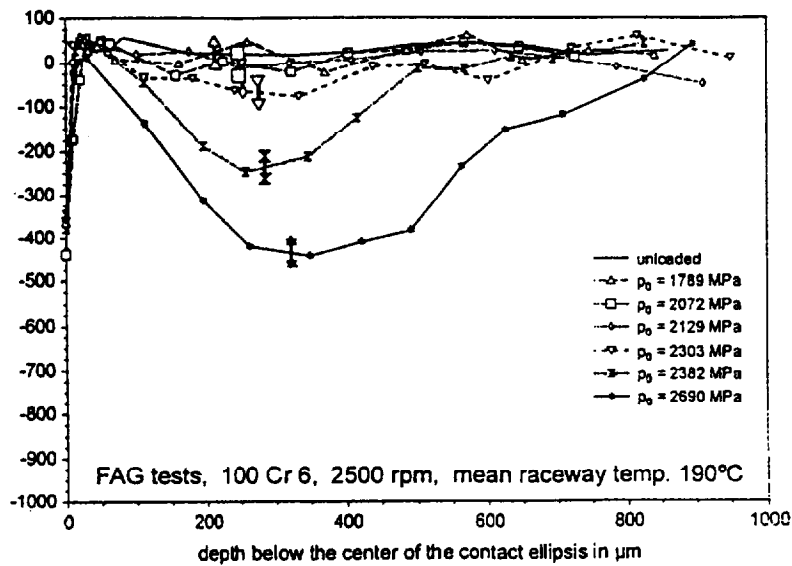


Figure 5 : Changes in residual stress
(FAG tests, 100Cr6, 2500 RPM, 190° C)

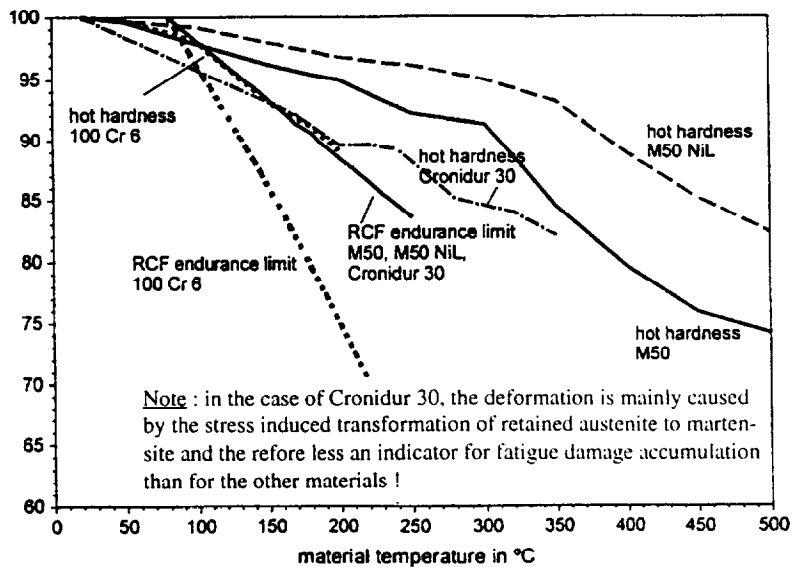


Figure 6 : Influence of the operational temperature
on the material strength