

Annexe 3
MISE EN ŒUVRE ET EVALUATION
DE LA LUBRIFICATION FLUIDE
DANS UN ROULEMENT
POUR AMBIANCE SPATIALE
AVEC LE BANC D'ESSAIS RAMI

I- Objectifs. Paramètres des essais

Le banc d'essais RAMI permet de tester en continu le comportement de roulements pour ambiance spatiale en enregistrant le couple. L'objectif est de déterminer la ou les combinaisons de paramètres parmi ceux considérés au cours des chapitres 2 à 5 : nettoyage des pièces métalliques du roulement, comportement du lubrifiant, efficacité du film barrière et intérêt de l'emploi d'une cage poreuse.

La bague intérieure est entraînée en rotation et la bague extérieure est reliée à un couplemètre. Le schéma du système et les caractéristiques des roulements sont les suivantes :

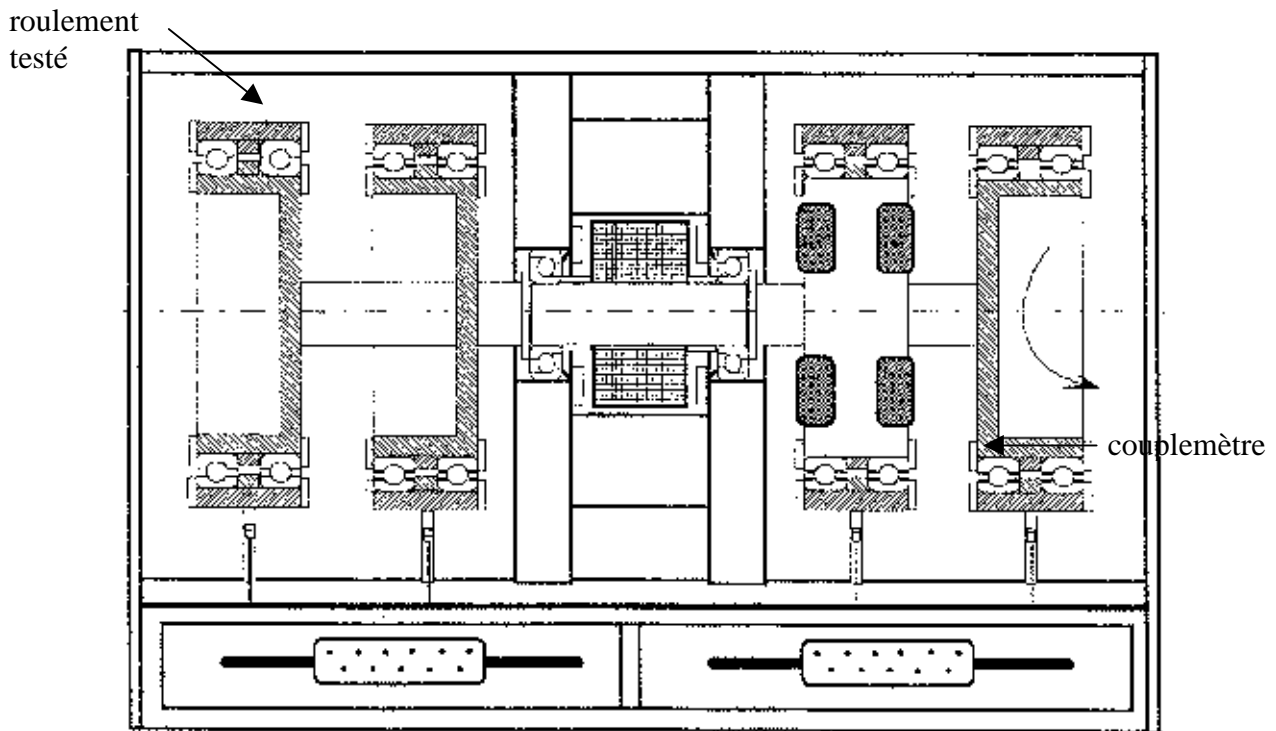


Figure A3-1. : schéma de principe du banc d'essais RAMI

bague extérieure :	
diamètre intérieur (mm)	47,459
diamètre extérieur (mm)	55
bague intérieure :	
diamètre intérieur (mm)	35
diamètre extérieur (mm)	42,531
cage alvéolaire :	
diamètre intérieur (mm)	42,80
diamètre extérieur (mm)	46,50
diamètre logement de la bille (mm)	4,20
billes :	
diamètre (mm)	3,969
nombre	26

Tableau A3-1 : caractéristiques des roulements testés avec RAMI

Plusieurs paramètres sont ajustables et sont rassemblés dans le tableau ci-dessous. Ils incluent notamment les points évoqués tout au long des chapitres 2 à 5.

	Paramètre	Nombre et nature du choix
1-	nature du lubrifiant	2 huiles
2-	nature de la cage poreuse	5 matériaux
3-	nature et présence du film barrière	1 film barrière présent/absent
4-	quantité de lubrifiant	à définir
5-	charge appliquée	à définir
6-	précharge	fixée
7-	vitesse de rotation ω	$0 \leq \omega \leq 150$ tours/mn
8-	rodage du roulement	2 oui/non
9-	guidage de la cage	à définir
10-	mode de nettoyage	4 techniques
11-	durée de l'essai	à définir
12-	température de travail	non contrôlée mais enregistrée

Tableau A3-2 : paramètres d'un essai

Cela représente un total de 9 paramètres au moins. Ces paramètres ne sont pas indépendants, des couplages existent entre eux. Cela permet en l'occurrence d'éviter des combinaisons incompatibles ou inutiles en s'appuyant sur les résultats des chapitres 2 à 5.

Paramètres liés	Nature du lien
1 ↔ 4 ↔ 12	- viscosités des huiles - dégradation auto-catalytique du PFPE
1 ↔ 3	- interaction lubrifiant – film barrière
1 ↔ 10	- dégradation auto-catalytique du PFPE - démouillage Pennzane
1 ↔ 5 et 6	- aptitude à générer des films EHD - dégradation auto-catalytique du PFPE
2 ↔ 4	- taux d'imprégnation, porosité - aptitude à générer des films EHD
2 ↔ 7	- centrifugation (à écarter car ω faible)
2 ↔ 12	- différentiel thermique huile – structure poreuse
3 ↔ 4	- facilité de confinement

Tableau A3-3 : couplage entre les paramètres des essais RAMI

1- Paramètres fixés

Un certain nombre de paramètres seront dans un premier temps figés. Il s'agit de :

- **la quantité de lubrifiant** : les structures poreuses seront imprégnées à saturation et on procèdera à un ajout de lubrifiant sur les éléments roulants et les pistes. Cette quantité pourrait être fixée à 5% du volume libre calculé à l'aide des caractéristiques des roulements (volume entre les bagues intérieure et extérieure, la cage et les billes, **mais excluant le volume poreux de la cage**). Ce point reste néanmoins à confirmer. Le tableau ci-dessous résume les quantités de lubrifiant que cela représente dans chaque cas.

	PTFE	papier phénolique	Meldin 9000	acier poreux
porosité (%)	0	≈ 2,5	≈ 22,8	≈ 35,7
volume libre dans la cage V_1 (cm³)	0	0,038	0,322	0,503
volume libre dans le roulement V_2 (cm³)	1,221			
volume libre total $V_3=V_1+V_2$ (cm³)	1,221	1,259	1,543	1,724
volume de lubrifiant rajouté $V_4 (=0.05 \times V_2)$ (cm³)	0,061	0,061	0,061	0,061
volume total de lubrifiant présent $V_5 (=V_1+V_4)$ (cm³)	0,061	0,099	0,383	0,564

Tableau A3-4 : volumes de lubrifiant dans un roulement selon la nature de la cage

- **la charge axiale sur le roulement** : La précharge du roulement ($100N \pm 10 \%$) sert de charge.

- **la vitesse de rotation ω** : Elle est fixée à 120 tours/mn. Le maximum accessible est de 150 tours/mn.

- **le mode de guidage de la cage** : Ce paramètre intervient essentiellement pour des vitesses de rotation élevées. Une seule géométrie est pour l'instant considérée. Il s'agit de cages alvéolaires. Le Meldin 9000 pose un problème : à l'heure actuelle, seuls des séparateurs sont disponibles chez le fournisseur.

- **la durée de l'essai** : En se fixant un nombre de cycles maximum de 4 millions, et avec une vitesse de 120 tours/mn, un test dure environ 1 mois.

- **la température et l'atmosphère de travail** : la température est enregistrée mais non contrôlée. Le dossier technologique de RAMI fait état de la possibilité de travailler sous air ou azote sec ($H_r < 5 \%$).

2- Paramètres variables

Après ces paramètres figés, les quatre principales variables à considérer lors de l'étude sont les suivantes :

- **la nature du lubrifiant** : Fomblin Z25, Pennzane SHF X-2000, et une (des) graisse(s). Les deux huiles sont celles communément employées dans le domaine spatial. La nature de la graisse reste à définir (huile de base, épaississants)

- **la nature du matériau de la cage** : papier phénolique, Meldin 9000, PTFE et acier. Les trois premiers matériaux sont ceux rencontrés dans des roulements évoluant en ambiance spatiale. Le tissu phénolique est écarté dans la mesure où sa porosité est presque nulle et que ses propriétés sont proches de celles du papier phénolique. Le retenir aussi reviendrait à doubler des essais. Le dernier présente l'avantage d'être très homogène, facilement imprégnable et dans une matière facile à trouver. De plus, cela permet de couvrir de manière assez large la palette du couple (rayon moyen de pore)-(porosité) comme le montre le tableau ci-dessous.

	PTFE	papier phénolique	Meldin 9000	acier poreux
$r_{\text{pore moyen}} (\mu\text{m})$	0	3,90	0,50	7,40
porosité (%)	0	≈ 2,5	≈ 22,8	≈ 35,7

Tableau A3-5 : gamme rayon de pore - porosité des différents matériaux de cage

- **la technique de nettoyage** : Les procédures retenues sont celles dans le cadre de l'évaluation des remplaçants de CFC (chapitre 2) et de l'emploi de la Pennzane SHF X-2000 avec une surface polie miroir (chapitre 5) : quatre solvants (eau savonneuse, hexane, acétone, éthanol), trichloroéthylène - acétone, Vertrel MCA+.

- **utilisation ou pas d'un film barrière** : L'objectif de RAMI est de tester l'efficacité des films barrière, à savoir la fonction de ces types de produits, et non un produit en particulier.

Ainsi, si on considère 3 lubrifiants, quatre matériaux de cage potentiels, quatre procédés de nettoyage et deux attitudes vis à vis du film barrière (présent ou absent), cela représente : $3 \times 4 \times 4 \times 2 = 96$ cas de figure. Chaque cas représente une paire de roulements dans la configuration de RAMI. A chaque test, on peut faire fonctionner 4 cas. Et un test devrait durer pour l'instant au maximum un mois (4 millions de cycles à 120 tours/mn).

Au temps nécessaire à la réalisation et la conduite des tests viennent se greffer ceux :

- des commandes du matériel et des consommables,
- de la préparation des essais (nettoyages, imprégnations, montages, démontages),
- des expertises
 - * états de surface des pistes et des billes
 - * taux d'imprégnation et usure des cages
 - * évolution du lubrifiant (dégradation chimique, interaction avec le film barrière, etc ...)

II- Hiérarchisation des essais

Afin de tester des cas significatifs et pertinents, et de réduire le nombre de tests à une durée raisonnable, des priorités sont instaurées. Elles concernent principalement :

- le choix des lubrifiants,
- les techniques de nettoyage,
- l'emploi et la nature du film barrière,

1^e priorité : les lubrifiants à évaluer en premier sont la Fomblin Z25 et la Pennzane SHF X-2000. Cela représente donc 64 cas à envisager. Les tests avec des graisses seront définis par la suite en fonction naturellement des résultats obtenus avec ces deux lubrifiants.

2^e priorité : Les roulements sont en acier Z100CD17. Lorsqu'il est nettoyé avec la procédure des quatre solvants (eau savonneuse, hexane, acétone, éthanol), la Pennzane SHF X-2000 démouille les surfaces. Il apparaît donc normal d'éliminer cette combinaison.

D'autre part, il ne semble pas utile d'évaluer le nettoyage de cet acier à la fois par les procédés quatre solvants et trichloroéthylène - acétone pour la Fomblin Z25, celle-ci ne présentant pas de phénomène de démouillage. De même, l'évaluation de l'efficacité comparée des remplaçants potentiels des CFC a donné l'avantage au Vertrel MCA+. Cela représente donc 32 cas de figure.

3^e priorité : L'emploi du film barrière est conditionné par la tension de surface γ_{LV} du lubrifiant et par la quantité de lubrifiant présente dans le roulement (lubrifiant présent dans la cage poreuse et sur les éléments roulants).

La tension de surface de la Fomblin Z25 étant la plus basse (21,1 mN.m⁻¹), le film barrière devrait être employé dans tous les cas. Lorsque la quantité de lubrifiant est faible ou modérée (papier phénolique, Meldin 9000), les cas où le film barrière est absent seront également considérés. En effet, nous avons vu au chapitre 5 que l'extraction du fluide était très difficile.

La Pennzane SHF X-2000 possède une tension de surface moins importante (30,7 mN.m⁻¹). Une approche inverse à celle de son homologue semble appropriée : pas de film barrière dans chacun des cas et en employer uniquement dans les cas pas trop défavorables (papier phénolique, Meldin 9000) avec le film barrière.

D'autre part, suite à la mise en évidence des interactions entre la Pennzane SHF X-2000 et le film barrière Fluorad FC 725 (chapitre 4), il serait préférable d'employer pour ce lubrifiant-ci un autre revêtement anti-migration, par exemple le Fluorad FC 732. Cependant, le but est de tester la fonction d'un revêtement anti-migration et non un type de produit. Le choix est conditionné par les fabricants, il est très probable que seul un seul produit sera disponible.

Cela conduit donc à 20 cas de figure à tester.

4^e priorité : Le Vertrel MCA+ a conduit à de meilleurs résultats. Les tests seront conduits prioritairement avec ce nettoyage. La procédure quatre solvants et le couple trichloroéthylène-acétone viendront dans un second temps.

A ce stade, il reste donc 12 cas prioritaires à considérer qui impliquent directement le remplaçant du CFC, des lubrifiants fluides, les structures poreuses et les revêtements non mouillants. Cela représente 3 tests de 1 mois chacun.

III- Bilan

Nettoyage avec le remplaçant du CFC, le Vertrel MCA+ :

Fomblin Z25

papier phénolique		nettoyage par Vertrel MCA+ des pièces en acier Z100CD17		Meldin 9000		PTFE		acier poreux	
film barrière	pas de film barrière	film barrière	pas de film barrière	film barrière	pas de film barrière	film barrière	pas de film barrière	film barrière	pas de film barrière

Pennzane SHF X-2000

papier phénolique		nettoyage par Vertrel MCA+ des pièces en acier Z100CD17		Meldin 9000		PTFE		acier poreux	
film barrière	pas de film barrière	film barrière	pas de film barrière	film barrière	pas de film barrière	pas de film barrière	pas de film barrière	pas de film barrière	pas de film barrière

En considérant le nettoyage de référence, et si on enlève dans l'organigramme précédent les cas sans film barrière avec la Fomblin Z25 et ceux avec pour la Pennzane SHF X-2000, cela conduit à 8 cas supplémentaires soit 2 tests (i.e. 2 mois).

Fomblin Z25

papier phénolique		nettoyage quatre solvants des pièces en acier Z100CD17		Meldin 9000		PTFE		acier poreux	
film barrière	pas de film barrière	film barrière	pas de film barrière	film barrière	pas de film barrière	film barrière	pas de film barrière	film barrière	pas de film barrière

Pennzane SHF X-2000

nettoyage trichloroéthylène-acétone des pièces en acier Z100CD17

papier phénolique		Meldin 9000		PTFE		acier poreux	
pas de film barrière	pas de film barrière	pas de film barrière	pas de film barrière	pas de film barrière	pas de film barrière	pas de film barrière	pas de film barrière

I- Objectifs. Paramètres des essais	208
<i>1- Paramètres fixés.....</i>	<i>209</i>
<i>2- Paramètres variables</i>	<i>210</i>
II- Hiérarchisation des essais.....	211
III- Bilan.....	213