

Conclusion générale

L'objectif de ce travail a été d'étudier individuellement les phénomènes en jeu dans la lubrification fluide en ambiance spatiale afin de mieux comprendre et la mettre en œuvre dans des roulements complets.

Le nettoyage des surfaces et le comportement rhéologique et tribologique des lubrifiants comptent parmi les questions incontournables lorsqu'on aborde la lubrification fluide.

En particulier, un remplaçant des CFC a été choisi et répond aux contraintes exposées dans le chapitre 2. Il s'agit d'un azéotrope de décafluoropentane et de trans-1,2 dichloroéthylène. Il a conduit, à l'aide d'un nettoyage en phase vapeur, à un état de surface reproductible en termes de contamination moléculaire et de tension de surface. L'évaluation a porté sur des contaminants modèles représentant ceux rencontrés par des organes mécaniques en Z100CD17 utilisé dans les applications spatiales. Cette évaluation nécessiterait également des essais de compatibilité sur d'autres métaux plus sensibles à la corrosion ainsi que sur des polymères afin de déterminer la polyvalence de ce solvant.

Deux lubrifiants pour ambiance spatiale, un perfluoropolyalkyléther linéaire et un cyclopentane ramifié ont fait l'objet de caractérisations rhéologiques poussées. Dans le chapitre 3, le caractère newtonien du cyclopentane ramifié a été confirmé dans un domaine de taux de cisaillement étendu. Nous avons par contre montré que le lubrifiant fluoré possède un caractère non newtonien pour des taux de cisaillement supérieurs à 10^5 s^{-1} , s'accompagnant d'une chute de près de 50 % de la viscosité.

Les mesures par interférométrie optique et analyse d'images conduisent à des épaisseurs qui correspondent aux prédictions des modèles de Hamrock et Dowson (centre du contact) et de Moes, Venner et Chevalier (épaisseurs minimales) pour le cyclopentane ramifié. L'épaisseur minimale diminue brutalement pour le cyclopentane ramifié pour des vitesses de quelques cm.s^{-1} à 60°C . Cette chute serait imputable à l'autophobie qui entraîne un démouillage. Le perfluoropolyalkyléther linéaire ne suit aucun des deux modèles cités, confirmant son caractère non newtonien. Un changement pour les épaisseurs minimales, dans des conditions similaires à celles du cyclopentane ramifié, s'opère à partir de 25 nm pour une vitesse de 5 mm.s^{-1} . Ce phénomène est la manifestation du cisaillement en amont du contact. La lubrification et la protection des surfaces des pistes et des billes d'un roulement ne sont donc plus aussi bien assurées dans ce domaine des basses vitesses.

Deux procédés de maintien et d'apport continu de lubrifiant, propres à la lubrification fluide en milieu confiné, permettant de limiter les pertes de fluide, ont été également approfondis.

Le premier consiste à employer des revêtements non mouillants, généralement des polyméthacrylates fluorés. Si leur efficacité est prouvée depuis longtemps, il restait à vérifier leur compatibilité avec les lubrifiants. Dans le chapitre 4, nous avons montré une solubilisation partielle du polymère par l'huile, avec baisse de la fonctionnalité du revêtement. Cette réaction peut être évitée en choisissant un lubrifiant dont la parenté chimique avec le solvant initial du revêtement est assez éloignée. En effet, l'altération des revêtements s'aggrave par contact direct avec le fluide et le mécanisme concerné subira une avarie prématurée par fuite de lubrifiant. Il ne pourra donc pas fonctionner pendant toute la période prévue de la mission. D'autre part, le passage significatif en valeur relative dans le lubrifiant de faibles fractions moléculaires non volatiles du revêtement anti-migration, étant donné les faibles quantités de fluide, pourrait affecter l'écoulement de l'huile. Une fois présentes dans le

lubrifiant, rien ne permettra de les en extraire. De la même façon, la mouillabilité de l'huile pourrait être modifiée. De plus, la cinétique du phénomène est inconnue. Il est capital de savoir quand l'interaction prend fin. En effet, cette réaction implique un lubrifiant de plus en plus "chargé" en résidus. Comme la quantité de fluide présente dans un roulement est faible, la concentration en résidus peut devenir rapidement importante. Sa mouillabilité a alors d'autant plus de chances d'être perturbée, ainsi que sa viscosité, bien que nous ne l'ayons en rien constaté.

Un substitut aux polyméthacrylates fluorés se dessine avec un PTFE amorphe déposé par un plasma C.V.D.. Ce matériau possède les qualités requises pour assurer le blocage de la migration du fluide. Il pourrait être déposé avant assemblage du roulement en masquant les pistes.

L'apport continu de lubrifiant repose sur l'emploi de structures poreuses imprégnées susceptibles de fournir du lubrifiant lorsque le besoin s'en fait sentir. Le chapitre 5 a recensé des phénomènes physiques impliqués ou supposés l'être dans le fonctionnement de ces milieux poreux. Plusieurs expériences modèles ont alors été développées afin de découpler et d'évaluer le rôle de chacun de ces phénomènes. Nous avons démontré que l'extraction en statique du fluide, à partir de structures poreuses imprégnées à saturation, était essentiellement due au mouillage et à des phénomènes de différentiel thermique. La rugosité des substrats et un gradient de température comme celui rencontré dans des roulements permettent d'extraire quelques milligrammes de lubrifiant. Cependant, et dans le cadre de ces aspects statiques, le rendement (apport de fluide)/(difficultés de mise en œuvre) est extrêmement faible. Le lubrifiant ainsi récupéré est le plus souvent celui piégé à l'interface entre les pièces.

La centrifugation a permis d'extraire de manière contrôlée du lubrifiant. Ceci est possible à partir d'un seuil en vitesse de rotation au-delà duquel les forces capillaires de rétention sont vaincues. Cette limite à franchir est fonction du fluide (tension de surface, viscosité) et des caractéristiques du milieu poreux (rayon de pore, géométrie macroscopique) d'après notre modèle analytique. Les valeurs expérimentales de ce seuil sont cohérentes avec les vitesses rencontrées dans des roulements à billes et le modèle est en bon accord avec l'expérience. La centrifugation est déjà employée pour alimenter un mécanisme. Il n'utilise pas les structures poreuses mais le fluide passe par les ajustements entre les différentes pièces. Il ressort alors de nos travaux que les milieux poreux pourraient être mis à profit pour des applications à grande vitesse.

Une approche numérique prospective et bidimensionnelle a également été entreprise. Elle a permis de montrer que la rotation des billes dans leurs logements engendrait des gradients de pression hydrodynamique créant une circulation de fluide au sein de la structure poreuse. Une telle circulation est susceptible d'alimenter les contacts bille-cage dans les conditions choisies dans cette approche.

Le but sera de valider sur des roulements la préparation de surfaces, la rhéologie de lubrifiants, le maintien et l'apport continu d'huile. En effet, le suivi en continu et l'évaluation du comportement de mécanismes lubrifiés sont généralement établis par l'analyse du couple et d'autres observations *post mortem* (états de surface, état du lubrifiant, analyses chimiques, ...). Ces résultats intègrent plusieurs paramètres, mais ne permettent pas de déterminer comment les aspects précédemment cités sont favorables ou défavorables au bon fonctionnement des roulements.

Nous proposons alors une démarche expérimentale en Annexe 3 qui permettrait d'analyser le fonctionnement de roulements pour les combinaisons les plus pertinentes des différents points évoqués ci-dessus : nettoyage, nature du lubrifiant, utilisation d'un film barrière et emploi d'une structure poreuse, géométrie de la cage. Cette évaluation sera réalisée

à l'aide du suivi du couple résistant et d'une analyse fréquentielle. Ces mesures globales nous renseigneront sur l'efficacité de la lubrification et les solutions envisagées. Des expertises permettront de visualiser des marques d'usure des surfaces, une détérioration du lubrifiant et l'efficacité du film barrière. La comparaison des résultats mettant en compétition des configurations antagonistes permettra de détecter l'apport de chaque paramètre et d'en déduire une ou plusieurs combinaisons optimales. Nous nous placerons dans des conditions réelles pour évaluer l'interaction entre le fluide et le revêtement anti-migration. Nous pourrions vérifier également si les quantités de fluide extraites des structures poreuses restent équivalentes à celles obtenues lors de nos expériences et assurent une durée de vie suffisante, pour différents types de cage.

