

Chapitre 1

SITUATION DU PROBLEME

I- Introduction. La lubrification fluide dans les mécanismes spatiaux

1- Généralités. Caractéristiques de l'ambiance spatiale

a- L'environnement spatial

Cet environnement peut se scinder en deux parties. Pour commencer, il y a ce qu'un mécanisme subit pour accéder à son orbite de travail. Puis viennent les caractéristiques propres au milieu spatial.

Les mécanismes conçus pour des vols spatiaux subissent d'abord les tests de qualification. Ces derniers aggravent les conditions rencontrées en réalité afin de mettre en évidence les marges de dimensionnement (capacité de charge, nombre de cycles, tenue en température). C'est notamment le cas des vibrations, des rayonnements, du vide poussé, de la microgravité, des cycles thermiques et de la durée de vie. Ces différentes conditions sont reprises et détaillées individuellement.

Phases de pré-vol et de vol

Les vibrations interviennent essentiellement durant la phase de lancement (poussée et détachement des étages du lanceur). Les accélérations peuvent atteindre 40 à 50g, en particulier lors du lancement [182]. Les fréquences sont basses et dans le domaine acoustique, aléatoires, allant jusqu'au choc. Elles conditionnent parfois les dimensions de certains mécanismes, comme les roulements. Elles sont quelquefois à l'origine de perte de précharge, de détérioration des billes et des pistes.

L'environnement spatial

Les rayonnements rencontrés dans l'environnement spatial sont assez diversifiés. Ils représentent la quasi-totalité du spectre des fréquences (des UV aux rayons X). A ces bombardements de photons s'ajoute celui des particules. Ces dernières proviennent des plasmas, des rayons cosmiques, de la Ceinture de Van Allen, des éruptions solaires, ... Les espèces chimiques présentes sont principalement N_2 , O_2 , H_2 et He_2 . L'activité solaire génère de l'oxygène atomique O et des protons H^+ , produits radicalaires extrêmement réactifs. En fonction de leur altitude, les satellites sont plus ou moins affectés par ces rayonnements. Ils induisent généralement des réactions chimiques "parasites" qui affectent essentiellement les composés organiques (polymères, lubrifiants fluides). Cela entraîne le plus souvent une polymérisation radicalaire incontrôlée et un dégazage d'espèces chimiques [66, 214]. Les autres aspects sont les potentiels électriques et les arcs de décharges provoqués par les particules ionisées. Ces phénomènes électriques peuvent provoquer des détériorations de surface et des contaminations. Cependant, il convient de modérer les risques que de tels phénomènes peuvent causer sur les organes à fonction tribologique. En effet, la plupart des matériaux susceptibles d'être détériorés sont rarement soumis à une exposition directe puisque situés au cœur des mécanismes. Un scellement ou des écrans métalliques constituent alors des solutions efficaces.

En raison de l'exposition directe au soleil et des autres irradiations, les équipements sont soumis à des variations thermiques parfois importantes (-25 à +55°C pour des

mécanismes internes, -110 à +130°C pour des appendices extérieurs tels les panneaux solaires déployés). Bien que supportables par une structure, ces contraintes thermiques doivent être prises en considération pour la détermination des charges, des jeux et des couples de fonctionnement dans les différents roulements et paliers. De plus, la gamme de viscosité à basse et haute température de certains lubrifiants fluides rend leur utilisation impossible.

En raison de leur altitude, les satellites opèrent sous gravité réduite. L'accélération de la pesanteur évolue avec l'altitude selon une loi inversement proportionnelle à l'altitude. Cette gravité réduite est généralement équilibrée par la force d'inertie centrifuge due à la vitesse de rotation du satellite sur son orbite (quelques km.s^{-1}). L'écoulement du lubrifiant est principalement régi par les forces interfaciales (mouillabilité, capillarité). Le confinement du lubrifiant fluide est par conséquent plus difficile. En outre, dans le cas des roulements, les charges dues à la gravité et aux accélérations lors du lancement disparaissent. Seules demeurent les précharges, les effets de balourd et les interactions entre les éléments du roulement (bagues et cage).

Le dernier point est le vide poussé dans lequel vont évoluer les mécanismes. Au-delà de 500 km, la pression est de $1,33.10^{-6}$ Pa et est voisine de 10^{-9} Pa en orbite géostationnaire (≈ 36000 km). Cette absence d'espèces gazeuses ne permet pas la dissipation thermique par convection. La présence de cette atmosphère réduite ralentit le satellite et l'oblige à procéder à des corrections de trajectoire par l'intermédiaire de ses moteurs. La combustion des carburants (ergols) génère des vapeurs de composés azotés (ammoniac, ...) qui s'ajoutent aux espèces citées auparavant et constituent autant de pollution potentielle.

Enfin, à pression ambiante, toute surface est recouverte d'oxydes. Ces derniers se subliment et/ou se décomposent, selon les matériaux, lorsque la pression chute. Ce phénomène est parfois critique avec les métaux. La couche d'oxydes limite les forces d'adhésion à courte portée qui existent entre deux métaux. Son absence peut conduire à des soudures froides et un blocage du mécanisme. La lubrification, fluide ou sèche, permet d'éviter ces avaries.

Ces conditions sont autant de contraintes pour un lubrifiant fluide. Tout d'abord, peu de fluides satisfont les critères (tenue au vide, viscosité correcte sur une plage de température large, compatibilité avec les matériaux, ...). Ensuite, l'évaporation engendrée par le vide poussé constitue une perte non négligeable lorsqu'on considère la durée des missions actuelles et à venir (au moins dix ans). L'évaporation et l'action des espèces radicalaires contribuent à modifier les caractéristiques rhéologiques des huiles. La disparition des couches adsorbées et des oxydes change la mouillabilité. L'étalement et la formation d'un film fluide sont donc modifiés. La condensation des vapeurs de lubrifiant est difficilement maîtrisable et peut survenir sur des éléments sensibles comme des optiques ou des connecteurs.

Un résumé des spécificités de l'environnement spatial est proposé dans le Tableau 1-1.

Environnement	Problème potentiel	Origine
lancement	élimination du lubrifiant solide, "fretting", matage, éjection du lubrifiant fluide, "brinelling" des surfaces en contact	lancement sous fortes charges
vide poussé	perte d'huile contamination d'optiques	évaporation condensation
rayonnement	dégradation des polymères oxydation ou érosion des lubrifiants solides	rayonnements et particules ionisants oxygène atomique
température	mauvaise lubrification aux températures extrêmes	décomposition/évaporation aux hautes températures rhéologie aux températures extrêmes solidification aux basses températures
vie orbitale	contamination des zones sensibles par des particules, perte et migration des lubrifiants fluides	gravité réduite, migration

Tableau 1-1 : résumé des spécificités de l'ambiance spatiale [182]

b- La lubrification fluide

Historiquement, l'étude et le formalisme de la lubrification ont commencé à la révolution industrielle avec les besoins de fabrication, l'accroissement des vitesses de rotation. C'est à cette époque que Reynolds a développé sa théorie (1886). Cependant, bien avant, Léonard de Vinci et Coulomb s'étaient intéressés au frottement [33]. Ce dernier a mis en évidence la relation de proportionnalité entre la charge appliquée et la force de frottement dans un mouvement de glissement pur, conduisant à la définition du coefficient de frottement.

L'objectif de la lubrification est de séparer des surfaces en mouvement relatif à l'aide d'un matériau qui n'endommagera pas ces surfaces. Le cisaillement de ce matériau doit causer le moins de résistance possible. Si la lubrification fluide a été longuement étudiée, celle basée sur la graisse, ou encore la lubrification sèche ne l'ont été que bien plus récemment. Il n'existe pas de formalisme mathématique en décrivant physiquement les mécanismes. On distingue principalement trois grands types de régimes de lubrification, illustrés par la courbe de Stribeck [214]:

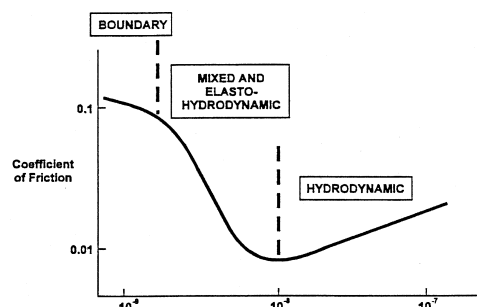
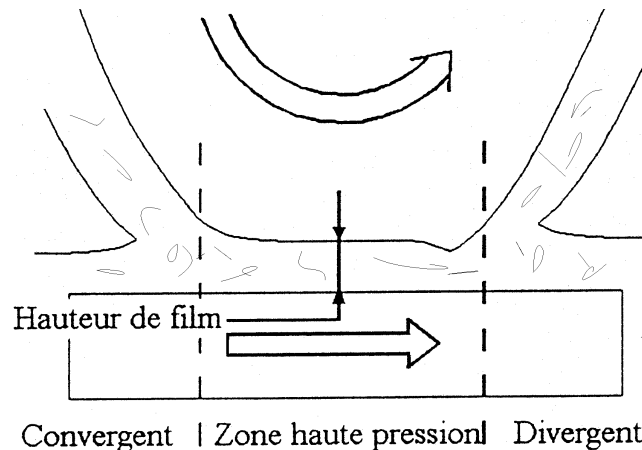


Figure 1-1. : évolution du coefficient de frottement en fonction du rapport hauteur de film/rugosité quadratique

Les frontières entre les différents domaines ne sont en réalité pas aussi clairement définies. Celles-ci sont fonction des conditions de fonctionnement (vitesse, charge, température) et des réponses du mécanisme comme du lubrifiant. C'est la conjonction de ces deux aspects qui définit le régime de lubrification. Le paramètre lambda employé pour distinguer chacun des régimes est le rapport de la hauteur de film pour des surfaces supposées idéalement lisses et la moyenne quadratique des rugosités de surface.

Pour $\lambda \gg 3$, un film complet de lubrifiant sépare les surfaces et couvre totalement les aspérités. Il s'agit alors de lubrification hydrodynamique. Trois paramètres interviennent dans ce régime de lubrification : la viscosité du lubrifiant, la vitesse des surfaces en mouvement relatif, la géométrie du convergent, i.e. l'entrée du contact. Ce régime intervient surtout dans les paliers et les butées [80].

Lorsque lambda est aux environs de 3, on entre dans le régime élastohydrodynamique. Les charges sont plus élevées et agissent sur des surfaces plus réduites. Les pressions sont plusieurs ordres de grandeur au-dessus de celles rencontrées dans les paliers. Elles engendrent des déformations élastiques significatives (Figure 1-2), ainsi qu'une augmentation de la viscosité des lubrifiants.



Convergent | Zone haute pression | Divergent
Figure 1-2. : coupe schématique d'un contact élastohydrodynamique

Dans la zone de haute pression, le film de lubrifiant forme une épaisseur sensiblement constante et le champ de pression est proche de celui obtenu dans un contact sec (théorie développée par Grubin à partir de la superposition des équations de Reynolds et de la théorie de Hertz [182]). La forme des surfaces est voisine de celle obtenue lors d'un contact sec. La faible étendue du convergent conditionne néanmoins l'épaisseur de lubrifiant dans la zone principale de charge. La pression chute rapidement vers celle ambiante en sortie de contact et l'épaisseur minimale représente environ 70 % de celle en région centrale. Les engrenages, les cames et les roulements sont les mécanismes où ce régime de lubrification se rencontre le plus. La résolution d'un problème élastohydrodynamique nécessite par conséquent la prise en compte simultanée des déformations de surfaces, de l'évolution des caractéristiques rhéologiques du lubrifiant en fonction des conditions de fonctionnement et des lois d'écoulement du fluide. La première résolution complète a été réalisée par Dowson et Higginson en 1959, pour des surfaces lisses et un fluide isovisqueux [80].

Pour lambda aux environs de 1, on a simultanément une portance hydrodynamique et des contacts directs entre les rugosités. On est en régime de lubrification mixte. Pour $\lambda \approx 1$, la portance est assurée pour plus de la moitié par le film hydrodynamique.

Lorsque $\lambda < 0,8$, on passe en lubrification limite. Un contact direct entre les aspérités des surfaces existe. Celles-ci supportent en partie ou totalement la charge. Le film lubrifiant est constitué de molécules d'huile ou d'additifs adsorbés. Ce régime de lubrification intervient aux faibles vitesses, ou aux vitesses modérées avec de fortes charges.

c- Avantages de la lubrification fluide

L'apport continu de lubrifiant dans un mécanisme spatial n'est pas toujours possible. Le film séparateur, solide ou fluide, doit assurer sa fonction durant toute la durée de la mission.

Le comportement du lubrifiant fluide se décrit à l'aide de l'équation de Reynolds. Les performances d'une huile sont par conséquent plus faciles à prévoir.

Les fluides sont généralement plus faciles et plus rapides à appliquer. Sauf cas particulier des lubrifiants fluorés, le nettoyage est réalisable dans de bonnes conditions. Le volume à employer est facilement contrôlable.

Les caractéristiques physiques des huiles (viscosité, mouillabilité, ...) permettent la lubrification de plusieurs zones fonctionnelles, indépendamment de la complexité du mécanisme. Ce type de lubrification peut être réalisé sans aide extérieure. L'énergie générée par échauffement est souvent dissipée par l'huile. Un film d'huile se reforme généralement, même après rupture et avec un volume utilisé faible (1 à 2 ml).

Les lubrifiants solides possèdent généralement une structure lamellaire. Un dépôt solide est souvent réalisé par un appareillage spécifique. Le cisaillement et la déformation plastique sont facilités par la température. Ils sont intrinsèquement générateurs de débris et provoquent des échauffements. Il n'existe pas un formalisme équivalent à l'équation de Reynolds pour en décrire le comportement. La rupture du film solide est généralement irréversible. Le couple obtenu avec une lubrification solide est souvent plus bruité.

Enfin, du point de vue économique, le fluide représente moins de 1 % du prix du roulement et est environ 50 fois moins cher qu'un revêtement classique de MoS₂.

Jones [124] donne une comparaison résumée des qualités et inconvénients de chaque type de lubrification, présentée dans le Tableau 1-2.

Lubrification sèche	Lubrification fluide
tension de vapeur saturante négligeable	tension de vapeur finie
insensibilité par rapport à la température d'utilisation	viscosité, tension de surface et tension de vapeur fonction de la température
absence de migration	nécessité de scellement ou de confinement
tests accélérés possibles	tests accélérés non validés
faible tenue à l'humidité	opération possible à l'air ou au vide
frottement bruité en raison des débris	frottement plus stable et plus faible
frottement indépendant de la vitesse	frottement dépendant de la vitesse et de la température
durée de vie déterminée par l'usure du lubrifiant	durée de vie déterminée par la dégradation et les pertes du lubrifiant
propriétés thermiques médiocres	bonne conductivité thermique
capacité de charge limitée	capacité de charge donnée par le substrat
conducteur électrique	isolant électrique

Tableau 1-2 : caractéristiques antagonistes des lubrifications sèche et fluide [124]

2- Les roulements

a- Généralités

Les efforts nécessaires pour déplacer des objets sont moins importants par roulement - glissement qu'en glissement pur, même lubrifié. La plupart des mécanismes s'appuyant sur le mouvement de roulement permettent la rotation d'un axe par rapport à une structure fixe. Cependant, le frottement demeurait important et s'accompagnait d'une usure excessive des matériaux impliqués. Les forces de frottement ou les pressions en jeu causaient la rupture d'un des éléments mécaniques au moins. Les principales innovations apportées à la réduction du frottement sont la lubrification et l'adaptation des matériaux. L'introduction d'un palier, élément intermédiaire, capable de résister à la charge et de s'insérer facilement dans le montage, a permis de réduire les frictions dans ces mouvements de rotation.

L'avènement des roulements à billes ou à rouleaux a d'abord été freiné par l'incapacité de fabriquer des éléments roulants tous identiques pouvant supporter les conditions de fonctionnement. Lorsque ces barrières techniques ont été franchies, les roulements ont pris les formes telles qu'elles existent actuellement. Là encore, les différences majeures portent sur la nature des matériaux et le système de lubrification. Ces mécanismes restent constitués d'éléments roulants séparant un arbre en rotation d'une structure support fixe. Ces éléments roulants évoluent entre deux bagues concentriques et sont séparés les uns des autres par une cage (Figure 1-3).

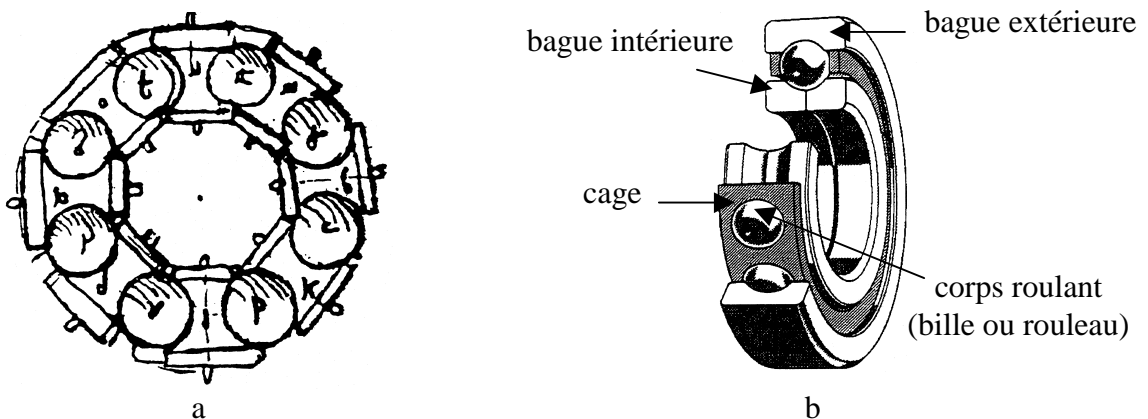


Figure 1-3. : exemples de roulements

(a) roulement-butée (Léonard de Vinci) [80], (b) roulement contemporain

b- Caractéristiques et lubrification

Caractéristiques

Les roulements présentent plusieurs avantages par rapport aux paliers :

- le couple résistant est plus faible que dans les paliers hydrodynamiques classiques, réduisant les pertes par frottement et par échauffement,
- le couple de démarrage est légèrement plus élevé que celui de fonctionnement,
- le fonctionnement sont moins sensibles aux variations de charge,
- la quantité de lubrifiant nécessaire au fonctionnement est faible,
- l'encombrement est réduit,
- les performances sont moins sensibles aux variations de vitesse et de température,
- ils peuvent supporter des charges axiales et/ou radiales plus importantes,
- la fonction de guidage est mieux assurée (jeux, calage, ...)

- la gamme de vitesses et de charges accessible est large.

Il existe globalement trois types de chargement des roulements, schématisés sur la Figure 1-4, donnant la répartition des efforts à l'intérieur du roulement :

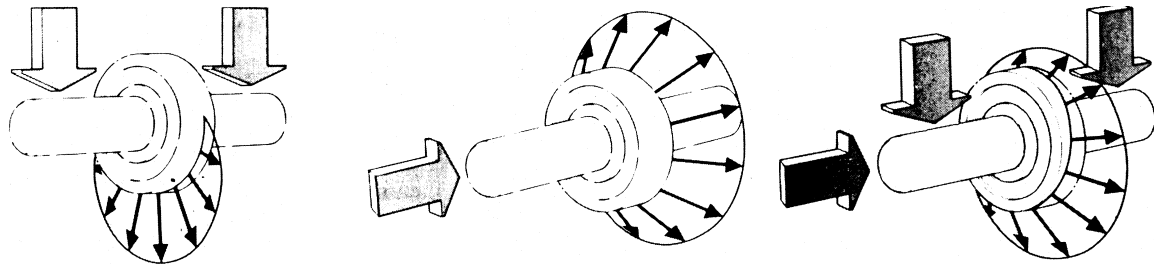


Figure 1-4. : les trois différents types de mises en charge des roulements [102]

En plus de ces mécanismes, les butées permettent, selon la géométrie, de travailler sous des charges très élevées mais à des vitesses plus faibles.

Etant donné que les surfaces en contact sont plus faibles qu'en glissement et en raison de la cinématique, le frottement est par conséquent plus faible dans les roulements. L'origine de ce frottement se situe dans :

- l'hystérésis élastique du roulement,
- le glissement des corps roulants sur les pistes en raison de la géométrie des surfaces en contact,
- la déformation des éléments en contact,
- le glissement entre la cage et les éléments roulants, entre la cage et l'une des bagues selon le mode de guidage de celle-ci,
- le frottement visqueux du lubrifiant sur la cage et les éléments roulants,
- le frottement des joints d'étanchéité.

La lubrification

La fonction principale du lubrifiant est de séparer les surfaces en contact de roulement et de glissement, améliorant les performances et réduisant l'usure. Ce lubrifiant peut aussi jouer un rôle de caloporteur (réfrigérant ou homogénéisateur thermique), de protection contre la corrosion. Il peut aussi évacuer les débris et empêcher la pollution solide de pénétrer dans le mécanisme.

Les roulements courants utilisent la lubrification fluide. La lubrification solide n'apparaît que dans des cas extrêmes.

Les lubrifiants employés sont généralement des produits fluides issus du pétrole (communément appelées huiles minérales) [102]. Cela représente une palette étendue en termes de performances rhéologiques, chimiques et sans tenir compte des additifs. Viennent ensuite les hydrocarbures synthétiques. Ils sont élaborés afin d'avoir une propriété spécifique et répondre à un besoin particulier. Ces huiles peuvent servir de base à différentes graisses, obtenues par ajout d'un épaississant. Le solide mou ainsi obtenu libère théoriquement l'huile à un taux contrôlé pour satisfaire les besoins du roulement. D'une manière globale, on estime que 80 % des roulements sont lubrifiés à la graisse. Le lubrifiant peut être apporté par différentes techniques (bain, jet, système d'alimentation, ...). Une technique assez marginale dans l'utilisation courante des roulements s'appuie sur une cage solide poreuse. Cette dernière emmagasine une quantité donnée de lubrifiant. Il est ensuite libéré par ressuage, oxydation,

évaporation, Deux procédés sont utilisés. Le premier repose sur la formation d'un gel emplissant les "vides" du roulement mais reste très peu employé [116]. La seconde solution consiste à usiner une pièce poreuse et à l'assembler imprégnée dans le roulement. La technique de la cage poreuse est abondamment employée dans l'industrie spatiale et fera l'objet d'une grande partie de notre étude dont les objectifs sont présentés au paragraphe II de ce chapitre.

c- Cas particulier des applications spatiales

Il ne s'agit pas ici d'une analyse exhaustive mais d'indiquer la spécificité des roulements dans un contexte spatial. La charge est généralement faible à modérée, sauf dans les phases de lancement. Ensuite, seule demeure la précharge appliquée au montage du roulement. Les billes ont un faible diamètre (< 5 mm) et sont nombreuses (> 20). Cela permet d'accroître la capacité de charge supportable par le roulement. Les bagues sont extrêmement fines afin de limiter la masse. Les déformations potentielles sont compensées par un ajustement très précis du logement du roulement. Le degré de précision requis pour les organes roulants (billes ou rouleaux) est extrêmement élevé (normes AFMA [102]).

Les mouvements sont généralement lents et/ou oscillants. Cela conduit à des films lubrifiants fluides de faible à très faible épaisseur. Il existe aussi quelques applications grande vitesse (gyroscopes, roues à inertie, ...). Cette diversité rend le choix de la lubrification délicat : lubrification sèche pour les rotations lentes et des pressions de contact modestes, fluide pour les autres cas [214].

Les matériaux doivent présenter une bonne résistance à l'usure et à la corrosion. Il s'agit généralement de l'acier Z100CD17. Ce dernier reçoit souvent un revêtement céramique, comme le TiC [182]. Les lubrifiants limitent aussi la formation de soudures froides. Le choix de la nature de la cage n'est pas figé et son comportement est mal connu. C'est le plus souvent un polymère ou un composite (sacrificiel pour la lubrification sèche, poreux imprégné pour la lubrification fluide). La définition des logements de billes et du mode de guidage (par bague ou par bille), reste ouverte.

II- Objectifs et démarche de l'étude

1- Positionnement du problème. Objectifs

La mise en œuvre de la lubrification fluide d'un mécanisme spatial concerne plusieurs actions très différentes. Dans le cas particulier d'un roulement à billes, cela commence par la préparation et le nettoyage des différents éléments (bagues, billes et cage). Le deuxième point est le choix et l'application du lubrifiant fluide, en s'assurant qu'il satisfait aux exigences des conditions de fonctionnement. Le maintien de cette huile et les techniques pour assurer un apport continu constituent les derniers aspects. L'objectif commun de toutes ces étapes est d'assurer le fonctionnement du mécanisme pour la durée de la mission. Une solution doit donc être apportée aux interrogations suivantes :

- comment maintenir le lubrifiant dans les zones tribologiques, empêcher sa migration pour éviter des avaries causées par un contact direct, s'assurer de l'efficacité et de l'innocuité des solutions proposées, conservant un frottement minimal et un couple stable ?

- de quels moyens dispose-t-on pour apporter une quantité de lubrifiant suffisante en cas de besoin et quelle est leur efficacité ?
- quels sont les autres éléments qui peuvent perturber la lubrification fluide et comment procéder à leur éradication ?
- comment se comporte l'huile lorsqu'elle est soumise à des conditions sévères de fonctionnement ?
- quels sont les impacts sur le mécanisme (configuration, durée de vie, simplicité ou redondance, efficacité, coût ...) ?

Deux échelles d'observation et de vérification apparaissent pour chacune des questions ci-dessus.

La première échelle se rapporte à des considérations macroscopiques. Il s'agit de la mouillabilité, de la solubilisation de polluants, buts principaux de la préparation d'une surface en vue d'une lubrification fluide efficace.

La seconde intervient à un niveau moléculaire. Cela concerne plusieurs points. Le premier est le comportement et l'organisation du lubrifiant en lubrification mixte. Un mécanisme évolue souvent dans ce régime de lubrification et la durée de vie du mécanisme est subordonnée à ce comportement. Le second est l'application de revêtements pour confiner le fluide dans les zones fonctionnelles, solution la plus simple pour y parvenir. Néanmoins, des interactions entre ce revêtement et le lubrifiant ont été signalées. Enfin, la libération de lubrifiant contenu dans une matrice poreuse a été proposée dès les années soixante pour réalimenter un mécanisme. Cependant, l'efficacité desdites structures est controversée. Elles sont assimilées à des puits ou des sources de lubrifiant. La mesure d'un couple de frottement permet de valider le choix d'une combinaison des points précédents en apportant la réponse la plus globale.

Chacune des thématiques abordées peut *a priori* être considérée indépendamment des autres. Notre objectif n'est évidemment pas de réaliser une étude exhaustive pour chacune de ces questions. L'objectif de l'étude présentée ici est de clarifier l'importance des phénomènes physiques et mécaniques qui interviennent aux échelles d'observations mentionnées plus haut. Certains, comme le comportement du fluide aux très faibles épaisseurs et le rôle de structures poreuses, seront quantifiés. La finalité commune à chacune de ces études est la mise en œuvre de la lubrification fluide. Pour chaque étape, nous nous efforcerons de synthétiser les recherches déjà menées et les solutions apportées dans celles-ci, puis nous exposerons comment nous avons décidé d'orienter notre étude pour compléter les travaux antérieurs.

2- Démarche expérimentale

a- Préparation des surfaces

Dans les organes mécaniques lubrifiés fluides, le lubrifiant se doit d'être présent dans les zones fonctionnelles (pistes des roulements, dents d'engrenages, ...). Cela implique en particulier que le fluide mouille totalement les surfaces. Ces dernières doivent par conséquent être exemptes de toute pollution, facteur contribuant à modifier la tension de surface et à perturber l'étalement. Ces aspects requièrent une préparation adéquate des surfaces pour l'élimination de la pollution afin d'obtenir des conditions optimales et reproductibles de mouillabilité. Par ailleurs, les produits employés doivent respecter la législation en vigueur.

Une surface propre n'est définie qu'en fonction des besoins d'un utilisateur donné. Chaque finalité implique un certain degré de tolérance [160, 29]. Des études cristallographiques, de catalyse ou d'adsorption de surface n'admettent que quelques monocouches de particules étrangères. La jonction ou l'adhésion de surfaces accepte, dans un

cadre général, une pollution grossière. Le dépôt d'un revêtement sur un substrat nécessite quelquefois la présence d'une couche intermédiaire de nature donnée.

Quoi qu'il en soit, la préparation des surfaces nécessite comme préliminaire la connaissance de l'historique des pièces à nettoyer, et donc de la nature des différents polluants potentiels, axiomatique incontournable. L'objectif est de définir une procédure de nettoyage aussi polyvalente et reproductible que possible, mais en aucun cas exhaustive (il n'est pas question de contamination biologique et bactériologique ici).

L'éradication des solvants chloro-fluoro-carbonés (CFC) a rendu obsolète la quasi-totalité des procédures de nettoyage en vigueur, dont celles dans le domaine spatial [50]. L'objectif de cette partie de l'étude est d'obtenir après nettoyage un état de référence reproductible afin de toujours mettre en œuvre la lubrification fluide dans les mêmes conditions. De nombreuses techniques et d'autres solvants ont été pressentis et une alternative devait au moins être esquissée, à défaut d'être évaluée. Cette étape demeure indispensable compte tenu des contraintes de propreté inhérentes au contexte spatial dans lequel se place l'étude. De plus, avant de l'évaluer sur des mécanismes complets, il convenait d'obtenir des résultats préliminaires probants.

Ce second chapitre débutera par la présentation des exigences et des objectifs du nettoyage. Nous poursuivrons par la définition des contaminants, particulièrement ceux préjudiciables à la lubrification fluide. Nous évoquerons ensuite les remplaçants du CFC 113 puis les moyens retenus pour vérifier l'efficacité et la réussite du nettoyage. Enfin, une évaluation de trois produits sera proposée et s'appuiera sur les points précédents. Elle aboutira sur le choix d'un remplaçant du CFC 113.

b- Comportement rhéologique et tribologique de lubrifiants

Le lubrifiant doit être stable chimiquement vis-à-vis de son environnement de travail mais également des conditions dans lesquelles il opère. Il doit être en mesure de générer un film pour séparer les surfaces en contact. Peu de lubrifiants fluides satisfont les critères autorisant leur utilisation en milieu spatial (tenue au vide, viscosité à différentes températures, ...). Ils ont fait l'objet d'études importantes en termes de rhéologie et de tribologie : l'approche adoptée visait à déterminer les caractéristiques dans des conditions conventionnelles de taux de cisaillement ou d'épaisseurs [123, 228]. Cependant, il existe peu d'informations sur le comportement de ces produits pour des cas plus extrêmes et néanmoins réalistes de conditions de contact. Il s'agit notamment des grands taux de cisaillement et de l'aptitude à générer des films élastohydrodynamiques aux faibles vitesses. A grand taux de cisaillement, les interactions et arrangements moléculaires peuvent en effet conduire à un comportement non newtonien [189].

Nous évoquerons d'abord les derniers travaux concernant la stabilité physico-chimique des deux huiles les plus employées en milieu spatial. Nous chercherons ensuite à caractériser le comportement de ces lubrifiants spatiaux. Certains auteurs attribuent un caractère non newtonien [37, 111, 219], alors que d'autres le considèrent comme newtonien, notamment pour les perfluoropolyalkyléthers [98, 204, 170].

c- Migration et confinement du lubrifiant

Le fluide doit autant que possible rester confiné dans les zones utiles alors qu'il tend naturellement à s'étaler. Des lubrifiants fluides comme les perfluoropolyalkyléthers et le cyclopentane ramifié [214, 144] mouillent bien les matériaux sur lesquels ils sont appliqués lorsque leur nettoyage est réussi. Si cette aptitude s'avère bénéfique puisque toutes les zones

sensibles d'un mécanisme sont effectivement recouvertes (pistes des roulements, billes, dents d'engrenages, ...), elle peut se révéler parfois désastreuse et cela à deux points de vue.

D'une part, cette migration "intempestive" cause un appauvrissement dans les zones soumises au frottement. Lorsque nous nous plaçons en régime élastohydrodynamique, l'épaisseur du film fluide est extrêmement faible (au plus quelques dixièmes de μm). Une perte d'huile dans ces régions critiques, accentuée par une dégradation potentielle de celle-ci dans des conditions de fonctionnement sévères, peut provoquer une avarie irréversible.

D'autre part, le lubrifiant peut se placer à des endroits indésirables, comme des systèmes optiques et perturber leurs mesures, ou dans des "poches" (angles trous, ...) des différents jeux entre les pièces assemblées (Figure 1-5). C'est par ailleurs une des raisons avancées lorsque la solution "lubrifiant fluide" est écartée [5, 64, 65, 67, 70, 235].

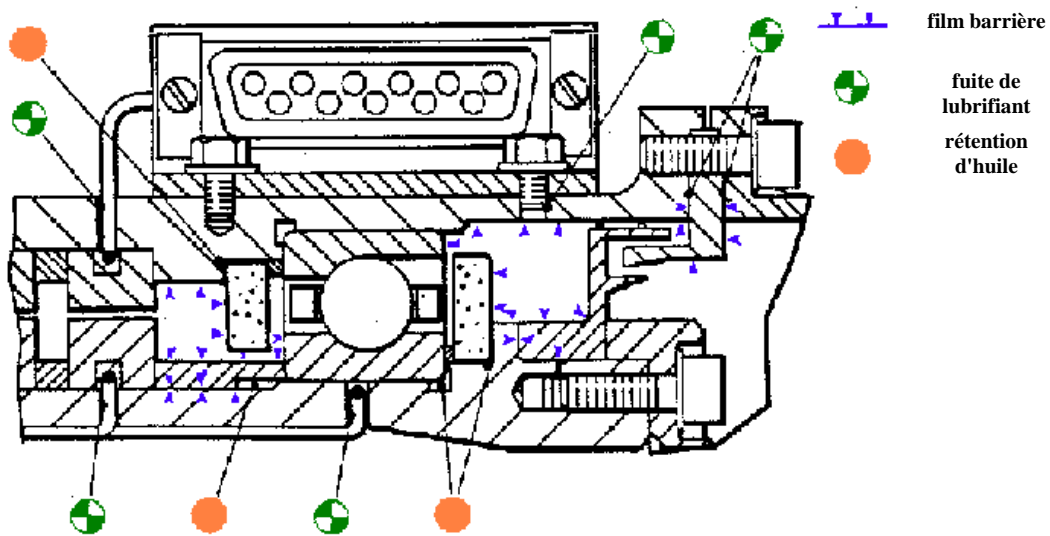


Figure 1-5. : exemple de mécanisme protégé avec des revêtements anti-migration et des joints labyrinthes [223]

Peu de travaux ont porté sur les films anti - migration [13, 21, 30, 45, 68, 69, 70, 71, 136, 137, 223] ou sur les moyens physiques de maintenir le lubrifiant dans des zones déterminées [79]. Le Space Tribology Handbook (1997) [214] ne cite que les évolutions commerciales. Il n'y a pas de réel souci dans cet ouvrage d'optimiser, de développer ou de fixer de façon même semi - définitive (dans le sens où il est indispensable de tenir compte de l'évolution des lubrifiants) un produit donné. Peu d'indications sont données sur la façon dont on peut orienter le choix d'un revêtement. Même après avoir trouvé le produit adéquat, deux problèmes se posent :

- le lubrifiant et le revêtement anti-migration sont-ils inertes l'un par rapport à l'autre ? Dans le cas contraire, la fonctionnalité du film barrière est-elle conservée ? Des travaux ont déjà été conduits dans ce sens et ont apporté des réponses négatives [21, 109, 182].
- le mode d'application de ces revêtements est-il optimal ? Le risque de souiller des zones sensibles est-il négligeable ?

Notre objectif est double. Nous voulons mettre en évidence une éventuelle interaction et en déterminer la cause. En parallèle, nous souhaitons apporter une solution autre que les revêtements classiques, tout aussi efficace et plus pratique, notamment pour la détection et l'application correcte du revêtement.

d- Rôle d'une structure poreuse dans l'alimentation d'un mécanisme

L'environnement spatial (apesanteur, ultravide) est propice aux fuites de lubrifiant dans les mécanismes. De nombreuses missions n'ont pu être remplies en raison d'une mauvaise lubrification, en dépit d'un nettoyage correct et de techniques de confinement adaptées. Shapiro *et al.* en donnent un imposant recueil [201, 202]. Des réservoirs poreux imprégnés de lubrifiant ont alors été intensivement employés pour résoudre ce problème. Ils sont supposés permettre des missions de 5 ans au moins dans la mesure où une maintenance n'est pas envisageable. Le principe s'appuie sur les facultés d'absorption et de rétention d'une structure poreuse. La manière dont le lubrifiant est extrait n'est pas clairement comprise. L'autre aspect, auquel nous sommes plus attachés, est la rétention et la circulation de lubrifiant dans le milieu poreux. Cette technique a été étudiée en lubrification par Morgan et Cameron [164] dès la fin des années cinquante. Les travaux ont surtout été développés autour de l'analyse des paliers poreux et font l'objet d'une abondante littérature résumée par Meurisse *et al.* [158, 159]. Les matériaux poreux ont été introduits comme réservoirs ou cages dans les roulements à partir du milieu des années soixante [192]. Ils ont été l'objet d'études jusqu'à la fin des années soixante-dix afin de comprendre comment "disposer" de ce lubrifiant. Cet intérêt s'est tari pendant presque deux décennies, certainement pour des raisons de rentabilité. L'équipe de Bertrand [23-26] a repris leur étude depuis le début des années quatre-vingt-dix, notamment en terme de comportement. La structure n'est plus seulement considérée dans un roulement assemblé mais étudiée individuellement [23, 25 26]. Des réservoirs permettent de maintenir une tension de vapeur saturante en huile suffisante dans l'environnement immédiat du mécanisme. L'huile peut être aussi acheminée vers les pistes des roulements par des phénomènes physiques (mouillage, capillarité, effets de la température, ...). Une cage poreuse agit directement au niveau des éléments roulants. Aux phénomènes cités précédemment viennent s'ajouter la centrifugation et une circulation potentielle au sein même de la matrice poreuse sous l'action de gradients de pression hydrodynamique.

Dans le dernier chapitre, nous recenserons d'abord les différents phénomènes physiques impliqués dans la libération et la circulation de fluide au sein d'une structure poreuse. Les différents matériaux poreux employés comme cages et réservoirs dans les mécanismes spatiaux seront présentés. Cinq d'entre eux seront sélectionnés et leurs caractérisations réalisées. Nous analyserons les paramètres de l'imprégnation des structures poreuses et définiront nos choix dans une seconde partie. Ensuite, par l'examen individuel des phénomènes physiques identifiés et à partir d'expériences élémentaires, nous tenterons d'évaluer et autant que possible de quantifier le rôle de chacun. Les couplages entre les différents paramètres ne seront en revanche pas évalués. Cette approche permettra d'accéder à une meilleure compréhension du fonctionnement d'un roulement équipé d'une structure poreuse. Elle nous est apparue comme la meilleure source d'informations, bien que très en amont des interrogations d'utilisateurs de ces mécanismes.

e- Perspectives d'applications aux roulements à billes

Ce paragraphe évoque les perspectives de nos travaux. Considérons un roulement équipé d'une cage poreuse. Pour une combinaison de conditions de fonctionnement donnée (charge, température, vitesse, nature du lubrifiant et de la cage, technique de confinement, durée, ...), le suivi du couple de frottement, son analyse fréquentielle et des expertises permettront de valider ou d'infirmer les choix effectués. Cependant, il s'agira d'une réponse globale et il sera très difficile de déterminer dans quelle mesure chaque phénomène intervient favorablement ou pas, indépendamment ou pas d'autres phénomènes.

A l'issue des études citées dans les paragraphes précédents, un certain nombre de tendances et d'orientations possibles se dégagent. Il sera possible de tester les combinaisons les plus pertinentes sur des paires de roulements, par exemple en s'appuyant sur le travail de Lauer [146]. L'objectif sera de parvenir à confirmer la technique de nettoyage proposée, le rôle et l'efficacité des films barrière d'une part, des structures poreuses d'autre part, pour les deux lubrifiants fluides les plus utilisés dans le domaine spatial.

I- Introduction. La lubrification fluide dans les mécanismes spatiaux	26
1- Généralités. Caractéristiques de l'ambiance spatiale	26
a- L'environnement spatial.....	26
Phases de pré-vol et de vol	26
L'environnement spatial.....	26
b- La lubrification fluide.....	28
c- Avantages de la lubrification fluide.....	30
2- Les roulements	31
a- Généralités.....	31
b- Caractéristiques et lubrification.....	31
Caractéristiques	31
La lubrification	32
c- Cas particulier des applications spatiales	33
II- Objectifs et démarche de l'étude.....	33
1- Positionnement du problème. Objectifs.....	33
2- Démarche expérimentale.....	34
a- Préparation des surfaces	34
b- Comportement rhéologique et tribologique de lubrifiants.....	35
c- Migration et confinement du lubrifiant.....	35
d- Rôle d'une structure poreuse dans l'alimentation d'un mécanisme	37
e- Perspectives d'applications aux roulements à billes	37