

Résumé des travaux de recherche

Les frottements sont omniprésents dans tout ce qui nous entoure. Que l'on cherche à les réduire ou au contraire à les maintenir, il est indispensable de connaître les mécanismes qui les provoquent. Ainsi est née la Tribologie, science du frottement, qui regroupe trois domaines majeurs d'étude : la lubrification, le frottement et l'usure. Chacun de ces domaines peuvent interagir les uns avec les autres : un mécanisme lubrifié peut par exemple s'user en raison du frottement induit par un contact direct entre certaines parties. C'est ce qui a motivé mon attrait pour la Tribologie, qui est un domaine de recherche qui fait appel à un grand nombre de connaissances, afin de comprendre des phénomènes parfois extrêmement complexes. Mais la Tribologie étant un vaste domaine, les recherches que j'ai entreprises voilà bientôt quinze ans se sont concentrées sur la lubrification.

La lubrification a pour principal but de diminuer le frottement entre deux pièces en mouvement relatif. Elle intervient dans de très nombreuses applications, aussi bien dans les mécanismes que les êtres vivants ; citons par exemple les articulations du corps humain, les guidages d'arbres dans de nombreux domaines allant de l'énergie à l'agro-alimentaire en passant par l'aéronautique ou encore les composants informatiques. Les études que j'ai menées se sont principalement concentrées sur les mécanismes de guidage que sont les paliers et butées hydrodynamiques pour lesquels, bien que leur comportement soit aujourd'hui très bien prédit par les méthodes numériques, les expérimentations sur de nouveaux sujets tels que la lubrification mixte, la texturation ou encore les matériaux et lubrifiants complexes, sont indispensables à la validation des nouvelles théories développées. Ce sont principalement ces sujets qui m'ont attiré et ont nourri ma curiosité scientifique depuis de nombreuses années.

Je présenterai mon travail suivant trois paragraphes qui décriront respectivement les bancs d'essais, mes travaux sur les paliers puis ceux sur les butées avant de développer les points forts de mes recherches ainsi que les nouvelles orientations que je souhaite explorer.

1.1 Dispositifs d'essais

Les bancs d'essais ont pour objet l'étude en conditions établies des caractéristiques des paliers et butées hydrodynamiques. Ils ont beaucoup évolué depuis mon arrivée au laboratoire, notamment du point de vue opérationnel.

Lors de mon arrivée au laboratoire, les deux bancs fonctionnaient principalement avec des prises de mesures manuelles, tant au niveau des pressions que des températures. Les prises de pression s'effectuaient sur des manomètres de précision par l'intermédiaire de vannes multi-voies permettant de regrouper les prises de pression en fonction du calibre du manomètre. Les mesures

de températures étaient quant à elles réalisées par des thermocouples reliés à des afficheurs eux-mêmes connectés à des boîtiers de sélection qui permettaient de choisir la température à afficher. Dans ces conditions, la prise de mesures sur tous les paramètres (pression, température, couple de frottement, vitesse de rotation) ne pouvait se faire qu'en régime établi, celle-ci durant plus de cinq minutes pour un relevé complet qui se faisait alors sur papier.

Il faut noter que des mesures automatisées avaient déjà été réalisées auparavant sur la machine d'essais de paliers par Bodgan Kucinski, Pascal Monmousseau et Michel Fillon qui avaient fait des relevés en régime transitoire avec un système rudimentaire peu performant. Malgré les faibles performances du système d'acquisition (néanmoins tout à fait honorables au moment où ces mesures ont été effectuées), des résultats très originaux pour l'époque ont pu être obtenus sur l'évolution transitoire de la température et du couple de frottement lors du démarrage du palier. Cependant, les mesures que nous souhaitions effectuer ne pouvaient se faire avec un tel système.

C'est pourquoi une des premières tâches qui m'a été confiée fut la numérisation des prises de mesures avec un nouveau système d'acquisition : ce travail a été réalisé durant mon Doctorat avec la configuration d'un système d'acquisition de chez National Instruments fonctionnant grâce au logiciel *Labview*. Ce nouveau système a permis un grand nombre d'améliorations dont la plus notable est le temps de relevé des mesures. En effet, une fois toutes mesures connectées au système d'acquisition, il suffit d'un clic pour les enregistrer. Ceci a cependant nécessité l'achat de capteurs de pression et d'un couplemètre. Le système permet également de piloter les bancs d'essais et comporte plus d'une centaine de voies d'acquisition. Il est donc dorénavant possible de réaliser un grand nombre de mesures instantanées, en choisissant soit un grand nombre de voies à acquérir soit une fréquence d'acquisition pouvant aller jusqu'à 1 kHz pour une seule voie.

Le banc d'essais de butées a également été équipé d'un système d'acquisition. Je travaille actuellement à sa mise en place qui nécessite une migration des voies entre l'ancien et le nouveau système. Cette migration est actuellement effectuée par un stagiaire de L3 GSI. Le programme *LabView* doit également être revu afin de fonctionner avec le nouveau système.

Les nombreuses études expérimentales que j'ai eu la chance d'effectuer sur ce deux banc m'a donc permis d'acquérir une expérience que je crois être excellente dans les expérimentations, au sens large du terme. En effet, grâce aux nombreux problèmes auxquels j'ai été confronté dans ma carrière, j'ai pu développer des capacités d'anticipation et une certaine maîtrise de la conception de bancs. De plus, les travaux réalisés depuis dix avec les systèmes d'acquisition *LabView* m'ont donné une bonne expérience des systèmes de contrôle/commande des machines, que je mets à profit en m'occupant depuis 2007 de la licence 3 Génie des Systèmes Industriels, qui forme des étudiants aux métiers de l'automatisation, de la robotique et de la mécatronique en général.

Pour conclure, l'expertise que j'ai pu acquérir en termes d'expérimentations sur les composants de guidage que sont les paliers et butées hydrodynamiques m'ont permis de réaliser de nombreuses études qui ont pour la plupart été publiées dans des journaux à comité de lecture. Cette expérience est très enrichissante du point de vue technique et permet d'envisager la recherche expérimentale avec sérénité, toujours en gardant une curiosité sur l'explication de phénomènes qui sont de plus en plus complexes à prendre en compte du point de vue numérique, qui nécessitent donc des expérimentations toujours plus pointues et précises. Afin de réaliser de telles expériences, les améliorations ainsi que les nouveaux bancs d'essais que nous concevons actuellement revêtent une importance capitale. Je mettrai donc à profit mon expérience au service de ces nouveaux moyens de validation ainsi qu'à ceux de mes collègues avec qui je travaille sur d'autres bancs comme celui servant à l'étude des garnitures mécaniques par exemple.

1.2 Paliers hydrodynamiques

C'est par ce composant que j'ai commencé mes recherches. Les premières études que j'ai menées durant ma thèse de doctorat concernaient à la fois la modélisation TEHD de paliers mésalignés mais aussi la validation expérimentale du code de calcul numérique. Le comportement de paliers était alors déjà bien connu, aussi bien du point de vue expérimental que théorique, mais ce sont ces premières études qui ont finalement orienté mes recherches sur les conditions de fonctionnement dégradées.

Ces études ont donc commencé par le mésalignement, que j'ai pu explorer très finement du point de vue expérimental en réalisant un grand nombre d'essais sur un palier lisse. J'ai pu notamment montrer que le mésalignement modifiait significativement les performances des paliers et des paramètres critiques comme la pression maximale, la température maximale ou l'épaisseur minimale du film. Les résultats de ces essais ont été utilisés et publiés dans plusieurs revues internationales à comité de lecture.

Par suite, j'ai continué à développer le code de calcul en y intégrant un module de prise en compte de l'usure. Cette étude numérique a permis de montrer qu'un palier usé pouvait fonctionner de façon tout à fait satisfaisante dans certaines conditions. Les résultats ont été publiés dans deux articles de revues internationales à comité de lecture. C'est à la suite de cette étude que nous avons réalisé une étude expérimentale pour EDF R&D sur l'usure d'un palier à lobe, engendrée aussi bien par de nombreux arrêts/démarrages que par des périodes de fonctionnement prolongées en régime mixte (forte charge et très faible vitesse). Cette étude expérimentale, réalisée sur 18 mois a permis d'élaborer des lois d'usure pour les deux types de conditions de fonctionnement ainsi que donner des préconisations sur le fonctionnement de paliers dégradés. Nous avons pu montrer lors de cette étude que la rugosité de l'arbre avait également un importance capitale, influant significativement sur le taux d'usure du coussinet.

C'est pourquoi j'ai décidé de poursuivre mes investigations en analysant expérimentalement l'influence du type ainsi que de qualité de la rugosité sur les performance d'un palier lors des phases transitoires d'arrêts/démarrages. Mon intérêt s'est donc porté sur les phénomènes mis en jeu lors de la phase de démarrage et plus particulièrement au coefficient de frottement au démarrage qui est un paramètre très important pour les utilisateurs de paliers, et néanmoins souvent déterminé de façon empirique. Les économies d'énergie étant une préoccupation grandissante, la réduction du frottement est devenue aujourd'hui un thème extrêmement porteur. J'ai donc réalisé plusieurs études expérimentales sur ce sujet que j'ai présentées lors de trois conférences internationales entre 2007 et 2009 et dont la synthèse a été publiée en 2011 dans le premier article de la sélection de publications qui est en fin de ce document.

Parmi les résultats les plus marquants, il a pu être montré que le coefficient de frottement au démarrage ne dépend pas de la pression spécifique appliquée au palier. En effet, quelle que soit la charge, le coefficient conserve une valeur de $0,15 \pm 0,01$, qui correspond en fait à un compromis entre les valeurs du coefficient de frottement bronze/acier pour des contacts à sec et lubrifié, respectivement 0,15-0,18 et 0,1-0,13.

J'ai ensuite réalisé une étude complémentaire afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu lors des premières secondes du démarrage, en particulier les transitions entre le contact direct, la lubrification mixte puis hydrodynamique. Dans cette optique, j'ai réalisé des mesures optiques en collaboration avec Valéry Valle de l'équipe Photomécanique et expérimentations en mécanique de notre département afin de relier le déplacement de l'arbre par rapport au coussinet avec la mesure du couple de frottement. Pour ce faire, nous avons utilisé une caméra rapide prenant des images 1024x1024 octets à une fréquence de 1000 Hz.

Cette étude a permis de montrer que le phénomène de broutage ("Stick-Slip" en anglais) se produisait uniquement au cours de la première révolution de l'arbre : le régime hydrodynamique est atteint au cours de la première révolution de l'arbre après une courte période de broutage, quelle que soit la charge à l'étude. Le broutage ne dure que sur une très courte période (moins de 0,5 secondes dans nos expériences), qui consiste en une alternance de phases contact direct et de roulement entre l'arbre et le coussinet.

Une étude suivante a permis de confirmer l'importance des matériaux sur le coefficient de frottement au démarrage en utilisant les mêmes paliers bronze plus un palier régulé. En particulier, pour les paliers bronze, le coefficient de frottement n'augmente que très légèrement avec la charge, restant compris entre 0,16 et 0,20 quelle que soit la rugosité considérée, confirmant ainsi les conclusions de la première étude. Pour le palier régulé, en revanche, le coefficient de frottement est nettement supérieur à celui obtenu pour le palier bronze aux pressions spécifiques faibles. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que le régule est un matériau beaucoup plus souple que le bronze et tend donc à "attacher" davantage aux rugosités plus élevées lorsque la charge n'est pas assez forte pour écraser les pics de rugosité. A la pression spécifique plus élevée, la différence entre les paliers régulés et bronze tombe à 20%.

Mais les matériaux ne sont pas les seuls à influencer les conditions de contact dans les paliers. C'est ainsi qu'en 2008, nous avons réalisé une étude pour un fabricant de lubrifiants Japonais, Idemitsu Kosan, dont j'ai co-encadré avec Michel Fillon un ingénieur inscrit en thèse à l'Université de Poitiers. Dans cette thèse, dont la soutenance a eu lieu le 12 avril 2010, M. Kasai a réalisé une importante étude expérimentale sur l'influence de la composition des lubrifiants sur les performances d'un palier hydrodynamique. Ces essais, réalisés sous ma responsabilité, ont porté sur plusieurs matériaux de paliers et de nombreuses formulations de lubrifiants qui ont été testés afin de mettre en évidence leur contribution à la diminution du frottement. Une étude des caractéristiques rhéologiques de ces lubrifiants a également été réalisée en collaboration avec nos collègues de l'opération "rhéologie des fluides" du Laboratoire d'Etudes Aérodynamique et m'a permis d'élargir le champ de mes connaissances dans ce domaine de la mécanique des fluides.

Il a pu être montré que les coefficients de frottement obtenus expérimentalement avec des huiles contenant des polymères sont significativement réduits par rapport à ceux obtenus avec l'huile de base pour le palier bronze, contrairement au palier régulé. Les essais ont donc permis de confirmer que l'effet des huiles contenant des polymères dépendait des matériaux utilisés pour le palier. Cependant, les légères différences de jeu radial constatées entre les paliers permettent de penser que la géométrie a aussi une grande importance sur le comportement des paliers, ce qui peut être une autre voie pour le développement d'huiles contenant des polymères permettant de réduire les consommations. Ceci suggère également que les déformations des paliers dans les moteurs automobiles actuels peuvent affecter l'efficacité des lubrifiants. Les déplacements mesurés dans les expérimentations ont également été comparés avec des simulations numériques réalisées avec un code de calcul THD. Les résultats ont montré que l'épaisseur du film était plus faible avec le palier bronze et plus forte avec le palier régulé par rapport à celle qui était attendue pour un fluide newtonien. On peut alors penser que la baisse de viscosité ainsi que la contrainte normale pour les huiles contenant des polymères affecte les propriétés de friction ainsi que la fiabilité de la lubrification hydrodynamique. L'analyse des résultats a été présentée dans plusieurs rapports ainsi que lors de deux conférences internationales et un article a été publié dans une revue internationale à comité de lecture présentée dans la sélection de publications à la fin du document.

La dernière étude menée sur le banc d'essai de palier a concerné un palier bronze à rainure d'alimentation circonférentielle. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une thèse en co-tutelle

avec nos collègues de l'Université Polytechnique de Bucarest. Les expérimentations réalisées par A. Cristea en régime établi ont permis la détermination précise des champs de pression et de température à la fois pour la partie active du palier et pour la section à mi-rainure, ainsi que plusieurs paramètres de performance. La mesure en régime établi des champs de pression et de température est allée au-delà de tous les travaux existants, quel que soit le type de palier considéré : nombreux points de mesure sur la partie active du palier à l'aide de capteurs de haute précision, large gamme de conditions de fonctionnement ou d'alimentation et plusieurs profondeurs de rainure d'alimentation.

Les essais expérimentaux ont prouvé que les pressions dans la zone de cavitation n'étaient pas nulles et de plus qu'elles étaient bien en dessous de la pression atmosphérique, proches du zéro absolu. En outre, de forts gradients axiaux ont été détectés aux abords de la rainure, ce qui indique une forte interaction entre les écoulements dans la zone active du palier et dans la rainure. Les gradients axiaux existaient également près de l'autre extrémité de la partie active du palier en contact avec l'air ambiant, où l'on a pu observer que du lubrifiant est expulsé en dehors de la zone convergente et que de l'air était ingéré par le palier dans la zone divergente. Traditionnellement, comme il est probable qu'un ménisque attaché à la surface du palier se forme, on considère l'ambiance proche de la sortie de la partie active comme uniquement composée d'air, et il en résulte que dans la zone divergente l'ingestion peut être à la fois d'air et de lubrifiant.

Le processus de mélange qui se produit près de la rainure a été mis en évidence par le tracé de la variation circonférentielle du gradient de pression axiale. Ceci a permis d'étendre les conclusions qui avaient été faites sur le mélange dans la rainure à la zone juste en dehors de la zone active du palier, là où un ménisque de lubrifiant se forme parfois. D'autres phénomènes du comportement du palier ont également été découverts lors du tracé simultané des gradients de pression et des isothermes.

En superposant les champs de température et de pression dans la zone active avant du palier, nous avons pu montrer que la température maximale se trouvait dans la zone de forte chute de pression. A faible charge, lorsque la vitesse est peu élevée, les isothermes au début de la zone de cavitation pointent vers l'amont. Lorsque la vitesse augmente, les isothermes s'orientent vers l'aval, correspondant à la direction de rotation de l'arbre. A forte charge, les isothermes au début de la zone de cavitation pointent toujours vers l'amont. La superposition des gradients de pression avec les champs de température ont montré l'existence d'une composante inverse de l'écoulement de Poiseuille lorsque les gradients axiaux sont négligeables. Pour les faibles vitesses, les isothermes sont quasiment axiales, mais lorsque la vitesse augmente leur forme est modifiée ; la température augmente dans le sens de la rainure vers l'environnement. L'analyse des résultats a été présentée dans plusieurs conférences internationales et un article a été publié dans une revue internationale à comité de lecture. Cet article est présenté dans la sélection de publications à la fin du document.

En conclusion, les nombreuses études réalisées ces dernières années m'ont permis d'acquérir une très grande expérience du fonctionnement de tous types de paliers hydrodynamiques, aussi bien en régime établi que transitoire. J'ai pu réaliser différents essais sur des paliers lisses ou à lobes, en bronze ou en acier régulé, avec plusieurs types d'arbres. Je maîtrise les différentes techniques expérimentales qui permettent de mesurer les paramètres de fonctionnement comme la pression, la température ou encore l'épaisseur de film. Cette expérience m'a servi en premier lieu pour élargir mes recherches aux butées hydrodynamiques, dont je présente un bref aperçu dans le paragraphe suivant.

1.3 Butées hydrodynamiques

Lorsque j'ai été recruté en 2006, j'ai voulu compléter mes recherches en y incluant les butées hydrodynamiques dont le fonctionnement est tout à fait similaire à celui des paliers. Après avoir encadré plusieurs étudiants en 3^{ème} année de licence et en Master 2^{ème} année qui ont travaillé sur la modification et la mise au point du banc d'essais de butées, j'ai eu en 2008 l'opportunité de lancer une étude sur une butée à patins oscillants fonctionnant en conditions dégradées. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une thèse CIFRE, en collaboration avec EDF R&D.

M. Harika a tout d'abord participé, sous ma responsabilité, à la conception et à l'adaptation du banc d'essais de butées hydrodynamiques du LMS aux conditions de l'étude demandée par EDF R&D. Nous avons pu mettre au point le dispositif afin qu'il puisse accueillir une butée à patins oscillants du commerce. Les liens tissés avec mes collègues de l'opération "rhéologie des fluides" du Laboratoire d'Etudes Aérodynamique ont également permis de réaliser, grâce à leur participation, une étude rhéologique sur l'huile polluée par de l'eau. M. Harika a donc réalisé une étude rhéologique sur le mélange eau-huile afin d'établir une loi de variation de la viscosité du mélange tenant compte de la température et de la concentration en eau. Le modèle développé a ensuite été implémenté dans un logiciel de calcul utilisé par EDF R&D puis utilisé pour une comparaison théorie expérimentation qui a été publiée dans une revue internationale. Cet article est présenté dans la sélection de publications à la fin du document. Parmi les méthodes envisageables pour modéliser l'effet de la présence de l'eau dans l'huile de lubrification, nous en avons choisi une qui présente une simplicité pratique sans toutefois exiger des approximations importantes. Ainsi, l'approximation essentielle de notre modèle est de considérer un film épais devant la grandeur des gouttelettes formant l'émulsion d'eau dans l'huile. Dans ce cas, l'émulsion est considérée comme un fluide homogène dont les caractéristiques physiques sont à étudier selon la concentration de l'eau. L'émulsion d'eau dans l'huile a des caractéristiques physiques différentes de celles de l'huile pure. Cependant, jusqu'à la concentration de 10% massique en eau, la variation de la plupart de ces caractéristiques ne montre pas d'effet significatif sur la lubrification. Seule, la variation de viscosité due à la présence de l'eau semble avoir un effet important et une modélisation de la viscosité de l'émulsion en fonction de la concentration en eau est indispensable.

La suite de sa thèse a ensuite consisté à réaliser des essais sur une butée hydrodynamique à patins oscillants fonctionnant avec de l'huile polluée avec de l'eau. Une légère augmentation du couple de frottement a été détectée. Cependant, celle-ci est compensée par une légère augmentation de l'épaisseur du film lubrifiant et une faible diminution des températures mesurées. Nous avons pu expliquer l'augmentation de l'épaisseur du film et du couple par l'augmentation de la viscosité du lubrifiant, entraînée par la présence des gouttelettes d'eau au sein du fluide. Quant à la diminution de température, elle a été expliquée par une amélioration des caractéristiques thermiques du lubrifiant (c'est précisément pour cette raison que l'on utilise de l'eau dans l'huile pour la lubrification des laminoirs par exemple), plus importante que l'effet de l'augmentation de viscosité. Ainsi, à court terme, la présence de l'eau jusqu'à 10% en masse ne montre pas d'effets négatifs sur la lubrification.

Un complément à cette étude a ensuite été réalisé dans le cadre d'un nouveau contrat avec EDF R&D. Il s'est agi de définir plus finement les coefficients à utiliser dans la modélisation du mélange eau-huile. Dans ce but, une étude particulière des coefficients qui régissent le comportement thermique des matériaux ainsi que de l'huile (conductivité thermique notamment) a été menée. Il a été montré que la prise en compte des paramètres suivants dans la modélisation avait différents effets :

- la présence d'eau (jusqu'à 7%) induit une augmentation de la viscosité de 9 à 18%, selon la température,
- la masse volumique ρ n'a aucun effet,
- la conductivité thermique λ entraîne une légère diminution de la température maximale,
- la chaleur spécifique c_p conduit à une augmentation de l'épaisseur du film et du couple de frottement accompagnée d'une diminution de la température maximale,
- le coefficient d'échange global h augmente de 25% avec 7% d'eau, améliorant la capacité de refroidissement du lubrifiant.

Cette étude a permis de confirmer le fait que la présence de l'eau jusqu'à 7% en masse dans le circuit de lubrification peut, contre toute attente et sous certaines conditions, être bénéfique au fonctionnement de la butée (à court terme), au moins du point de vue mécanique. Les conditions nécessaires à ce type de fonctionnement sont la formation d'une émulsion, une charge spécifique n'excédant pas 3 MPa et une vitesse linéaire inférieure à 70 m.s^{-1} . De plus, le travail expérimental qui a suivi a permis de confirmer qu'une concentration en eau jusqu'à 30% en masse ne présente pas de risques sur la lubrification et que même l'arrivée brutale d'eau modifie instantanément le comportement de la butée mais l'effet ne dure que quelques secondes jusqu'à ce que le fluide se stabilise dans une configuration plus homogène. Les résultats de cette étude finale ont été proposés pour publication dans une revue internationale à comité de lecture.

Pour faire suite aux études qui avaient été menées sur l'influence des matériaux et de la rugosité de l'arbre sur les performances de paliers, plus généralement à l'étude des conditions de lubrification, j'ai proposé un sujet de thèse portant sur l'influence de la texturation sur les performances d'une butée hydrodynamique. Cette thèse a été pourvue en 2010 sur financement MESR et octroyée à M. Henry. Les études sur les texturations sont essentiellement numériques et parfois contradictoires. Il m'apparaissait donc important de tenter d'apporter une réponse claire aux questions posées par ces études en proposant une étude expérimentale complète sur ce sujet. Le travail a commencé par une étude bibliographique importante au cours de laquelle M. Henry a pu découvrir les textures ainsi que les différents modes de fabrication qui s'y rapportent. Ainsi, il a pu réaliser l'adaptation de notre banc et surtout la conception de nouvelles butées texturées qui ont pu être testées. Les premiers essais expérimentaux ont été réalisés sur des butées à plans inclinés et une butée à face parallèles afin de disposer de cas d'étude de référence.

Le banc d'essais nous a permis de mesurer de façon très précise plusieurs caractéristiques de fonctionnement de butées texturées, comme le couple de frottement, l'épaisseur de film, la pression ainsi que les températures à l'interface film/patin. Des comparaisons ont été effectuées sur quatre butées texturées avec la butée à faces parallèles. Cette étude a permis de tirer un certain nombre de conclusions très intéressantes parmi lesquelles nous pouvons citer :

- La température mesurée en régime établi de la butée présentant le taux de texturation le plus important est légèrement inférieure aux autres.
- la configuration de la première rangée de textures, à l'entrée du contact, modifie significativement le comportement de la butée. Lorsque la première rangée communique avec la rainure d'alimentation, les performances sont supérieures, dû à l'augmentation du débit entrant dans le contact.
- La densité de 56% permet d'obtenir une diminution significative du couple de frottement en comparaison avec la butée à faces parallèles.
- La profondeur relative des textures, combiné avec leur densité, apparaît comme étant un facteur influant fortement la capacité de charge de la butée.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse sont d'une très grande qualité de par la quantité inédite de résultats expérimentaux qui ont pu être obtenus. En effet, plusieurs centaines d'essais

ont été réalisés, permettant d'avoir une parfaite confiance dans les résultats obtenus. M. Henry rédige actuellement son mémoire de thèse et devrait soutenir en octobre 2013. Plusieurs publications sont en cours de préparation pour être soumises à des revues internationales à comité de lecture.

Parallèlement à cette thèse, M. Fillon et moi-même avons conclu un contrat de collaboration avec un fabricant de palier et butées japonais. Pour ce contrat, j'ai été en charge de la partie expérimentale avec l'étude de butées revêtues de plusieurs matériaux, régule et PEEK (Poly-Ether-Ether-Ketone). J'ai étudié le comportement de ces butées à patins oscillants aussi bien en régime établi que transitoire. Les mesures effectuées sur des butées à pivots centrés et excentrés ont notamment concerné le couple de frottement, l'épaisseur de film et les températures à l'interface film/patin. Cette étude a été réalisée sur une période de 12 mois et la rapport final a été rendu à notre partenaire Daido Metal en janvier 2013. Cette étude, dont les principaux résultats ont été présentés dans trois conférences internationales, a permis de confirmer un certain nombre d'hypothèses mais aussi de comprendre les mécanismes qui influent sur les caractéristiques des butées. Ainsi, les conclusions de ces travaux sont les suivantes :

- La butée régulée avec les pivots centrés est capable de fonctionner dans les deux sens de rotation dès lors que la charge n'excède 2000N, ce qui représente 80% de la charge maximale préconisée par la constructeur.
- En revanche, les butées revêtues de PEEK ne peuvent fonctionner dans les deux sens que pour des vitesses supérieures à 5000 tr/min et une charge maximale de 1000N.
- Les butées PEEK ont cependant d'autres caractéristiques qui font qu'elles peuvent être d'un grand intérêt : le coefficient de frottement est réduit de 59% lors du démarrage par rapport à la butée régulée (ce qui est très important pour réduire l'usure) mais également lors du régime établi. En effet, nous avons pu constater que le couple de frottement en régime établi est réduit de 20% avec l'utilisation du PEEK.
- Les butées à pivot centrés présentent les mêmes caractéristiques mais comme l'on pouvait s'y attendre, la configuration à pivot centré donne des performances médiocres par rapport aux butées classiques à pivot excentrés.

Nous avons donc pu montrer par cette étude que les butées régulées avaient des performances très satisfaisantes pour toutes les conditions de fonctionnement que nous avons testées, vitesse entre 1000 et 10000 tr/min et charge entre 1000 et 5000N, avec une rotation dans les deux sens. Le revêtement PEEK permet de réduire très significativement le couple de frottement aussi bien au démarrage qu'en régime établi mais conduit à une augmentation des températures avec une capacité de charge réduite, notamment en rotation inverse.

En conclusion, au travers de ces études sur de nombreux types de butées différentes, j'ai pu acquérir une expérience intéressante sur le comportement des butées hydrodynamiques. De plus, cela m'a également permis de conforter l'expérience que j'avais acquise avec les études sur les paliers en ce qui concerne les expérimentations.

1.4 Points forts

Expérimentations

Les études menées depuis plus de trente ans dans notre laboratoire nous permettent d'avoir une excellente image et une visibilité au niveau international concernant les études expérimentales de paliers et butées hydrodynamiques. Nos points forts dans ce domaine sont les suivants :

- dispositifs expérimentaux originaux de paliers et butées hydrodynamiques,

- grande flexibilité de montage qui permet de tester tous types de géométries, configurations d'alimentation et tous types de matériaux, ou de fluides lubrifiants
- fiabilité des études par une compétence scientifique d'analyse et un dépouillement des résultats rigoureux.

Etudes numériques

Même si je n'ai que peu participé aux diverses études numériques réalisées au laboratoire en dehors de celles qui ont été menées par mes étudiants en thèse, je profite de l'expertise de M. Fillon dans ce domaine qui constitue indéniablement un second point fort de l'équipe que je forme avec lui. Ses travaux sont reconnus internationalement, ce qui nous permet d'avoir de nombreux contacts, non seulement avec des industriels mais aussi avec d'autres institutions comme par exemple les Universités de Patras et Athènes en Grèce, Minho au Portugal ou encore Bucarest en Roumanie.

Collaborations

J'ai participé en 2011 au montage d'un projet ANR en collaboration avec un collègue du laboratoire ainsi que des collègues de l'INPL de Nancy. Nous avons reçu une réponse favorable pour le financement de ce projet qui concerne les texturations dans les garnitures d'étanchéité. Ce projet me permettra de mettre à profit l'expérience acquise au cours de dernières années sur les textures et de découvrir une partie de la lubrification que je ne connaissais jusqu'alors que de principe, les garnitures mécaniques. Un étudiant en thèse a été recruté sur ce projet. Sa thèse a commencé en avril 2012 et les premiers résultats numériques sur les textures dans la garniture mécanique sont fort prometteurs. Ces résultats vont servir de base à la mise au point d'un procédé qui pourra ensuite éventuellement être industrialisé.

1.5 Projets de recherche

Nouveau banc d'essais

Afin de pouvoir répondre à des sollicitations de plus en plus nombreuses d'études de paliers et butées de grandes dimensions, un projet a été mis en place : le banc Stribeck. Ce banc a pour principal objectif de répondre en termes de dimensions mais aussi de conditions de fonctionnement, aux exigences de plus en plus sévères des fabricants et des utilisateurs de paliers. Les paliers seront ainsi testés dans des conditions très proches des conditions d'utilisation industrielle, la charge appliquée sur le rotor d'essai (arbre) sera imposée et la position de l'arbre par rapport au stator (coussinet) sera mesurée en conséquence, de même que les pressions et les températures. Ce projet, dont j'assure la coordination, a été élu parmi les équipements d'excellence et sera financé par ce biais pour un montant de 500 k€. Au moment de l'écriture de ce document, la phase de conception n'a pas encore commencé mais le cahier des charges est fixé afin de pouvoir lancer l'appel d'offres pour la conception et la réalisation.

Projet ANR

J'ai monté en début d'année un projet ANR répondant à un appel à projets bi-nationaux. Ce projet doit être réalisé en collaboration avec nos collègues de l'Université Polytechnica de Bucarest.

Il s'agit de reconditionner un banc d'essai de paliers qui se trouve actuellement à l'Université de Lille afin d'étudier des paliers revêtus de matériaux compliant, tant au niveau des performances statiques que dynamiques.

Garnitures mécaniques

La thèse que je co-encadre avec mon collègue N. Brunetière m'a permis de m'intéresser aux garnitures mécaniques. Ces organes d'étanchéité sont tout à fait complémentaires des paliers et butées : les principes de lubrification sont les mêmes mais les échelles sont différentes. C'est ce qui me pousse à approfondir mes connaissances dans ce domaine pour les prochaines années.