

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

Conception d'un capteur caractérisant la dégradation du fluide dans un embrayage magnétorhéologique.

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Benoit GILLET

Jury : Jean-Sébastien PLANTE (directeur)

Luc G. FRÉCHETTE

Alexis LUSSIER DESBIENS

RÉSUMÉ

Le monde de l'aéronautique évolue graduellement vers le concept d'aéronefs plus électrique. Dans ce cadre, des systèmes électriques de commande de vol sont à l'étude. De tels systèmes permettraient de réduire le coût de maintenance et l'impact environnemental tout en alliant légèreté, fiabilité et performance dynamique. Dans ce but, un système électrique de commande de vol comprenant des embrayages magnétorhéologiques (MR) et des moteurs électriques a été développé à l'Université de Sherbrooke. Un des obstacles principaux au développement de la technologie MR est la capacité de mesurer l'état d'usure du fluide MR en opération. En effet, même si l'état du fluide MR peut déjà être déduit grâce aux performances globales de l'embrayage, une deuxième méthode indépendante de mesure est nécessaire pour assurer une redondance et statuer de manière fiable sur l'état du système. À ce jour, aucune recherche n'ont été faite pour développer un capteur permettant un suivi direct de l'usure du fluide à partir de l'observation d'une de ses caractéristiques.

Le but de cette maîtrise est donc de trouver un principe physique pour la mesure de la dégradation du fluide MR, de développer puis de tester sur banc de test un prototype de capteur mesurant la dégradation du fluide de manière directe. Un recensement des différentes propriétés physiques pouvant être affectées par la dégradation a été fait et des expériences simples ont été menées sur chacune d'elles. Les propriétés optiques du fluide ont montré la plus grande sensibilité à la dégradation et ont été choisies comme principe physique de fonctionnement du capteur. Ainsi une corrélation entre l'assombrissement du fluide et son âge a été mise évidence. L'assombrissement du fluide est mesuré par le capteur grâce à une carte RGB.

Le prototype développé a ensuite été intégré à un embrayage MR installé sur un banc de test instrumenté afin d'étudier l'assombrissement du fluide au cours de son usure. Pour ce faire, deux types de fluide ont été utilisés: le Lord 140CG, un fluide commercial et le GPL-103, un fluide maison à base de perfluoropolyéther (PFPE). Trois tests ont été faits avec le fluide Lord 140 et ont montré que le fluide s'assombrit de manière régulière jusqu'à devenir 12% plus sombre lors de son usure totale. L'assombrissement apparaît alors comme un bon métrique pour mesurer l'état de dégradation du fluide. Les trois tests avec du GPL-103 ont montré une tendance similaire d'assombrissement du fluide, mais avec une corrélation moindre avec la dégradation du fluide à cause de problèmes de blocage de l'écoulement de fluide devant le capteur dû à l'augmentation de la viscosité du fluide. Cela montre que les résultats du capteur sont dépendants du couple embrayage/fluide utilisé et que le capteur doit donc être étalonnés pour chaque nouveau fluide et embrayage.

Mots clés: magnétorhéologique, embrayage, capteur optique, dégradation des fluide magnétorhéologiques

REMERCIEMENTS

Je voudrais en premier lieu remercier mon directeur de recherche Jean-Sébastien Plante pour son soutien pendant ces deux années de maîtrise ainsi que pour les bonnes idées et les bons conseils qu'il a su me donner pour guider mes travaux de maîtrise.

Merci également à tous mes collègues du laboratoire de recherche Créatek pour l'ambiance conviviale qu'ils donnent au laboratoire.

Pour finir, J'aimerais également remercier tout spécialement, Mathieu et Alexandre avec qui j'ai eu l'honneur de travailler, Raphaël pour ses bons conseils, ainsi que toutes les personnes qui ont pu m'aider durant ces deux ans de maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1.1. Mise en contexte et problématique	1
1.1.1. Aéronefs plus électriques	1
1.1.2. Projet ENV-404	1
1.1.3. Projet ENV-709	2
1.2. Définition du projet de recherche	3
1.3. Objectifs du projet de recherche	4
1.4. Contributions originales	4
1.5. Plan du document	5
ÉTAT DE L'ART	6
2.1. Fluides et embrayages magnétorhéologiques	6
2.1.1. Histoire du fluide magnétorhéologique	6
2.1.2. Composition des fluides magnétorhéologique	7
2.1.3. Comportement des fluides magnétorhéologique	8
2.1.4. Les embrayages magnétorhéologiques	8
2.2. Durabilité des fluides magnétorhéologique	10
2.2.1. Épaississement du fluide « <i>In Use Thickening</i> »	10
2.2.2. Oxydation des particules	11
2.2.3. Comportement erratique	12
2.3. Principe de mesure	13
2.3.1. Méthode de mesure indirecte	13
2.3.2. Capteur à variation d'inductance	13
2.3.3. Capteur magnétique	14
2.4. Conclusion de l'état de l'art	16
ARTICLE	17
3.1. Abstract	19
3.2. Introduction	20
3.2.1. Motivation	20

3.2.2. Background.....	20
3.3. Approach.....	22
3.4. Sensor Design	22
3.4.1. Sensing Technology Selection	22
3.4.2. Optical Sensor Design	25
3.5. Experimental Results	26
3.5.1. Durability Test Bench	26
3.5.2. Experimental Method	27
3.5.3. Results	28
3.6. Conclusion	34
3.6.1. Summary	34
3.6.2. Future work	35
Acknowledgements.....	35
CONCLUSION	36
4.1. Sommaire	36
4.2. Perspectives.....	37
LISTE DES RÉFÉRENCES.....	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Banc d'essai réalisé dans le cadre du projet ENV404.....	2
Figure 1.2	Planification du projet ENV-709.....	3
Figure 2.1	Diagramme de Bingham du fluide MR. D'après [11].	8
Figure 2.2	Principe de fonctionnement d'un embrayage MR.....	9
Figure 2.3	Abrasion et déformation de particules ductiles et dures [10]. De gauche à droite: particules neuves, particules dures usées, particules molles usées.	11
Figure 2.4	Diminution relative du cisaillement transmissible maximal par le fluide MR en fonction de son oxydation [15].	12
Figure 2.5	SEM d'une particule de CIP neuve (à gauche) et d'une usée (à droite) après 540 heures de test de durabilité [17].....	12
Figure 2.6	Relation couple courant d'un embrayage MR	13
Figure 2.7	Capteur de caractérisation de la sédimentation du fluide MR [20].	14
Figure 2.8	Vue en coupe du capteur de débris dans l'huile. D'après Gastop [21].....	15
Figure 2.9	Principe de fonctionnement du capteur de débris dans l'huile [21].	15
Figure 3.1	Sensor development roadmap.....	22
Figure 3.2	Exploded and sectional view of the monitoring sensor.....	25
Figure 3.3	Sectional view and picture of the durability test clutch [30]. The recirculation hose in not represented in the sectional view (see picture)	26
Figure 3.4	Typical results of the clearness (upper curve) and the torque and current relationship (lower curve) of a Lord 140CG fluid.	28
Figure 3.5	<i>a)</i> Clearness results for Lord140CG tests in function of the LDE. <i>b)</i> Clearness results for Lord 140CG tests in function of the percentage of degradation.	30
Figure 3.6	<i>a)</i> GPL-103 clearness results in function of the LDE. <i>b)</i> GPL-103 clearness results in function of the percentage of degradation. Bold parts of the curves: free flow (phase 1). Not bold part: blocked flow (phases 2 and 3).	31
Figure 3.7	Comparison between the clearness and the viscosity during GPL-103 tests. When the curve is in dotted line the fluid should be changed since recirculation issues occur and that the fluid state can no longer be monitored by the sensor.....	32
Figure 3.8	Set up used and results of the test of brightening during sedimentation. <i>a)</i> Picture of the setup. <i>b)</i> Clearness results of a GPL-103 during sedimentation.	33

LISTE DES TABLEAUX

Table 3.1	Description of the measuring methods tested.....	23
Table 3.2	Experimental conditions with Lord 140CG MR fluid.	29
Table 3.3	GPL-103 tests specifications	31

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte et problématique

1.1.1. Aéronefs plus électriques

L'aéronautique s'oriente de plus en plus vers le concept du « *more electric aircraft* » (aéronef plus électrique). L'industrie souhaite ainsi électrifier les réseaux de distribution de puissance afin de remplacer les sources de puissance hydraulique et pneumatique par des sources uniquement électriques.

De nos jours, de nombreux actionneurs sont alimentés par des réseaux de puissance hydraulique. Ainsi, les commandes de vol de pas cyclique et collectif des hélicoptères sont contrôlées par des vérins et des servovalves hydrauliques. Ces commandes sont principalement visées par le concept « d'avion plus électrique ».

Le passage à l'électrique des systèmes offre trois principaux avantages. Tout d'abord, la suppression des circuits hydrauliques permet d'alléger significativement le système. En effet, les circuits hydrauliques sont plus lourds que les circuits électriques. Ensuite, la suppression de la tuyauterie permet de diminuer le coût de maintenance, car les fuites des circuits hydrauliques sont longues et fastidieuses à diagnostiquer. Finalement, le fluide hydraulique est corrosif, une solution d'actionneur électrique serait alors meilleure pour l'environnement et pour le personnel effectuant les maintenances [1].

1.1.2. Projet ENV-404

Afin de développer des systèmes de commande de vols plus électrique, le projet CRIAQ ENV-404 entre l'université Laval, l'Université de Sherbrooke, Bell hélicoptère et Bombardier Aerospace souhaitait développer un système d'actionneurs électriques couplés à des embrayages MR afin de remplacer les systèmes hydrauliques existants. L'actionneur proposé devait avoir la fiabilité requise par l'industrie aéronautique concernant ce type de système critique, soit 10^{-9} défaillance par heure.

La première phase du projet a permis de choisir un type de technologie d'actionneurs de commande de vol. Les systèmes classiques électromécaniques (moteur électrique engrenages) ne permettaient pas d'atteindre le taux de fiabilité requis, le projet s'est alors dirigé vers une architecture avec des moteurs électriques et des embrayages magnétorhéologiques (MR) à glissement continu redondant. Les actionneurs électriques sont en parallèle, la redondance est alors possible grâce aux embrayages MR qui permettent de désaccoupler le moteur défaillant. Les embrayages MR avaient été retenus, car ils ont comme principal avantage de ne pas pouvoir se bloquer. En effet, ils fonctionnent sans contact mécanique entre les pièces mouvement, la totalité du couple est transmise par cisaillement du fluide MR dans l'embrayage.

Le projet a également permis de mieux comprendre la technologie MR ainsi que les problématiques de conception d'embrayage. Il a été conclu par un test de validation de cette architecture de système de commande de vol sur banc d'essai (voir figure 1.1).

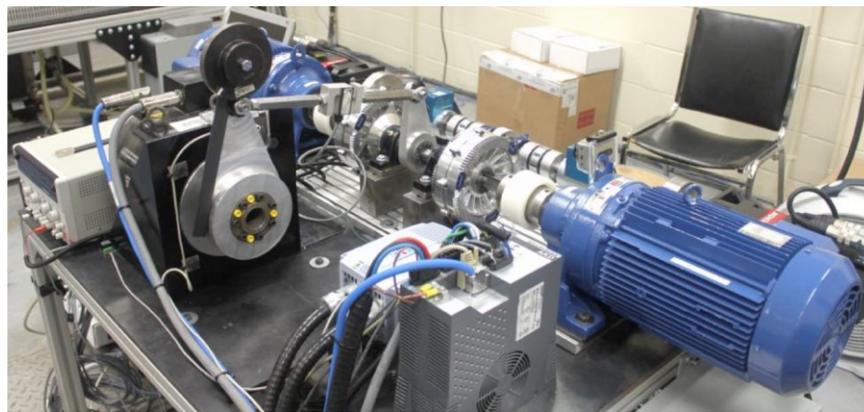


Figure 1.1 Banc d'essai réalisé dans le cadre du projet ENV404.

1.1.3. Projet ENV-709

Le projet ENV-404 a validé la possibilité de faire un système de commande de vol d'hélicoptère avec une architecture utilisant des embrayages MR et de moteurs électriques redondants tout en alliant légèreté, performance et fiabilité. Cependant, aucune étude de durabilité de ce système n'a été faite. Le projet ENV-709 est donc la suite du projet ENV-404. Il a pour but de démontrer que l'architecture et non seulement fiable, mais en plus durable, condition nécessaire à la viabilité de la technologie. Le projet ENV-709 est un partenariat entre le laboratoire CAMUS (conception d'actionneur de

l'université de Sherbrooke) l'université Mc Gill, Bell hélicoptère ainsi que l'organisme CRIAQ.

Afin d'améliorer la durabilité de l'ensemble du système de commande de vol, les objectifs du projet sont donc les suivants (voir figure 1.2) :

- Améliorer la durabilité du fluide MR.
- Comprendre les mécanismes de dégradation du fluide MR.
- Concevoir un embrayage fiable et durable.
- Concevoir un capteur assurant le suivi in situ de la dégradation du fluide dans l'embrayage.

Les travaux exposés dans ce mémoire portent sur ce dernier point.

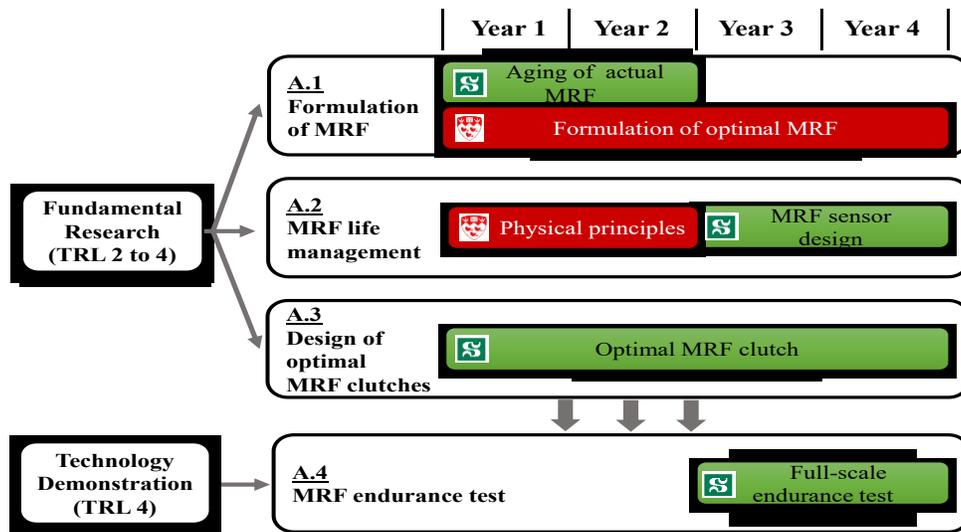


Figure 1.2 Planification du projet ENV-709

1.2. Définition du projet de recherche

Les embrayages à glissement continu, développés à Université de Sherbrooke, sont des éléments de sécurité mécanique dans la chaîne de contrôle des commandes de vol, leur fiabilité requise est très élevée (une défaillance tous les milliards d'heures).

À ce jour, aucun capteur permettant de mesurer in situ la dégradation du fluide dans l'embrayage à partir de l'observation d'une de ses caractéristiques n'a été développé. La dégradation est déduite à partir de la diminution des performances globales de

l'embrayage. En effet, le couple de sortie de l'embrayage MR en boucle ouverte (i.e. pour une intensité de courant fixe dans la bobine de l'embrayage) diminue avec l'usure du fluide. Cette méthode est employée sur le banc de test de durabilité de fluide MR de notre laboratoire, car elle permet de déduire l'état de dégradation du fluide MR en continu. Un capteur permettant un suivi de l'usure du fluide de manière directe est nécessaire pour assurer une redondance sur la mesure de l'état du fluide. Ainsi comme les deux méthodes de mesures sont indépendantes, si une des méthodes est la cause d'une information erronée, l'autre méthode de mesure contredit l'information.

Le travail présenté dans ce mémoire porte donc sur le choix d'une technologie de mesure de dégradation du fluide MR, sur le développement d'un prototype de capteur utilisant cette technologie puis sur le test de celui-ci sur un embrayage monté sur un banc d'essai de durabilité.

1.3. Objectifs du projet de recherche

Les travaux présentés dans ce mémoire se déclinent ainsi aux trois objectifs suivants :

- Identifier les paramètres du fluide changeant au cours du vieillissement et déduire une technologie de mesure de la dégradation du fluide.
- Développer un prototype de capteur utilisant la technologie précédemment choisie.
- Valider expérimentalement le comportement du prototype développé sur un embrayage monté sur un banc d'essai.

1.4. Contributions originales

De nombreuses études ont été effectuées sur les applications utilisant des fluides MR, peu ont été faites sur les mécanismes de dégradation du fluide et à ce jour il n'existe aucune méthode permettant de mesurer la dégradation du fluide à partir de l'observation d'une de ses caractéristiques. La contribution de ce travail consiste donc à la conception d'un prototype de capteur mesurant la dégradation du fluide MR dans un embrayage MR. Le capteur développé utilise une technologie optique. La méthodologie qui a été suivie pour sélectionner le principe physique optique utilisé par le capteur est décrite. Les tests du prototype, les conditions expérimentales et les résultats sont détaillés, expliqués et analysés. Enfin, ce travail met en évidence le potentiel d'une méthode optique pour caractériser la dégradation du fluide MR.

1.5. Plan du document

Ce document est composé de 4 parties. La première partie contextualise et définit les objectifs de ces travaux. La deuxième partie expose l'état de l'art des recherches antérieures sur le sujet. Ce chapitre décrit ce qu'est un fluide et un embrayage MR, puis expose les différents mécanismes de dégradation du fluide, ainsi que des exemples de technologies de mesure qui pourraient être adaptés pour mesurer la dégradation du fluide. La troisième partie est la principale contribution, c'est un article soumis pour publication au *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (JIMSS) et qui sera présenté en octobre 2019 à la conférence de l'ICAST à Montréal. Cette partie décrit le processus de sélection d'un principe physique de mesure, puis le développement d'un prototype de capteur utilisant ce principe. Les tests du capteur, les conditions expérimentales et les résultats y sont présentés et analysés. Le dernier chapitre conclut ce mémoire et dresse les perspectives du capteur développé.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART

Afin de permettre une bonne compréhension des travaux exposés dans ce document, ce chapitre expose tout d'abord ce qu'est un fluide MR ainsi que le fonctionnement d'un embrayage MR. La connaissance de la dégradation permettra d'identifier des paramètres du fluide affecté par la dégradation. Les recherches faites sur la durabilité et les mécanismes de dégradation des fluides MR sont ainsi exposés en deuxième partie. La troisième partie expose différents principes de mesures pouvant être adaptés pour le capteur de dégradation. Pour finir la dernière partie récapitule l'état de l'art.

2.1. Fluides et embrayages magnétorhéologiques

2.1.1. Histoire du fluide magnétorhéologique

Bien que la technologie des fluides magnétorhéologique soit relativement ancienne, 70 ans, elle a beaucoup évolué ces 20 dernières années avec l'industrialisation des premiers amortisseurs semi-actifs à fluide magnétorhéologique.

La première application de la technologie magnétorhéologique est décrite dans un article de J.Rabinow [2] en 1948 où il fait état d'un embrayage MR. Son embrayage est décrit par un brevet [3] déposé en 1947. L'embrayage est constitué d'un disque en contact de part et d'autre avec du fluide MR. Le fluide utilisé est alors très simple, c'est un mélange de 90% de carbonyle de fer avec 10% d'huile de lubrification. Le contrôle de cet embrayage est simple, mais le couple statique à courant nul est important à cause de la viscosité du fluide utilisé. J. Rabinow a également déposé un brevet sur des amortisseurs à fluide magnétorhéologique.[4].

La technologie magnétorhéologique a ensuite lentement évolué. Ce n'est que dans les années 90 que des applications MR sont utilisées à grande échelle. Les entreprises, General Motors, Lord et Adelphi ont été les pionniers dans le développement de suspension semi-active. La Cadillac STS Sedan a ainsi été la première voiture à bénéficier des suspensions semi-actives magnétorhéologiques. [5]

2.1.2. Composition des fluides magnétorhéologique

Un fluide magnétorhéologique est un fluide dont la viscosité est modifiée réversiblement et rapidement, par l'application d'un champ magnétique externe (le temps de réponse du fluide est inférieur à 1 ms) [6]. Le fluide est composé de deux composantes principales et indispensables : des particules ferromagnétiques (généralement du fer) et un lubrifiant liquide appelé, base. Le fluide a une concentration typique en particule comprise entre 20% et 47%.

Les particules ferromagnétiques ont une taille comprise entre 1 et 10 μm . Si les particules sont plus grosses, elles sédimentent ce qui est peu problématique pour les applications dans lesquels le fluide est naturellement brassé comme pour les amortisseurs automobiles ou les freins MR. C'est un problème majeur lorsque le fluide reste statique pendant longtemps comme dans le cas d'amortisseur sismique [7]. Si les particules sont plus petites, elles ne sédimentent pas et restent en suspensions grâce au mouvement brownien. Cependant, les forces de cisaillement maximales diminuent rapidement lorsque la taille des particules est inférieure au micron. Lorsque les particules de fer sont de l'ordre de grandeur du nanomètre le fluide est appelé ferrofluide et à des caractéristiques très différentes des fluides MR. Les particules les plus utilisées sont le carbonyle de fer (*CIP-Carbonyl iron particles*), car elles sont sphériques ce qui limite l'abrasion et ont l'avantage d'avoir une haute saturation magnétique (2.5 T) [6].

Sans lubrifiant, les particules de fer auraient un comportement très erratique. Le but principal du lubrifiant est donc d'éviter ce comportement. Cependant, le lubrifiant permet également d'éviter le frittage entre les particules de fer qui aurait été généré par les contraintes entre les particules et la chaleur dégagée par dissipation thermique du fluide et de la bobine. La base permet aussi de ralentir l'oxydation des particules de fer. Bien que de nombreuses bases ont été testées [8], les fluides MR commerciaux ont quasi exclusivement été faits avec, de l'eau, de l'huile de silicone ou de l'huile (synthétique et minérale). De nos jours, la majorité des fluides MR commercialisés ont une huile pour base.

À ces deux ingrédients principaux s'ajoutent différents additifs [9]. Le rôle des additifs est de ralentir l'oxydation des particules, de diminuer l'abrasion entre les particules, ou de stabiliser les particules afin de diminuer la sédimentation du fluide. La nature et le rôle de ces différents additifs sont bien décrits par Einar Hreinsson [10].

2.1.3. Comportement des fluides magnétorhéologique

Dans la littérature, le modèle le plus populaire pour décrire le comportement du fluide magnétorhéologique est le modèle de Bingham (voir équation 2.1). Ce modèle empirique a été introduit par Philips en 1969.

$$\tau = \eta_{mr} \dot{\gamma} + \tau_0(B) \quad (2.1)$$

Où

- τ : contrainte de cisaillement
- η_{mr} : viscosité indépendante de la densité de flux magnétique dans le fluide.
- $\dot{\gamma}$: taux de cisaillement
- τ_0 : contrainte de cisaillement aux taux de cisaillement nuls qui est fonction du champ B.

Lorsque le fluide n'est pas soumis à un champ magnétique, il est modélisé par un fluide newtonien (figure 2.1). Sa contrainte de cisaillement est nulle à un taux de cisaillement nul et elle augmente linéairement avec le taux de cisaillement.

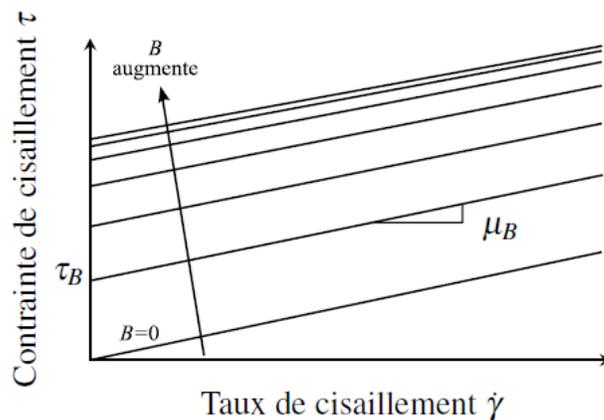


Figure 2.1 Diagramme de Bingham du fluide MR. D'après [11].

2.1.4. Les embrayages magnétorhéologiques

Il existe de nombreux concepts d'embrayage. Les embrayages MR se démarquent par leur grande fiabilité, car ils n'ont pas de contact mécanique entre l'arbre d'entrée et de sortie. L'intégralité du couple de l'embrayage est transmise par cisaillement du fluide MR. De

plus, le temps de réponse de l'embrayage de très court, il est inférieur au dixième de secondes.

Le principe de fonctionnement d'un embrayage MR est illustré par la figure 2.2. L'embrayage est constitué de deux disques qui se font face, séparé par une zone de fluide MR. lorsqu'aucun champ magnétique n'est appliqué, l'arbre d'entrée peut tourner librement dans le bain de fluide qui est alors liquide. Lors de l'application d'un champ magnétique, les particules de fer s'alignent sur les lignes de champ en formant des chaînes, ce qui augmente considérablement la viscosité du fluide. Le couple est alors transmis d'un arbre à l'autre par l'intermédiaire du fluide.

La figure 2.2 présente une configuration d'embrayage mono disque. Il est également possible d'utiliser des configurations avec plusieurs disques afin de maximiser la densité de puissance transmissible de l'embrayage ou d'utiliser des configurations avec un ou plusieurs tambours.

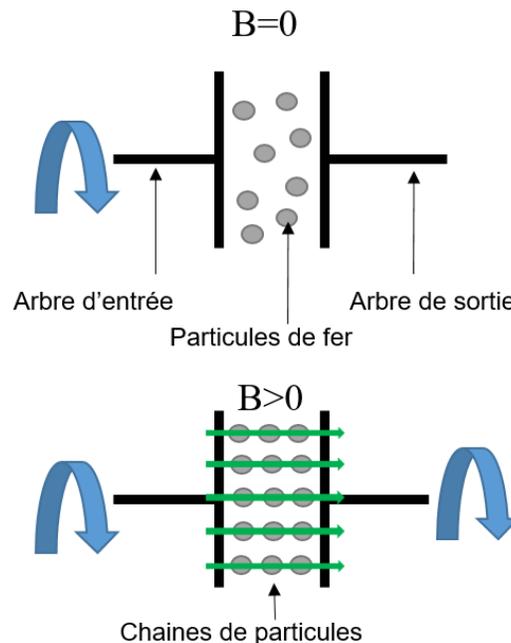


Figure 2.2 Principe de fonctionnement d'un embrayage MR.

L'embrayage utilisé à l'université de Sherbrooke pour les tests de durabilité et pour les tests du capteur de suivi de la dégradation du fluide est un embrayage mono tambour. Il est présenté ultérieurement dans le chapitre 3.

2.2. Durabilité des fluides magnétorhéologique

2.2.1. Épaississement du fluide « *In Use Thickening* »

Le premier mode de dégradation est l'épaississement du fluide, il est couramment appelé « *In-use-thickening* » ou IUT. L'augmentation de la viscosité apparente peut aller jusqu'à être deux fois et demie plus grande. Ce type d'usure a été constaté par le docteur Carlson lors de travaux portant sur l'amélioration de la durée de vie d'amortisseur semi-actif (MotionMaster™ RD-1005-3) de siège de camion pour la Lord Corporation. Carlson compare ce phénomène [12] à l'épaississement du lait lors de l'élaboration du beurre. Sous l'effet du brassage, le fluide initialement liquide devient de plus en plus pâteux, jusqu'à obtenir la consistance de cirage à chaussures et devenir alors inutilisable. Plusieurs phénomènes mènent à ce mode de dégradation.

Tout d'abord, sous l'effet des contraintes entre les particules, l'oxyde à la surface des particules de CIP s'écaille et des nanoparticules de carbures et d'oxydes sont alors mises en solution. Le ratio surface volume des nanoparticules étant beaucoup plus élevé que celle des particules de CIP, cela affecte significativement la rhéologie globale du fluide [12].

L'épaississement peut être également dû à la rupture ou à la déformation des particules elles-mêmes. Si les particules sont molles, elles finiront par se déformer plastiquement sous l'effet des contraintes tandis que si elles sont dures, elles vont tendre à s'écailler ou à se briser (voir figure 2.3), augmentant dans les deux cas la viscosité du fluide [13].

L'additif peut également être la cause de l'épaississement du fluide. La silice pyrogénée, une des nanoparticules couramment utilisées comme additif, finit par se fixer sous l'effet des contraintes sur les particules de CIP puis par les souder entre elles. Les amas ainsi formés modifient la rhéologie du fluide [9].

Une autre cause de l'IUT est la consommation des additifs et la perte d'huile de base. D.E Barber a constaté que la consommation des additifs et la perte progressive de l'huile de base finissaient par augmenter la viscosité du fluide MR de son amortisseur semi-actif, au point de le rendre inutilisable [5].

Pour résoudre ce problème, de nombreuses solutions parfois contradictoires ont été proposées. Afin d'éviter que les particules de fer se déforment puis s'agglomèrent, Iyengar propose de prendre des particules dures (d'une dureté de B50 sur l'échelle de Rockwell) [9]. Au contraire, Hreinsson suggère d'utiliser des particules plus ductiles afin de diminuer l'abrasion des particules qui produit des nanoparticules qui épaississent le fluide [10]. Finalement un compromis est proposé par Forehand qui propose de mélanger entre 5% et 20% de particules dures aux particules ductiles [14].

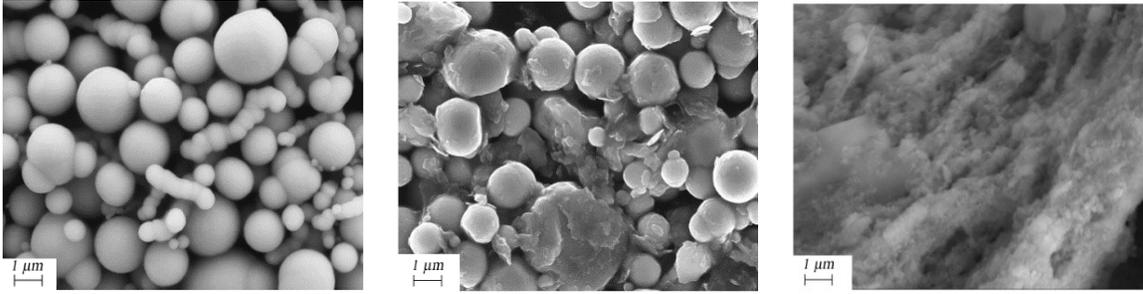


Figure 2.3 Abrasion et déformation de particules ductiles et dures [10]. De gauche à droite: particules neuves, particules dures usées, particules molles usées.

2.2.2. Oxydation des particules

Les performances magnétorhéologiques du fluide peuvent également diminuer. Le taux de cisaillement maximal transmissible par le fluide diminue avec la teneur en oxygène [15] et donc avec l'oxydation comme le montre la figure 2.4.

Cette baisse des performances du fluide qui peut aller jusqu'à 20% est due à la formation d'une couche d'oxyde (voir figure 2.5) non magnétique autour des particules de CIP [16]. Par ailleurs, le taux d'oxydation des particules dépend de la taille des particules. En effet, des tests de durabilité sur des embrayages MR pour ventilateur de voiture ont montré que l'oxydation des petites particules de fer ($1.6 \mu\text{m}$) allait jusqu'à 20% tandis que celle des grosses particules ($7.8 \mu\text{m}$) était entre 4 et 8%. Le taux d'oxydation dépend de la surface de contact, c'est pour cela que les petites particules, dont la surface totale par unité de volume est plus grande ont des couches d'oxyde à temps d'usure égale, supérieures aux particules plus grosses [17]. Par ailleurs, la couche d'oxyde de fer formée (FeO_x) est friable et a donc un taux de croissance constant.

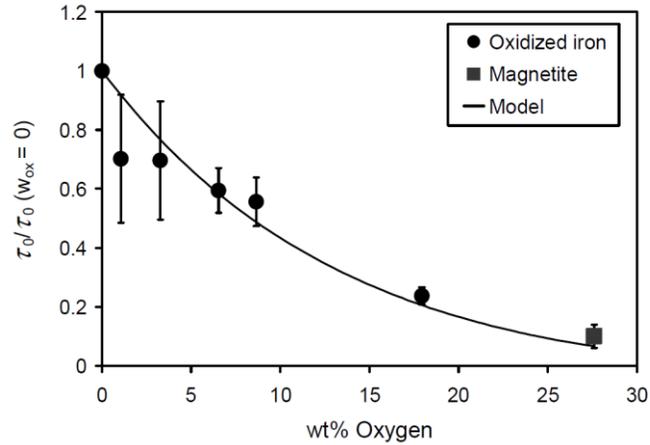


Figure 2.4 Diminution relative du cisaillement transmissible maximal par le fluide MR en fonction de son oxydation [15].

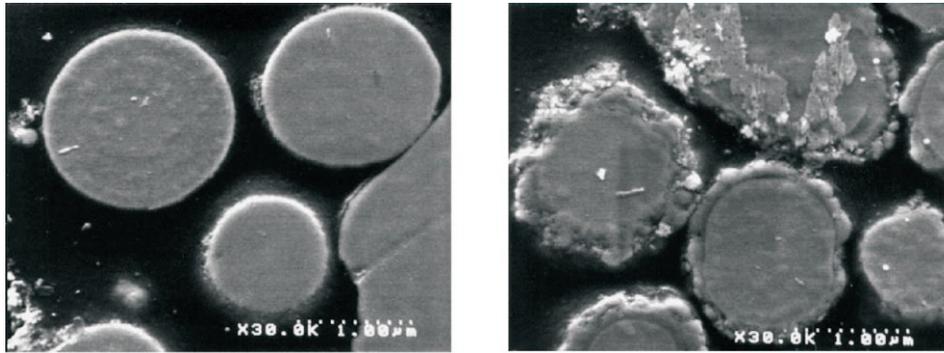


Figure 2.5 SEM d'une particule de CIP neuve (à gauche) et d'une usée (à droite) après 540 heures de test de durabilité [17].

Afin de limiter au maximum l'oxydation des particules, des particules en acier inoxydable de 8-25 microns peuvent être utilisées [16]. Une autre possibilité est de créer une fine couche protectrice d'oxyde résistante sur les particules afin de les protéger de l'oxydation. [17].

2.2.3. Comportement erratique

Un comportement erratique du fluide MR apparaît avec le vieillissement. Pour une intensité de courant donné dans la bobine de l'embrayage le couple qui était constant initialement, varie erratiquement. Un tel comportement a été constaté sur des fluides fait

avec des particules de fer et d'une base d'acétylène [18]. Ce comportement était dû à l'agglomération des particules causée par le frittage des particules entre elles. De même, un comportement erratique a été constaté sur le fluide MR Basonetic® 5030 causé par la solidification du fluide MR dans la zone de cisaillement de l'embrayage [19]. La solidification du fluide MR a été causée par une augmentation de la concentration de particules due à des fuites d'huile de base.

2.3. Principe de mesure

2.3.1. Méthode de mesure indirecte

À ce jour aucun capteur embarqué permettant de mesurer la dégradation du fluide à partir de l'observation d'une de ses caractéristiques n'a été développé. La dégradation du fluide MR est actuellement déduite indirectement à partir des performances de l'embrayage. La méthode consiste à mesurer le couple généré par l'embrayage au cours du temps, résultant de l'application d'une valeur fixe de courant dans la bobine de l'embrayage [19] (voir figure 2.6). Le couple transmis par l'embrayage pour une même valeur de courant dans la bobine diminue avec l'usure du fluide. Pour ces travaux le fluide est considéré comme complètement usé lorsque le couple a diminué de 30% par rapport à sa valeur initiale (i.e. lorsque le fluide est neuf). Par ailleurs l'usure du fluide est généralement quantifiée par la LDE (« *life dissipated energy* »,) c'est la quantité d'énergie dissipée par le fluide au cours de sa vie.

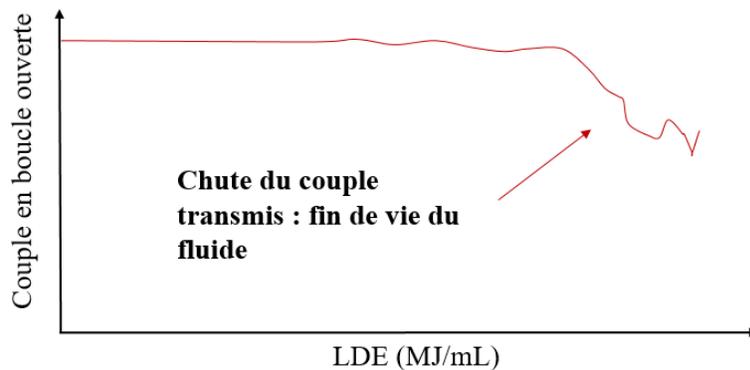


Figure 2.6 Relation couple courant d'un embrayage MR

2.3.2. Capteur à variation d'inductance

Il existe également des capteurs dont le principe de fonctionnement pourrait être adapté à la mesure de la dégradation du fluide MR. Ainsi, un capteur mesurant la sédimentation d'un fluide MR a été développé [20]. La sédimentation est un phénomène naturel auquel sont soumis tous les fluides MR. Si le fluide est laissé au repos, les particules de fer plus

lourdes ont tendance à tomber au fond de leur contenant au cours du temps. Le fluide se sépare donc en deux phases, la phase supérieure contient l'huile de base tandis que la phase inférieure contient les particules. Le capteur mesure la baisse de la concentration du fluide en particule de fer, ce qui permet de déduire le taux de sédimentation du fluide MR. Le dispositif était constitué d'une bobine entourant l'échantillon de fluide qui constitue le « noyau » de ce solénoïde. La variation de l'inductance de la bobine et du noyau permettait d'obtenir la concentration du fluide. En effet l'inductance L d'un solénoïde est donnée par l'équation 2.2.

$$L = \frac{N^2 A \mu_0}{l} \mu_r \quad (2.2)$$

où N est le nombre de spires par mètres, A est l'aire de la section du solénoïde et l sa longueur. Lors de la sédimentation du fluide, la perméabilité relative du matériau μ_r diminue ce qui fait chuter l'inductance du solénoïde. Le LCR mètre permet alors de mesurer cette chute et d'en déduire le taux de sédimentation du fluide (voir figure 2.7).

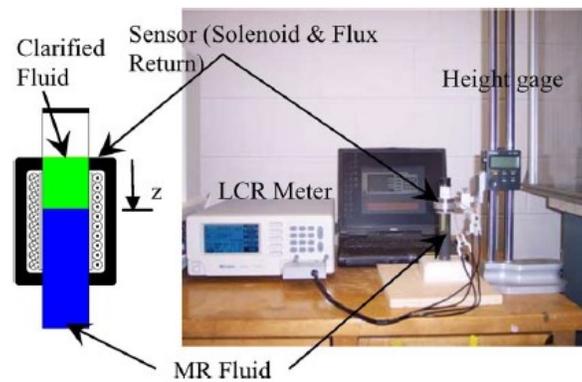


Figure 2.7 Capteur de caractérisation de la sédimentation du fluide MR [20].

2.3.3. Capteur magnétique

La compagnie Gastop au Canada a développé un capteur pour mesurer en continu le nombre de débris métallique circulant dans les circuits d'huile des moteurs F119-PW du chasseur américain F22. Le capteur est constitué de trois bobines qui entourent la canalisation de passage d'huile. Les deux bobines extérieures sont alimentées par un courant alternatif à haute fréquence, la bobine du milieu analyse les perturbations du champ magnétique créées lors du passage d'une particule métallique (voir figure 2.8 et 2.9) [21]. Un tel principe d'analyse magnétique pourrait être adapté afin d'évaluer la réponse du fluide MR à une sollicitation magnétique variable.

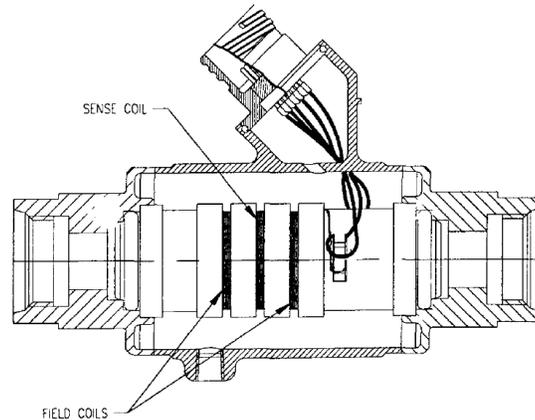


Figure 2.8 Vue en coupe du capteur de débris dans l'huile. D'après Gastop [21]

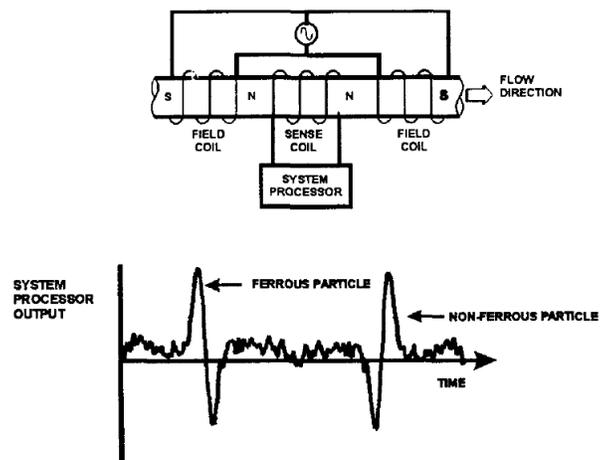


Figure 2.9 Principe de fonctionnement du capteur de débris dans l'huile [21].

Lors des tests de durabilité effectués sur les embrayages de notre laboratoire, il a été constaté que le fluide devenait plus foncé à la fin des tests lorsqu'il était usé. Une telle corrélation pourrait être exploitée afin de déduire le vieillissement du fluide. Dans l'industrie alimentaire, la couleur est une méthode efficace pour déterminer le stade de maturité des fruits et légumes [22]. La couleur est déduite à partir du code RGB de l'image du fruit, un traitement de l'image déduit alors l'état de maturité. Un tel principe d'analyse d'image pourrait permettre de déduire l'état de dégradation du fluide MR à partir de la coloration du fluide MR.

2.4. Conclusion de l'état de l'art

L'état de l'art a permis de mieux comprendre ce qu'est un fluide MR ainsi que le principe de fonctionnement d'un embrayage MR. La durabilité des fluides MR est apparue comme un point clé et a conduit à s'intéresser aux modes de dégradations du fluide MR. L'épaississement du fluide, l'oxydation des particules de fer et les fuites de l'huile de base sont apparus comme étant les trois principaux modes de dégradation du fluide. Ainsi, la connaissance des modes de dégradation du fluide permettra déduire des propriétés physiques du fluide affecté par sa dégradation et de déduire des potentielles méthodes de mesure. Pour finir des exemples de méthode de mesure utilisant des approches magnétique et optique pouvant être adapté pour une mesure de la dégradation du fluide ont été exposé.

CHAPITRE 3

ARTICLE

Avant-propos :

Auteur et affiliation :

B. Gillet : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie mécanique

M. Lamy : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie mécanique

A. Landry-Blais : professionnel de recherche, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

R. Pilon : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, département de génie mécanique

J.-S. Plante : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Date de soumission : 5 décembre 2019

Numéro de manuscrit : JIM-19-484

Revue: Journal of Intelligent Material Systems and Structures

Titre français: Capteur optique pour caractériser la dégradation du fluide magnétorhéologique dans un embrayage magnétorhéologique

Contribution au document:

Cet article constitue la principale contribution et le corps principal de ce mémoire. L'article décrit dans un premier temps la méthodologie qui a été suivie pour sélectionner le principe physique de mesure utilisé par le capteur. Il développe dans un deuxième temps les étapes de conception et de développement d'un prototype de capteur utilisant le principe de mesure choisi antérieurement. Le test du prototype de capteur ainsi que les conditions expérimentales sont ensuite décrits. Les résultats y sont détaillés, expliqués et analysés. Pour finir, une conclusion du potentiel du capteur développé ainsi que des axes de travaux futurs sont dressés à partir des résultats obtenus.

Résumé français :

L'aéronautique évolue progressivement vers le concept d'aéronefs plus électrique. Développer des actionneurs entièrement électriques est un défi en termes de fiabilité, car les systèmes conventionnels comprenant des moteurs et des engrenages présentent des risques de blocage à cause des contacts métal/métal. L'utilisation d'embrayage magnétorhéologique (MR) permet de résoudre ce problème, car le couple est transmis par cisaillement du fluide. Un système de commande de vol électrique comprenant des embrayages MR et des moteurs électriques a ainsi été développé à l'Université de Sherbrooke. L'un des défis clés pour le développement à grande échelle de la technologie des fluides MR dans l'aéronautique est la capacité à suivre l'évolution de l'état du fluide MR présent dans l'embrayage au cours de son vieillissement. À ce jour, aucune recherche n'ont été publiées sur le développement d'un capteur permettant un suivi direct de l'usure du fluide à partir de l'observation de l'une de ses caractéristiques.

Cet article présente le choix d'un principe de mesure de l'usure du fluide, puis la conception, le développement et le test d'un prototype. Une méthode optique est apparue comme étant la plus prometteuse parmi plusieurs méthodes de mesure testée. Le capteur développé est ainsi constitué d'une carte RGB qui mesure la clarté du fluide. La carte est elle-même intégrée à une structure imprimée 3D lui donnant un accès optique au fluide. Le capteur a ensuite été testé sur un embrayage MR de 60 N.m, monté sur un banc de test instrumenté de durabilité.

Les tests du capteur sur deux fluides différents ont démontré une corrélation entre le vieillissement et la diminution de la clarté du fluide. En effet, trois tests sur un fluide commercial courant, le Lord 140CG, ont montré une diminution de la clarté du fluide de 12% lors de son usure totale malgré des conditions d'usure différente, comme le couple et la puissance dissipée, ou même des fuites du fluide (1-2 mL) au travers des joints dynamiques. Ces tests suggèrent que pour le Lord 140CG la diminution de la clarté du fluide est une meilleure métrique que l'énergie dissipée au cours de la vie du fluide, car elle semble directement reliée à l'usure du fluide sans égard aux conditions d'opération. De même, les résultats obtenus avec le GPL-103 (un fluide maison utilisant une base de perfluoropolyéther) ont montré une tendance similaire, mais sans corrélation aussi forte. Cette étude montre que les résultats du capteur sont dépendants du couple embrayage fluide et qu'ils doivent donc être étalonnés pour chaque nouveau fluide et embrayage.

Note : à la suite des corrections demandées par les membres du jury, le contenu de cet article diffère de celui présenté à la revue.

An Optical RGB Sensor for Monitoring the Degradation of Magnetorheological Fluids in High-torque Clutch Actuators

3.1. Abstract

The aerospace industry is gradually moving towards “more electric aircraft” to reduce its environmental footprint. Developing all-electric actuators brings a reliability challenge because conventional geared-motor actuators are susceptible to jamming failures from their metal-to-metal gear contacts. Magnetorheological (MR) clutch actuators solve this challenge by using a layer of fluid to transmit torque and are not exposed to potential jam failures, making them particularly attractive for high reliability applications such as primary flight control. A key challenge that must be addressed for a wide-spread deployment of the magnetorheological (MR) fluid technology in aerospace is the ability to monitor MR fluid condition while it ages in operation. To date, no such efforts have been reported in the literature.

This paper presents the selection of a sensing technology, the prototyping and the testing of a first proof of concept of a monitoring sensor. The developed sensor uses an optical sensing principle to monitor MR fluid color during degradation. Fluid coloration is measured by an RGB sensor and has been tested in a high-torque (60 N.m) MR clutch designed to simulate MR fluid degradation. The clutch was mounted on a fully instrumented durability test bench and tested up to fluid failure. Tests have been performed in two types of fluid, a commercial fluid, the Lord 140CG, and a homemade perfluoropolyether (PFPE) base oil fluid, the GPL-103.

Optical sensor tests on the Lord fluid have demonstrated a strong correlation between fluid torque-to-current performance decrease with aging and fluid clearness. The average of three aging tests on Lord 140CG fluid show a 12% clearness decrease at end-of-life regardless of operating conditions such as torque, RPM, dissipated power, and even fluid leaks through mechanical seals. These results suggest that, for the Lord 140CG fluid, clearness is directly linked to the fluid degradation state and independent of operating conditions which makes clearness a more accurate metric to quantify durability than life dissipated energy (LDE). However, the tests made with the GPL-103 fluid show a similar trend but didn't show such a strong correlation, which means that optical sensing of MR fluid condition must be carefully calibrated for each individual fluid and clutch design pairs. Results from this study suggest that optical sensing is a relevant method to measure MR fluid condition in clutch applications.

Keywords: Magnetorheological, clutch, optical sensing, condition monitoring, degradation

3.2. Introduction

3.2.1. Motivation

The aerospace industry is gradually replacing conventional hydraulic flight control systems by electric or servo-hydraulic systems [1]. There are three major advantages of this change. Firstly, the suppression of the hydraulic pipe reduces significantly the weight of the system. Secondly, the removal of the piping reduces the maintenance cost, because the leaks in the hydraulic circuits are long and tedious to diagnose. Thirdly, avoiding the use of corrosive fluids would be better for the environment and for workers carrying out the maintenance.

In order to benefit from these advantages, an electric system combining continuously slipping magnetorheological (MR) clutches with electric motors for the control of cyclic and collective blades pitch of an helicopter has been developed in collaboration with Bell Flight and Bombardier Aerospace [1]. The interest from this approach is its superior dynamic performance compared to hydraulics while being lightweight and capable of meeting stringent reliability requirements for primary flight control applications due to the absence of metal-to-metal contacts from gears or ball screws.

A key challenge with the MR actuation technology used in slippage conditions is the durability of the fluid. Indeed, the dissipated power from the clutch actuators inevitably causes wear on the MR fluid. Monitoring the fluid's condition inside the clutch becomes a necessity in order to safely and reliably deploy MR technologies in aerospace.

3.2.2. Background

MR fluids are composed of two major components : a base oil and magnetics particles, generally carbonyl iron (CIP) but sometime ferrimagnetic alloys such as iron-cobalt alloys, manganese zinc ferrite or nickel zinc ferrite [23]. The most common base is mineral oil, but water, silicon and PFPE oil are also used. Additives can be added to improve the sedimentation stability or to reduce the oxidation or the particle wearing [24].

The established metric to quantify durability is the “Life Dissipated Energy” (*LDE*), defined as the total amount of energy dissipated per unit volume of fluid, usually expressed in MJ/mL [12]:

$$LDE = \frac{1}{V} \int_0^{life} P \cdot dt, \quad (3.1)$$

where P is the instantaneous power dissipated in a volume V of MR fluid. In the case of constant torque and rotational velocity, the LDE is proportional to the aging time. Best performing MR fluids can reach a LDE of around 10 MJ/mL [7], which means that 100 mL of fluid can dissipate 100 W during 2800 h before reaching their end-of-life. Understanding and closely monitoring MR fluid durability is even more important at high power applications where the total quantity of available fluid can be limited for costs and weight reasons, for example, in a cooling fan clutch application for commercial vehicles [25] or in the case of a flight control system using continuous slippage clutch [1].

There are three major degradation modes of MR fluids which are interconnected. The first one is the in use thickening [7], it occurs when hard particles tend to flake their oxidized surface into smaller particles [26], [9], or when soft particles tend to deform and agglomerate. In both cases, the result is a thicker fluid. Furthermore, additives can cause thickening. Fumed silica, a widely used additive appears to bond the stressed iron particles together resulting in a thicker fluid [9]. Particles oxidation [17] reduces the maximal transmissible shear stress because the mass of the active magnetic material in the fluid is reduced [15]. Finally, a third degradation mode is leakage. Base oil or full MR fluid leakage can occur due to poor seal designs. Leakage is accelerated in some MR fluid exhibiting base oil outgassing which results in internal pressure increase in the clutch. Reducing the total amount of MR fluid or mechanically thickening the fluid by removing base oil both results in shorter fluid life. Operating conditions also have a strong effect on durability, for example temperature appears to be a critical factor [27].

To the authors' knowledge, no sensor designs have been proposed to monitor MR fluid condition. Indirect measurements can be performed to periodically infer MR fluid condition by measuring the clutch torque response to current steps [28], [27]. Indeed, for a given current step, the more the torque decreases compared to its initial value, the more the fluid is used. With this technique, a clutch is considered to have reached its end-of-life when the transmitted torque of the clutch decreases below a given threshold compared to the response of the initial system (figure 2.6). Since flight control is a vital system, another independent mean of quantifying MR fluid condition is needed to provide duplex redundancy, and thus, a reliable condition monitoring system upon which a trustworthy decision regarding the operational status of the flight control system can be made. There is therefore a need to develop such a dedicated sensor to monitor MR fluid's aging.

3.3. Approach

The empirical development roadmap shown in figure 3.1 was used to guide the development of the MR fluid condition monitoring sensor. First, *degradation indicators* have been identified from the three known degradation modes of MR fluids (discussed in the previous section). Second, the *physical properties* affected have been deduced. Third, appropriate *measuring methods* to quantify those physical properties have been proposed and tested experimentally. Finally, a preferred measuring method is selected, here an optical method, and its integration into a sensor design as well as its experimental characterization is presented in the remainder of this paper.

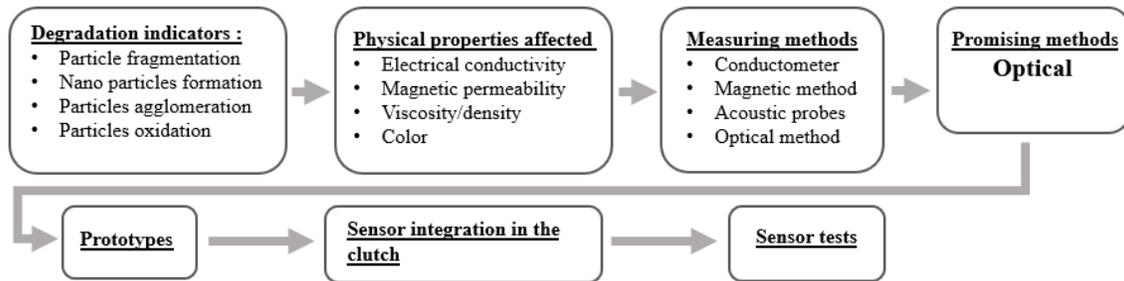


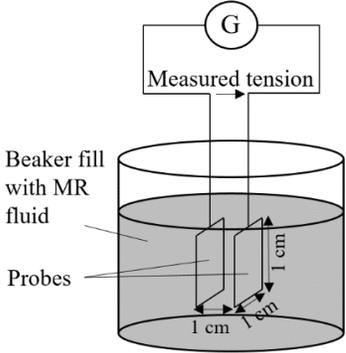
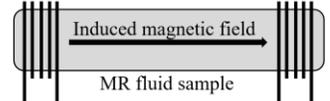
Figure 3.1 Sensor development roadmap.

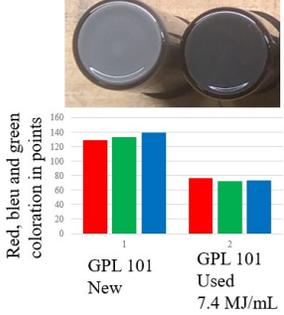
3.4. Sensor Design

3.4.1. Sensing Technology Selection

Referring to figure 3.1, four measuring methods were considered to measure electrical, magnetic, mechanical (viscosity/density), and optical properties of the MR fluid during aging. Proof-of-concept experiments were run for each of them and results are presented in the table 3.1. Among all methods tested, the optical approach appeared to be the most relevant solution to monitor MR fluid degradation and has been developed as the monitoring principle for the sensor.

Table 3.1 Description of the measuring methods tested.

Set up	Hypothesis	Experiment	Results
 <p>Beaker fill with MR fluid</p> <p>Probes</p> <p>Measured tension</p> <p>1 cm</p> <p>1 cm</p>	<p>Since formation of nano particles [26] and particle oxidation [15] have been observed during fluid aging, the particle size and the oxide layer could potentially affect the electrical conductivity of the fluid.</p>	<p>The generator emitted a 5V alternating voltage at different frequencies between 0 Hz and 20 MHz. The voltage between the two probes was monitored.</p>	<p>At 0 Hz: for both new and old fluid, 0 V is measured. At 20 MHz: 0.167 V is measured for a new fluid and 0.157 V for the old fluid. Small difference.</p>
 <p>Induced magnetic field</p> <p>MR fluid sample</p> <p>Emitting coil: 10 turns Allimented with 5V Sinusoidal current at 15 MHz</p> <p>Receiving coil: 10 turns Measure of the induced voltage</p>	<p>Larger particles tend to spall into smaller micro- and nano-sized particles [29]. There are more particles in the same volume which should reduce the eddy current induced in the fluid and therefore the amplitude of the receiving coil induced current.</p>	<p>A 5 V, 15 MHz sinusoidal signal is sent in the emitting coil, the receiving coil voltage was monitored</p>	<p>For both cases an 80 mV voltage was observed in the receiving coil. No significant difference.</p>
 <p>Emitting probe</p> <p>MR sample</p> <p>Receiving probe</p>	<p>During aging, the size of particles decreases, which increases the viscosity that could affect the time of flight or the damping of an ultrasonic wave.</p>	<p>The first probe emitted an ultrasonic wave through the MR fluid sample which is received by the second probe</p>	<p>Measured time of flight: new fluid 0.01145 s vs 0.0116 s for the old fluid. Small difference.</p>

 <p>Red, bleu and green coloration in points</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sample</th> <th>Red</th> <th>Green</th> <th>Blue</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GPL 101 New</td> <td>~130</td> <td>~135</td> <td>~140</td> </tr> <tr> <td>GPL 101 Used 7.4 MJ/mL</td> <td>~75</td> <td>~70</td> <td>~75</td> </tr> </tbody> </table>	Sample	Red	Green	Blue	GPL 101 New	~130	~135	~140	GPL 101 Used 7.4 MJ/mL	~75	~70	~75	<p>Darkening of MR fluids has been observed during aging (Hreinsson, 2011). Moreover, for the Lord fluid a dark, insoluble oily residue that coated the surface of the aged particles has been observed [29]. However, investigation of the mechanisms responsible for the presence of this layer remains to be studied.</p>	<p>Darkening was characterized by looking at the RGB colors of new and used MR fluids.</p>	<p>A 42% clearness decrease was observed between used and new fluid. A significant difference is found.</p>
Sample	Red	Green	Blue												
GPL 101 New	~130	~135	~140												
GPL 101 Used 7.4 MJ/mL	~75	~70	~75												

3.4.2. Optical Sensor Design

The fluid's color is measured with the TCS34725 sensor board, which is composed of a LED and an RGB sensor. The LED emitted a constant white light which went through the acrylic tubing and then reflected on the MR fluid and went to the RGB sensor which measured the amount of the three colors. This board has been chosen for its low price (less than 10 USD) and its ease of use. This sensor measures the color in terms of its red, blue and green components. Since no color becomes predominant during aging, only the clearness which is defined as the sum of the three colors amount is considered. The RGB data is acquired throughout aging with an Arduino Uno board every 3 minutes.

The final sensor design is presented in the figure below (figure 3.2). Most of the sensor's parts are 3D printed for fast prototyping at low cost. The RGB sensor board is maintained by the frame in front of a transparent acrylic pipe in which the MR fluid flows. The distance between the board and the pipe is chosen to have the angle of view that maximize the response of the sensor. Furthermore, as RGB sensor values depend on the lightening, an opaque shell protects the sensor from the exterior light.

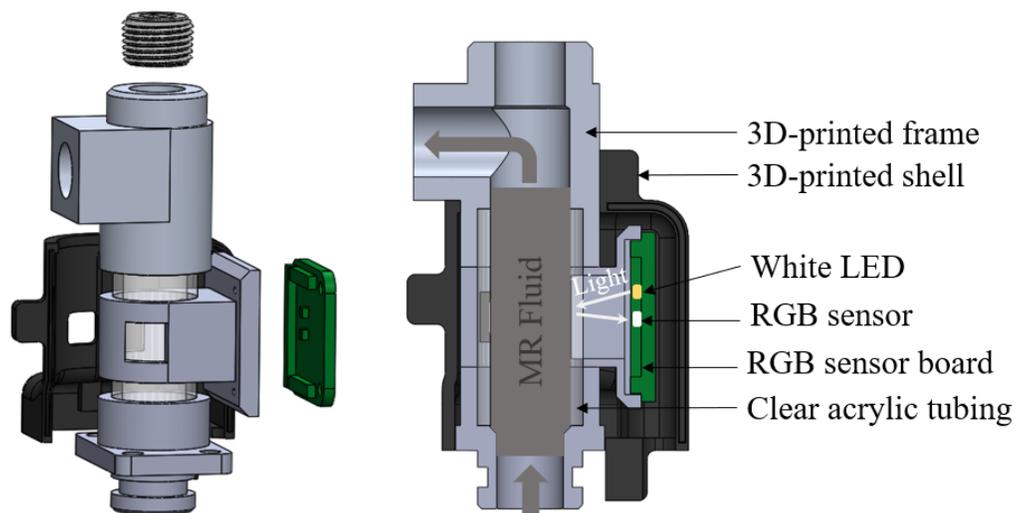


Figure 3.2 Exploded and sectional view of the monitoring sensor.

A key design consideration is that the RGB board must be exposed to a homogenous MR fluid in order to measure a *global* coloration and to avoid measuring a *local* feature such as the coloration of a stagnant or sedimented fluid. This issue is addressed by using a special clutch design with a self-pumping mechanism coupled to an external recirculation circuit where the sensor is mounted. In this way, the pumping action assures that the MR fluid is always perfectly mixed and that a homogeneous flow of MR fluid circulates in front of the RGB board. Furthermore, visual observation of the acrylic tubing at the end of

sensor tests validates that MR fluid does not adhere to the transparent walls in front of the sensor which could have caused false results.

MR fluid pumping is achieved by using a grooved drum configuration which acts like a magnetic screw pump where the MR fluid form semi-solid screw flights [30]. Moreover, MR fluid recirculation significantly improves fluid durability because pumping assures that wear is more evenly shared among all the volume of fluid, and not only the fluid in the shear zone. The sensor was placed at the beginning of the recirculation circuit because the fluid is forced to fully fill the sensor's sensing area by the pumping effect (figure 3.3).

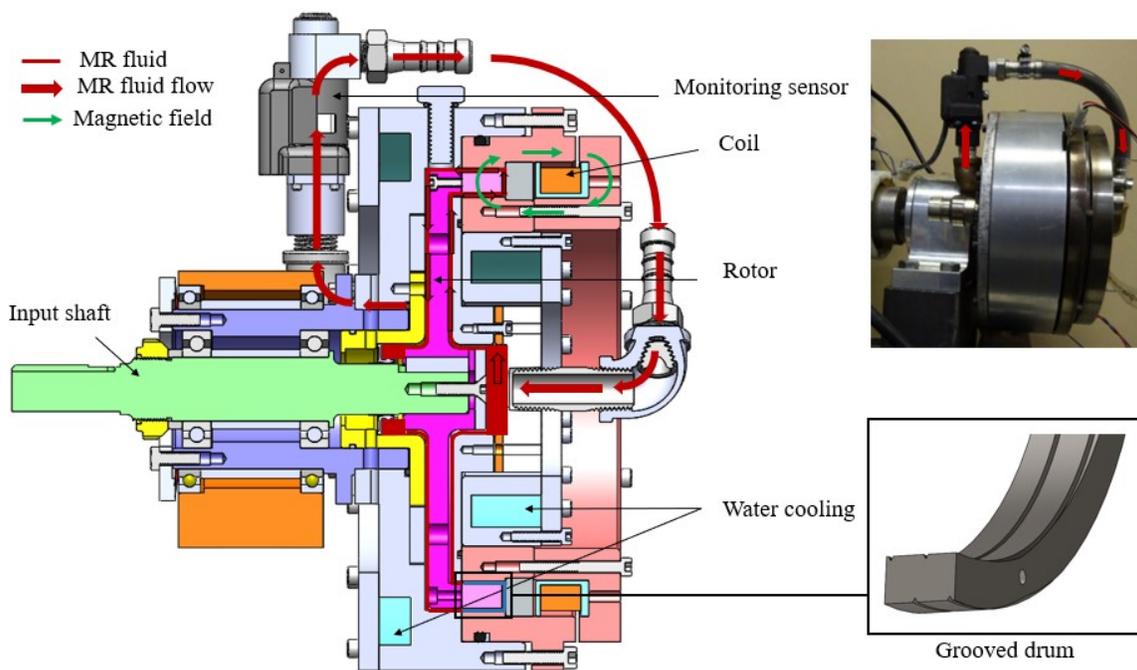


Figure 3.3 Sectional view and picture of the durability test clutch [30]. The recirculation hose is not represented in the sectional view (see picture)

3.5. Experimental Results

3.5.1. Durability Test Bench

The sensor and clutch have been set up in a test bench controlled by a National Instruments compactRio cRIO-9024 that monitored the output torque, the coil current, the pressure, and the temperature. The clutch used was a mono drum clutch (figure 3.3) in continuous slippage with constant input rotational velocity throughout the test. The output was blocked by a load cell (MLP-300 from Transducer Techniques) measuring the resulting torque. A grooved drum was used to pump the fluid in a recirculation circuit in

which the monitoring sensor was inserted. Clutch shear zone temperature was maintained constant at 30-40°C by using two water cooling circuits extracting the dissipated energy and exchanged it with the air using a chiller (REMCOR CH1500 series chiller) and two thermocouples (OMEGA KMQSS-062G-6) measuring the coil and the shear zone temperature. Moreover, to prevent leaks caused by MR fluid outgassing, a pressure sensor (SSI technologies Inc P51-15-G-UC-I36-4.5V) measures pressure which was manually released by opening a purge valve as soon as it reached 10 psi.

The RGB sensor performance was studied with two different MR fluids classes: a commercially available MR fluid specifically designed for clutch operation (Lord 140CG) and a homemade perfluoropolyether (PFPE) base oil fluid, the GPL-103, which is described in the literature (Jonsdottir et al., 2009), [31]. GPL-103 fluid is composed of 40% in volume of carbonyl iron EM particle from BASF, 55% of GPL-103 oil and 5% of Krytox 157 FSL oil, which is a dispersant agent that improves thermal stability.

3.5.2. Experimental Method

The fluid aging sequence consisted in two steps. During the first step, the current is adjusted in closed loop to maintain a constant output torque during one hour. In the second step, the fluid state is characterized using a one minute open loop sequence during which current steps are sent to the clutch and the resulting torque was measured. This sequence is repeated and the fluid is considered as fully used when the torque has decreased by more than 30% of its initial torque response for a given current (see figure 3.4).

When the output torque aging criteria is reached, the fluid's clearness is measured with the monitoring sensor. The RGB sensor sends back the amount of red, green and blue coded in 16 bits. Thus, clearness is calculated as the sum of these three colors, its value is therefore between 0 and 65535. Furthermore, as the clearness is very sensitive to the LED enlightenment and to the difference of geometry, it is normalised so that the initial clearness value is 100% and the 0 points of clearness which correspond to a perfect shade of black is 0%. The normalised clearness can be calculated with the equation 3.2. Therefore, a clearness of 110% means that the clearness is 10% bigger than the initial clearness.

$$\text{normalised clearness (\%)} = 100 \times \frac{\text{clearness}}{\text{initial clearness}} \quad (3.2)$$

Figure 3.4 shows a typical result for a Lord 140CG fluid, which has been used at 20 N.m and 150 RPM and has reached a LDE of 27 MJ/mL. This end-of-life age is defined as the

age reached when the torque at 3 A drops by more than 30% (figure 3.4). The decrease in clearness means that the fluid becomes darker. Moreover, it correlates linearly with the aging of the fluid. Consequently, this test supports that MR fluid clearness can be used as a proxy measure of its age. The method requires to calibrate or preset a threshold in clearness decrease in order to determine when the fluid should be considered fully used.

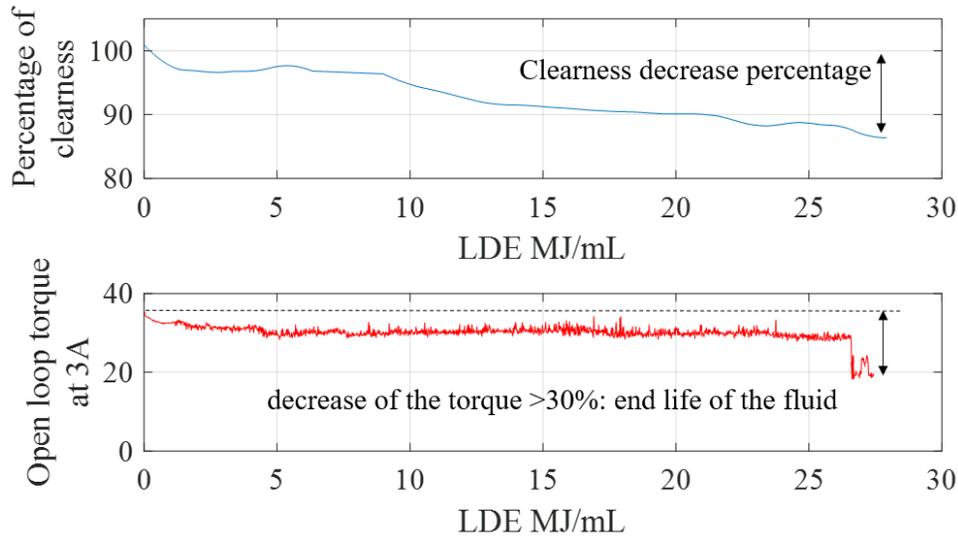


Figure 3.4 Typical results of the clearness (upper curve) and the torque and current relationship (lower curve) of a Lord 140CG fluid.

3.5.3. Results

Lord 140CG:

Three tests were made with Lord 140CG. The test conditions are summarized in table 3.2 and were selected to represent varying conditions of torque, RPM, and dissipated power. Figure 3.5 a) presents the fluid clearness during aging in function of the LDE. The clearness is normalised in percentage with the method previously described.

The final darkening reached by the three fluids are close, 13% 12.1% and 11.5% respectively for tests 1, 2 and 3. These results strengthen the correlation between aging and clearness decrease and support that the fluid aging can be monitored by measuring the clearness decrease. Indeed, a final criterion of 12% of clearness decrease can be taken so that as long as the clearness decrease of the fluid is inferior to this criterion, it is considered still usable.

The variations in LDE at end-of-life is attributed to base oil leaks which are known to decrease durability [27]. Indeed 1-2 mL leaks have been observed during tests 2 and 3

which explains their lower LDE's of 7.9 MJ/mL and 9.6 MJ/mL compared to the LDE of 27.8 MJ/mL of test 1 (with no leaks). It should be noted that the absolute volume of fluid leaks were small (1-2 mL in a total of 65 mL) compared to the volume of hydraulic fluid that can leak from conventional, highly pressurized hydraulic systems. The leaks cause an increase of about 1% of the iron concentration in the fluid. Effect of MR fluid on hydraulic seal leakage is starting to be understood and a better seal design could help to solve the leakage issues [32]. Since the three tests reach an equivalent end-of-life at widely varying LDE, it can be concluded that LDE may not be the best discriminant to monitor fluid condition in practical devices. In order to further study the effect of degradation on fluid clearness, aging results have been normalized such that 100% of degradation corresponds to the maximal LDE reached by the fluid and that 0% of degradation corresponds to the degradation at the beginning of the test (i.e., no degradation). The normalised clearness results are presented in figure 3.5 b). It clearly appears from this graph that for the three tests, clearness has decreased by 12 % at the end of life regardless of operating conditions such as torque, RPM, and dissipated power and the presence of leaks or not. Moreover, a linear regression of the three clearness curves shows a strong regression coefficient of a 0.95. Thus, for results presented in this paper with the Lord 140CG, the clearness appears to be a better metric than LDE to represent the real state of MR fluid degradation status.

It should be noted that much more tests are needed to fully conclude that the final clearness decrease reached by the fluid is completely independent from the aging conditions. Moreover, tests were performed at constant temperature conditions, which is known to be a sensitive factor for MR fluid durability (Desrosiers et al., 2012). Consequently, other tests at different temperatures are needed to study its effects on the clearness decrease correlation.

Table 3.2 Experimental conditions with Lord 140CG MR fluid.

<i>Test</i>	<i>Test 1</i>	<i>Test 2</i>	<i>Test 3</i>
<i>Torque</i>	20 N.m	40 N.m	20 N.m
<i>Rotational speed</i>	150 RPM	100 RPM	150 RPM
<i>Dissipated power</i>	314 W	418W	314W
<i>Fluid quantity</i>	70 mL	72 mL	73 mL
<i>Temperature</i>	30-40°C	30-40°C	30-40°C
<i>LDE reached</i>	27.8 MJ/mL	7.9 MJ/mL	9.6 MJ/mL
<i>number of test hours</i>	1722 h	378 h	620 h

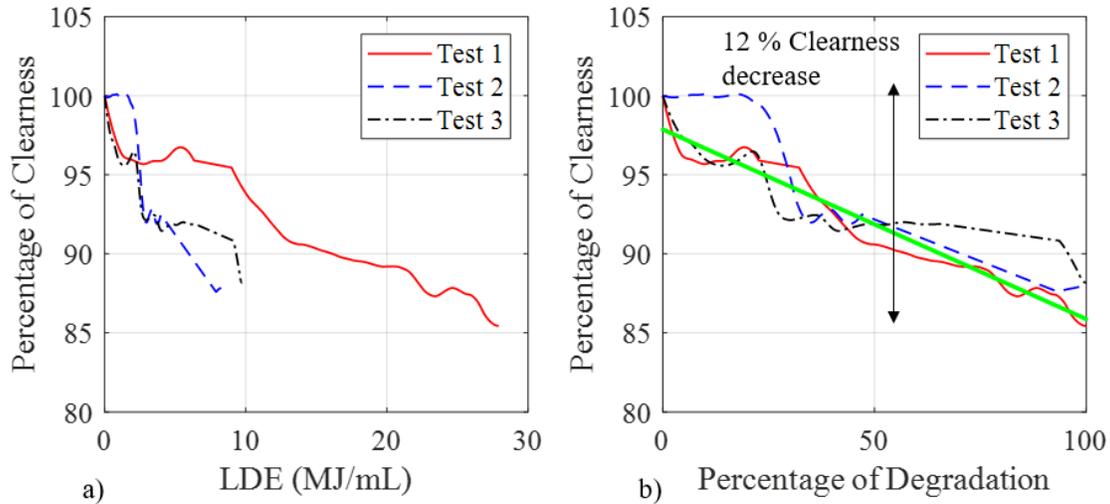


Figure 3.5 *a)* Clearness results for Lord140CG tests in function of the LDE. *b)* Clearness results for Lord 140CG tests in function of the percentage of degradation.

To sum up the Lord 140CG results, the fluid condition can be determined with the following method. The fluid clearness is measured with the proposed sensor. If it is under 12% the fluid is still usable. If not, the fluid must be replaced.

GPL-103:

Three tests were made with GPL-103 homemade fluids. This fluid has been tested because it has shown sufficient lifetime capabilities for flight control applications (~ 10 MJ/mL) [33] and because it does not outgas as much as Lord 140CG during constant load operation over long periods. The test conditions are summarized in table 3.3 and were selected to represent varying conditions of torque, rpm, and dissipated power. The results of these tests have been normalised with the same method used for the Lord 140CG. The clearness signature for the GPL-103 tests (figure 3.6 a)) are similar to each other but are different from the tests performed with the Lord 140CG MR fluid since they exhibit three phases, a first one where the clearness decreases, and a second one where the clearness actually increases. During phase one, both the GPL-103 and the Lord 140CG fluid signatures are similar showing a clearness decrease due to fluid darkening. In phase two, the clearness of the GPL-103 fluid as measured in front of the RGB sensor increases and then becomes erratic (see figure 3.6).

Visual observations of the fluid flow through transparent recirculation window confirms that the fluid flows freely during phase one, but is blocked during phase two. As the RGB sensor only sees the same unmixed fluid after long periods of no-flow conditions, the clearness becomes no longer meaningful and clearness acquisition is stopped and replaced by straight lines on figure 3.6 (phase 3). Furthermore, circulation blockage occurs

at 0.9 MJ/mL, 5.5 MJ/mL and 2 MJ/mL respectively for tests 4, 5 and 6 which is much sooner than the fluid end-of-life as defined by the 30% open loop torque decrease criterion occurring respectively at, 11.8 MJ/mL, 9.6 MJ/mL and 8 MJ/mL.

However, according to figure 3.6 b), at flow blockage onset at the end of phase one, the fluid has not reached the same clearness decrease (11%, 7% and 4%) and moreover for the same degradation percentage the tests show different values of clearness decrease. Thus, unlike the normalised results from the Lord 140CG fluid in figure 3.6 b), no clear correlation can be made between clearness decrease and aging as defined by the torque-to-current degradation.

Table 3.3 GPL-103 tests specifications

Test	Test 4	Test 5	Test 6
Torque	40 N.m	20 N.m	40 N.m
Rotational speed	150 RPM	150 RPM	100 RPM
Dissipated power	628 W	314W	418W
Fluid quantity	65 mL	76 mL	72 mL
Temperature	30-40°C	30-40°C	30-40°C
LDE reached	11.8 MJ/mL	9.6 MJ/mL	8 MJ/mL
number of test hours	339 h	645 h	383 h

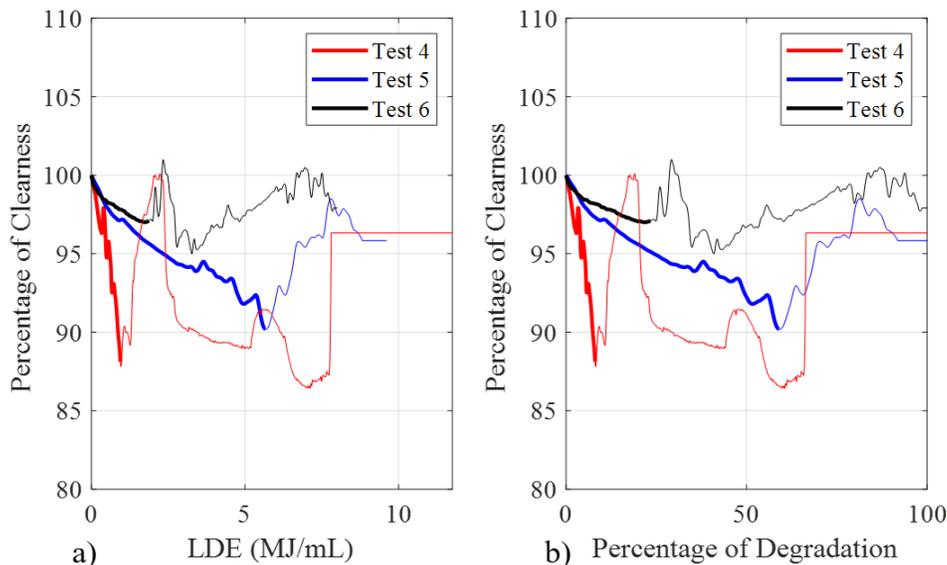


Figure 3.6 a) GPL-103 clearness results in function of the LDE. b) GPL-103 clearness results in function of the percentage of degradation. Bold parts of the curves: free flow (phase 1). Not bold part: blocked flow (phases 2 and 3).

The nature of circulation blockage can be explained by looking at figure 3.7 which presents clearness measurements as well as measurements of the fluid viscosity calculated at each hour from the viscous torque (i.e. at 0 A in coil) of the clutch response to a velocity ramp. The viscosity curve of the three tests shows an increase of more than 100 % at the inflexion point of the clearness curve when it starts to increase which strongly suggests that the clearness increase is due to blockage in the recirculation because of a viscosity increase.

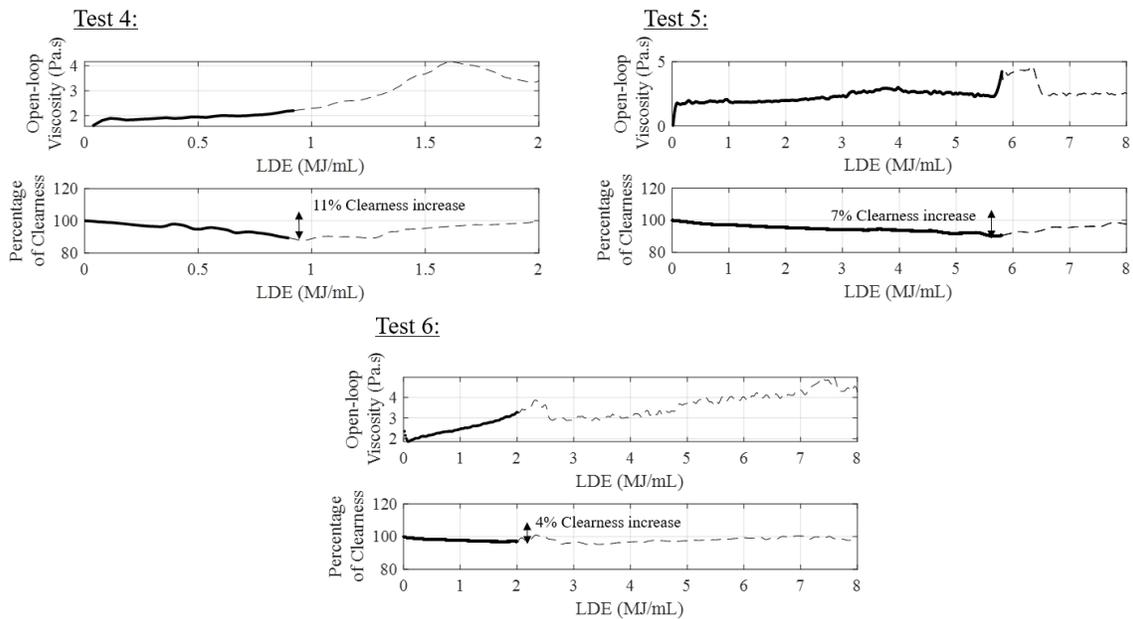


Figure 3.7 Comparison between the clearness and the viscosity during GPL-103 tests. When the curve is in dotted line the fluid should be changed since recirculation issues occur and that the fluid state can no longer be monitored by the sensor.

A viscosity increase of the fluid eventually leads to flow blockage in the recirculation circuit, which in turn, causes segregation of the particles from the base oil by sedimentation. All MR fluids are affected by sedimentation when the fluid is not shaken or held in movement. As the sensor is at the highest position of the recirculation circuit, when there is no flow in front of the sensor, the fluid sediments and the sensor sees a brighter fluid since the dark and heavier particles go to the bottom and the clear and light base oil goes on top.

Controlled sedimentation tests have been made to validate the effect of sedimentation on fluid clearness measurements. In this test, the sensor has been placed at the top of a tube (12.7 X 120 mm) fully filled with GPL-103 to record clearness data during

sedimentation (figure 3.8 a)). The fluid was first shaken to insure fluid homogeneity before being introduced in the tube. A total clearness of 4% is observed after 100 hours of sedimentation with a rapid jump of 3% in the first 10 hours (figure 3.8 b). The quick sedimentation of GPL can be explained by the fact that it is a simple home-made fluid that does not have anti-sedimentation additives to slow the phenomenon.

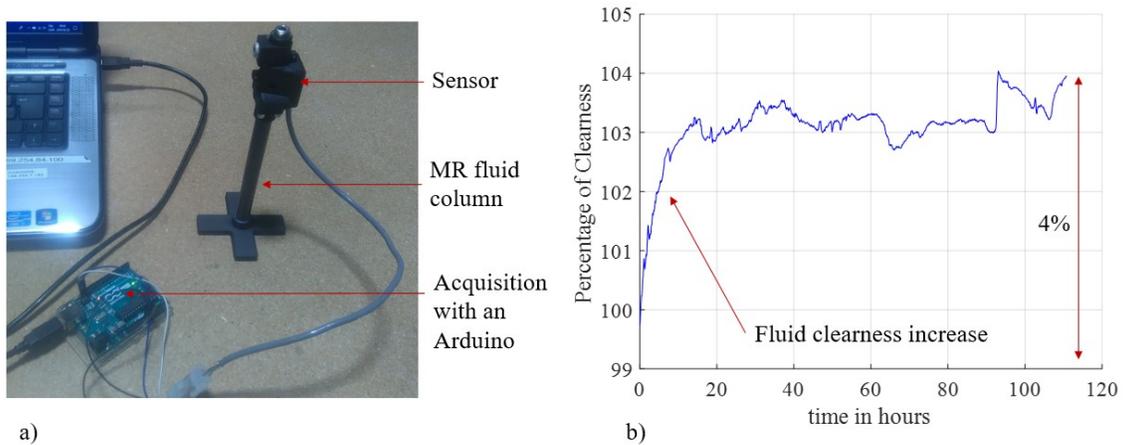


Figure 3.8 Set up used and results of the test of brightening during sedimentation. *a)* Picture of the setup. *b)* Clearness results of a GPL-103 during sedimentation.

To sum up, the tests with GPL-103 all presented circulation issues at some point during aging. These issues are specific to the design of the test clutch for this given fluid. Indeed, the same test clutch showed no circulation issue for the Lord 140CG fluid. Here, a combination of a clutch with a stronger pumping effect and/or a larger recirculation circuit and/or improved fluid formulation would certainly have decreased clogging occurrences and recirculation issues. This highlights the importance of having a properly matched combination of MR fluid / clutch design to ensure proper fluid circulation for the optical sensor approach to be fully effective. If otherwise, the optical approach can only identify the onset of blockage and cannot identify full fluid end-of-life as defined by a torque-to-current criterion. The drawback in this case is that blockage begins when the clutch is still functional ($\sim 1\text{MJ/ml}$) with plenty of life left (up to $\sim 10\text{MJ/ml}$).

3.6. Conclusion

3.6.1. Summary

This work presented the design, fabrication and testing of an optical sensor measuring the state of aging of MR fluids during operation. Preliminary tests on fluid coloration have demonstrated a strong correlation between aging and clearness decrease of the fluid.

A prototype sensor was designed and tested with two widely known MR fluid families, the commercially available Lord 140CG and a homemade PFPE fluid made with GPL-103. Tests were run with a fully instrumented clutch installed in an automated durability test bench. The three tests conducted on the Lord fluid have shown a good correlation between aging and clearness decrease that can be used to monitor fluid condition and even predict remaining life. The three GPL-103 tests do not correlate as well and have shown a different two phase signature where the fluid first darkens and then brightens because of fluid sedimentation in front of the RGB board due to recirculation issue caused by the fluid thickening and sedimentation. The conclusions and limitations that can be drawn from this study are:

- It is possible to monitor MR fluid degradation by looking at the fluid color or clearness. Depending on the given combination of MR fluid and clutch design, useful information can be extracted on fluid life and circulation flow status:
 - o A strictly decreasing clearness indicates degradation of the fluid
 - o A decreasing clearness followed by a sudden clearness increase indicates recirculation flow blockage caused by the viscosity increase which leads to the fluid sedimentation in the sensor area.
- It was observed that, for the Lord 140CG fluid tested in the limits of this study, clearness appears to be a better indicator of fluid condition than the LDE metric since it better correlates with real open-loop torque-to-current performance decrease. This observation is not made with the PFPE-based GPL-103 fluid.
- Failure signature patterns and quantitative thresholds must be calibrated for each MR fluid and clutch design pairs. For example, the test clutch used in this paper combined with Lord 140CG fluid lead to the definition of a failure criterion of 12% loss of clearness as corresponding to a 30% loss of open-loop torque-to-current. A different fluid in a different clutch design is likely to behave differently and use different threshold values.
- Results from this study are a first illustration of the feasibility of a new MR fluid condition monitoring technique. Reported values are for a single clutch design with two fluids. Many more tests with various fluids and clutch designs are needed to generalize the conclusions on optical monitoring and fully understand MR fluid aging behavior.

3.6.2. Future work

Other than gathering more experimental data on optical condition monitoring, two major design improvements are needed before optical sensors can become practical solutions for MR clutch systems. First, recirculation circuits should be integrated in the clutch to be more compact and to prevent blockage occurrences. For example, circuits could be made to sit entirely inside the clutch environment without any external tubing that is more prone to blockage because there are longer and generate more pressure drop. Second, the approach must be tested in real-life systems or on test benches replicating real-life conditions both with variable loads, temperature variations, and appropriate unused periods allowing the fluid to settle down in order to investigate the behavior of an optical sensor under real operating conditions, transients, and perturbations.

Acknowledgements

This research is supported by the CRIAQ of Québec, the NSERC of Canada, Bell Flight and Gastops.

CHAPITRE 4

CONCLUSION

4.1. Sommaire

Dans le domaine aéronautique les requis de fiabilité des systèmes sont très élevés. Afin d'augmenter la fiabilité des embrayages MR inclus dans un système de commande de vol, un capteur assurant le suivi de l'usure du fluide est nécessaire pour garantir l'état de l'embrayage à tout moment. Ce travail présente ainsi le choix d'un principe physique pour mesurer la dégradation du fluide, puis la conception et le test d'un prototype de capteur.

Le prototype développé s'appuie sur un principe physique optique, la clarté du fluide est mesurée par un capteur RGB. Les premiers tests ont montré une bonne corrélation entre la diminution de la clarté du fluide et son état de dégradation. Le prototype a été testé avec deux types de fluides communs dans la littérature, un fluide commercial le Lord 140CG et un fluide maison le GPL-103 utilisant du PFPE comme huile de base. Le capteur a été testé sur un banc de test instrumenté autonome.

Les trois tests effectués sur le fluide Lord 140CG ont montré une bonne corrélation entre la diminution de la clarté du fluide et son vieillissement ce qui permet de mesurer l'état de dégradation du fluide. Les résultats obtenus avec le fluide GPL-103 n'ont pas montré une aussi bonne corrélation entre la diminution de la clarté et le vieillissement du fluide. En effet, la signature de clarté du GPL-103 montre deux phases. Dans la première, le fluide a une signature similaire à celle du Lord 140CG, il s'assombrit (la clarté du fluide diminue) tandis que dans la deuxième il s'éclaircit (la clarté augmente). L'éclaircissement est dû à la sédimentation du fluide devant le capteur, causé par des problèmes de recirculation du fluide due à l'augmentation de la viscosité du fluide. Ainsi, les conclusions et les limitations de ces travaux sont les suivants :

- 1- La mesure de la dégradation du fluide par l'observation de sa clarté est possible. Dépendamment du couple fluide embrayage utilisé. Les informations utiles suivantes peuvent être déduites :
 - a. Une décroissance de la clarté indique une usure du fluide.
 - b. Une décroissance de la clarté suivie d'une augmentation soudaine de la clarté indique un blocage du fluide dans le circuit de recirculation, causé par l'augmentation de la viscosité puis à la sédimentation du fluide devant le capteur.

- 2- Pour le Lord 140CG aux conditions de test utilisées, la clarté semble être une meilleure métrique pour caractériser la dégradation du fluide que la LDE. En effet la clarté semble être linéairement lié au pourcentage de dégradation du fluide. Cependant, cette observation n'est pas valable pour le GPL-103.
- 3- La signature de clarté ainsi que le pourcentage de diminution de la clarté du fluide atteint lors de la fin de vie du fluide doivent être calibrés pour chaque type de fluide et d'embrayage. Ainsi pour l'embrayage testé dans ces travaux avec du fluide Lord 140CG un critère d'usure de 12% de perte de clarté peut être pris et correspond à une perte de 30% du couple en boucle ouverte. Un autre fluide ou un autre embrayage auraient données un résultat différent.
- 4- Les résultats de cette étude sont une première illustration de la faisabilité d'un capteur optique pour mesurer la dégradation du fluide. Les données ont été obtenues pour un type unique d'embrayage et pour deux types de fluides différents. Ainsi, d'autres tests avec d'autres types de fluides et d'embrayage seraient nécessaires pour généraliser les conclusions sur le capteur optique et pleinement comprendre le comportement du vieillissement du fluide MR.

4.2. Perspectives

Le capteur présenté dans ce mémoire est une preuve de concept, ainsi de nombreuses améliorations sont à apporter avant l'embarquement de ce capteur dans un système réel. Plusieurs grands axes sont à développer.

De multiples tests préliminaires réalisés sur des échantillons de fluide MR ont permis de choisir une technologie optique se basant sur l'assombrissement du fluide pour la conception de ce capteur. Cependant une autre piste prometteuse proposée ultérieurement et n'ayant pas été testée serait de fabriquer un capteur miniature mesurant la force de cisaillement du fluide MR directement au niveau du tambour de l'embrayage. En effet, pour une intensité fixe dans la bobine de l'embrayage et pour une vitesse de rotation donnée le cisaillement diminue avec l'usure du fluide.

Le but de cette maîtrise était de proposer un premier prototype de capteur de suivi de la dégradation du fluide MR, ainsi un nombre limité d'essais de ce capteur a été réalisé. Des données supplémentaires pour renforcer la corrélation entre l'assombrissement et le vieillissement du fluide sont nécessaires. Il faudrait compléter les résultats obtenus en testant le capteur avec d'autres types de fluides (Lord 122CG, Lord 132CG par exemple) et tester d'autres conditions d'usures, spécialement la température. Les travaux précédant ont montré que la température a un effet important sur la durée de vie du fluide MR [27]. À ce jour le capteur a été testé seulement à une seule vitesse de rotation (150 tr/min) et à trois couples de sortie de l'embrayage (20, 40 et 60 N.m). D'autres

conditions d'usure permettraient d'une part d'évaluer l'effet de ces paramètres sur la relation assombrissement/usure et d'autre part, d'améliorer la compréhension des mécanismes d'usure des fluide MR commencée dans les travaux précédents [32]. Enfin, des tests du capteur sur un banc de test simulant des conditions réelles d'utilisation seraient nécessaires pour valider son comportement à des conditions variables.

Les tests réalisés lors de cette maîtrise ont montré une première limitation du design du couple embrayage capteur. Les tests 4, 5 et 6 avec du fluide GPL-103 ont tous eu des problèmes de bouchage du circuit de recirculation, ce qui a rendu le capteur inopérant dès la première moitié de la vie du fluide. Les designs actuels du capteur et de l'embrayage sont ainsi à améliorer à partir des recommandations suivantes. Le circuit de recirculation pourrait être amélioré en augmentant sa section et en ajustant sa géométrie afin de diminuer les pertes de charges et de favoriser la circulation du fluide. Par ailleurs, l'utilisation d'embrayage multi-tambours rainurés permettrait non seulement d'augmenter la compacité de l'embrayage (meilleure rapport couple/masse) mais également d'augmenter sa force de pompage via un effet de pompe multi étages généré par les tambours. L'autre possibilité serait de concevoir un embrayage avec un capteur intégré directement à l'intérieur. Le défi serait de s'assurer que le fluide soit toujours renouvelé et en mouvement devant le capteur. Cette architecture supprimerait le circuit de recirculation pourtant connu pour avoir un effet bénéfique sur la durée de vie du fluide [29].

En parallèle de l'amélioration du design du capteur, un travail de mise aux normes et aux standards de l'aéronautique serait nécessaire. Le premier prototype utilise une carte RGB commerciale qu'il faudrait remplacer par une version spécialement conçue pour cette application et suivant les normes de conception des circuits imprimés en aéronautique.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] P. Chouinard, « Conception et validation expérimentale d'un système d'embrayages magnétorhéologiques à glissement continu pour les commandes de vol d'aéronef », thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 2014.
- [2] J. Rabinow, « The Magnetic Fluid Clutch », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, n° 2, p. 1308-1315, janv. 1948
- [3] J. Rabinow, « Magnetic fluid torque and force transmitting device », US2575360A, 31-oct-1947.
- [4] R. Jacob, « Magnetic fluid shock absorber », US2667237A, 26-janv-1954.
- [5] N. Wereley, « Magnetorheology: Advances and Applications », *Royal Society of Chemistry*, p. 396, 2013.
- [6] J.-P. Lucking Bigué, « Étude du comportement des fluides magnétorhéologiques (MR) en compression-cisaillement simultanée », thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 2016
- [7] J. D. Carlson, « What Makes a Good MR Fluid? », *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 13, n° 7-8, p. 431-435, 2002
- [8] J. D. Carlson, « MR fluids and devices in the real world », *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 19, n° 07n09, p. 1463-1470, avr. 2005
- [9] V. R. Iyengar et R. T. Foister, « Durable magnetorheological fluid compositions », US6599439B2, 29-juill-2003.
- [10] E. Hreinsson, « Durability of a Magnetorheological Fluid in a Prosthetic Knee Joint », mémoire de maîtrise, University of Iceland, Reykjavik, Iceland, 2008.
- [11] D. Vallée, « Optimisation d'un embrayage magnétorhéologique à disques », mémoire de maîtrise, Université de Laval, Québec, QC, Canada, p. 158, 2016.
- [12] J. D. Carlson, « Critical factors for MR fluids in vehicle systems », *International Journal of Vehicle Design*, vol. 33, n° 1, p. 207-217, 2003.
- [13] V. R. Iyengar et R. T. Foister, « Durable magnetorheological fluid compositions », US6599439B2, 29-juill-2003.
- [14] T. L. Forehand et D. E. Barber, « High durability magnetorheological fluids », US8828263B2, 09-sept-2014.
- [15] S. R. Sunkara, T. W. Root, J. C. Ulicny, et D. J. Klingenberg, « Iron oxidation and its impact on MR behavior », *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 149, p. 012081, 2009.
- [16] V. R. Iyengar, R. T. Foister, et J. C. Johnson, « MR fluids containing magnetic stainless steel », US6679999 B2, 20-janv-2004.
- [17] J. C. Ulicny, M. P. Balogh, N. M. Potter, et R. A. Waldo, « Magnetorheological fluid durability test-Iron analysis », *Materials Science and Engineering: A*, vol. 443, n° 1-2, p. 16-24, 2007.
- [18] W. P. Jones, « Investigation of Magnetic Mixtures for Clutch Application », *Power Apparatus and Systems*, vol. 72, n° 2, p. 88-92, 1953.

- [19] A. Wiehe, C. Kieburg, et J. Maas, « Temperature induced effects on the durability of MR fluids », *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 412, n° 1, p. 012017, 2013.
- [20] G. T. Ngatu et N. M. Wereley, « Viscometric and Sedimentation Characterization of Bidisperse Magnetorheological Fluids », *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, n° 6, p. 2474-2476, juin 2007.
- [21] D. Muir et B. Howe, « In-line oil debris monitor (ODM) for the advanced tactical fighter engine », *GasTOPS LTD*, Glouster, ON, Canada, 1996.
- [22] F. Mendoza, P. Dejmek, et J. M. Aguilera, « Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis », *Postharvest Biology and Technology*, vol. 41, n° 3, p. 285-295, sept. 2006.
- [23] P. P. Phulé, « Magnetorheological (MR) fluids: Principles and applications », *Smart Materials Bulletin*, vol. 2001, n° 2, p. 7-10, févr. 2001.
- [24] Hreinsson, Einar, « High durability magnetorheological fluids », University of Iceland, Reykjavik, Iceland 2011.
- [25] A. L. Smith, J. C. Ulicny, et L. C. Kennedy, « Magnetorheological Fluid Fan Drive for Trucks », *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 18, n° 12, p. 1131-1136, 2007.
- [26] F. Jonsdottir, K. H. Gudmundsson, F. Thorsteinsson, et O. Gutfleisch, « Bidisperse Perfluorinated Polyether (PFPE)-Based Magneto-Rheological Fluids in a Prosthetic Knee », *Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 2009.
- [27] J.-F. Desrosiers, J.-P. L. Bigué, M. Denninger, G. Julió, J.-S. Plante, et F. Charron, « Preliminary investigation of magneto-rheological fluid durability in continuous slippage clutch », in *Journal of Physics: Conference Series*, Ankara, Turkey, 2012, vol. 412, p. 012022.
- [28] A. Wiehe et J. Maas, « Large-scale test bench for the durability analysis of magnetorheological fluids », *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, p. 1045389X12453960.
- [29] X. Chen, M. P. Andrews, A. Landry-Blais, J.-P. Lucking Bigué, et J.-S. Plante, « Investigation of shear-induced physical and chemical transformations of Fe microparticles in hydrocarbon- and fluorocarbon-based magnetorheological fluids », *Smart Material and Structures*, févr. 2019.
- [30] R. Pilon, J.-S. Plante, F. Charron, et M. Picard, « Étude d'une pompe à vis magnétique pour améliorer la durabilité des embrayages magnétorhéologiques », mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 2018.
- [31] K. H. Guðmundsson, « Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry » thèse de doctorat, University of Iceland, Reykjavik, Iceland, 2011.
- [32] P. Zhang, K.-H. Lee, et C.-H. Lee, « Wear Behavior of Rotary Lip Seal Operating in a Magnetorheological Fluid Under Magnetic Field Conditions », *Journal of Tribology*, vol. 140, n° 2, p. 022201, mars 2018.
- [33] J.-P. Lucking Bigué *et al.*, « On the relation between the Mason number and the durability of MR fluids », *Smart Materials and Structures*, janv. 2019.

