

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie mécanique

Fiabilité et durabilité d'un embrayage  
magnétorhéologique utilisé en glissement  
continu pour le contrôle des surfaces de vols  
primaires d'aéronefs

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie mécanique

Jean-François Desrosiers

Jury : François CHARRON (co-directeur)  
Jean-Sébastien PLANTE (co-directeur)  
Gustave NFONGUEM  
Richard ARÈS



À ma mère et à mon père,  
pour avoir cru en moi



# RÉSUMÉ

Le projet de recherche financé par une subvention RDC du CRSNG et le CRIAQ est un partenariat entre Bombardier Aéronautique, Bell Helicopter, l'Université de Sherbrooke et l'Université Laval. **Le principal objectif de ce projet est d'évaluer le potentiel de remplacer les actionneurs hydromécaniques par des actionneurs électromécaniques pour les commandes de vols primaires du Bell 407.**

La composante critique de l'actionneur électromécanique visé est un embrayage magnétorhéologique (MR). En effet, le fonctionnement de ce type d'embrayage est bien connu, mais la fiabilité ainsi que la durabilité de cette technologie restent à être prouvées. **Le présent projet de maîtrise consiste donc à étudier la fiabilité ainsi que la durabilité d'un embrayage MR utilisé en glissement continu.**

Dans un premier temps, une analyse de fiabilité du système complet aux composantes (*Top-Down*) a été réalisée selon les méthodes et les techniques standards (FMEA et FTA) utilisées dans le domaine de l'aéronautique. Le manque d'informations concernant les modes de défaillance et la durabilité des embrayages MR a nécessité une étude expérimentale. Pour ce faire, un banc d'essais de longue durée complètement autonome a été conçu et fabriqué. Au total, 1750 heures de tests en glissement continu ont été réalisées sur des embrayages MR. Il y avait deux objectifs à ces tests. Le premier était d'étudier l'effet des paramètres d'opération (température, vitesse, couple) sur la durée de vie du fluide MR. Le deuxième était d'évaluer l'impact de la dégradation du fluide MR sur les performances d'un embrayage MR. Au final, le projet de recherche a permis de :

1. **Évaluer les requis de fiabilité** pour chacune des composantes d'un embrayage MR lorsqu'utilisé dans un système d'actuation pour des commandes de vol primaire d'un hélicoptère ;
2. **Obtenir une compréhension plus fine du processus de dégradation** du fluide MR et l'impact sur les performances des embrayages MR ;
3. **Doubler la durée de vie des embrayages MR** par le développement d'une technique de circulation interne du fluide MR permettant l'utilisation d'un plus grand volume de fluide MR et ce, sans pénalité de poids, de volume et de coût.

**Mots-clés :** Fiabilité, durabilité, embrayage magnétorhéologique, fluide magnétorhéologique, mode de défaillance



# REMERCIEMENTS

Premièrement, je remercie ma mère, **Sylvie Granger**, et mon père, **Michel Desrosiers**, pour m'avoir supporté et encouragé durant toutes mes années d'études. Que ce soit en me faisant réciter mes premières leçons ou en m'encourageant à persévérer durant les dernières années.

Je remercie ma copine, **Cynthia Plante** qui m'a accompagné pendant toutes mes années universitaires. Je te remercie pour tes encouragements et ton soutien moral qui ont été d'une aide exceptionnelle et qui m'ont permis de croire en moi, en mes compétences.

Je remercie mon collègue, **Jean-Philippe Lucking Bigué**, pour ton incroyable aide et toutes ces soirées passées au laboratoire. Je te remercie aussi pour ton grand intérêt envers mon projet de maîtrise.

Je remercie mon collègue, **Patrick Chouinard**, pour notre belle complicité et pour ton soutien lors de ma présentation à la conférence en Hollande.

Je remercie tous les membres du laboratoire **CAMUS** qui m'ont supporté et aidé lors de ma maîtrise, particulièrement les membres du projet ENV404. Vous êtes une merveilleuse gang inspirante et motivante qui donne le goût de la recherche.

Je tiens aussi à remercier, mes directeurs, **François Charron** et **Jean-Sébastien Plante**, pour leurs visions et leurs idées qui ont fait cheminer mon projet de maîtrise.

Finalement, je remercie **Bombardier Aéronautique** et **Bell Helicopter** pour avoir donné naissance au projet ENV404 et du même coup, de m'avoir donné la chance d'y participer.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1	Mise en contexte et problématique . . . . .	1
1.2	Définition du projet de recherche . . . . .	2
1.3	Plan du document . . . . .	3
<b>2</b>	<b>CADRE DE RÉFÉRENCE - FIABILITÉ</b>	<b>5</b>
2.1	Introduction à la fiabilité . . . . .	5
2.2	Calcul de la fiabilité . . . . .	6
2.2.1	Densité de probabilité . . . . .	6
2.2.2	Probabilité . . . . .	6
2.2.3	Taux de défaillance . . . . .	8
2.3	Approche de conception pour la fiabilité . . . . .	9
2.4	Détection et isolation de fautes . . . . .	11
<b>3</b>	<b>ÉTAT DE L'ART - FLUIDE MR</b>	<b>13</b>
3.1	Composition du fluide MR . . . . .	13
3.1.1	Particules ferromagnétiques . . . . .	13
3.1.2	Fluide porteur . . . . .	14
3.1.3	Additifs . . . . .	14
3.2	Comportement et propriétés du fluide MR . . . . .	15
3.2.1	Mode d'opération . . . . .	15
3.2.2	Modèle comportemental . . . . .	16
3.2.3	Taux de déformation en cisaillement . . . . .	16
3.2.4	Contrainte d'écoulement en cisaillement . . . . .	18
3.3	Durabilité du fluide MR . . . . .	18
3.3.1	Calcul de la durée de vie . . . . .	18
3.3.2	Effet des paramètres d'opération . . . . .	20
3.3.3	Dégradation et modes de défaillance du fluide MR . . . . .	21
3.4	Conception d'embrayage MR durable . . . . .	25
3.5	Conclusion . . . . .	25
<b>4</b>	<b>OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE</b>	<b>27</b>
4.1	Objectifs du projet de recherche . . . . .	27
4.1.1	Objectifs - embrayage MR . . . . .	27
4.1.2	Objectifs - fluide MR . . . . .	27
4.2	Contribution originale . . . . .	27
<b>5</b>	<b>FIABILITÉ DES EMBRAYAGES MR</b>	<b>29</b>
5.1	Méthodologie . . . . .	29
5.2	Requis fonctionnels . . . . .	30
5.3	Analyse de fiabilité . . . . .	31

5.3.1	Analyse des modes de défaillances et de leurs effets . . . . .	31
5.3.2	Analyse par arbres de défaillances . . . . .	33
5.3.3	Comparatif (théorie vs requis) . . . . .	38
5.4	Méthode d'identification de fautes . . . . .	39
5.4.1	Approche directe . . . . .	39
5.4.2	Approche indirecte . . . . .	39
5.5	Conclusion . . . . .	41
<b>6</b>	<b>BANCS D'ESSAIS</b>	<b>43</b>
6.1	Banc d'essais à échelle réduite . . . . .	43
6.1.1	Présentation de l'embrayage . . . . .	44
6.1.2	Fiche technique . . . . .	47
6.1.3	Séquence des essais . . . . .	47
6.1.4	Limitations . . . . .	48
6.2	Banc d'essais à échelle réelle . . . . .	49
6.2.1	Présentation de l'embrayage . . . . .	50
6.2.2	Fiche technique . . . . .	53
6.2.3	Séquence des essais . . . . .	53
6.2.4	Limitations . . . . .	54
<b>7</b>	<b>DURABILITÉ DU FLUIDE MR</b>	<b>57</b>
7.1	Pré-étude de l'effet des paramètres d'opération . . . . .	57
7.1.1	Critères d'arrêt des tests . . . . .	57
7.1.2	Choix des paramètres d'opération . . . . .	58
7.1.3	Résultats . . . . .	58
7.2	Étude de la signature de dégradation . . . . .	59
7.2.1	Migration des particules . . . . .	61
7.2.2	Dégradation du fluide porteur . . . . .	63
7.2.3	Oxydation des particules ferromagnétiques . . . . .	67
7.2.4	Augmentation du volume . . . . .	69
7.2.5	Performance en boucle ouverte . . . . .	70
7.2.6	Performance dynamique . . . . .	72
7.3	Solution pour améliorer la durabilité du fluide MR . . . . .	73
7.4	Solutions pour améliorer la durabilité des embrayages . . . . .	74
7.4.1	Circulation interne . . . . .	74
7.4.2	Meilleure gestion de la puissance dissipée . . . . .	79
7.5	Conclusion . . . . .	80
7.5.1	Travaux futurs . . . . .	81
<b>8</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>83</b>
8.1	Sommaire . . . . .	83
8.2	Contributions . . . . .	84
8.3	Travaux futurs . . . . .	85
<b>A</b>	<b>PROJET ENV404 - ARCHITECTURE ET EMBRAYAGE MR</b>	<b>87</b>

TABLE DES MATIÈRES

vii

A.1	Présentation de l'architecture EGC . . . . .	87
A.2	Présentation de l'embrayage MR CSA2 . . . . .	88
A.3	Cas de chargement . . . . .	89
<b>B</b>	<b>DISSECTION D'UN EMBRAYAGE MR</b>	<b>91</b>
B.1	Allure du fluide MR . . . . .	91
B.2	Usure interne de l'embrayage . . . . .	94



# LISTE DES FIGURES

1.1	Actionneurs hydrauliques servant à contrôler le collectif ainsi que les deux cycliques d'un hélicoptère . . . . .	1
1.2	Comparaison de deux configurations d'actionneurs électromécaniques couplés ou non à un embrayage MR . . . . .	2
2.1	Processus de fiabilité durant le cycle de vie complet d'un produit [Bertsche, 2008] . . . . .	5
2.2	Exemple de fonctions de densité $f(t)$ . . . . .	7
2.3	Exemples de probabilité de mort $F(t)$ et de survie $R(t)$ . . . . .	8
2.4	Exemple de taux de défaillance . . . . .	9
2.5	Approche de fiabilité utilisée dans le projet de recherche . . . . .	10
2.6	Approche expérimentale de fiabilité mise de l'avant dans le cadre de ce projet de recherche . . . . .	11
3.1	Effet de la concentration sur la contrainte de cisaillement maximale et sur la viscosité apparente . . . . .	14
3.2	Mode de fonctionnement du fluide MR : (a) écoulement (b) cisaillement (c) compression (d) pincement . . . . .	15
3.3	Mode de fonctionnement d'un embrayage MR . . . . .	16
3.4	Comportement des fluides newtoniens . . . . .	17
3.5	Comportement du fluide MR en mode cisaillement . . . . .	18
3.6	Test de durabilité réalisé par M.Rabinow en 1953 sur un fluide MR composé d'huile et de particules de fer. La cause de la baisse du couple serait la décomposition de l'huile. . . . .	22
3.7	Présence d'oxyde recouvrant les particules de fer [Ulicny <i>et al.</i> , 2007a] . . . . .	23
3.8	Test de durabilité réalisé par Jürgen Mass sur le Basonetic 5030 . . . . .	24
5.1	Méthodologie utilisée pour l'analyse de fiabilité . . . . .	29
5.2	Arbre de défaillances pour le mode de défaillance : Aucun couple transmis . . . . .	34
5.3	Arbre de défaillances pour le mode de défaillance : Blocage de l'embrayage . . . . .	35
5.4	Effet de la maintenance préventive sur le taux de défaillance d'un roulement à billes . . . . .	35
5.5	Arbre de défaillances pour le mode de défaillance : Diminution du couple transmis par l'embrayage MR . . . . .	36
5.6	Arbre de défaillances pour le mode de défaillance : Perte de performance aléatoire de l'embrayage MR . . . . .	37
5.7	Perte de contrôle momentanée ( $\approx 2$ sec.) de l'embrayage avant une période de caractérisation . . . . .	38
5.8	Approche basée sur la lecture de la pression et de la température pour faire la détection de fautes des embrayages MR. . . . .	40

5.9	Architecture du système mis de l'avant dans le projet ENV404 pour contrôler les surfaces de vol d'un hélicoptère. Une cellule de force doit être intégrée entre les deux embrayages afin de pouvoir évaluer les performances de chaque embrayage. . . . .	40
6.1	Photo du banc d'essais en fonctionnement . . . . .	43
6.2	Banc d'essais à échelle réduite . . . . .	44
6.3	Embrayage MR miniature pour les essais de vieillissement accélérés . . . .	45
6.4	Intégration des joints d'étanchéité magnétique dans l'embrayage MR miniature. . . . .	46
6.5	Séquence de tests utilisée pour vieillir et caractériser le fluide MR. (À gauche) Séquence de vieillissement réalisée à couple, température et vitesse constante. (À droite) Séquence de caractérisation réalisée en boucle ouverte à température et vitesse constante . . . . .	48
6.6	Banc d'essais à échelle réelle . . . . .	49
6.7	Photo du banc d'essais en fonctionnement . . . . .	50
6.8	Vue de la section détaillée de l'embrayage MR mono-tambour. Les parties rotatives sont représentées par la couleur verte. . . . .	51
6.9	Modélisation analytique des performances de l'embrayage MR . . . . .	52
6.10	Positionnement des capteurs de température et de pression sur l'embrayage MR . . . . .	53
6.11	Séquence de caractérisation de performance, de la dynamique et de la viscosité du fluide MR . . . . .	55
7.1	Effet des paramètres d'opération sur la durée de vie du fluide MR . . . . .	59
7.2	Signature de dégradation du fluide MR lorsqu'utilisé en glissement continu dans un embrayage MR (essai G3) . . . . .	61
7.3	Vue de la section de l'embrayage MR utilisé lors des tests de durabilité. Les flèches montrent la direction où les particules sont entraînées dues à l'effet de l'accélération centripète. . . . .	62
7.4	Résultats des rampes en vitesse réalisées pendant le test G3. . . . .	63
7.5	Courbes expérimentales et théoriques de l'augmentation de la viscosité de l'huile . . . . .	64
7.6	Analyse de thermogravimétrie de quatre échantillons de fluide MR récupérés à la fin du test G3 . . . . .	66
7.7	Perte de contrôle momentanée ( $\approx 2$ sec.) de l'embrayage avant une période de caractérisation . . . . .	66
7.8	Comparaison de la morphologie des particules provenant de différentes zones a) particules neuves b) particules provenant de l'interface de cisaillement c) particules provenant de la zone morte d) particules situées près des joints d'étanchéité . . . . .	68
7.9	Images provenant d'un microscope à balayage électronique montrant les zones où les spectres ont été réalisés . . . . .	68
7.10	Résultats des diffractions des rayons X . . . . .	69

7.11	Graphique de la pression en fonction du temps pour le test G3. La ligne représente la pression maximale des joints d'étanchéité à lèvres spécifiée par le fabricant (SKF). . . . .	70
7.12	Performance en boucle ouverte lors du test G3 (0,5 A / 1,5 A / 2,5 A) . . .	71
7.13	Comparaison des performances théorique et expérimentale (@ 0 et 36 heures). . . . .	72
7.14	Constante de temps de l'embrayage MR lors du test G3 . . . . .	73
7.15	Exemple d'applications touchées par l'oxydation . . . . .	74
7.16	Concept d'un embrayage MR de type disque ayant une pompe externe pour refroidir le fluide MR. Ce concept a été dessiné par Jacob Rabinow en 1951 et l'image provient du brevet #2.575.360 . . . . .	75
7.17	Concept pour circuler le fluide MR à l'intérieur d'un embrayage MR . . . . .	76
7.18	Pression statique relative en fonction du courant circulant dans la bobine de l'embrayage . . . . .	77
7.19	Signature de dégradation du fluide MR lorsqu'utilisé en glissement continu dans un embrayage MR muni d'un tambour rainuré pour générer un écoulement de fluide MR (essai G5). . . . .	78
7.20	Changement de la viscosité en fonction du temps (essai G5 avec circulation interne) . . . . .	78
7.21	Extrapolation de la durabilité d'un embrayage en fonction de la vitesse de rotation pour différentes valeurs de durabilité du fluide MR . . . . .	79
7.22	Chronologie des évènements basée sur les tests de durabilité réalisés sur un embrayage MR . . . . .	80
A.1	Architecture EGC permettant de contrôler les surfaces de vols de l'hélicoptère Bell 407. Cette architecture a été développée par Patrick Chouinard, étudiant au doctorat et membre du projet ENV404 (image : Patrick Chouinard) . . . . .	87
A.2	(a) Vue de section et (b) Description de l'embrayage CSA2. . . . .	88
A.3	Couple moyen pour chaque embrayage MR en fonction des cas de chargement . . . . .	89
B.1	Photo des échantillons de fluide MR provenant de différentes zones de l'embrayage MR avant et après le test G3 . . . . .	91
B.2	Photo de l'état du fluide MR situé à l'interface de cisaillement après le test G6 . . . . .	92
B.3	Échantillon de fluide MR provenant de l'interface de cisaillement du test G7. . . . .	92
B.4	Échantillon de fluide MR provenant de la zone morte près des joints d'étanchéité du test G7. . . . .	93
B.5	Échantillon de fluide MR provenant de la zone morte du test G7. . . . .	93
B.6	Fluide MR sous forme d'une « galette » collée sur la partie statique de l'embrayage MR . . . . .	94
B.7	Comparaison de la couleur de l'huile. De gauche vers la droite : échantillon d'huile neuve, échantillon d'huile provenant de la zone de cisaillement, échantillon d'huile provenant de la zone morte et échantillon de fluide MR neuf. . . . .	94
B.8	Usure du rotor d'aluminium suite aux tests de durabilité . . . . .	95

B.9 La bague d'usure côté décharge ou « haute-pression » présente des marques  
d'usure considérables suite à 700 heures d'utilisation. . . . . 96

# LISTE DES TABLEAUX

3.1	Comparatif de la durée de vie en fonction de l'application et du fournisseur du fluide MR . . . . .	19
3.2	Résultats de durabilité d'un embrayage MR obtenus par les chercheurs Ansgar Weihe, Dirk Güth et Jürgen Mass . . . . .	20
5.1	Requis fonctionnels de fiabilité pour un embrayage MR utilisé pour le contrôle primaire d'une surface de vol d'un hélicoptère . . . . .	30
5.2	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets . . . . .	32
5.3	Taux de défaillance estimés versus requis pour l'embrayage MR . . . . .	38
6.1	Caractéristiques du banc d'essais à échelle réduite . . . . .	47
6.2	Caractéristiques de l'embrayage à échelle réelle . . . . .	54
7.1	Description des tests réalisés sur le banc d'essais à échelle réelle . . . . .	60
7.2	Comparaison des tests avec et sans circulation . . . . .	77



# LEXIQUE

<b>Terme technique</b>	<b>Définition</b>
Actionneur	Un actionneur est un appareil qui convertit une énergie (ex. électrique) sous la forme d'un travail (force + déplacement).
Capteur	Appareil qui transforme une grandeur physique en un signal électrique utilisable à des fins de mesure ou de commande.
Fiabilité	La fiabilité exprime la probabilité qu'un produit remplisse sa fonction pendant une période de temps (ou nombre de cycles) et sous des conditions d'opération connues.
Durabilité	La durabilité est la période d'utilisation pendant laquelle un produit répond aux besoins d'utilisation (durée de vie).
Défaillance	Une défaillance est un événement qui a un impact sur le fonctionnement d'un produit. Il existe plusieurs types de modes de défaillance : perte de fonctions, fonctionnement dégradé, fonctionnement intempestif, démarrage impossible, arrêt impossible, etc.
Dégradation	Destruction ou altération des propriétés d'un matériau qui, dans le présent document, est le fluide magnéto-rhéologique.
Robustesse	La robustesse est la capacité d'un système à maintenir ses fonctions lorsque soumis à des conditions d'utilisation extrêmes mais possibles.



# LISTE DES SYMBOLES

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement
$\tau$	Contrainte de cisaillement
m	Mètre
C	Couple
$\Omega$	Vitesse angulaire
P	Puissance
N	Newton
t	Temps
$\nu$	Viscosité
J	Joule
E	Énergie
V	Volume
ml	Millilitre



# LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
OIQ	Ordre des ingénieurs du Québec
UdeS	Université de Sherbrooke
MR	Magnétorhéologique
CSA	<i>Controlled Slippage Actuation</i>
MEA	<i>More Electric Aircraft</i>
CAMUS	Laboratoire de conception d'actionneur et de moteur de l'Université de Sherbrooke
PERSEUS	Laboratoire de la performance et la sécurité de l'homme
LSMI	Laboratoire de systèmes mécaniques intelligents
CRIAQ	Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
LDE	<i>Life Dissipated Energy</i>
AMDE	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets
MEB	Microscope électronique à balayage
ATG	Analyse thermogravimétrique
SFX	La spectrométrie de fluorescence X
DRX	La diffractométrie des rayons X



# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

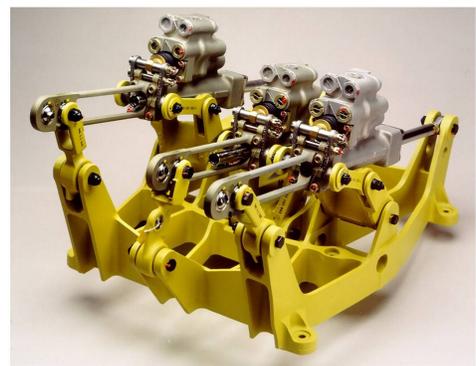
### 1.1 Mise en contexte et problématique

Avec l'augmentation des coûts de l'énergie et les défis environnementaux, l'industrie des transports est confrontée à de fortes pressions politique, sociale et économique afin de développer des technologies plus propres et efficaces. Afin de relever ces défis, les constructeurs aériens tendent vers des concepts d'avions plus électriques ou communément appelés en anglais *More Electric Aircraft* (MEA).

Le projet de recherche financé par une subvention RDC du CRSNG et le CRIAQ est un partenariat entre Bombardier Aéronautique, Bell Helicopter, le laboratoire de conception d'actionneur et de moteur de l'Université de Sherbrooke (CAMUS) et le laboratoire de systèmes mécaniques intelligents (LSMI) de l'Université Laval. Le principal objectif du projet est d'évaluer le potentiel de remplacer les actionneurs hydromécaniques (voir figure 1.1b) par des actionneurs électromécaniques pour les commandes de vol primaire des aéronefs en général. L'hélicoptère Bell 407 présenté à la figure 1.1a sert de plateforme de développement pour le projet.



(a) Hélicoptère Bell 407



(b) Actionneurs hydrauliques conçus et fabriqués par Woodward destinés aux hélicoptères de Bell Helicopter (Bell 206, 212 et 429)

Figure 1.1 Actionneurs hydrauliques servant à contrôler le collectif ainsi que les deux cycliques d'un hélicoptère

Cependant, les actionneurs électromécaniques standards (voir figure 1.2a) ne répondent pas aux niveaux de fiabilité des applications visées [Jones, 2002]. C'est pourquoi le projet ENV404 propose d'ajouter un embrayage MR à la sortie d'un actionneur électromécanique (voir figure 1.2b). La prémisse du projet stipule que l'ajout d'un embrayage MR permettrait de déconnecter l'actuateur en cas de faute afin d'éviter une situation catastrophique et donc, de répondre aux requis de fiabilité.

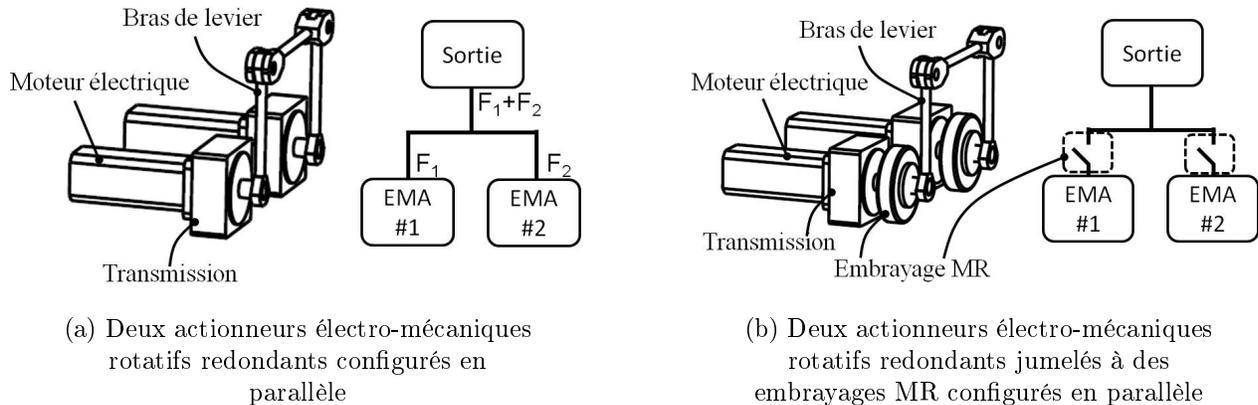


Figure 1.2 Comparaison de deux configurations d'actionneurs électromécaniques couplés ou non à un embrayage MR

Même si la prémisse du projet est que l'ajout d'un embrayage MR permettrait d'atteindre les requis en terme de fiabilité, aucune étude ne le démontre à ce jour. En effet, les embrayages MR présentent plusieurs avantages, mais la fiabilité ainsi que la durabilité de ceux-ci restent à démontrer.

## 1.2 Définition du projet de recherche

Bien que les embrayages MR existent depuis longtemps, peu d'études ont été réalisées sur la durée de vie de ceux-ci et aucune ne concerne la fiabilité. À première vue, les embrayages MR semblent avoir un bon potentiel de fiabilité puisqu'il n'y a pas de contact mécanique lors de l'engagement contrairement aux embrayages conventionnels. Par contre, la durée de vie du fluide MR jouant le rôle de lien entre l'entrée et la sortie des embrayages n'est pas illimitée, particulièrement lorsque l'embrayage est utilisé en glissement continu.

Pour réaliser une étude de fiabilité sur un embrayage MR, il est impératif de bien connaître les modes de dégradation et de défaillance de chacune des composantes et leurs impacts sur la fonctionnalité de l'embrayage. L'élément le moins connu et celui qui limite le plus la durabilité de ce type d'embrayage est le fluide MR. En effet, le fluide MR subit des efforts

de cisaillement considérables et donc, il est sujet à se dégrader rapidement [Carlson, 2002]. La façon dont le fluide MR se dégrade ainsi que les répercussions sur les performances des embrayages ne sont pas, encore une fois, très bien maîtrisées quoi qu'essentielles pour évaluer la fiabilité de ceux-ci.

Bien que les fluides MR commercialement disponibles sur le marché soient développés depuis plusieurs années, l'étude de ceux-ci d'un point de vue phénoménologique et mécanique manque à la littérature. En effet, une meilleure compréhension de la dégradation et des modes de défaillance permettraient de réaliser une analyse de fiabilité plus détaillée et réaliste.

Donc, le projet de recherche présenté dans ce document porte sur l'étude de la fiabilité des embrayages en rapport avec la dégradation du fluide MR. De plus, une étude expérimentale de la dégradation du fluide MR utilisé en glissement est réalisée en parallèle afin de mieux comprendre les causes de la dégradation ainsi que les effets sur l'embrayage. Finalement, quelques propositions sont présentées dans le but d'améliorer la durabilité des embrayages MR n'ayant pas tellement évolué depuis les années 60.

## 1.3 Plan du document

Le document présent se divise en 8 chapitres suivis des annexes.

Après l'introduction, le chapitre 2 présente les concepts ainsi que l'approche de fiabilité mise de l'avant dans ce projet de recherche. Ensuite, le chapitre 3 présente exclusivement des notions liées à la durabilité du fluide MR qui est l'élément critique des embrayages MR quant à la fiabilité et à la durabilité. Au chapitre 4, les objectifs ainsi que les contributions scientifiques du projet de recherche sont présentés.

Le corps du mémoire débute au chapitre 5 en présentant l'analyse de fiabilité réalisée sur un embrayage MR. Par la suite, les bancs d'essais sont présentés en détails au chapitre 6. Le chapitre 7 présente l'étude expérimentale portant sur les embrayages MR, plus particulièrement sur le fluide MR. Finalement, une conclusion faisant ressortir la nature des travaux, les résultats importants et les conclusions qui en découlent, est présentée au chapitre 8.

Finalement, l'annexe A présente l'embrayage MR étudié pour l'analyse de fiabilité et l'annexe B présente des photos de dissection mécanique.



# CHAPITRE 2

## CADRE DE RÉFÉRENCE - FIABILITÉ

### 2.1 Introduction à la fiabilité

La fiabilité d'un produit doit être prise en compte au tout début du processus de conception. L'objectif de réaliser une étude de fiabilité dès la première phase de conception est d'obtenir des données quantitatives afin de pouvoir évaluer les éléments critiques et risqués. La première étape du processus de conception pour la fiabilité d'un produit est de déterminer les requis de fiabilité. En effet, un produit doit avoir été conçu dès le départ pour atteindre les requis de fiabilité. Durant la conception du produit, les requis de fiabilité pour le système complet vont permettre de définir ceux pour les sous-systèmes et les composantes. Cette distribution, communément appelé en anglais *allocation*, est réalisée au meilleur des connaissances de l'équipe de travail et est supportée par des données expérimentales. En effet, le niveau de certitude de fiabilité est grandement amélioré lorsque des tests expérimentaux sont réalisés pour valider les hypothèses. Aussi, le niveau de certitude d'une analyse de fiabilité évolue durant toute la vie utile du produit (voir figure 2.1).

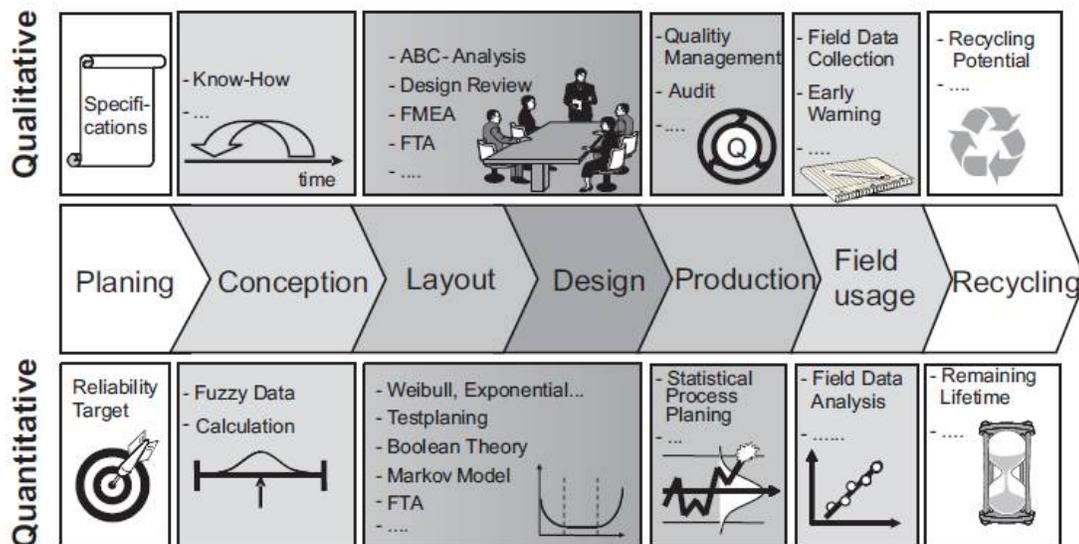


Figure 2.1 Processus de fiabilité durant le cycle de vie complet d'un produit [Bertsche, 2008]

Lorsqu'on réalise une étude de fiabilité, il est important d'être conscient des faiblesses de l'analyse comme par exemple :

- Généralement, on ne connaît pas tous les paramètres (modes de défaillance, taux de défaillance, etc.) de fiabilité des composantes du système ;
- La fiabilité d'un système est obtenue à partir de données expérimentales. Les essais expérimentaux sont très coûteux en temps et en ressources ;
- La fiabilité prédite (théorique) d'un système est toujours différente de celle observée sur le terrain.

## 2.2 Calcul de la fiabilité

La défaillance d'une composante ou d'un système peut être représentée graphiquement en utilisant des outils statistiques. Les sous-sections suivantes présentent les outils statistiques généralement utilisés pour exprimer la fiabilité d'une composante ou d'un système.

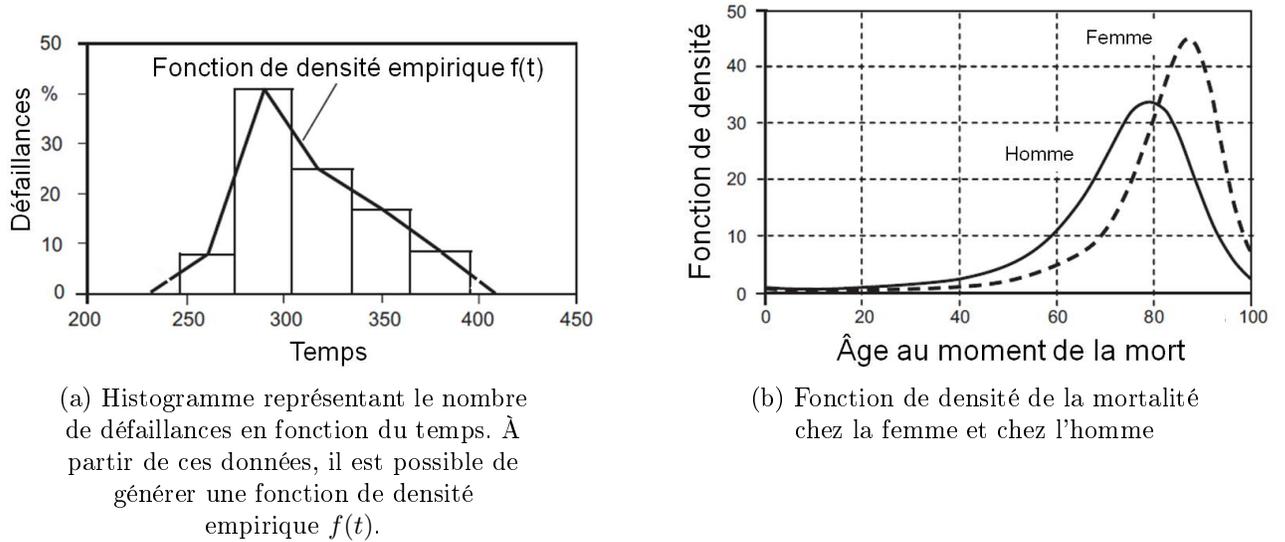
### 2.2.1 Densité de probabilité

La manière la plus simple de présenter la défaillance d'une composante ou d'un système est d'utiliser un histogramme. La figure 2.2a montre un histogramme qui présente le nombre de défaillances en fonction du nombre de cycles. L'histogramme peut être construit directement à partir des données expérimentales (voir équation 2.1). Bien évidemment, plus la quantité de données est grande et plus on pourra réduire la largeur des colonnes de l'histogramme afin de pouvoir obtenir une estimation plus fine de la fonction de densité  $f(t)$ . Un exemple classique de fonction de densité est l'âge de mortalité des hommes et des femmes. On peut voir sur la figure 2.2b que les femmes et les hommes n'ont pas la même espérance de vie. De plus, les âges où il y a le plus de décès sont respectivement 80 et 87 ans.

$$f(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\text{prob}(t < T \leq t + dt)}{dt} \quad (2.1)$$

### 2.2.2 Probabilité

Dans plusieurs situations, le nombre de défaillance survenant dans un intervalle de temps spécifique n'est pas une information utile. Ce que l'on veut savoir c'est la probabilité cumulative de défaillance ou de survie à un temps spécifique. Cette question peut être

Figure 2.2 Exemple de fonctions de densité  $f(t)$ 

répondue soit par la probabilité de défaillance  $F(t)$  ou de survie  $R(t)$  tel que présenté aux équations 2.3 et 2.6.

$$F(T) = \int_0^T f(t) dt \quad (2.2)$$

$$F(0) = 0 \text{ et } F(\infty) = 1 \quad (2.3)$$

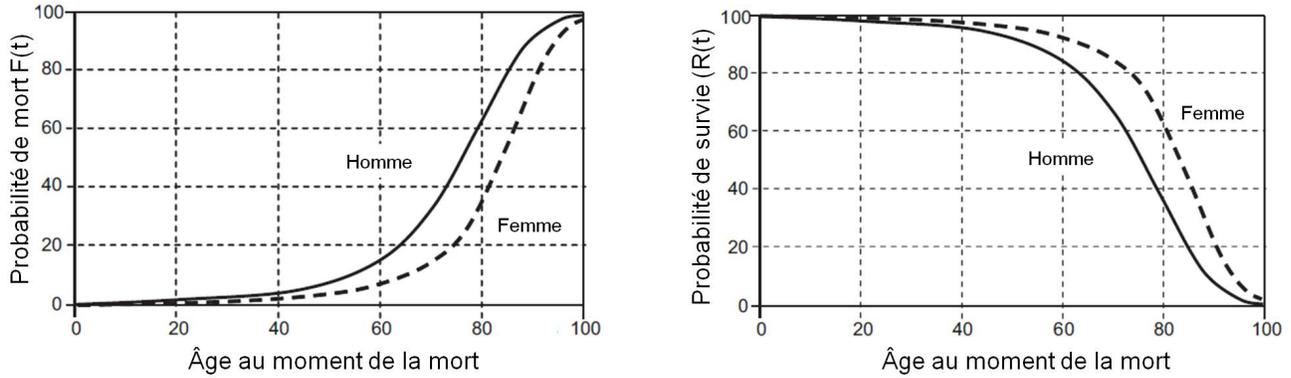
La probabilité de défaillance  $F(t)$  additionnée à la probabilité de survie ou fiabilité  $R(t)$  est toujours égal à 1.

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2.4)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_T^\infty f(t) dt \quad (2.5)$$

$$R(0) = 1 \text{ et } R(\infty) = 0 \quad (2.6)$$

La figure 2.3 présente graphiquement  $F(t)$  et  $R(t)$  de la mortalité des hommes et des femmes. Au temps « 0 », la probabilité de mort est de 0% et la probabilité de survie est de 100%. D'un autre côté, lorsque le temps est  $>100$  ans, la probabilité de mort est 100% et la probabilité de survie est de 0%.



(a) Probabilité de mort des femmes et des hommes en fonction de leur âge.

(b) Probabilité de survie des femmes et des hommes en fonction de leur âge.

Figure 2.3 Exemples de probabilité de mort  $F(t)$  et de survie  $R(t)$

### 2.2.3 Taux de défaillance

Le taux de défaillance a un temps  $t$  peut être interprété comme la mesure du risque de défaillance de la composante. Le taux de défaillance est la division du nombre de défaillance  $f(t)$  par la somme des composantes ayant survécues  $R(t)$  (voir équation 2.9).

$$\lambda(t) = \frac{\text{Nombre de défaillances au temps } t}{\text{Nombre de composantes intactes au temps } t} \quad (2.7)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - \int_0^t f(x) dx} \quad (2.8)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \left[ \frac{\text{défaillances}}{\text{heure}} \right] \quad (2.9)$$

La figure 2.4 présente un exemple du taux de défaillance des humains. Sur ce graphique, il est possible de voir trois phases : 1. diminution du taux de défaillance des enfants (0 à 10 ans), 2. stabilisation du taux de défaillance (10 à 40 ans) (les décès sont probablement des causes accidentelles) et 3. augmentation claire du taux de défaillance (40 à 100 ans).

Plusieurs distributions existent pour modéliser la taux de défaillance de différentes composantes. Par exemple :

- Distribution normale ou gaussienne : Composantes structurales ;
- Distribution exponentielle : Composantes électriques ;
- Distribution de Weibull : Composantes mécaniques ;
- Distribution logarithmique : Composantes mécaniques ;

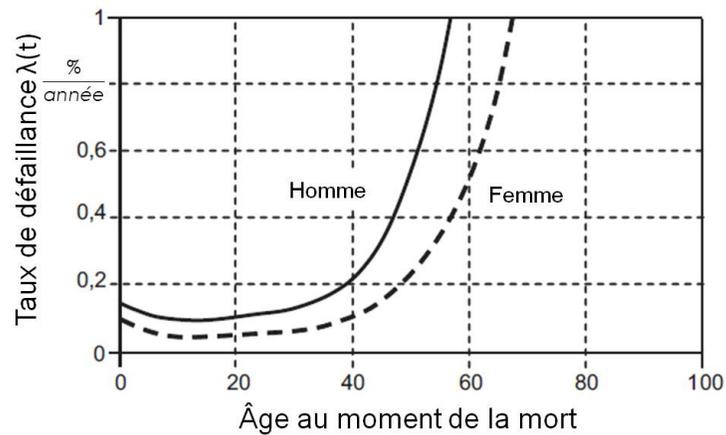


Figure 2.4 Exemple de taux de défaillance

- Distribution gamma.

Cependant, pour des raisons de simplicité, on fait souvent l'hypothèse que les taux de défaillance des composantes d'un système sont constants durant toute la vie du système. En général, un taux de défaillance se situant entre  $10^{-4}$  et  $10^{-2}$  présente un bon niveau pour des produits commerciaux et un taux de défaillance se situant entre  $10^{-9}$  et  $10^{-7}$  est un niveau acceptable pour les systèmes critiques d'un aéronef.

De nos jours, on retrouve le temps moyen avant défaillance, communément appelé en anglais "Mean Time Between Failure" (MTBF), comme caractéristique dans les fiches techniques de produits. Lorsqu'on fait l'hypothèse que le taux de défaillance est constant, le MTBF s'obtient de la façon suivante :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\text{heures}}{\text{défaillance}} \right] \quad (2.10)$$

## 2.3 Approche de conception pour la fiabilité

La fiabilité d'un système est obtenue à la suite d'un processus de très longue durée. L'approche de conception pour la fiabilité doit commencer dès le début de ce processus de conception. C'est pourquoi le présent projet de maîtrise tient compte de la fiabilité. L'objectif principal de l'approche de conception pour la fiabilité est d'identifier les composantes à risque et les stratégies pour réduire le risque. Puisque le projet ENV404 consiste à intégrer une nouvelle technologie dans un aéronef, des défis de taille devront être relevés concernant les composantes non-maîtrisées.

La figure 2.5 présente l'approche de fiabilité utilisée dans ce projet. Dans un premier temps, les requis de fiabilité pour l'hélicoptère ou l'avion sont déterminés via les normes canadiennes [FAR 25 671]. Ensuite, les requis du système, de l'embrayage MR ainsi que des composantes découlent des requis de fiabilité de l'aéronef. Par la suite, il faut vérifier si les requis de fiabilité des composantes sont réalistes en les comparant avec les données de fiabilité trouvées dans la littérature. Dans le cas où les valeurs de fiabilité allouées aux composantes correspondent aux valeurs trouvées dans la littérature, le concept est bon. Cependant, lorsque les valeurs de fiabilité allouées ne correspondent pas aux valeurs de fiabilité que l'on trouve dans la littérature, une décision doit être prise. Trois possibilités sont envisageables :

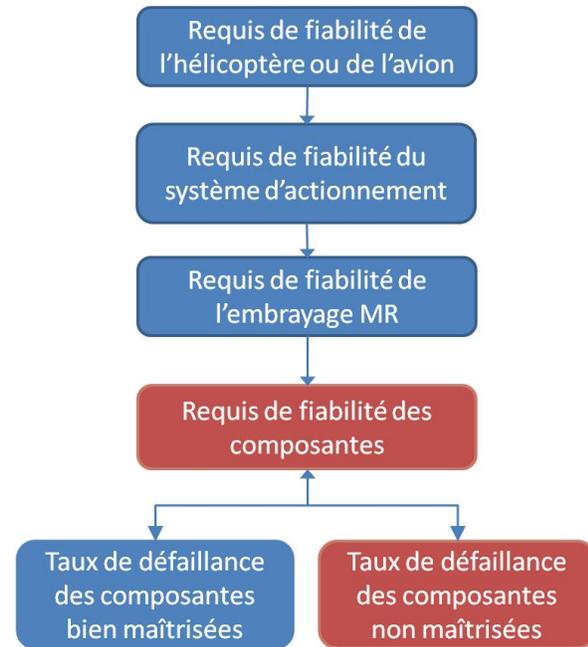


Figure 2.5 Approche de fiabilité utilisée dans le projet de recherche

1. **Redondance** : La redondance consiste à ajouter la même composante plusieurs fois dans le système afin d'améliorer la fiabilité. Il faut faire attention avec la redondance puisque le coût, le poids ainsi que le volume sont souvent affectés ;
2. **Maintenance préventive** : La maintenance préventive est l'action de remplacer les composantes sur une base périodique prédéfinie. Il faut être conscient que cette décision engendre des coûts et diminue la disponibilité de l'aéronef ;
3. **Amélioration** : Pour un concept donné, l'amélioration de la fiabilité peut être faite par le développement. Des tests accélérés sont réalisés sur la composante. Les données des tests sont récupérées puis analysées afin de déterminer les modes de défaillance. Ces modes sont analysés par les ingénieurs pour identifier la cause de la défaillance.

L'allocation des requis de fiabilité est réalisée à l'aide des outils suivants : l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), communément appelée en anglais Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) et l'arbre de défaillance, communément appelé en anglais Fault Tree Analysis (FTA).

Les embrayages MR existent depuis longtemps mais ne sont pas utilisés pour des applications nécessitant un niveau de fiabilité élevé. Cela dit, une étude expérimentale devra être réalisée afin de déterminer les modes de défaillance du fluide MR et leurs effets sur l'embrayage et le système. La figure 2.6 montre l'approche expérimentale mise de l'avant dans ce projet de recherche.

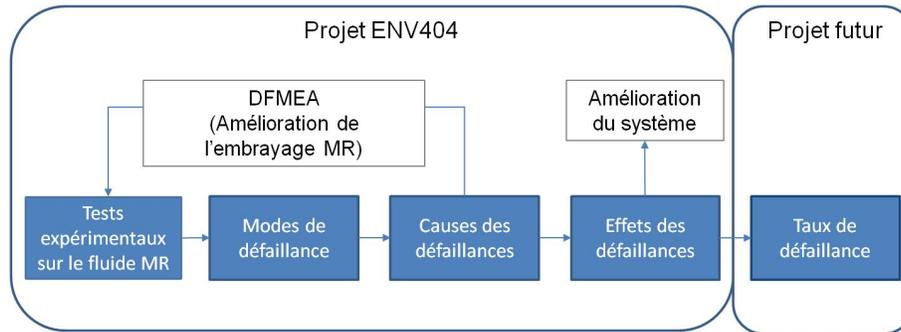


Figure 2.6 Approche expérimentale de fiabilité mise de l'avant dans le cadre de ce projet de recherche

## 2.4 Détection et isolation de fautes

Les actionneurs critiques se retrouvant dans les avions, les trains ou les véhicules routiers requièrent de hauts niveaux de fiabilité. Pour atteindre ces niveaux, la conception de ces systèmes doit permettre l'intégration de méthodes de détection et d'isolation de fautes [Johnson, 1996].

### Méthode de détection et d'isolation de fautes

Dans la littérature, deux approches de détection et d'isolation de fautes, communément appelée en anglais *Fault Detection and Isolation* (FDI), sont proposées. Tout d'abord, il y a l'approche directe basée sur l'acquisition d'informations via des capteurs. Ensuite, il y a l'approche indirecte basée sur un modèle mathématique ou expérimental qui est combiné à l'acquisition de signaux [Muenchhof *et al.*, 2009]. Les informations obtenues lors de l'étude expérimentale réalisée sur les embrayages MR permettront de proposer des idées pour mettre en oeuvre l'une ou l'autre des méthodes de FDI.

**Approche directe.** Les systèmes hydrauliques conventionnels que l'on retrouve dans les applications industrielles utilisent des interrupteurs de pression, de température et de niveau d'huile dans le réservoir. Dans le cas des systèmes hydrauliques plus sophistiquées, la détection de fautes utilisent des capteurs de débit, de pression, de température ainsi que des accéléromètres.

**Approche indirecte.** Des méthodes de supervision s'appuyant sur des modèles ont été récemment développées pour des systèmes hydrauliques. Par exemple, il est possible d'observer en temps réel la condition de l'huile, l'augmentation de frottement d'un piston ou d'une valve.

Une méthode basée sur un modèle combiné à l'acquisition de signal permettant l'identification de fautes d'une pompe hydraulique a été développée [Tan et Sepehri, 2001]. Sachant que les pompes hydrauliques tournent à une vitesse constante, il est possible d'analyser le signal de pression en temps réel (*wavelet analysis*) et ainsi d'identifier l'état de ce système.

# CHAPITRE 3

## ÉTAT DE L'ART - FLUIDE MR

Le but du chapitre 3 est d'exposer les connaissances liées à la durabilité du fluide MR publiées dans la littérature. Dans un premier temps, des informations générales sur la composition et le comportement du fluide MR sont présentées et commentées. Ensuite, une section portant sur la durabilité du fluide MR amène le problème spécifique et justifie les contributions originales annoncées au chapitre 4.

### 3.1 Composition du fluide MR

Le fluide MR est typiquement composé de trois éléments : 1. des particules ferromagnétiques 2. un fluide porteur et 3. des additifs. Cette section présente en détails chacun de ces constituants.

#### 3.1.1 Particules ferromagnétiques

Dans un fluide MR, les particules ferromagnétiques ont un diamètre variant de 3 à 40  $\mu\text{m}$  et sont fabriquées avec des matériaux ayant une haute saturation magnétique [Goncalves *et al.*, 2006]. En effet, la contrainte de cisaillement maximale du fluide MR augmente au carré avec la saturation magnétique des particules. Les meilleurs fluides MR sont ceux fabriqués avec des particules d'alliages de fer-silicium ayant une saturation magnétique de 2.4 T [Rudnick, 2005].

Les fluides MR ont typiquement une concentration volumique élevée en particules. Cette concentration varie entre 20 et 50% du volume total tandis que la limite est d'environ 63% [Song *et al.*, 2008]. Cette concentration en particules a un effet direct et important sur la contrainte de cisaillement maximale (voir figure 3.1a). Par contre, une concentration plus élevée a pour effet d'augmenter la viscosité apparente du fluide MR lorsque le champ magnétique est nul (voir figure 3.1b). Cela dit, le choix de la concentration du fluide MR est un compromis entre la contrainte maximale et la viscosité apparente désirée.

La distribution de la grosseur des particules peut aussi avoir un effet significatif sur la contrainte maximale du fluide MR [D. Weiss et Carlson, 1999]. La présence de différentes

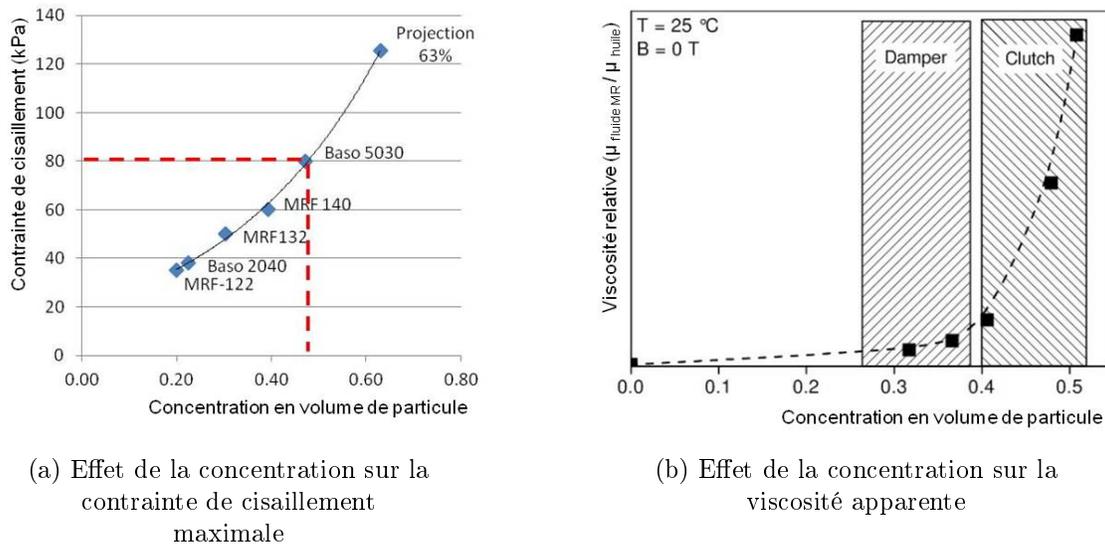


Figure 3.1 Effet de la concentration sur la contrainte de cisaillement maximale et sur la viscosité apparente

grosseurs de particules permet d'augmenter la limite d'empilement des particules à plus de 63% comparativement à un fluide MR où les particules ont le même diamètre.

### 3.1.2 Fluide porteur

Plusieurs types d'huile sont utilisés comme fluide porteur. Il y a les huiles minérales, les huiles synthétiques ou un mélange des deux types [Rudnick, 2005]. Les qualités recherchées pour les fluides porteurs sont une bonne capacité de lubrification, une bonne durabilité, une bonne stabilité en fonction de la température et une bonne compatibilité avec d'autres matériaux (exemple : joint d'étanchéité).

### 3.1.3 Additifs

Plusieurs types d'additifs se retrouvent dans les fluides MR. Le choix des additifs varie en fonction de l'application visée (ex : suspension automobile, embrayage ou frein, suspension sismique pour bâtiment). L'ajout d'additifs permet d'éviter la sédimentation ou l'agglomération des particules, de réduire la friction interparticulaire et, de prévenir l'oxydation et l'usure. Au final, l'ajout de ces additifs permet d'obtenir un fluide MR stable et durable, deux qualités qui sont essentielles au fluide MR pour des applications commerciales [Avraam, 2009].

## 3.2 Comportement et propriétés du fluide MR

### 3.2.1 Mode d'opération

Le fluide MR est principalement utilisé dans quatre modes d'opération. Ces modes d'opération sont : 1. mode d'écoulement 2. mode de cisaillement 3. mode de compression et 4. mode de pincement (voir figure 3.2). L'étude présentée dans ce mémoire porte sur des embrayages utilisant le fluide MR en mode cisaillement.

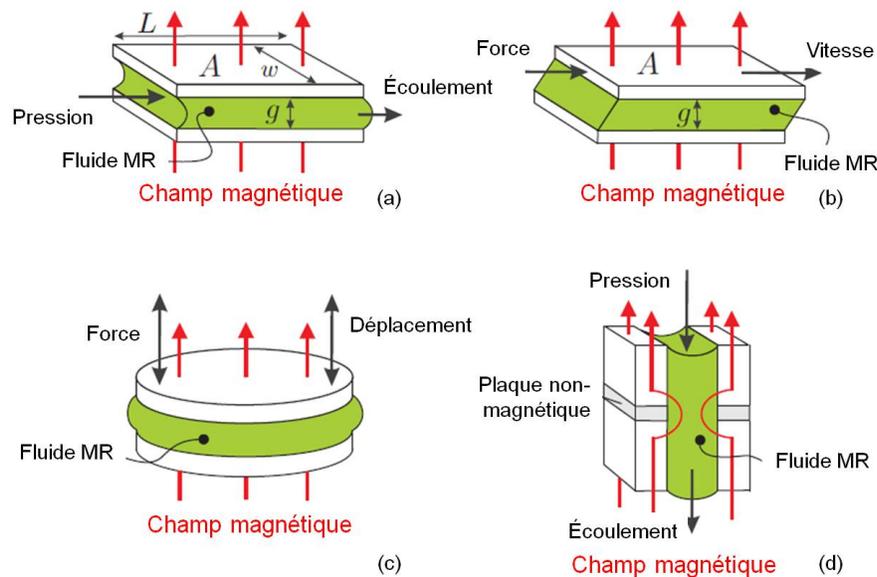


Figure 3.2 Mode de fonctionnement du fluide MR : (a) écoulement (b) cisaillement (c) compression (d) pincement

Typiquement, la contrainte en cisaillement maximale (voir section 3.2.2) des fluides MR utilisés dans un embrayage est de 80 kPa et le taux de déformation se situe entre 1000 et 10000  $s^{-1}$  [Carlson, 2002].

Le principe de fonctionnement d'un embrayage utilisant du fluide MR en cisaillement est le suivant : lorsqu'un champ magnétique traverse le fluide, les particules ferromagnétiques forment des colonnes alignées avec les lignes de flux magnétique. Ces colonnes restreignent le mouvement relatif des surfaces mobiles de l'embrayage (soit des disques ou des tambours) et permettent donc de transférer du couple de l'entrée vers la sortie de l'embrayage. L'intensité du champ magnétique sert à moduler le couple transmis de l'embrayage MR (voir figure 3.3).

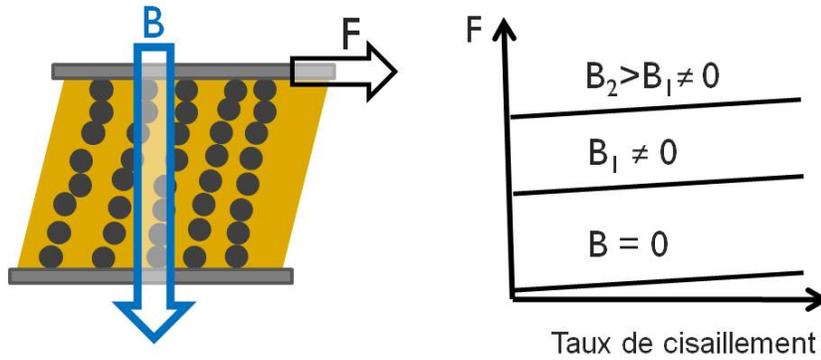


Figure 3.3 Mode de fonctionnement d'un embrayage MR

### 3.2.2 Modèle comportemental

Dû à sa simplicité, le modèle plastique de Bingham est le plus fréquemment utilisé pour modéliser le comportement du fluide MR (voir équation 3.1) [Avraam, 2009]. La contrainte de cisaillement du fluide MR dépend de l'intensité du champ magnétique  $B$  qui le traverse et du taux de déformation en cisaillement  $\tau(B, \dot{\gamma})$ . Plus le champ magnétique est intense, plus la contrainte de cisaillement est grande et ce, jusqu'à la limite de saturation du fluide. Cette contrainte maximale dépend principalement de la concentration en particules, du matériau qui compose les particules et de la distribution des particules comme mentionné à la section 3.1.1. Aussi, le comportement du fluide MR lorsque soumis à un champ magnétique nul, s'apparente à un fluide newtonien, c'est-à-dire que la relation entre la contrainte et le taux de déformation en cisaillement est linéaire.

$$\tau(B, \dot{\gamma}) = \tau_o(B) + \mu_m \dot{\gamma} \quad (3.1)$$

où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement du fluide MR en kPa,  $B$  est le champ magnétique en tesla,  $\mu_m$  est la viscosité du fluide en Pa.s et  $\dot{\gamma}$  est le taux de déformation en  $s^{-1}$ .

### 3.2.3 Taux de déformation en cisaillement

Le taux de déformation en cisaillement d'un fluide newtonien est défini à l'équation 3.2. Il est fréquemment utilisé dans la littérature pour quantifier le cisaillement du fluide MR en fonction de l'épaisseur du film et de la vitesse de déplacement des surfaces de cisaillement (voir figure 3.4a).

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{g} \quad (3.2)$$

où  $\dot{\gamma}$  est le taux de déformation ( $s^{-1}$ ),  $v$  est la vitesse ( $\frac{m}{s}$ ) et  $g$  est la distance qui sépare les deux plaques (m).

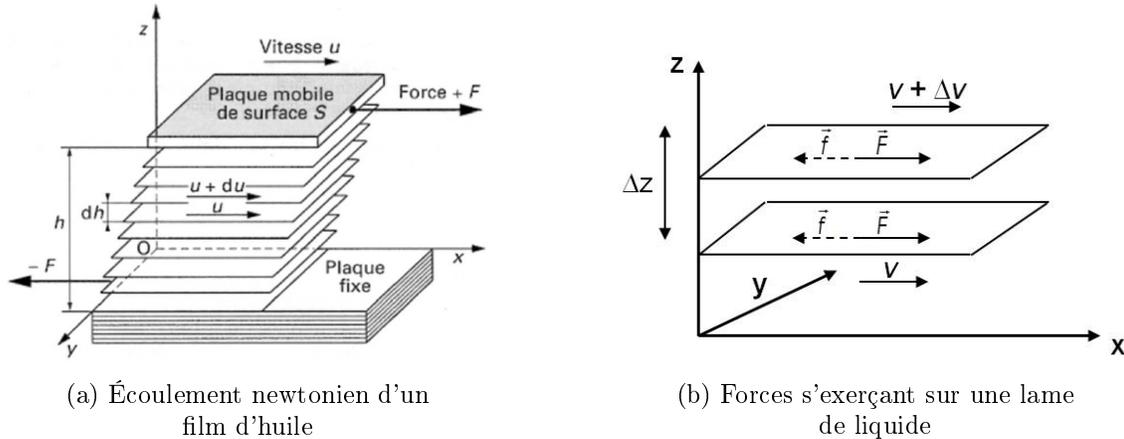


Figure 3.4 Comportement des fluides newtoniens

Dans un écoulement comme celui présenté à la figure 3.4a, il se crée un frottement entre les lames de liquide glissant les unes sur les autres. En régime établi, une lame de liquide est soumise à l'action de deux forces égales et opposées, soit  $\vec{f}$  et  $\vec{F}$  (voir figure 3.4b). Les forces de frottement entre les lames de fluide sont proportionnelles à leur surface et à la différence de leur vitesse [Denis *et al.*, 1997]. Cela dit, est-ce que l'on peut appliquer ce raisonnement lorsque le fluide MR est magnétisé ? Est-ce que le profil d'écoulement du fluide MR est le même magnétisé ou pas ? Si non, cela voudrait dire que le frottement est beaucoup plus intense localement et que le taux de déformation en cisaillement calculé avec l'équation 3.2 représente une valeur inexacte et plus petite que réellement.

Le taux de déformation en cisaillement dans un embrayage MR ou un frein MR se situe généralement autour de  $10^3$  et  $10^4 s^{-1}$  [Carlson, 2002]. Dans une suspension MR, le taux de cisaillement est beaucoup plus élevé, celui-ci atteint plutôt les  $10^4$  à  $4 \times 10^4 s^{-1}$ .

Un taux de déformation en cisaillement élevé signifie qu'un léger changement de la viscosité du fluide MR aura une répercussion significative sur le fonctionnement de l'embrayage ou la suspension. Plus précisément, le couple minimum pour un embrayage et l'amortissement minimum pour une suspension sont directement influencé par la viscosité du fluide MR. Cela explique pourquoi des recherches ont été précédemment réalisées sur le changement de viscosité du fluide MR dans le temps [Hreinsson, 2011] [Carlson, 2002]. Les résultats

de ces recherches démontrent que les fluides MR d'aujourd'hui vieillissent mieux en ce qui concerne la viscosité, mais qu'il reste encore beaucoup de travail à faire.

### 3.2.4 Contrainte d'écoulement en cisaillement

La contrainte d'écoulement en cisaillement d'un fluide MR ( $\tau$ ) est fonction de l'intensité du champ magnétique  $B$  ainsi que du taux de déformation en cisaillement  $\dot{\gamma}$  (voir figure 3.5b). Pour que s'applique la loi de Newton à l'écoulement, il faut que celui-ci se produise à la manière de lames simples glissant les unes par rapport aux autres comme mentionné à la section précédente. Pour que le glissement des lames se fasse de façon continue et repérable, une bonne lubrification et une quantité minimale d'huile sont nécessaires. Lorsque la lubrification est insuffisante ou bien que la quantité de particules est trop grande, le comportement n'est plus newtonien. Il ne peut donc plus être modélisé comme à la figure 3.5b. Aussi, lorsque le taux de déformation est très faible, la contrainte de cisaillement oscille entre la contrainte d'écoulement et la contrainte dynamique (voir figure 3.5a).

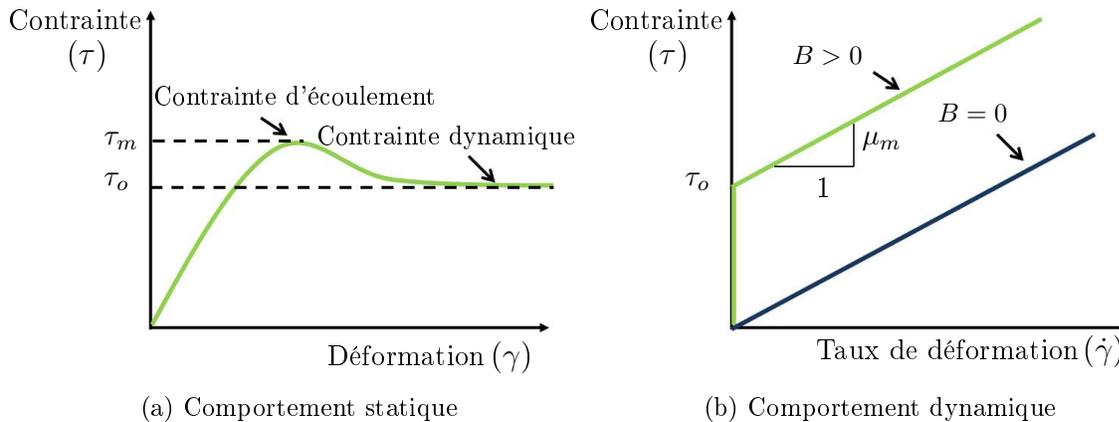


Figure 3.5 Comportement du fluide MR en mode cisaillement

## 3.3 Durabilité du fluide MR

### 3.3.1 Calcul de la durée de vie

Plusieurs chercheurs dont Anthony L. Smith et Claus Gabriel ainsi que les fabricants des fluides MR, BASF et LORD, évaluent la durée de vie par la quantité d'énergie dissipée par volume de fluide MR communément appelée en anglais *Life Dissipated Energy* (voir équation 3.3) [Gabriel *et al.*, 2011; Smith *et al.*, 2007].

L'équation a été développée afin d'identifier les variables prises en compte dans le calcul de la durée de vie. La durée de vie est donc fonction du volume de fluide MR, de la contrainte de cisaillement et de quelques dimensions géométriques. Ce calcul de durée de vie ne tient pas compte d'une multitude de paramètres comme par exemple le taux de déformation en cisaillement et la température. Cela veut-il dire que ces paramètres n'influencent pas la durée de vie du fluide MR ?

$$\begin{aligned}
 LDE &= \frac{1}{V} \int_0^t P dt \\
 &= \frac{1}{V} \int_0^t T.\Omega dt \\
 &= \frac{1}{V} \int_0^t (2\pi.r^2.L.\tau) \left( \frac{tr}{min} \cdot \frac{2\pi}{60} \right) dt
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

où  $LDE$  est l'énergie dissipée par unité de volume,  $V$  est le volume de fluide MR et  $P$  est la puissance dissipée en  $W$ . En général, les fluides MR que l'on retrouve sur le marché peuvent dissiper  $>5$  MJ/ml avant de devenir inutilisables [Carlson, 2002; Gabriel *et al.*, 2010].

Tableau 3.1 Comparatif de la durée de vie en fonction de l'application et du fournisseur du fluide MR

Compagnie (Chercheur associé)	Application	Durée de vie (MJ/ml)
Christoffer Keiburg (BASF)	Embrayage	6
Claus Gabriel [Gabriel <i>et al.</i> , 2011]	Embrayage / frein	5
LORD Corporation	Amortisseur	?
Jürgen Mass [Wiehe <i>et al.</i> , 2011]	Embrayage	2.8 - 5.7
Carlson [Carlson, 2002]	Amortisseur	10
General Motor [Smith <i>et al.</i> , 2007]	Embrayage	70

Le tableau 3.1 illustre bien qu'il y a une variation importante dans l'estimation de la durée de vie. En effet, on remarque un ordre de grandeur entre les applications MR les moins et les plus durables. Cet écart s'explique peut-être par les conditions d'opération différentes ou bien par des formulations de fluide MR différentes.

### 3.3.2 Effet des paramètres d'opération

Il semble logique que les paramètres d'opération aient un impact sur la durée de vie du fluide MR. Quelques articles de journaux scientifiques discutent de l'effet de la contrainte de cisaillement, du taux de déformation en cisaillement et de la température sur la durabilité du fluide MR. Ces résultats sont présentés et discutés ci-bas.

#### Contrainte de cisaillement

Des chercheurs allemands ont développé un banc d'essais pour réaliser une étude de durabilité sur un embrayage MR fonctionnant en glissement continu [Wiehe *et al.*, 2011]. L'embrayage est de type mono-tambour et contient environ 20 ml de fluide MR. Les couples maximal et minimal sont respectivement d'environ 100 Nm et 20 Nm.

Leurs résultats montrent que le LDE dépend de la puissance dissipée. Par contre, ils n'indiquent pas la vitesse de rotation (ou le taux de cisaillement) ainsi que la température du fluide MR lors des tests. Le tableau 3.2 présente leurs résultats.

Tableau 3.2 Résultats de durabilité d'un embrayage MR obtenus par les chercheurs Ansgar Weihe, Dirk Güth et Jürgen Mass

Couple (Nm)	Contrainte de cisaillement (kPa)	Puissance (W)	Durée de vie (MJ/ml)
≈ 26	≈ 5	105	5.7
≈ 48	≈ 30	190	4.3
≈ 70	≈ 50	280	2.8

Étant donné que leurs essais de durabilité ont été réalisés en boucle ouverte, la puissance n'est pas constante pendant toute la durée du test. Les puissances indiquées dans le tableau 3.2 sont donc des puissances moyennes. Cela dit, il semble que la vitesse de rotation soit de 40 rpm pour tous les tests. Donc, pour faire varier la puissance dissipée, ils ont obligatoirement fait varier le couple, et plus précisément, la contrainte de cisaillement.

Ces résultats bien que très intéressants, ne semblent pas complets. Les informations concernant le type de fluide MR et la température d'opération des tests ne sont pas données. Aussi, les chercheurs n'expliquent pas pourquoi le couple a diminué tout au long des tests.

D'un autre côté, le premier essai réalisé à 5 kPa ou 26 Nm semble indiquer que c'est plutôt le cisaillement mécanique de l'huile qui est la source du problème et non la puissance dissipée. Une question se pose : « Est-ce que l'augmentation de la contrainte de cisaillement augmente le cisaillement mécanique que l'huile subit ? ».

### Taux de déformation en cisaillement

Les seuls chercheurs ayant discuté de l'effet du taux de déformation en cisaillement sont Dr.Gabriel et Dr.Kieburg, représentants techniques de la compagnie BASF et des produits Basonetic [Gabriel *et al.*, 2011]. Il est important de mentionner que l'article scientifique est écrit de façon à vendre les mérites du fluide MR produit par BASF sans toutefois présenter les résultats expérimentaux.

Les conclusions mises de l'avant par Dr.Gabriel et Dr.Kieburg sont les suivantes :

- La durée de vie du fluide MR est  $>6$  MJ/ml ;
- Aucune différence significative sur la durée de vie du fluide MR n'a été relevée lors de différents essais à différents taux de déformation en cisaillement ;
- Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) démontrent aucune usure significative des particules de fer.

Pourquoi M. Kieburg dit-il avoir volontairement arrêté le test à 6 MJ/ml quand cette valeur correspond au LDE maximum recommandé par lui-même? Il n'annonce aucune différence significative sur la durée de vie en fonction du taux de cisaillement, mais sans présenter de courbes ou de résultats expérimentaux. Finalement, il mentionne que des observations au MEB ne démontrent aucune usure des particules sans toutefois présenter d'image.

### Température

Une étude de durabilité a été réalisée sur un embrayage MR en collaboration avec M.Smith, M.Ulicny et General Motors [Smith *et al.*, 2007; Ulicny *et al.*, 2007a,b]. Au cours de cette étude, ils ont réalisé un test d'une durée de 540 heures à haute température (+100 °C). Durant ce test, ils ont récupéré six échantillons de fluide MR pour ensuite analyser les particules ainsi que les composés organiques (huile). La dégradation de l'huile ne semble pas de nature thermique.

### 3.3.3 Dégradation et modes de défaillance du fluide MR

Plusieurs chercheurs dans la littérature ont parlé de dégradation, de mécanisme de dégradation ou bien d'usure. La section qui suit présente les résultats de leurs observations.

#### Décomposition de l'huile porteuse

En 1953, un pionnier dans le domaine des embrayages MR a réalisé plusieurs expériences avec différentes formulations de fluide MR [Jones, 1953]. Lors d'une expérience avec un

fluide MR composé de particules de fer et d'huile, il a observé une chute abrupte du couple expliquée par la décomposition de l'huile et la formation d'une « boue » (voir figure 3.6).

En 2001, J. David Carlson a discuté pour la première fois d'un problème d'épaississement du fluide MR communément appelé le *In-Use-Thickening* (IUT). Il mentionne que le fluide devient progressivement de plus en plus épais jusqu'à atteindre l'allure et la consistance d'une pâte. Cette augmentation de viscosité semble être causée par l'effritement de la couche externe des particules formées d'oxyde de fer sous la force des impacts et des contacts interparticulaires. Les débris non magnétiques créés ont une taille plus petite qu'une particule (nanométrique) et donc, un grand ratio surface sur poids. Ces petits débris peuvent influencer négativement les performances magnétiques et augmentent la viscosité du fluide MR. L'augmentation de la viscosité fait accroître le couple minimum tandis que l'oxydation des particules diminue le couple maximum. Donc, le fluide devient de plus en plus visqueux et de moins en moins efficace [Carlson, 2002].

En 2007, John C. Ulicny réalise des analyses organiques sur des échantillons de fluide MR provenant d'un test de durabilité ayant duré 540 heures ou l'équivalent de 70 MJ/ml [Ulicny *et al.*, 2007b]. Les résultats indiquent une baisse de la masse moléculaire de l'huile et aucune oxydation. Ces résultats suggèrent que le cisaillement mécanique est le mécanisme de dégradation dominant et non la dégradation thermique.

En 2008, Chritoffer Keiburg mentionne que la décomposition de l'huile porteuse a pour effet de créer une augmentation de pression. Il mentionne aussi qu'une perte constante de couple peut aussi être attribuée à la composition du fluide MR [Kieburg *et al.*, 2008]. M. Keiburg prétend que les nouvelles compositions de fluide MR rencontrent les requis de l'industrie en termes de durabilité et de fiabilité.

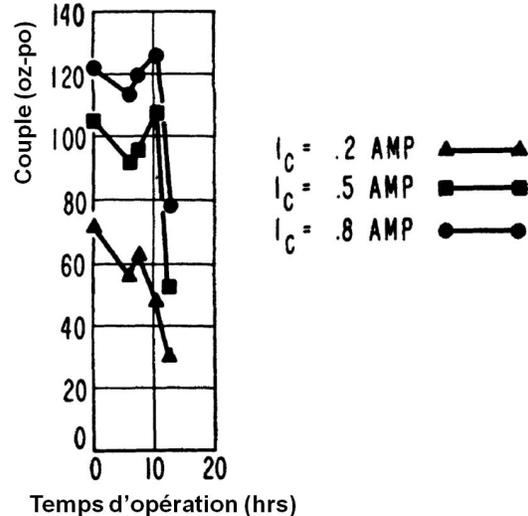


Figure 3.6 Test de durabilité réalisé par M.Rabinow en 1953 sur un fluide MR composé d'huile et de particules de fer. La cause de la baisse du couple serait la décomposition de l'huile.

### Oxydation des particules ferromagnétiques

En 2006, John C.Ulicny a mentionné dans un journal que l'augmentation du courant requis pour atteindre la même vitesse de rotation du ventilateur est due à l'oxydation des particules de fer contenues dans le fluide MR. En effet, il mentionne qu'une particule de fer oxydée a des propriétés magnétiques moins bonnes comparativement à des particules de fer pures [Smith *et al.*, 2007].

Dans un autre article publié la même année portant principalement sur l'analyse des particules [Ulicny *et al.*, 2007a], Ulicny mentionne que l'oxyde retrouvé sur les particules est de la magnétite cristalline. Il ajoute que l'on retrouve la magnétite en plus forte concentration sur les plus petites particules. Cela dit, il y a aussi présence d'oxyde sur les plus grosses particules (voir figure 3.7). La présence de magnétite a pour effet de réduire les propriétés magnétiques des particules de fer.

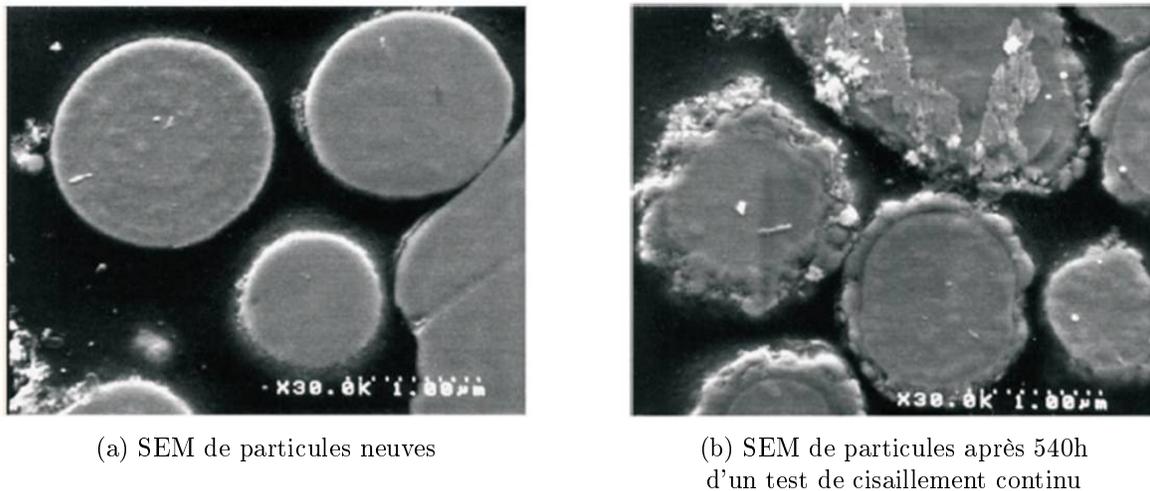


Figure 3.7 Présence d'oxyde recouvrant les particules de fer [Ulicny *et al.*, 2007a]

D'un autre côté, Dr.Gabriel et Dr.Keiburg prétendent que les propriétés rhéologiques du fluide MR suite à un test de durabilité sont comparables aux propriétés originales du fluide MR [Gabriel *et al.*, 2011]. Cette affirmation remet encore une fois en doute les affirmations de ces chercheurs.

### Changement morphologique des particules

Comme discuté précédemment à la section 3.3.2, le chercheur Chritoffer Keigburg a mentionné avoir observé aucun changement de la morphologie des particules suite à un test de durabilité. Cela dit, pour qu'une particule se déforme, elle doit avoir subi une contrainte

plus élevée que la limite élastique du matériau. La limite élastique d'un acier de faible résistance mécanique est d'environ 300 MPa, ce qui est environ 3750 fois plus que la contrainte de cisaillement maximum qu'un fluide MR. De plus, la forme sphérique des particules favorise un roulement plutôt qu'un coincement. Il semble donc normal de ne pas observer un changement morphologique des particules.

M. Jones a observé qu'un mélange composé de poudres de fer et d'acétylène noir avait tendance à se compacter [Jones, 1953]. Ce phénomène avait pour effet de rendre le comportement de l'embrayage erratique. M. Jones explique que le compactage était causé par un phénomène de frittage. Le frittage consiste à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion. Puis, sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui forme la cohésion du fluide MR.

### Augmentation de la pression

Les chercheurs Ansgar Wiehe et Jürgen Mass ont observé lors de trois tests expérimentaux, une augmentation de la pression (voir figure 3.8) suivie par un changement du couple produit par l'embrayage [Wiehe *et al.*, 2011]. Il mentionne que cette augmentation de pression est une indication de l'usure du fluide MR.

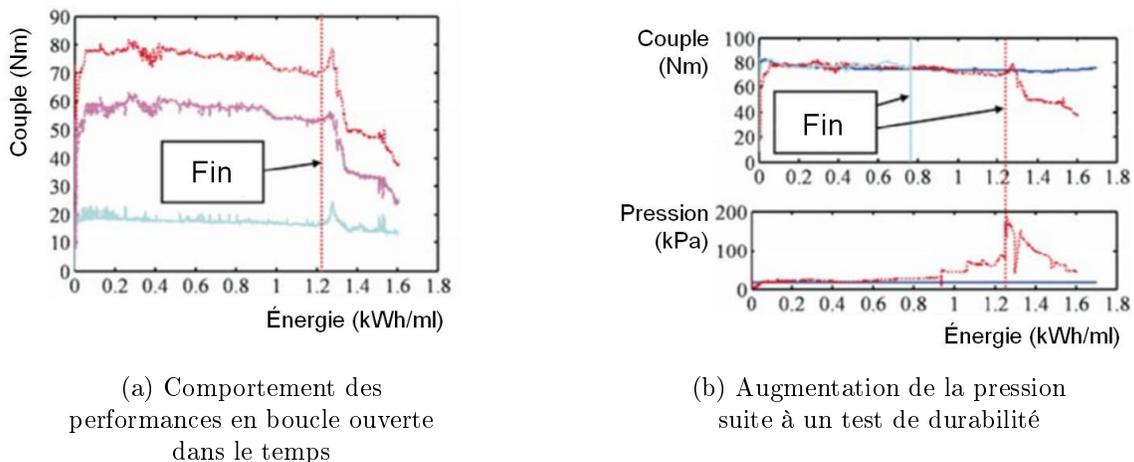


Figure 3.8 Test de durabilité réalisé par Jürgen Mass sur le Basonetic 5030

Physiquement, pour que la pression à l'intérieur d'un embrayage augmente, il est obligatoire qu'il y ait eu un changement de volume ou bien un déplacement du fluide. Aucune cause possible n'est discutée par le chercheur allemand.

## 3.4 Conception d'embrayage MR durable

Il est important de mentionner que la durabilité du fluide MR ne limite pas obligatoirement celle de l'application MR (embrayage ou suspension). En effet, certaines applications sont plus ou moins sensibles à la dégradation du fluide MR.

Prenons exemple sur les embrayages testés par Anthony L. Smith et Einar Hreinsson [Gopalswamy, 1999; Hreinsson, 2011; Smith *et al.*, 2007]. Les deux embrayages ont, respectivement, une interface de cisaillement d'une épaisseur de 0.9 mm et 0.025 mm. Cela dit, les deux applications, soit l'embrayage pour contrôler la vitesse d'un fan de camion et l'embrayage pour orthèse de genoux, n'ont certainement pas les mêmes requis en termes de densité de couple. Dans le premier cas, le changement de viscosité du fluide MR n'a eu aucune incidence sur la fonctionnalité du fan de camion. Par contre, dans le second cas, une augmentation de la viscosité rend inutilisable l'orthèse de genoux.

Au final, il semble y avoir un compromis entre la performance et la durabilité lors de la conception d'un embrayage MR.

## 3.5 Conclusion

À la lumière de l'état de l'art présenté, il est clair qu'une compréhension plus précise et impartiale des causes et du processus de dégradation du fluide MR est nécessaire. En effet, une meilleure compréhension est essentielle pour être en mesure de concevoir de meilleurs embrayages MR et au final, des embrayages plus durables qui seront moins sensibles à la dégradation du fluide MR.

Aussi, une meilleure connaissance du processus de dégradation permettra de réaliser une analyse de fiabilité réaliste et de mettre en valeur le potentiel de durabilité et de fiabilité des embrayages MR. Ceci ouvrirait la porte à une multitude de possibilités d'applications utilisant cette technologie dont celle étudiée dans le projet ENV404.



# CHAPITRE 4

## OBJECTIFS DU PROJET DE RECHERCHE

### 4.1 Objectifs du projet de recherche

Les objectifs du projet de recherche se divisent en deux parties : l’embrayage MR et le fluide MR.

#### 4.1.1 Objectifs - embrayage MR

- Évaluer le potentiel en terme de fiabilité des embrayages MR ;
- Identifier les modes de défaillance d’un embrayage MR ;
- Proposer des solutions pour la conception d’embrayages MR plus fiables et plus durables.

#### 4.1.2 Objectifs - fluide MR

- Identifier l’impact des paramètres d’opération (taux de cisaillement, contrainte de cisaillement et température) sur la durabilité du fluide MR ;
- Comprendre le processus de dégradation et identifier les modes de dégradation du fluide MR commercialement disponible ;
- Proposer des solutions afin d’éliminer ou de mitiger les modes de dégradation du fluide MR qui sont critiques au fonctionnement des embrayages MR ;
- Proposer des stratégies de détection et d’identification de fautes du fluide MR.

### 4.2 Contribution originale

Tout d’abord, la contribution originale de ce projet de recherche est la première évaluation de la fiabilité d’un embrayage MR dans la littérature. Cette analyse de fiabilité permet de mettre en valeur le potentiel de fiabilité et de durabilité des embrayages MR tout en indiquant les éléments critiques. Ceci permettrait un plus grand éventail de possibilités d’application utilisant cette technologie.

Une autre contribution originale que ce travail est une meilleure compréhension du processus de dégradation du fluide MR et son impact sur les performances d’un embrayage

MR utilisé en glissement continu. Cette compréhension passe obligatoirement par l'étude expérimentale rigoureuse de la dégradation du fluide MR. Pour ce faire, deux bancs d'essais complètement autonomes et sécuritaires ont été développés pour réaliser des essais de très longue durée ( $>100$  heures) permettant de simuler des conditions d'opération (température, couple, vitesse) données.

# CHAPITRE 5

## FIABILITÉ DES EMBRAYAGES MR

Ce chapitre porte sur l'analyse de fiabilité de l'embrayage MR présenté à la section A.2 de l'annexe A. L'objectif est de valider si les requis de fiabilité de chacune des composantes de embrayage MR utilisées dans le système de contrôle primaire de vol d'un hélicoptère (voir section A.1) sont réalistes et atteignables. Pour ce faire, une approche de fiabilité du système vers les composantes est utilisée. Ce type d'approche se sert des requis de fiabilité du système, dans notre cas un hélicoptère, comme point de départ. Ensuite, les requis de fiabilité de chacune des composantes de l'embrayage MR sont évalués et comparés avec des valeurs trouvées dans la littérature.

L'étude expérimentale présentée au chapitre 7 (cumulant environ 1750 heures de tests) a permis d'identifier les modes de défaillance du fluide MR et les effets sur l'embrayage. Ces résultats sont utilisés lors de l'étude de fiabilité de ce chapitre.

### 5.1 Méthodologie

La figure 5.1 présente l'approche utilisée du système vers les composantes pour déduire les requis de fiabilité des composantes d'un embrayage MR. L'analyse présentée dans ce chapitre porte essentiellement sur la dernière étape de ce processus.

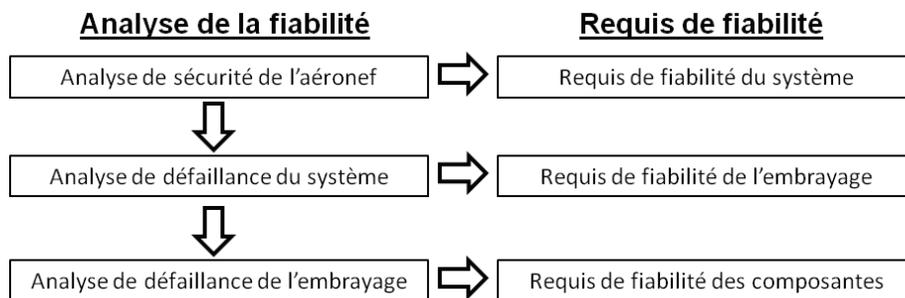


Figure 5.1 Méthodologie utilisée pour l'analyse de fiabilité

Les requis de fiabilité de chacune des composantes sont déterminés par l'entremise d'une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) suivie par l'élaboration d'arbres de défaillance.

Il est à noter que les composantes électriques et électroniques sont considérées comme étant très fiables puisqu'elles sont normalement utilisées en redondance. Donc, seulement les composantes mécaniques sont considérées dans cette étude de fiabilité. De plus, on fait l'hypothèse que les taux de défaillance sont constants dans le temps.

## 5.2 Requis fonctionnels

Les requis fonctionnels présentés au tableau 5.1 proviennent d'une étude de fiabilité de plus haut niveau qui n'est pas présentée dans ce document. Ces requis sont exprimés en termes de défaillance par heure de vol et doivent être rencontrés pour satisfaire les exigences de la *Federal Aviation Regulations* en termes de sécurité. Ceux-ci sont présentés au tableau 5.1.

Tableau 5.1 Requis fonctionnels de fiabilité pour un embrayage MR utilisé pour le contrôle primaire d'une surface de vol d'un hélicoptère

Mode de défaillance	$\lambda$ (défaillance/heure)
Blocage de l'embrayage	2.2E-10
Blocage de l'entrée de l'embrayage	Requis système
Blocage de la sortie de l'embrayage	Requis système
Aucun couple transmis	2.4E-10
Diminution du couple transmis <sup>1</sup>	Non disponible
Perte de performance aléatoire <sup>1</sup>	Non disponible

Les paragraphes ci-dessous définissent chacun des modes de défaillance présentés au tableau 5.1.

**Blocage de l'embrayage.** Le blocage de l'embrayage signifie qu'il n'est plus possible de désembrayer. Ce mode de défaillance peut être causé soit par un coincement entre le stator et le rotor causé par le bris ou le décollement d'un tambour ou soit par la saisie d'un roulement à billes. Dans ces situations, la surface de vol sera complètement ouverte ou fermée (*full deployed or retracted*).

**Blocage à l'entrée de l'embrayage.** Le blocage à l'entrée de l'embrayage signifie que la partie tournante (rotor) ne peut plus être amenée en rotation. Cette défaillance peut être causée par un bris du moteur électrique ou de la transmission situé en amont de

<sup>1</sup>Il n'y a pas de requis fonctionnels de fiabilité dans les normes canadiennes pour ces modes de défaillance.

l'embrayage. Dans cette situation, l'embrayage doit être mis hors service afin d'éviter un blocage à la sortie de l'embrayage qui mène à une situation beaucoup plus critique.

**Blocage à la sortie de l'embrayage.** Le blocage à la sortie signifie que le levier de sortie de l'embrayage ne peut plus être amené en rotation. Cette défaillance peut être causée par le coincement du mécanisme à quatre barres situé en aval de l'embrayage. Ceci a pour incidence de fixer la surface de vol.

**Aucun couple transmis.** Aucun couple transmis signifie qu'aucun couple ne peut être transmis de l'arbre de transmission venant des moteurs électriques vers la sortie de l'embrayage.

**Diminution du couple transmis.** La diminution du couple transmis signifie qu'il y a une perte de performance de façon constante et prédictive. La perte de performance peut être causée par la dégradation du fluide MR ou par la perte de fluide MR à l'interface de cisaillement.

**Perte de performance aléatoire.** La perte de performance aléatoire signifie que les performances de l'embrayage varient d'une façon incompréhensible. La perte de performance aléatoire peut être causée par la dégradation du fluide MR. Comme expliqué au chapitre 7, une mauvaise lubrification des particules de fer peut causer un comportement erratique de l'embrayage.

## 5.3 Analyse de fiabilité

L'analyse de fiabilité suivante est divisée en trois étapes : 1. l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets ; 2. l'analyse par arbres de défaillance ; 3. une comparaison des requis de fiabilité versus les valeurs théoriques trouvées dans la littérature. Cette analyse est basée sur l'architecture et l'embrayage MR présentés à l'annexe A.

### 5.3.1 Analyse des modes de défaillances et de leurs effets

L'AMDE est une méthode systématique. En effet, elle permet de mettre sur papier l'ensemble des modes de défaillance des composantes pour ensuite évaluer les effets sur les performances du système [A. Ericson, 2005]. Le tableau 5.2 présente un AMDE réalisé sur l'embrayage MR présenté à l'annexe A section A.2.

Les modes de défaillance concernant le fluide MR ont été déterminés de façon expérimentale. Cette étude expérimentale est présentée au chapitre 7 et a été réalisée sur deux

Tableau 5.2 Analyse des modes de défaillance et de leurs effets

Composante	Mode de défaillance	Effet de la défaillance sur l'embrayage	Cause de la défaillance
<b>Joint d'étanchéité dynamique</b>	Fuite	Diminution du couple transmis ou aucun couple transmis	- Contamination - Dégradation thermique - Pression excessive - Vibrations
<b>Joint d'étanchéité statique</b>	Fuite	Diminution du couple transmis ou aucun couple transmis	- Température excessive - Pression excessive
<b>Roulement à billes</b>	Saisie mécanique	Blocage de l'embrayage	- Mauvaise lubrification - Haute température - Contamination - Dommages en fatigue
<b>Bobine</b>	Cour-circuit	Aucun couple transmis	- Température excessive - Vibrations - Humidité excessive
<b>Fluide MR</b>	Augmentation de la viscosité	Augmentation du couple minimal	- Oxydation de l'huile - Contamination
	Diminution de la contrainte de cisaillement maximale	Diminution du couple transmis	- Migration des particules - Diminution des propriétés magnétiques des particules
	Augmentation du volume	Diminution du couple transmis	- Vaporisation de l'huile - Dilatation thermique
	Variation de la relation champ magnétique vs contrainte de cisaillement	Perte de performance aléatoire	- Migration des particules - Mauvaise lubrification inter-particulaire - Dégradation de l'huile
<b>Structure (rotor, stator, tambour)</b>	Déformation excessive des tambours	Blocage de l'embrayage	- Expansion thermique - Attraction magnétique

embrayages MR. La première est un embrayage MR miniature pouvant transmettre un couple maximum d'environ 4 Nm. La seconde est un embrayage MR pouvant transmettre environ 60 Nm. Ces deux embrayages sont de type tambour et ils ont respectivement un espacement de fluide MR de 0.030 po et 0.020 po.

Le tableau 5.2 fait ressortir plusieurs points importants provenant de l'analyse des modes de défaillance :

- Les embrayages MR sont composés d'éléments simples et peu nombreux ;
- Il n'y a aucun contact métal-métal entre les parties mobiles qui transmettent du couple ;
- La température est une cause commune de défaillance pour les embrayages MR, ce qui veut dire qu'une attention particulière devra être prise pour diminuer au maximum la température d'opération des embrayages MR ;
- Les modes de défaillance du fluide MR ne causent pas d'évènement catastrophique sur le fonctionnement des embrayages MR.

### 5.3.2 Analyse par arbres de défaillances

La méthode d'analyse par arbres de défaillances est basée sur l'algèbre booléenne et la théorie des probabilités. Cette méthode permet d'analyser simplement des systèmes pouvant être très complexes. Un des avantages majeurs est que cette méthode fournit des résultats qualitatifs et quantitatifs. Par contre, la méthode est limitée par la connaissance du système à l'étude. C'est pourquoi une étude expérimentale portant principalement sur la dégradation du fluide MR a été réalisée.

Les arbres de défaillances communément appelé en anglais *Fault Tree Analysis* (FTA) présentés ci-dessous ont permis de déterminer les requis de fiabilité pour chacune des composantes en fonction des requis de l'embrayage MR présentés au tableau 5.1. L'embrayage MR étudié est présenté à la section A.2 de l'annexe A. Étant une étude préliminaire, l'allocation des taux de défaillance a été faite de façon égale entre chacune des composantes. De plus, pour tous les composantes structurelles de l'embrayage, on a fait l'hypothèse que celles-ci sont conçues selon la philosophie « vie infinie ». Cela veut dire que les contraintes appliquées sont toujours inférieures à la limite d'endurance ou à la limite d'endurance conventionnelle (vie quasi-infinie) [C. Juvinall et M. Marshek, 2000].

#### FTA - Aucun couple transmis

La figure 5.2 présente le FTA pour le mode de défaillance « Aucun couple transmis par l'embrayage MR ». Ce mode de défaillance peut être causé par quatre événements. Les événements les plus critiques dans ce cas sont la fuite d'un joint d'étanchéité et le court-circuit d'une bobine.

Selon l'arbre de défaillances de la figure 5.2, le taux de défaillance requis pour les joints d'étanchéité est de  $3.9E-6$  *défaillance/heure*. Ce taux de défaillance n'est pas réaliste pour un joint d'étanchéité à lèvres comme utilisé dans l'embrayage MR présenté à l'annexe A. Par contre, un joint d'étanchéité mécanique peut théoriquement rencontrer le requis de fiabilité. En effet, le taux de défaillance estimé est d'environ  $E-8$  *défaillance/heure* [Division, 2010]. Le calcul du taux de défaillance a été fait en prenant en considération la température d'opération, la contamination, la vitesse de rotation ainsi que la viscosité du fluide MR. Ce type de joint d'étanchéité a aussi l'avantage de ne pas éclater comme les joints d'étanchéité à lèvres. Cela dit, un programme de recherche et développement devrait être mis en oeuvre comme expliqué à la section 2.3 pour valider l'impact de la présence d'une grande quantité de particules en contact avec les surfaces d'étanchéité.

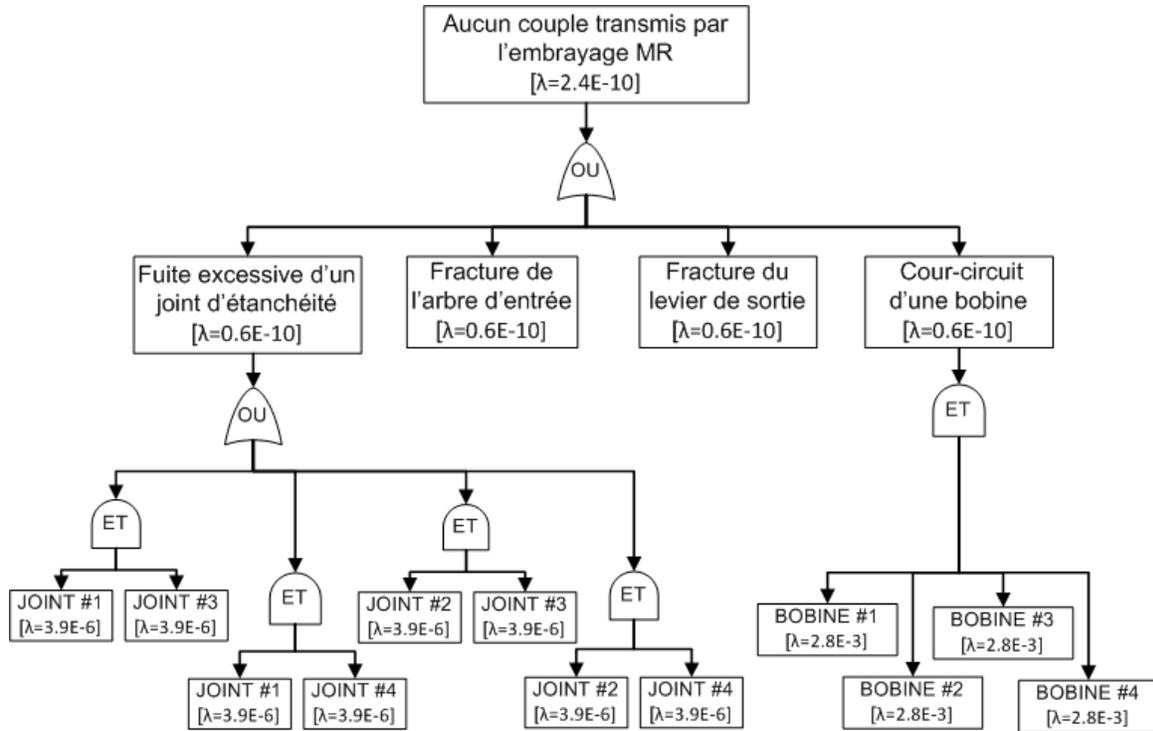


Figure 5.2 Arbres de défaillances pour le mode de défaillance : Aucun couple transmis

Pour les bobines d'alimentation, le taux de défaillance requis est de  $2.8E-3$  *défaillance/hr.* Ce taux de défaillance est élevé puisque quatre bobines assurent l'alimentation du circuit magnétique. Il a donc très peu de chance que les quatre ne fonctionnent plus en même temps. Cela dit, le choix du nombre de bobines a été fait de manière à s'assurer que 75% du couple maximal sera disponible lorsqu'une bobine est en défaillance.

### FTA - Blocage de l'embrayage MR

La figure 5.3 présente le FTA pour le mode de défaillance « Blocage de l'embrayage MR ». Ce mode de défaillance peut être causé par deux événements. Le premier événement « déformation ou bris des tambours » peut être considéré comme un problème structurel. Donc, on peut faire l'hypothèse que la fiabilité est très élevée. Le deuxième événement « saisie des roulements à billes » est très critique et nécessite un taux de défaillance de  $1.1E-10$  *défaillance/heure* pour chacun des roulements.

Le taux de défaillance des roulements à billes utilisés dans l'embrayage MR étudié est de  $1E-8$  *défaillance/hr* après 2000 heures d'utilisation (voir figure 5.4a). Cette valeur est beaucoup trop élevée comparativement au requis selon l'arbre de défaillances de la figure 5.3. L'approche possible dans cette situation est de réaliser de la maintenance préventive en remplaçant les roulements ou bien en inspectant ceux-ci périodiquement (voir figure

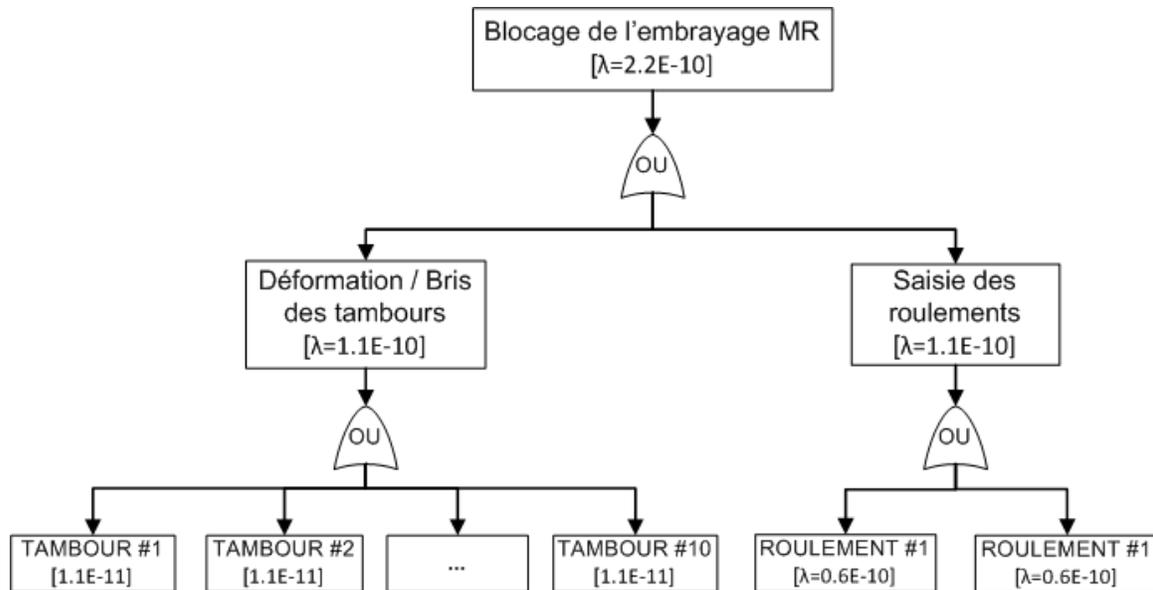
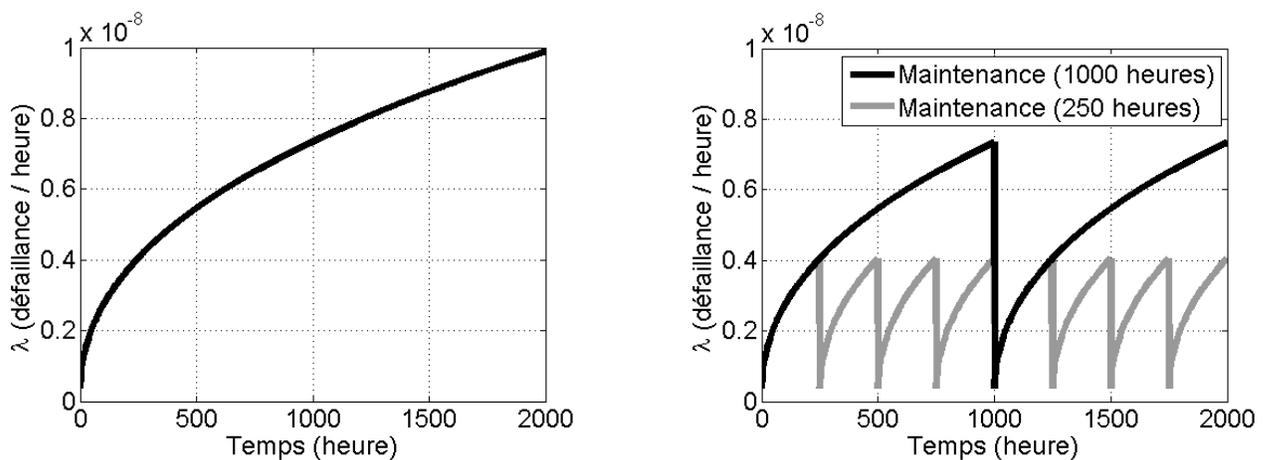


Figure 5.3 Arbre de défaillances pour le mode de défaillance : Blocage de l'embrayage

5.4b). Une maintenance préventive réalisée à toutes les 250 heures de vol ne permettrait pas d'atteindre le requis de fiabilité. Cela dit, une bonne compréhension de la signature vibratoire des roulements permettrait sûrement d'atteindre les niveaux de fiabilité requis [Tafinine et Mokrani, 2012].



(a) Taux de défaillance d'un roulement à billes basé sur une distribution de Weibull

(b) Taux de défaillance d'un roulement à billes avec maintenance préventive à tous les 1000 heures ou 250 heures

Figure 5.4 Effet de la maintenance préventive sur le taux de défaillance d'un roulement à billes

### FTA- Diminution du couple transmis

La figure 5.5 présente le FTA pour le mode de défaillance « Diminution du couple transmis par l'embrayage MR ». Ce mode de défaillance peut être causé par trois événements, soit la fuite d'un joint d'étanchéité dynamique, la fuite d'un joint d'étanchéité statique ainsi que la diminution de la contrainte maximale de fluide MR.

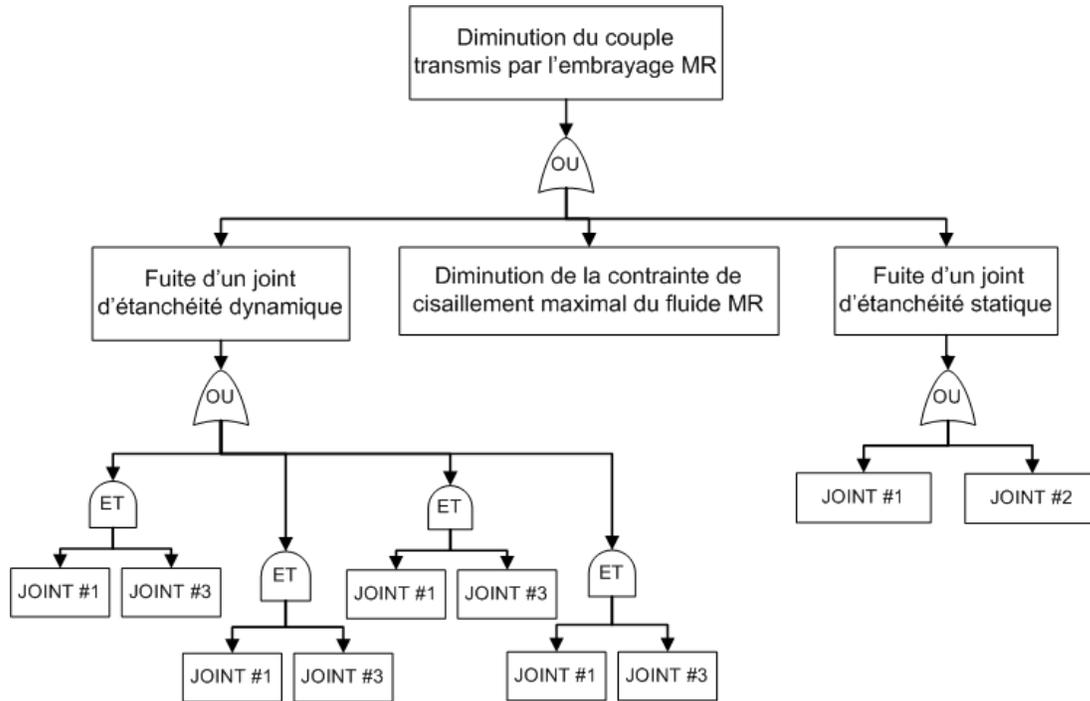


Figure 5.5 Arbre de défaillances pour le mode de défaillance : Diminution du couple transmis par l'embrayage MR

La fuite d'un joint d'étanchéité (statique ou dynamique) peut avoir un effet négatif sur le couple maximal que l'embrayage MR peut transmettre. Par contre, il est important de mentionner que la perte de fluide MR n'est pas directement liée à une baisse du couple transmissible. En effet, pour qu'une baisse de couple survienne, il doit y avoir une perte de particules ferromagnétiques à l'interface de cisaillement. Les essais expérimentaux dans le cadre de ce projet ont permis de confirmer qu'une grande perte d'huile, par exemple, n'a pas nécessairement d'effet direct sur le couple transmis (voir section 7.2).

Aussi, la diminution de la contrainte de cisaillement maximale du fluide MR peut être causée par :

- La migration des particules de fer à l'extérieur de l'interface de cisaillement ;
- La diminution des propriétés magnétiques causée par l'oxydation des particules ;
- La diminution de la viscosité.

### FTA - Perte de performance aléatoire

La figure 5.6 présente le FTA pour le mode de défaillance « Perte de performance aléatoire de l’embrayage MR ». Ce mode de défaillance peut être causé par la variation de la relation couple versus courant de l’embrayage MR et par la formation d’agglomérations de particules.

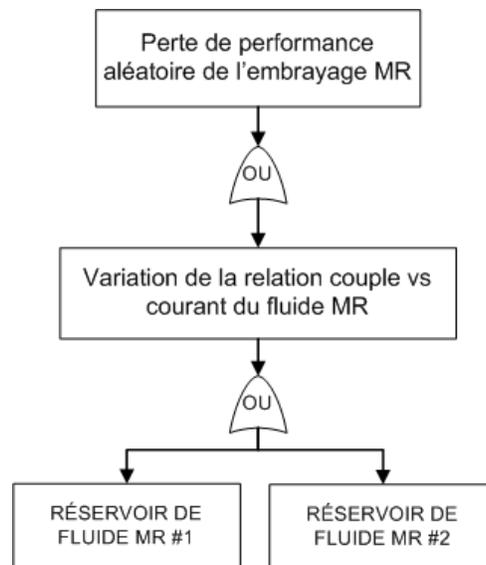


Figure 5.6 Arbre de défaillances pour le mode de défaillance : Perte de performance aléatoire de l’embrayage MR

La variation de la relation couple versus le courant a été observée dans tous les tests expérimentaux réalisés dans le cadre du projet ENV404. Cette variation se manifeste de deux manières : 1. variation rapide (ms) et momentanée ; 2. variation lente (sec.) et permanente.

Dans la littérature, on explique la variation rapide et momentanée par une mauvaise lubrification interparticulaire [Jones, 1953]. D’un autre côté, les variations lentes et permanentes semblent être causées par une migration des particules à l’extérieur de l’interface de cisaillement ou par une chute importante de la viscosité.

L’impact de la formation d’agglomérations de particules sur les performances d’un embrayage MR est présenté à la figure 5.7. En effet, pendant les deux premières secondes du graphique, le couple a atteint près de 45 Nm ou environ 100% du couple nominal pour un courant nul.

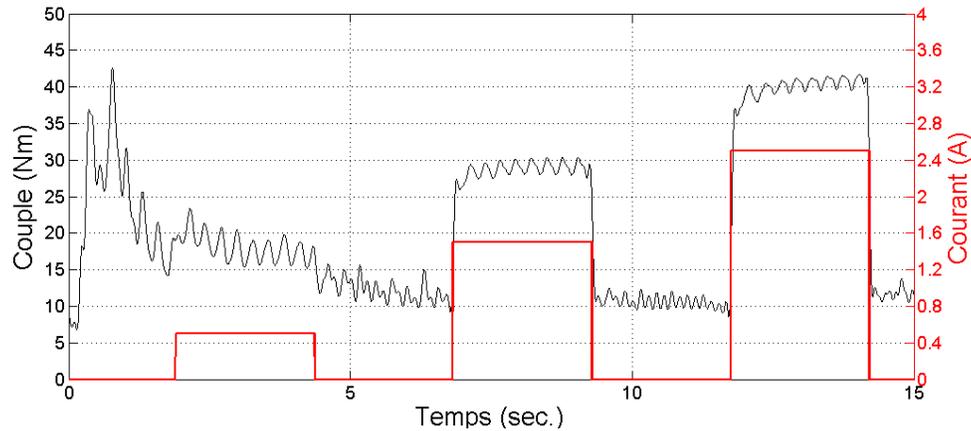


Figure 5.7 Perte de contrôle momentanée ( $\approx 2$  sec.) de l'embrayage avant une période de caractérisation

### 5.3.3 Comparatif (théorie vs requis)

Le tableau 5.3 présente les valeurs des taux de défaillance pour chaque composante. On retrouve à la colonne du centre les requis et à la colonne de droite les valeurs estimées. Les taux de défaillance estimés ont été déterminés par similitude et/ou calculs préliminaires.

Tableau 5.3 Taux de défaillance estimés versus requis pour l'embrayage MR

Composante	Requis (défaillance/heure)	Estimé (défaillance/heure)
Roulement à billes	0.6E-10	0.4E-8 (avec maintenance)
Joint d'étanchéité à lèvres	3.9E-6	2.5E-5 (analogie)
Joint d'étanchéité mécanique	3.9E-6	1E-8 (analogie)
Bobine	2.8E-3 (avec redondance)	1E-6
Fluide MR	-	Aucun estimé
Tambour	1.1E-11	Vie infinie
Arbre d'entrée	0.6E-10	Vie infinie
Levier de sortie	0.6E-10	Vie infinie

Comme discuté à la section 2.3, lorsque les valeurs de fiabilité requises ne correspondent pas aux chiffres de fiabilité que l'on retrouve dans la littérature, une décision doit être prise. Voici les approches choisies pour potentiellement atteindre les requis de fiabilité.

1. **Redondance** : Chambre de fluide MR (x2) et bobine (x4).
2. **Maintenance préventive (temps réel)** : Roulement à billes.
3. **Recherche et développement** : Fluide MR et joint d'étanchéité.

## 5.4 Méthode d'identification de fautes

Comme discuté à la section 2.4, l'identification des fautes pour un système d'actuation critique est essentielle. Puisque les embrayages MR représentent un élément critique du système d'actuation mis de l'avant dans le projet ENV404, il est important d'intégrer cette philosophie dès les premières étapes de conception.

L'étude expérimentale présentée au chapitre 7 a permis d'étudier le processus de dégradation de fluide MR et son impact sur les performances de l'embrayage. Ces informations ont permis d'identifier les paramètres à surveiller pour identifier les fautes.

### 5.4.1 Approche directe

La détection de fautes d'un embrayage MR peut se faire de façon similaire aux systèmes hydrauliques utilisés dans le domaine de l'aéronautique. En effet, des capteurs de température intégrés aux embrayages MR permettraient d'identifier une surchauffe du fluide MR. Aussi, des capteurs de pression permettraient d'identifier les changements de volume du fluide MR.

### 5.4.2 Approche indirecte

Plusieurs approches « hybrides », c'est-à-dire un modèle couplé à des valeurs physiques provenant de mesures expérimentales, ont été identifiées comme étant intéressantes pour les embrayages MR.

**Approche hybride #1.** Le couplage d'un modèle expérimental de la pression en fonction de la température  $P(T)$  avec des capteurs de température et de pression permettrait d'identifier un changement de volume suspect qui n'est pas attribué à la dilatation thermique de l'huile (voir figure 5.8). En effet, lorsque la pression est plus basse que la pression prédite, on est en présence d'une fuite d'huile. D'un autre côté, lorsque la pression est plus élevée que la pression prédite, le fluide MR est dégradé (pour plus d'informations concernant le changement de volume du fluide MR suite à la dégradation voir la section 7.2.4).

**Approche hybride #2.** Sachant que la durée de vie du fluide MR dépend des conditions d'utilisation, un modèle expérimental pourrait être intégré au système pour prévenir les changements de fluide MR. En effet, cette technique permettrait d'éviter de changer le fluide MR prématurément et du même coup, permettrait de réduire les coûts de maintenance. Cette approche est utilisée dans le domaine de l'automobile depuis quelques années [Schwartz et Smolenski, 1987] [Paul, 2007]. En effet, des recherches ont permis d'identifier

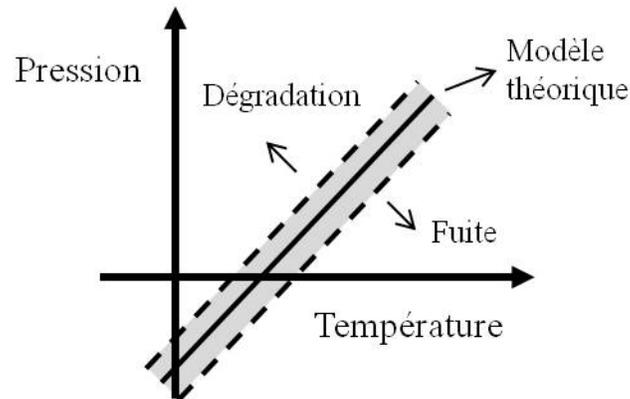


Figure 5.8 Approche basée sur la lecture de la pression et de la température pour faire la détection de fautes des embrayages MR.

que la durée de vie de l'huile à moteur est fonction de la température, du kilométrage de la voiture, de la vitesse de révolution du moteur et des changements physiques des propriétés de l'huile. Un modèle mathématique basé sur ces mesures expérimentales a été créé et intégré à l'ordinateur de bord des voitures.

**Approche hybride #3.** Puisque les performances d'un embrayage MR (couple minimum et maximum) et les propriétés du fluide MR (viscosité et propriété magnétique) varient tout au long de la vie utile de l'embrayage, il est important de déterminer ces caractéristiques régulièrement. L'intégration d'une cellule de force entre les deux embrayages MR servant au contrôle d'un degré de liberté des surfaces de vol est nécessaire (voir figure 5.9).

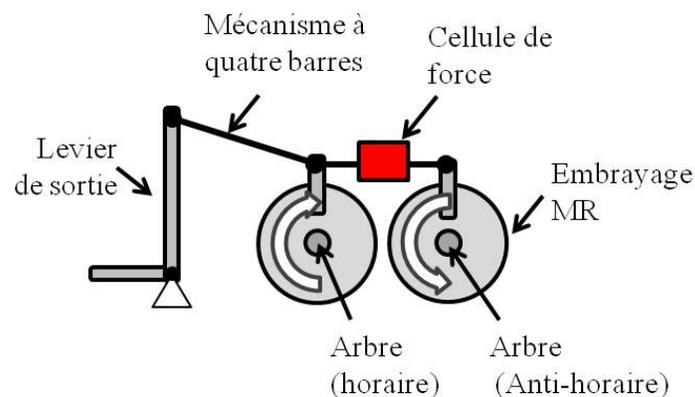


Figure 5.9 Architecture du système mis de l'avant dans le projet ENV404 pour contrôler les surfaces de vol d'un hélicoptère. Une cellule de force doit être intégrée entre les deux embrayages afin de pouvoir évaluer les performances de chaque embrayage.

La cellule de force permettrait de caractériser les performances en boucle ouverte, la viscosité du fluide MR, la résistance des joints d'étanchéité et des roulements à billes. Plusieurs indicateurs obtenus lors de l'étude de durabilité du fluide MR pourraient être utilisés pour identifier un embrayage en faute lorsque :

- la viscosité du fluide MR n'est plus linéaire ou newtonienne ;
- le couple minimal dépasse une valeur critique ;
- le couple maximal a diminué d'un certain pourcentage ;
- les performances en boucle ouverte ne sont plus répétables.

La séquence de caractérisation pourrait être réalisée avant chaque décollage au même titre que les vérifications du *pre-flight checklist* en aviation [Senthil *et al.*, 2009].

## 5.5 Conclusion

Cette étude préliminaire de fiabilité a permis de faire ressortir quelques points importants :

- Un programme de maintenance préventive doit être mis en place sur les roulements à billes pour atteindre le requis de fiabilité ;
- Les joints d'étanchéité à lèvres doivent être remplacés par des joints d'étanchéité mécaniques pour atteindre le requis de fiabilité ;
- L'impact de la présence d'une grande quantité de particules en contact avec les surfaces d'étanchéité des joints mécaniques doit être étudié expérimentalement ;
- L'étude de la dégradation du fluide MR doit être poursuivie afin d'obtenir plus de données expérimentales et gagner confiance envers les résultats.

Aussi, l'identification de fautes d'un embrayage MR est possible par l'entremise de plusieurs méthodes directes ou indirectes. La mise en place de ces méthodes nécessite des études approfondies sur les embrayages MR ainsi que sur le système qui sera intégré à un hélicoptère.



# CHAPITRE 6

## BANCS D'ESSAIS

Pour réaliser l'étude expérimentale sur le vieillissement du fluide MR et la durée de vie des embrayages MR, deux bancs d'essais ont été conçus et fabriqués. Le premier est un banc d'essais miniature conçu pour réaliser des essais de vieillissement du fluide MR rapidement et ce, dans des conditions d'opération uniformes et contrôlées. Le second banc d'essais de dimensions plus réalistes en regard avec l'application visée a été conçu pour étudier précisément le processus de dégradation du fluide MR et identifier la signature de dégradation typique d'un embrayage MR à tambour. Aussi, la conception de l'embrayage MR grandeur réelle a été réalisée dans un esprit de polyvalence et de modularité. Les sections suivantes présentent les deux bancs d'essais en détails, les choix de conception, l'instrumentation, la séquence des tests ainsi que les limitations.

### 6.1 Banc d'essais à échelle réduite

Un banc d'essais pour réaliser des tests de vieillissement accélérés du fluide MR a été conçu et fabriqué (voir figure 6.1). Une attention particulière a été portée afin de bien contrôler les paramètres d'opération tels que la température de l'embrayage, le couple de sortie ainsi que la vitesse de rotation.

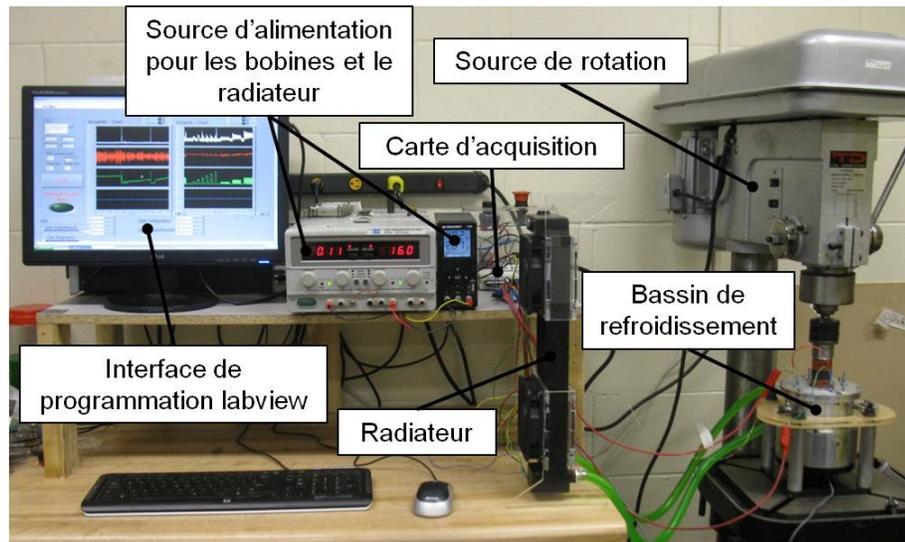


Figure 6.1 Photo du banc d'essais en fonctionnement

Le banc d'essais est entraîné par un moteur électrique de 2 hp à vitesse fixe. Celui-ci entraîne une transmission à courroie permettant d'ajuster la vitesse entre 300 et 3000 rpm à la sortie. La vitesse à la sortie de la transmission est mesurée par un capteur optique tandis que le couple à la sortie de l'embrayage est mesuré par une cellule de couple (Transducer Techniques model TRT-200). Le banc d'essais est équipé d'un capteur de température (Omega thermocouple No. TJ36-CASS-116G-6-SB-SMPW-M) et d'un radiateur (HX-360HL) pour contrôler la température de l'embrayage. L'embrayage MR est immergé à l'intérieur du bassin de refroidissement (voir figure 6.2b). L'acquisition ainsi que le contrôle sont faits avec une carte USB de National Instruments.

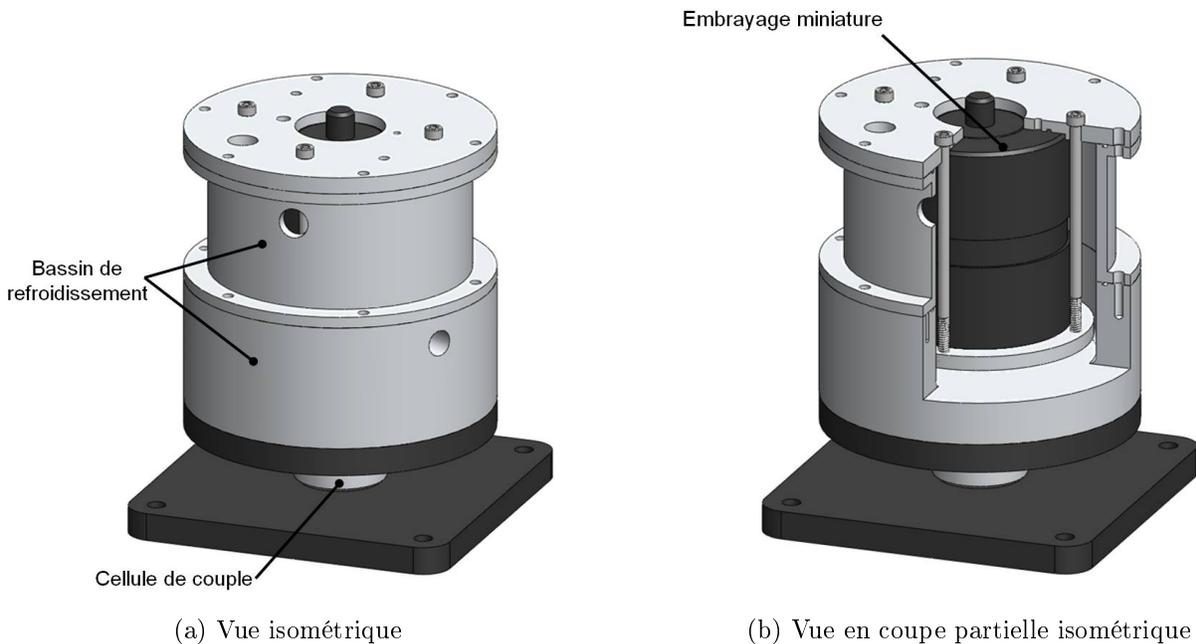


Figure 6.2 Banc d'essais à échelle réduite

### 6.1.1 Présentation de l'embrayage

Un embrayage de type tambour a été choisi afin que le taux de cisaillement soit uniforme sur toute la longueur de l'interface de cisaillement (voir figure 6.3b) contrairement à une configuration disque. Aussi, une configuration avec deux bobines a été choisie afin d'obtenir un champ magnétique uniforme. Les boulons de serrage sont placés à l'extérieur du bâti (voir figure 6.3a) afin d'éviter de perturber le flux magnétique de l'embrayage. Un arrangement vertical a été choisi afin de simplifier le montage et de pouvoir utiliser une « perceuse à colonne » comme source de rotation.

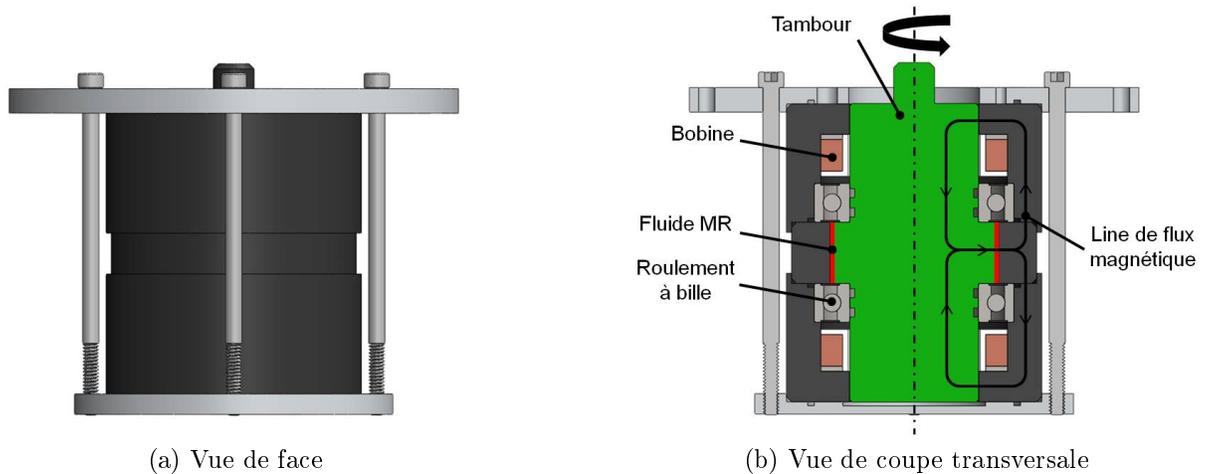


Figure 6.3 Embrayage MR miniature pour les essais de vieillissement accélérés

### Dimensionnement de l'embrayage

Le dimensionnement de l'embrayage a été réalisé de façon à satisfaire plusieurs contraintes fonctionnelle et/ou temporelle suivantes :

- Respecter un taux de déformation en cisaillement réaliste dans le cadre de l'application visée, c'est-à-dire entre  $1000$  à  $3000 \text{ s}^{-1}$  ;
- Respecter une puissance volumique de l'ordre de  $100$  à  $300 \text{ Watts/ml}$  ;
- Limiter la durée des tests à cinq jours et ce, en faisant l'hypothèse que la durée de vie du fluide MR se situe entre  $2 \text{ MJ/ml}$  et  $10 \text{ MJ/ml}$  ;
- Utiliser une quantité de fluide MR suffisamment grande pour ne pas complexifier les manipulations ( $>1 \text{ ml}$ ) ;
- Permettre la magnétisation du fluide MR jusqu'à  $1.2 \text{ Tesla}$  et ce, d'une façon uniforme sur toute la longueur de l'interface de cisaillement ;
- Atteindre un couple  $>1 \text{ Nm}$  lorsque l'embrayage MR est activé à  $25\%$  du couple maximal. Le but de cette contrainte est de limiter les chances que les bruits électrique et mécanique rendent impossible une bonne lecture du couple.

Les principales dimensions de l'embrayage MR sont présentées au tableau 6.1.

### Choix du type de joint d'étanchéité

Des roulements à billes scellés ont été choisis pour contenir le fluide MR et pour éviter les zones mortes (où le fluide MR ne contribue pas au cisaillement). En effet, les joints

d'étanchéité à lèvres, par exemple, créent des zones mortes d'un volume équivalentes à celui du fluide MR utilisé dans ce type d'embrayage MR.

Une technologie de joint d'étanchéité non disponible sur le marché a aussi été intégrée à l'embrayage MR pour réaliser quelques tests exploratoires (voir figure 6.4). Ces joints d'étanchéité magnétiques ont été développés et fabriqués dans le laboratoire du CAMUS. Le fonctionnement de ceux-ci est très simple : un joint d'étanchéité magnétique est composé d'aimants permanents ainsi que d'une structure permettant de conduire le flux magnétique pour magnétiser le fluide MR situé au point à sceller.

Bien que cette technologie de joint d'étanchéité soit intéressante et prometteuse pour une panoplie d'applications incluant les embrayages MR, l'étude de ceux-ci est hors du cadre de ce projet de recherche [Saynatjoki et Holmberg, 1993].

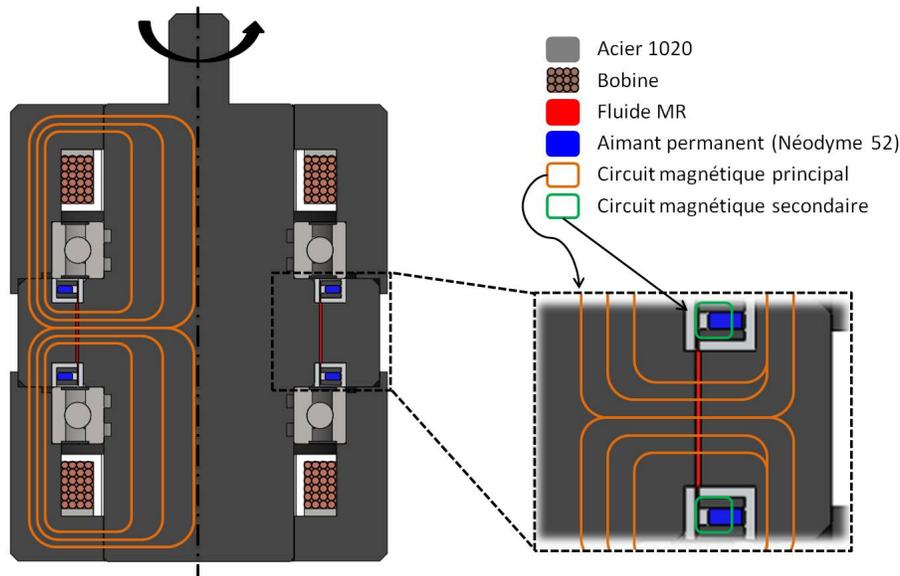


Figure 6.4 Intégration des joints d'étanchéité magnétique dans l'embrayage MR miniature.

### Positionnement de l'instrumentation

Le positionnement de l'instrumentation a été fait de façon à obtenir une meilleure lecture du phénomène observé. Le thermocouple a été positionné à 0.1 po de l'interface de cisaillement. La cellule de couple a été positionnée en dessous du bassin de refroidissement et le contact avec des métaux a été éliminé afin de diminuer le bruit sur le signal de mesure. Le capteur optique a été positionné directement sur l'axe de sortie du moteur et le capteur de courant sur le *Printed Circuit Board* (PCB) de contrôle où se trouve le convertisseur de courant.

### 6.1.2 Fiche technique

Le tableau 6.1 présente un sommaire des principales caractéristiques de l'embrayage MR discutés lors des sections précédentes.

Tableau 6.1 Caractéristiques du banc d'essais à échelle réduite

Caractéristique	Valeur / Description
Type d'embrayage	Mono tambour
Volume de fluide MR	1.5 ml
Diamètre du tambour	2 po
Espacement de fluide MR	0.030 po
Longueur de l'interface	0.5 po
Nombre de tour de fils/bobine	80 tours
Courant maximal	3 A
Voltage maximal	60 V
Zone morte	< 5%
Champ magnétique max.	1.2 Tesla
Taux de déformation	0 - 3500 s <sup>-1</sup>
Couple max.	≈ 5 Nm
Refroidissement externe max.	1000 Watts
Taux de vieillissement max.	350 W/ml
Type de joint d'étanchéité	Joint de roulement à billes (6908 DDU) ou Joint magnétique
Cellule de couple	Oui
Capteur de température	Oui

### 6.1.3 Séquence des essais

Chacun des tests réalisés avec ce banc d'essais s'est déroulé en deux temps (voir figure 6.5). Durant la première partie de la séquence du test, un couple de référence est demandé tandis que le courant est automatiquement asservi par le contrôleur *Sliding mode* à une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz. Cette partie est d'une durée d'une heure et est utilisée pour vieillir le fluide MR ainsi que pour observer la signature de dégradation. Après chaque heure, la séquence de vieillissement est arrêtée et la séquence de caractérisation est réalisée. Dans cette partie, des sauts de courants à des amplitudes spécifiques sont imposés et la réponse en couple est acquisitionnée à une fréquence de 1000 Hz. Cette partie est

utilisée pour évaluer de façon quantitative la relation courant-couple de l'embrayage MR sur toute la plage de fonctionnement (0A à 3A).

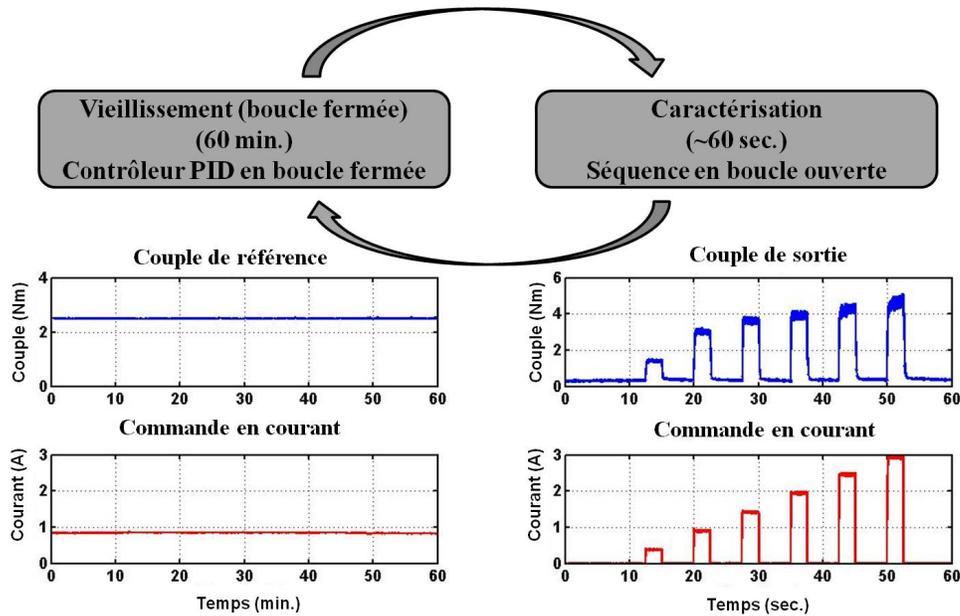


Figure 6.5 Séquence de tests utilisée pour vieillir et caractériser le fluide MR. (À gauche) Séquence de vieillissement réalisée à couple, température et vitesse constante. (À droite) Séquence de caractérisation réalisée en boucle ouverte à température et vitesse constante

### 6.1.4 Limitations

Malgré l'effort de conception, quelques limitations et problèmes sont survenus lors de l'utilisation du banc d'essais.

- La lecture du couple était très bruitée. Le bruit était causé par la vibration du banc d'essais peu rigide latéralement et dont, l'alignement avec la source de rotation était inadéquate ;
- L'intégration des capteurs ainsi que les connexions des bobines étaient difficiles à mettre en oeuvre puisque ceux-ci devraient être à l'intérieur du bassin de refroidissement (submergé) ;
- Le choix du type de joint d'étanchéité (joint de roulement à billes) n'assurait pas une étanchéité parfaite et était limité à une température maximale de 80 °C.

## 6.2 Banc d'essais à échelle réelle

Le deuxième banc d'essais pour l'étude du vieillissement du fluide MR a été conçu et fabriqué en partie dans le laboratoire du CAMUS (voir les figures 6.6 et 6.7). L'objectif est d'obtenir des résultats le plus près de la réalité (dans le contexte du projet ENV404) et d'avoir une certaine flexibilité au niveau du montage pour être en mesure de tester de nouveaux concepts (ex. : circulation interne).

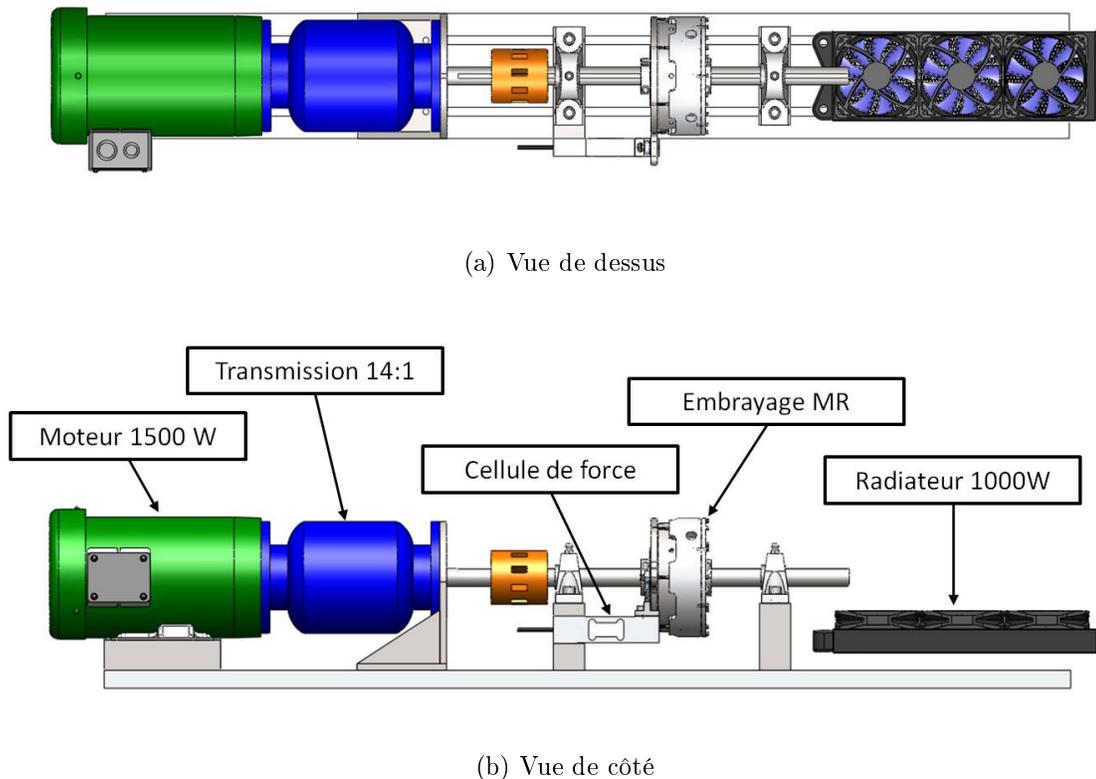


Figure 6.6 Banc d'essais à échelle réelle

Le banc de tests est entraîné par un moteur électrique de 2 hp à vitesse variable (0 à 3500 rpm). Celui-ci entraîne un réducteur à engrenages permettant d'ajuster la vitesse entre 0 et 250 rpm à la sortie. La vitesse du moteur est changée à l'aide d'un contrôleur (Emerson Commander SKBD200150). Le couple est mesuré par une cellule de force (Teda Huntleigh 1042) fixée sur la sortie de l'embrayage. Le banc de tests est équipé de deux capteurs de température (Omega thermocouple No. TJ36-CASS-116G-6-SB-SMPW-M). Le premier est situé directement à l'interface de cisaillement tandis que le second mesure la température du fluide MR dans la zone morte de l'embrayage. Aussi, deux capteurs de pression (SSI Technologies Inc. No. P51-50-G-B-I36-4.5v-R) sont situés de part et d'autres

de l'interface de cisaillement. Un radiateur (HX-360HL) couplé avec trois ventilateurs est utilisé pour contrôler la température intérieure de l'embrayage. L'acquisition ainsi que le contrôle sont faits avec une Compact RIO-9022 de National Instruments.

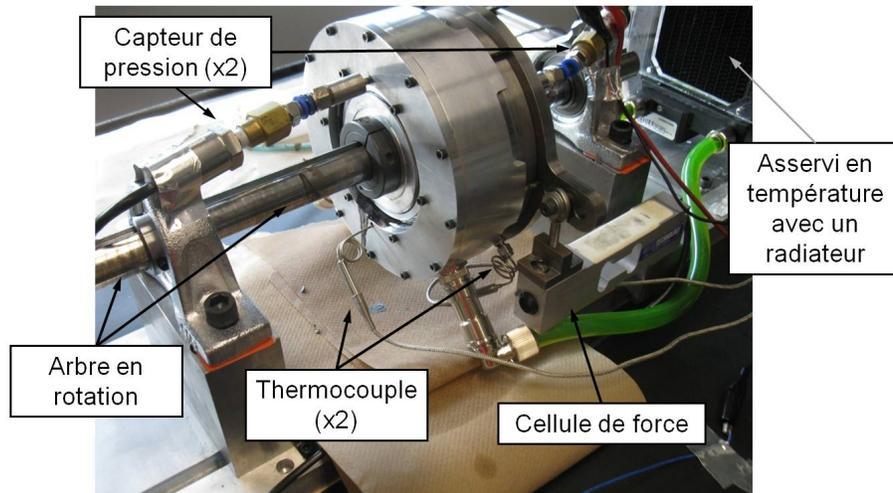


Figure 6.7 Photo du banc d'essais en fonctionnement

### 6.2.1 Présentation de l'embrayage

Cet embrayage MR a été conçu dans l'optique de tester les choix de conception de la première génération de l'embrayage CSA2 présenté à la section A.2. Une vue de section détaillée de l'embrayage est présentée à la figure 6.8. Une configuration mono-tambour a été préférée vis-à-vis une configuration multi-tambour pour des raisons de simplicité et de modularité. En effet, le tambour dynamique ainsi que celui statique sont interchangeables afin de permettre l'essai de différentes géométries (ex. dimension de l'espacement de fluide MR, rainure hélicoïdale pour favoriser la circulation interne, fini de surface, etc.). Aussi, le centre du rotor est perforé pour permettre au fluide MR de circuler d'un côté vers l'autre. Des joints à lèvres assurent l'étanchéité et sont placés loin de la zone de cisaillement. Ce choix crée volontairement une grande zone morte ou inactive représentant environ 90% du volume total de fluide MR dans l'embrayage. Finalement, un circuit de refroidissement à l'eau est intégré pour permettre de contrôler la température interne de l'embrayage.

#### Dimensionnement de l'embrayage

Le dimensionnement de l'embrayage a été réalisé de façon à satisfaire plusieurs contraintes techniques :

- Respecter un taux de déformation en cisaillement réaliste dans le cadre de l'application visée, c'est-à-dire entre 1000 à 3000  $s^{-1}$  ;

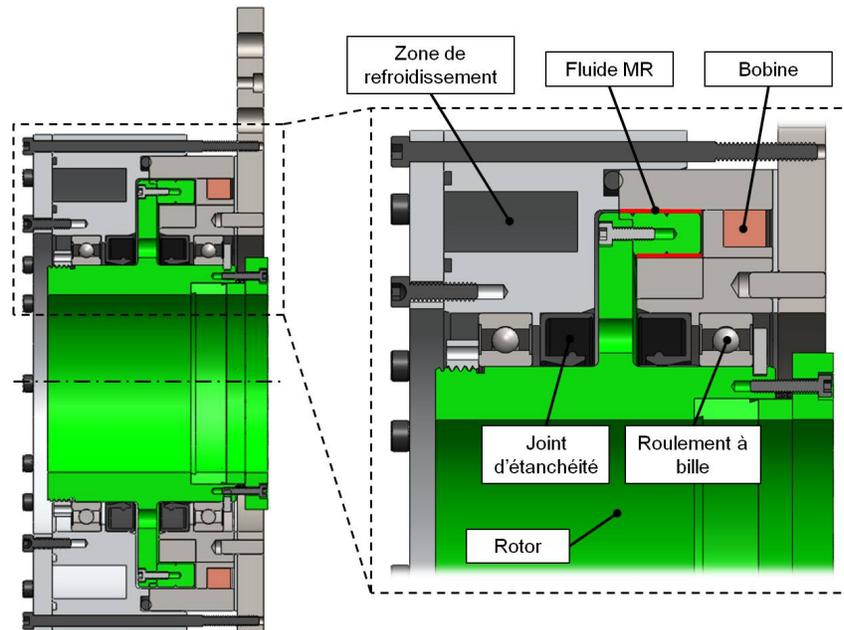
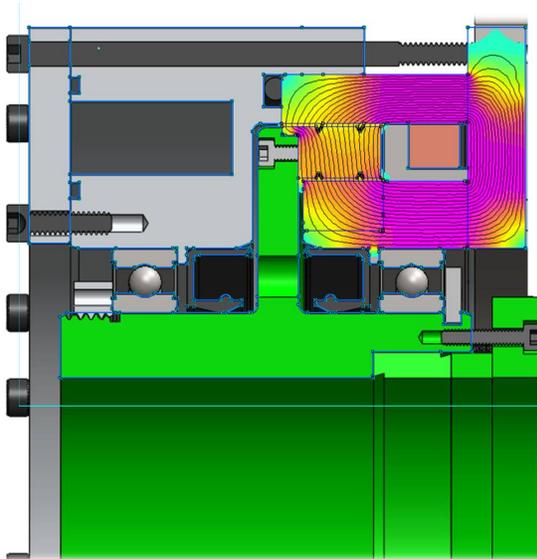


Figure 6.8 Vue de la section détaillée de l'embrayage MR mono-tambour. Les parties rotatives sont représentées par la couleur verte.

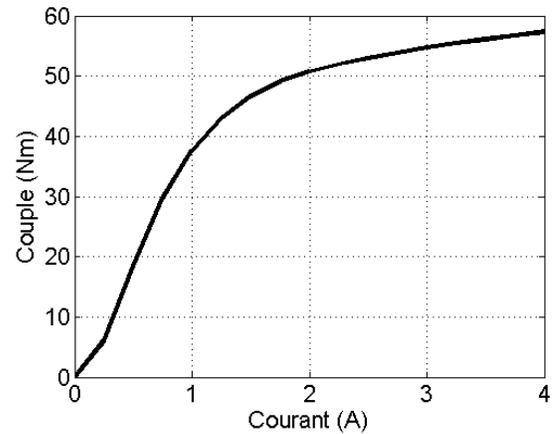
- Respecter une puissance volumique de l'ordre de 100 à 300 W/ml ;
- Permettre de tester le concept de circulation avec un tambour rainuré ;
- Répartir le volume de fluide MR de façon à ce que la zone inactive soit de 5 à 10 fois plus grande que la zone active. ;
- Permettre la magnétisation du fluide MR jusqu'à 1.2 Tesla ;
- Permettre et faciliter l'intégration de l'instrumentation (capteurs de température et de pression) aux zones active et inactive ;
- Intégrer un circuit de refroidissement au liquide pour faciliter le contrôle de la température interne ;
- Utiliser les mêmes dimensions critiques (diamètre et espacement de fluide MR) que pour la première génération de l'embrayage CSA2.

Les principales dimensions de l'embrayage MR sont présentées au tableau 6.2.

Le dimensionnement du circuit magnétique a été réalisé avec le logiciel FEMM (voir figure 6.9a ). La relation estimée entre le courant et le couple de l'embrayage (sans considérer la résistance des joints d'étanchéité et des roulements à billes) est présentée à la figure 6.9b. Cette courbe expérimentale est basée sur la fiche technique du Basonitic 5030 fournie par le fabricant de fluide MR BASF. La comparaison des courbes expérimentales versus la courbe analytique est présentée et discutée à la section 7.2.5.



(a) Exemple d'une analyse magnéto-statique du circuit magnétique à l'aide du logiciel FEMM



(b) Courbe prédite de la relation courant-couple de l'embrayage MR utilisé pour les tests de vieillissement grandeur réelle

Figure 6.9 Modélisation analytique des performances de l'embrayage MR

### Choix du type de joint d'étanchéité

Le choix du type de joint d'étanchéité s'est arrêté sur le modèle SKF CRx80x100x10 CRW1 V. C'est un joint à lèvres muni d'un ressort annulaire communément appelé en anglais *gather spring*. Ce joint est fait d'un caoutchouc *fluoro* développé par SKF et particulièrement résistant à l'usure, aux hautes températures et à plusieurs éléments chimiques. En effet, ce joint peut résister à des températures allant jusqu'à 200 °C et est compatible avec la plupart des huiles, des fluides hydrauliques et des lubrifiants.

L'efficacité et la durabilité du joint d'étanchéité dépendent beaucoup de la qualité de la surface en contact [MARTIN, 2001]. Pour cette raison, une bague d'usure (SKF *speedi-sleeve* CR 99317) a été installée sur chacun des joints. L'utilisation d'une bague d'usure assure que le fini de surface de la pièce en contact avec le joint est optimal (entre 0.2 et 0.8  $\mu\text{m}$ ).

### Positionnement de l'instrumentation

Le positionnement de l'instrumentation sur l'embrayage MR est présenté à la figure 6.10. Un thermocouple est positionné directement à l'interface de cisaillement supérieur et un autre est positionné à la zone inactive près du circuit de refroidissement. Les capteurs de pression sont positionnés de part et d'autre de l'interface de cisaillement.

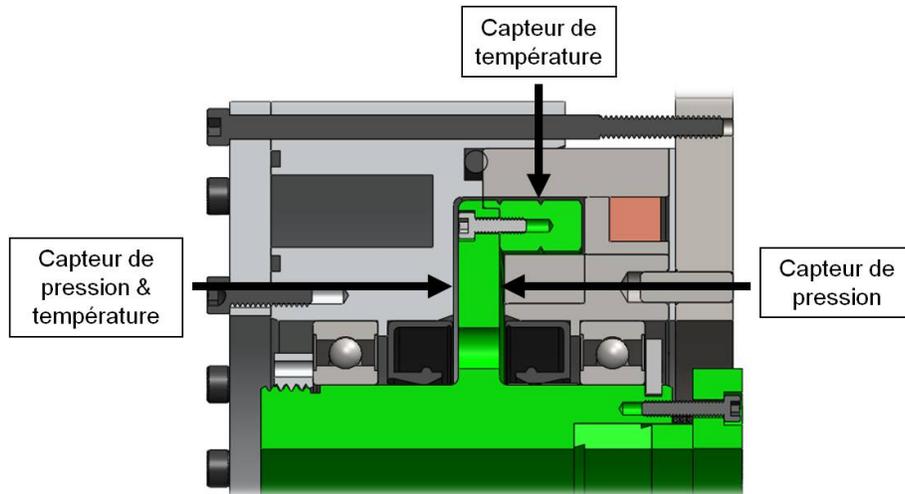


Figure 6.10 Positionnement des capteurs de température et de pression sur l'embrayage MR

Les équipements électriques de « puissance » et de « contrôle » ont été séparés pour éviter le bruit électrique généré par les sources électriques multiples (5 volts, 12 volts, 24 volts et 60 volts). En effet, un premier panneau de puissance contient l'entrée électrique, le contacteur principal, des sources d'alimentation et les disjoncteurs. Dans un second panneau, on retrouve le système d'acquisition, c'est-à-dire le CompactRio ainsi que les cartes d'acquisitions.

## 6.2.2 Fiche technique

La table 6.2 présente les principales caractéristiques de l'embrayage.

## 6.2.3 Séquence des essais

Chacun des tests réalisés avec ce banc d'essais s'est déroulé en deux temps. Durant la première partie de la séquence du test, un couple de référence est demandé tandis que le courant est automatiquement asservi par le contrôleur PID à une fréquence de 1000 Hz. Cette partie est d'une durée d'une heure et est utilisée pour vieillir le fluide MR ainsi que pour observer la signature de dégradation. Après chaque heure, la séquence de vieillissement est arrêtée et la séquence de caractérisation est lancée (voir figure 6.11). Cette séquence se divise comme suit :

1. Des sauts de courants à des amplitudes spécifiques sont imposés et la réponse en couple est acquisitionnée à une fréquence de 1000 Hz (voir figure 6.11a). Cette partie est utilisée pour évaluer de façon quantitative la relation courant-couple de l'em-

Tableau 6.2 Caractéristiques de l'embrayage à échelle réelle

Caractéristique	Valeur / Description
Type d'embrayage	Mono tambour
Volume de fluide MR	50 ml
Type d'acier	Acier 1020
Diamètre et longueur de l'interface supérieure	$\varnothing$ 5.415 po $\ell = 0.600$ po
Diamètre et longueur de l'interface inférieure	$\varnothing$ 4.790 po $\ell = 0.500$ po
Espacement de fluide MR	0.020 po
Nombre de tours de fils	150 tours
Courant maximal	3 A
Voltage maximal	60 V
Zone morte	$> 90$ %
Champ magnétique max.	1.2 T
Taux de déformation	0 - 3000 s <sup>-1</sup>
Couple max.	$\approx 60$ Nm
Refroidissement externe	1000 W
Taux de vieillissement max.	350 W/ml
Type de joint d'étanchéité	Joint à lèvres (CRx80x100x10 CRW1 V)
Cellule de couple	Oui
Capteur de température	Oui (2x)
Capteur de pression	Oui (2x)

brayage MR (boucle ouverte) sur toute la plage de fonctionnement (0 A à 3 A) ainsi que le temps de réponse (activation et désactivation) ;

2. Un sinus de très faible fréquence ( $\approx 0.03$  Hz) balaye toute la plage fonctionnelle de l'embrayage de 0 A  $\rightarrow$  2.75 A  $\rightarrow$  0 A (voir figure 6.11b). Ceci permet de quantifier l'hystérésis en fonction du vieillissement du fluide MR ;
3. Une rampe en vitesse à courant nul est effectuée à partir de 0 jusqu'à 250 rpm (voir figure 6.11c). La durée de celle-ci est de 25 sec. et permet de déterminer la viscosité apparente du fluide MR.

### 6.2.4 Limitations

Les principales limitations du banc d'essai sont les suivantes :

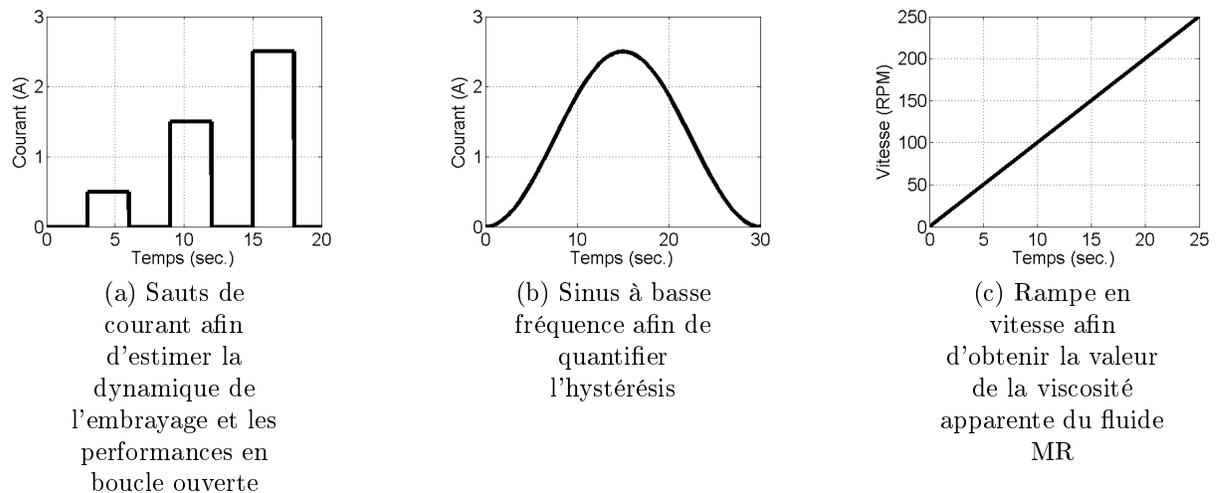


Figure 6.11 Séquence de caractérisation de performance, de la dynamique et de la viscosité du fluide MR

- Le temps de réponse de l'embrayage est limité à environ 20 ms par le type d'acier utilisé et par le voltage maximum de l'alimentation électrique (60 volts). Une meilleure dynamique permettrait de mieux observer les fluctuations (s'il y a lieu) du temps de magnétisation du fluide MR qui est d'environ 1 ms ;
- Il n'est pas possible de démagnétiser le bâti magnétique de l'embrayage en appliquant un courant sinusoïdal centré à 0. La conception d'un nouveau *Printed Circuit Board* (PCB) serait nécessaire pour pouvoir dégausser l'embrayage et le fluide MR ;
- Il n'est pas possible de mesurer directement le champ magnétique. L'intégration d'un capteur de flux magnétique permettrait de déduire le champ magnétique à l'interface de cisaillement. L'intégration de ce capteur nécessiterait une force magnétomotrice plus élevée, donc une plus grosse bobine ;
- Les trous des capteurs de pression ont tendance à s'obstruer à cause de leur petite dimension (1/16 po). Compte tenu de l'espace restreint, il n'est pas possible de grossir les trous pour la présente conception.



# CHAPITRE 7

## DURABILITÉ DU FLUIDE MR

Ce chapitre présente, dans un premier temps, l'impact des paramètres d'opération sur la durabilité du fluide MR. Ces résultats ont été obtenus lors d'une série d'essais expérimentaux réalisés sur un embrayage à échelle réduite. L'objectif de cette étude était d'évaluer macroscopiquement l'effet des paramètres d'opération sur la durée de vie du fluide MR. La durée de vie du fluide MR est très importante pour des applications qui utilisent des embrayages MR en glissement continu.

Dans un second temps, une deuxième série de tests expérimentaux a été réalisée, mais cette fois-ci sur un embrayage grandeur réelle. L'objectif était plutôt d'étudier microscopiquement le processus de dégradation du fluide MR sur un embrayage très près de l'application visée et du même coup, d'identifier les modes de défaillance des embrayages MR.

Finalement, des solutions potentiellement intéressantes sont proposées afin de prolonger la durée de vie du fluide MR et/ou des embrayages MR. Les solutions proposées sont : 1. la pressurisation de l'embrayage avec un gaz inerte pour éviter l'aération du fluide MR et ainsi retarder l'apparition de l'oxydation à l'intérieur de l'embrayage ; 2. la circulation du fluide MR à l'intérieur de l'embrayage ; 3. une meilleure gestion de la puissance dissipée en fonction des besoins de performance.

### 7.1 Pré-étude de l'effet des paramètres d'opération

Le banc de tests à échelle réduite présenté à la section 6.1 a été utilisé pour déterminer la durée de vie du fluide MR en fonction des conditions d'opération (contrainte de cisaillement, taux de déformation en cisaillement et température) d'un embrayage MR. Les sections suivantes présentent le critère d'arrêt des tests, le choix des paramètres d'opération ainsi que les résultats.

#### 7.1.1 Critères d'arrêt des tests

Les critères d'arrêts employés lors des tests réalisés dans cette étude préliminaire sont les suivants : 1. lorsque l'embrayage n'arrive plus à atteindre la consigne de couple ou bien ; 2. lorsque le couple maximal de l'embrayage a diminué de façon importante, c'est-à-dire

de plus de 50%. Les fluctuations de performance en dehors de ces deux critères d'arrêt n'ont donc pas été considérées dans cette étude.

### 7.1.2 Choix des paramètres d'opération

Les tests ont été réalisés dans les limites possibles du banc d'essais. En effet, la température maximale est limitée par le joint d'étanchéité ne pouvant supporter des températures plus élevées que 80 °C tandis que la température inférieure est limitée par la capacité du radiateur.

La plage de contrainte de cisaillement possible par fluide MR utilisée se situe entre 0 et 80 kPa. La valeur minimum de la contrainte devait être suffisamment grande pour générer un couple supérieur à celui produit par la friction des joints d'étanchéité et des roulements à billes. De l'autre côté, la valeur maximum devait permettre de légères fluctuations autour de la consigne en couple. Pour ces raisons, les contraintes de cisaillement testées sont de 40 et 60 kPa.

Le choix des valeurs de taux de cisaillement ont été déterminées à partir des valeurs typiques de fonctionnement des embrayages MR conçus dans le cadre du projet ENV404, c'est-à-dire entre 1000 et 2500 s<sup>-1</sup>.

### 7.1.3 Résultats

Les résultats présentés à la figure 7.1 montre que l'énergie dissipée maximale est obtenue lorsque les paramètres d'opération sont à leur valeur minimale (40 kPa, 1000 s<sup>-1</sup>, 40 °C). L'énergie dissipée au moment de la défaillance se trouve toujours diminuée lorsque les tests sont faits avec des paramètres d'opération d'une valeur supérieure. Bien que les résultats ne montrent pas l'effet combiné de tous les paramètres d'opération, ceux-ci démontrent de façon quantitative l'influence de chaque paramètre. Pris individuellement, la température est le paramètre qui influence le plus la durée de vie du fluide MR (facteur de 6) tandis que le taux de déformation en cisaillement est celui qui influence le moins (facteur de  $\sim 1.2$ ). Ces résultats semblent bien corrélés avec les valeurs de durabilité énoncées dans la littérature [Carlson, 2002] [Kieburg *et al.*, 2008] [Gabriel *et al.*, 2011] [Wiehe *et al.*, 2011].

Les résultats de cette étude macroscopique de l'effet des paramètres réalisée sur un banc d'essai miniature sont :

- Les conditions d'opération jouent un rôle important sur la durée de vie du fluide MR lorsqu'utilisé en glissement continu ;

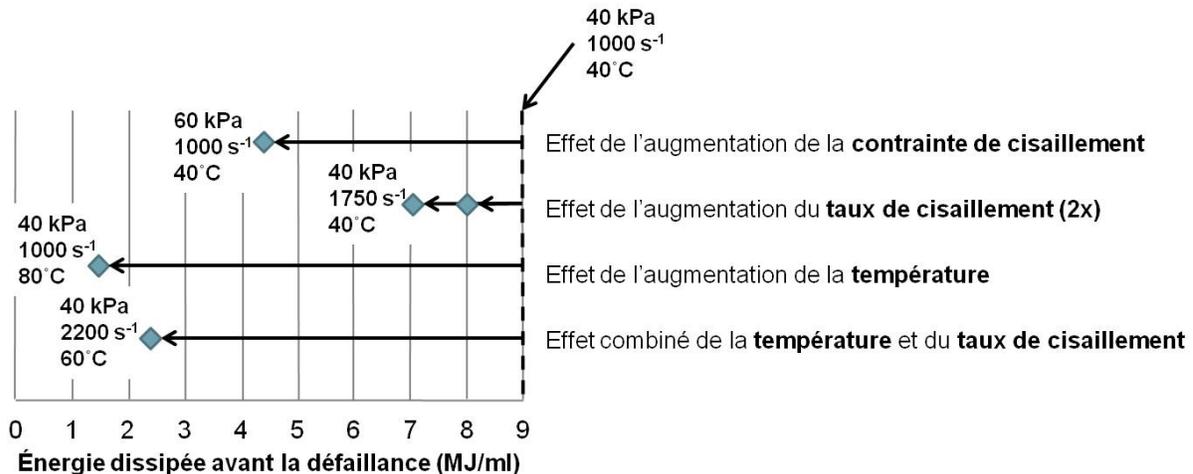


Figure 7.1 Effet des paramètres d'opération sur la durée de vie du fluide MR

- La température est le paramètre qui a la plus grande influence sur la durée de vie (facteur de 6);
- Deux avenues semblent être possibles pour prolonger la durée de vie des embrayages MR : 1. opérer à des températures plus basses et/ou 2. utiliser une plus grande quantité de fluide MR.

Suite à l'obtention de ces résultats, il apparaît important de continuer l'étude de durabilité mais cette fois-ci, de façons plus précise et détaillée pour mieux comprendre le processus de dégradation du fluide MR et l'impact sur les performances de l'embrayage.

## 7.2 Étude de la signature de dégradation

Cette section présente l'étude de la signature de dégradation du fluide MR utilisé en glissement continu dans un embrayage grandeur réelle. L'objectif de cette étude est de confirmer les résultats présentés précédemment pour un embrayage grandeur réelle et du même coup, d'étudier les évènements liés au processus de dégradation jusqu'à la fin du fonctionnement acceptable du fluide MR. La fin du fonctionnement de l'embrayage MR est atteint lorsque celui-ci ne parvient plus à transmettre le niveau de couple demandé lors du test. Cette étude a été réalisée sur le banc d'essais à échelle réelle présenté à la section 6.2. Deux essais complets de durabilité ont d'abord été réalisés jusqu'à la fin du fonctionnement de l'embrayage MR. Les deux essais ont été réalisés dans les mêmes conditions d'opération. La description des tests est présentée au tableau 7.1.

La figure 7.2 présente la signature de dégradation du test G3. La courbe supérieure représente la réponse à une consigne de couple de 20 Nm et celle inférieure représente la

Tableau 7.1 Description des tests réalisés sur le banc d'essais à échelle réelle

<b>Paramètres d'opération</b>	<b>G3/G6</b>
Vitesse de révolution <i>(valeur mesurée)</i>	200 rpm
Couple <i>(valeur mesurée)</i>	20 Nm
Température <i>(valeur mesurée)</i>	65 °C
Taux de cisaillement <i>(valeur calculée)</i>	2600 s <sup>-1</sup>
Contrainte de cisaillement <i>(valeur calculée)</i>	25 kPa
<b>Fluide MR</b>	BASF 5030
Concentration	
<i>particule / volume</i>	47 %
<i>particule / masse</i>	90 %
Durée de vie <sup>2</sup>	2.5 MJ/ml

valeur du courant nécessaire pour l'obtention de la consigne. L'axe des abscisses représente la durée du test en heures ou bien l'énergie dissipée en MJ. Dans ce cas, l'utilisation du MJ/ml n'est pas appropriée puisque l'embrayage MR utilisé ne cisaille pas tout le volume de fluide MR qu'elle contient.

La valeur du courant a varié à plusieurs moments durant le test pour une même valeur de consigne en couple. Ces variations sont dues principalement à des changements physiques du fluide MR à l'interface de cisaillement de l'embrayage. On peut diviser ces changements en cinq évènements distincts dont : 1. la migration des particules ferromagnétiques ; 2. l'augmentation de la viscosité du fluide porteur ; 3. la chute de la viscosité du fluide porteur ; 4. l'oxydation des particules ferromagnétiques ; 5. le changement de volume du fluide porteur. Chacune de ces phases est expliquée plus en détails dans les sections suivantes selon les observations, hypothèses, analyses et effets sur l'embrayage.

La figure 7.2 montre que l'embrayage a fonctionné correctement pendant environ 100 heures. Les 100 heures de fonctionnement correspondent à 150 MJ. Concernant le *LDE* du fluide MR, il se situe entre 3 et 30 MJ/ml tout dépendamment si on considère tout

<sup>2</sup>Information provenant d'un courriel envoyé par Dr. Christoffer Kieburg, gestionnaire pour la compagnie BASF.

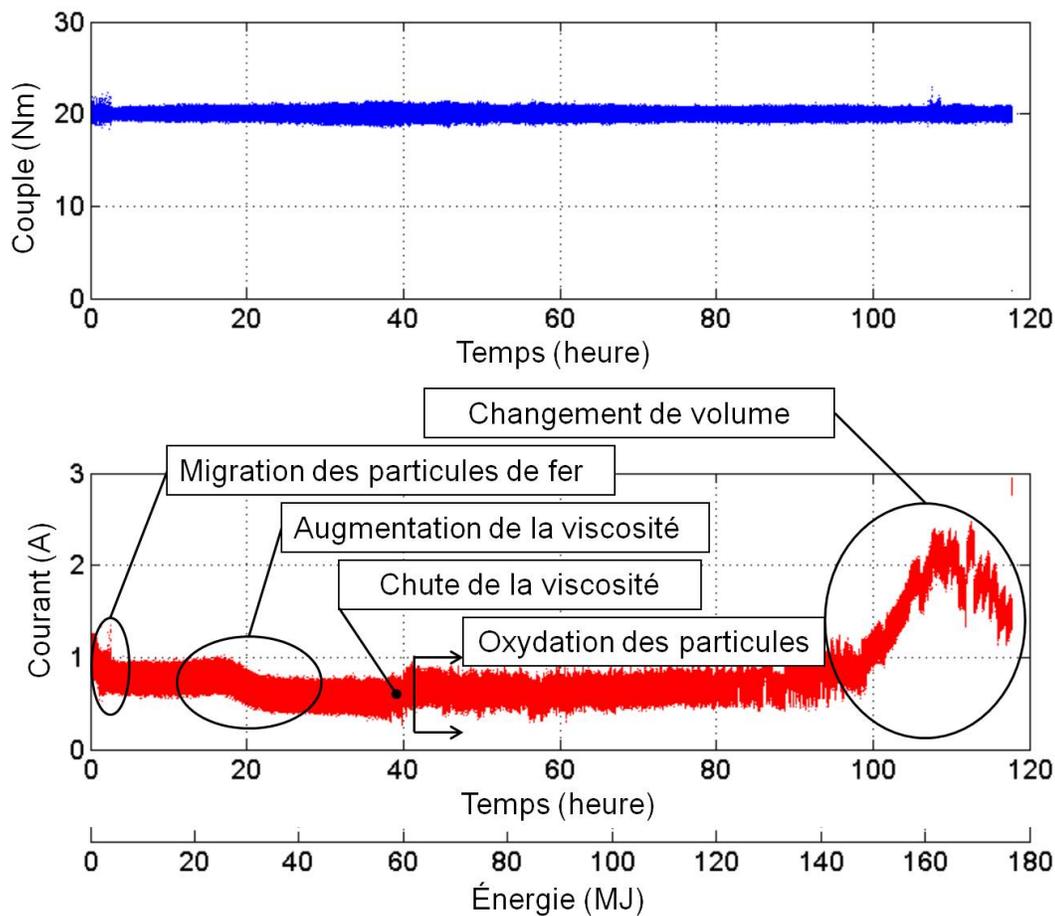


Figure 7.2 Signature de dégradation du fluide MR lorsqu'utilisé en glissement continu dans un embrayage MR (essai G3)

le volume de fluide MR dans l'embrayage ou bien seulement le volume à l'interface de cisaillement. D'après le résultat, il semble donc y avoir un certain mélange ou mouvement du fluide MR dans l'embrayage MR puisque le  $LDE$  spécifié par le fabricant est 2.5 MJ/ml.

### 7.2.1 Migration des particules

**Observation.** Au début de chaque test, il se produit un changement dans la relation couple-courant. Le résultat de ce changement est une hausse d'environ 10% du couple maximal transmis par l'embrayage MR. Ce phénomène est également observable dans plusieurs courbes expérimentales présentées dans la littérature [Gabriel *et al.*, 2011] [Wiehe *et al.*, 2011].

**Hypothèse.** Cette hausse semble être causée par un effet combiné de la géométrie et du champ magnétique. En effet, lorsque le rotor de l'embrayage est en rotation, il force les

particules à se déplacer vers l'interface de cisaillement (voir figure 7.3). Cela a pour effet d'augmenter la concentration en particules à l'interface de cisaillement et d'augmenter le couple maximal. Aussi, lorsque le fluide MR à l'interface de cisaillement est soumis pour la première fois à un fort champ magnétique, les performances de l'embrayage augmentent. On suppose qu'un fort champ magnétique agit comme un aimant et attire les particules vers l'interface de cisaillement pour encore une fois augmenter la concentration en particules. Ce mouvement initial des particules ou ce conditionnement est comparable à l'effet *Mullins* dans le domaine des élastomères [Diani *et al.*, 2009].

**Analyse.** Il serait intéressant de trouver une méthode pour observer la répartition ou la concentration en particules du fluide MR lors des essais pour confirmer l'hypothèse précédente.

**Effet sur l'embrayage.** La migration des particules n'a pas d'impact négatif sur les performances de l'embrayage. Par contre, une trop grande concentration en particules pourrait modifier le régime d'écoulement du fluide MR à l'interface de cisaillement. En effet, un fluide constitué d'une trop grande quantité de particules ne se comporte plus comme un fluide newtonien [Denis *et al.*, 1997].

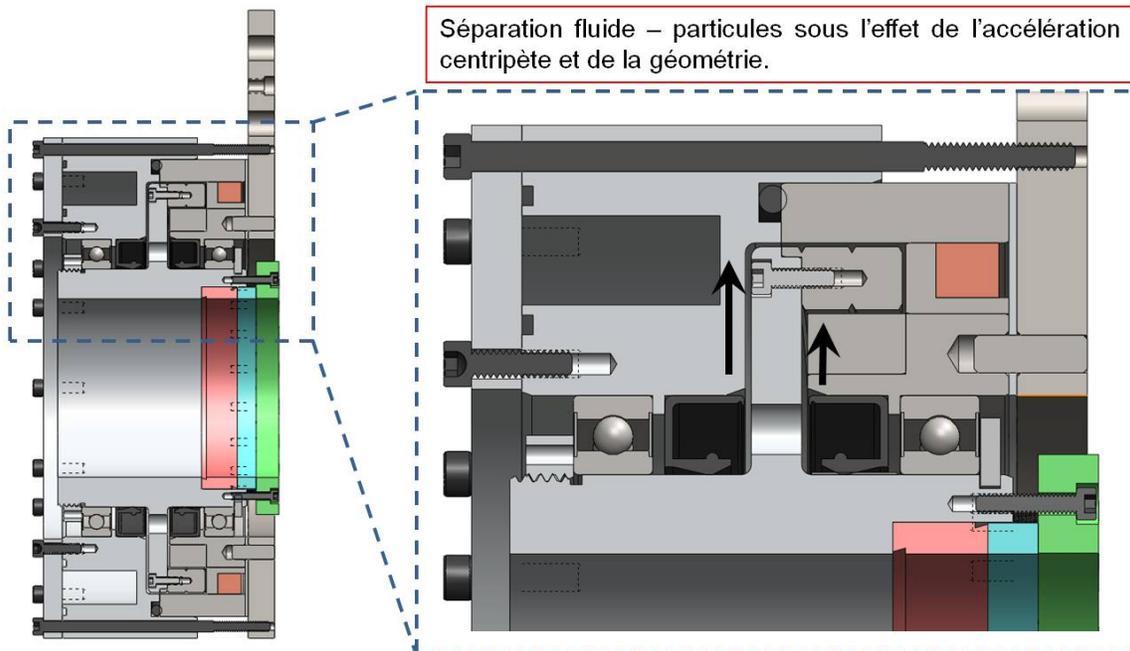


Figure 7.3 Vue de la section de l'embrayage MR utilisé lors des tests de durabilité. Les flèches montrent la direction où les particules sont entraînées dues à l'effet de l'accélération centripète.

## 7.2.2 Dégradation du fluide porteur

Durant les tests de durabilité, la dégradation du fluide porteur, c'est-à-dire de l'huile synthétique, s'est manifestée par une augmentation puis une chute rapide de la viscosité. Ces changements de viscosité ont été observés lors des séquences de caractérisation réalisées à chaque heure des tests (voir section 6.2.3 pour plus de détails).

### Augmentation de la viscosité

**Observation.** Durant le test G3 (voir figure 7.5a), la viscosité a été passablement stable durant les 20 premières heures. Le niveau de viscosité mesuré était alors de 0.2 Pa.s, ce qui concorde avec les données du fabricant du fluide MR utilisé [BASF, 2009]. Ensuite, une augmentation rapide de la viscosité s'est produite entre 20 et 36 heures (voir figure 7.4a). La valeur de la viscosité a passé de 0.2 à 0.8 Pa.s. Par la suite, la réponse à la rampe en vitesse ressemble à celle d'un fluide pseudoplastique communément appelé en anglais *shear-thinning* [M. White, 2006] (voir figure 7.4b).

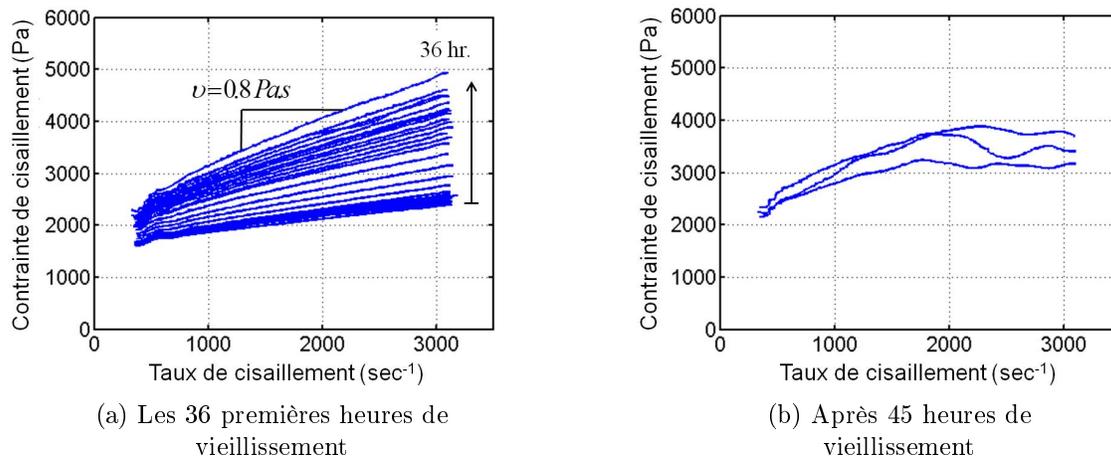


Figure 7.4 Résultats des rampes en vitesse réalisées pendant le test G3.

**Hypothèse.** La signature de cette augmentation de viscosité semble être typique de l'oxydation de l'huile présentée à la figure 7.5b [Denis *et al.*, 1997] [AYEL, 1996]. En effet, le processus d'oxydation des huiles synthétiques se produit en deux temps. La première phase est la période d'induction où le processus d'oxydation est lent. La seconde phase est la période d'évolution où l'oxydation se produit de façon beaucoup plus rapide.

Dans la littérature scientifique [AYEL, 1996] [Denis *et al.*, 1997], il est mentionné que les principales causes de l'oxydation de l'huile sont : 1. la contamination par des particules métalliques (métaux, oxydes, etc.) qui jouent le rôle de catalyseur ; 2. la température de

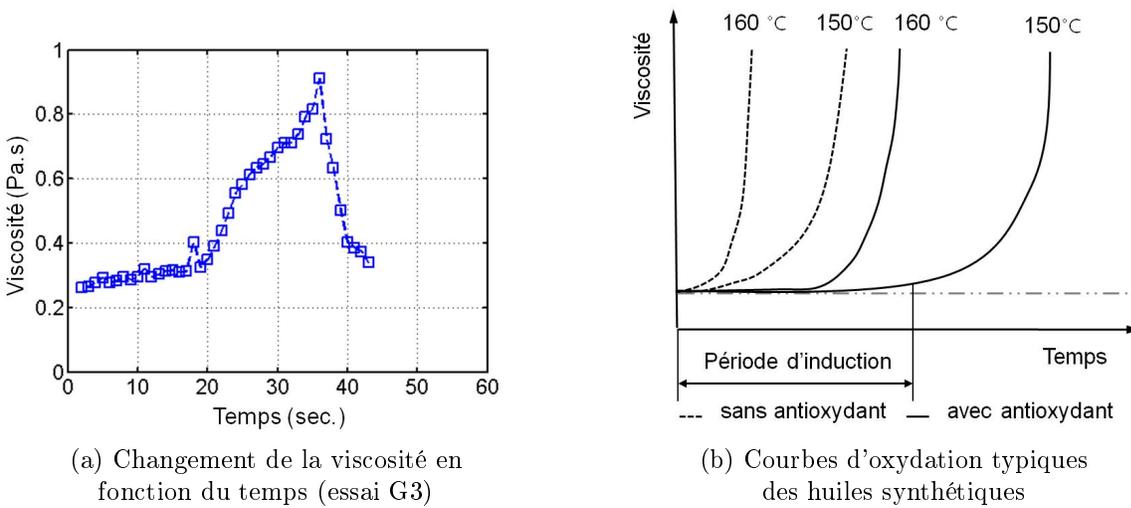


Figure 7.5 Courbes expérimentales et théoriques de l'augmentation de la viscosité de l'huile

l'huile et 3. l'aération de l'huile lors du fonctionnement. Lorsque le fluide MR est utilisé dans un embrayage en glissement continu, les trois principales causes de l'oxydation de l'huile sont présentes. Cela dit, il y a des solutions qui peuvent être mises en place afin de limiter l'oxydation de l'huile qui sont discutées à la section 7.3.

Les effets directs de l'oxydation sur l'huile sont l'augmentation de la viscosité, la coloration de l'huile et la formation de dépôts et/ou de boues (voir annexe B). Toutes ces conséquences directes de l'oxydation de l'huile ont été observées lors des tests de durabilité.

**Analyse.** La mesure de la viscosité est une mesure indirecte de l'oxydation de l'huile. Des analyses de composition chimique sur l'huile usée permettraient de confirmer hors de tout doute l'oxydation de l'huile. Pour ce faire, une méthode d'extraction de l'huile pendant le déroulement ou après un test devra être mise en place.

**Effet sur l'embrayage.** L'impact de l'augmentation de la viscosité (facteur de x4 dans le cas du test G3) peut être critique sur la fonctionnalité d'un embrayage MR utilisé comme un actionneur en glissement. Bien que le ratio des couples maximal et minimal reste inchangé, la puissance nécessaire pour emmener en rotation l'embrayage peut atteindre des niveaux critiques dépendamment de la géométrie et du système. Par exemple, l'embrayage MR utilisé pour réaliser le test G3 a normalement un couple résistant de 3 Nm incluant l'effet de la viscosité, de la résistance des joints d'étanchéité et des roulements à billes. Cette valeur de couple a atteint 9 Nm lorsque la viscosité était maximale. Dans le cas d'un système utilisant 12 embrayages en glissement continu (comme le système mis de l'avant

dans le projet ENV404), la puissance demandée par le couple résistif à 100 rpm pour tous les embrayages sera de l'ordre de 1000 W.

### Chute de la viscosité

**Observation.** Durant le test G3 (voir figure 7.5a), la viscosité a chuté entre les 37<sup>e</sup> et 40<sup>e</sup> heures. Cette chute de viscosité est suivie d'une longue période où la réponse en couple aux rampes en vitesse n'est plus linéaire et repérable. En effet, le comportement du fluide MR ne semble plus newtonien.

**Hypothèse.** La chute de viscosité du fluide MR peut avoir été causée par une combinaison des deux évènements :

- Un cisaillement mécanique intense et continu qui a pour effet de découper les macromolécules des polymères en tronçons de plus faible masse molaire ayant pour effet une chute de viscosité irréversible [AYEL, 1996; Denis *et al.*, 1997].
- Une perte d'huile considérable qui aurait pour effet de perturber l'écoulement du fluide MR. À ce moment, la substance restante n'a plus le comportement d'un fluide.

**Analyse.** Une analyse de thermogravimétrie a été réalisée sur les quatre échantillons provenant du test G3. Les résultats de cette analyse sont présentés à la figure 7.6. Une analyse de thermogravimétrie est une technique d'analyse thermique qui consiste à mesurer la variation de la masse d'un échantillon en fonction de la température. Les analyses sont réalisées sous un atmosphère inerte pour éviter l'oxydation des particules en contact avec l'oxygène.

L'échantillon de fluide MR neuf contient 10 % en masse d'huile ce qui concorde avec les données du fabricant [BASF, 2009]. Par contre, les autres échantillons pris dans l'embrayage après le test montrent une grande perte d'huile. En effet, l'échantillon provenant de l'interface de cisaillement contient environ 2,5 % en masse d'huile tandis que l'échantillon provenant de la zone morte contient environ 5 % en masse d'huile. Finalement, l'échantillon près de joints d'étanchéité contient environ 4 % en masse d'huile. Cela veut donc dire qu'un volume de 16 sur 25 ml d'huile s'est évaporé ou a fuit par les joints d'étanchéité pendant le test. Ceci confirme l'hypothèse d'une perte d'huile considérable et expliquerait donc, du moins en partie, pourquoi le comportement du fluide MR n'est plus newtonien.

**Effet sur l'embrayage.** Le principal effet observé sur l'embrayage suite à la chute de viscosité est une instabilité de la relation couple-courant, c'est-à-dire que pour un courant fixe, le couple n'est pas parfaitement constant. Cela s'explique par l'inefficacité de l'huile

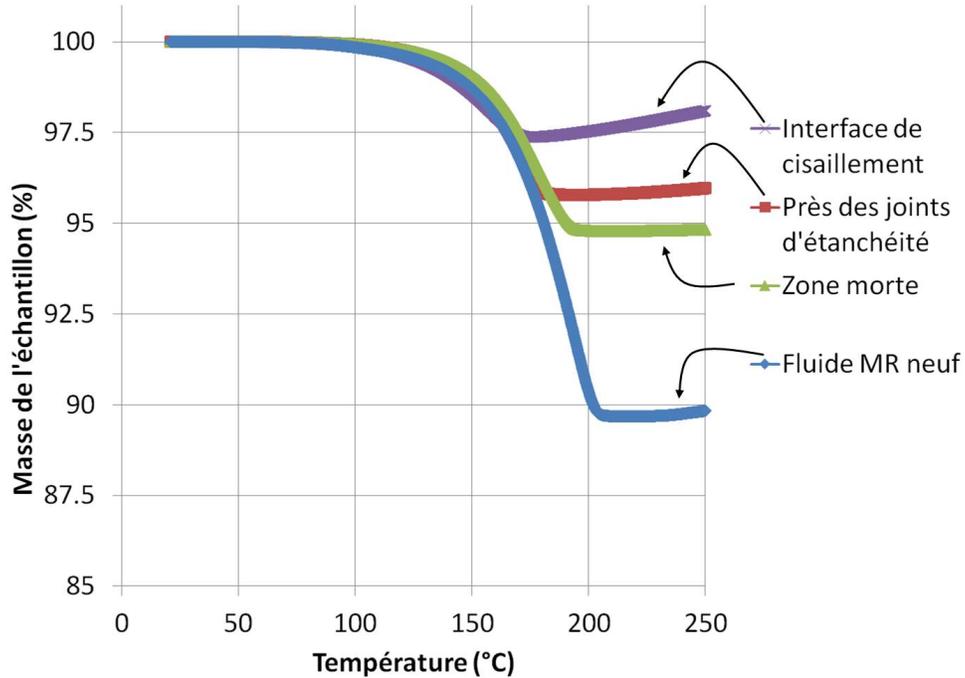


Figure 7.6 Analyse de thermogravimétrie de quatre échantillons de fluide MR récupérés à la fin du test G3

à lubrifier le mouvement des particules ainsi que par la perte importante d'huile. La pire conséquence de cette instabilité s'est manifestée par une perte de contrôle momentanée de l'embrayage sur une courte période de temps (voir figure 7.7). En effet, pendant les deux premières secondes, le couple a atteint presque 100% du couple nominal pour un courant nul. Ce phénomène est survenu trois fois durant les dernières heures de fonctionnement de l'embrayage.

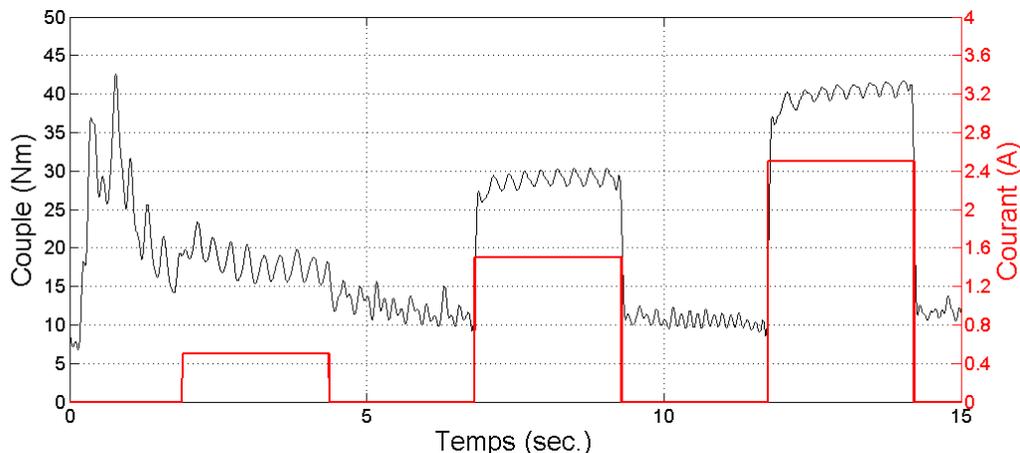


Figure 7.7 Perte de contrôle momentanée ( $\approx 2$  sec.) de l'embrayage avant une période de caractérisation

Cette instabilité semble être accentuée lorsque l’embrayage tourne à des vitesses de rotation faible (moins de 25 rpm). Cela porte à croire que ce phénomène pourrait être apparenté au « collé-glissé » communément appelé en anglais du *stick-slip*. N’étant plus un fluide newtonien mais plutôt une pâte visqueuse (voir annexe B), il est possible que celle-ci forme des agglomérations qui se déplacent et/ou qui se brisent sous l’effet de la rotation de l’embrayage. Probablement que l’espace entre les surfaces de cisaillement influence l’occurrence de ce phénomène. Dans le cas présent, l’embrayage testé avait un espace de 0.020 po entre les surfaces de cisaillement.

### 7.2.3 Oxydation des particules ferromagnétiques

**Observation.** Des échantillons provenant de trois zones dans l’embrayage ainsi qu’un échantillon de fluide MR neuf ont été observés par microscopie électronique à balayage (MEB). Les images des particules de ces quatre échantillons sont présentées à la figure 7.8. On note la présence de particules nanométriques seulement dans l’échantillon provenant de l’interface de cisaillement. Les particules nanométriques se retrouvent en plus grande quantité autour des plus grosses particules.

**Hypothèse.** La présence des nanoparticules dans l’échantillon de fluide MR provenant de l’interface de cisaillement de l’embrayage nous fait croire que ce sont des débris d’oxyde formés par le contact inter-particulaire.

**Analyse.** Une analyse de diffraction par rayons X a été conduite sur les petites et les grosses particules présentées à la figure 7.9.

Il semble que les deux types de particules, grosses ou petites, soient constitués de fer et d’oxygène. Puisque les ratios d’intensité varient en fonction de l’absorption des rayons X dans chaque type de particules, il n’est pas possible de conclure de quel type d’oxyde il s’agit. Aussi, les changements d’intensité des raies de carbone ne sont pas significatifs puisque les échantillons de poudre ont été placés sur un ruban de carbone afin d’effectuer les analyses. Ces résultats sont présentés à la figure 7.10.

**Effet sur l’embrayage.** L’oxydation des particules de fer affecte leurs propriétés magnétiques et donc, diminue le couple transmissible de l’embrayage MR [Sunkara *et al.*, 2009]. Par contre, il est difficile de différencier une perte de couple causé par l’oxydation ou par une migration des particules. Dans le cas du test G3, on note une diminution de couple transmissible d’environ 23% entre la 40<sup>e</sup> et la 97<sup>e</sup> heure, période pendant laquelle on croit que l’oxydation a affecté les performances (voir figures 7.2 et 7.12).

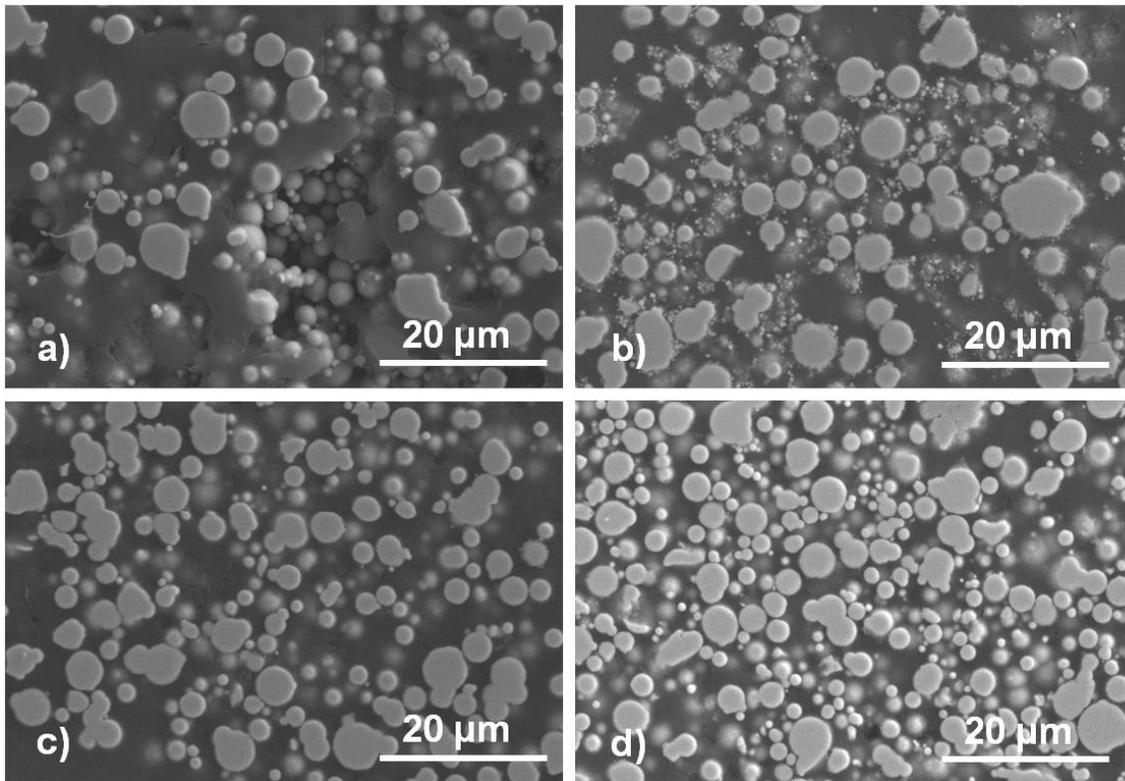
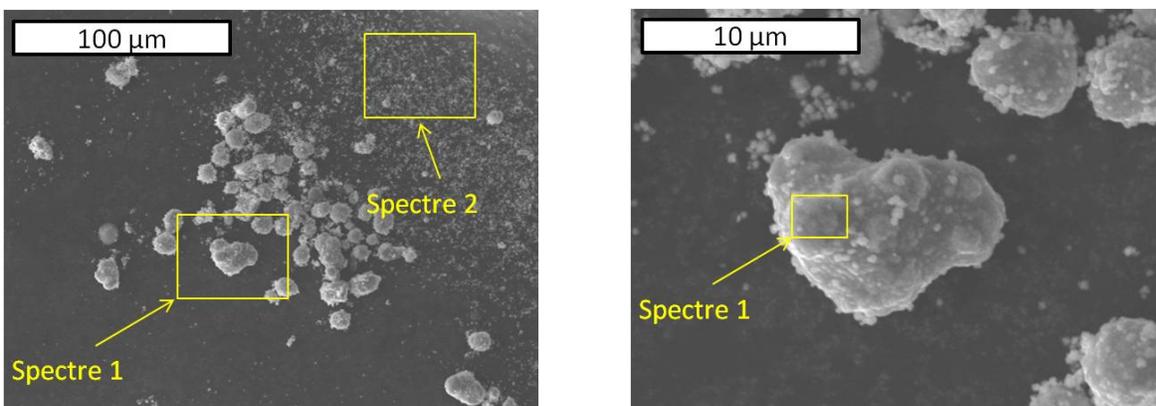


Figure 7.8 Comparaison de la morphologie des particules provenant de différentes zones a) particules neuves b) particules provenant de l'interface de cisaillement c) particules provenant de la zone morte d) particules situées près des joints d'étanchéité



(a) Image provenant d'un microscope à balayage électronique indiquant les zones étudiées

(b) Agrandissement de la zone où le spectre # 1 a été réalisé

Figure 7.9 Images provenant d'un microscope à balayage électronique montrant les zones où les spectres ont été réalisés

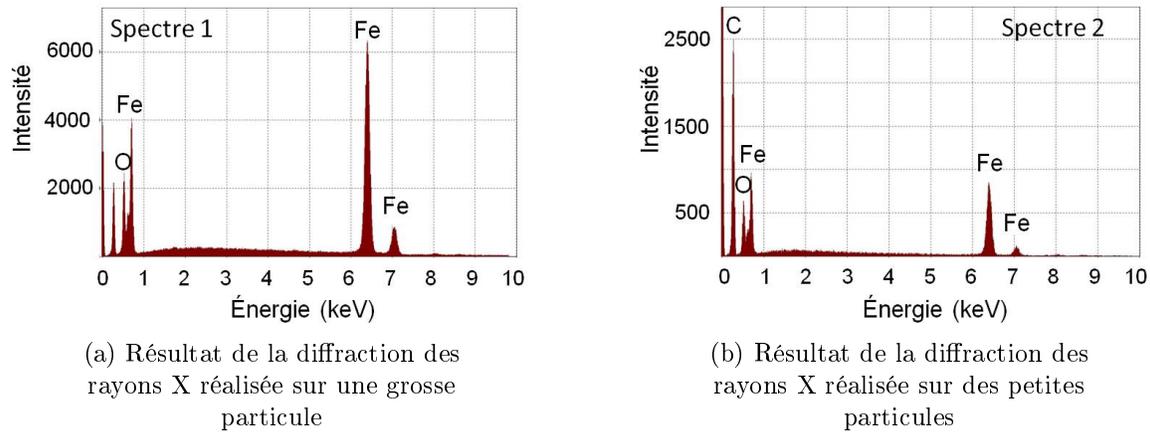


Figure 7.10 Résultats des diffractions des rayons X

Aussi, un grand nombre de petites particules peuvent avoir pour effet d'augmenter la viscosité du fluide MR. Ce phénomène, appelé *In-Use-Thickening*, a été observé pour la première fois par J. David Carlson [Carlson, 2002]. Pour plus de détails concernant ce phénomène, voir section 3.3.3.

#### 7.2.4 Augmentation du volume

**Observation.** Lors des tests de durabilité, le dernier phénomène observé menant à l'arrêt des tests est une augmentation rapide ( $\sim 15$  sec.) et importante ( $\sim 12$  psi) de la pression à l'intérieur de l'embrayage. Cette augmentation de pression est illustrée à la figure 7.11. Ce gain de pression se produit à température, vitesse et couple constants.

**Hypothèse.** Physiquement parlant, l'augmentation de la pression doit être causée par un changement de volume et donc, de densité du fluide MR (loi de la conservation de la masse). Ce changement de densité pourrait être causé par la vaporisation de l'huile.

**Analyse.** Pour vaporiser de l'huile, il est nécessaire de fournir une quantité d'énergie de l'ordre de 60 kJ/mol [Chen *et al.*, 2009]. Si on traduit cette énergie molaire en énergie nécessaire pour évaporer les 7,2 g ou 9 ml d'huile restante à l'interface de cisaillement de l'embrayage, l'énergie est d'environ 5,25 kJ. Cependant, il est difficile de connaître l'énergie emmagasinée par l'huile pendant le déroulement du test étant donné la difficulté de mesurer l'énergie thermique dissipée par l'embrayage (voir équation 7.1).

$$E_{\text{entrée}} = E_{\text{dissipée}} + E_{\text{emmagasinée}} \quad (7.1)$$

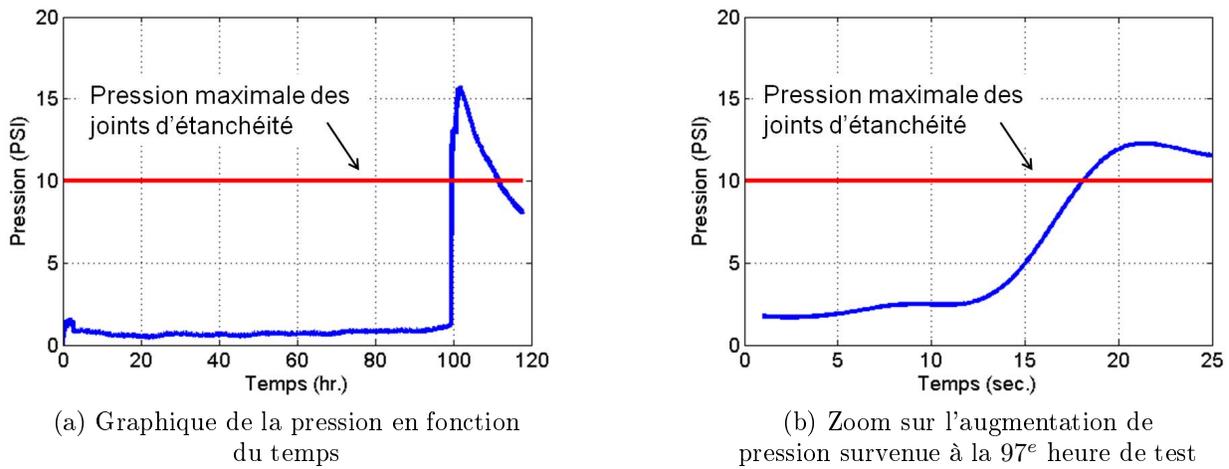


Figure 7.11 Graphique de la pression en fonction du temps pour le test G3.

La ligne représente la pression maximale des joints d'étanchéité à lèvres spécifiée par le fabricant (SKF).

où  $E_{entree}$  est l'énergie fournie au système,  $E_{dissipee}$  est l'énergie thermique dissipée par l'embrayage et  $E_{emmaginee}$  est l'énergie emmagasinée par l'huile lorsqu'elle se fait cisailier.

La puissance fournie à l'embrayage par le moteur électrique (puissance d'entrée) lors du test G3 est de 400 W ( $P = \Omega.C$ ) tandis que la puissance nécessaire pour activer la vaporisation de l'huile est de 350 W ( $5,25 \text{ kJ} \div 15 \text{ sec.}$ ). Il est donc, énergétiquement parlant, possible de croire que l'augmentation de volume ait été causée par la vaporisation de l'huile.

**Effet sur l'embrayage.** Les effets directs de cette augmentation de volume sont un éclatement des joints d'étanchéité et une diminution importante du couple transmissible. En effet, la pression à l'intérieur de l'embrayage devient trop grande pour être complètement reprise par les joints d'étanchéité. Suite à la défaillance des joints d'étanchéité, on observe une baisse importante des performances. À ce moment, les particules ferromagnétiques ont probablement été expulsées de l'interface de cisaillement causant ainsi une diminution de couple transmissible d'environ 40% entre la 97<sup>e</sup> et la 108<sup>e</sup> heure, période pendant laquelle l'expansion de l'huile a eu lieu (voir figure 7.2 et 7.12). Une lecture du flux magnétique du circuit magnétique permettrait éventuellement de confirmer cette hypothèse de perte de particules.

### 7.2.5 Performance en boucle ouverte

L'allure des courbes de performance en boucle ouverte de la figure 7.12 concorde bien avec les cinq événements précédemment expliqués des sections 7.2.1 à 7.2.4. Les valeurs de

couple présentées dans ce graphique correspondent à une valeur de couple moyennée sur deux secondes pour trois valeurs de courant (0,5 A / 1,5 A / 2,5 A).

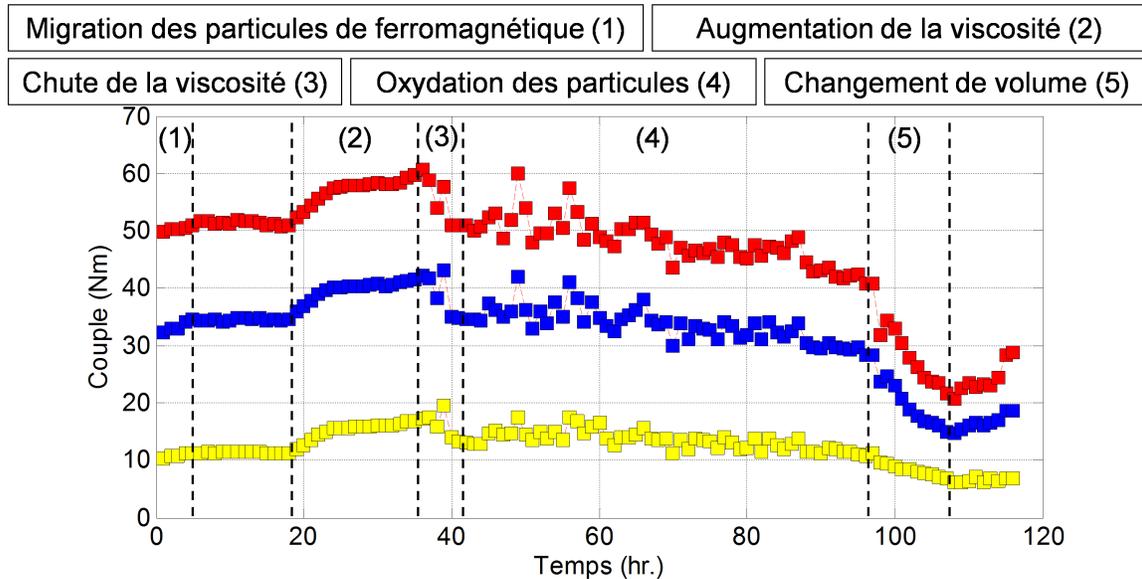


Figure 7.12 Performance en boucle ouverte lors du test G3 (0,5 A / 1,5 A / 2,5 A)

Pendant les 20 premières heures du test, les performances en boucle ouverte pour les trois niveaux de courant ont été relativement constantes. Ensuite, de la 20<sup>e</sup> à la 36<sup>e</sup> heure, le niveau de couple transmis a augmenté légèrement. Cette augmentation est le résultat, en partie, de l'augmentation de viscosité et de la rémanence. Par la suite, au même moment où la viscosité de l'huile a chuté à la 36<sup>e</sup> heure, une baisse des performances a été observée. Cette baisse de couple transmis semble être fonction de l'intensité du courant. Cette diminution pourrait donc être expliquée par une perte de particules à l'interface de cisaillement. Par la suite, les performances semblent plus erratiques puisque l'huile ne joue plus son rôle de lubrifiant. Finalement, un peu avant la 100<sup>e</sup> heure, on observe une baisse importante des performances. Cela correspond au moment où l'augmentation de pression a été enregistrée. À ce moment, les particules ferromagnétiques ont probablement été expulsées de l'interface de cisaillement causant ainsi une baisse importante du couple transmissible.

La figure 7.13 compare les performances théoriques prédites par le modèle magnétostatique avec les courbes expérimentales obtenues au début et à la 36<sup>e</sup> heure du test G3. Le couple initial pour la courbe expérimentale à  $t = 0$  h est de 3 Nm et les valeurs de la viscosité et l'hystérésis sont respectivement de 0.2 Pa.s et de 12 A.Nm (aire intérieure). À  $t = 36$  h,

le couple initial pour la courbe expérimentale est de 9 Nm et les valeurs de la viscosité et l'hystérésis sont respectivement de 0.9 Pa.s et de 18 A.Nm.

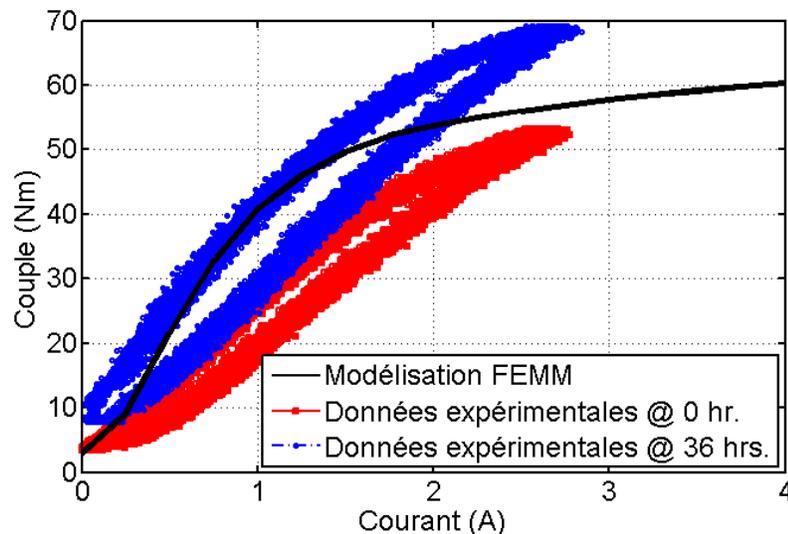


Figure 7.13 Comparaison des performances théorique et expérimentale (@ 0 et 36 heures).

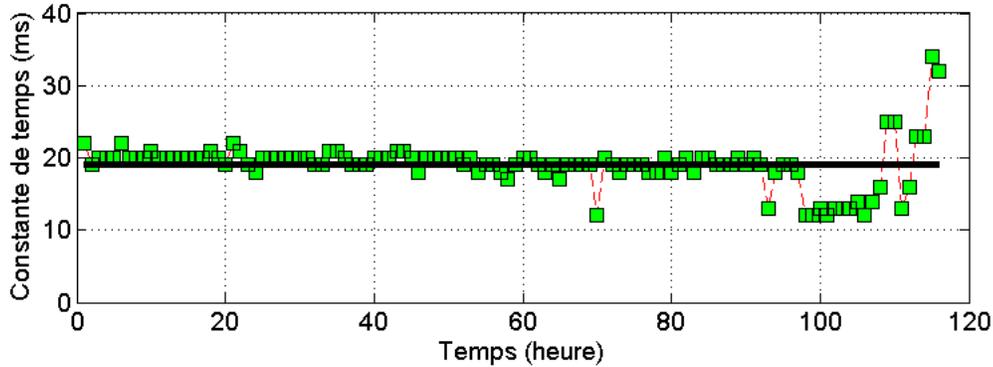
Une des causes de la différence entre la courbe théorique provenant de la modélisation avec FEMM et la courbe expérimentale à  $t = 0$  h semble être le taux de déformation en cisaillement. En effet, la relation entre la limite de cisaillement versus le champ magnétique donnée par le fabricant correspond à un taux de déformation en cisaillement de  $100 \text{ s}^{-1}$ , tandis que le taux de déformation en cisaillement lors du test G3 est  $2600 \text{ s}^{-1}$ . Donc, l'augmentation du taux de déformation en cisaillement a eu pour effet d'aplatir la courbe couple-courant (voir figure 7.13).

### 7.2.6 Performance dynamique

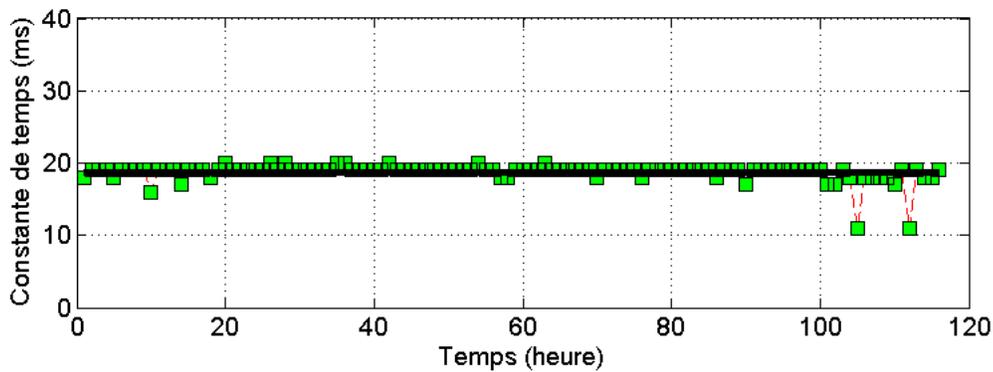
Les performances dynamiques enregistrées pendant le test G3 sont présentées à la figure 7.14. Les constantes de temps présentées dans ce graphique incluent le temps d'application du courant dans la bobine ( $\approx 5$  ms), le temps d'application du champ magnétique ainsi que le temps de magnétisation du fluide MR ( $< 1$  ms) [Goncalves et Carlson, 2007]. Les constantes de temps d'activation et de désactivation ont été stables pendant toute la durée du test. La valeur moyenne est de 18,6 ms et la fréquence d'acquisition du signal de couple transmis par l'embrayage est de 1000 Hz ou 1 ms.

Puisque l'embrayage n'a pas été optimisé pour minimiser le temps de réponse et que la précision de la mesure était dans l'ordre du temps de magnétisation du fluide MR, il

impossible de dire que les constantes de temps n'ont pas changé. Par contre, il est possible de dire que les constantes de temps n'ont pas changé de façon significative durant le test de durabilité.



(a) Constante de temps d'activation de l'embrayage MR. La ligne correspond à la moyenne.



(b) Constante de temps de désactivation de l'embrayage MR. La ligne correspond à la moyenne.

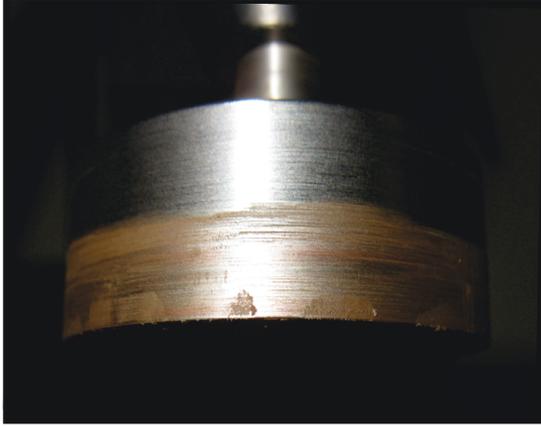
Figure 7.14 Constante de temps de l'embrayage MR lors du test G3

## 7.3 Solution pour améliorer la durabilité du fluide MR

Les problèmes d'oxydation touchent plusieurs applications telles que les amortisseurs, les capteurs, la carrosserie de voitures et même les embrayages MR (voir figure 7.15a). La solution pour plusieurs de ces problèmes d'oxydation est d'éliminer le contact avec l'air des composants critiques [Hu *et al.*, 2008; Munske, 1987].

Prenons exemple sur les amortisseurs. Certains utilisent un réservoir pressurisé à l'azote pour éviter que des bulles d'air se retrouvent mélangées à l'huile [Ahmadian, 1999; Zhang *et al.*, 2012] (voir figure 7.15b). Lorsque les bulles d'air sont fortement mélangées à l'huile, il se forme une mousse. À ce moment, les performances de l'amortisseur sont grandement

affectées. Aussi, la présence d'air dans l'huile augmente les risques d'oxydation. Une huile oxydée est normalement beaucoup plus visqueuse ce qui, encore une fois, peut affecter les performances de l'amortisseur.



(a) Tambour d'embrayage MR oxydé (image : Jean-François Desrosiers)



(b) Suspensions munies d'amortisseur avec une chambre pressurisée à l'azote (image : [www.foxracingshox.com](http://www.foxracingshox.com))

Figure 7.15 Exemple d'applications touchées par l'oxydation

Dans le cas d'un embrayage MR, il serait aussi intéressant d'ajouter une barrière de gaz inerte séparant le fluide MR de l'environnement extérieur contenant de l'oxygène. Ceci permettrait de ralentir/éviter l'oxydation de l'huile et des particules à l'intérieur de l'embrayage et donc, d'améliorer la durée de vie du fluide MR.

## 7.4 Solutions pour améliorer la durabilité des embrayages

Deux solutions ont été mises de l'avant pour prolonger la durée de vie des embrayages MR. La première est de faire circuler le fluide MR à l'intérieur de l'embrayage afin de faire participer une plus grande quantité de fluide MR au cisaillement. La seconde est de mieux gérer la puissance dissipée en fonction des besoins. Ces deux solutions sont présentées ci-bas.

### 7.4.1 Circulation interne

L'idée de faire circuler du fluide MR dans un embrayage ne vient pas d'hier. Jacob Rabinow, l'inventeur de la technologie MR, avait imaginé en 1951 un moyen de le faire avec une pompe externe (voir figure 7.16). À ce moment, M. Rabinow avait en tête de faire circuler le fluide MR dans le but de le refroidir.

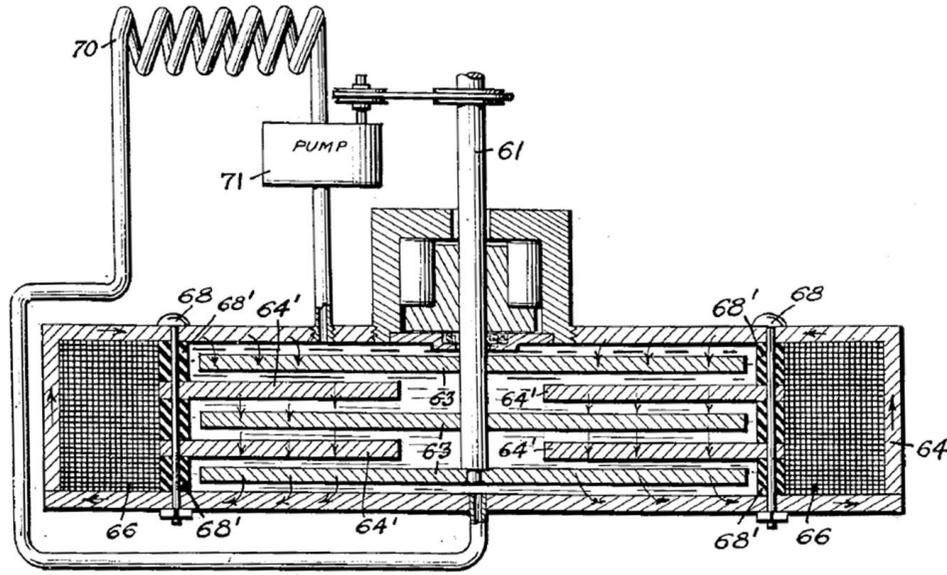


Figure 7.16 Concept d'un embrayage MR de type disque ayant une pompe externe pour refroidir le fluide MR. Ce concept a été dessiné par Jacob Rabinow en 1951 et l'image provient du brevet #2.575.360

Les embrayages d'aujourd'hui ont généralement très peu de fluide à l'interface de cisaillement. Du coup, la durée de vie des embrayages est limitée puisqu'elle est fonction du volume de fluide MR. La circulation du fluide MR à l'intérieur d'un embrayage permettrait d'utiliser une plus grande quantité de fluide et d'augmenter la durée de vie de l'embrayage.

La difficulté réside dans la manière avec laquelle on fait circuler le fluide MR. Une pompe externe comme imaginée par Jacob Rabinow en 1951 n'est pas si simple. En effet, il est très difficile, voire impossible, de faire circuler du fluide MR lorsque celui-ci est magnétisé. Des calculs préliminaires (à partir des dimensions de l'embrayage présenté à l'annexe 6.2) montrent qu'une pompe externe devrait générer une pression  $>450$  psi pour faire circuler le fluide MR lorsque celui-ci est magnétisé à saturation. Autant de pression dans un embrayage emmènerait certainement d'autres problèmes.

Une méthode inspirée des vis d'extrusion a été imaginée. Des rainures ont été usinées sur les surfaces de cisaillement d'un tambour dans le but de générer un écoulement en spirales. La figure 7.17 présente un embrayage MR muni d'un tambour rainuré.

Le concept présenté à la figure 7.17 a été testé expérimentalement. Dans un premier temps, des tests de fonctionnement ont été réalisés afin de s'assurer que le concept permettait de créer un écoulement. Puisque c'est très compliqué de mesurer directement l'écoulement de fluide MR avec un débitmètre, la mesure du débit s'est faite indirectement par une mesure

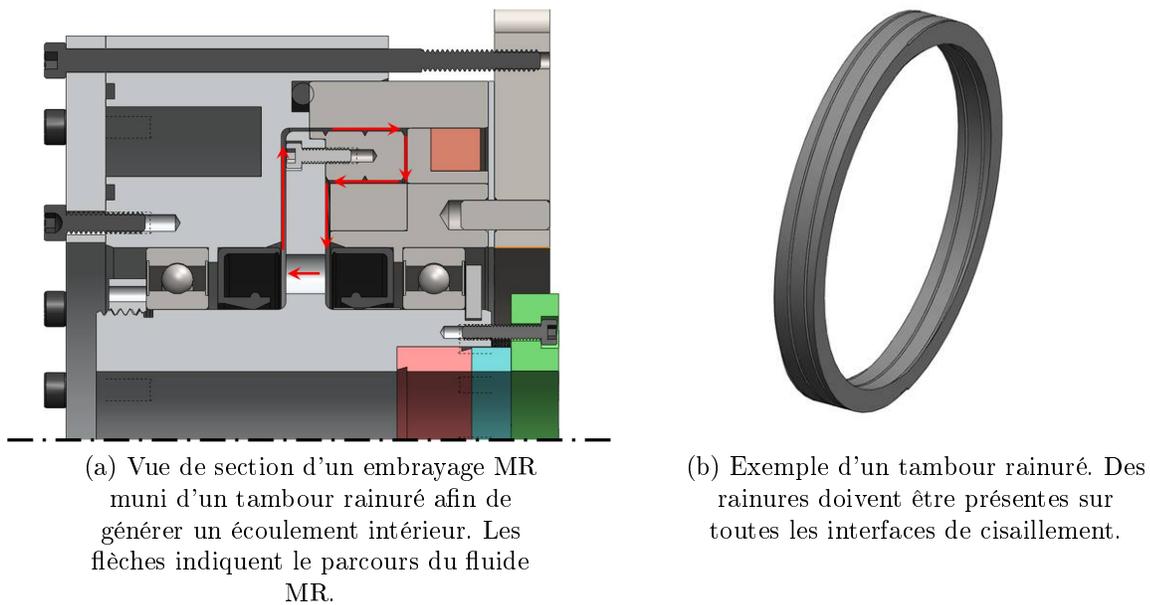


Figure 7.17 Concept pour circuler le fluide MR à l'intérieur d'un embrayage MR

différentielle de pression. L'idée n'est pas d'évaluer précisément le débit (la résistance fluide du circuit interne n'est pas connue) mais de s'assurer que les rainures permettent de faire circuler le fluide MR à l'intérieur de l'embrayage. En fait, deux capteurs de pression ont été installés de part et d'autre de l'interface de cisaillement (voir figure 6.10). Au même titre qu'une pompe, la pression est positive du côté décharge et est négative du côté suction.

Plusieurs essais ont permis de cartographier la relation pression, vitesse de rotation et courant (voir figure 7.18). Cette cartographie montre que la vitesse de rotation de l'embrayage ainsi que le courant (ou le champ magnétique) ont tous les deux une importance considérable sur la pression générée par le tambour rainuré. La pression maximale générée par les rainures a été de 12 psi à 2,5 A et 200 rpm.

Suite à cette validation de fonctionnalité, deux tests expérimentaux de durabilité ont été faits. Les conditions d'opération sont présentées au tableau 7.1. Les signatures de dégradation avec et sans circulation sont très similaires à l'exception où tous les événements sont repoussés dans le temps pour le test avec circulation (voir les figures 7.19 et 7.20). Le tableau 7.2 présente une comparaison des résultats obtenus.

Les tests de circulation du fluide MR dans l'embrayage démontrent un bon potentiel. En effet, les rainures sont faciles d'intégration et n'ajoutent aucune pénalité de poids, de volume

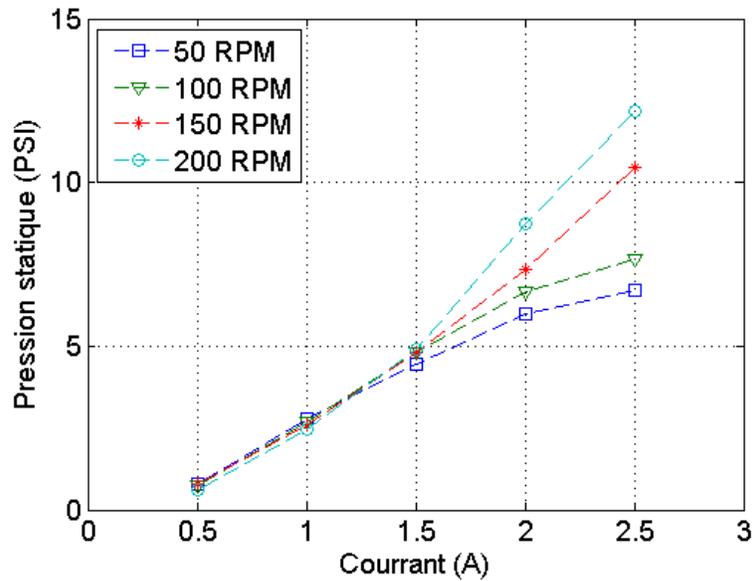


Figure 7.18 Pression statique relative en fonction du courant circulant dans la bobine de l'embrayage

Tableau 7.2 Comparaison des tests avec et sans circulation

Paramètres	Sans circulation (G3)	Avec circulation (G5)
Durée du test (hr.)	100	180
Énergie dissipée (MJ)	150	270
Énergie dissipée (MJ/ml)	3	6
Viscosité de départ (Pa.s)	0.2	0.2
Viscosité maximum (Pa.s)	0.8	0.5
Chute de la viscosité @	37 hr. ou 60 MJ	110 hr. ou 150 MJ

et de coût à l'embrayage. De plus, la circulation permet d'éviter les zones mortes inutiles que l'on retrouve dans la plupart des embrayages présentés dans la littérature. L'avantage le plus important de ce concept est l'amélioration de la durabilité de l'embrayage d'un facteur deux, ce qui est majeur. De plus, la circulation du fluide MR pourrait améliorer le transfert thermique et diminuer la température du fluide MR. Sachant que la température est le paramètre le plus critique, des gains encore plus importants peuvent être envisagés dans le futur.

Les futurs travaux devront mettre l'accent sur le retardement du changement de viscosité du fluide MR. En effet, lorsque le fluide MR devient une pâte, on peut dire que l'embrayage est en défaillance car le comportement commence à devenir erratique. Aussi, la mécanique

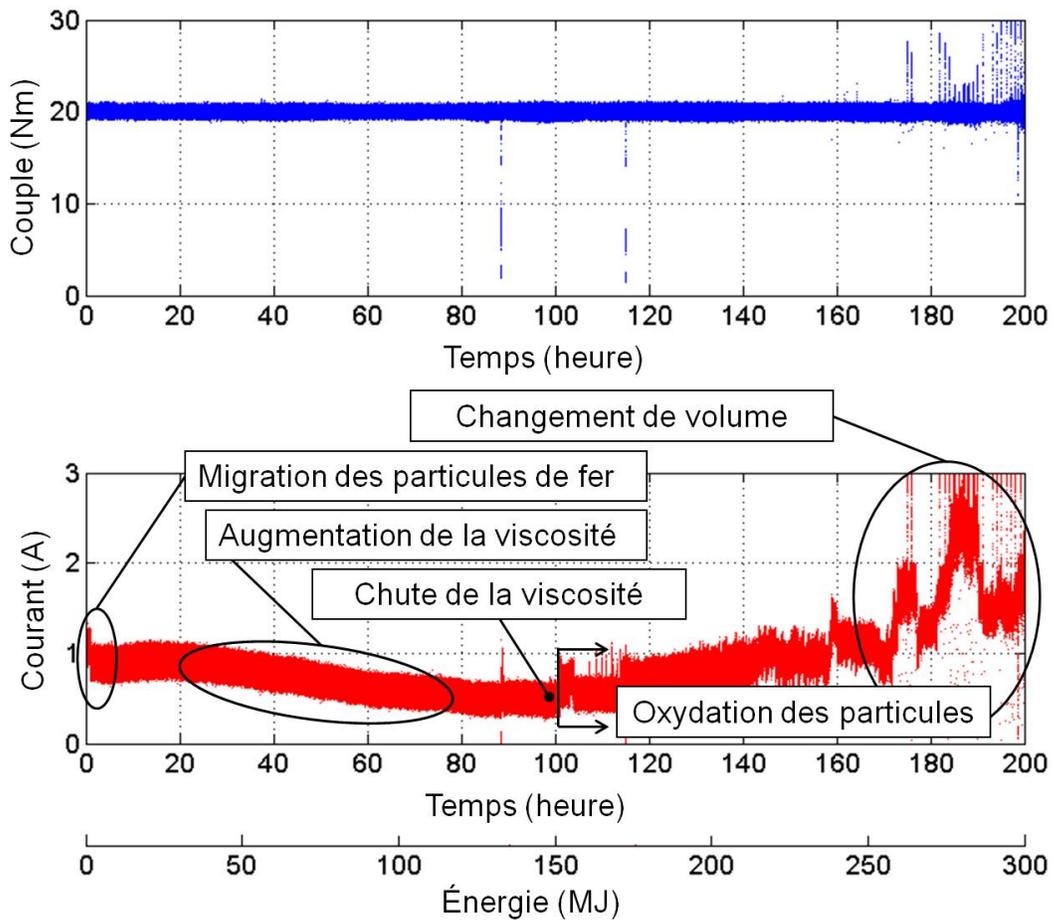


Figure 7.19 Signature de dégradation du fluide MR lorsqu'utilisé en glissement continu dans un embrayage MR muni d'un tambour rainuré pour générer un écoulement de fluide MR (essai G5).

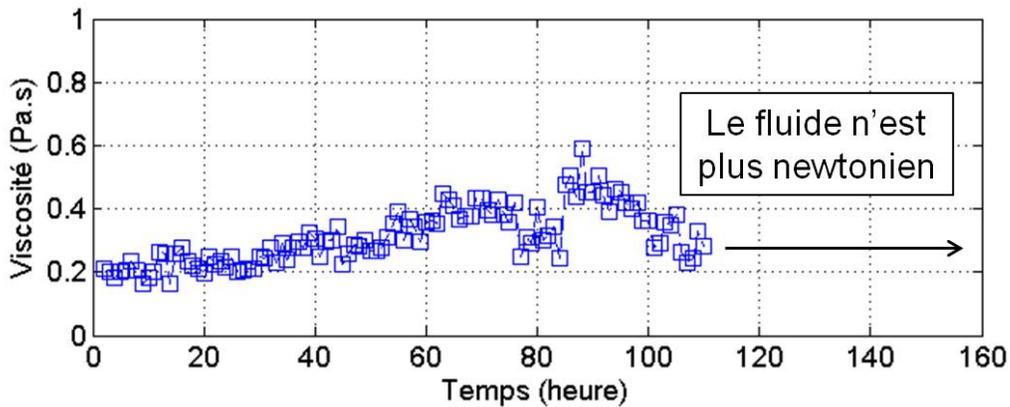


Figure 7.20 Changement de la viscosité en fonction du temps (essai G5 avec circulation interne)

de pompage devra être modélisée finement et mieux comprise (ex. effet de la géométrie des rainures).

### 7.4.2 Meilleure gestion de la puissance dissipée

Si l'application le permet, la diminution de la vitesse de rotation ou de la vitesse de glissement a un impact direct sur la puissance dissipée et donc, sur la durabilité de l'embrayage (sans considérer le gain de la durée de vie du fluide MR). La figure 7.21 présente une extrapolation des résultats de la durée de vie d'un embrayage en fonction de la vitesse de rotation pour différentes valeurs de la durée de vie du fluide MR (les valeurs choisies correspondent à des durées de vie réalistes). Dans ce graphique, on considère l'embrayage CSA2 et une moyenne des cas de chargement présentés à l'annexe A.

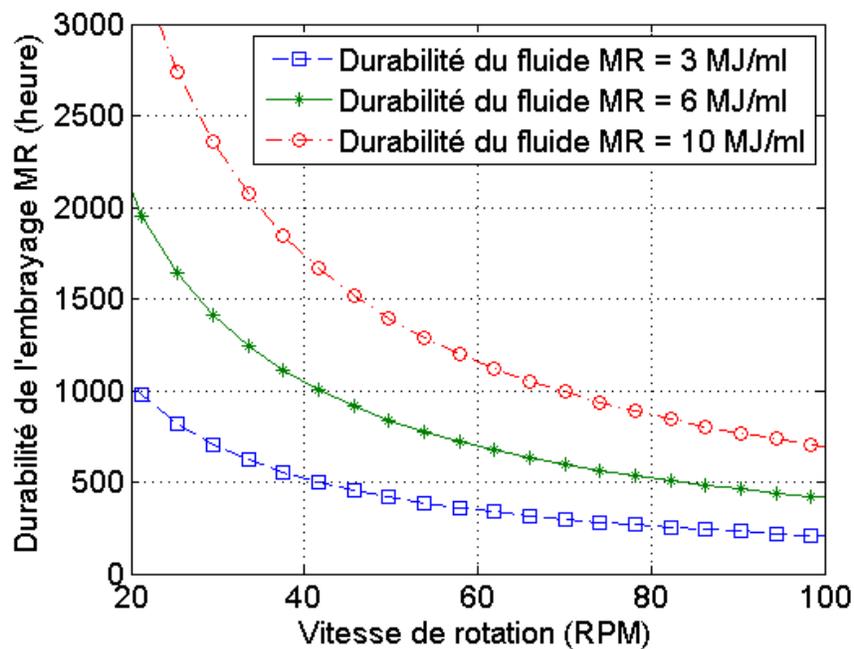


Figure 7.21 Extrapolation de la durabilité d'un embrayage en fonction de la vitesse de rotation pour différentes valeurs de durabilité du fluide MR.

Ces résultats confirment qu'il est possible d'atteindre une durée de vie de l'embrayage respectant les requis pour un actionneur primaire de vol pour hélicoptère. Cependant, une meilleure gestion de la puissance dissipée est nécessaire. Dans ce cas, il implique que la gestion de la vitesse de révolution soit réalisée en temps réel pour atteindre les performances dynamiques.

## 7.5 Conclusion

L'étude de l'impact des paramètres d'opération a permis de déterminer une plage de durabilité du fluide MR (1,5 à 9 MJ/ml). Le paramètre ayant le plus d'impact sur la durabilité du fluide MR est la température. En effet, une augmentation de 40 °C a fait passer la durée de 9 à 1,5 MJ/ml.

Suite à cette étude, l'étude de durabilité du fluide MR s'est poursuivie sur un embrayage grandeur réelle. Cela a permis de bien identifier les événements reliés au processus de dégradation. La figure 7.22 présente un résumé des événements identifiés. Les éléments encadrés par un trait plein sont des observations physiques tandis que les éléments encadrés par un trait pointillé sont des hypothèses. En conclusion, le fluide porteur (l'huile) est un élément critique en ce qui concerne la durabilité du fluide MR.

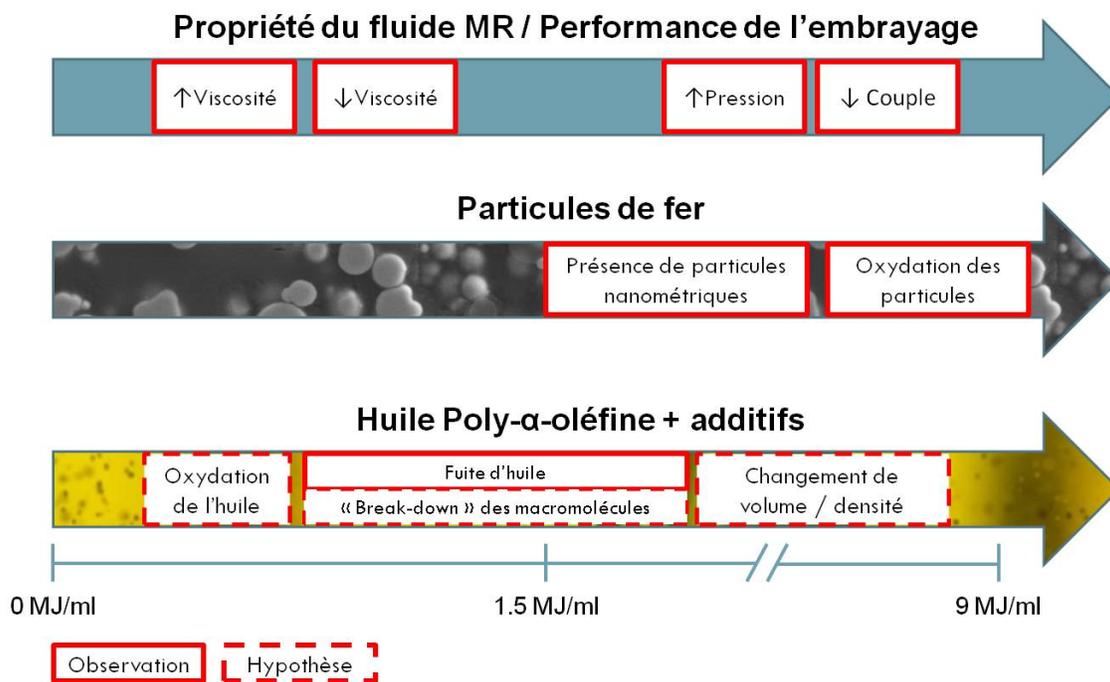


Figure 7.22 Chronologie des événements basée sur les tests de durabilité réalisés sur un embrayage MR

L'idée de circuler le fluide MR à l'intérieur d'un embrayage a été mise de l'avant. L'objectif étant d'allonger la durée de vie des embrayages limités par le volume de fluide MR à l'interface de cisaillement. Les résultats démontrent l'efficacité des rainures qui ont doublé la durée de vie de l'embrayage de 100 à 200 hr. De plus, les rainures ne causent aucune pénalité de poids, de volume, de coût et sont faciles d'intégration.

Aussi, une meilleure gestion de la puissance dissipée permettrait aux embrayages MR d'atteindre des niveaux de durée de vie très intéressants pour une panoplie d'applications.

### 7.5.1 Travaux futurs

Bien que beaucoup d'essais expérimentaux ont été réalisés au cours de ce projet de maîtrise, trois autres essais proposés ci-bas permettraient de valider des hypothèses émises et de s'assurer du bon fonctionnement des embrayages MR lorsque soumis à des conditions extrêmes.

Cette section présente la description des essais proposés, les contributions scientifiques visées ainsi qu'une description des défis de réalisation (s'il y a lieu).

#### Essai #1 - Embrayage MR sous atmosphère inerte

**Description.** Réaliser un test en prenant le soin que le fluide MR n'entre pas en contact avec de l'oxygène.

**Contribution.** L'oxydation de l'huile, qui a pour effet d'augmenter la viscosité, serait évitée ou considérablement retardée.

**Défi de réalisation.** Ce test pourrait être réalisé avec le banc d'essais existant, mais en prenant le soin de contrôler l'atmosphère en contact avec l'embrayage en utilisant un « ballon » gonflé à l'azote placé autour du banc d'essai.

#### Essai #2 - Très haute température

**Description.** Réaliser un test de durabilité dans les mêmes conditions d'opérations que les tests présentés ci-haut (20 Nm et 2600  $s^{-1}$ ) à l'exception de la température ( $>100$  °C).

**Contribution.** Évaluer la durée de vie et le comportement du fluide MR lorsque celui-ci est soumis à de très haute température pendant plusieurs heures.

#### Essai #3 - Lecture du flux magnétique

**Description.** Ce test consiste à réaliser un répliquat de G3, c'est-à-dire dans les mêmes conditions d'opération. En plus, un capteur de flux magnétique devrait être intégré à l'embrayage MR.

**Contribution.** L'ajout du capteur de flux magnétique permettrait d'avoir une meilleure idée de l'état et de la quantité de particules à l'interface de cisaillement. En effet, lorsqu'il y aura diminution graduelle du couple transmis par l'embrayage, il sera possible de dire qu'elle est causée par l'oxydation des particules. D'un autre côté, lorsqu'il se produira une

diminution importante et rapide du couple transmis par l'embrayage, il sera possible de dire que c'est une perte de particules à l'interface de cisaillement.

# CHAPITRE 8

## CONCLUSION

### 8.1 Sommaire

Dans un premier temps, une analyse de fiabilité a été réalisée sur un embrayage MR. Cette analyse a permis d'évaluer les requis de fiabilité de chacune des composantes nécessaires pour répondre aux normes de fiabilité d'un hélicoptère. La redondance de la chambre de fluide MR ainsi que des bobines sont essentielles pour atteindre les requis de fiabilité. Aussi, le type de joint d'étanchéité doit être modifié. Somme toute, les embrayages ont un bon potentiel de fiabilité dû à leur simplicité et à l'absence de contact métal-métal.

Dans un second temps, une vingtaine d'essais expérimentaux ont été réalisés sur un banc d'essais miniature dans le but d'évaluer l'effet des paramètres d'opération sur la durée de vie du fluide MR. Il s'avère que la température est le paramètre le plus influent en comparaison avec le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement. En effet, le LDE d'un fluide MR utilisé à basse température (40 °C) est six fois plus grand que celui d'un fluide MR utilisé à haute température (80 °C).

Dans un troisième temps, des tests de durabilité ont été réalisés sur un embrayage MR grandeur réelle. Les résultats ont permis d'identifier et de comprendre le processus de dégradation du fluide MR. On peut diviser ce processus en cinq événements distincts : 1. la migration des particules ferromagnétiques ; 2. l'augmentation de la viscosité du fluide porteur ; 3. la chute de la viscosité du fluide porteur ; 4. l'oxydation des particules ferromagnétiques ; 5. le changement de volume du fluide porteur. Les effets sur l'embrayage MR sont respectivement les suivants : 1. augmentation de 10% de couple transmissible ; 2. augmentation du couple résistif (*off-state*) ; 3. diminution du couple résistif et comportement erratique ; 4. diminution de 23% du couple transmissible ; 5. diminution de 40% du couple transmissible.

Dans un quatrième temps, un concept pour permettre la circulation du fluide MR à l'intérieur d'un embrayage a été testé. Ce concept complètement nouveau repose sur des rainures hélicoïdales directement usinées sur la surface des tambours. Les résultats démontrent une amélioration de la durée de vie de l'embrayage MR très considérable. En effet, les tests de durabilité avec des rainures ont duré environ 100 heures de plus que les tests sans rainure,

un facteur de deux de différence. Cette nouvelle caractéristique permet d'utiliser une plus grande quantité de fluide MR et de, potentiellement, diminuer la température du fluide MR, paramètre critique de la durée de vie.

Finalement, à partir des résultats des études de fiabilité et de durabilité, des stratégies de détection et d'identification de fautes du fluide MR ont été proposées. Des approches hybrides, c'est-à-dire un couplage d'informations provenant de capteurs et de modèles, permettraient d'identifier une augmentation de volume suspect, l'état de l'embrayage et les périodes de maintenance.

## 8.2 Contributions

L'analyse de fiabilité d'un embrayage MR a permis de proposer des modifications au design (redondance de la chambre de fluide MR et redondance des bobines) pour atteindre les requis de fiabilité nécessaires pour l'application visée. De plus, elle a permis d'identifier où les efforts en terme de recherche et de développement devront être mis dans le futur. Les résultats de l'étude de fiabilité ont été présentés le 3 juillet 2012 à la *Fifth International Conference on Engineering Failure Analysis* se déroulant à The Hague aux Pays-Bas.

Un banc d'essais complètement autonome et sécuritaire a été développé pour réaliser des essais de très longue durée (>100 heures) permettant de simuler des conditions d'opérations (température, couple, vitesse). Celui-ci permet aussi de quantifier la dégradation du fluide MR et les performances de l'embrayage MR par l'entremise de séquences périodiques de caractérisation. La séquence permet d'obtenir les performances en boucle ouverte de l'embrayage, la viscosité apparente du fluide MR, les constantes de temps d'activation et de désactivation ainsi que la valeur de l'hystérésis et ce, à chaque heure de test. Aussi, un embrayage MR grandeur réelle et instrumentée a été développé afin d'étudier de façon précise la dégradation du fluide MR et de permettre l'intégration du concept de circulation interne.

Les 1750 heures d'essais expérimentaux ont été réalisés dans le cadre de ce projet de maîtrise. Ils ont permis d'étudier l'effet des paramètres d'opération, d'identifier les modes de défaillance du fluide MR et d'évaluer l'impact de la dégradation du fluide MR sur les performances d'un embrayage MR. Tout ces points ne sont pas complètement nouveaux, mais apportent certainement une meilleure compréhension de la durabilité des embrayages MR. Les résultats de l'étude portant sur la durabilité du fluide MR ont été présentés le 5 juillet 2012 à la *13e International Conference on Electrorheological Fluids and Magneto-rheological* se déroulant à Ankara, en Turquie. Aussi, un article de conférence a été publié

dans le *Journal of Physics : Conference Series* [Desrosiers *et al.*, 2012]. Finalement, l'étude expérimentale de la circulation du fluide MR à l'intérieur d'un embrayage constitue une nouveauté très intéressante autant sur le plan du fonctionnement que sur les résultats obtenus.

## 8.3 Travaux futurs

Bien qu'un grand nombre d'études ont été réalisées concernant la durabilité des embrayages MR, plusieurs tests expérimentaux restent à faire. La description de ceux-ci se trouve à la section 7.5.1.

Il y a quelques mois, le fabricant du fluide MR utilisé pour les tests de durabilité (BASF) a annoncé l'arrêt de sa production. Le fluide MR maintenant utilisé dans le projet ENV404 est fabriqué par Lord Corporation. Afin de valider que les résultats présentés dans ce mémoire soient toujours valables, il faudrait refaire quelques tests avec le nouveau fluide.

Compte tenu des résultats obtenus avec les rainures hélicoïdales, le concept de circulation interne mérite d'être étudié et mieux compris. En effet, la mécanique de pompage devra être modélisée et mieux comprise. Plusieurs défis de modélisation, d'optimisation et de tests expérimentaux attendent celui ou ceux qui voudront bien y travailler.

Tel que mentionné chapitre 5, les joints d'étanchéité sont des éléments critiques en termes de fiabilité et de durabilité. La grande quantité de particules abrasives affectent grandement la durée de vie des joints d'étanchéité et des bagues d'usure (voir figure B.9). De plus, les joints à lèvres utilisés dans les embrayages testés ne font pas le travail et ne répondent pas au requis de fiabilité demandé par l'application visée. Cela dit, il reste beaucoup de travail à faire concernant le choix ou le développement des joints d'étanchéité en contact avec le fluide MR [Iyengar *et al.*, 2004].

Finalement, une technique efficace et simple pour remplir et vidanger le fluide MR devra être développée. En effet, il n'est pas simple de remplir les embrayages et encore moins de les vidanger sans les désassembler complètement. La fiabilité et la durabilité des embrayages MR sont essentielles pour une application aéronautique, mais la maintenabilité l'est tout autant.



# ANNEXE A

## PROJET ENV404 - ARCHITECTURE ET EM-BRAYAGE MR

### A.1 Présentation de l'architecture EGC

L'architecture présentée à la figure A.1 a été développée dans le cadre du projet ENV404 par Patrick Chouinard. Ce système électromécanique permet de remplacer le système hydromécanique qui contrôle les surfaces de vols de l'hélicoptère Bell 407.

Cette nouvelle architecture emploie des embrayages MR en glissement contrôlés (EGC) pour moduler la force transmise au bras de levier du plateau cyclique de l'hélicoptère. Un mécanisme à quatre barres est ajouté entre les embrayages MR et les bras de levier (n'apparaissent pas sur la figure A.1) des trois degrés de liberté pour offrir un rapport de réduction et minimiser le poids des composantes. Ce concept est actionné par quatre moteurs électriques ainsi que par quatre réducteurs tournant à vitesse constante qui alimentent en rotation l'entrée des six embrayages MR. Pour contrôler la position du plateau cyclique dans les deux directions (pousser & tirer), les embrayages sont activés indépendamment.

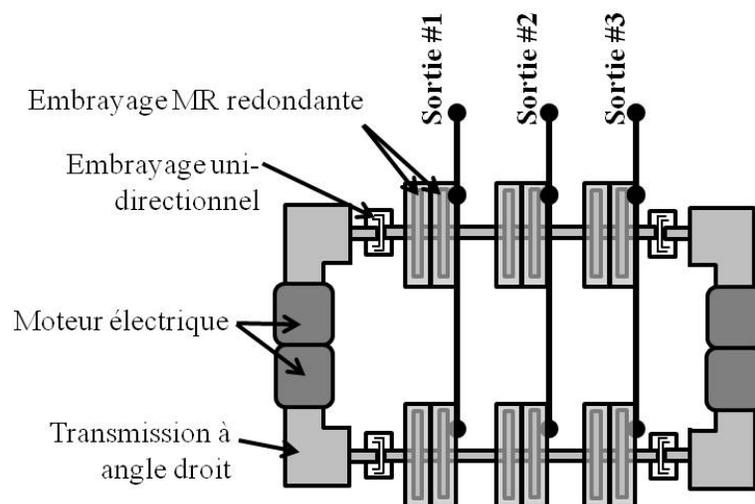


Figure A.1 Architecture EGC permettant de contrôler les surfaces de vols de l'hélicoptère Bell 407. Cette architecture a été développée par Patrick Chouinard, étudiant au doctorat et membre du projet ENV404 (image : Patrick Chouinard)

## A.2 Présentation de l'embrayage MR CSA2

L'embrayage MR multi-tambours utilisé dans la configuration EGC est présenté à la figure A.2. Cet embrayage MR est la deuxième génération conçue et optimisée pour le projet ENV404. L'embrayage est composé de deux côtés redondants et symétriques permettant d'améliorer la fiabilité du système. Deux bobines de chaque côté de l'embrayage assurent la création du champ magnétique aux interfaces de cisaillement. En cas de défaillance d'une bobine, l'embrayage peut fournir 75% du couple nominal.

L'embrayage a été conçu pour transmettre  $\sim 215$  Nm et atteindre une densité de couple de  $\sim 80$  Nm/kg. Le volume de chaque chambre de fluide MR est de  $\sim 25$  ml, soit  $\sim 50$  ml au total. Cette quantité de fluide MR devrait permettre une durée de vie de l'embrayage de 850 heures (hypothèses : couple moyen = 20 Nm / vitesse de rotation = 25 rpm / vie du fluide MR = 6 MJ/ml). L'étanchéité est assurée par quatre joints à lèvres. Six éléments compliant en polymère sont prévus pour limiter l'augmentation de la pression à l'intérieur de l'embrayage lorsque le fluide MR se dilate sous l'effet de la température. La chaleur est dissipée par des ailettes fabriquées à même le boîtier extérieur ainsi que le rotor. Les parties tournantes sont soutenues par deux roulements à billes radiales. L'espacement entre les surfaces de cisaillement est fixé à une valeur de 0,010 po.

Des filets optionnels peuvent être usinés à même les tambours dans le but de créer une circulation interne afin d'uniformiser la dégradation du fluide MR.

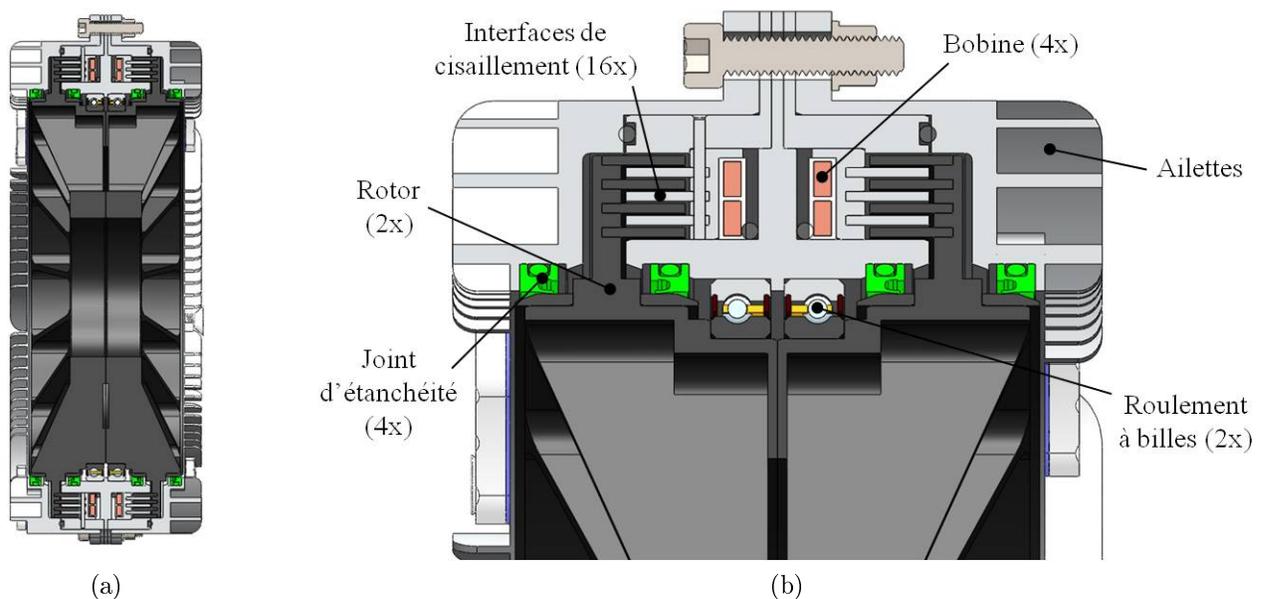


Figure A.2 (a) Vue de section et (b) Description de l'embrayage CSA2.

## A.3 Cas de chargement

La figure A.3 présente le couple moyen que chacun des six embrayages MR devra fournir en fonction du cas de chargement. Les cas de chargement sont expliqués ci-dessous.

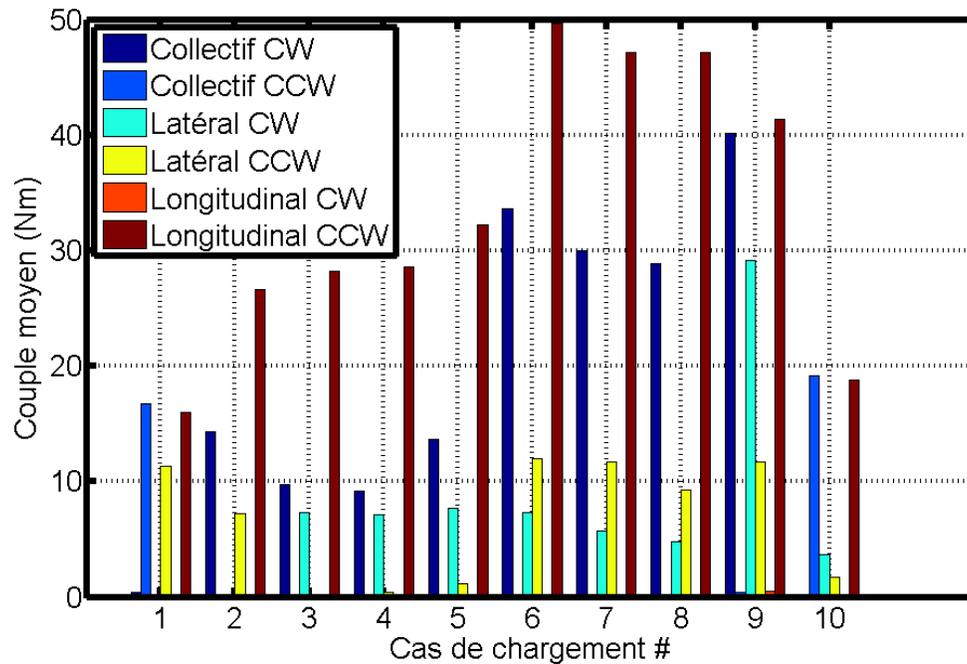


Figure A.3 Couple moyen pour chaque embrayage MR en fonction des cas de chargement

Voici la description des dix cas de chargement présentés à la figure A.3.

- Arrondi normal et atterrissage à partir de 60 noeuds
- Montée régulière @ 60 noeuds
- Vol en palier
- Renversment longitudinal @  $V_h$
- Renversment latéral @  $V_h$
- Montée @  $0.9V_h$
- Virage à droite @  $0.9V_h$  Max G
- Virage à gauche @  $0.9V_h$  Max G
- Descente régulière
- Autorotation @  $0.7V_h$



# ANNEXE B

## DISSECTION D'UN EMBRAYAGE MR

### B.1 Allure du fluide MR

Avant et après chacun des tests de durabilité, des échantillons sont prélevés. Selon le cas, des analyses de thermogravimétrie, de granulométrie, de diffraction aux rayons X ou des observations au microscope à balayage électronique sont réalisées. La figure B.1 présente quatre échantillons de fluide MR provenant du test de durabilité G3. Le fluide MR est du Basonitic 5030 de la compagnie BASF. Ce test a duré environ 120 heures de cisaillement continu. Les paramètres d'opération du test sont : 20 Nm ou 25 kPa, 65 °C, 200 rpm ou 2600 s<sup>-1</sup>. Le tambour de l'embrayage lors de ce test était lisse.

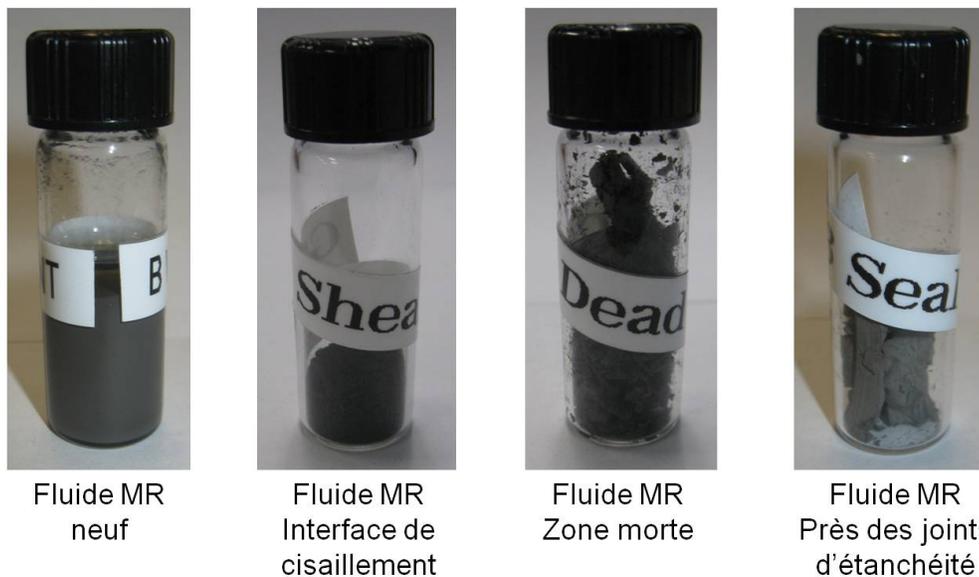


Figure B.1 Photo des échantillons de fluide MR provenant de différentes zones de l'embrayage MR avant et après le test G3

La figure B.2 présente l'allure du fluide MR collé sur la partie tournante de l'embrayage MR grandeur réelle après le test G6. Ce test est un réplicat du test G3 précédemment expliqué.

Les figures B.3, B.4 et B.5 présentent des échantillons de fluide MR provenant du test G7. Le fluide MR est du Basonitic 5030 de la compagnie BASF. Ce test a duré environ 220 heures de cisaillement continu. Les paramètres d'opération du test sont : 20 Nm ou 25 kPa, 65 °C, 200 rpm ou 2600 s<sup>-1</sup>. Le tambour de l'embrayage lors de ce test avait des rainures pour favoriser la circulation interne du fluide MR.



Figure B.2 Photo de l'état du fluide MR situé à l'interface de cisaillement après le test G6

L'échantillon de fluide MR présenté à la figure B.3 à une allure poudreuse. En effet, une analyse de thermogravimétrie a permis de confirmer que l'échantillon contient seulement 2,5% en masse d'huile comparativement à 10% pour un échantillon de fluide MR non utilisé.



Figure B.3 Échantillon de fluide MR provenant de l'interface de cisaillement du test G7.

Les échantillons de fluide MR présentés aux figures B.4 et B.5 ont une allure à moitié solide et vaseuse. En effet, une analyse de thermogravimétrie a permis de confirmer que

les échantillons contiennent de 4 à 5% en masse d'huile comparativement à 10% pour un échantillon de fluide MR non utilisé.



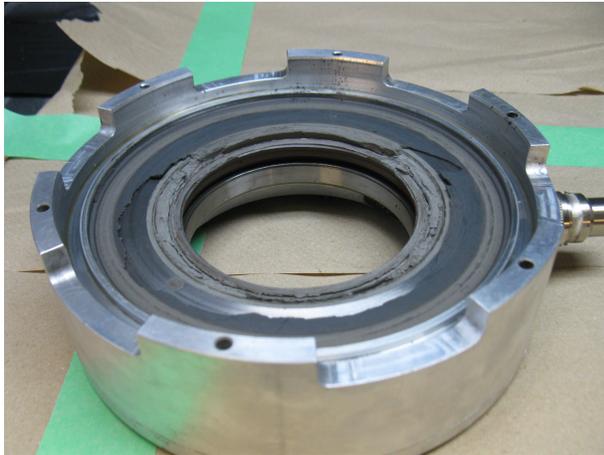
Figure B.4 Échantillon de fluide MR provenant de la zone morte près des joints d'étanchéité du test G7.



Figure B.5 Échantillon de fluide MR provenant de la zone morte du test G7.

La figure B.6 présente l'allure du fluide MR situé à la zone morte (zone non magnétisée) du test G7. Le fluide MR est collé sur la paroi qui n'est pas en rotation lors du test (côté statique). La « galette » collée sur la paroi statique est foncée sur le dessus et pâle en dessous. Cela porte à croire qu'il n'y avait plus d'écoulement de fluide, mais plutôt un frottement continu avec la partie tournante.

La figure B.7 présente des échantillons d'huile neuve et usagée. L'échantillon complètement à droite est de l'huile neuve que l'on retrouve dans le fluide MR Basonitic 5030 produit par BASF. Les deux échantillons du centre proviennent du test de durabilité G7. L'échantillon plus rougeâtre a été récupéré près de l'interface de cisaillement pendant le test tandis que l'échantillon plus jaunâtre a été récupéré près des capteurs de pression situés de part et d'autres de l'interface de cisaillement.



(a) Intérieur de l'embrayage MR utilisé pour le test G7



(b) Zoom sur le fluide MR collé sur la partie statique de l'embrayage

Figure B.6 Fluide MR sous forme d'une « galette » collée sur la partie statique de l'embrayage MR

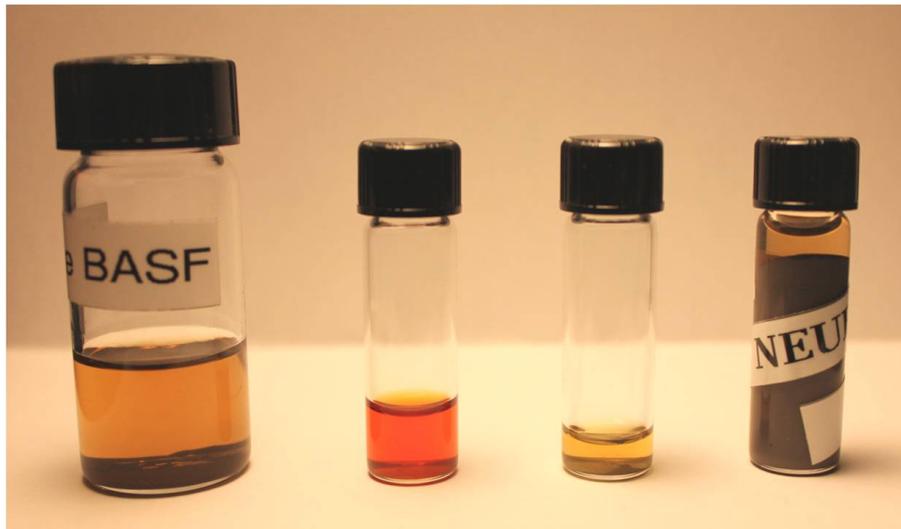


Figure B.7 Comparaison de la couleur de l'huile. De gauche vers la droite : échantillon d'huile neuve, échantillon d'huile provenant de la zone de cisaillement, échantillon d'huile provenant de la zone morte et échantillon de fluide MR neuf.

## B.2 Usure interne de l'embrayage

La figure B.8 présente une photo de l'usure non uniforme à la jonction du rotor et du tambour. À droite, on voit la surface de cisaillement en acier et à gauche, on voit le rotor d'aluminium. Cette photo a été prise à la suite des essais réalisés sur l'embrayage MR grandeur réelle. Le temps total de fonctionnement de l'embrayage MR correspond

à environ 700 heures. La présence d'aluminium dans les échantillons de fluide MR a été relevée suite à une analyse de composition chimique.

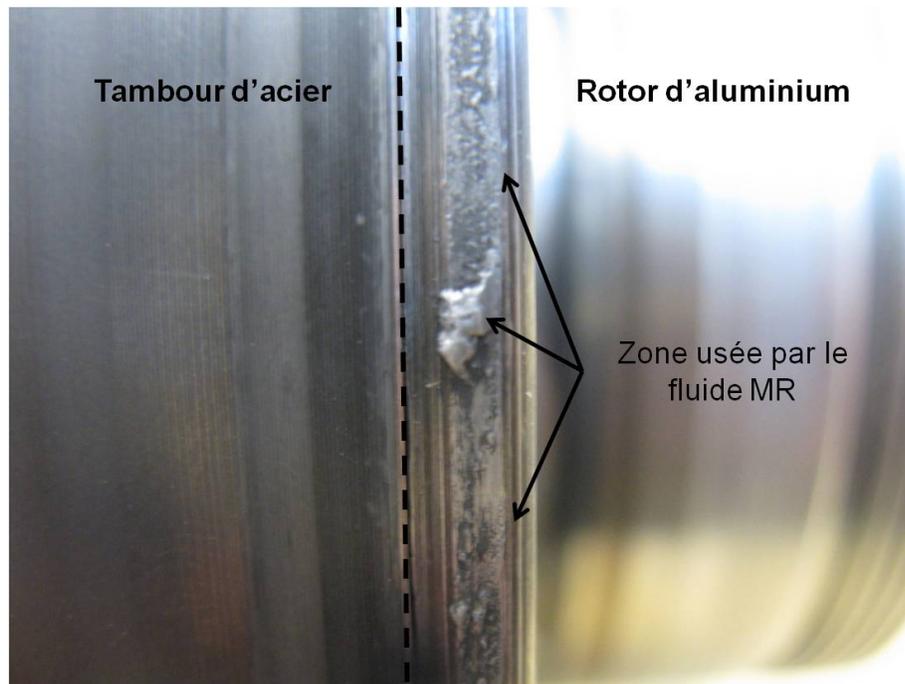


Figure B.8 Usure du rotor d'aluminium suite aux tests de durabilité

La figure B.9 présente une photo de la bague d'usure après 700 heures d'utilisation. À ce moment, des rainures étaient perceptibles au toucher, donc de l'ordre de 0,001 po. Les spécifications du fabricant annonce que le fini de surface de la bague d'usure se situe entre 0,2 et 0,8  $\mu\text{m}$ . Un bon fini de surface de la zone en contact avec le joint d'étanchéité est nécessaire pour assurer une bonne étanchéité.

Généralement, la surface en contact avec le joint d'étanchéité devient marquée lorsque des particules s'infiltrerent. L'usure prend l'allure d'un chemin circulaire situé au point de contact du joint d'étanchéité. Plus la rainure devient profonde, plus les particules pourront s'infiltrer et diminuer la capacité du joint d'étanchéité de sceller le fluide MR.

La durée de vie d'une bague d'usure de ce type dans des conditions normales d'utilisation est  $>1000$  heures. Le contact avec les particules de fer contenues dans le fluide MR a certainement entraîné l'usure prématurée de la bague.

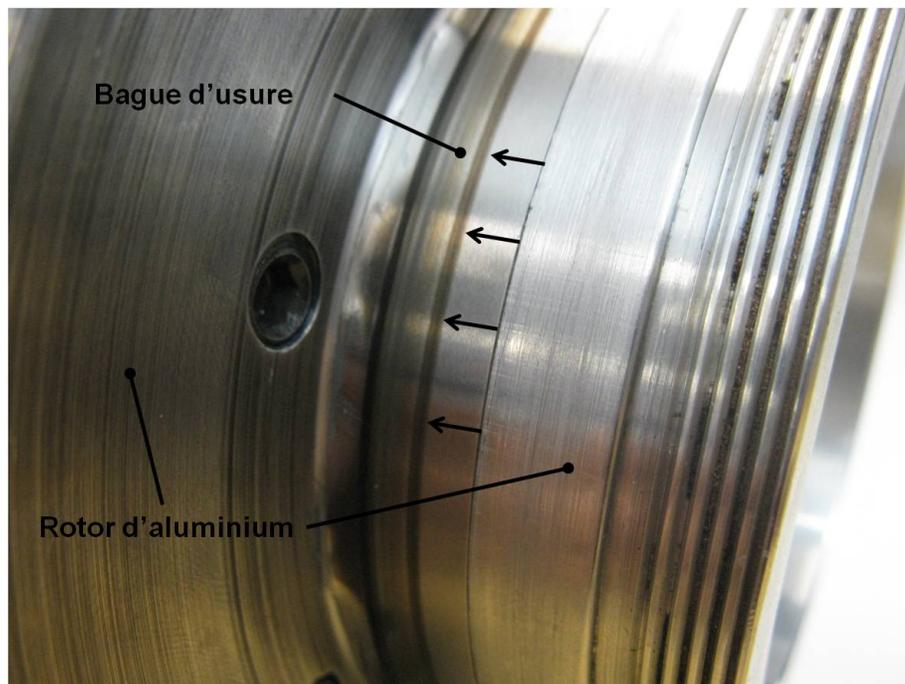


Figure B.9 La bague d'usure côté décharge ou « haute-pression » présente des marques d'usure considérables suite à 700 heures d'utilisation.

# LISTE DES RÉFÉRENCES

- A. Ericson, C. (2005). *Hazard Analysis Techniques for System Safety*. John Wiley & Sons.
- Ahmadian, M. (1999). Design and development of magneto rheological dampers for bicycle suspensions. *Dynamic Systems and Control Division - 1999 (The ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition), November 14, 1999 - November 19, 1999*, volume 67, p. 737–741.
- Avraam, M. T. (2009). *MR-fluid brake design and its application to a portable muscular rehabilitation device*. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, France.
- AYEL, J. (1996). Lubrifiants - propriétés et caractéristiques. *Techniques de l'ingénieur*, volume TIB183DUO, numéro B5340.
- BASF (2009). Magnetorheological fluid basonetec 5030 - technical data.
- Bertsche, B. (2008). *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering : Determination of Component and System Reliability*. Springer.
- C. Juvinall, R. et M. Marshek, K. (2000). *Fundamentals of Machine Component Design*, third edition édition. John Wiley & Sons.
- Carlson, J. D. (2002). What makes a good MR fluid? *Journal of intelligent material systems and structures*, volume 13, numéro 7-8, p. 431.
- Chen, X., Yu, Q., Ren, W. et Long, H. (2009). Thermal degradation kinetics and thermo-life of transformer oil. *Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University*, volume 43, numéro 8, p. 112–115+134.
- D. Weiss, K. et Carlson, D. (1999). Method and magnetorheological fluid formulations for increasing the output ...
- Denis, J., Briant, J. et Hipeaux, J.-C. (1997). *Physico-Chimie Des Lubrifiants : Analyses Et Essais*. Editions OPHRYS.
- Desrosiers, J.-F., Lucking Bigue, J.-P., Denninger, M., Julio, G., Plante, J.-S. et Charron, F. (2012). Preliminary investigation of magneto-rheological fluid durability in continuous slippage clutch. Dans *Proceedings of the 13th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*.
- Diani, J., Fayolle, B. et Gilormini, P. (2009). A review on the mullins effect. *European Polymer Journal*, volume 45, numéro 3, p. 601–612.
- Division, N. C. (2010). *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*. West Bethesda, Maryland.
- Gabriel, C., Kieburg, C. et Laun, H. (2010). Clutch and brake related testing of magnetorheological fluids using the BASF twin gap magnetocell. *Applied Rheology*, volume 20, numéro 4, p. 41778 (10 pp.).

- Gabriel, C., Oetter, G. et Kieburg, C. (2011). Durability testing of magnetorheological fluids for clutch and brake applications. World Scientific.
- Goncalves, F., Koo, J.-H. et Ahmadian, M. (2006). A review of the state of the art in magnetorheological fluid technologies part i : MR fluid and MR fluid models. *Shock and Vibration Digest*, volume 38, numéro 3, p. 203–19.
- Goncalves, F. D. et Carlson, J. D. (2007). Investigating the time dependence of the MR effect. *International Journal of Modern Physics B*, volume 21, numéro 28-29, p. 4832–4840.
- Gopalswamy, S. (1999). Magnetorheological fluid fan clutch.
- Hreinsson, E. (2011). *Durability of a Magnetorheological Fluid in a Prosthetic Knee Joint*. Thèse de doctorat, University of Iceland.
- Hu, W., Wilson, N., Hiemenz, G. J. et Wereley, N. M. (2008). Magnetorheological shock absorber for crew seats in the expeditionary fighting vehicle. Dans *ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS2008, October 28, 2008 - October 30, 2008*. Proceedings of the ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS2008, volume 1. American Society of Mechanical Engineers, p. 831–837.
- Iyengar, V., Alexandridis, A., Tung, S. et Rule, D. (2004). Wear testing of seals in magnetorheological fluids. *Tribology Transactions*, volume 47, numéro 1, p. 23–28.
- Johnson, D. M. (1996). A review of fault management techniques used in safety-critical avionic systems. *Progress in Aerospace Sciences*, volume 32, numéro 5, p. 415–431.
- Jones, R. I. (2002). The more electric aircraft - assessing the benefits. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G : Journal of Aerospace Engineering*, volume 216, numéro 5, p. 259–269.
- Jones, W. P. (1953). Investigation of magnetic mixtures for clutch application. *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, volume 72, numéro 2, p. 88 –92.
- Kieburg, C., Oetter, G., Laun, M., Gabriel, C. et Steinwender, H. (2008). MR all-wheel-drive prototype car driving tests and durability requirements for the MR fluids used.
- M. White, F. (2006). *Fluid Mechanics*, 6<sup>e</sup> édition. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- MARTIN, J. (2001). Etancheite en mecanique. *Techniques de l'ingenieur Guidage mecanique*, volume base documentaire : TIB183DUO., numéro ref. article : b5420.
- Muenchhof, M., Beck, M. et Isermann, R. (2009). Fault-tolerant actuators and drives-structures, fault detection principles and applications. *Annual Reviews in Control*, volume 33, numéro 2, p. 136–148.
- Munske, H. (1987). Corrosion protection for hopper cars. *Zeitschrift fuer Eisenbahnwesen und Verkehrstechnik - Glasers Annalen*, volume 111, numéro 10, p. 334–339.

- Paul, L. (2007). Maintenance no longer on schedule [industrial equipment maintenance]. *Managing Automation*, volume 22, numéro 8, p. 63–4.
- Rudnick, L. R. (2005). *Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants : Chemistry and Technology*. CRC Press.
- Saynatjoki, M. et Holmberg, K. (1993). Magnetic fluids in sealing and lubrication - a state of the art review. *Journal of Synthetic Lubrication*, volume 10, numéro 2, p. 119–132.
- Schwartz, S. E. et Smolenski, D. J. (1987). Development of an automatic engine oil - change indicator system. Dans *Papers Presented at the SAE International Congress and Exposition*. SAE Technical Paper Series. SAE, p. SAE, Warrendale, PA, USA.
- Senthil, K., Uthirabalan, R. et Bhowmick, S. (2009). Towards full autonomous development of a fixed wing unmanned air vehicle. Dans *2009 International Conference on Automation, Robotics and Control Systems (ARCS-09), 13-16 July 2009*. Proceedings 2009 International Conference on Automation, Robotics and Control Systems (ARCS-09). ISRST, p. 200–6.
- Smith, A. L., Ulicny, J. C. et Kennedy, L. C. (2007). Magnetorheological fluid fan drive for trucks. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, volume 18, numéro 12, p. 1131 –1136.
- Song, C., Wang, P. et Makse, H. A. (2008). A phase diagram for jammed matter. *Nature*, volume 453, numéro 7195, p. 629–632.
- Sunkara, S. R., Root, T. W., Ulicny, J. C. et Klingenberg, D. J. (2009). Iron oxidation and its impact on MR behavior. *Journal of Physics : Conference Series*, volume 149, p. 012081.
- Tafnine, F. et Mokrani, K. (2012). Real time automatic detection of bearing fault in induction machine using kurtogram analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, volume 132, numéro 5, p. EL405–EL410.
- Tan, H. et Sepehri, N. (2001). On condition monitoring of pump pressure in a hydraulic servo-drive system. Dans *2001 American Control Conference, June 25, 2001 - June 27, 2001*. Proceedings of the American Control Conference, volume 6. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 4478–4483.
- Ulicny, J. C., Balogh, M. P., Potter, N. M. et Waldo, R. A. (2007a). Magnetorheological fluid durability test-iron analysis. *Materials Science and Engineering : A*, volume 443, numéro 1-2, p. 16–24.
- Ulicny, J. C., Hayden, C. A., Hanley, P. M. et Eckel, D. F. (2007b). Magnetorheological fluid durability test - organics analysis. *Materials Science and Engineering : A*, volume 464, numéro 1-2, p. 269–273.
- Wiehe, A., GuTh, D. et Maas, J. (2011). Large scale test bench for the durability analysis of MR fluids. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., p. 620–626.

Zhang, G., Chang, Z. et Wang, L. (2012). Study on nitrogen shock absorber oil. *Advanced Materials Research*, volume 430-432, p. 53-6.



