



HAL
open science

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

Paul-Alexis Novikoff

► **To cite this version:**

Paul-Alexis Novikoff. Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université Paris Saclay (COMUE), 2019. Français. NNT: 2019SACLX010 . tel-02168027

HAL Id: tel-02168027

<https://theses.hal.science/tel-02168027>

Submitted on 28 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide Magnéto-Rhéologique

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'école Polytechniques

École doctorale n°573 Interfaces : approches interdisciplinaires,
fondements, applications et innovations (Interfaces)
Spécialité de doctorat : Sciences et Technologies Industrielles

Thèse présentée et soutenue à Gif-Sur-Yvette, le 1^{er} Avril 2019, par

Mr Paul-Alexis Novikoff

Composition du Jury :

Nazih Mechbal Professeur, Arts et Métiers ParisTech (– PIMM)	Président du jury Rapporteur
Laurence Bodelot Maître de Conférences, École Polytechnique (– LMS)	Rapporteur
Betty Semail Professeur, École polytechnique universitaire de Lille (– L2EP)	Examineur
Waad Nassar Docteur, Jaguar Land Rover	Examineur
Moustapha Hahez Professeur, CEA (– LISA)	Directeur de thèse
Laurent Eck Ingénieur, CEA (– LISA)	Co-Directeur de thèse

Remerciements

Ces trois années de thèse furent pour moi l'accomplissement d'une tâche de longue haleine. Celle-ci certes n'a été possible que grâce à de nombreuses personnes que je souhaite tout particulièrement remercier ici.

Il me faut tout d'abord remercier mes encadrants Moustapha Hafez et Laurent Eck pour leurs supervisions, leurs conseils et en particulier pour leurs capacités à m'aider à reformuler ma pensée en de meilleurs termes. Ce sont leurs visions et leurs expertises sur le sujet des fluides Magnéto-Rhéologique qui ont permis de délimiter le cadre de ce grand projet.

Je remercie l'École Doctorale Interface au sein de l'école Polytechnique qui a permis la faisabilité administrative de la thèse mais aussi par le biais de nombreuses formations pluridisciplinaires qui m'ont appris à prendre du recul sur les nombreux sujets traités.

Je remercie le jury de thèse par leurs présences ainsi que le temps accordé à ma thèse entre autres par leurs écoutes attentives et leurs pertinentes questions.

Je remercie tous les membres du laboratoire du CEA LIST pour m'avoir accueilli dans leurs bâtiments afin de pouvoir travailler dans de très bonnes conditions dans leur laboratoire, le LISA. J'en profite pour remercier tout le personnel visible ou non du site de Nano Inov, permettant le bon déroulement de ma thèse.

Grâce à la bonne entente régnant dans le laboratoire, les échanges et discussions s'y déroulant m'ont permis de partager de nombreuses expériences qui m'ont fait grandir tant d'un point de vue scientifique que personnel. Je remercie Sylvie Lamy, Alix Perusseu-Lambert et Pierre-Henri Oréface, de m'avoir entouré et grâce à leurs positions d'écoute, entre autres, pour avoir permis de lisser les nombreux chemins escarpés de mon esprit. J'en profite pour remercier particulièrement Charles Hudin et Oliver Faures pour leurs aides ainsi que pour leurs nombreux et pertinents conseils scientifiques.

Je souhaite remercier mes orthophonistes (Marie-Odile, Marie-Caroline...) qui depuis mon enfance m'ont aidé à vivre avec ma dyslexie. Je tiens à mentionner que c'est grâce à de telles personnes, que j'ai pu au sein de ma famille me construire, réussir mes études et surtout me dépasser pour mener à bien ma thèse.

Je remercie mes amis de m'avoir épaulé et permis d'aborder les choses sous d'autres angles permettant d'ajouter toujours plus de couleurs à notre monde. Une pensée particulière est réservée pour mes amis du Lycée Saint-André et des Arts et Métiers qui ont toujours été là quand j'en avais besoin.

Je souhaiterais particulièrement remercier tous ceux qui ont passé quelques heures à me relire pour que cela devienne progressivement ce manuscrit dont je suis fier, cher lecteur, de vous présenter.

Enfin avec une attention toute particulière je souhaite remercier mes parents, piliers infaillibles, qui m'ont accompagné pour franchir chaque étape de ma thèse et pour devenir l'être que je suis par leurs soutiens indéfectibles.

Table des matières

Introduction.....	1
Chapitre 1 : Les fluides magnéto-rhéologiques	3
1.1 Les fluides magnéto-rhéologiques : fondamentaux	4
1.2 Les applications des fluides magnéto-rhéologique	14
1.3 La rhéologie des fluides	21
1.4 Conclusion.....	29
Chapitre 2 : Banc de test vibratoire : Montage et expérimentations.....	31
2.1 Introduction	32
2.2 Banc de test expérimental et méthodologie.....	33
2.3 Mesures des vibrations sur l'élément cisailant.....	44
2.4 Variations de la contrainte de cisaillement du fluide	54
2.5 Conclusion.....	59
Chapitre 3 : Effet de la direction des vibrations.....	61
3.1 Introduction	62
3.2 Trois directions de vibrations	63
3.3 Mesures vibratoires	67
3.4 Couple des configurations vibratoires.....	80
3.5 Conclusion.....	89
Chapitre 4 : Effets des vibrations sur différents fluides magnéto-rhéologiques	91
4.1 Introduction	92
4.2 Les fluides étudiés	92
4.3 Mesure de la déformation.....	93
4.4 Variations du couple.....	102
4.5 Conclusion.....	110
Conclusion	113

Introduction

Le stade technologique dont nous jouissons actuellement nous vient de la connaissance progressive des matériaux qui nous entourent ainsi que par la maîtrise de leurs propriétés. Pour faire suite aux nombreuses avancées, les études des matériaux liquides et solides ont été menées de manière séparée. Cependant, cette distinction n'est pas clairement définie puisqu'il existe des matériaux dont les propriétés indiquent cette dualité. C'est entre autres le cas du fluide Magnéto-Rhéologique (MR) qui, suite à un champ magnétique qui lui est appliqué, passe d'un état liquide à un état se rapprochant d'un solide.

De nombreux domaines applicatifs utilisent ces fluides MR dans le cadre de la dissipation de l'énergie mécanique. Leur capacité à modifier rapidement leurs propriétés, en fonction d'un champ magnétique, fait de ces fluides un très bon moyen de contrôler le comportement statique et dynamique de différents dispositifs mécaniques tels que des amortisseurs, des freins et des embrayages. Cependant ces dissipateurs d'énergie mécanique sont amenés à opérer dans des milieux soumis à des perturbations externes notamment des vibrations.

À notre connaissance l'impact de telles perturbations vibratoires sur les fluides MR a été peu étudié dans l'état de l'art. Dans le cadre de l'utilisation du fluide MR pour la réalisation d'une fonction d'amortisseur, pour un véhicule ou un pont, les produits commerciaux existants n'ont pas montré à ce jour de sensibilité et de limite concernant cette forme de perturbation. En revanche sur de nouvelles interfaces homme-machine telles que les interfaces haptiques à base de frein MR, qui sont actuellement à un stade de recherche et qui ne bénéficient pas du recul suite à une industrialisation, leurs exigences en termes de contrôlabilité et de finesse dans la restitution des efforts pourraient être dégradées par la présence de vibrations parasites.

C'est dans ce cadre qu'il nous a semblé intéressant d'étudier l'impact des vibrations sur les fluides MR et plus particulièrement dans le cas d'un frein MR réalisé par le cisaillement du fluide par un élément mécanique. Des vibrations seront donc appliquées à cet élément cisailant afin de propager les vibrations dans le fluide et de permettre l'étude de l'impact des vibrations dans le fluide MR.

Deux objectifs nous semblent importants :

- Établir une relation entre la présence de perturbations vibratoires et l'observation d'une dégradation de la performance de freinage.
- Identifier les paramètres clefs du fluide (viscosité, concentration en particules) ainsi que ses conditions de mise en œuvre (champ magnétique, vitesse de cisaillement) qui peuvent influencer sur cette dégradation soit pour la minimiser ou au contraire la renforcer.

Le premier chapitre décrit les propriétés et les applications des fluides MR dans leurs différentes configurations usuelles. Il se termine par une comparaison analytique de l'ordre de grandeur des efforts vibratoires relativement aux efforts de cohésion magnétiques ayant lieu dans le fluide.

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

Nous présentons dans le second chapitre une approche expérimentale pour étudier l'impact des vibrations sur un fluide MR. Pour cela, les moyens et la méthodologie communs à toutes les expériences sont exposés. Les variations de la contrainte de cisaillement du fluide sont mises en regard de l'amplitude vibratoire d'excitation.

Dans le troisième chapitre, nous cherchons à déterminer si les directions de propagation des vibrations ont une influence sur la variation de la contrainte de cisaillement du fluide. Nous étudions aussi l'influence de l'intensité du champ magnétique ainsi que la vitesse de cisaillement sur la variation des performances de freinage lorsqu'elles sont affectées par des vibrations.

Dans le quatrième chapitre, nous étudions l'influence de la composition des fluides MR. Nous montrons comment certains paramètres de la composition de différents fluides MR ont une influence sur la stabilité du fluide lorsque celui-ci est en présence de vibrations.

Chapitre 1

Les fluides magnéto-rhéologiques

Table des matières

1.1 Les fluides magnéto-rhéologiques : fondamentaux	4
1.1.1 Découverte des effets rhéologiques.....	4
1.1.2 Constitution des fluides magnéto-rhéologiques	5
1.1.3 Structure variable	6
1.1.4 Propriétés contrôlables	7
1.1.5 Les fluides du commerce.....	11
1.2 Les applications des fluides MR	14
1.2.1 Les modes de fonctionnement.....	14
1.2.2 Recherches et Applications	15
1.3 La rhéologie des fluides	21
1.3.1 Définition de la rhéologie.....	21
1.3.2 Les vibrations dans les fluides en suspension	22
1.4 Conclusion.....	29

1.1 Les fluides magnéto-rhéologiques : fondamentaux

1.1.1 Découverte des effets rhéologiques

Les fluides Magnéto-Rhéologiques (MR) ont été découverts il y a moins d'un siècle. L'origine de la découverte est associée à Monsieur Jacob RABINOW en 1949 [1]. Cette découverte est étroitement liée à celle des fluides Electro-Rhéologiques (ER) étudiés par WINSLOW en 1948 [2]. D'un point de vue macroscopique, ces fluides peuvent être décrits comme un fluide dont la caractéristique principale, la viscosité ou encore la contrainte de cisaillement est modifiée par un champ d'origine électrique ou magnétique.

Les deux types de fluides, ER et MR, ont connu une phase de recherche plus intensive à partir des années 1980. La recherche s'est tout d'abord intéressée aux fluides ER pour des applications dans l'automobile et plus particulièrement les suspensions. Les fluides ER ont besoin d'un champ électrique important afin de provoquer un changement de sa viscosité. Pour plus de détails sur les fluides ER, voir les références [3]–[6]. Au fil des années, la recherche s'est tournée vers les fluides MR qui ont une contrainte maximale de cisaillement plus importante et qui ne nécessitent pas de haute tension. Le Tableau 1 compare les caractéristiques et les conditions d'utilisation des fluides MR et des fluides ER.

	MR fluides	ER fluides
Contrainte maximale de cisaillement	50 à 100 kPa	2 à 5 kPa
Champ Maximal	250 kA/m (limité par la saturation)	4 kV/mm (Tension de claquage)
Température d'utilisation	-40 à 150 °C (dépend du fluide porteur)	-20 à + 125 °C (limité par la polarisation)
Effet des impuretés	Non modifié par les impuretés	Sensible aux impuretés
Temps de réponse	Quelques millisecondes (<10 ms)	Quelques millisecondes (<10 ms)
Densité énergétique	100 mJ/cm ³	1 mJ/cm ³
Masse volumique	3000 à 4000 kg/m ³	1000 à 2000 kg/m ³
Demande énergétique	2 à 25 V, 1 à 2 A	2 à 5 kV, 1 à 10 mA

Tableau 1 : Caractéristiques principales des fluides MR et ER [7]–[16].

Si on observe l'évolution du nombre de publications scientifiques sur les fluides ER et MR, on se rend compte qu'on a d'abord une forte croissance des fluides ER jusqu'aux années 2000 où la tendance s'inverse. Le nombre de publications parues dans une tranche de 5 ans est tracé sur la figure pour la période de 1940 à 2015. On remarque aussi l'intérêt plus tardif, mais bien plus rapide des fluides MR.

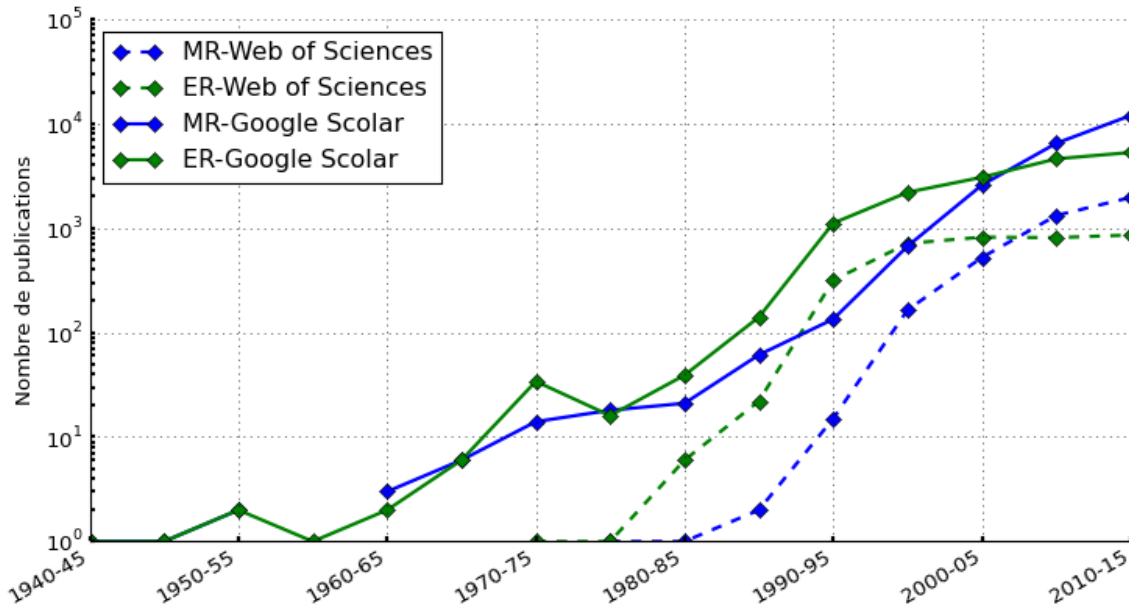


Figure 1 : Représentation de la tendance du nombre de publications cumulées en 5 ans entre 1940 et aujourd'hui suivant 2 sources : Web of sciences et Google Scholar, sur les mots clés suivants : « MagnetoRheological et MagnetoRheologic » ou (exclusif) « electrorheological et electrorheologic ».

Les fluides MR et ER sont des fluides fonctionnant de manière similaire. On retrouvera des comportements similaires tant au niveau des applications qu'au niveau de la physique qui intervient dans le phénomène [17]–[20]. Dans la section suivante, nous nous focaliserons sur les fluides MR.

1.1.2 Constitution des fluides magnéto-rhéologiques

Les fluides MR sont des fluides non homogènes composés d'un fluide porteur et de particules magnétisables en suspension [21], [22]. Le fluide porteur est généralement une huile ou une graisse. Les particules, en proportion volumique comprise entre 20 % et 40 % [11], [23], sont de forme sphérique, de diamètre généralement de l'ordre de 1 à 10 μm (voir Figure 2). Il est possible que des additifs soient ajoutés pour limiter la sédimentation de ces particules [24], [25]. L'association de ces éléments détermine la viscosité intrinsèque du fluide ainsi que sa contrainte de cisaillement [26].

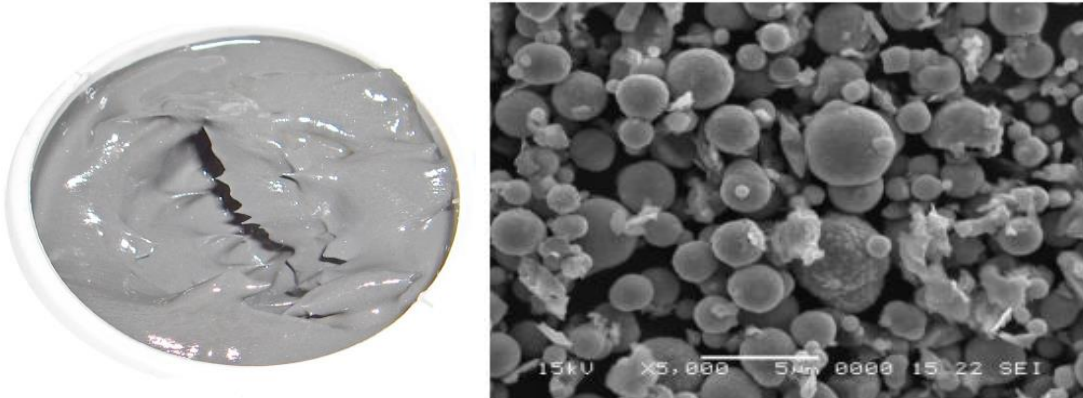


Figure 2 : images représentant des particules vues par microscopie électronique à balayage [24] et en représentation macro [27].

1.1.3 Structure variable

On peut se demander ce qui différencie ce fluide d'un autre. Il y a deux aspects à prendre en compte. Tout d'abord, le fait que les particules ferreuses soient suffisamment petites leur permet d'avoir un certain degré de liberté dans le fluide afin d'être assujetties au mouvement imposé par le fluide et au mouvement Brownien [28].

Ensuite, sous l'action du champ magnétique, les particules en suspension se polarisent. Les interactions dipôles-dipôles des particules induisent un arrangement ordonné des particules suite à leur mouvement dans le fluide. Lorsque le fluide est entre 2 plaques faisant office de pôles magnétiques opposés, les particules vont former une structure sous forme de chaînes le long du champ magnétique entre ces 2 pôles. C'est ce que l'on peut observer dans les illustrations suivantes des Figure 3 et Figure 4.

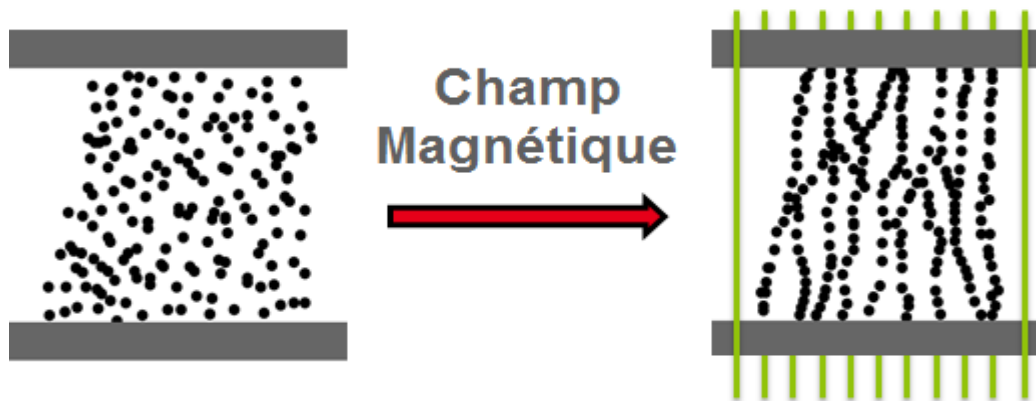


Figure 3 : Représentation schématique de la modification de la structure des particules en fonction du champ magnétique.

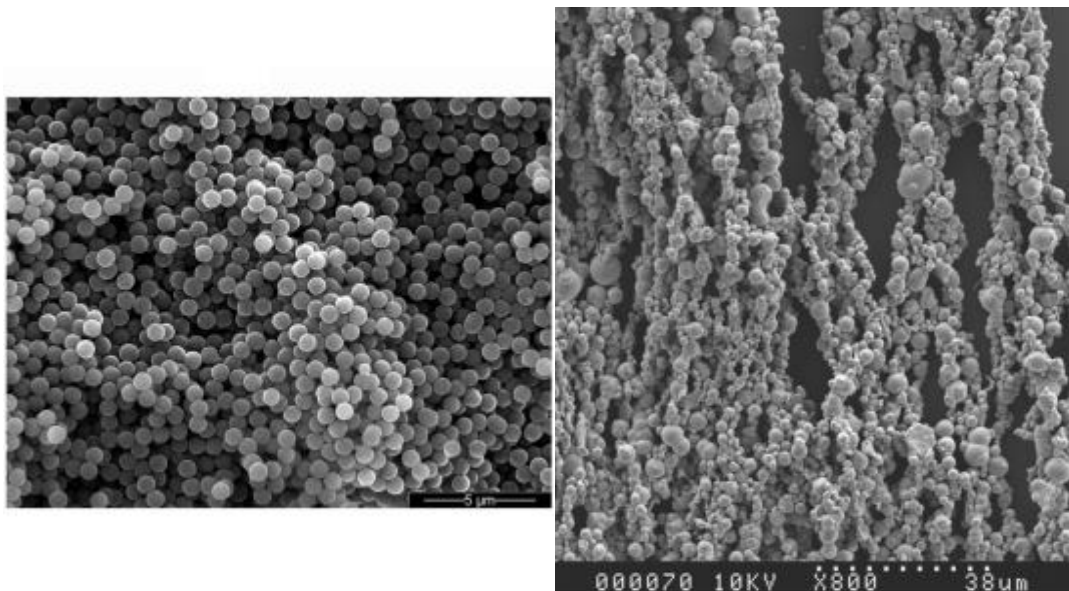


Figure 4 : Microscopie électronique à balayage de fluides MR sans champ magnétique (gauche) [29] et avec un champ magnétique (droite) [30]. Les fluides dans les deux images sont différents.

Du fait de la polarisation des particules, le matériau réagit comme un matériau magnétique. Il est donc possible de le caractériser avec une courbe d'induction. On représente dans la Figure 5 la courbe d'induction d'un fluide MR et celle d'un fer doux.

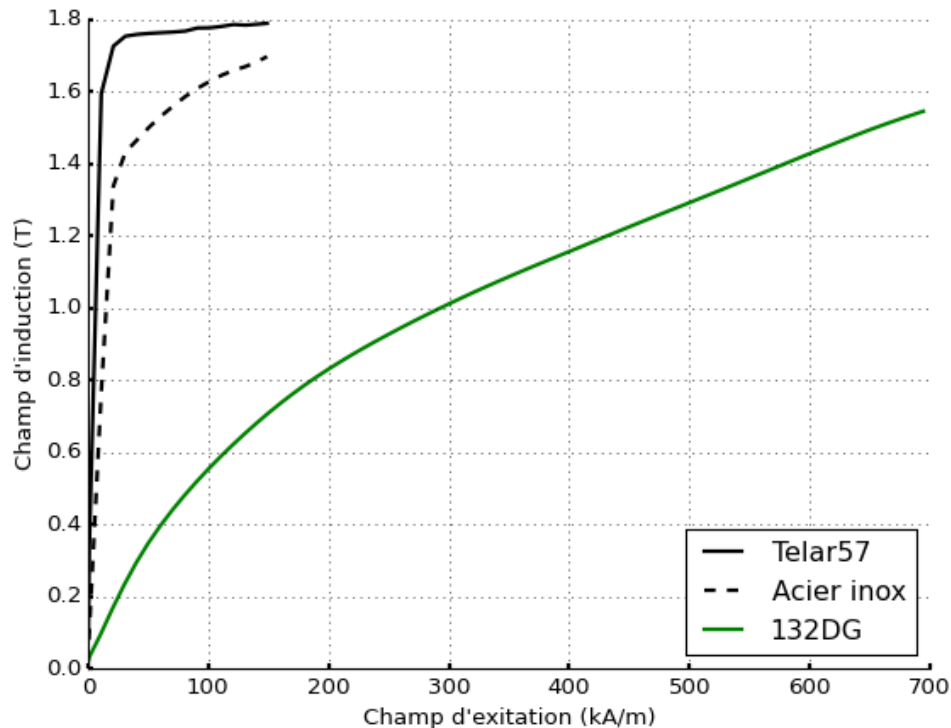


Figure 5 : Courbes d'induction pour le fluide 132DG produit par LORD [31] ainsi que pour celle du Telar 57 (fer pur) et de l'acier inoxydable [32].

1.1.4 Propriétés contrôlables

Les interactions entre les particules forment une force de cohésion entre les particules d'une même chaîne. L'accumulation de ces efforts de cohésion se retrouve dans le comportement macroscopique du fluide. Le fluide passe d'un état assimilé à un liquide à un état se rapprochant du solide.

Pour caractériser le fluide MR suivant le champ magnétique, on utilise la contrainte de cisaillement du fluide. La contrainte va augmenter avec le champ magnétique appliqué au fluide. Chaque fluide a ses propres caractéristiques comme tous matériaux en fonction de la composition de celui-ci. Dans la Figure 6, on montre le comportement du fluide 132DG produit par LORD. Cette figure présente l'évolution de la contrainte en fonction du champ magnétique. On observe une augmentation linéaire de la contrainte de cisaillement à faible champ. Celle-ci s'atténue progressivement à plus fort champ magnétique.

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

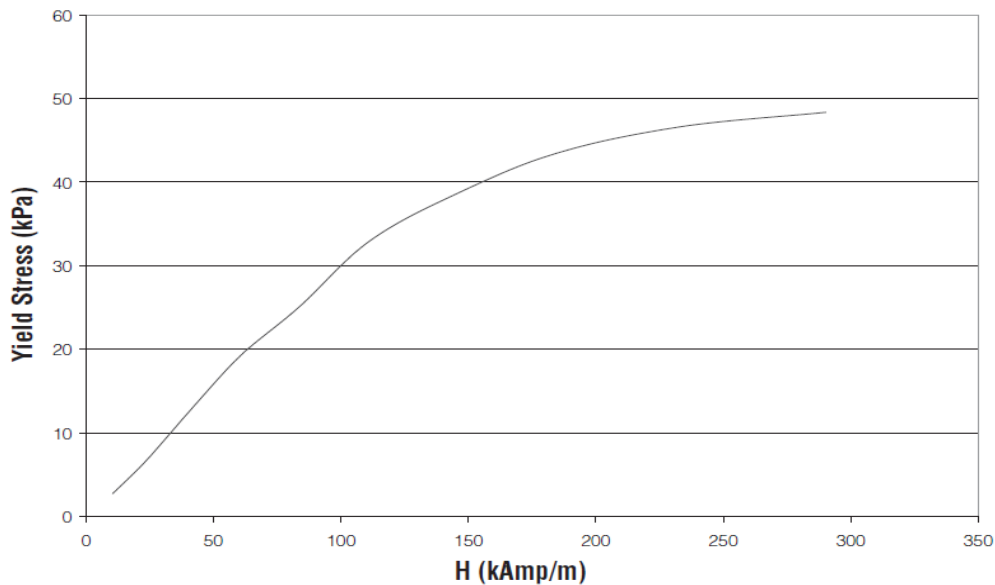


Figure 6 : Contrainte de cisaillement en fonction du champ d'excitation H pour le fluide 132DG produit par LORD [31].

Le fluide MR est constitué d'un liquide porteur qui peut être de l'huile, de l'eau ou une huile silicone. Ce fluide porteur va définir la viscosité du fluide. Un modèle représentant cette dualité de propriétés du fluide, dans un régime établi, est le modèle de Bingham présenté par Philips en 1969 [8] associé à l'équation suivante.

$$\begin{aligned} \tau &= \text{sig}(\dot{\gamma}) \cdot \tau_H + \dot{\gamma} \cdot \eta & \text{pour } |\tau| > \tau_H \\ \dot{\gamma} &= 0 & \text{pour } |\tau| \leq \tau_H \end{aligned} \quad (1)$$

Avec τ , la contrainte de cisaillement total, $\text{sig}(\dot{\gamma}) \cdot \tau_H$ celle relative au champ magnétique induit dans le fluide, $\dot{\gamma}$ la vitesse de cisaillement et η la viscosité.

L'équation (1) est représentée par la Figure 7, l'évolution de la contrainte τ est tracée en fonction de la vitesse de cisaillement et du champ magnétique. On comprend donc que le fluide va avoir une contrainte de cisaillement d'autant plus importante que le champ magnétique, tout en respectant les propriétés intrinsèques du matériau. On peut donc voir un effet de palier introduit par le champ magnétique. C'est la variation de ce palier qui permet le contrôle du fluide et donc des performances associées à l'application désirée.

Ce modèle a la particularité de séparer les effets liés au champ magnétique tout comme ceux liés à la vitesse de cisaillement. Ce modèle représente une première approche simplifiée du comportement du fluide. Or ce fluide réagit de manière plus complexe. Lors du cisaillement des particules, avant la rupture des chaînes, on pourra noter un comportement dû aux efforts de cohésion des particules, le pre-yield survenant avant le régime établi, représenté dans la Figure 8 [19], [33]–[36].

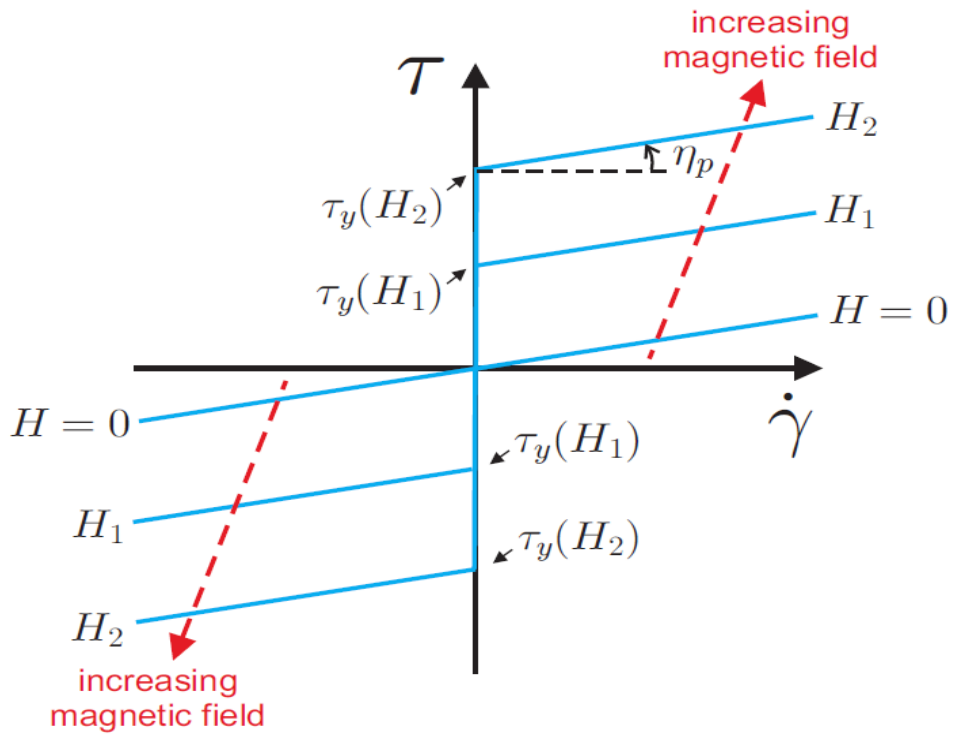


Figure 7 : Modèle de Bingham : Contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement, concernant les fluides MR pour 3 champs magnétiques $H_2 > H_1 > H$ [37].

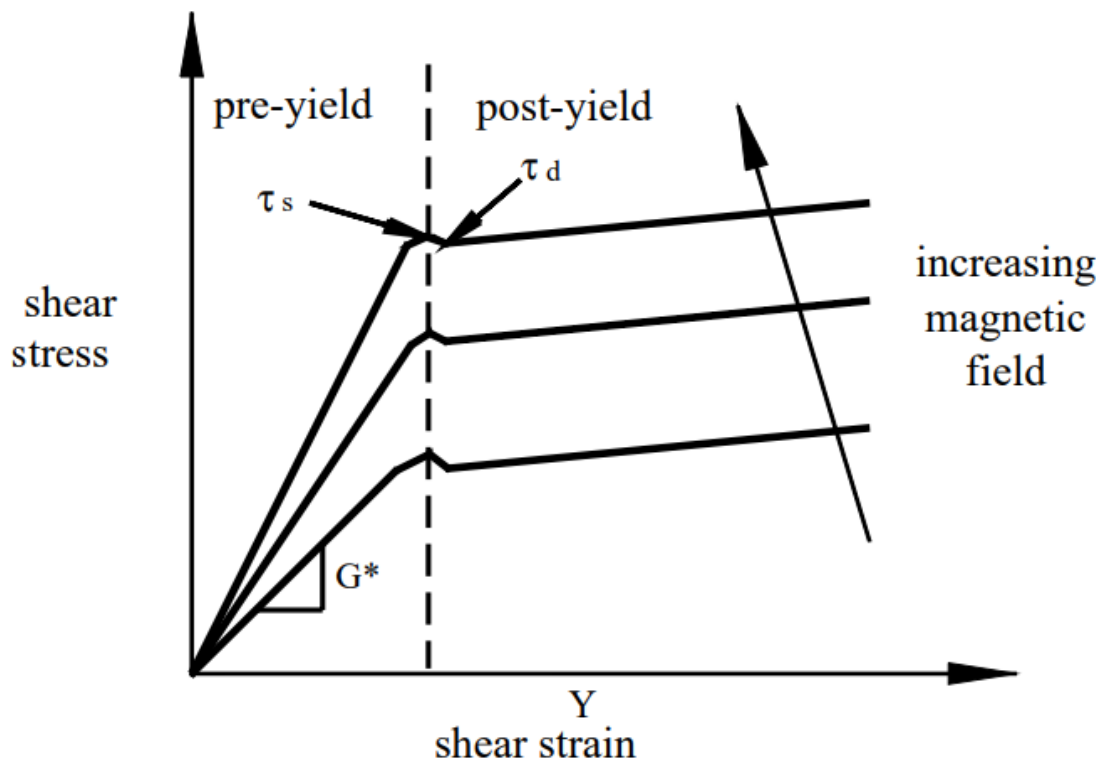


Figure 8 : Représentation de la contrainte de cisaillement en fonction du cisaillement [33].

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

D'autres modèles ont été proposés pour se rapprocher du comportement réel du fluide. En fonction des applications que l'on souhaite développer, le modèle du fluide peut être affiné [36], [38]–[44]. Ces modèles sont basés sur l'étude de l'écoulement des fluides, la rhéologie. Le modèle de Herschel-Bulkley, représenté en vert dans la Figure 9, étend le modèle de Bingham pour décrire de manière plus fine l'écoulement par un indice de fluidité en exposant de la vitesse de cisaillement comme représenté dans l'équation suivante :

$$\tau = \text{sig}(\gamma) \cdot \tau_H + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Avec k l'indice de consistance (pour $|\tau| \leq \tau_H$ le liquide se comporte comme un solide) et n l'indice de fluidité qui caractérise si le fluide est rhéo-fluidifiant ou rhéo-épaississant.

Le modèle de Casson, représenté en bleu, prend un autre point de vue avec non pas la viscosité plastique, mais la viscosité dynamique [45] comme représentée dans l'équation suivante :

$$\tau^{0.5} = \text{sig}(\gamma) \cdot \tau_H^{0.5} + (\eta \cdot \dot{\gamma})^{0.5} \quad (3)$$

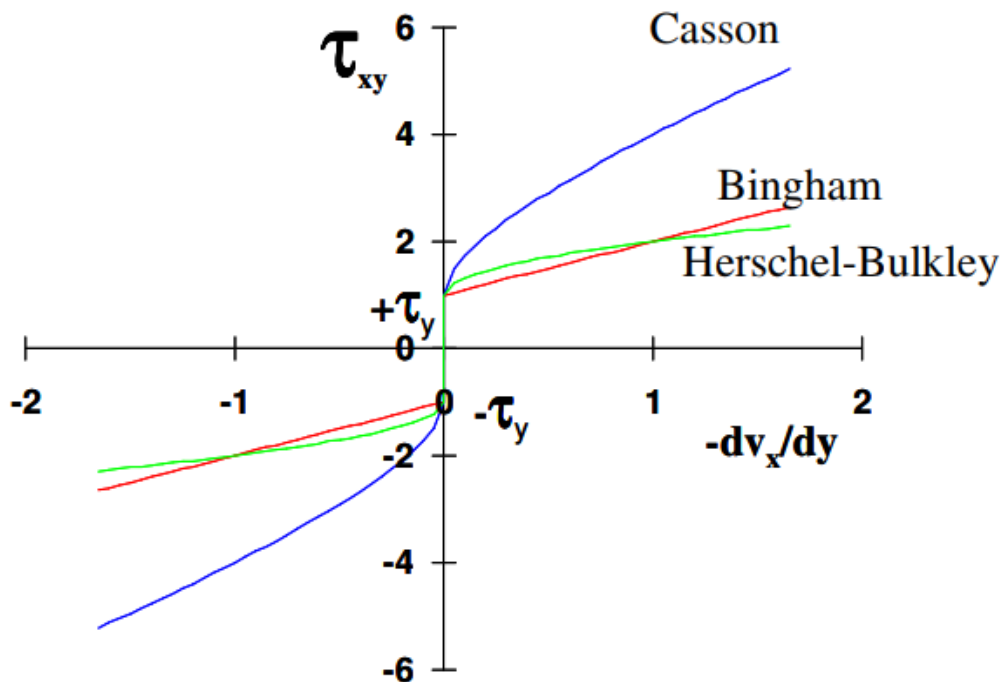


Figure 9 : Modèle de fluides rhéologiques, applicables dans le cas des fluides MR. Représentation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement dans le cas de 3 modèles couramment utilisés. Tiré de [46].
 τ_{xy} Représente ici la contrainte du fluide et $-dv_x/dy$ représente la vitesse de cisaillement.

1.1.5 Les fluides du commerce

Dans le commerce, il existe différents fluides. On note principalement les entreprises LORD, Liquids Research, Asurus Mr Tech (AMT). Dans cette section, nous résumerons leurs caractéristiques.

La Figure 10 présente les courbes d'induction de chaque fluide. Trois fournisseurs y sont représentés. Les fluides LORD sont nommés en fonction de leur densité de particules : le fluide 140CG en ayant le plus : 85,44 % massique, suivi du 132 DG (80,98 %) et enfin le 122EG (72 %) qui en présente le moins. Les fluides fournis par Liquids Research : le MRHCCS4-A et le MRHCCS4-B sont à la fois classés par leur pourcentage massique de particules ainsi que par la viscosité du fluide porteur. On y remarque dans le cas des fluides LORD et ceux de Liquids Research que plus il y a de particules dans le fluide plus il y a une forte induction du fluide. On remarque sur la courbe d'induction que les fluides MRHCCS4-A et 122 EG sont comparables, leurs densités de particules sont proches respectivement 72 et 70 % de masse. Le fluide conçu par AMT, SMARTEC+, a un comportement différent des autres fluides. On peut supposer que celui-ci a plus de particules que les autres fluides du fait de son rapprochement avec le fer doux magnétisable, le Telar 57 d'ARMCO par exemple.

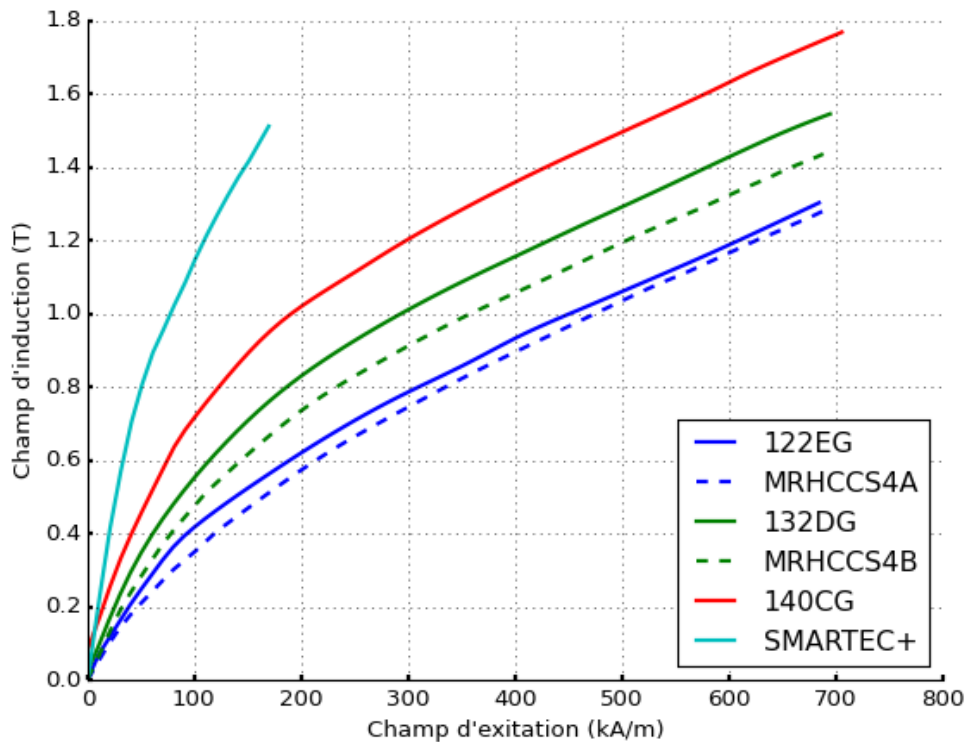


Figure 10 : Courbes d'induction pour différents fluides du commerce.

Il existe deux manières pour représenter les fluides MR. La première est de les considérer comme des matériaux solides avec une contrainte de cisaillement spécifique évoluant selon le modèle de Bingham présenté en équation (1). La seconde est de considérer les fluides MR comme un fluide avec une viscosité intrinsèque. Cette viscosité, aussi appelée viscosité apparente du fluide, résulte d'une action conjointe entre le champ magnétique et une vitesse de cisaillement.

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

La première méthode de représentation a été choisie par LORD et AMT pour la caractérisation de leurs fluides, représentés en Figure 11 et Figure 12. Nous constatons que la contrainte de cisaillement croît avec le pourcentage de particules. Cependant, la viscosité du fluide s'en retrouve aussi accrue, elle dépend aussi du fluide porteur et du pourcentage de particules à l'intérieur. En fonction des applications visées, il est possible de devoir faire des compromis entre la viscosité du fluide et la contrainte maximale que l'on peut obtenir.

La seconde méthode de représentation est utilisée par Liquids Research (pour le cas du fluide MRHCCS4-B en Figure 13). On retrouve les mêmes tendances que dans la méthode précédente : plus le champ magnétique est important plus la viscosité apparente, et donc la contrainte de cisaillement, est grande.

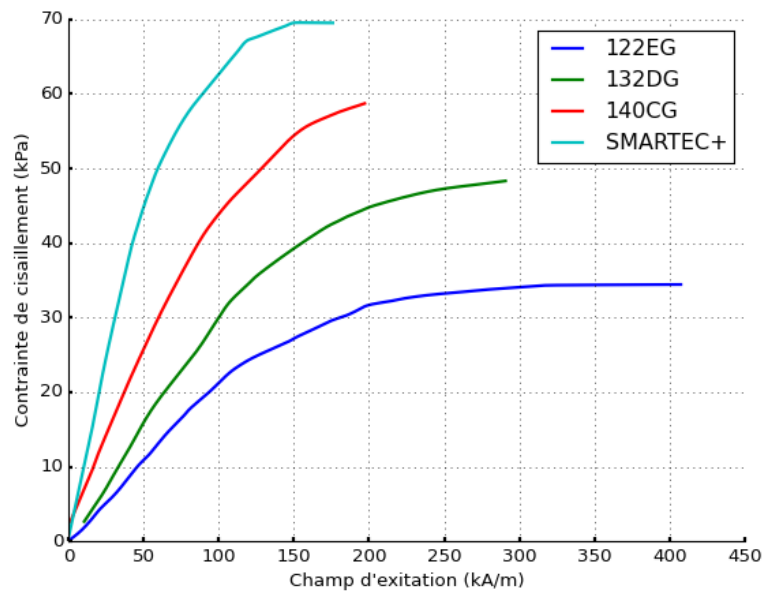


Figure 11 : Contrainte de cisaillement en fonction du champ magnétique pour les fluides commerciaux.

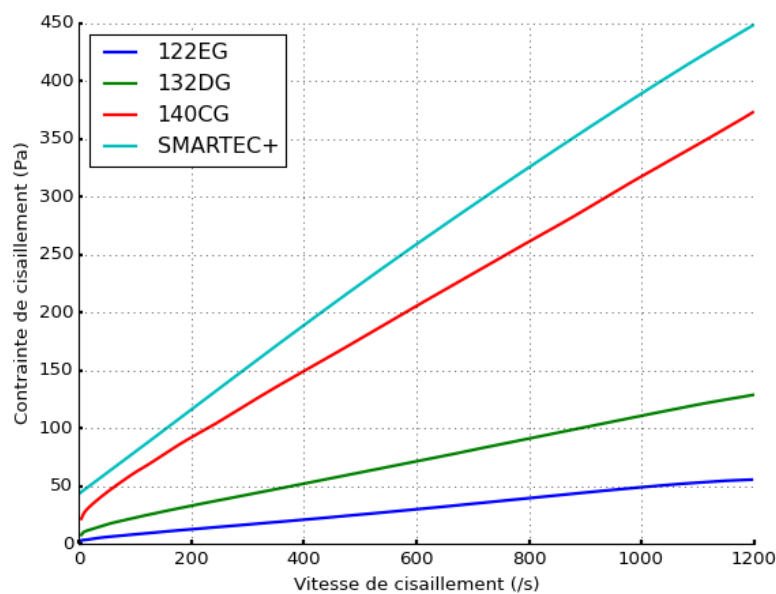


Figure 12 : Contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement.

Dans le cadre de cette thèse, nous considérons que les fluides MR ont une contrainte définie. On dira donc que la viscosité du fluide est donc sujette à la contrainte, l'équation (4) permet de faire le lien entre la viscosité et la contrainte de cisaillement du fluide :

$$\tau = \dot{\gamma} * \eta \tag{4}$$

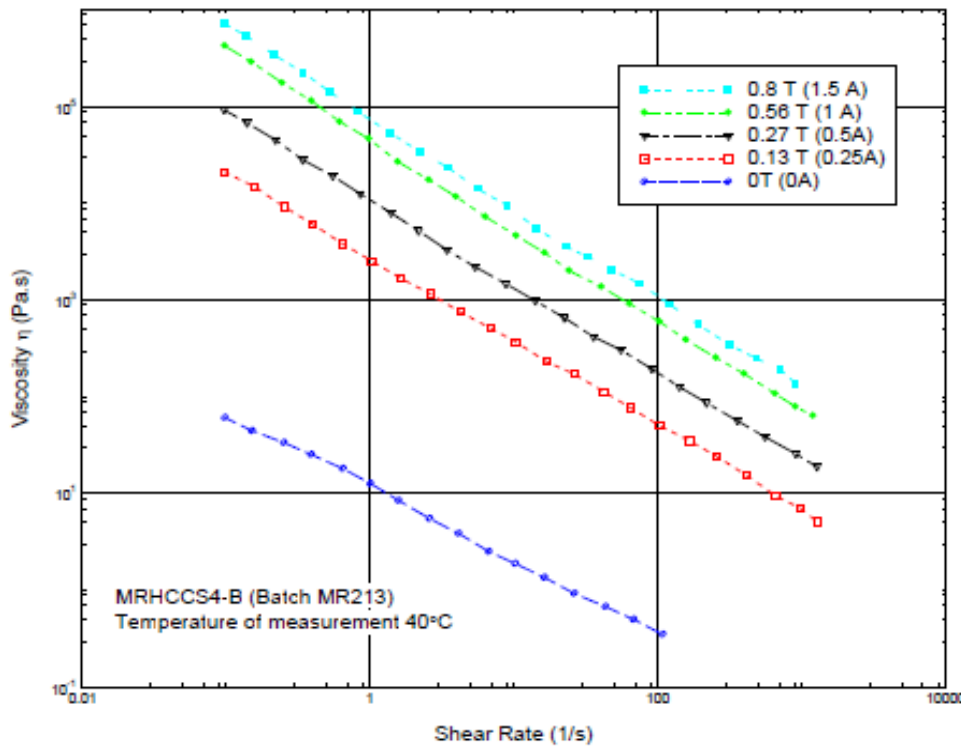


Figure 13 : Viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour différents courants dans la bobine (champ magnétique). Données constructeur Liquids Research.

On ne comparera pas directement les données constructeur des fluides Liquids Research avec les autres fluides provenant de LORD et de AMT, bien que l'équation (4) le permettrait du fait que l'on ne connaît pas les conditions des expériences ni les méthodes de mesure. Les caractéristiques des fluides du commerce sont résumées dans le Tableau 2 :

	140CG	132 DG	122EG	MRHCCS4-A	MRHCCS4-B	SMARTEC+
Fournisseur	LORD	LORD	LORD	Liquid Research	Liquid Research	AMT
Masse volumique (g/cm ³)	3,64	3,05	2,38	2,49	3,08	2,9
Viscosité (Pa s)	0,280	0,112	0,042	0,17	0,24	0,37
% massique de particules	85,44	80,98	72	70	80	N/C
Contrainte (kPa) à 140 kA/m	52	39	26	N/C	N/C	69

Tableau 2 : Caractéristiques disponibles pour les différents fluides MR [47]. N/C : non communiqué.

1.2 Les applications des fluides magnéto-rhéologique

Dans la partie précédente, nous avons introduit le principe de fonctionnement des fluides MR qui sont composés de particules en suspension permettant une modification de sa structure en fonction du champ magnétique. Nous avons décrit que cette modification est contrôlable et résulte en des variations de propriété du fluide. Enfin, nous avons présenté différents types de fluides MR. Dans cette section nous allons présenter comment ces fluides sont utilisés et mis en œuvre. Dans un premier temps, on verra les modes d'utilisation courant du fluide, puis leurs applications [48].

1.2.1 Les modes de fonctionnement

Une grande majorité des applications liées aux fluides utilisent un des trois modes principaux des fluides MR : valve, cisaillement et compression [49], [50]. Pour décrire ces trois modes, on considère deux pôles magnétiques opposés séparés par du fluide MR.

Le premier mode est le mode valve représenté en Figure 14 (a). Dans ce mode, un écoulement du fluide entre les deux pôles est régulé par le champ magnétique [51]–[54].

Le second mode est le mode cisaillement représenté en Figure 14 (b). Dans ce mode, un des pôles est mobile par rapport au second tout en conservant l'écartement entre les deux pôles magnétiques. Ce mouvement relatif va cisailer le fluide résultant en une force de résistance dépendant du champ magnétique [55]–[58].

Dans le mode compression, on règle l'écartement entre les pôles magnétiques. De cette compression, ou extension, le fluide s'oppose au mouvement avec une force variable grâce au champ magnétique [59]–[63].

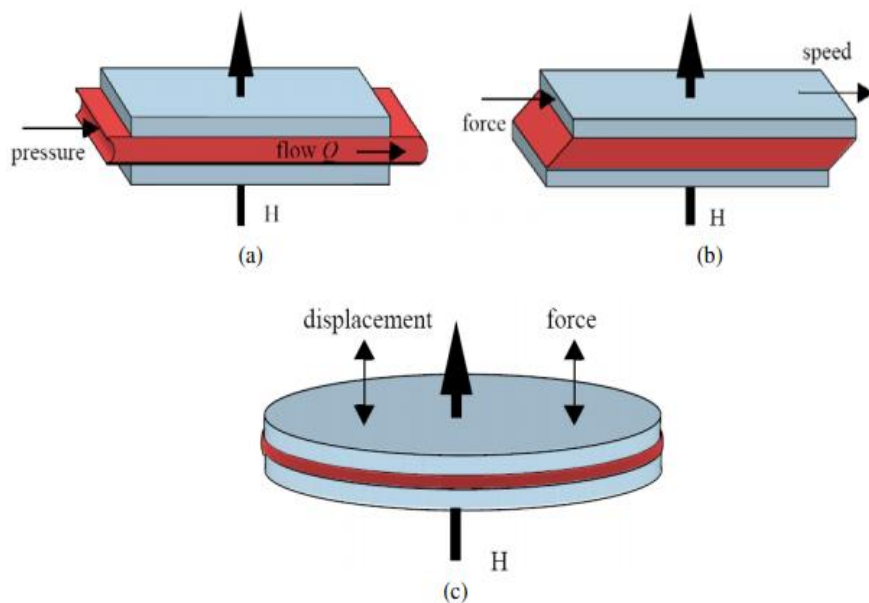


Figure 14 : Modes principaux d'utilisations des fluides MR. a) mode valve, b) mode cisaillement, c) mode compression. [38].

1.2.2 Recherches et Applications

Au cours de ces dernières années, différents travaux de recherche ont approfondi les connaissances liées aux fluides. Des modèles microscopiques représentant les efforts intraparticulaires peuvent être comparés dans des conditions bien spécifiques aux modèles macroscopiques [38], [64]–[67]. Cependant, une généralisation et une fusion des deux approches ne sont pas encore possibles [68].

La littérature aborde aussi les désavantages du fluide. La durabilité du fluide est étudiée sous plusieurs aspects, les particules : sédimentation [69], [70], l'état de surface [71], [72], l'impact de l'environnement extérieur : la corrosion des particules [73], [74], la température [75]–[77].

Pour améliorer les performances des fluides MR dans leur cadre d'utilisation, plusieurs stratégies sont adoptées. Il est possible de modifier et d'optimiser les proportions de particules dans le fluide pour obtenir les caractéristiques souhaitées. L'optimisation ne s'arrête pas là, l'ajout de particules de tailles diverses, l'ajout de fibre dans le fluide et entre autres la porosité et les formes des particules sont capables d'influencer la contrainte de cisaillement fournie par le fluide [30], [72], [78]–[83].

L'optimisation du circuit magnétique a aussi un fort impact sur les performances. Il permet de guider le champ magnétique dans le fluide. La Figure 15 représente les configurations les plus communes pour le mode cisaillement [84]. Ces configurations rotatives utilisent des surfaces différentes pour effectuer le cisaillement des fluides. La surface utile de la configuration 1 est perpendiculaire à l'axe de rotation pour utiliser la grande surface et celle des configurations 2 à 4 sont parallèles à l'axe de rotation pour profiter d'un bras de levier important. L'intérêt des configurations mécaniques 1 et 2 est le cisaillement du fluide de chaque côté de l'élément tournant permettant ainsi d'augmenter le couple induit par le champ magnétique. Nous porterons une attention particulière dans le cadre de ces travaux de thèse à la configuration 2 dans laquelle l'axe de rotation de l'élément tournant ne fait pas partie intégrante du circuit magnétique (configurations 3 et 4) ni est encapsulé par celui-ci (configuration 1).

Dans la littérature, quelques travaux dressent l'optimisation de ces configurations en optimisant le champ magnétique (voir Figure 16) [122] –[124], la configuration mécanique [88]–[90] ou le fait d'utiliser plusieurs modes en même temps [91]–[94].

Une autre manière d'effectuer une amélioration est d'optimiser la commande et le contrôle du dispositif MR [95]–[97].

Dans la littérature, un certain nombre de travaux étudie l'atténuation des vibrations sous différentes formes : une amplitude d'excitation [98]–[101] ou en tant qu'atténuation de l'onde acoustique [102]–[104]. Des domaines tels que la tectonique terrestre [105], le stockage d'énergie [106], l'haptique [107], [108] font aussi partie des recherches en cours sur les applications du fluide MR.

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

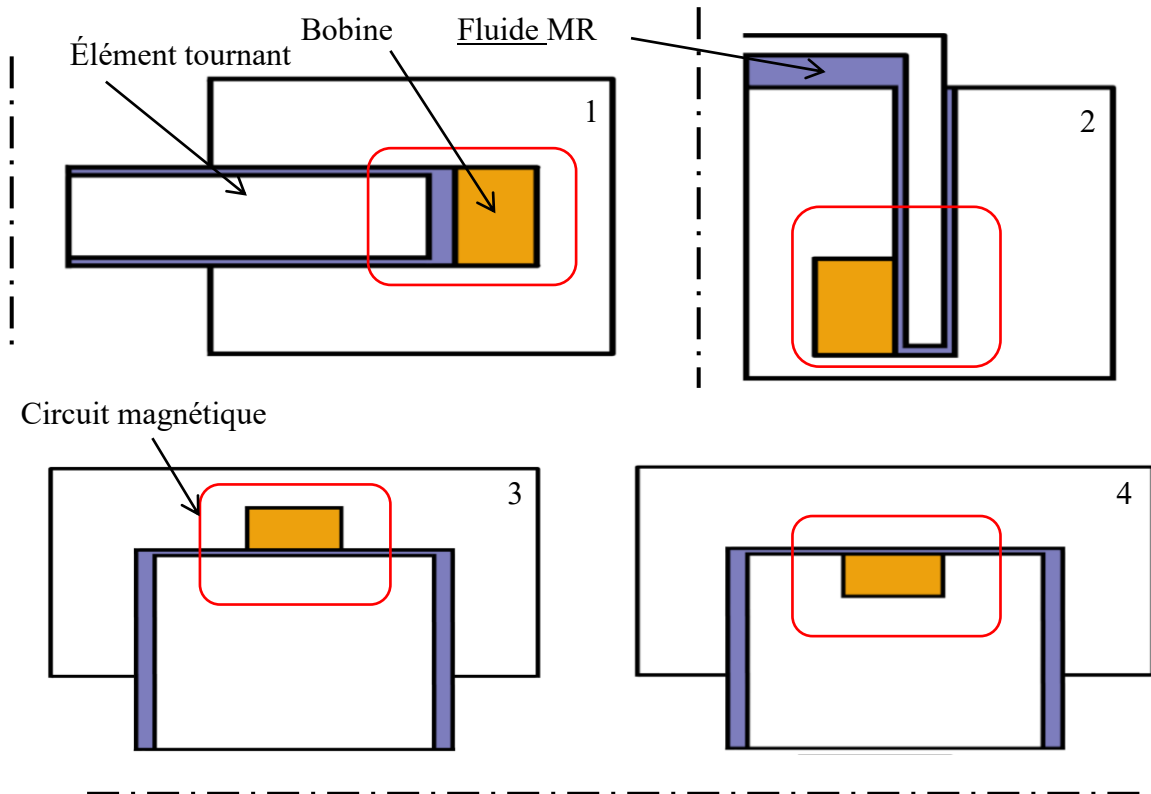


Figure 15 : Configurations principales utilisant le mode cisaillement.
En 1 : Disque. En 2 : Cloche. En 3 et 4 : Tambours.

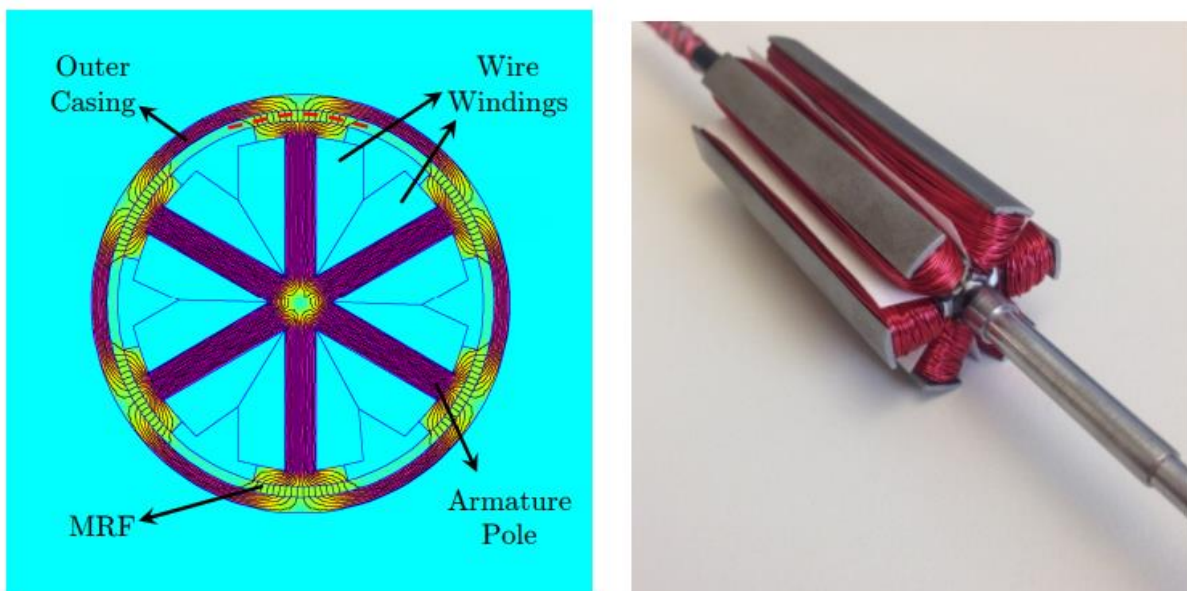


Figure 16 : Optimisation du champ magnétique et de la structure pour une application haptique [85].

Les modes que l'on a présentés dans la partie précédente sont utilisés soit de manière simple soit en combinant plusieurs modes [109] dans de nombreuses applications. On relève ici, certains domaines majeurs d'applications.

Les fluides MR sont utilisés dans les moyens transports. On notera principalement le domaine automobile en tant qu'amortisseur pour le véhicule ou pour le siège du conducteur de poids lourd [22], [110]–[113]. Cependant, des applications existent aussi dans le transport ferroviaire [114] et l'aviation [115]. Ces amortisseurs utilisent dans la plupart des cas le mode valve.

L'utilisation des fluides MR en tant qu'amortisseur ne se limite pas au domaine du transport. De nombreuses applications utilisent les fluides MR pour atténuer les vibrations, en particulier celles sismiques [95], [98], [116], [117]. Ces amortisseurs fonctionnent généralement en régulant le flux, de manière active par une bobine, du fluide MR entre les deux chambres de l'amortisseur.



Figure 17 : Installation d'amortisseur avec du fluide MR sur le pont du lac de Dongting en Chine, adapté de [117].

Les dispositifs utilisant le mode de cisaillement sont grandement utilisés en haptique, permettant un ressenti tactile de l'utilisateur. Plus particulièrement, l'haptique est utilisé dans le domaine de la réalité virtuelle. Ces dispositifs vont servir d'interface entre l'utilisateur et un monde virtuel. Cette interaction tactile permet un rendu fidèle de l'interaction et permet donc une meilleure immersion dans l'environnement virtuelle ainsi qu'une maîtrise plus fine lors de l'interaction de l'utilisateur dans cet espace.

On remarque deux types d'interfaces haptiques, les interfaces passives et celles actives. Les interfaces passives ont la particularité d'interagir avec l'action que l'utilisateur impose. Elles ont pour principe de dissiper l'énergie d'interaction apportée par l'utilisateur, il est possible de simuler le toucher d'une touche de piano (voir Figure 18). L'interaction avec le fluide s'effectue sous forme d'un élément cisailant linéaire. Cette interface passive permet aux pianos électriques de se rapprocher, dans le sens du toucher, aux pianos acoustiques traditionnels.

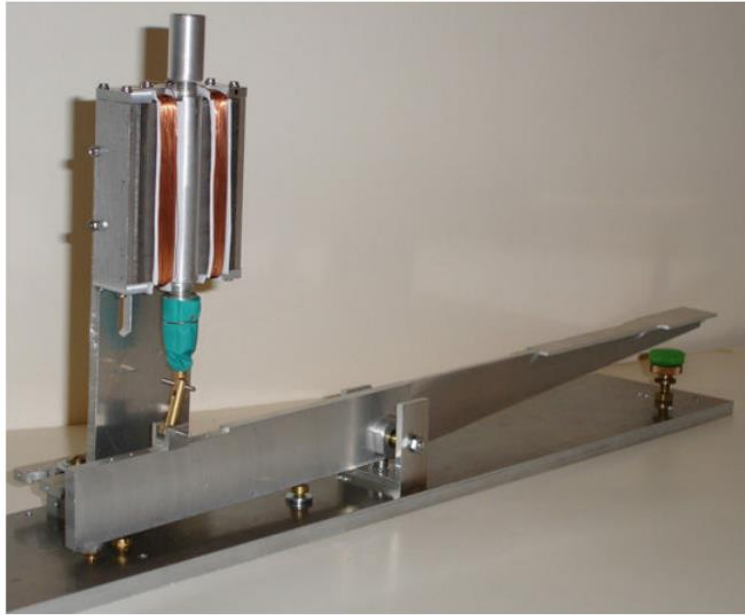


Figure 18 : Interface haptique pour une seule touche de piano [118].

Les interfaces haptiques actives permettent d'apporter de l'énergie dans l'interaction avec l'utilisateur en plus de pouvoir dissiper celle-ci [119]. Le MATISS (voir Figure 19) est une interface homme/machine dont l'interaction est sous une forme d'un bouton rotatif reprogrammable. Il est composé d'un frein MR et d'un moteur électromagnétique. Le fluide du frein MR est cisailé par un élément cylindrique. Le MATISS permet de créer des patterns haptiques actifs et passifs. Ces patterns sont perceptibles et adaptés à l'interaction haptique.



Figure 19 : Interface haptique hybride (frein MR+moteur), MATISS développée par le CEA LIST.

Le ressenti avec une interface utilisateur trouve de nombreuses applications dans le domaine de la Réalité virtuelle. Dans ce cas, les fluides MR intégrés dans un gant (voir Figure 20) permettent de percevoir le contact ou la manipulation, suivant les applications, aussi bien des petites surfaces que des grandes [120]–[124].

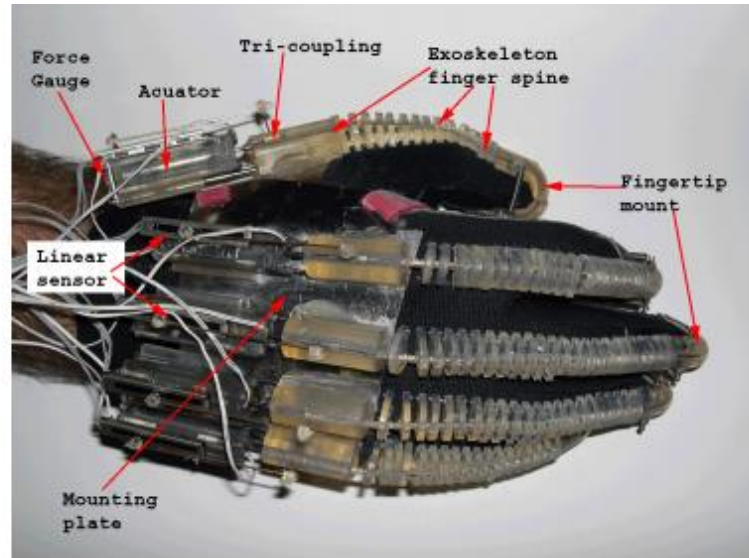


Figure 20 : Gant haptique MRAGES (Magneto-Rheological Actuated Glove Electronic system) [124].

Ces interactions avec un utilisateur ont permis de nouvelles applications dans le domaine médical émergent basées sur le principe des fluides MR. Il est possible de créer des prothèses (voir Figure 21) et des moyens de rééducations orthopédiques [125]–[128]. Ces applications vont pouvoir être adaptées à chaque personne grâce à la contrôlabilité du fluide. Et de ce fait, permettre une meilleure prise en charge du patient en mettant en place une courbe de rééducation plus personnalisée ainsi qu'un meilleur suivi de l'évolution de la pathologie [129], [130].

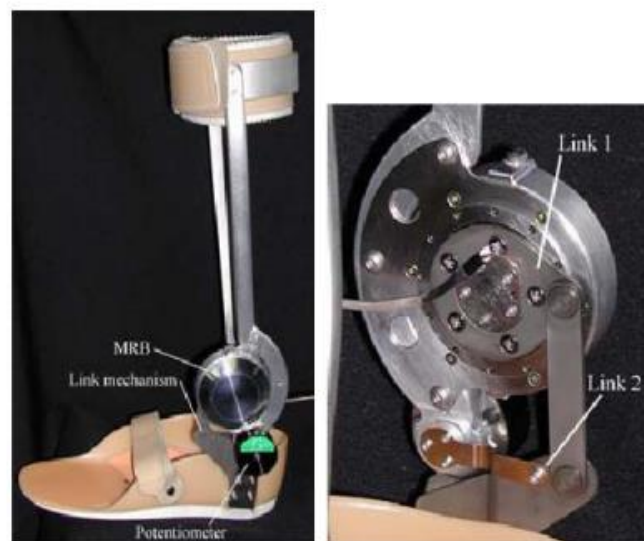


Figure 21 : Prothèse orthopédique pour une cheville [90].

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

Dans le cas de la chirurgie assistée par robot (voir Figure 22), l'apport que fournit le fluide MR est la liaison entre ce que voit l'opérateur et ce qu'il ressent par l'intermédiaire de l'interface utilisateur [131]–[133].

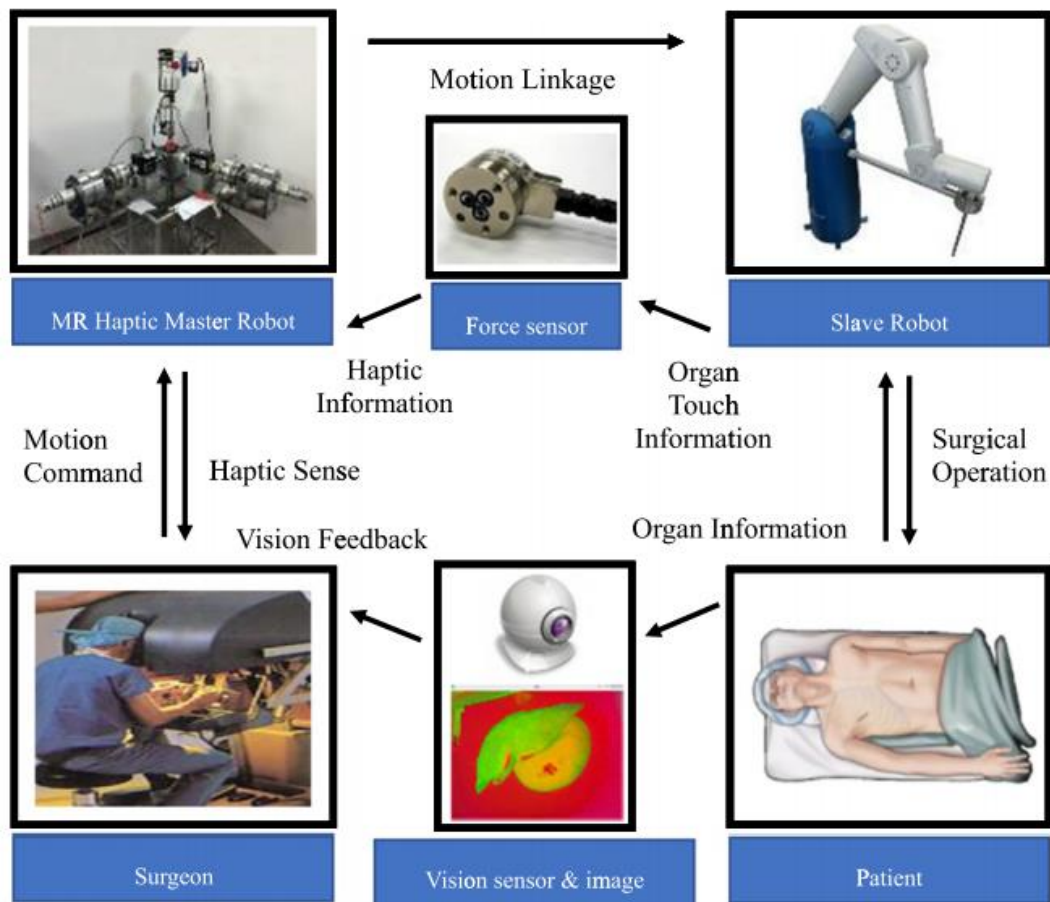


Figure 22 : Schéma de fonctionnement du RMIS (Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery) avec une interface haptique utilisant du fluide MR et du traitement d'image [133].

Dans d'autres domaines industriels très variés, le fluide MR est utilisé pour le polissage et le ponçage de matériaux (voir Figure 23) [134]–[138].

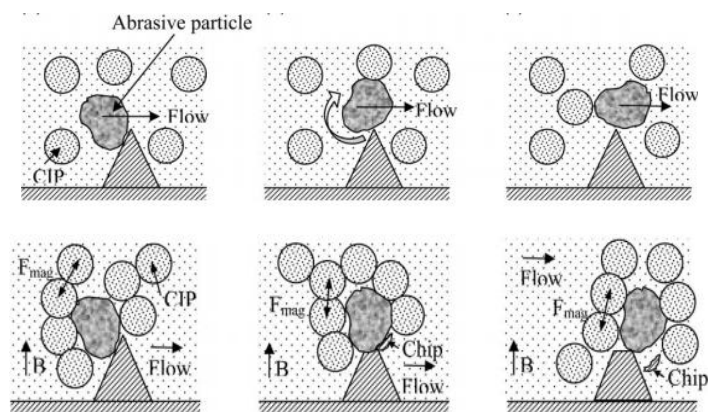


Figure 23 : Ponçage par flux abrasif magnéto-rhéologique, en haut sans champ magnétique, en bas avec champ magnétique adapté de [137].

1.3 La rhéologie des fluides

On parle dans les parties précédentes du fluide Magnéto-Rhéologique, on peut toutefois s’attarder sur la décomposition du mot. La première partie fait référence au champ magnétique et du fait que les propriétés du fluide sont dépendantes de celui-ci. La seconde partie est le mot rhéologique que nous présenterons plus en détail dans cette partie.

1.3.1 Définition de la rhéologie

La rhéologie est l’étude de l’écoulement de matière ayant pour condition de ne pas avoir d’élasticité. Ce domaine fait le lien entre l’étude des solides et l’étude des liquides. Le Tableau 3 représente comment se situe la rhéologie dans les sciences. La frontière entre un liquide et un solide est chose complexe à définir. La Société de Rhéologie Internationale a pour sigle un sablier dont le texte en grec signifie « tout s’écoule » ce qui montre cette sinueuse distinction. Le nombre de Deborah est un nombre adimensionnel caractérisant l’écoulement en fonction du temps d’observation [139], [140].

<u>Mécanique des milieux continus</u>			
Étude de la physique des matériaux continus			
<u>Mécanique du solide</u>		<u>Mécanique des fluides</u>	
Étude de la physique des matériaux continus ayant une forme stable au repos.		Étude des matériaux continus se déformant lorsqu’ils sont soumis à une force.	
<u>Élasticité</u> Décrit les matériaux reprenant leurs formes initiales suite à une relaxation de la contrainte.	<u>Plasticité</u> Décrit la déformation prenante des matériaux après une contrainte appliquée définie.	<u>Non newtonien</u> Les fluides n’ont pas une vitesse de déformation proportionnelle à la contrainte de cisaillement appliquée.	<u>Newtonien</u> La vitesse de cisaillement est proportionnelle à la vitesse de déformation appliquée.
<u>Rhéologie</u> L’étude des matériaux à la fois solides et liquides			

Tableau 3 : Domaine d’étude de la rhéologie adaptée de [141].

On parle donc du fluide MR en tant que fluide rhéologique du fait de ses propriétés qui ne sont pas « classiques » dans le sens newtonien du terme. On distingue 2 différences notoires entre le fluide newtonien et le fluide MR : son comportement macro du au champ magnétique, et son comportement microscopique avec la présence d’agglomérats dans le fluide. Les fluides MR présentent un comportement complexe qui dépend à la fois du champ magnétique et de la vitesse de cisaillement.

1.3.2 Les vibrations dans les fluides en suspension

1.3.2.1 Cas particulier : le béton

D'autres fluides de par leurs compositions peuvent se rapprocher du fluide MR. On nommera le béton, les suspensions de Laponite [142], et les pâtes de ciment [143]. Tous ces fluides sont des liquides rhéologiques ayant des particules en suspension. Leurs comportements peuvent être modélisés par la loi de Bingham représentée en équation (1) [144], [145].

Dans plusieurs études sur le béton (pâte de ciment) [146], [147] il a été observé, à faible cisaillement, une diminution immédiate de la contrainte de cisaillement dans le cas de la présence de vibrations (<100 Hz).

Plus précisément dans le cas d'une vibration localisée [148], [149], le béton n'est plus caractérisable par la loi de Bingham, mais par une loi en puissance comme on peut le remarquer sur la Figure 24. Il est possible de remarquer en plus du changement de comportement une diminution du couple nécessaire au cisaillement soit donc une diminution de la contrainte de cisaillement du fluide. La condition pour avoir ces résultats est une vitesse de cisaillement faible, inférieure à 2 tr/s. De plus dans le cas de très faible vitesse de cisaillement, la pâte de ciment a tendance à se comporter comme un fluide newtonien. Il a été aussi remarqué que l'amplitude de vibrations favorise la diminution de la contrainte de cisaillement. En s'éloignant de la source vibrante, il n'y a pas de discontinuité dans les propriétés du fluide, celui-ci retrouve ses caractéristiques.

D'autre part, il a été observé que les vibrations entraînent la formation d'une gaine autour des particules évitant les agglomérats ainsi que favorisait une sédimentation plus rapide des particules dans le fluide, impact croissant avec la masse de la particule [153].

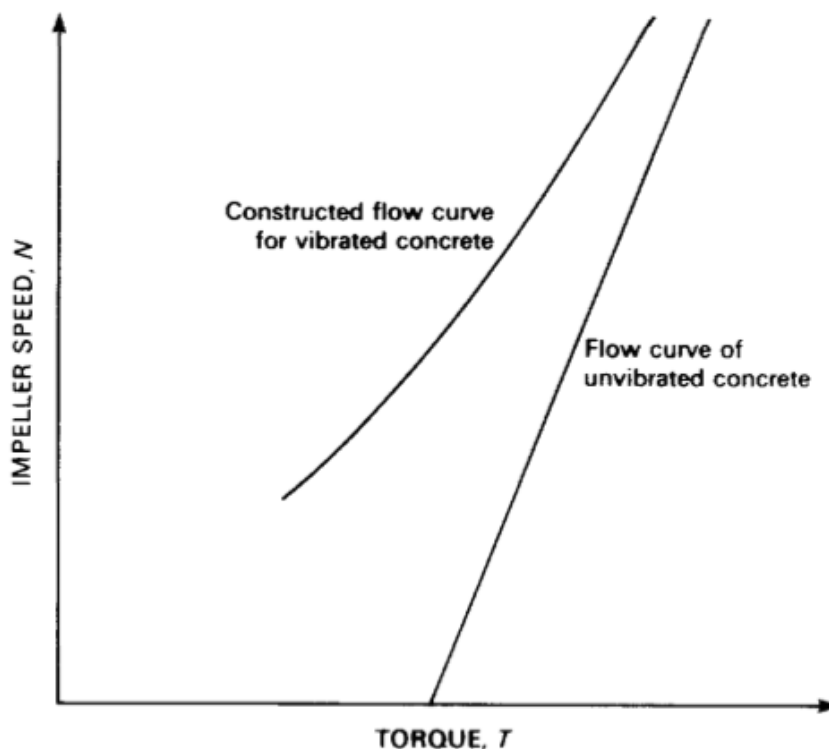


Figure 24 : L'effet des vibrations sur la courbe d'écoulement du béton [148].

1.3.2.2 Cas d'étude : les fluides magnéto-rhéologiques

Le fluide MR est un fluide composé de particules en suspension. Le béton (pâte de ciment) est un fluide similaire, tous deux se comportent suivant la loi de Bingham et ont des particules en suspensions dans un liquide visqueux. Les études sur le béton, présentées précédemment, montrent une variation locale de l'état du fluide, une diminution de sa contrainte de cisaillement lors de vibrations. On en vient à se poser la question si les fluides MR, ayant un comportement proche du béton, réagissent aux vibrations de manières similaires.

Dans cette partie, nous étudions de manière théorique les efforts qui interviennent sur les particules ferromagnétiques, en suspension dans le fluide MR, dans le cas de perturbations vibratoires. Nous prenons en compte les interactions suivantes :

- Le mouvement du fluide, suite au cisaillement d'un des deux pôles magnétiques.
- Les efforts magnétiques entre deux particules adjacentes.
- L'impact des vibrations induites par le pôle mobile dans le fluide.

Pour simplifier l'étude, nous considérons un problème plan, quasi statique avec une vitesse de chaque particule nulle. La Figure 25 représente la chaîne isolée ainsi que les trois interactions décrites par la suite.

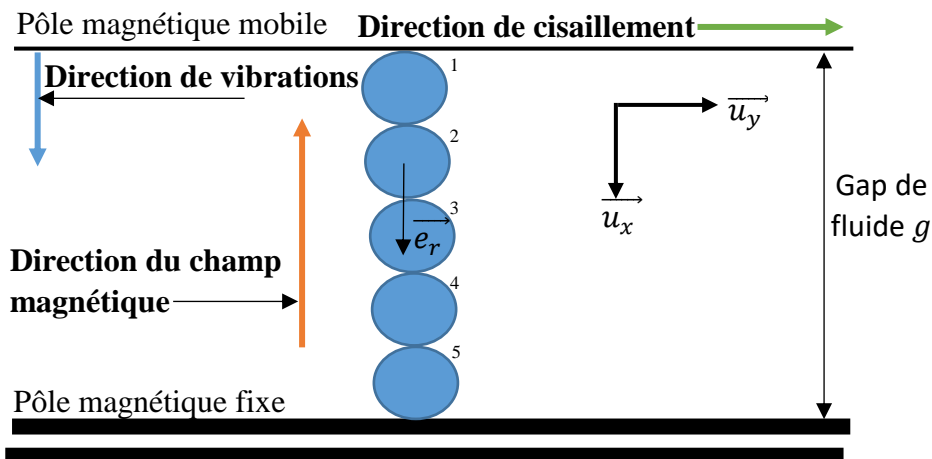


Figure 25 : Représentation d'une chaîne isolée ainsi que les interactions induites de la paroi cisailant le fluide.

a) Interaction fluide

Avec le cisaillement du fluide, les particules subissent une force de traînée. Nous nous basons sur une solution de l'équation de Stocks [68], [150] :

$$F = 3 \pi d \eta f \cdot (v_f - v_i) \tag{5}$$

Avec d le diamètre de la particule, η la viscosité du fluide, v_f la vitesse du flux, v_i la vitesse de la particule i et f le coefficient de friction que nous considérons égal à 1, au vu d'un faible nombre de Reynolds (inférieur à 0,1 pour une vitesse de cisaillement de 25 s^{-1}).

La vitesse du fluide v_y , induite par le cisaillement du fluide, est définie par rapport aux conditions limites :

- La vitesse du pôle cisailant le fluide est constante à $x = 0$ et égale à V_y
- Le pôle magnétique à $x = g$ est fixe

$$v_y = \dot{\gamma} \cdot (g - x) = V_y \cdot \left(1 - \frac{x}{g}\right) \quad (6)$$

Avec $\dot{\gamma}$ la vitesse de cisaillement, g le gap de fluide et u_i la distance de la particule par rapport à l'élément cisailant, il est possible aussi de formuler la vitesse du fluide avec V_y la vitesse tangentielle de l'élément cisailant.

b) Interaction magnétique

Suite à l'établissement du champ magnétique dans le fluide MR, chaque particule agit comme un dipôle magnétique. Ces dipôles interagissent donc entre eux et par le cisaillement du fluide vont s'aligner dans la direction du champ magnétique. Soit la force exercée par une particule i sur une particule j [28], [105] :

$$\vec{F}_{max} = F_0 \left(\frac{d}{r_{ij}}\right)^4 \cdot [(3 \cos^2 \theta - 1) * \vec{e}_r + \sin 2\theta * \vec{e}_\theta] \quad (7)$$

Avec r_{ij} la distance entre les particules i et j , d le diamètre de la particule, θ l'angle entre \vec{e}_r et la direction du champ magnétique et F_0 tel que :

$$F_0 = \frac{3}{16} \pi \mu_f d^2 \beta^2 H^2 \quad (8)$$

Avec μ_f la permittivité du fluide, μ_p la permittivité de la particule, H le champ d'excitation magnétique et β tel que :

$$\beta = \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_f + 2\mu_f} \quad (9)$$

c) Interaction vibratoire

Nous introduisons des vibrations sur l'élément cisailant le fluide. La direction de vibrations est prise comme normale à la surface du pôle vibrant. Soit la relation de la propagation de l'onde vibratoire dans le fluide MR :

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial^2 t} = -c^2 \frac{\partial^2 v_x}{\partial^2 x} \quad (10)$$

Avec v_x la vitesse de l'onde vibratoire, c la célérité de l'onde vibratoire dans le fluide MR. L'équation précédente nous donne une solution de la forme :

$$v_x = (A e^{jkx} + B e^{-jkx}) \cdot e^{j\omega t} \quad (11)$$

Avec k le nombre d'onde, ω la fréquence d'excitation de l'onde vibratoire. Ces deux constantes sont liées par la célérité de l'onde vibratoire c par l'équation suivante :

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (12)$$

Avec λ la longueur d'onde.

Donc nous obtenons en prenant en compte les conditions limites :

- La vitesse de vibrations de la paroi vibrante à $x = 0$ est d'amplitude V_x .
- La paroi opposée à $x = g$ est fixe

$$v_x = \frac{V_x e^{j\omega t}}{1 - e^{-2jk g}} \cdot (-e^{jkx} e^{-2jk g} + e^{-jkx}) \quad (13)$$

Avec g la taille du gap.

Notre étude porte sur des fluides ayant une célérité minimale de 800 m/s [102], [103], [151] et pour une fréquence d'excitation vibratoire d'environ 20 kHz soit donc la longueur d'onde est supérieure à 40 mm.

La longueur d'onde λ , est donc très grande comparée au gap de fluide, $g = 1$ mm, et donc devant x ($x \leq g$). Il est donc possible de simplifier l'équation (13) par la relation suivante :

$$\lambda \gg g \rightarrow kx = \frac{2\pi x}{\lambda} \ll 1 \quad (14)$$

Nous obtenons donc la relation :

$$v_x = V_x \cdot \left(1 - \frac{x}{g} + jkx\right) \cdot e^{j\omega t} \approx V_x \cdot \left(1 - \frac{x}{g}\right) \cdot e^{j\omega t} \quad (15)$$

Cette relation est en valeur absolue de forme identique à la vitesse de cisaillement du fluide en équation (6). Par la suite, nous utiliserons l'équation (5) permettant d'effectuer le lien entre l'onde vibratoire dans le fluide et obtenir les efforts induits sur les particules.

d) Comparaison des forces de cisaillement et vibratoires

Nous avons choisi un set de paramètres nous permettant de distinguer les tendances qui se dégagent des équations énoncées précédemment. Ils sont récapitulés dans le Tableau 4.

Dénominations	Sigle	Valeurs
Gap de fluide	g	1 mm
Diamètre de particules	d	10 μm
Nombre de particules	N_p	100
Permittivité acier	μ_p	6,28 e-3 H/m
Permittivité fluide	μ_f	6,05 e-6 H/m
Viscosité fluide	η	0,112 Pa. s
Concentration volumique	cv	32 %
Célérité de l'onde fluide	c	900 m/s
Amplitude de vibrations	A	1 μm
Fréquence des vibrations	$fr = \omega/2\pi$	20 kHz
Champ magnétique	H	75 kA/m
Vitesse de cisaillement	$\dot{\gamma}$	25 s^{-1}

Tableau 4 : Paramètres du modèle analytique.

La vitesse d'onde représentée par l'équation (15) génère des efforts sur les particules par l'intermédiaire des efforts de traînée, équation (5). De la même manière, le cisaillement du pôle mobile induit lui aussi des efforts sur la particule. La Figure 26 représente les efforts induits par l'onde vibratoire, en bleu, et ceux induits du cisaillement, en vert, en fonction de la distance de la particule à la paroi, u_x . Nous constatons, pour le set paramètres choisi, que la force de traînée est faible, environ d'un facteur cinq par rapport aux efforts vibratoires. Cependant, il faut noter que les efforts dus à la traînée sont unidirectionnels et constants sur un long terme qui permet donc la rupture d'une chaîne dans un fonctionnement sans vibration. Les efforts vibratoires, bien que plus importants, oscillent suivant la fréquence choisie, ici 20 kHz

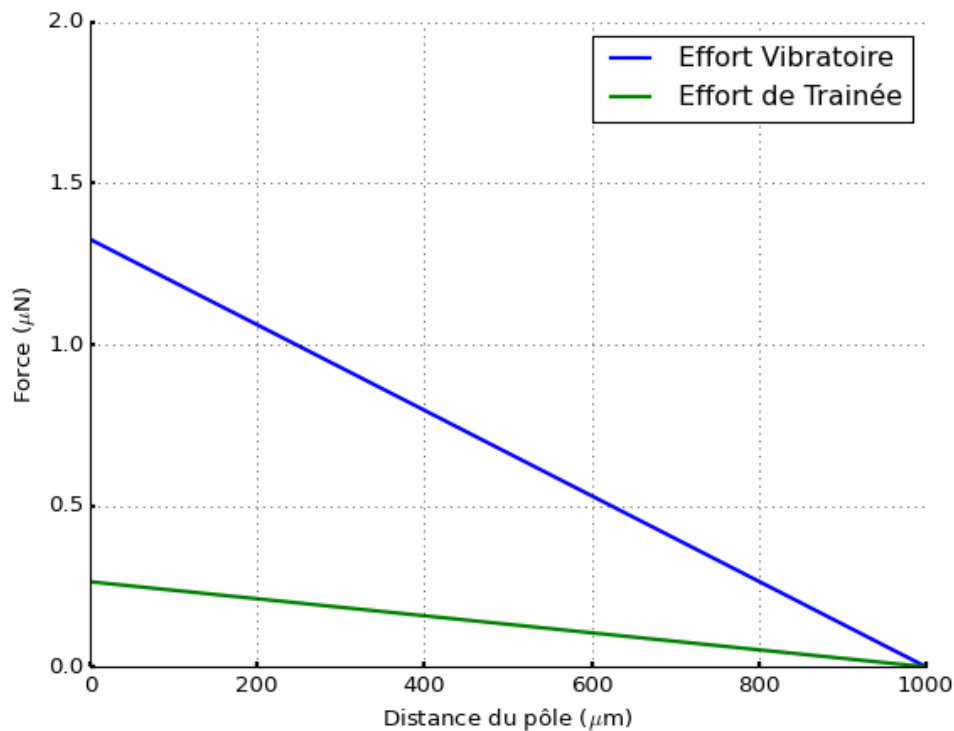


Figure 26 : Efforts induits du cisaillement du fluide ainsi que des vibrations que subit une particule en fonction de sa distance du pôle magnétique mobile.

Les efforts magnétiques qui permettent la cohésion des chaînes de particules est la force suivant \vec{e}_r . La Figure 27 représente les efforts magnétiques, suivant \vec{e}_r , d'une particule sur une autre en fonction de la distance centre à centre des deux particules, équation (7), aussi représentée en Figure 28 pour une vision plus globale. Il faut noter que les particules ont un diamètre de 10 µm qui est donc la distance minimale entre deux particules sans qu'il y ait de destruction.

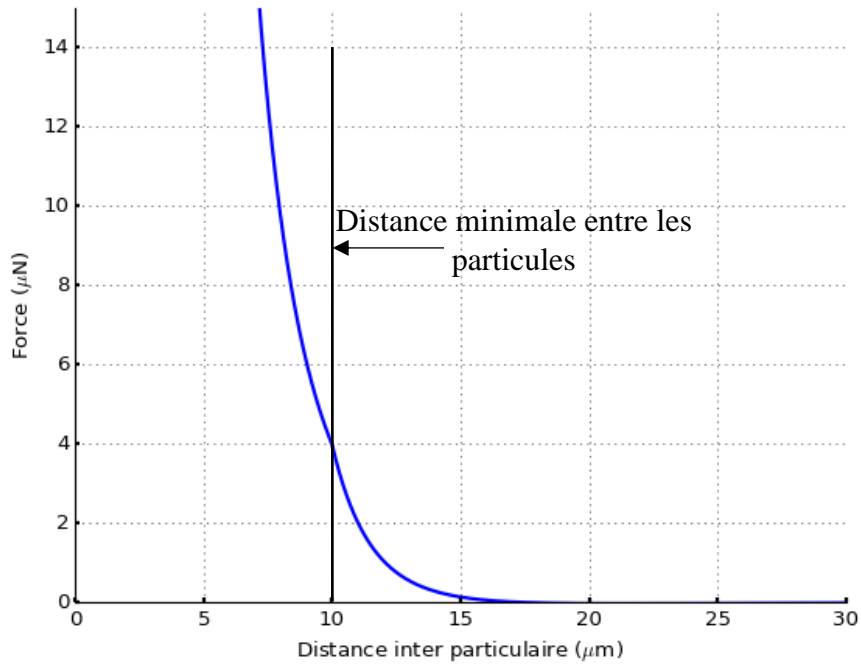


Figure 27 : Effort magnétique en fonction de la distance entre les deux dipôles centres à centre.

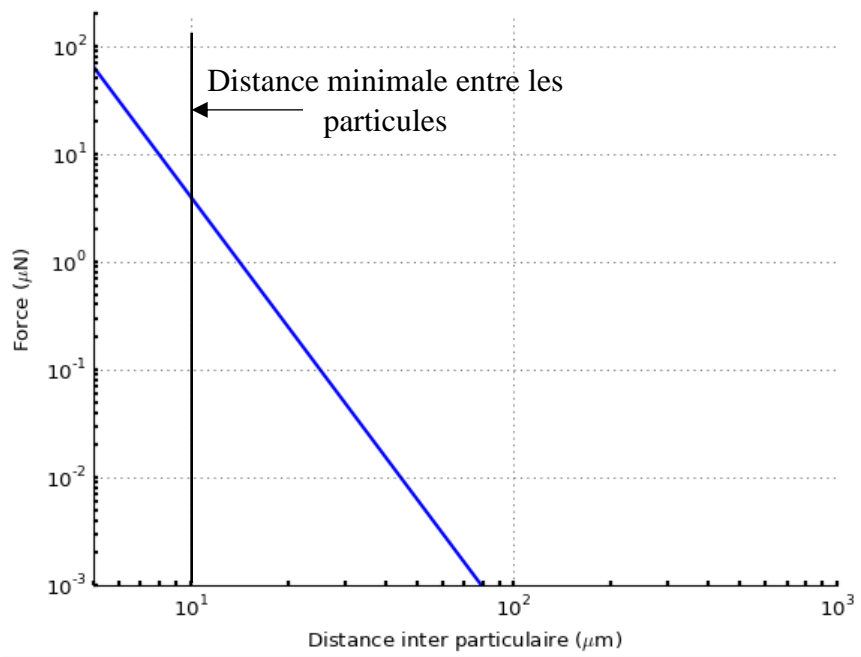


Figure 28 : Effort magnétique en fonction de la distance entre les deux dipôles centres à centre. Représentation log-log.

Pour étudier l'impact que peuvent avoir les efforts de vibrations sur le fluide MR, nous isolons une chaîne de particules alignées, tel que le montre la Figure 25. Nous considérerons que la première particule et la dernière sont ancrées aux pôles magnétiques dus à une plus grande surface de contact (partialement dû à la rugosité). Nous calculons ensuite le rapport entre les efforts que subit une particule et la force de liaison magnétique générée par une particule adjacente.

La Figure 29 montre l'évolution de ce rapport sur la seconde particule en fonction du champ d'excitation dans le fluide pour une amplitude vibratoire de 1 et 2 μm de la paroi vibrante. Le champ d'excitation n'impactant pas les efforts issus des vibrations, le rapport diminue comme l'ont montré l'équation (7) et la Figure 27. Nous remarquons aussi que plus l'amplitude vibratoire augmente plus les efforts issus des vibrations augmentent tels que le décrit l'équation (15) et de ce fait le rapport augmente.

Cette figure montre qu'en dessous d'un certain seuil les forces vibratoires sont dominantes. Ce seuil de champ correspond à une zone de fonctionnement de l'ordre de 15 % du champ d'excitation avant la saturation de la contrainte de cisaillement du fluide MR correspondant, ici les 132 DG. Au-delà de cette valeur, les efforts assurant la cohésion des particules sont plus importants que les efforts induits par les vibrations. Dans cette zone de fonctionnement, nous estimons qu'une rupture de la chaîne a peu de chance d'avoir lieu. Similairement si ce bilan est effectué sur les particules suivantes les efforts vibratoires décroissent, dus à l'écartement plus important à la paroi mobile, et de ce fait, le rapport des forces diminue également.

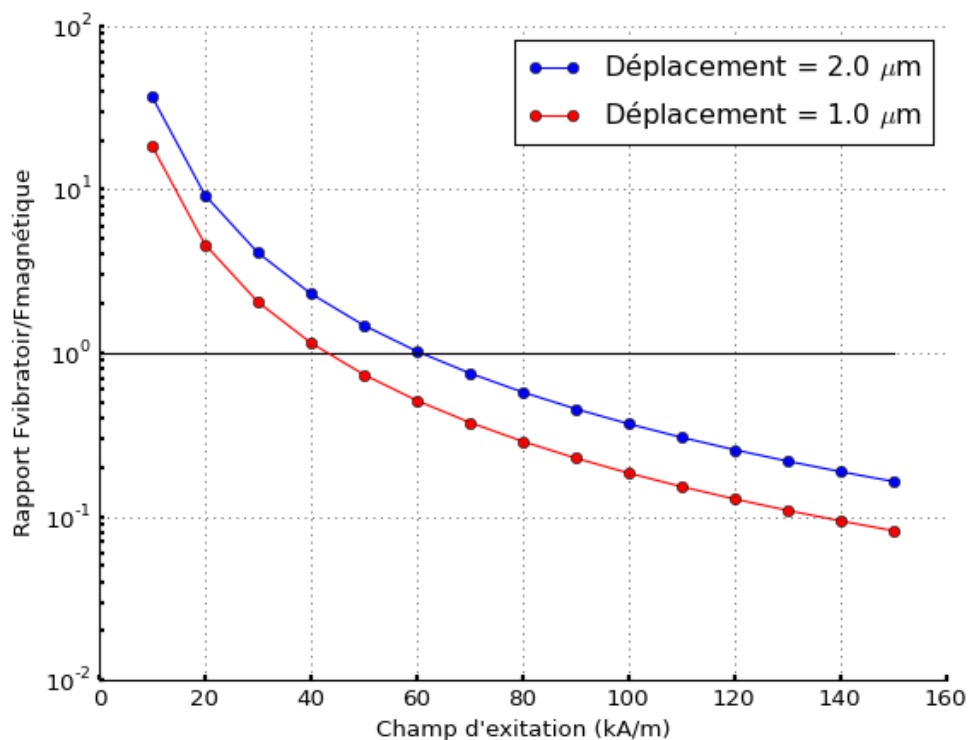


Figure 29 : Rapport des efforts vibratoires sur les efforts magnétiques en fonction du champ d'excitation dans le fluide MR.

e) Discussion

Le fait d'avoir des efforts de même ordre de grandeur indique qu'il est possible sous certaines conditions (champ d'excitation inférieur à 60 kA/m) d'avoir ces efforts qui se contrebalancent permettant ainsi une rupture plus aisée de la chaîne suite aux forces de traînée intervenant dans le fluide. Nous constatons aussi que le ratio des deux interactions, magnétique et vibratoire, est plus important lorsque celui-ci est proche de la paroi vibrante. Ce ratio est plus prépondérant avec un champ magnétique faible, 15 % du champ d'excitation avant la saturation de la contrainte de cisaillement du fluide MR, et une grande amplitude de vibrations.

Cependant, ce modèle est une approche simpliste des interactions entre les vibrations et les efforts magnétiques entre les particules. En réalité les chaînes de particules ne sont pas

constituées d'une seule ligne de particules alignées le long du champ, mais d'un amas de particules. Cet amas permet aux particules d'avoir plus de cohésion entre elles et pourrait nécessiter un effort plus important pour les séparer.

De plus, les chaînes magnétiques ne sont pas isolées les unes aux autres. Celles-ci sont entourées d'autres chaînes, dont leur dispersion est liée à la concentration de particules dans le fluide. Lors de la rupture d'une chaîne, celle-ci va se reformer avec une chaîne déjà existante qui lui est adjacente grâce au mouvement du fluide et de l'attraction magnétique. Ce phénomène ne permet donc pas une absence totale de contrainte suite aux vibrations.

La vibration est dans ce modèle simplifié appliquée uniformément, cependant dans un système mécanique, suivant les fréquences d'excitation, la surface présente des nœuds et des ventres de déformations. Il y a donc une répartition spéciale de zone « favorable » à la perturbation des chaînes tout comme une zone où l'amplitude de déformation ne sera pas assez importante pour une modification de structure.

Par ailleurs nous avons étudié le cas d'un régime non turbulent pour l'équation (5) dérivant de Stock. Or le fait de rajouter des perturbations par une onde de vibration, qui est pour rappel oscillant, crée des perturbations dans le flux du fluide et donc ne permet pas d'avoir un flux laminaire favorable à l'effort induit par les vibrations (cas du coefficient f différent de 1).

Malgré cette simplification du modèle des forces, il en résulte une première conclusion : l'ordre de grandeur des forces vibratoires peut être similaire voir supérieur aux efforts magnétiques induits dans les chaînes du fluide MR. Cela donc nous motive à étudier l'effet des vibrations sur les fluides MR.

1.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'introduire les fluides MR, leurs compositions, mélange d'un fluide porteur et de particules en suspension. Ces particules sont sensibles au champ magnétique extérieur et s'alignent le long des lignes du champ magnétique. Ce phénomène induit une variation des caractéristiques du fluide, distinctes pour chaque composition du fluide. Nous avons aussi présenté les applications des fluides MR. Grâce aux trois modes d'utilisation, de nombreuses applications dans l'industrie ont pu voir le jour. Nous noterons entre autres, les interfaces haptiques pour leur capacité à générer un retour d'effort de qualité dans les interactions Homme Machine. Les différentes études sur le fluide MR, montrent que le fluide a du potentiel dans de nombreux domaines restant à être explorés.

Nous avons proposé un modèle simplifié des différentes forces qui entre en jeux lors de la création de chaînes de microparticules ferromagnétiques dans un liquide porteur. Nous concluons que suite aux vibrations, les efforts qui en découlent sur les particules sont de même ordre de grandeur que les efforts de cohésion d'une chaîne isolée. Ce fait nous amène à penser que les vibrations peuvent perturber le fonctionnement usuel, rupture des chaînes suite au cisaillement du fluide, et de ce fait dégrader les performances, la contrainte de cisaillement, du fluide. Cependant, il existe de nombreux facteurs qui viennent pondérer cette analyse : la présence d'amas de particules dans le fluide, le comportement lors de la rupture de la chaîne, l'amplitude variable de l'élément subissant des vibrations, etc... Ces facteurs montrent que l'analyse du fluide, lorsque celui-ci subit des perturbations vibratoires, nécessite un approfondissement expérimental pour appréhender comment cette perturbation impacte les performances d'un fluide MR.

Chapitre 2

Banc de test vibratoire : Montage et expérimentations

Table des matières

2.1 Introduction.....	32
2.2 Banc de test expérimental et méthodologie	33
2.2.1 Corps d'épreuve	33
2.2.2 Banc de test expérimental	40
2.2.3 Logiciel de paramétrage	41
2.3 Mesures des vibrations sur l'élément cisailant.....	44
2.3.1 Configuration des modes vibratoires de l'élément cisailant	44
2.3.2 Déformations à l'air libre	45
2.3.3 Influence de l'immersion dans le fluide	49
2.3.4 Influence du champ magnétique.....	52
2.3.5 Bilan des mesures vibratoires.....	53
2.4 Variations de la contrainte de cisaillement du fluide	54
2.4.1 Balayage fréquentiel.....	54
2.4.2 Lien avec les modes mécaniques.....	56
2.4.3 Effet du champ magnétique.....	57
2.5 Conclusion.....	59

2.1 Introduction

Nous avons décrit, dans le chapitre précédent, les fluides Magnéto-Rhéologiques (MR) ainsi que leurs applications comme frein, amortisseur ou embrayage dans différents domaines. Les fluides MR ont pour principale propriété de présenter une modification de l'arrangement spatial des particules ferromagnétiques en suspension en présence d'un champ magnétique et d'une sollicitation mécanique. Cette caractéristique affecte notamment la contrainte de cisaillement développée par le fluide MR qui peut ainsi être contrôlé par le champ magnétique, obtenu par exemple à l'aide d'un aimant permanent ou d'une bobine parcourue par un courant. Il faut cependant remarquer que l'application seule d'un champ magnétique ne provoque que très peu de déplacement des particules ferromagnétiques. C'est la mise en mouvement du fluide MR (application d'un différentiel de pression, cisaillement par une pièce mécanique en déplacement dans le fluide) conjointement à la présence du champ magnétique qui provoque progressivement un changement dans l'organisation spatiale des particules et mène à la formation de ces « chaînes » de particules.

Dans le cadre de cette thèse, nous souhaitons évaluer l'impact de vibrations mécaniques dans le fluide sur la formation et la modification de l'arrangement des particules ferromagnétiques. Plutôt que d'observer visuellement d'un point de vue microscopique ces arrangements, nous observerons plutôt leur impact sur la caractéristique principale d'un fluide MR, à savoir la modification de la contrainte de cisaillement du fluide.

Dans ce chapitre, nous allons décrire une première approche expérimentale permettant d'analyser l'influence des vibrations sur le comportement du fluide MR. Pour cela, nous choisissons de nous placer dans le cas où le fluide est mis en cisaillement par un élément mécanique et des vibrations seront appliquées à cet élément cisailant. Une première étape de caractérisation consistera à mesurer la déformation engendrée par les vibrations sur l'élément cisailant le fluide et à analyser l'évolution de cette déformation suivant différentes configurations expérimentales :

- L'élément cisailant est libre.
- L'élément cisailant est plongé dans le fluide MR.
- L'élément cisailant est plongé dans le fluide MR et un champ magnétique est appliqué.

Suite à ces expérimentations qui permettront de mieux cerner les relations liant l'application de vibrations avec les déformations mécaniques obtenues sur l'élément cisailant, nous analyserons l'influence des vibrations sur la contrainte de cisaillement développée par le fluide sur l'élément cisailant lorsque ce dernier est en déplacement.

Nous présentons maintenant les méthodes et le banc de test expérimental qui seront communs à l'ensemble des travaux effectués.

2.2 Banc de test expérimental et méthodologie

Pour comprendre l'interaction entre les vibrations et le fluide MR, nous mettons en place dans cette partie les moyens expérimentaux permettant d'une part de mettre en œuvre un fluide MR en interaction avec un élément cisailant : le corps d'épreuve, et d'autre part d'appliquer de manière contrôlée des vibrations à cet élément cisailant par le biais d'actionneurs piézoélectriques.

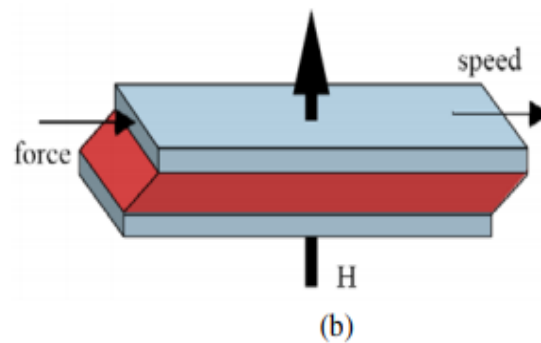


Figure 30 : Mode de fonctionnement en cisaillement extrait de [38].

2.2.1 Corps d'épreuve

Le corps d'épreuve réalise plusieurs fonctions :

- Il sert de contenant pour le fluide MR.
- Il permet la génération d'un champ magnétique par le biais d'une bobine.
- Il permet de guider ce champ magnétique vers le fluide à l'aide d'une pièce polaire fixe.
- Il permet de mettre en cisaillement le fluide avec un élément mobile.
- Il permet de déterminer la contrainte de cisaillement en mesurant la force d'interaction entre la pièce polaire fixe contenant le fluide et l'élément de cisaillement mobile.

Nous avons choisi d'adopter une configuration cylindrique pour le corps d'épreuve qui permet par rotation de l'élément cisailant une action mécanique continue sur le fluide sans limites de déplacement. Un tel corps d'épreuve est représenté en Figure 31. On y retrouve trois composants principaux : le circuit magnétique, la cavité de fluide et l'élément cisailant. Cette configuration a démontré de bonnes performances MR notamment rapport couple max/couple min important et stabilité du comportement dans le temps.

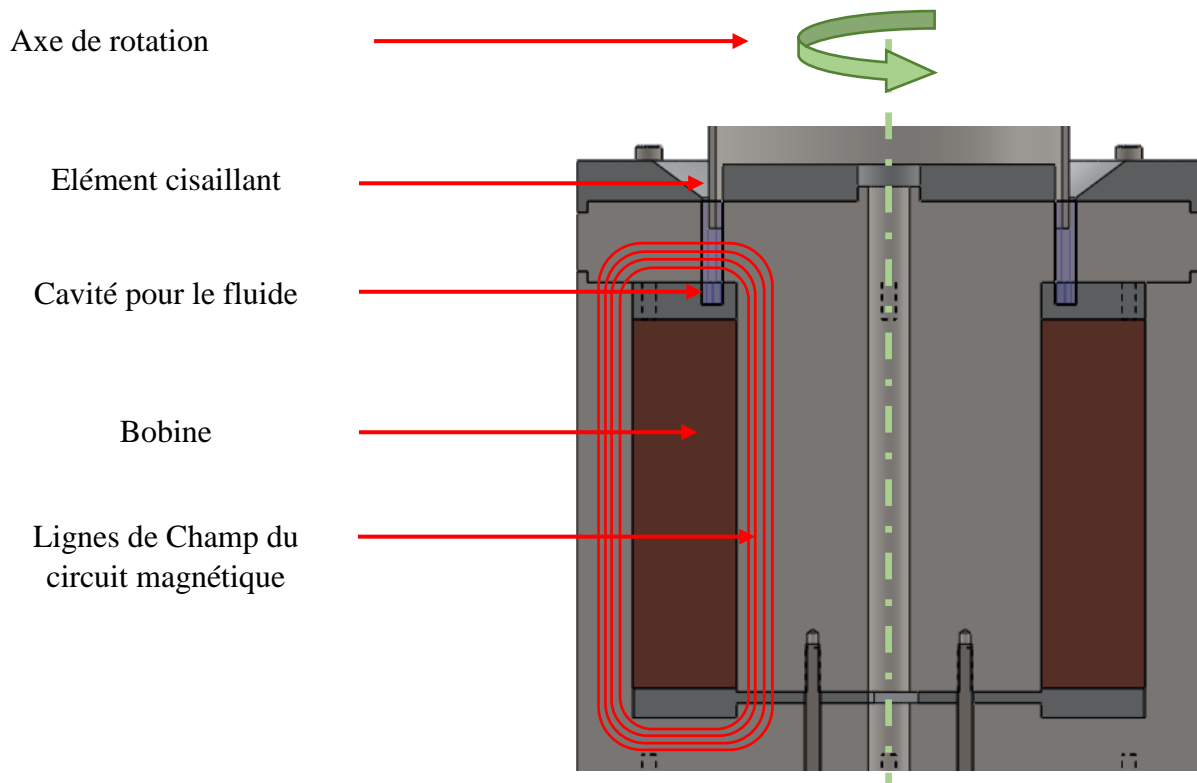


Figure 31 : Corps d'épreuve, coupe suivant l'axe de rotation.

2.2.1.1 Interaction magnétique

Une bobine crée un champ magnétique par l'intermédiaire du courant qui le traverse. Ce champ est dirigé, nous parlons donc de flux magnétique, vers la cavité contenant le fluide. Le circuit magnétique est composé de fer doux. Nous avons choisi le Telar 57 d'Amerco pour ses propriétés magnétiques : champ d'induction élevé avant saturation (2,15 Teslas) et une faible rémanence.

Le flux magnétique, ϕ , créé par la bobine est calculé par la loi d'Ampère et d'Hopkinton :

$$NI = \oint \vec{H} \, d\vec{l} = \mathfrak{R}\phi \quad (16)$$

Avec N le nombre de tours dans la bobine, I le Courant et \mathfrak{R} la réluctance totale du circuit. La réluctance se calcule en fonction de la direction du flux magnétique et du volume qui le traverse. Il est possible de subdiviser le problème en éléments simples qui seront sommés pour obtenir la réluctance totale. Ces éléments simples sont distingués par un changement de géométrie, de matériaux, de permittivité μ , ou de la direction du champ magnétique. On calcule la réluctance du circuit, par la relation ci-après :

$$\mathfrak{R} = \int \frac{dl}{\mu S(l)} \quad (17)$$

Par exemple, dans notre cas, deux cas se présentent avec une même géométrie. La subdivision du corps d'épreuve est un ensemble de cylindres creux. Dans un premier cas, le flux magnétique est perpendiculaire au rayon (orientation axiale), à gauche dans la Figure 32.

Dans le second, il est parallèle au rayon (orientation radiale), à droite dans la Figure 32. Les deux équations suivantes présentent respectivement les résultats de réluctance obtenue dans les cas exposés.

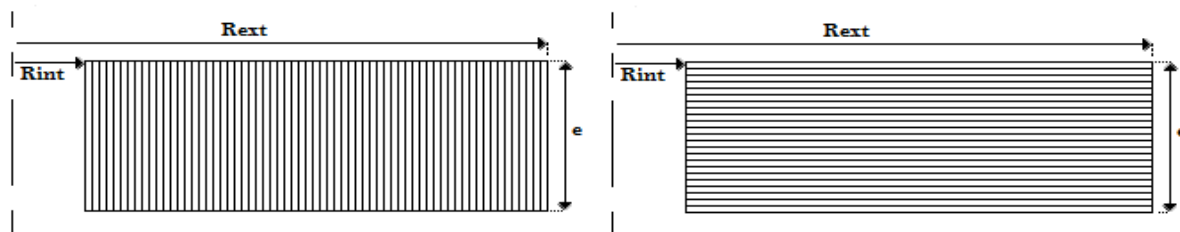


Figure 32 : Gauche : Lignes de champ axiales, perpendiculaires au rayon. Droite : Lignes de champ radiales parallèles au rayon.

Lignes de champ axiales	Lignes de champ radiales
$\mathfrak{R}_{pe} = \frac{e}{\pi\mu \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2)}$	$\mathfrak{R}_{pa} = \frac{\ln(R_{ext}) - \ln(R_{int})}{2 \pi\mu e}$

Tableau 5 : Calcul de la réluctance en fonction de la direction des lignes de champs pour un cylindre creux.

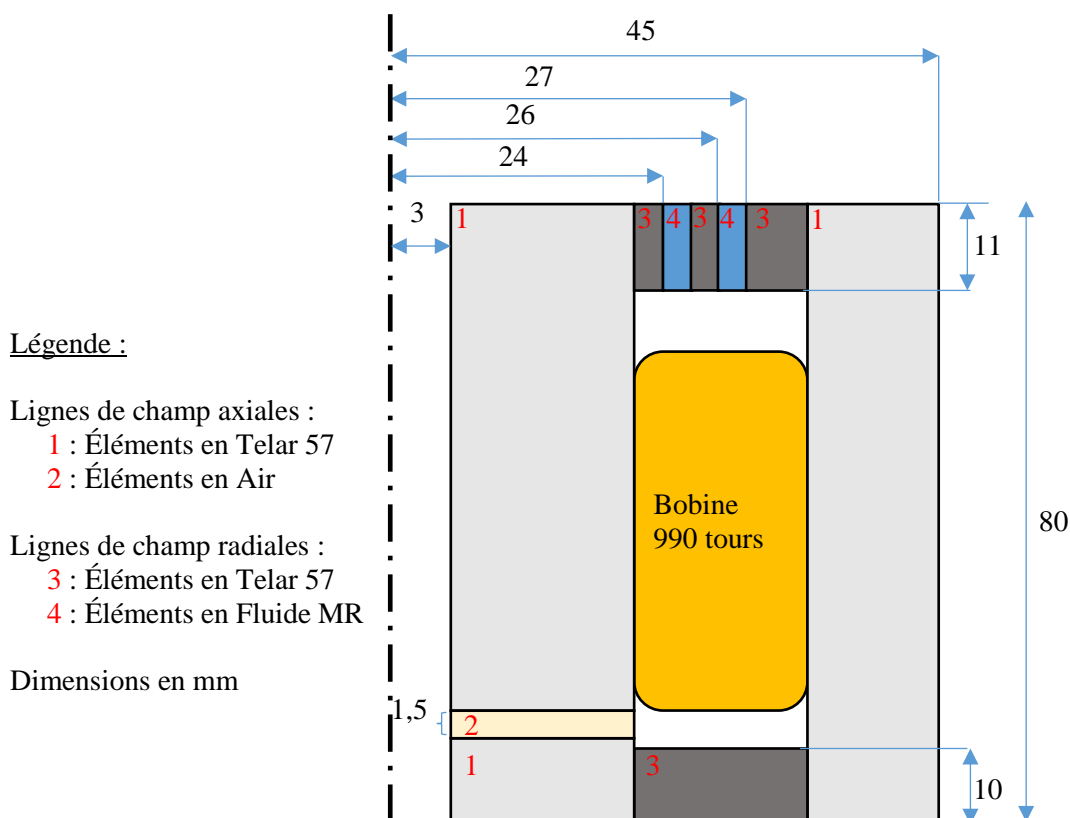


Figure 33 : Découpage géométrique du corps d'épreuve en éléments simples pour le calcul de la réluctance du circuit magnétique.

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

La Figure 33 représente le corps d'épreuve avec une découpe en éléments simples pour le calcul de la réluctance totale du circuit magnétique. Ce découpage pourrait être effectué de manière différente, mais il n'a pas une influence notable sur le résultat final.

Nous obtenons pour le corps d'épreuve une réluctance d'environ $10^6 H^{-1}$. En première approche, on peut négliger les pertes et on considère alors que le flux magnétique ϕ est conservé. On en déduit le champ magnétique local B, le champ d'induction, traversant une surface S par la relation suivante :

$$\phi = \int \vec{B} \cdot \vec{dS} = BS \quad (18)$$

Nous pouvons donc désormais calculer de manière analytique le champ magnétique dans le fluide en fonction du courant dans la bobine, comprenant 990 tours. Pour un courant bobine de 1,2 A, nous obtenons un flux magnétique de $1,2 \cdot 10^{-3}$ Weber soit un champ d'induction de 630 mT dans la cavité intérieure du fluide. Pour conforter ces calculs, nous simulons par éléments finis en utilisant le logiciel FEMM, le champ magnétique créé par la bobine dans le fluide. La Figure 34 présente le champ pour un courant de 1,2 A et du fluide 132DG de LORD. Le champ d'induction dans le circuit magnétique est inférieur à 1 T, nous sommes donc toujours dans la partie linéaire de la courbe d'induction du Telar 57 (voir Figure 5) n'indiquant donc aucune saturation magnétique dans le corps d'épreuve.

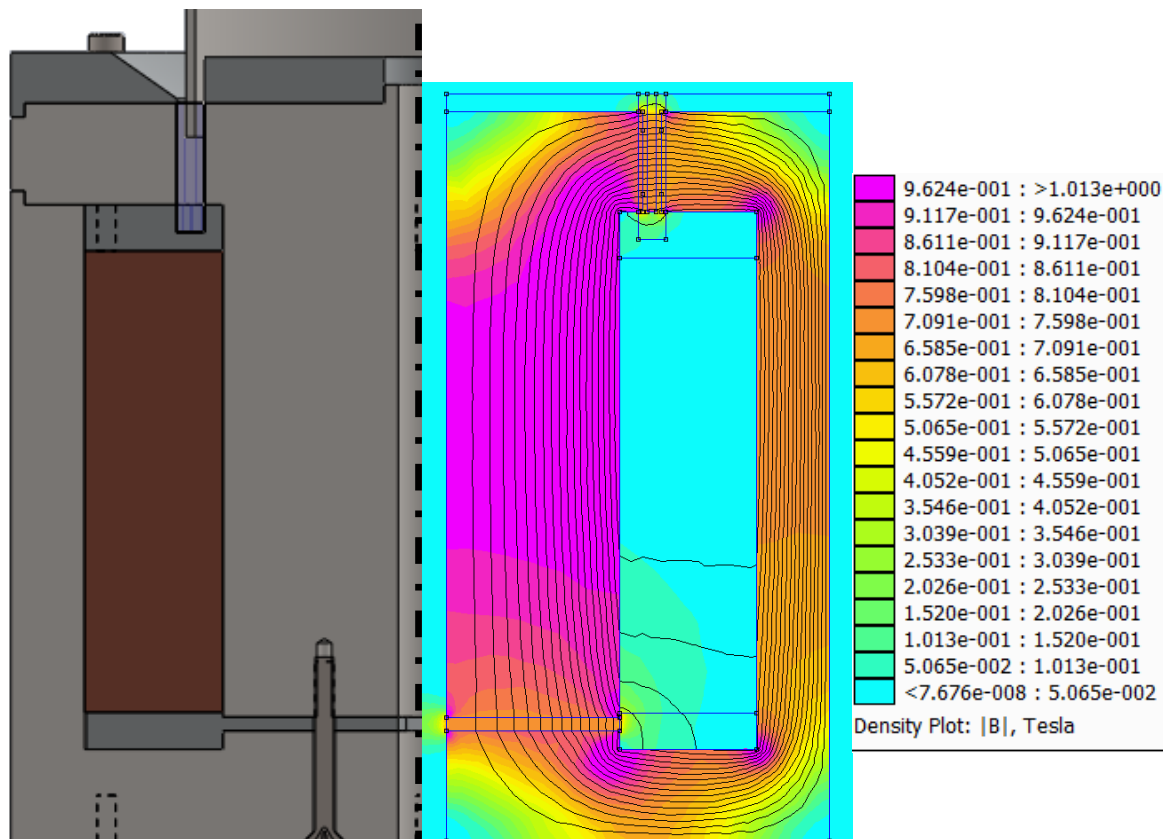


Figure 34 : Champ d'induction magnétique en Tesla dans le corps d'épreuve pour un courant bobine de 1,2 A.

Nous comparons par la suite les résultats analytiques et ceux obtenus par éléments finis dans la Figure 35. Nous mesurons un écart inférieur à 0,1 T pour un champ d'induction en dessous de 1 T. Cet écart est dû au fait que la simulation par éléments finis représente au mieux les zones participant au circuit magnétique.

Par la suite, nous nous baserons sur les résultats obtenus par éléments finis. Dans le cas du fluide 132DG, nous effectuons une approximation du comportement par linéarisation de la courbe, ce qui nous permet d'obtenir la relation suivante entre le courant dans la bobine I et le champ d'induction B circulant dans le fluide :

$$B = 0,6275 I \quad (1)$$

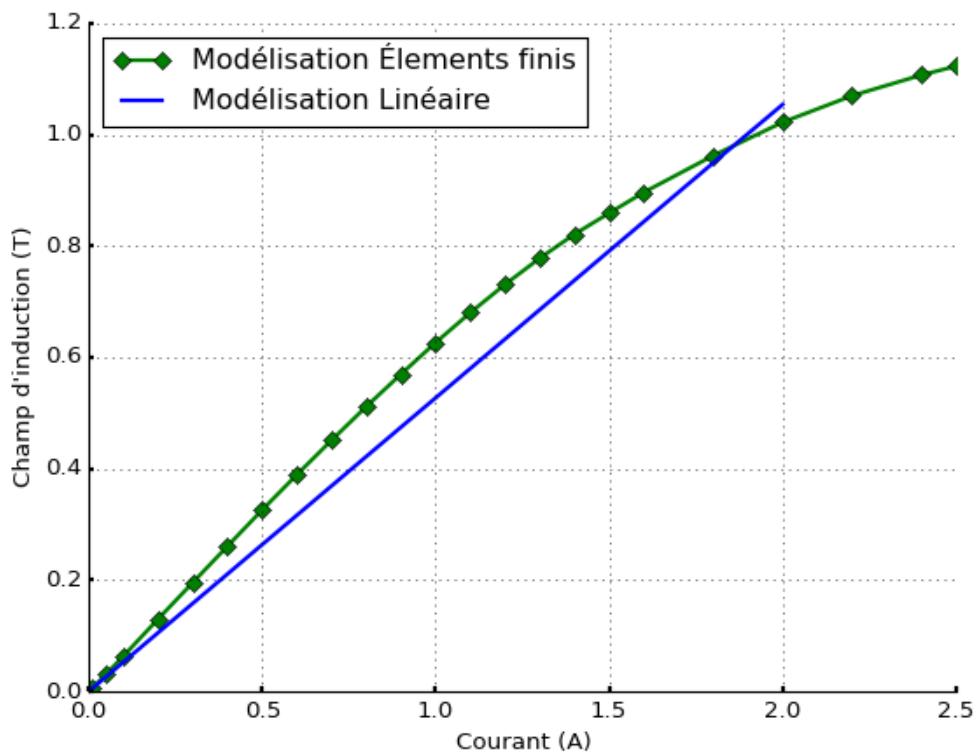


Figure 35 : Comparatif du champ d'induction dans le fluide pour un courant donné. Modèle analytique, en bleu et modèle par éléments finis en vert.

2.2.1.2 Couple de cisaillement

Pour notre utilisation, l'élément cisailant est constitué d'une cloche cylindrique en fer pur (TELAR 57) d'un diamètre extérieur de 52 mm, d'une hauteur de 40 mm et d'une épaisseur de 1 mm.

Cet élément cylindrique vient cisailer le fluide dans la cavité qui lui est alloué. La cavité permet d'avoir un cisaillement sur 11 mm de hauteur (hauteur effective du circuit magnétique) pour un écart, un gap, de fluide de 1 mm de chaque côté de l'élément cisailant. La cloche sera immergée à une profondeur de 12 mm afin d'assurer le cisaillement sur toute la hauteur effective du circuit magnétique.

Nous avons déterminé dans le chapitre précédent que les fluides MR peuvent se modéliser par la loi de Bingham. Cette loi sépare l'interaction du champ magnétique et celle induite par la vitesse de cisaillement. Pour retrouver le couple résistant C dû à l'interaction entre le fluide et l'élément cisailant, on intègre la contrainte de cisaillement τ_H sur la surface d'interaction S , avec r représentant le rayon de l'interaction avec l'élément cisailant, soit :

$$C = \iint r \tau_H dS \quad (19)$$

Dans ce chapitre, le fluide MR 132DG de Lord est utilisé pour l'ensemble des expériences. Le champ magnétique a une forte influence sur la contrainte de cisaillement comparativement à la vitesse de cisaillement. Pour établir un modèle analytique, nous nous focalisons sur l'influence du champ magnétique, en négligeant l'impact des efforts de viscosité.

Les caractéristiques du fluide MR sont exprimées par le fabricant de fluide sous la forme de courbes donnant (présenté dans le chapitre précédent en Figure 10 et Figure 11) :

- La relation entre le champ d'excitation H et la contrainte de cisaillement résultante τ_H .
- La relation entre le champ d'induction B et le champ d'excitation H .

À partir de ces courbes, on peut établir un modèle du premier ordre en considérant une linéarisation de la contrainte de cisaillement en fonction du champ d'excitation H :

$$\tau_H = 0,267 H \quad (20)$$

Ainsi qu'une linéarisation de la perméabilité magnétique :

$$B = 6,05 * 10^{-6} H \quad (21)$$

Avec la géométrie de l'élément cisailant nous obtenons la relation entre la contrainte de cisaillement du fluide et le couple suivant :

$$C = 90 10^{-6} \tau_H \quad (22)$$

Donc, nous obtenons analytiquement la relation ainsi linéarité entre le couple et le courant suivant :

$$C = 2,1 I \quad (23)$$

Un second modèle plus précis peut être établi en utilisant une tabulation de la courbe d'induction du fluide pour la modélisation par éléments finis. Cette courbe a un domaine de validité jusqu'à 150 kA/m ce qui nous permet d'obtenir les valeurs précises du champ d'excitation H dans le fluide. À partir de ces valeurs du champ, la contrainte de cisaillement est calculée comme précédemment par les relations (17) et (26) ci-dessus.

La Figure 36 présente les résultats du calcul analytique, en bleu pour le modèle linéaire et en rouge pour le modèle utilisant les éléments finis, ainsi que des mesures expérimentales de couple, en vert. Le modèle par éléments finis représente mieux l'évolution du couple pour un courant dans la bobine donnée.

Le modèle linéaire présente des valeurs inférieures aux mesures expérimentales du fait de la minoration du champ magnétique approximé par modèle analytique. Par la suite, nous nous baserons donc sur des modèles par éléments finis, par le logiciel FEMM.

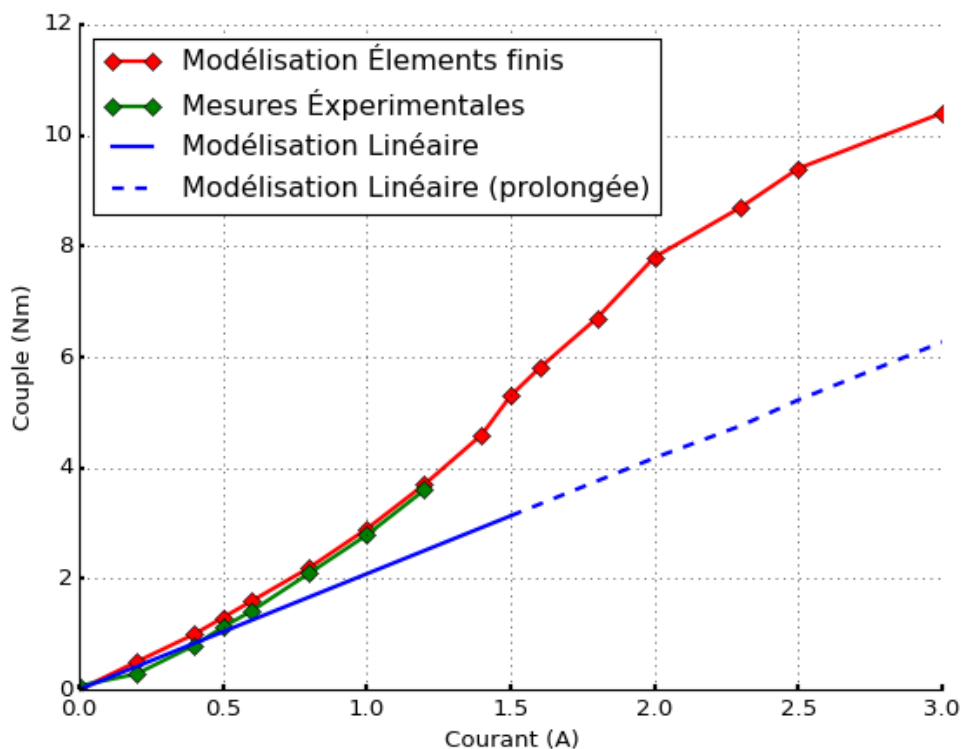


Figure 36 : Comparatif du modèle du couple en fonction du courant. Modèle analytique, en bleu. Modèle assisté par éléments finis, en rouge. Mesure de couple sur corps d'épreuve, en vert.

2.2.2 Banc de test expérimental

Pour assurer la mise en rotation de l'élément cisailant, un moteur électrique entraîne par un système de poulies et de courroies un porte-cloche qui permet d'adapter différentes pièces mécaniques.

La mise en vibration de l'élément cisailant est obtenue grâce à un actionneur piézoélectrique (de type « stack » multicouche) de référence PPA10M fabriqué par Cédrat. Afin d'assurer l'alimentation électrique de cet actionneur pendant la rotation de l'élément cisailant, un collecteur tournant est inséré en amont du porte-cloche.

Afin de régler la profondeur d'immersion dans le fluide et pour ajuster la concentricité entre l'élément cisailant et la cavité de fluide, nous utilisons des platines de positionnement à vis micrométriques permettant des déplacements dans les trois directions X, Y et Z.

Les forces d'interactions développées par le fluide MR entre l'élément cisailant en rotation et le corps d'épreuve fixe sont mesurées par l'intermédiaire d'un capteur de couple positionné à la base du corps d'épreuve. Il s'agit d'un capteur de couple piézoélectrique référence 9339A de KISTLER. Ce type de capteur offre une gamme de mesure de couple dans la gamme +/- 10 N.m avec une grande résolution (seuil inférieur à 0,18 mN.m) et une forte sensibilité (-460pC/Nm).

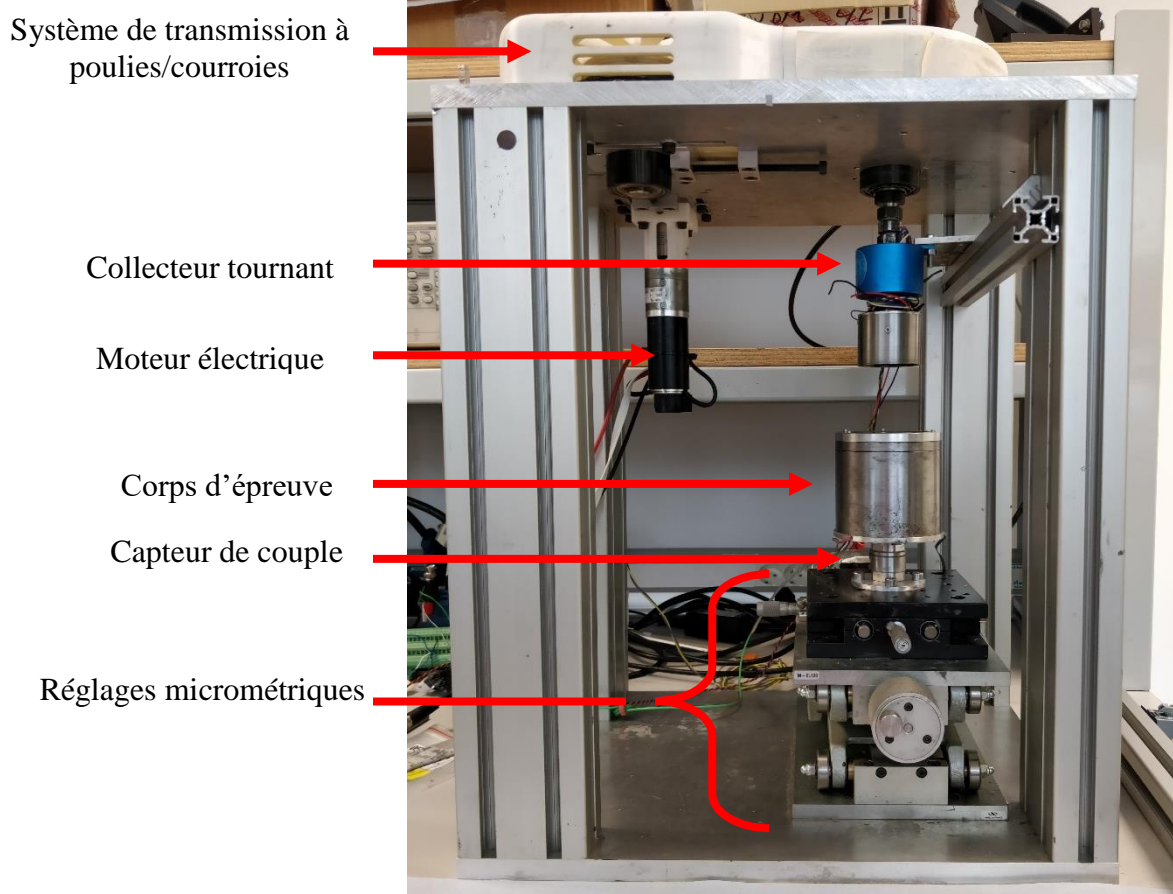


Figure 37 : Banc de test expérimental.

2.2.3 Logiciel de paramétrage

Le banc de test doit permettre de contrôler trois grandeurs physiques qui vont déterminer les conditions expérimentales de mise en œuvre du fluide MR :

- Le champ magnétique traversant le fluide. Ce dernier est contrôlé par le courant injecté dans la bobine du corps d'épreuve. Grâce au dimensionnement du circuit magnétique et aux caractéristiques de la bobine, on établit la relation suivante entre la valeur du courant et la valeur du champ magnétique généré :

$$B = 0,6275 I \quad (24)$$

Avec B , le champ d'excitation magnétique en Tesla et I le courant bobine en Ampères. Nous nous limiterons à un courant de 1,2 A au vu de l'alimentation de notre banc.

- La vitesse de cisaillement du fluide est représentée sur la Figure 38, elle est contrôlée par la vitesse de rotation du moteur électrique. Connaissant le rapport de transmission du banc de test ainsi que les dimensions géométriques de l'élément cisailant et de la cavité de fluide, on obtient la relation :

$$\dot{\gamma} = 26 \omega \quad (25)$$

Avec $\dot{\gamma}$ la vitesse de cisaillement du fluide et ω la vitesse de rotation de l'élément cisailant.

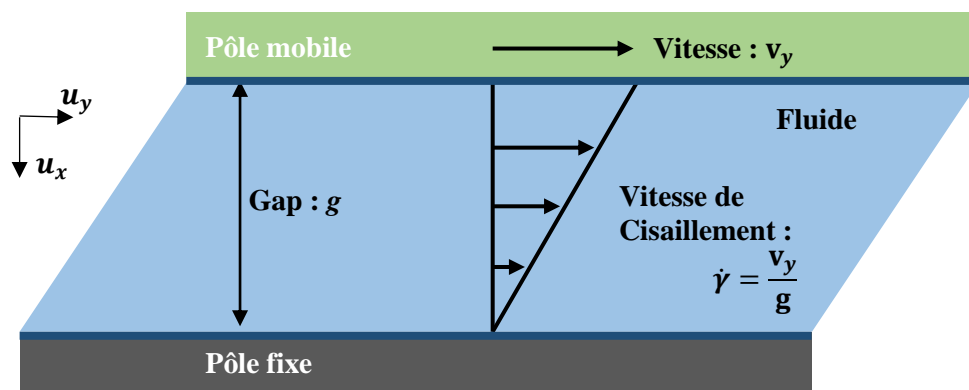


Figure 38 : Profile de vitesse d'un fluide, en cisaillement plan.

- La tension et la fréquence du signal appliqué à l'élément piézoélectrique.

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

Le séquençement et l'évolution temporelle de ces différents paramètres sont régis par une interface graphique présentée en Figure 39.

Pour chaque paramètre, il est possible de contrôler le type d'évolution temporelle souhaitée. Dans la majorité des cas, il s'agit d'un palier ou d'un balayage fréquentiel pour l'excitation de l'actionneur piézoélectrique. Leurs durées, leurs amplitudes et dans le cas échéant leurs vitesses sont paramétrées dans l'encadré I. L'enregistrement des données se fait par l'intermédiaire de l'encadré II. Cet encadré est aussi réservé pour configurer la gestion temporelle des signaux émis pour la bobine, le moteur et l'actionneur piézoélectrique. Suite aux réglages, il est possible de voir en cadre III une représentation temporelle des signaux représentatifs des grandeurs paramétrées.

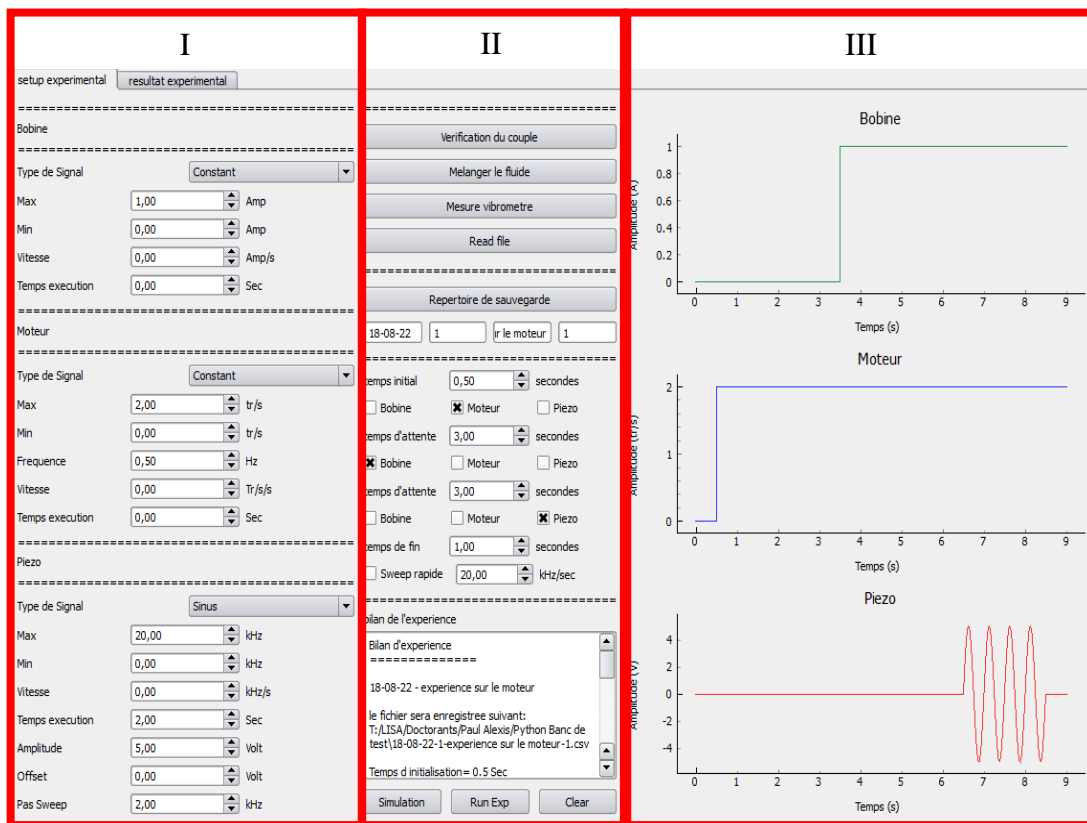


Figure 39 : Interface graphique contrôlant les expériences. En I, le contrôle des paramètres : bobine, moteur et de l'actionneur piézoélectrique. En II, sauvegarde, ordonnancement et bilan des résultats de l'expérience. En III, prévisualisation des signaux de commandes.

Le déroulement d'un cycle de mesure se fait en quatre phases, repris par la Figure 40 :

- Une phase de préparation de l'expérience est nécessaire, suite à quelques mesures sur le couple, nous avons conclu qu'une légère rémanence est constatée dans le circuit magnétique. Pour pallier ce problème, nous effectuerons donc des cycles de démagnétisation (« degaussing ») du circuit magnétique avant chaque expérience.
- Phase I : Mise en rotation du moteur en contrôlant sa vitesse. Cela entraîne l'élément cisailant dans le fluide avec la vitesse de cisaillement désirée.
- Phase II : Établissement du champ magnétique souhaité en mettant la bobine sous tension. Le fluide MR présente donc une augmentation progressive de sa contrainte de cisaillement jusqu'à l'établissement du courant dans la bobine.
- Phase III : Génération des vibrations par l'actionneur piézoélectrique. Ces vibrations sont caractérisées par l'amplitude, la fréquence (sinusoïde de fréquence constante ou balayage en fréquence) du signal électrique pilotant l'actionneur.
- Phase IV : Suppression des vibrations.

En synchronisme avec ce séquençage, les données du capteur de couple sont enregistrées à une cadence de 125 kHz.

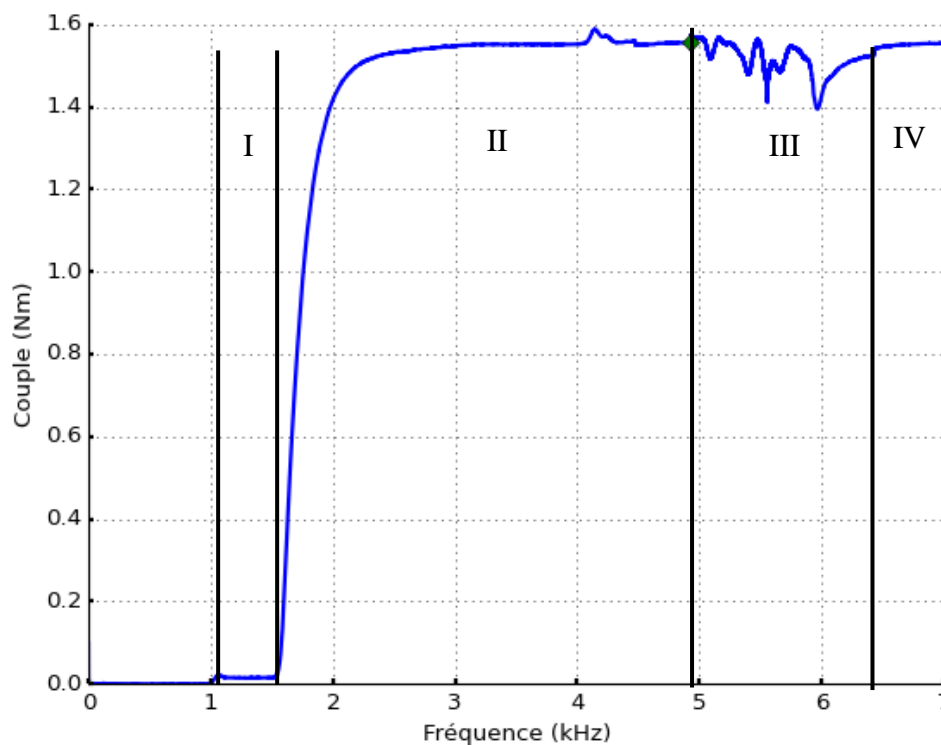


Figure 40 : Séquence des commandes pour une expérimentation type. Mesure du couple pour un champ magnétique non nul et en présence de vibrations.

2.3 Mesures des vibrations sur l'élément cisailant

Avant de pouvoir aborder l'étude de l'impact des vibrations sur la contrainte de cisaillement du fluide, il est nécessaire d'analyser la déformation de l'élément cisailant le fluide. Pour cela, la déformation est étudiée en laissant la cloche à l'air libre, puis dans un deuxième temps en l'insérant progressivement dans le fluide. Nous mettrons, dans ces deux cas, les résultats au regard d'une simulation par éléments finis de l'élément cisailant grâce au logiciel ANSYS APDL. Dans un troisième temps, nous allons appliquer un champ magnétique dans le fluide et observer les modifications correspondantes sur l'amplitude des vibrations.

2.3.1 Configuration des modes vibratoires de l'élément cisailant

Dans cette première approche, nous allons nous placer dans une configuration spécifique pour la mise en vibration de l'élément cisailant par l'actionneur piézoélectrique.

L'actionneur piézoélectrique stack PPA10M de Cédrat, générant l'onde vibratoire est encastré dans la cloche par l'intermédiaire de deux poutres métalliques, représenté dans la Figure 41. Cet actionneur permet un déplacement maximal, sans charge, de $7,72 \mu\text{m}$ et peut déployer un effort maximal, bloqué, de 1 kN. Au niveau électrique, le PPA10M peut être alimenté de -20 V à + 150 V. Afin de respecter une symétrie dans l'actionnement et surtout pour limiter le courant nécessaire à son actionnement (capacité statique importante, de l'ordre de 700 nF) la tension appliquée sera sinusoïdale avec une amplitude maximale de 10 V crête.

On appellera cette configuration dans laquelle les vibrations sont radiales, la configuration « R ». Pour mesurer les vibrations dans cette configuration, on utilise un vibromètre à effet doppler, de référence OFV-534 de Polytec, positionné de manière perpendiculaire à la surface de la cloche.

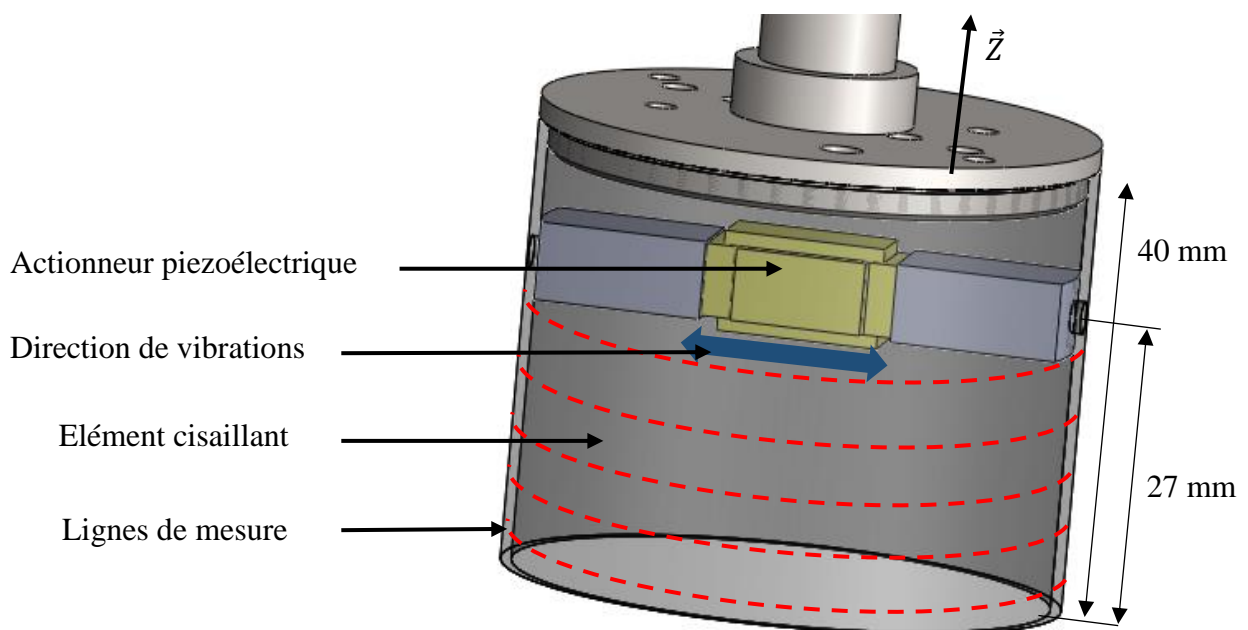


Figure 41 : Configuration « R ». Les vibrations sont orientées suivant l'axe radial du cylindre.

La zone de mesure de l'élément cisailant est située en dessous de l'actionneur piézoélectrique, qui sera plongé dans le fluide. Dans cette zone, lorsque la cloche est laissée libre dans l'air, il est possible de répartir les points de mesure sur 5 lignes sur l'axe Z, environ tous les 5 mm en partant du bas de la cloche, et 24 positions angulaires de l'élément cisailant sur toute la surface soit donc tous les 15 degrés. Pour représenter les résultats, nous calculerons une valeur efficace sur l'ensemble des lignes de mesure. Dans certains cas (immersion), on n'a accès qu'à une seule ligne de mesure pour effectuer ce calcul.

2.3.2 Déformations à l'air libre

2.3.2.1 Mesure expérimentale

Dans cette première partie, nous étudions la déformation de l'élément cisailant à l'air libre. On balaye les fréquences jusqu'à 120 kHz avec une amplitude de 10 V. La fréquence maximale est limitée par la fréquence d'acquisition de notre banc d'essai. Pour synthétiser les résultats, pour chaque ligne de mesure, on utilise la valeur efficace des mesures de déformation.

À l'air libre, représenté dans la Figure 42, le cylindre présente de nombreux modes de vibrations. On remarque les deux premiers modes à 2,9 et 6,5 kHz (repère A). Ces modes sont les modes principaux de l'élément cisailant d'amplitude 6,8 μm .

Entre 15 kHz et 35 kHz (repère B), nous remarquons une accumulation de modes. Leurs amplitudes sont inférieures aux deux premiers modes. Nous mesurons une amplitude maximale de 2,1 μm à 23,7 kHz.

À partir de 40 kHz (repère C), on observe que la déformation de l'élément cisailant décroît fortement. La déformation de l'élément cisailant ne dépasse pas 0,3 μm .

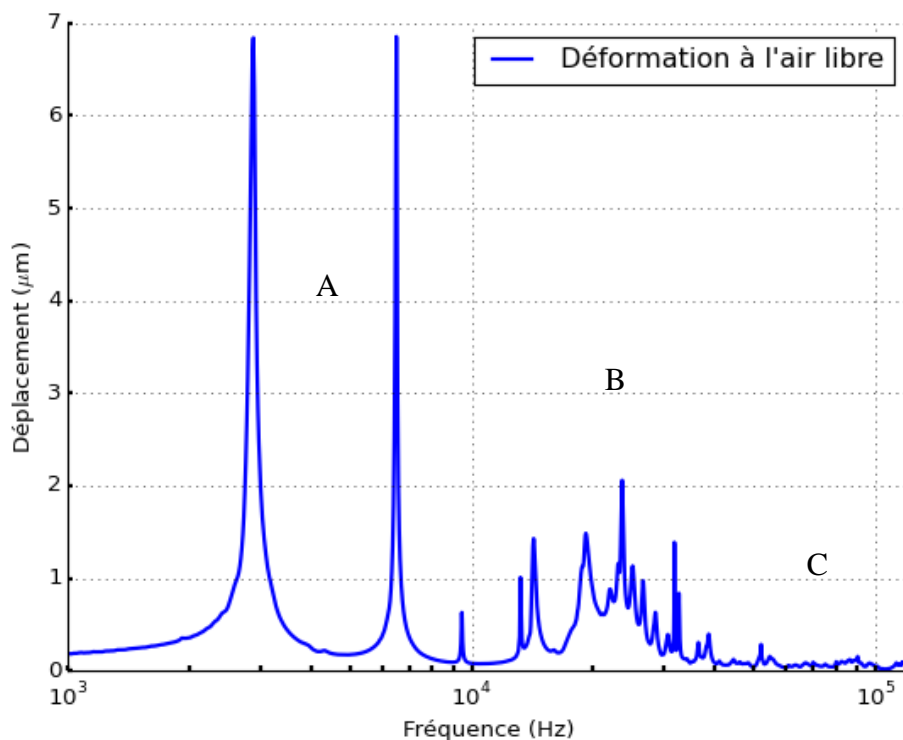


Figure 42 : Modes de déformation mesurés à l'air libre.

2.3.2.2 Confrontation par modélisation

Afin de conforter les résultats expérimentaux nous les comparons à une modélisation par éléments finis. Un modèle numérique est réalisé dans le logiciel ANSYS APDL en important la représentation en trois dimensions de la cloche décrite dans la section 2.3.1.

Des éléments solides SOLID186 sont utilisés pour mailler la cloche et ont pour degrés de liberté les déplacements U_x , U_y et U_z . La longueur caractéristique des éléments est fixée à 2,5 mm. Une condition limite d'encastrement est considérée sur les surfaces du trou central du porte-cloche, lié à l'axe de rotation. Un déplacement radial de 0,1 μm (vers l'extérieur du corps de la cloche) est imposé sur les surfaces des deux trous dans le corps de la cloche, pour simuler l'effet de l'excitation par l'actionneur piézoélectrique. Les simulations sont harmoniques et réalisées de 0 à 30 kHz avec un pas fréquentiel de 250 Hz. La Figure 43 présente le maillage ainsi réalisé. Les propriétés mécaniques des matériaux utilisées pour les simulations sont données dans le Tableau 6.

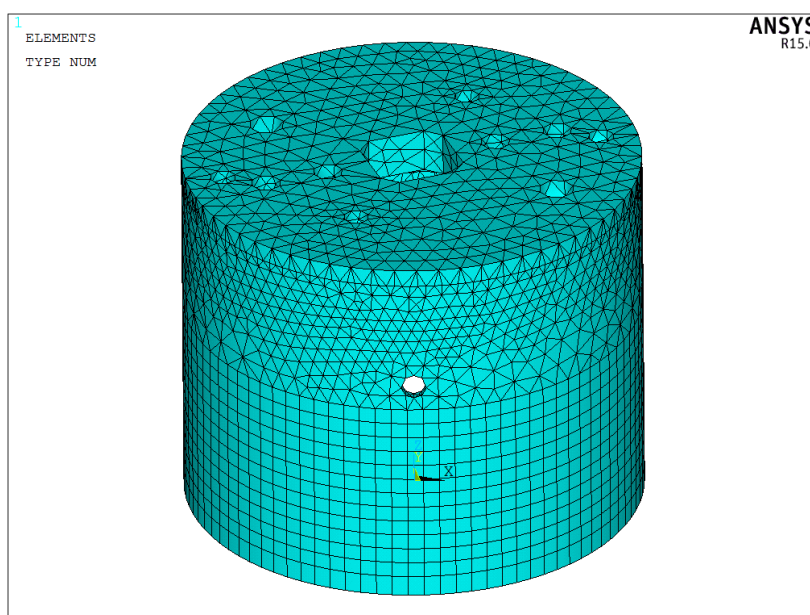


Figure 43 : Vue du maillage de la cloche : éléments SOLID186.

	Porte cloche	Cloche	Volumes fluides
Matériau	Au4G	Fer pur	Fluide MR
Masse volumique (kg.m^{-3})	2790	7860	3050
Module d'Young (GPa)	7,25	203	--
Coefficient de Poisson	0,33	0,285	--
Vitesse du son (m.s^{-1})	--	--	804

Tableau 6 : Propriétés mécaniques pour simulations par éléments finis, configuration « R ».

Les déplacements radiaux sont extraits en chaque nœud sur la partie externe de la cloche à une hauteur de 20 mm. La valeur efficace de ces déplacements est calculée et comparée aux résultats expérimentaux, mesurée sur une ligne de hauteur similaire, en Figure 44 suivant un axe des abscisses linéaire pour une aisance de comparaison. On constate une très bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux, nous observons six modes d'excitation jusqu'à 20 kHz, et une plus forte densité modale au-delà.

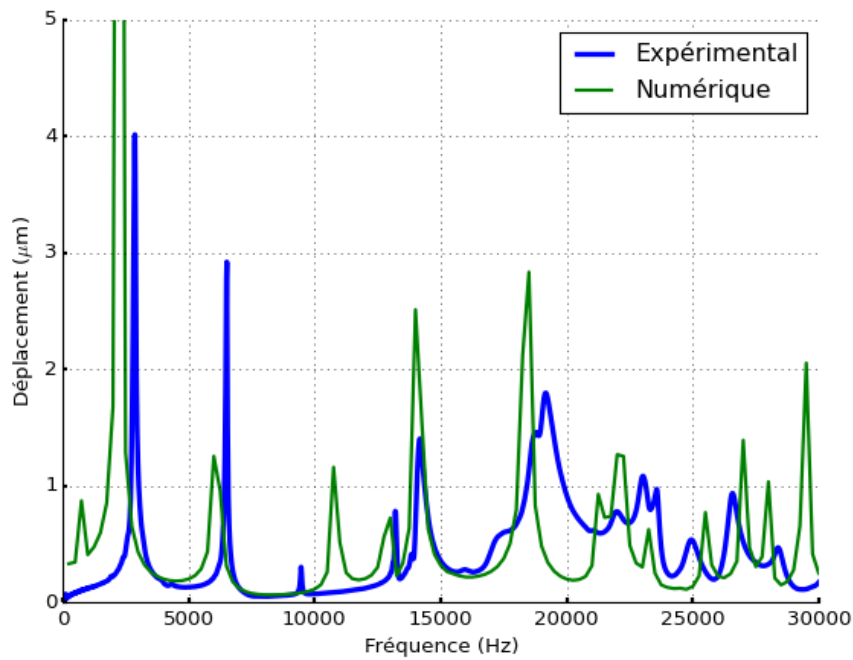


Figure 44 : Configuration « R ». Comparaison numérique (vert)/expérimentale (bleu) pour la cloche à l'air libre.

La Figure 45 représente la déformation spatiale de l'élément cisailant pour une fréquence de 6 kHz. Ce mode correspond au mode expérimental situé à 6,5 kHz (voir Figure 42). Le décalage entre les modes obtenus par modélisation et les modes mesurés expérimentalement peut être induit par le choix des paramètres de simulation (propriétés des matériaux, conditions d'encastrement ...). Une représentation spatiale (plane) de ce mode de déformation est comparée en Figure 46 et Figure 47.

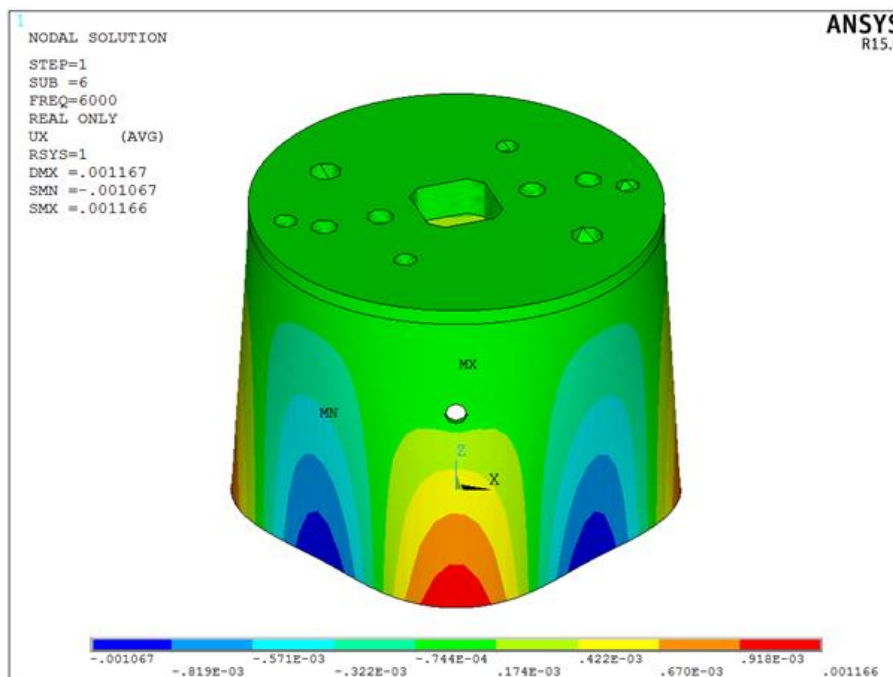


Figure 45. Représentation spatiale du déplacement à 6 kHz pour la cloche non immergée.

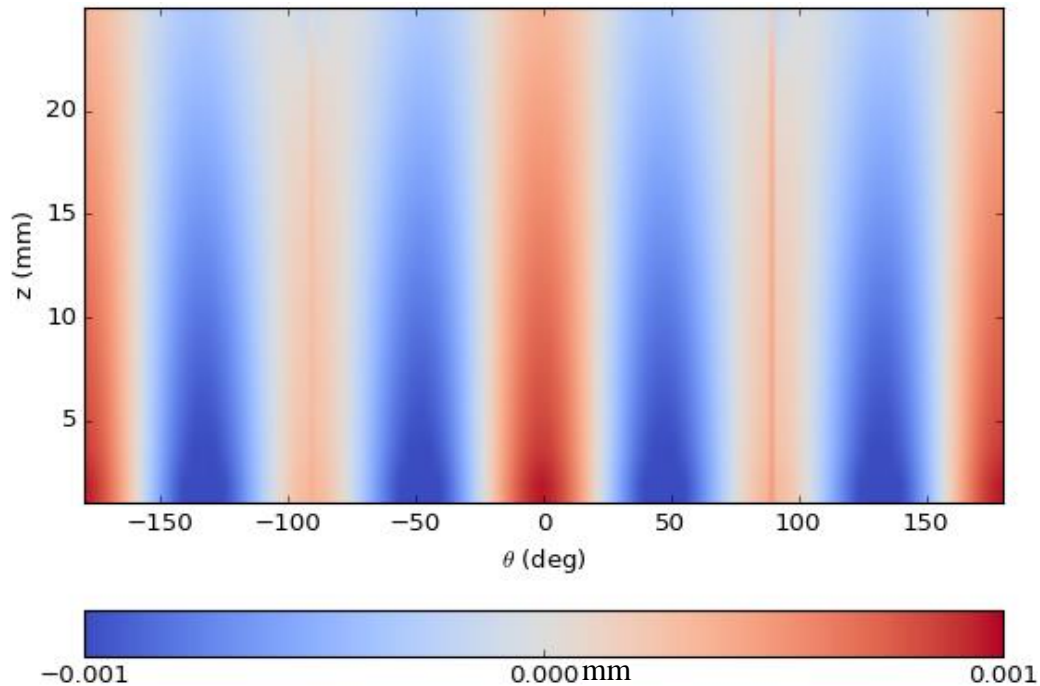


Figure 46 : Simulation numérique. Représentation spatiale de l'amplitude de vibration en millimètres pour une fréquence de 6 kHz.

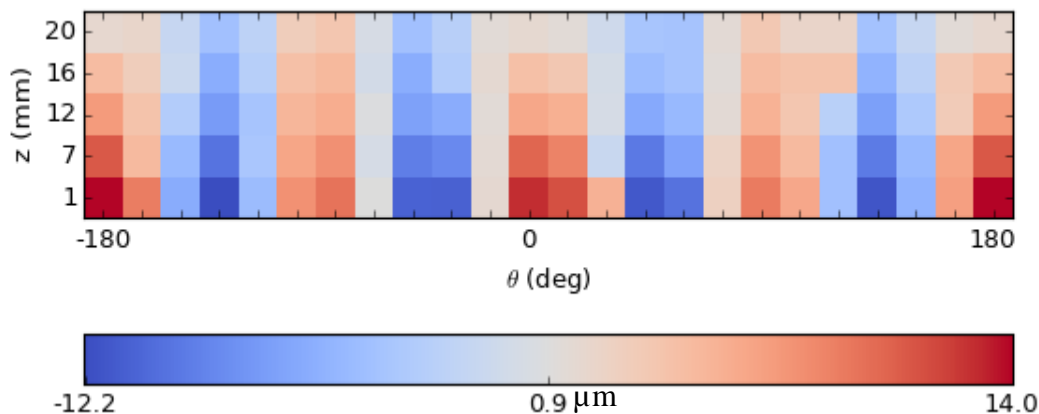


Figure 47 : Mesures expérimentales. Représentation spatiale de l'amplitude de vibration en micromètres pour une fréquence de 6,5 kHz.

Dans la Figure 46, nous remarquons quatre ventres positifs, la présence de deux ventres positifs plus marqués, à 0 et 180 degrés, est liée à la position angulaire de l'actionneur piézoélectrique. Nous observons dans la Figure 47 une concordance dans le nombre de ventres et de nœuds par rapport au résultat obtenu par modélisation. Similairement dans les résultats expérimentaux, nous retrouvons deux ventres plus marqués dans l'axe de l'actionneur, situés à 0 et 180 degrés.

Nous avons donc une bonne correspondance entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques tant pour les modes d'excitation de la structure que sur leurs répartitions spatiales. Ce qui indique que les résultats expérimentaux sont représentatifs du comportement vibratoire de l'élément cisailant à l'air libre.

2.3.3 Influence de l'immersion dans le fluide

2.3.3.1 Mesures expérimentales

Pour mesurer l'influence de l'immersion de l'élément cisailant dans le fluide, nous mesurons sa déformation dans 3 états différents :

- À l'air libre (nommée immersion de 0 mm).
- Pour une immersion à une profondeur de 6 mm.
- Pour une immersion maximale à une profondeur de 12 mm.

Lorsque la cloche est complètement plongée dans le fluide, il n'est pas possible d'effectuer des mesures sur les lignes de mesure les plus basses car elles sont immergées. Les mesures porteront donc uniquement sur la ligne située juste en dessous de l'actionneur piézoélectrique comme représentée en Figure 48.

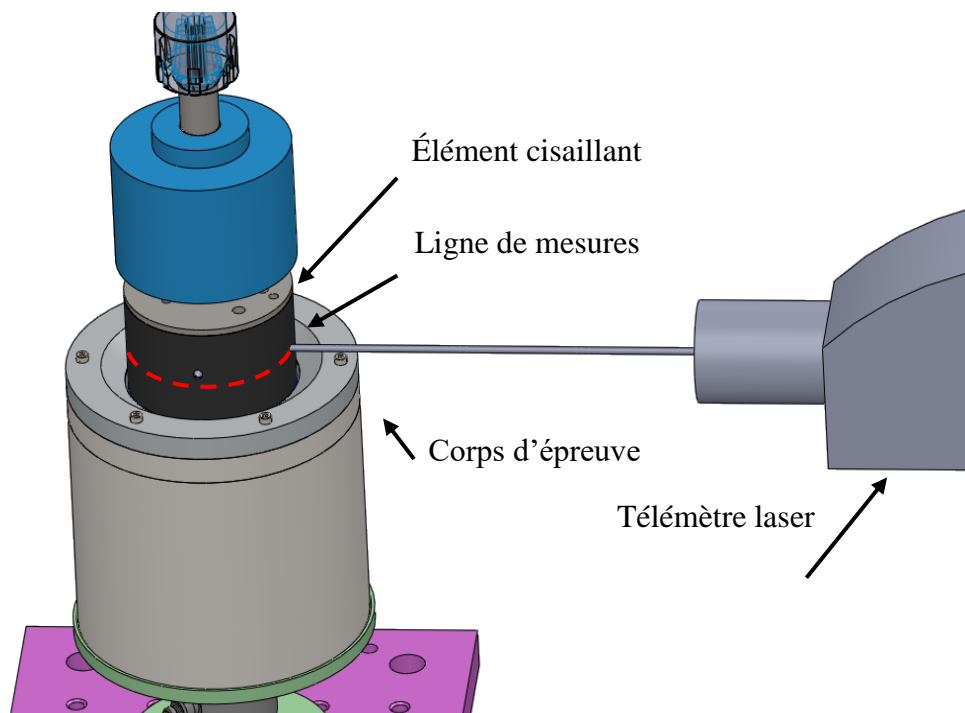


Figure 48 : Mesure de déplacement dans le cas de la cloche immergée.

La Figure 49 illustre les mesures de déplacement obtenues pour les différentes profondeurs d'immersion étudiées :

Avec la présence progressive du fluide, on observe une atténuation complète des deux premiers modes mécaniques (repère A). Ces deux modes sont décalés vers des fréquences plus basses, et leurs amplitudes passent respectivement de $4,0 \mu\text{m}$ et $2,9 \mu\text{m}$ (immersion 0 mm) à une amplitude inférieure à $0,2 \mu\text{m}$ (immersion 12 mm).

Dans la bande fréquentielle comprise entre 15 et 35 kHz (repère B), l'amplitude de déformation est moins impactée par la présence de fluide. Nous mesurons une atténuation du mode principal à 20,1 kHz de $0,3 \mu\text{m}$. De part et d'autre de ce mode, entre 16,5 kHz et 26,9 kHz, les pics de déplacement s'atténuent progressivement en fonction de l'immersion dans le fluide.

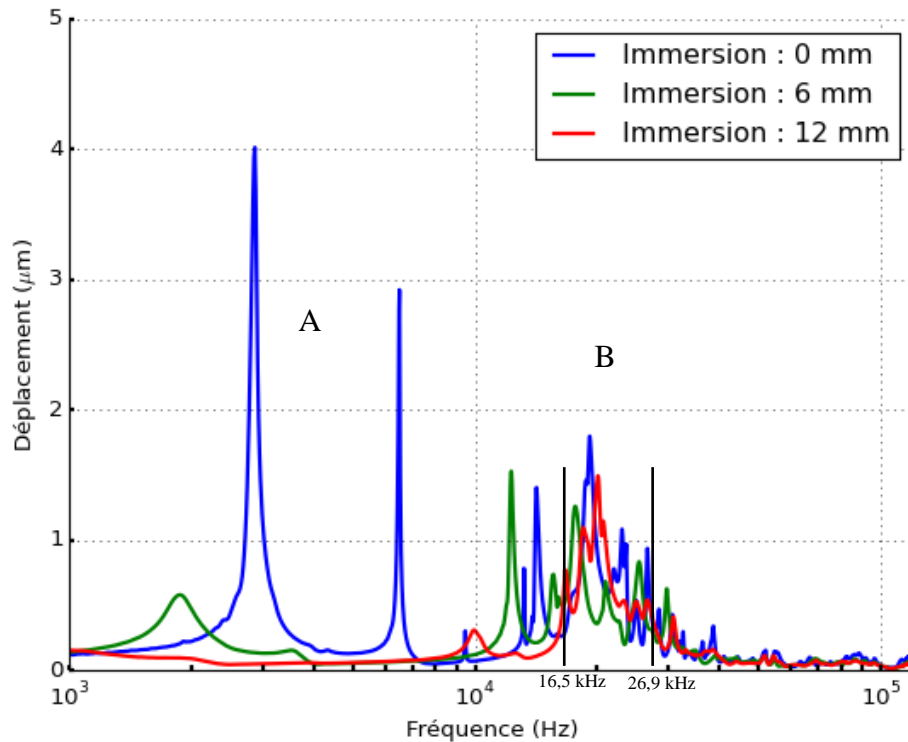


Figure 49 : Influence de l'immersion sur la déformation mesurée. En bleu, la déformation à l'air libre. En rouge, la déformation quand la cloche est plongée dans le fluide (12 mm). En vert, pour une immersion intermédiaire de 6 mm.

2.3.3.2 Confrontation par modélisation

Une simulation par éléments finis dans le cas de l'immersion (12 mm) de la cloche permet de comparer les résultats expérimentaux avec un résultat numérique.

Deux volumes fluides cylindriques de 5 mm d'épaisseur et d'une hauteur de 12 mm sont considérés à l'intérieur et à l'extérieur de la cloche pour modéliser l'effet du fluide. Cette épaisseur de fluide est utilisée, car des difficultés à faire converger les calculs ont été rencontrées lorsque l'on considère une épaisseur de fluide de 1 mm (utilisé sur le banc expérimental).

Les volumes fluides sont maillés avec des éléments « acoustiques fluides » FLUID30, qui ont pour seul degré de liberté la pression acoustique. Les éléments FLUID30 en contact avec le corps de la cloche ont l'option « structure présente » activée afin de disposer également de degré de liberté U_x , U_y et U_z . Des zones d'interaction fluide-structure sont définies sur les nœuds communs au corps de la cloche et aux volumes fluides. La Figure 50 représente le maillage effectué.

Nous reprenons des conditions similaires à celle effectuée précédemment, une longueur caractéristique des éléments à 2,5 mm et les propriétés mécaniques exposées dans le Tableau 6. Il faut noter que dans cette simulation nous ne prenons pas l'amortissement en compte. De ce fait, l'amplitude des résonances n'est pas pertinente pour la comparaison entre les résultats numérique et expérimentale.

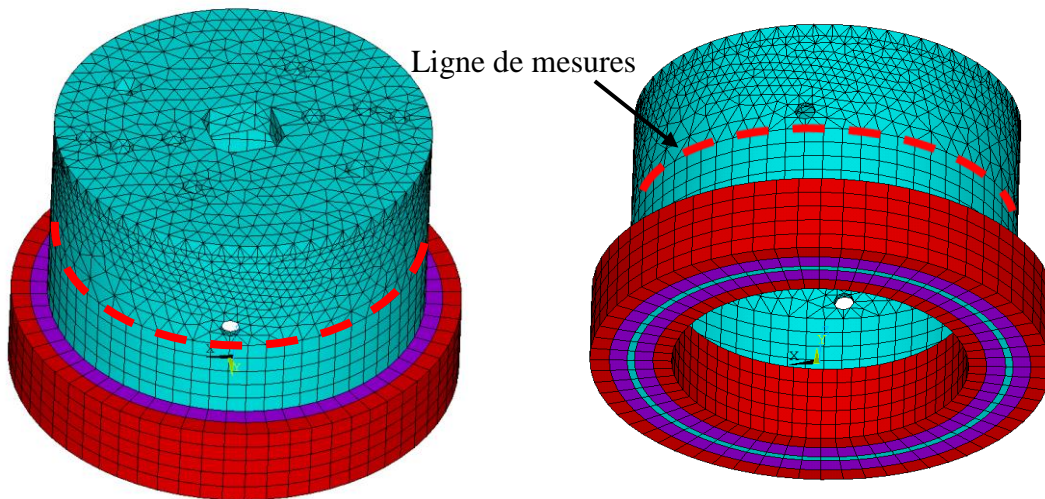


Figure 50 : Vues du maillage de la cloche et des couches fluides. En bleu : éléments SOLID186 ; en violet : éléments FLUID30 option « structure présente » ; en rouge : éléments FLUID30 option « structure absente ».

La Figure 51 expose la comparaison des résultats obtenus numériquement et expérimentalement suivant un axe des abscisses linéaire. Malgré un mode à environ 4,5 kHz donné par le résultat numérique, non retrouvé expérimentalement, nous constatons une concordance entre les résultats numériques et expérimentaux sur la position des pics de résonance, particulièrement au-dessus de 10 kHz.

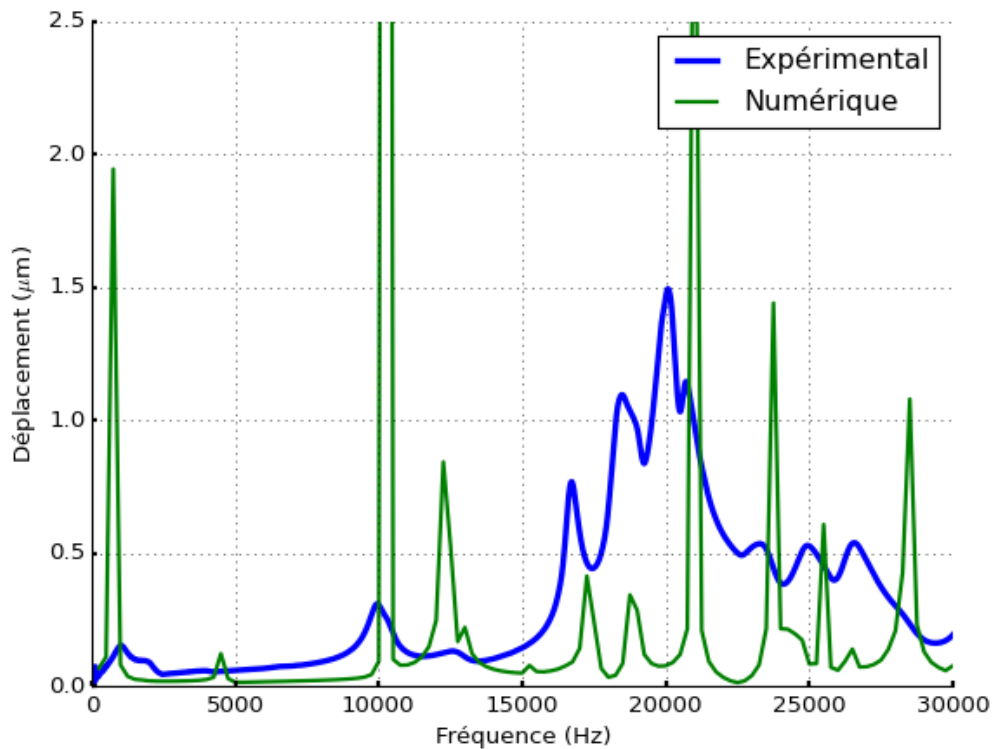


Figure 51 : Configuration « R ». Comparaison numérique (vert)/expérimentale (bleu) pour la cloche immergée dans 12 mm de fluide.

2.3.4 Influence du champ magnétique

On se place maintenant dans une configuration dans laquelle l'élément cisailant est complètement immergé et en présence d'un champ magnétique. On mesure donc son influence sur les vibrations de la cloche, ceci pour plusieurs valeurs de courant bobine jusqu'à 1,2 A, soit un champ magnétique d'environ 750 mT. On représente en Figure 52 la déformation mesurée à partir de 9 kHz sur la cloche pour deux courants distincts ainsi que celle sans champ magnétique. Pour une fréquence inférieure à 9 kHz nous n'avons pas constaté d'évolution suite au champ magnétique, la déformation de l'élément cisailant reste donc faible (inférieur à 0,2 μm).

Avec la présence de champ magnétique dans le fluide, l'amplitude de déformation a tendance à augmenter. Nous mesurons une différence d'amplitude de 0,89 μm entre la mesure avec un champ magnétique de 750 mT et sans champ magnétique. À première vue, ce n'est pas le résultat que nous attendions. Nous avions anticipé qu'en présence d'un champ magnétique et donc d'une plus forte cohésion des chaînes de particules dans le fluide, l'amplitude de la déformation diminuerait.

Cependant en considérant que le banc de test impose en partie supérieure de la cloche une liaison fixe, et que le champ magnétique rigidifie la partie immergée de l'élément cisailant dans le fluide, il semble alors possible de comparer ce phénomène avec celui d'une poutre encastree (voir Figure 53). Dans le cas de l'application du champ magnétique, l'extrémité libre de la poutre devient amortie, donc plus rigide et résiste donc au mouvement. La déformation n'est donc plus maximale au point le plus proche de la partie libre de l'élément cisailant, mais maximale au milieu de la poutre. C'est par ailleurs dans cette zone, correspondant à la partie non contrainte de la cloche, que la mesure de déplacement est effectuée, la partie inférieure et immergée de la cloche n'étant pas accessible au vibromètre laser.

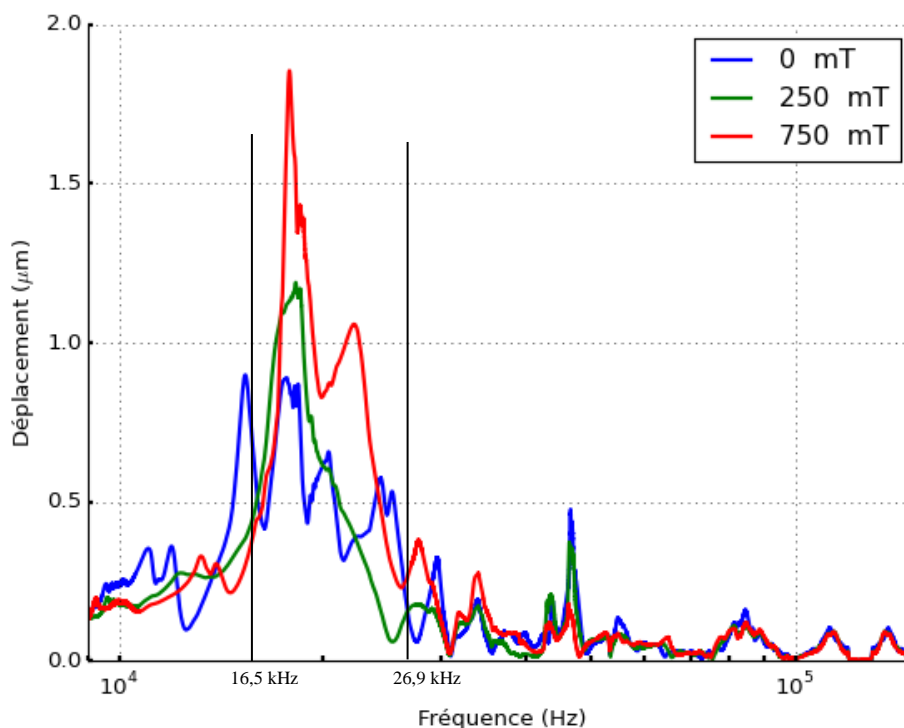


Figure 52 : Influence du champ magnétique sur le fluide 132 DG de Lord.

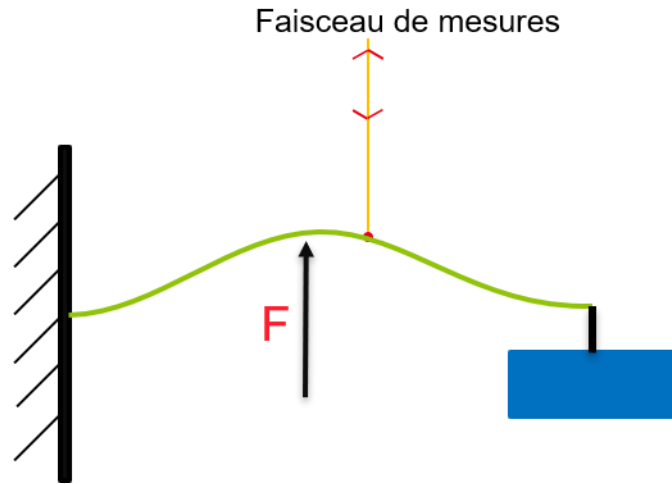


Figure 53 : Représentation schématique d'une poutre encastrée dont le mouvement est amorti en son bout libre

2.3.5 Bilan des mesures vibratoires

Dans l'air nous avons constaté la présence de modes importants ayant une amplitude d'environ $7 \mu\text{m}$ (repère A sur Figure 42) ainsi qu'une zone de plus forte densité modale, mais à plus faible amplitude, amplitude maximale $2,1 \mu\text{m}$ à $23,7 \text{ kHz}$ (repère B sur Figure 42).

Suite à l'immersion de l'élément cisailant dans le fluide, nous avons constaté une atténuation majeure des modes principaux (repère A sur la Figure 49). La déformation persiste entre $16,5 \text{ kHz}$ et $26,9 \text{ kHz}$ (repère B sur la Figure 49).

Ces résultats sont appuyés par une simulation par éléments finis montrant des modes similaires se concordant aux résultats expérimentaux. Nous avons pu voir que la présence du fluide modifie fortement le comportement vibratoire de la cloche comme le représente la Figure 54 à 6 kHz . Les résultats numériques nous confortent dans la pertinence de la méthode de mesures expérimentales, liée au comportement vibratoire de l'élément cisailant, et dans la constatation que le banc de test n'intervient pas et ne perturbe pas la bande de fréquence qui nous intéresse.

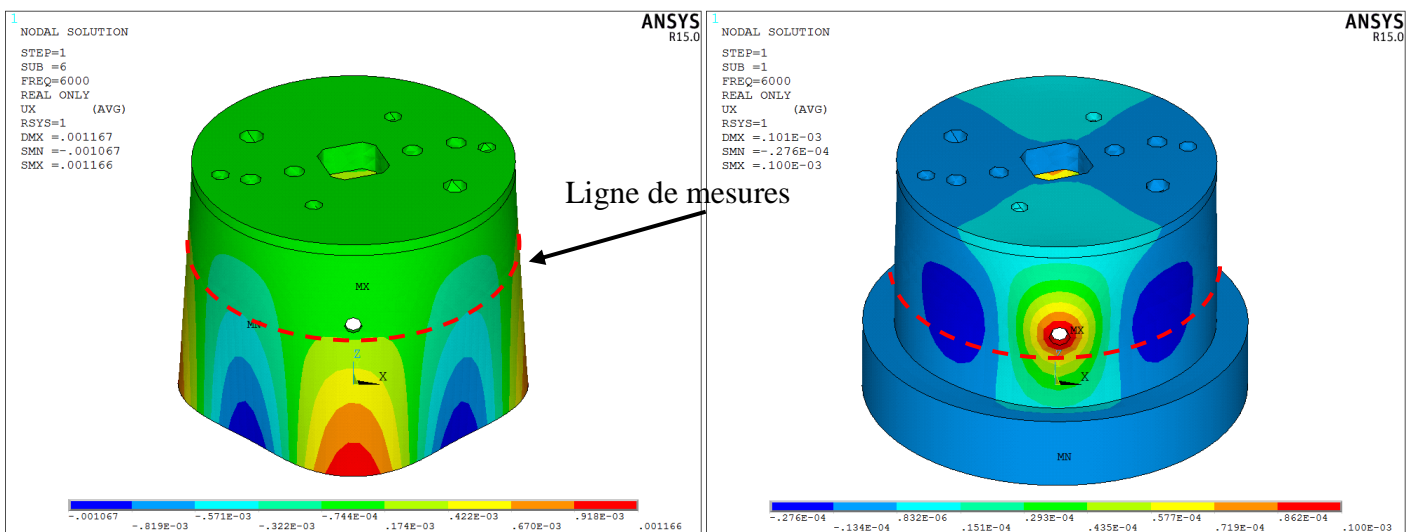


Figure 54 : Représentation spatiale du déplacement à 6 kHz pour (à gauche) la cloche non immergée et (à droite) la cloche immergée dans 12 mm de fluide.

Avec la mise en place du champ magnétique, l'amplitude de déformation croît avec le champ magnétique. Nous mesurons au maximum une déformation de $1,9 \mu\text{m}$ à $17,7 \text{ kHz}$ pour un champ d'induction B de 750 mT . Le phénomène étant petit devant les grandeurs en présence (taille des particules : $10 \mu\text{m}$, gap : $1 \text{ mm} \dots$), nous sommes dans un domaine où les perturbations induites par l'environnement extérieur (entre autres bruits de mesures) peuvent être non négligeables par rapport au phénomène observé.

Dans tous les résultats du vibromètre avec champ magnétique, après une fréquence de 50 kHz , nous remarquons que l'amplitude des vibrations est faible, inférieure à $0,16 \mu\text{m}$. Donc pour limiter ces effets indésirables, nous réduirons le cas échéant le cadre de l'étude.

2.4 Variations de la contrainte de cisaillement du fluide

Dans cette partie, nous souhaitons voir comment les vibrations influent sur le couple résistant généré sur la cloche en rotation par le cisaillement du fluide en présence de champ magnétique. Les vibrations sont transmises dans le fluide par l'intermédiaire de la structure mécanique de l'élément cisailant actionné par l'actionneur piézoélectrique dans la configuration radiale « R ».

Dans un premier temps, nous allons regarder quelles sont les gammes de fréquences de vibration qui conduisent à une modification du couple de cisaillement. Dans un second temps, nous chercherons à distinguer si l'influence remarquée peut être due à la seule viscosité du fluide porteur, ou si cela nécessite une structure de particules ordonnée par la présence d'un champ magnétique.

2.4.1 Balayage fréquentiel

Dans cette expérimentation, nous chercherons à maximiser l'influence des vibrations sur le fluide. À cet effet, nous choisissons une valeur d'amplitude du signal sinusoïdal d'excitation de l'actionneur piézoélectrique proche de sa valeur maximale, à savoir 10 V crête. Un balayage en fréquence de ce signal sera généré, afin de couvrir la même gamme d'étude que précédemment, de 0 à 120 kHz . La durée d'excursion fréquentielle est fixée à 3 s .

Le courant dans la bobine sera fixé à $0,5 \text{ A}$, le champ magnétique induit dans le fluide est alors de 315 mT , ce qui correspond à 32% du champ maximal avant saturation de la contrainte de cisaillement que peut fournir le fluide MRF 132CG. Dans la courbe du constructeur (voir Figure 6) montrant la relation entre la contrainte de cisaillement en fonction du champ d'excitation dans le fluide, on se situe alors dans la partie linéaire de comportement du fluide.

La vitesse de rotation de l'élément cisailant sera également constante et fixée à $0,5 \text{ tr/s}$, ce qui correspond à une vitesse de cisaillement pour le fluide de 80 s^{-1} .

Les paramètres d'expérience sont récapitulés dans le Tableau 7.

Paramètres	Valeurs
Vitesse de cisaillement	80 s^{-1}
Champ magnétique	315 mT
Tension crête appliquée à l'actionneur piézoélectrique	10 Volts
Balayage fréquentiel appliqué à l'actionneur piézoélectrique	0 à 120 kHz en 3 secondes

Tableau 7 : Paramètres d'expérience utilisés pour la mesure de couple résistant lors d'un balayage fréquentiel vibratoire.

La Figure 55 représente la variation de couple observée en fonction du temps lors du séquençement de l'expérience. Une fois passé le temps d'établissement des conditions expérimentales correspondant aux grandeurs de type champ magnétique et vitesse de cisaillement (de 0 à 4 s environ sur le graphique), on retrouve l'activation de l'actionneur piézoélectrique, entre 5 s et 8 s, représentées par les deux losanges sur le graphique. Pendant cette phase spécifique, on distingue des variations dans le couple résistant mesuré, ces variations étant plus ou moins importantes suivant l'évolution de la fréquence d'excitation de l'actionneur piézoélectrique.

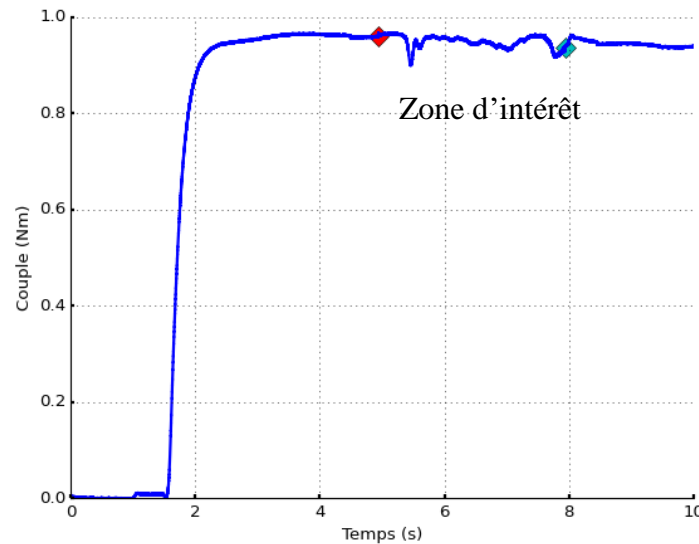


Figure 55 : Mesure du couple résistant en fonction du temps lors de l'application d'un champ d'induction de 315 mT et un balayage fréquentiel de 0 à 120 kHz d'amplitude 10 V de l'actionneur piézoélectrique à une vitesse de cisaillement de 80 s⁻¹.

La Figure 56 présente un focus sur la zone d'intérêt, entre 5 et 8 s, lors de l'activation de l'actionneur piézoélectrique. Trois pics principaux de diminution du couple sont observés relatifs aux fréquences d'excitation : 20,9 kHz (repère A dans Figure 56), 83,5 kHz (repère B) et 114 kHz (repère C). Pour le pic le plus important à 20,9 kHz, la réduction de couple mesurée est de 51,2 mNm soit 5,4 % de variation par rapport au couple non perturbé.

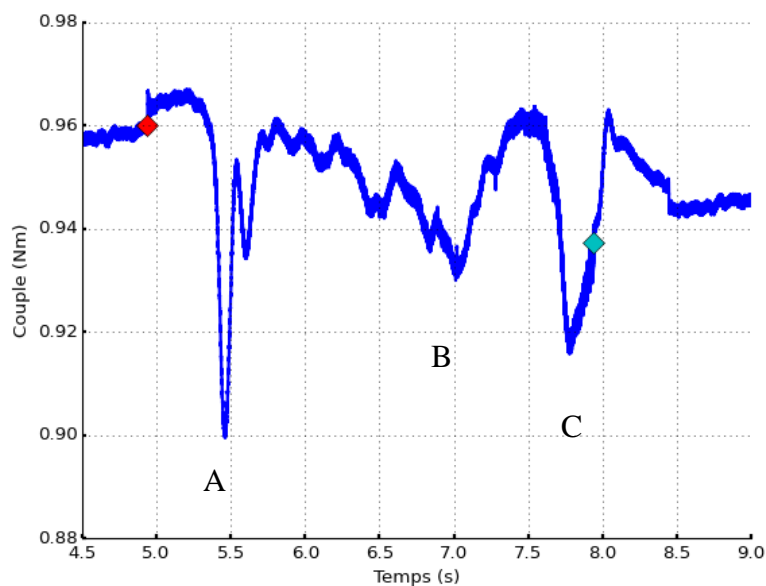


Figure 56 : Couple perturbé par l'actionneur piézoélectrique. Zoom sur la zone d'intérêt.

Par la suite et pour faciliter les comparaisons, on choisit de représenter la variation en pourcentage du couple, $C_{\%}$, en présence de vibration par rapport au couple sans vibration. Soit l'équation (26) ci-dessous reprend le calcul de $C_{\%}$:

$$C_{\%} = \frac{C_0 - C_{vib}}{C_0} \quad (26)$$

Avec $C_{\%}$ la variation de couple en fonction du couple mesuré C sans vibration et du couple C_{vib} avec vibrations.

2.4.2 Lien avec les modes mécaniques

Dans la section précédente portant sur la mesure des vibrations de l'élément cisailant, nous avons établi les relevés de déplacement de la cloche dans différentes situations : à l'air libre (2.3.2), en présence de fluide (2.3.3), en présence de champ magnétique (2.3.4), et ceci en fonction de la fréquence d'excitation de l'actionneur piézoélectrique. Il est alors intéressant de chercher à mettre en correspondance les profils de déplacements observés avec les profils de variation de couple obtenus précédemment.

Nous reprenons donc comme point de référence la courbe de déplacement de l'élément cisailant obtenue pour une profondeur d'immersion de 12 mm avec un champ magnétique appliqué de 315 mT. Cette mesure est superposée au relevé de variation du couple résistant obtenu avec le même champ magnétique et présentée en Figure 57.

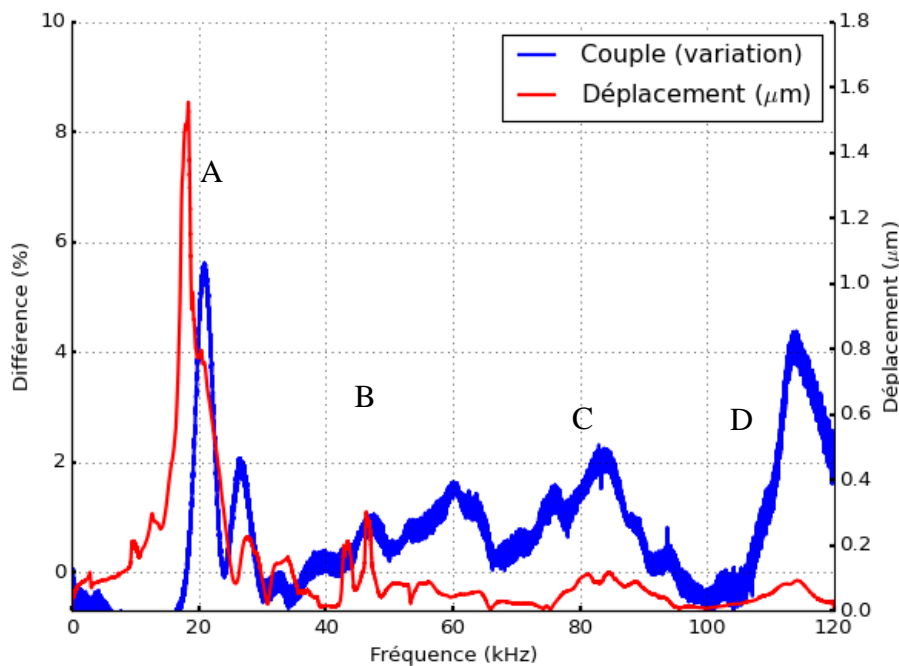


Figure 57 : Représentation de la variation du couple (à 80 s^{-1}) en fonction de la fréquence ainsi que la déformation pour d'un champ d'induction de 315 mT couple et une tension de 10 V.

Au vu de la Figure 57, on remarque que le pic de diminution du couple à 20,9 kHz semblerait effectivement correspondre au pic de déformation de l'élément cisailant à 18,4 kHz (repère A sur la figure). Le décalage fréquentiel entre les deux pics associés peut être dû au fait de conditions de mesures différentes. En effet, les mesures de déformations sont prises sans rotation de l'éléments cisailant alors que cela n'est pas le cas pour la mesure du couple. C'est seulement durant cette dernière, que les particules ferromagnétiques s'alignent sous forme de

chaînes continuellement rompues par le mouvement de rotation augmentant ainsi la rigidité de la cloche immergée dans le fluide.

En revanche, les pics de déformation obtenus aux fréquences de 43,3 kHz et 46,5 kHz ne se retrouvent pas de manière si marquée sur la variation de couple, ainsi que totalement absente dans le cas de la fréquence de 60 kHz (repère B) qui correspond cependant à une variation de couple. Enfin les variations de déformation spectralement étalées, aux environs de 80 kHz et 115 kHz (repères C et D) sembleraient correspondre aux variations de couple observées vers ces mêmes fréquences, mais dans un rapport d'amplitude moindre. À ces deux fréquences, nous constatons une chute importante de la tension d'alimentation de l'actionneur piézoélectrique, d'environ 30 %. Cette chute explique le fait que les deux modes soient moins marqués dans la Figure 57.

On peut en déduire qu'il y a un phénomène de couplage intervenant entre les variations de couple observées et les vibrations mécaniques de l'élément cisailant. Cet effet dynamique pourrait être induit du comportement des particules dans le fluide. On a vu, dans l'état de l'art [137]–[139], que les fluides MR permettent une transmission d'une onde de pression. Les particules ferromagnétiques contenues dans le fluide sont donc susceptibles de se mettre à vibrer et de se déplacer les unes par rapport aux autres. Avec la vitesse de rotation de l'élément cisailant, les chaînes de particules sont cassées puis se reconstruisent. Durant la phase de vibrations, les chaînes sont à la fois soumises à cette oscillation et au cisaillement du fluide.

L'élément cisailant est déformé de manière plus importante lors de son mode de résonance mécanique, ce qui implique une diminution de couple relativement marquée (cas du repère A sur la Figure 57). Le déplacement fréquentiel observé pourrait être lié à la contrainte mécanique supplémentaire appliquée à la cloche par le fluide lors de sa rotation, avec pour effet un déplacement de son mode de résonance vers une fréquence légèrement plus élevée que celle que l'on a pu mesurer préalablement (en présence de champ magnétique, mais sans rotation de la cloche) dans la section 2.3.4 de ce chapitre. Malheureusement la caractérisation des modes de vibration de l'élément cisailant étant obtenu par des mesures de déplacement avec un vibromètre laser, il ne nous était pas possible d'effectuer ces dernières alors que la cloche était en rotation. Enfin, on notera que les vibrations sont toujours présentes en dehors des modes de résonance et peuvent permettre des perturbations qui vont gêner l'établissement des chaînes de particules durant le cisaillement du fluide et donc impacter le couple mesuré (cas des repères C et D).

2.4.3 Effet du champ magnétique

Dans la partie précédente, on a pu lier la variation de couple avec les vibrations dans le cas d'un champ magnétique non nul. Cela implique la formation de chaînes de particules ferromagnétiques dans le fluide MR. On peut alors se poser la question si la diminution de couple mesurée est uniquement due à la présence d'un arrangement de particules dans le fluide.

Ne pas avoir d'arrangement spécifique dans le fluide revient alors à étudier l'évolution du couple résultant lié à la viscosité intrinsèque du fluide porteur en l'absence de champ magnétique. Pour étudier ce couple visqueux, nous étudions le mode vibratoire le plus prépondérant, à 18,4 kHz dans la partie précédente. Pour cela, on effectue un balayage fréquentiel des vibrations de 0 kHz à 40 kHz, avec une amplitude de 10 V pour l'actionneur piézoélectrique, sans champ magnétique et avec une vitesse de cisaillement de 80 s^{-1} .

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

Le balayage est effectué sur une bande de fréquence restreinte, par rapport à l'expérience précédente, et en 8 secondes pour éviter un possible effet dynamique induit par les vibrations. Les paramètres de l'expérience sont repris en Tableau 8.

Paramètres	Valeurs
Vitesse de cisaillement	80 s^{-1}
Champ magnétique	0 T
Tension crête appliquée	10 Volts
Balayage fréquentiel	0 à 40 kHz en 8 secondes

Tableau 8 : Paramètre de l'expérience : Mesure de l'effet des vibrations avec et sans champ magnétique.

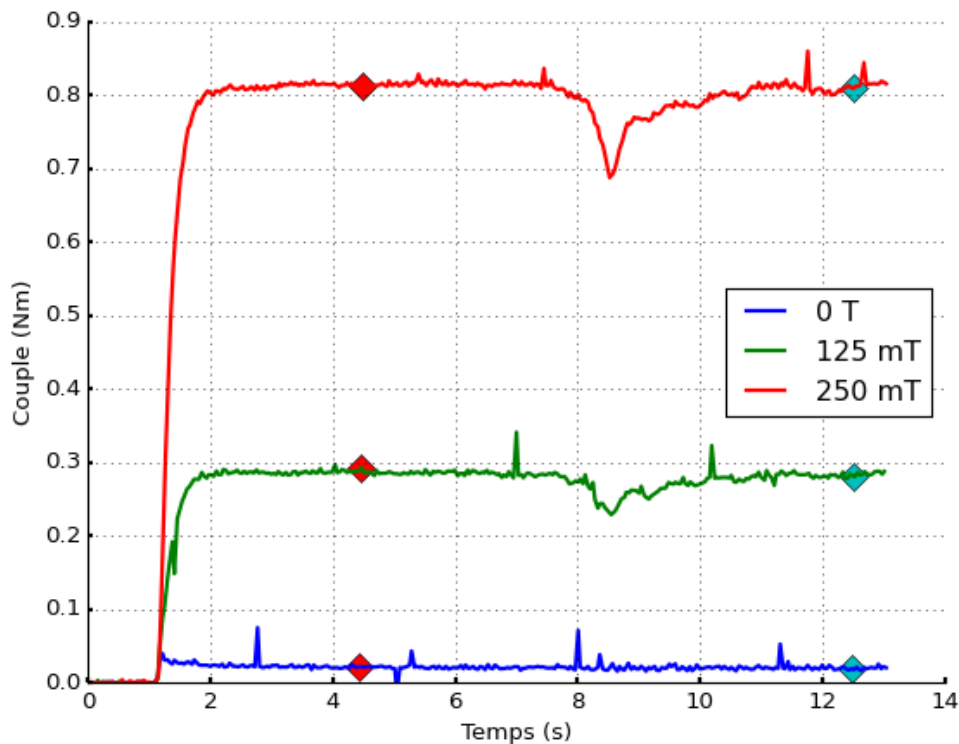


Figure 58 : Mesure de couple pour trois champ magnétique et pour une vitesse de cisaillement de 80 s^{-1} .

On représente en Figure 58 la mesure du couple résistant ainsi observé en fonction du temps (courbe bleue). En l'absence de champ magnétique, on ne remarque sur le graphique aucune influence des vibrations sur le couple mesuré. À titre de comparaison, on représente également les mesures de couple obtenues en présence de champ magnétique, pour un champ magnétique de 125 mT (courbe verte) et 250 mT (courbe rouge) avec les mêmes caractéristiques de balayage fréquentiel pour les vibrations. Contrairement au couple visqueux à vide, les couples mesurés avec la présence d'un champ magnétique présentent des variations relatives à l'application des vibrations. On notera par ailleurs que cette diminution est maximale à 20,2 kHz ce qui correspond aux observations faites dans les expériences précédentes. Pour un champ magnétique à 250 mT, nous mesurons une variation de couple de 0,126 Nm soit un écart de 15 % du couple sans vibrations.

Ce résultat clarifie les interactions entre le fluide et les vibrations. Le fait que le couple visqueux ne soit pas impacté montre que les caractéristiques du fluide porteur ne sont pas impactées de manière notable par les vibrations. Cela semble confirmer que ce sont plutôt les structures des particules ferromagnétiques ordonnées par le champ magnétique qui sont perturbées et qui induisent une diminution du couple de cisaillement.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthodologie pour étudier l'impact de vibrations mécaniques sur les propriétés d'un fluide MR. L'analyse du fluide peut se faire de deux manières : l'étude de la structure des microchaînes ou l'étude du comportement résultant du cisaillement des chaînes à savoir l'évolution de la contrainte de cisaillement du fluide MR.

À ce titre, nous avons développé un banc de test permettant de mettre en œuvre le fluide MR dans un mode de cisaillement. L'élément cisailant en interaction avec le fluide est réalisé sous la forme d'une cloche en matériau ferromagnétique dans laquelle nous avons inclus un actionneur piézoélectrique permettant la génération de déformations mécaniques sur la cloche. Ce banc de test nous a permis de maîtriser un certain nombre de grandeurs déterminantes dans la mise en œuvre du fluide MR, comme le champ magnétique appliqué au niveau de l'élément cisailant ou la vitesse de cisaillement du fluide. La grandeur observée du fluide MR susceptible d'être impactée par la présence de vibrations mécaniques est la contrainte de cisaillement développée par le fluide, qui est alors mesurée grâce à un capteur de couple.

Une première étape a consisté à observer et caractériser en termes d'amplitude, de fréquences et de répartition spatiale les déformations obtenues sur l'élément cisailant par l'actionneur piézoélectrique dans différentes configurations : profondeur d'immersion dans le fluide et amplitude du champ magnétique appliqué, ceci pour une vitesse de cisaillement nulle.

À l'aide d'une modélisation par éléments finis, nous avons mis en regard les résultats expérimentaux et les résultats de simulations. Ces résultats montrent une concordance sur les modes de déformation de la cloche à l'air libre ainsi qu'immergée dans le fluide. Cette comparaison nous conforte dans la pertinence des mesures effectuées sur le banc de test par vibromètre laser.

Nous avons alors observé une atténuation de l'amplitude des modes de vibration de la cloche lorsque cette dernière est en interaction avec le fluide accompagné d'un décalage fréquentiel des modes de déformation vers de plus basses fréquences.

Nous constatons aussi qu'en fonction de l'intensité du champ magnétique appliqué, l'amplitude des déformations observées est croissante. Ce comportement a été attribué à une modification des contraintes mécaniques appliquées à la cloche par le fluide MR par le biais de la rigidification de la partie immergée de la cloche.

Suite à cette analyse des déformations mécaniques de la cloche, nous avons dans une seconde étape cherchée à caractériser l'impact de ces déformations sur la contrainte de cisaillement développée par le fluide MR. Les mesures de couple résistant nous indiquent alors que les vibrations perturbent le comportement du fluide et font ainsi décroître la contrainte de cisaillement. Avec un faible champ magnétique, de l'ordre de 22 % du champ maximal avant saturation de la contrainte de cisaillement du fluide, nous obtenons jusqu'à 15 % de diminution du couple résistant. A fort champ magnétique, l'effet est moins prépondérant. Nous avons enregistré une diminution maximale de couple inférieur à 6 %.

Grâce à un balayage fréquentiel vibratoire, nous avons mis en correspondance les pics les plus marqués de diminution de couple résistant avec les pics modaux de déformation mécanique de la cloche et noté un faible décalage fréquentiel dans cette mise en correspondance, attribuable à la modification des contraintes mécaniques appliquées sur la cloche lorsque l'on applique un champ magnétique.

Par la mesure du couple visqueux, sans champ magnétique, mais toujours en présence de vibrations mécaniques, nous ne mesurons aucune diminution de couple. On peut alors prétendre

que ce sont les arrangements des particules ferromagnétiques dans le fluide qui seraient perturbés par les vibrations. Ces perturbations peuvent être localisées soit au niveau de l'interface avec l'élément cisailant, induit par un effet de lubrification acoustique, soit au cœur même des chaînes de particules ferromagnétiques par la transmission de l'onde mécanique dans le fluide. La contribution de ces deux hypothèses nécessite d'investiguer des changements d'état dans la microstructure du fluide et reste à être étudiée et quantifiée dans des travaux qui dépassent le cadre de cette thèse.

Nous concluons que la contrainte de cisaillement d'un fluide MR est impactée par la présence de vibrations mécaniques. Cette dépendance est fonction de paramètres bien définis que l'on note : la vitesse de cisaillement du fluide, le champ magnétique et les grandeurs liées à l'excitation vibratoire : fréquence et amplitude.

Chapitre 3

Effet de la direction des vibrations

Table des matières

3.1 Introduction.....	62
3.2 Trois directions de vibrations	63
3.2.1 Configuration « R »	64
3.2.2 Configuration « Z »	65
3.2.3 Configuration « θ ».....	66
3.3 Mesures vibratoires.....	67
3.3.1 Les vibrations à l'air libre	68
3.3.2 Immersion dans le fluide magnéto-rhéologique.....	71
3.3.3 Application d'un champ magnétique.	76
3.3.4 Discussion	78
3.4 Couple des configurations vibratoires	80
3.4.1 Influence des modes vibratoires	81
3.4.2 Influences paramétriques.....	84
3.5 Conclusion.....	89

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé l'influence des vibrations sur le fluide Magnéto-Rhéologique (MR). Nous avons mesuré lors de la présence de vibrations, dans certains cas, une diminution du couple dans le fluide. Cette diminution est liée à la présence d'un arrangement de particules dans le fluide. Lors des expériences, les vibrations étaient dirigées dans le sens radial comparé à l'élément cisailant le fluide, un cylindre creux.

Ce chapitre adresse la question suivante : dans quelle mesure la direction de vibrations a-t-elle une influence sur la variation des propriétés du fluide ? Nous utiliserons, comme dans le chapitre précédent, le fluide MR 132DG de LORD. Pour cela, nous mettons en place trois configurations de vibrations, suivant les axes d'un référentiel cylindrique.

Dans un premier temps, suivant les trois configurations de vibrations, nous étudions la déformation de l'élément cisailant en présence de fluide et de champ magnétique. De cette étude, nous souhaitons lister l'ensemble des points d'intérêt des configurations vibratoires.

Dans un second temps, nous étudions la correspondance entre la diminution de couple et les points d'intérêt de la déformation de l'élément cisailant. Puis, nous cherchons à trouver les paramètres qui permettent une influence la plus importante sur le couple. L'influence est étudiée suivant les trois paramètres influant sur le fluide : la vitesse de cisaillement, le champ magnétique et l'amplitude de la déformation.

3.2 Trois directions de vibrations

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié la configuration dite « R », où les vibrations sont perpendiculaires à la surface de l'élément cisailant. Pour étudier l'interaction entre les vibrations et le fluide, nous avons élargi l'étude à plusieurs directions de vibrations.

Plus précisément, on regarde l'influence de la direction de vibration en fonction de paramètres régissant le fluide : le champ magnétique et le cisaillement. Dans un référentiel cylindrique centré sur l'axe de la cloche, le champ magnétique a une direction radiale et le cisaillement du fluide sur une direction suivant l'angle θ . Nous avons donc trois directions combinant les deux précédemment citées.

Les trois directions sont représentées dans la Figure 59 et le Tableau 9. Dans cette section, nous présentons une à une ces configurations.

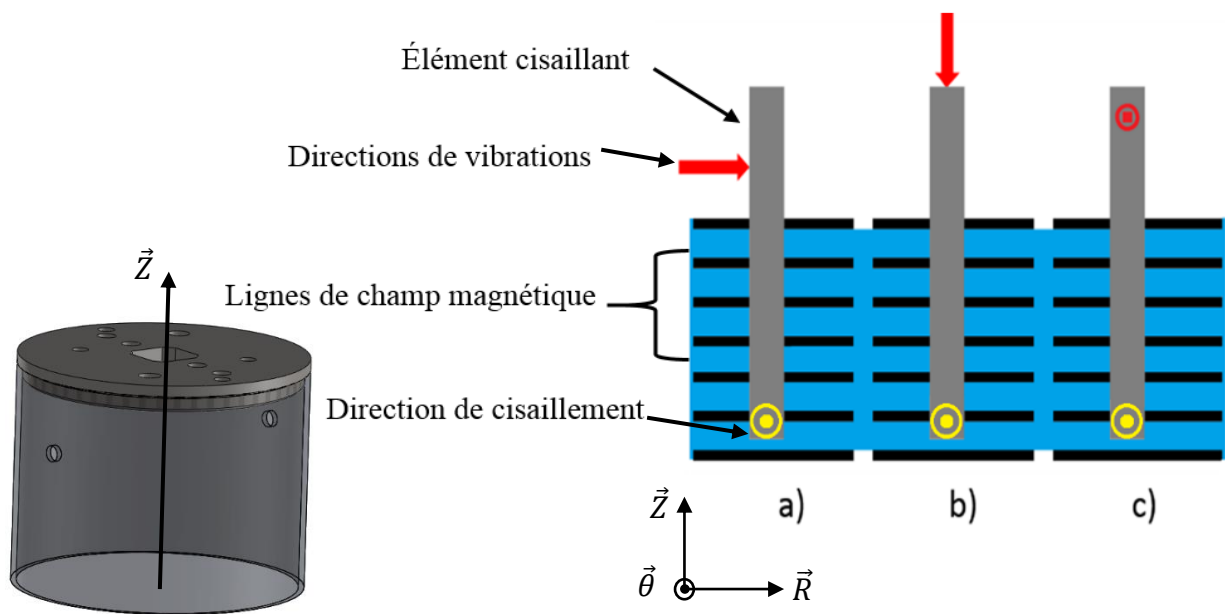


Figure 59 : Représentation schématique des configurations de vibrations.
 a) Configuration « R ». b) Configuration « Z ». c) Configuration « θ ».

	Configuration « R »	Configuration « Z »	Configuration « θ ».
Champ magnétique	Parallèle	Perpendiculaire	Perpendiculaire
Cisaillement	Perpendiculaire	Perpendiculaire	Parallèle

Tableau 9 : Direction des configurations au regard de la direction du champ magnétique et de la direction de cisaillement en coordonnée cylindrique.

3.2.1 Configuration « R »

La configuration « R » est la configuration dont la direction de vibrations est radiale. Cette direction est perpendiculaire à la direction de cisaillement et parallèle à la direction du champ magnétique.

Dans le chapitre précédent, nous avons utilisé cette configuration pour décrire les protocoles expérimentaux ainsi qu'effectué de premières expériences portant sur la variation de couple suite à des vibrations. Dans ce chapitre, nous conservons cette configuration pour pouvoir approfondir les résultats qu'il est possible d'obtenir ainsi que la comparer aux autres configurations. La Figure 60 représente l'intégration et le couplage de l'actionneur piézoélectrique à la structure grâce à deux poutres rigides.

La mesure de l'élément cisailant peut être effectuée sur toute la surface. Cependant du fait de son immersion dans le fluide, nous ne traiterons que la ligne de mesure la plus proche de l'actionneur piézoélectrique soit la ligne supérieure indiquée dans la Figure 60. Cette ligne est la seule accessible au vibromètre à effet Doppler.

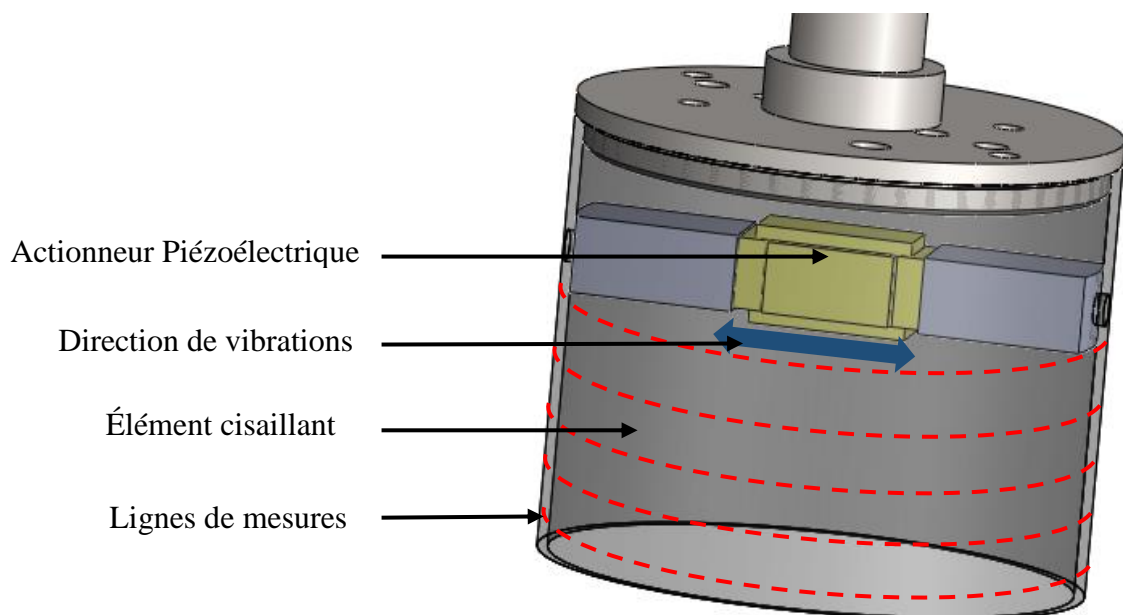


Figure 60 : Configuration R. Les vibrations sont orientées suivant l'axe radial du cylindre.

3.2.2 Configuration « Z »

Les vibrations de la configuration « Z » sont dirigées suivant l'axe principal de l'élément cisailant. Cette direction est perpendiculaire à la direction de cisaillement et à la direction du champ magnétique.

Pour propager les vibrations de manière uniforme, nous avons choisi de les transmettre à partir de deux actionneurs piézoélectriques, montés en parallèle, au lieu d'un seul comme dans la configuration « R » pour générer une excitation symétrique. La Figure 61 représente l'intégration des actionneurs piézoélectriques dans la structure. Pour éviter des efforts de cisaillement dans les actionneurs piézoélectriques lors de la rotation, le couple est transmis par l'intermédiaire de deux glissières, non représentées sur la figure ci-dessous.

Du fait de l'encombrement du banc de test, nous avons eu besoin d'utiliser un miroir pour effectuer un renvoi d'angle à 90° afin d'effectuer la mesure avec le vibromètre.

On considère que le déplacement dans l'axe Z de la cloche mesuré sur le porte-cloche est conservé tout le long de la cloche. Dans ce cas de figure, 4 points sont mesurés. Ils sont situés sur la ligne de mesure dans l'alignement de l'élément cisailant à côté de l'actionneur piézoélectrique et à 90° .

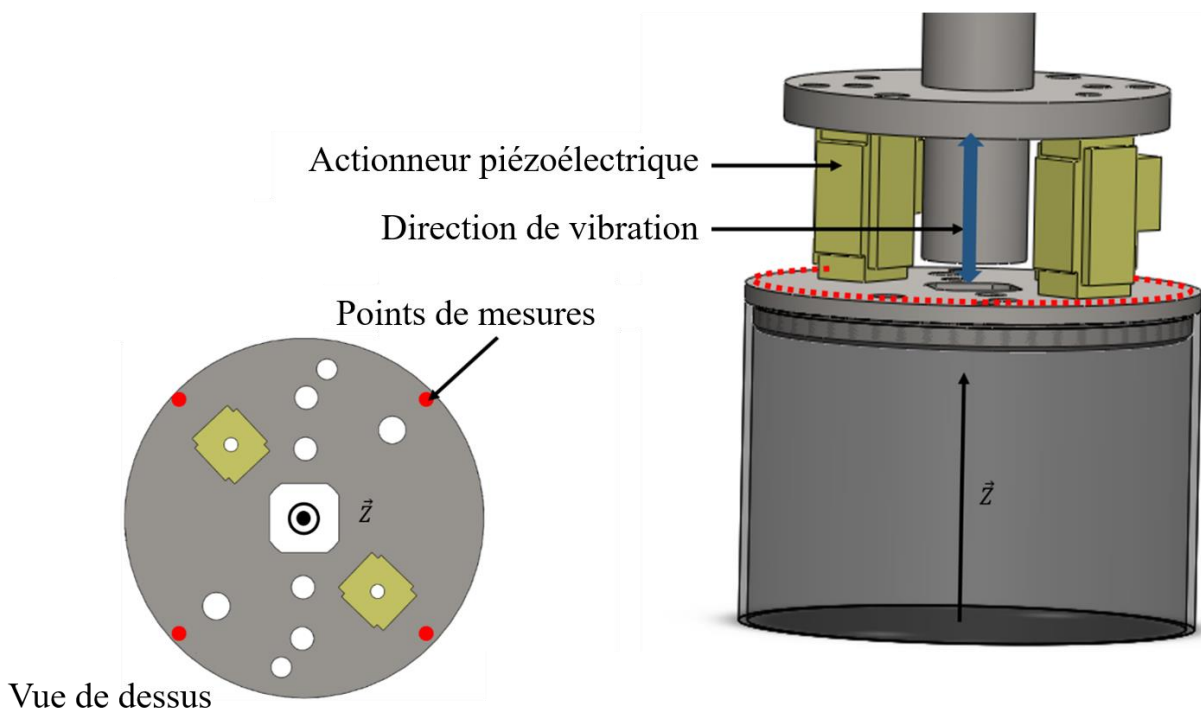


Figure 61 : Configuration Z. Les vibrations sont orientées suivant l'axe principal du cylindre.

3.2.3 Configuration « θ »

La configuration « θ » permet aux vibrations d'avoir une direction parallèle à la direction de cisaillement et perpendiculaire à la direction du champ magnétique.

Deux actionneurs piézoélectriques sont aussi utilisés dans le cadre de cette configuration. La Figure 62 représente l'intégration des actionneurs piézoélectriques dans la structure. Ils sont positionnés de manière à créer un bras de levier oscillant autour de la transition des vibrations.

Nous prenons en compte que les efforts dus à la rotation de l'élément cisailant sont directement repris par les actionneurs piézoélectriques. À cause de ces efforts, les vibrations peuvent en être entravées.

Dans cette configuration, on mesure le déplacement au plus proche de l'action de l'actionneur piézoélectrique. Nous mesurons deux points de mesure, tous deux en dessous de l'actionneur piézoélectrique sur la partie liée à l'élément cisailant.

De plus, nous considérons que la cloche n'a pas de torsion. De ce fait, nous estimons que les valeurs mesurées en ces deux points sont représentatives du déplacement tout le long de l'élément cisailant immergé dans le fluide.

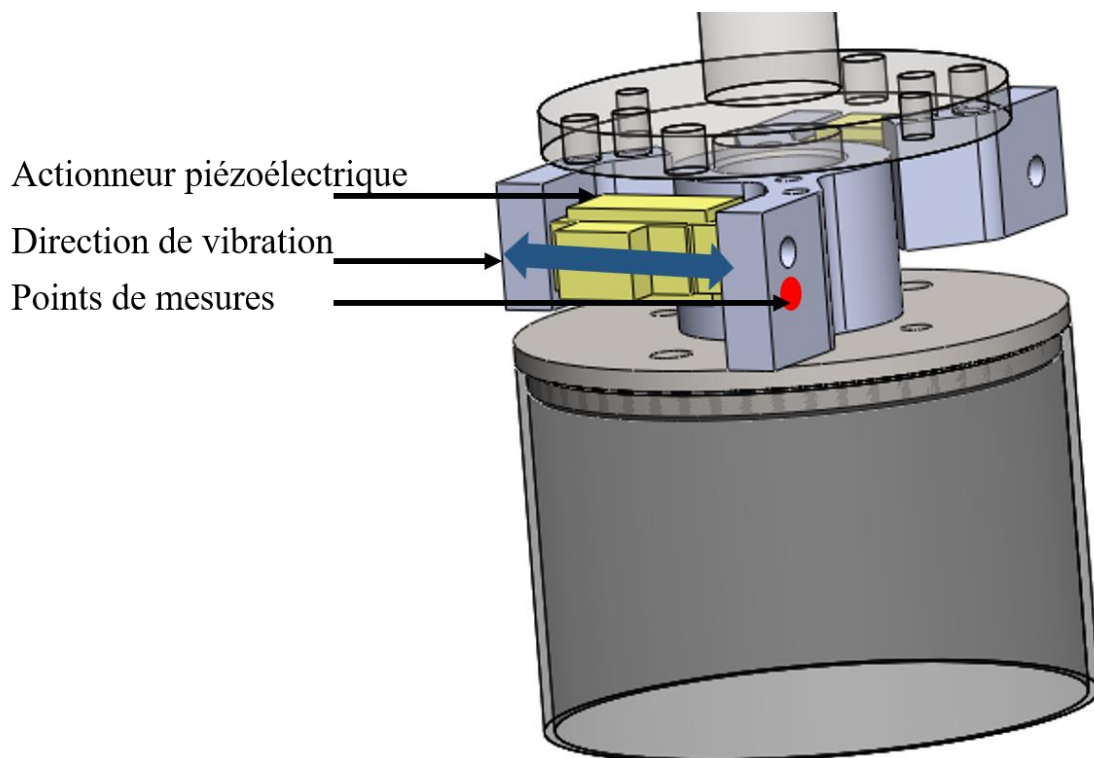


Figure 62 : Configuration « θ ». Les vibrations sont orientées suivant l'axe de rotation du cylindre.

3.3 Mesures vibratoires

Nous étudions dans cette section la déformation de l'élément cisailant. Le déplacement induit par les vibrations nous donne des indications sur les fréquences où l'on s'attend à obtenir des variations de couple.

Les trois configurations de vibrations : « R », « Z » et « θ » sont étudiés de manière similaire. Nous étudions tout d'abord l'influence de la présence de fluide sur la déformation de l'élément cisailant. Trois positions suivant l'axe principal, l'axe Z, du cylindre sont choisies :

- À l'air libre (nommée immersion de 0 mm).
- Pour une immersion à une profondeur de 6 mm.
- Pour une immersion maximale à une profondeur de 12 mm.

Suite à ces résultats, nous les confronterons à une simulation par éléments finis grâce au logiciel ANSYS APDL

Dans un second temps, avec l'élément cisailant immergé (12 mm), nous étudions l'influence du champ magnétique sur la déformation. Nous nous limitons à un champ d'induction important dans le fluide d'environ 750 mT ; soit 1,2 A dans la bobine.

Ce champ magnétique, équivalant à un champ d'excitation de 175 kA/m, permet de se situer dans la zone fonctionnelle du fluide MR sans saturation (voir Figure 62).

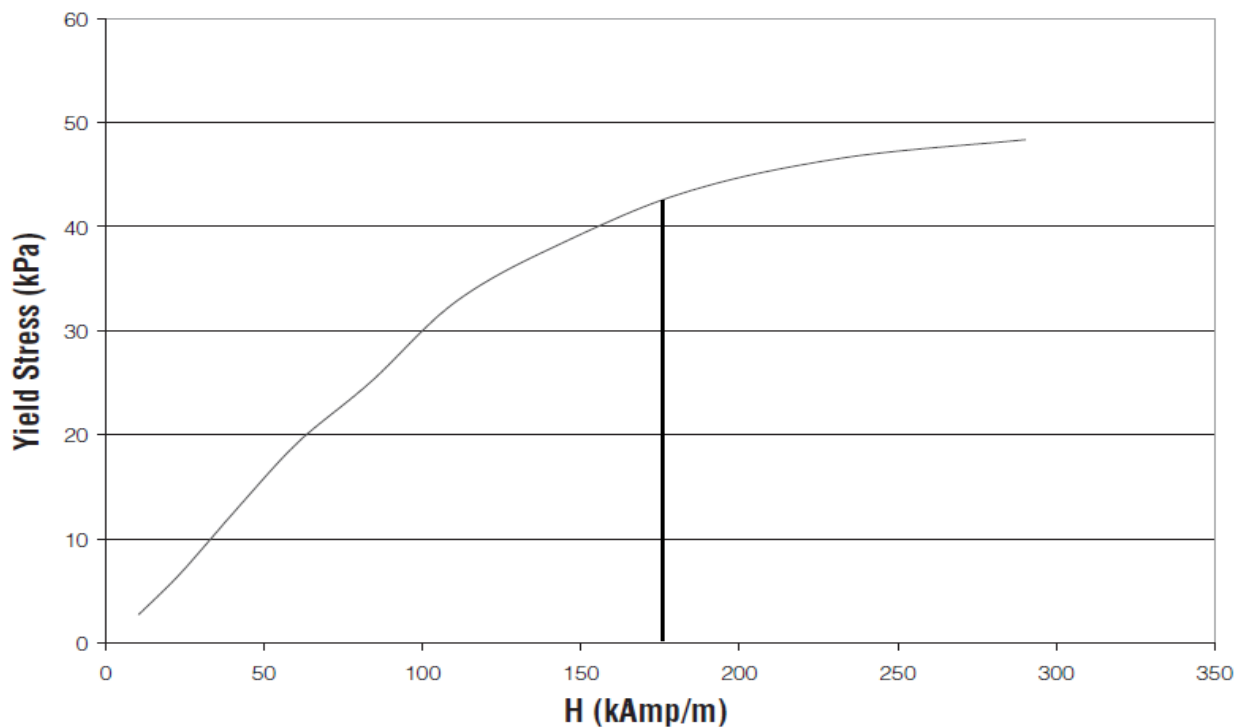


Figure 63 : Contrainte de cisaillement en fonction du champ d'excitation H pour le fluide MRF 132DG produit par LORD.

3.3.1 Les vibrations à l'air libre

3.3.1.1 Mesures expérimentales

À l'air libre, nous pouvons voir, sur la Figure 64, les amplitudes de déformation pour les trois configurations de vibrations. Nous constatons que les premiers modes de l'élément cisailant sont pour des fréquences supérieures à 600 Hz pour la configuration « Z » et à 1 kHz pour les deux autres configurations. Nous notons par ailleurs des modes plus nombreux et plus marqués dans le cas de la configuration « R ». À partir de 50 kHz, la déformation de l'élément cisailant est relativement faible pour les 3 configurations. Nous nous focalisons donc par la suite de ce chapitre dans une bande de fréquence entre 0 et 50 kHz.

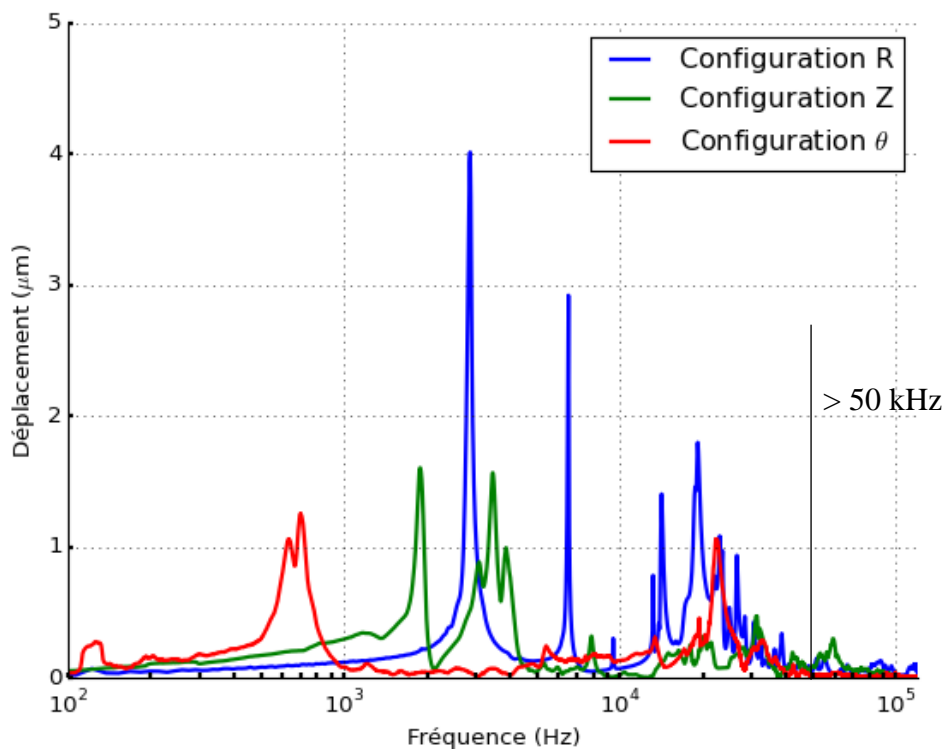


Figure 64 : Amplitude de la vibration en fonction de la fréquence d'excitation pour les trois configurations. Mesures à l'air libre pour une tension de 10 V appliquée aux actionneurs piézoélectriques.

3.3.1.2 Confrontation par modélisation

Toujours dans l'optique de valider les résultats expérimentaux, dans cette partie, nous souhaitons confronter les résultats obtenus par vibromètre avec une simulation par éléments finis. Nous nous focalisons sur les configurations vibratoires « Z » et « θ », la configuration « R » ayant été étudiée dans le chapitre précédent (Chapitre 2 - 2.3.2.2).

Ces configurations sont plus complexes, mécaniquement parlant, que la configuration « R », ils nécessitent donc de modéliser la partie supérieure liant les actionneurs piézoélectriques à l'axe de rotation.

Les actionneurs piézoélectriques sont modélisés par un parallélépipède rectangle de section carré de 64 mm² et de 18 mm de hauteur dont les propriétés mécaniques sont reprises dans le Tableau 10. Une contrainte en déplacement est imposée sur les faces aux extrémités de chaque actionneur d'une valeur de 0,1 µm et -0,1 µm suivant la direction de la configuration étudiée.

La partie supérieure, en acier inox (voir Tableau 10), reprend les dimensions géométriques de chaque configuration. Nous utilisons les mêmes éléments solides, SOLID186, pour mailler le modèle 3D. Une condition d'encastrement est appliquée, au-dessus du maillage, à la localisation de l'axe de rotation (non simulé).

Les résultats obtenus sont similairement extraits aux points indiqués dans la section 3.2.

	Porte cloche	Cloche	Actionneur	Partie supérieure	Volumes fluides
Matériau	Aluminium	Fer pur	Céramique	Acier inox	Fluide MR
Masse volumique (kg.m ⁻³)	2790	7860	5200	7850	3050
Module d'Young (GPa)	7,25	203	63	220	--
Coefficient de Poisson	0,33	0,285	0,31	0,29	--
Vitesse du son (m.s ⁻¹)	--	--	--	--	804

Tableau 10 : Propriétés mécaniques pour simulations par éléments finis, configuration « Z » et « θ ».

a) Configuration « Z »

La Figure 65 représente le modèle maillé dans le cas de la configuration « Z ». Dans cette configuration, quatre points de mesures sont extraits pour effectuer la comparaison entre les résultats obtenus numériquement et ceux mesurés par vibromètre, représenté en Figure 66 avec un axe des abscisses linéaire pour faciliter la comparaison.

Nous observons globalement que les résultats concordent jusqu'à 20 kHz. Les pics principaux sont retrouvés, notamment les deux pics à basse fréquence.

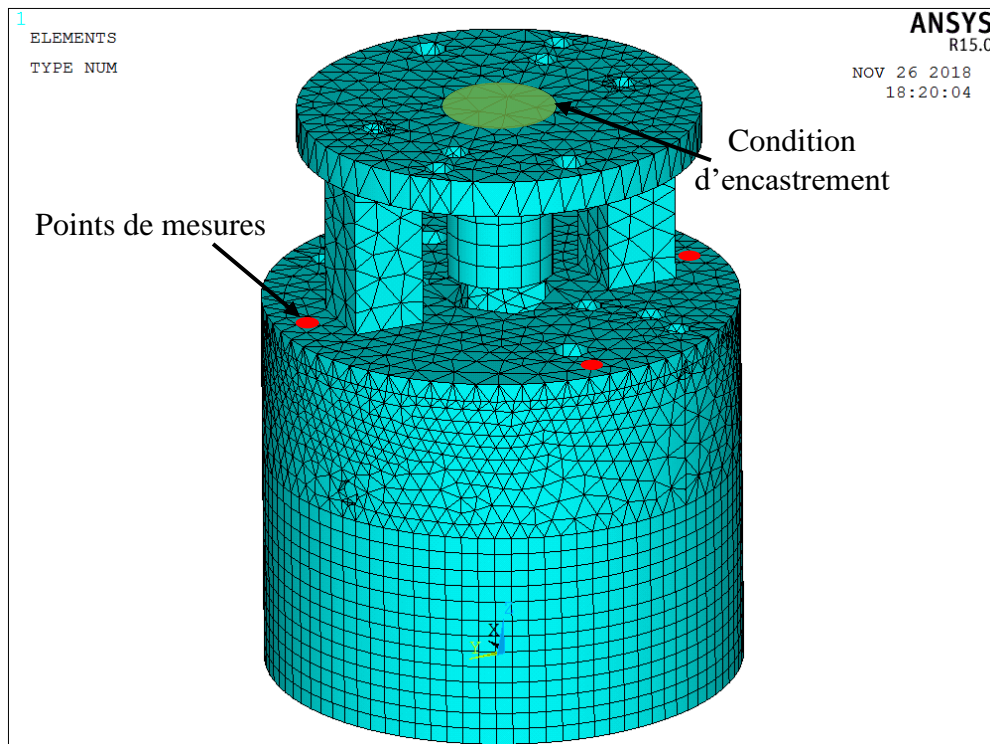


Figure 65 : Vues du maillage de la cloche lors de la configuration « Z » : éléments SOLID186.

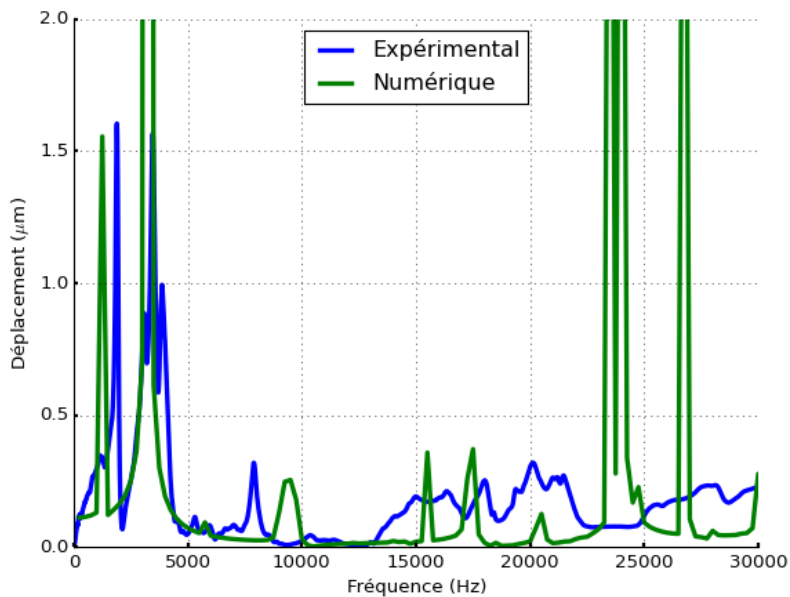


Figure 66 : Configuration « Z ». Comparaison numérique (vert)/expérimentale (bleu) pour la cloche à l'air libre.

b) Configuration « θ »

La Figure 67 représente le modèle maillé dans le cas de la configuration « θ ». Dans cette configuration, deux points de mesures sont extraits pour effectuer la comparaison entre les résultats obtenus numériquement et ceux mesurés par vibromètre, représenté en Figure 68 avec un axe des abscisses linéaire pour faciliter la comparaison.

À partir de 5 kHz on trouve une très bonne concordance entre les modes de vibrations, notamment vers 19 kHz et 21 kHz et la densité modale plus importante autour de 22,5 kHz. Cependant, le premier mode de vibrations des mesures expérimentales ne correspond pas à un pic sur les résultats numériques, il se peut que cela soit associé au banc de test dû à la torsion de l'axe non prise en compte dans la simulation.

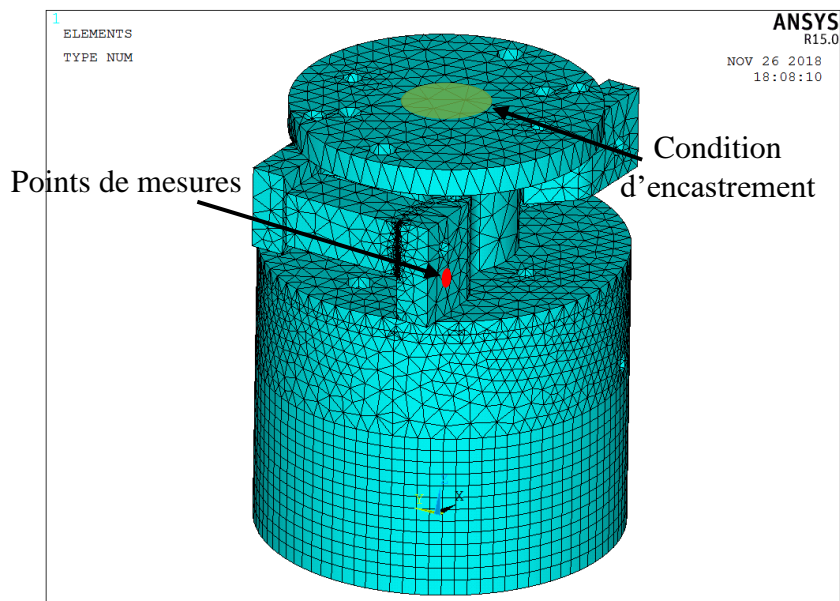


Figure 67 : Vues du maillage de la cloche lors de la configuration « θ » : éléments SOLID186.

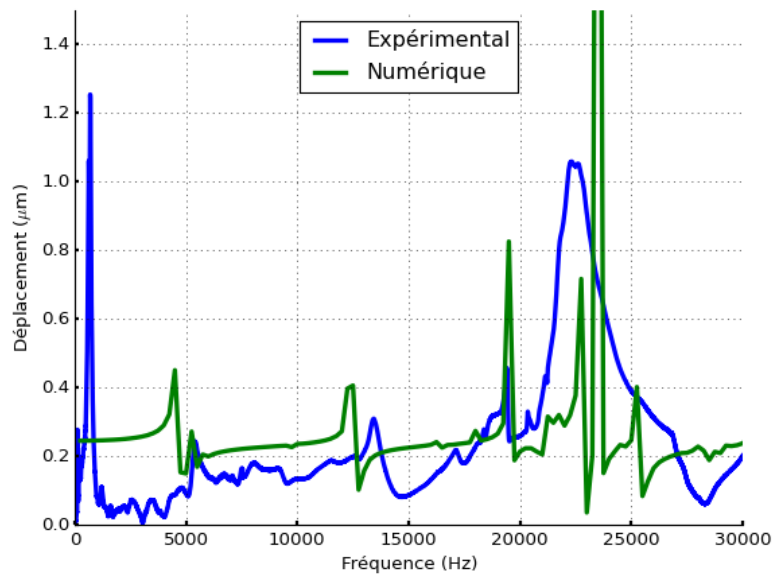


Figure 68 : Configuration « θ ». Comparaison numérique (vert)/expérimentale (bleu) pour la cloche à l'air libre.

3.3.2 Immersion dans le fluide magnéto-rhéologique

3.3.2.1 Configuration « R »

Dans le chapitre précédent, nous avons discuté de la déformation de l'élément cisailant lors de vibrations suivant la configuration « R ». L'immersion de l'élément cisailant induit une atténuation des premiers modes vibratoires, à 2,9 et 6,5 kHz d'amplitude respective 4 et 2,9 μm (voir Figure 69). Entre 15 et 35 kHz, l'impact sur l'amplitude est moins important, nous mesurons une atténuation du mode principal de 0,3 μm entre le mode à l'air libre (immersion de 0 mm) et celui pour une immersion de 12 mm (repère A). De plus, nous remarquons que moins de modes sont présents sur cette bande de fréquence suite à l'immersion.

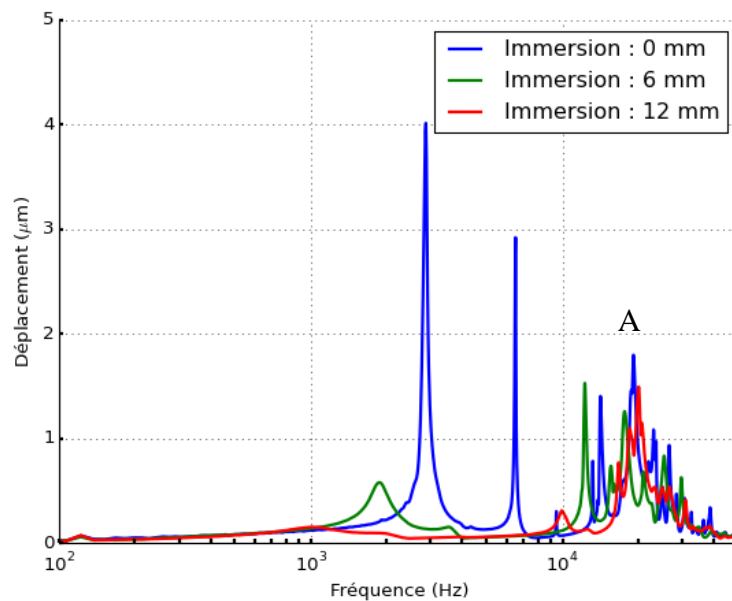


Figure 69 : Déformation de l'élément cisailant dans le cas de la configuration « R ». Cas de l'influence de l'immersion pour une tension d'excitation de 10 V.

3.3.2.2 Configuration « Z »

a) Mesures expérimentales

Concernant la configuration « Z », à l'air libre, nous notons deux modes principaux à 1,9 et 3,5 kHz, d'amplitude avoisinant 1,6 μm (voir Figure 70). Le second mode est encadré par deux pics de déformation mineure.

Suite à l'immersion, le fluide engendre une complète atténuation du premier mode. Nous constatons que les deux modes encadrant précédemment le mode à 3,5 kHz se retrouvent alors en tant que modes principaux de la déformation. Le premier, à une fréquence de 3,1 kHz, présente une déformation de 0,97 μm quand la cloche est totalement immergée (12 mm). Le second plus faible, à 3,9 kHz et présente une déformation de 0,4 μm .

En dehors de ces deux modes, pour une fréquence supérieure à 10 kHz, nous constatons que l'amplitude de déformation de l'élément cisailant est conservée malgré l'immersion dans le fluide.

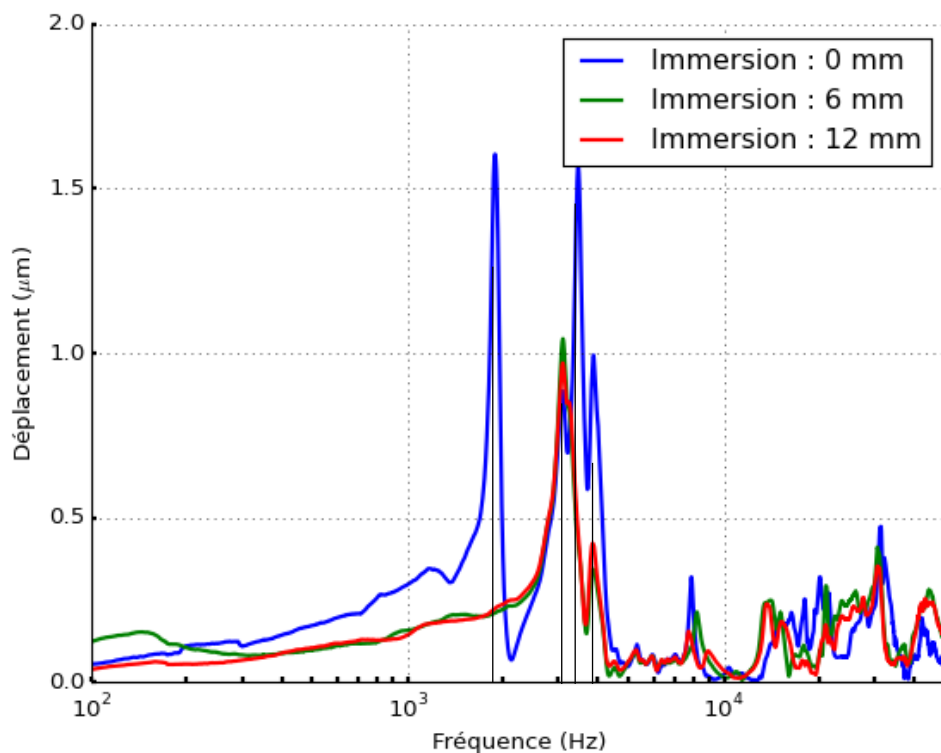


Figure 70 : Déformation de l'élément cisailant dans le cas de la configuration « Z ». Cas de l'influence de l'immersion pour une tension d'excitation de 10 V.

b) Confrontation par modélisation

La Figure 71 présente le maillage de la configuration « Z », sous les mêmes conditions que la simulation à l'air libre, lorsqu'on immerge l'élément cisailant dans le fluide. Dans le cadre de la modélisation, nous simulons une épaisseur de fluide de 5 mm, au lieu d'une épaisseur de 1 mm dans le banc de test, afin de faire converger les calculs. Similairement à la première étude sur la configuration « R », nous utilisons des éléments « acoustiques fluides » FLUID30 dont le seul degré de liberté est la pression acoustique. Les éléments FLUID30 en contact avec la structure mécanique ont l'option supplémentaire « structure présente ».

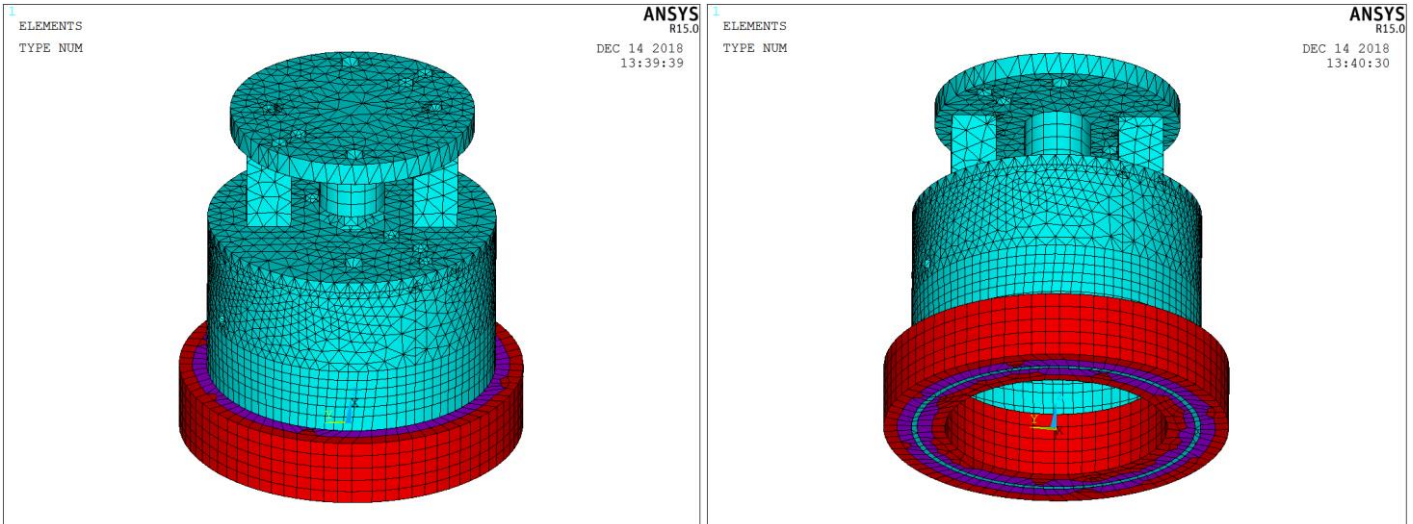


Figure 71 : Vues du maillage de la cloche et des couches fluides. En bleu : éléments SOLID186 ; en violet : éléments FLUID30 option « structure présente » ; en rouge : éléments FLUID30 option « structure absente ».

Nous observons sur la Figure 72 similairement au résultat expérimental une atténuation du premier mode de vibrations et une conservation des fréquences modales jusqu'à 10 kHz. Une bonne concordance est donc notée entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques.

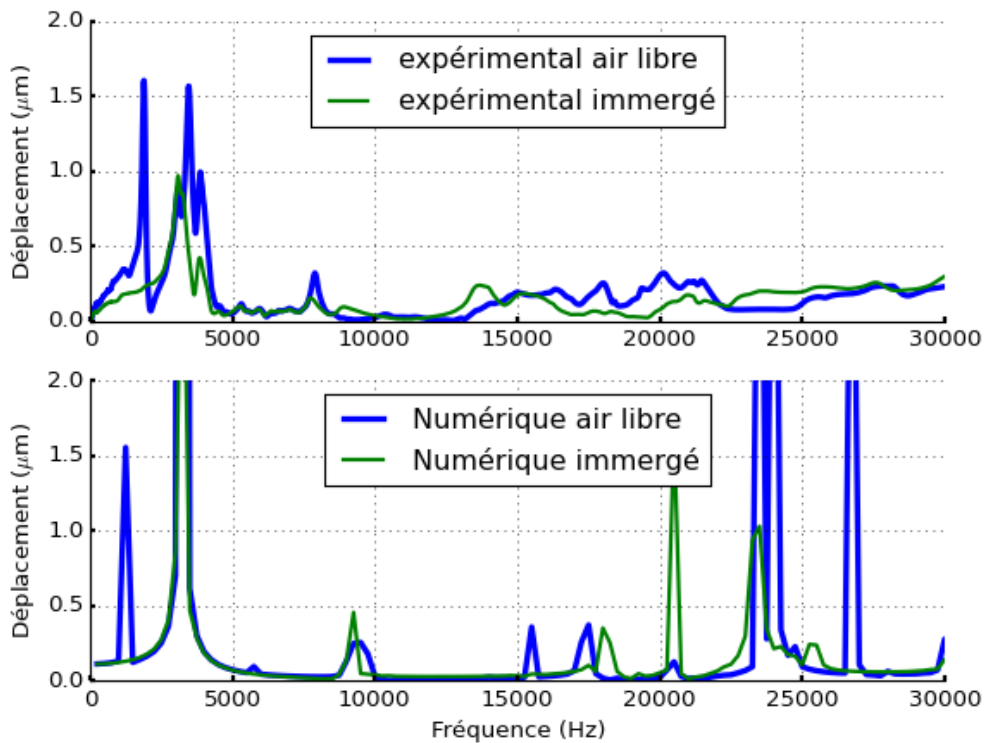


Figure 72 : Influence de l'immersion sur les résultats expérimentaux (haut) et numériques (bas).

3.3.2.3 Configuration « θ »

a) Mesures expérimentales

Dans la configuration « θ », à l'air libre, nous avons noté la présence de deux modes à 0,7 et 22,5 kHz d'amplitudes respectives 1,3 et 1,1 μm (voir Figure 73). Suite à l'immersion, le premier mode à 700 Hz est atténué de 0,8 μm . Nous mesurons, une augmentation de l'amplitude du mode à 22,5 kHz d'une valeur de 0,3 μm . Cette augmentation est inattendue, car en dehors de ces modes le fluide ne subit aucune influence due à l'immersion du fluide.

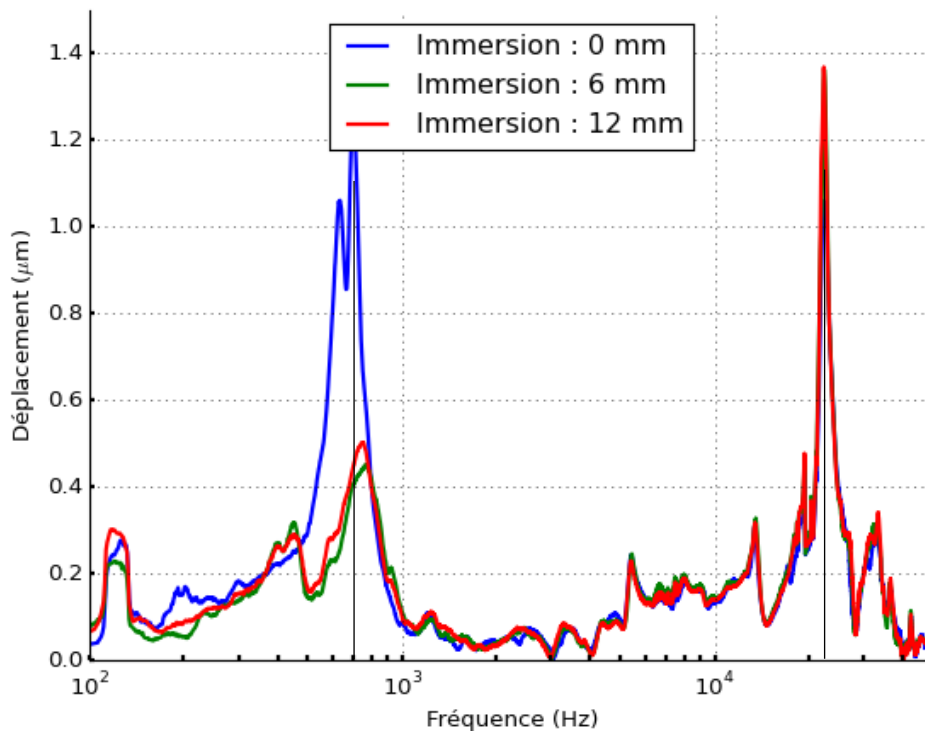


Figure 73 : Déformation de l'élément cisailant dans le cas de la configuration « θ ». Cas de l'influence de l'immersion pour une tension d'excitation de 10 V.

b) Confrontation par modélisation

La Figure 74 présente le maillage de la configuration « θ », sous les mêmes conditions que la simulation à l'air libre, lorsqu'on immerge l'élément cisailant dans le fluide. Dans le cadre de la modélisation, nous simulons une épaisseur de fluide de 5 mm, au lieu d'une épaisseur de 1 mm dans le banc de test, afin de faire converger les calculs. Similairement à la première étude sur la configuration « R », nous utilisons des éléments « acoustiques fluides » FLUID30 dont le seul degré de liberté est la pression acoustique. Les éléments FLUID30 en contact avec la structure mécanique ont l'option supplémentaire « structure présente ».

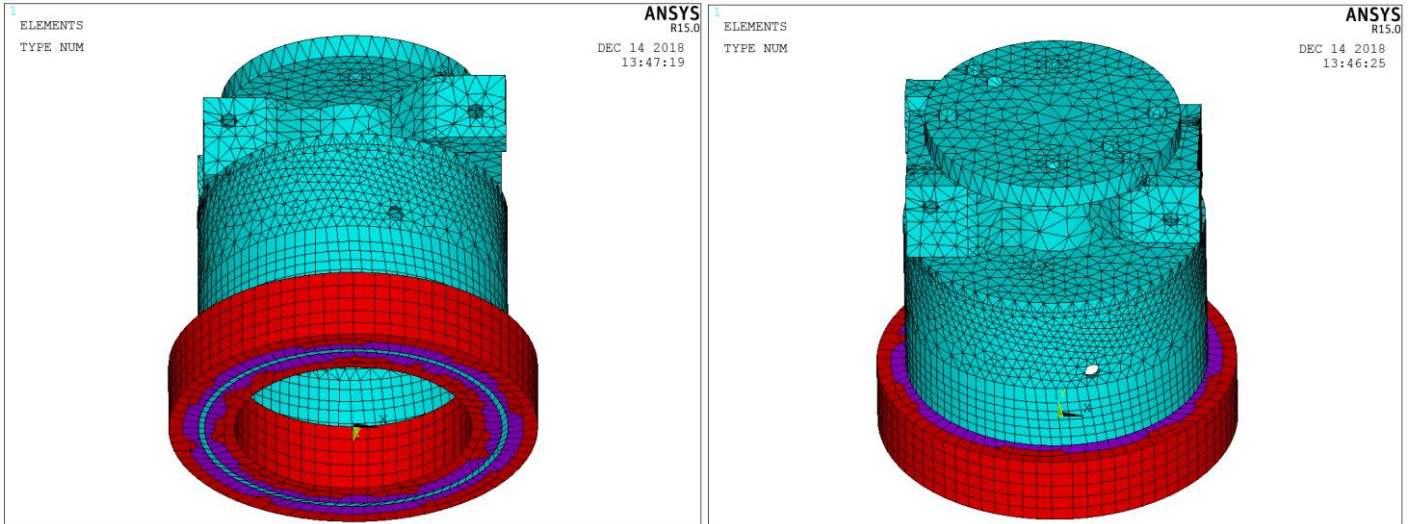


Figure 74 : Vues du maillage de la cloche et des couches fluides. En bleu : éléments SOLID186 ; en violet : éléments FLUID30 option « structure présente » ; en rouge : éléments FLUID30 option « structure absente ».

La Figure 75 présente l'influence de l'immersion sur les mesures expérimentales (haut) et résultats numériques (bas). Dans chaque cas, nous mesurons que l'immersion a très peu d'effet sur l'allure générale de la courbe ainsi que la position des modes. Nous constatons encore une fois une bonne correspondance entre les résultats numériques et expérimentaux.

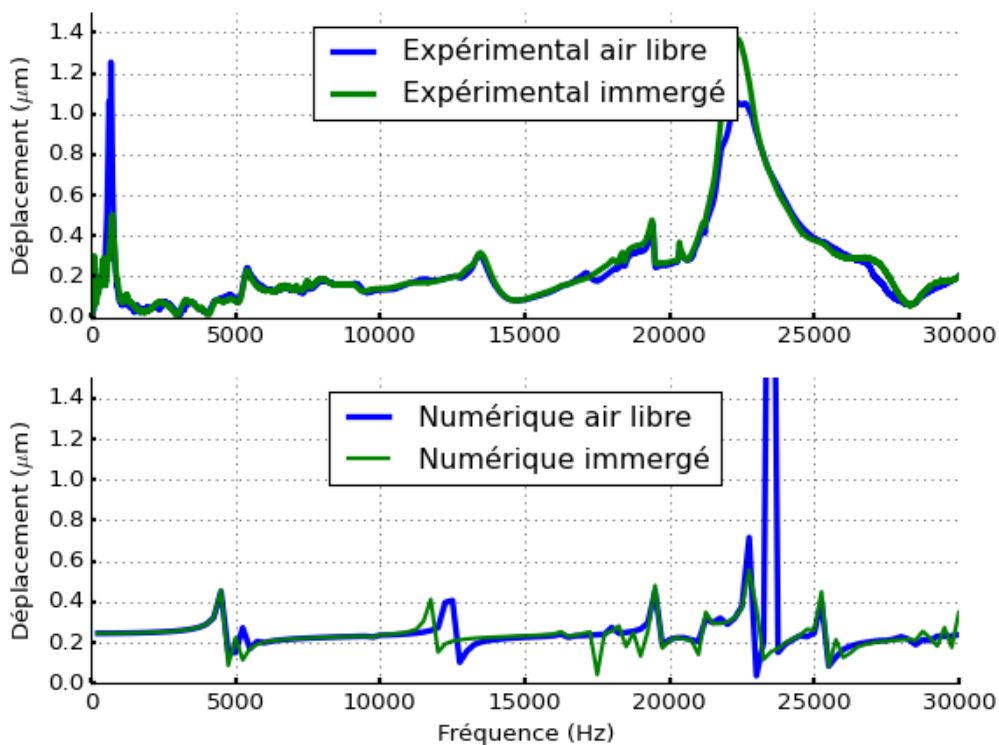


Figure 75 : Influence de l'immersion sur les résultats expérimentaux (haut) et numériques (bas).

3.3.3 Application d'un champ magnétique.

Une fois l'élément immergé, nous appliquons plusieurs champs magnétiques dans le fluide. Le déplacement ainsi mesuré nous permettra de mettre en regard, dans des cas proches, la déformation de l'élément cisailant et la variation de couple dans le cas d'une perturbation vibratoire.

3.3.3.1 Configuration « R »

Dans le cas de la configuration « R », nous avons constaté que seule la bande de fréquence entre 15 et 35 kHz, mentionnée précédemment, est impactée par un champ magnétique. Dans cette bande de fréquence, la déformation de l'élément cisailant augmente progressivement avec le champ magnétique.

Cette augmentation intervient au niveau du mode dominant situé à une fréquence de 19 kHz, à laquelle on mesure, au maximum, une amplitude de déformation de 1,8 μm (voir Figure 76). Ce premier mode est suivi d'un autre mode à 22,5 kHz. Ce mode a une amplitude de déformation plus faible, avoisinant les 1,1 μm .

Nous avons conclu, dans le chapitre précédent, que cette augmentation était due à une rigidité croissante dans la partie immergée de l'élément cisailant. Nous avons constaté par ailleurs que ce sont à ces fréquences que la diminution de couple est la plus importante.

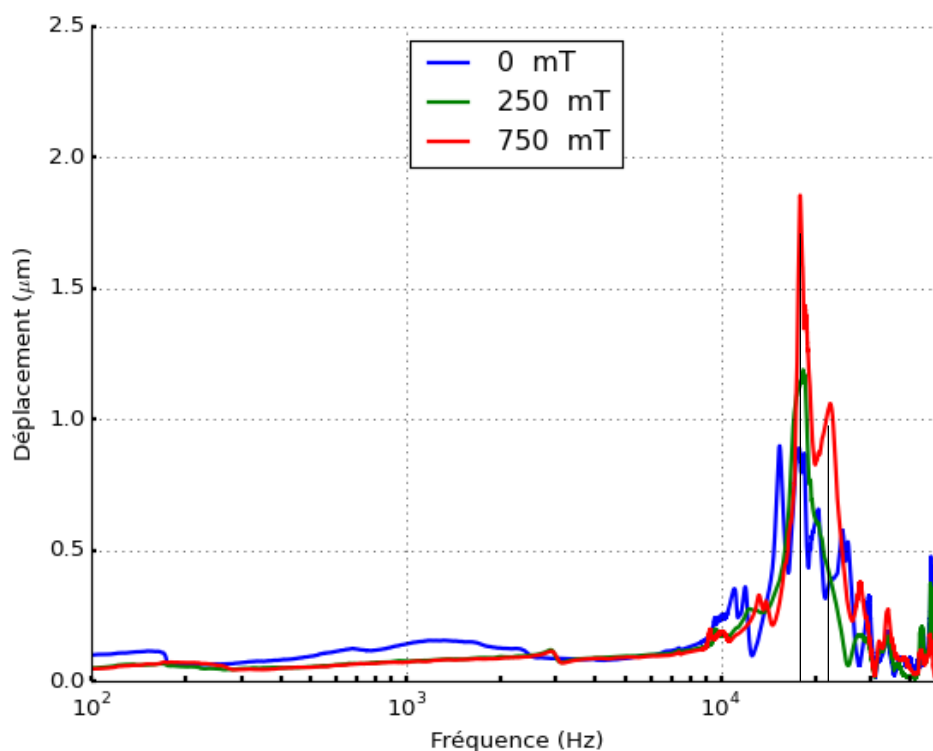


Figure 76 : Déformation de l'élément cisailant dans le cas de la configuration « R ». Cas de l'influence du champ magnétique pour une tension d'excitation de 10 V.

3.3.3.2 Configuration « Z »

L'influence du champ magnétique sur la déformation dans le cas de la configuration « Z », représentée en Figure 77, permet une distinction entre les fréquences supérieures et inférieures dans les environs de 10 kHz. Pour une fréquence supérieure à 10 kHz, nous ne mesurons pas d'influence notable par la présence de champs magnétiques.

Pour les fréquences inférieures à 10 kHz, le mode de déformation, à 3,1 kHz, est complètement atténué suite à la présence de champ magnétique dans le fluide. À partir de 125 mT, nous avons constaté l'augmentation locale, à 760 Hz d'un mode de vibrations avec le champ magnétique. De manière similaire, nous avons noté le mode de 6 à 10 kHz (repère A) présentant les mêmes caractéristiques avec le champ magnétique, c'est-à-dire que la déformation augmente avec le champ d'excitation et plus particulièrement à 9,4 kHz.

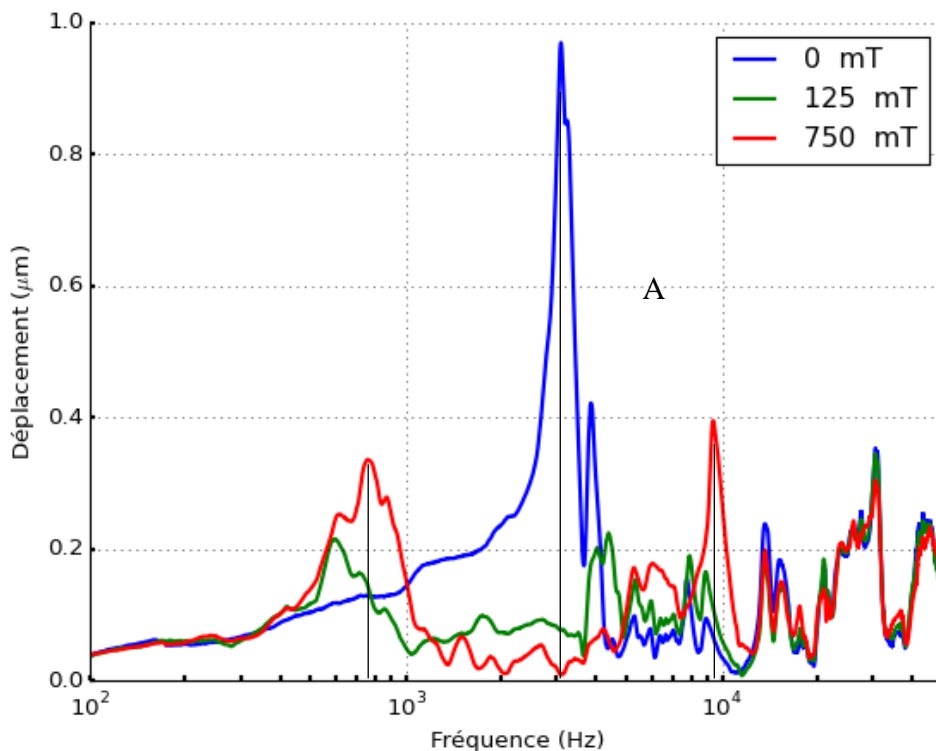


Figure 77 : Déformation de l'élément cisailant dans le cas de la configuration « Z ». Cas de l'influence du champ magnétique pour une tension d'excitation de 10 V.

3.3.3.3 Configuration « θ »

Avec l'immersion puis le champ magnétique, le premier mode, à 750 Hz, est complètement atténué dès l'apparition du champ magnétique (voir Figure 78). Quand le champ magnétique devient important, nous mesurons dans la bande de fréquence entre 2,3 et 10 kHz (repère A) une augmentation de la déformation.

Cependant, pour une fréquence supérieure à 10 kHz, la déformation n'est pas modifiée. Nous remarquons tout de même une très faible atténuation, inférieure à 0,1 μm , du mode à 22,5 kHz de la déformation avec un champ d'excitation de 750 mT.

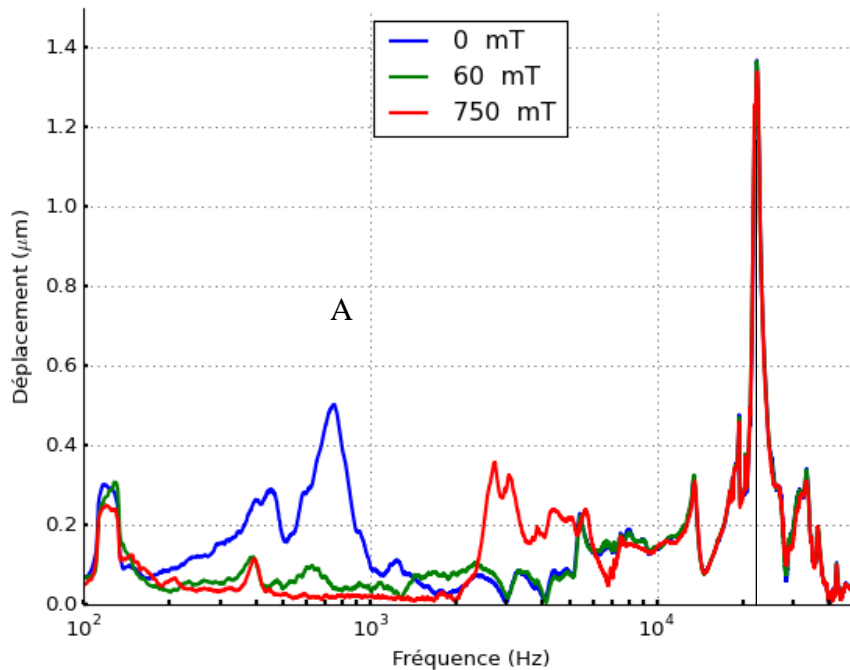


Figure 78 : Déformation de l'élément cisailant dans le cas de la configuration « θ ». Cas de l'influence du champ magnétique pour une tension d'excitation de 10 V.

3.3.4 Discussion

Suite à l'immersion de l'élément cisailant, sans champ magnétique dans le fluide, nous avons constaté l'atténuation de nombreux modes présents précédemment. Nous remarquons que l'amplitude de chaque fréquence d'intérêt diminue fortement, la déformation maximale dans l'air est d'environ $4 \mu\text{m}$ alors qu'immergée celle-ci est inférieure à $1,5 \mu\text{m}$ (voir Figure 79).

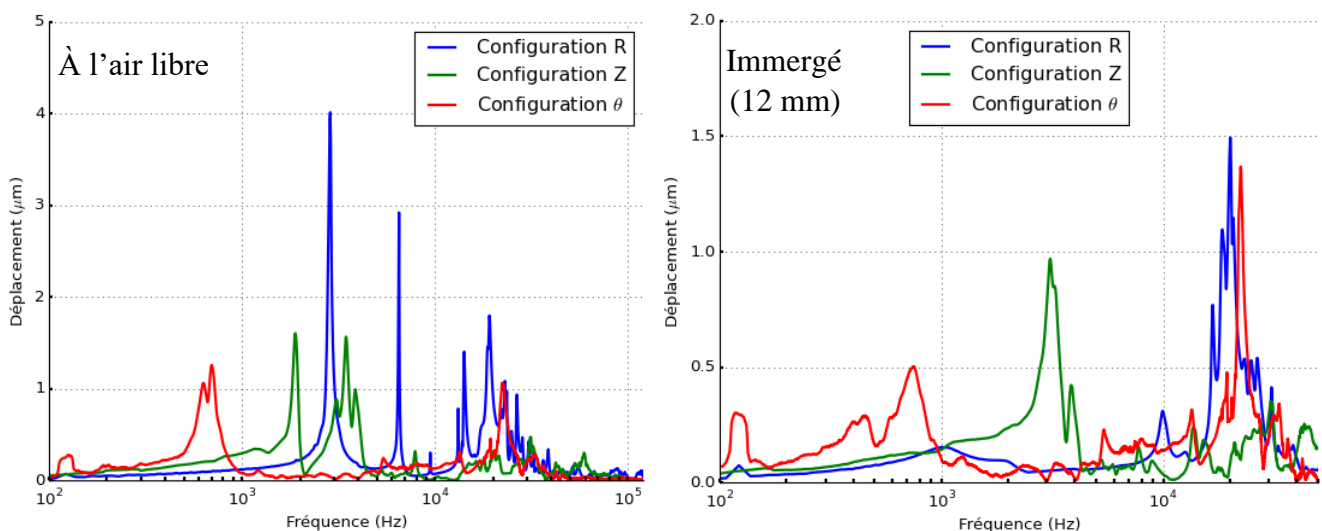


Figure 79 : Déformations en fonction de la fréquence pour les trois configurations de vibrations. Mesures dans le fluide pour une tension de 10 V à l'air libre (gauche) et immergé (12 mm), sans champ magnétique (droite).

On retrouve des comportements similaires, pour les trois configurations, concernant l'évolution de la déformation de l'élément cisailant suite à son immersion. Nous notons deux comportements en fonction de la fréquence d'excitation délimitée dans les environs de 10 kHz.

Les premiers modes sont situés à une fréquence inférieure à 10 kHz. On constate que ces modes sont fortement atténués avec la présence de fluide. Dans le cas des configurations « R » et « Z », nous avons même observé leur totale atténuation.

Pour des fréquences supérieures à ces modes, la déformation semble ne pas être impactée par la présence du fluide. Nous mesurons un écart maximal dans ces fréquences inférieures à 0,3 μm par rapport à leurs états initiaux.

Les simulations par éléments finis ont conforté les résultats mesurés à l'air libre dans les trois configurations de vibrations. Cependant, nous remarquons pour la configuration « θ » que le mode à 750 Hz ne correspond à aucun mode simulé, il peut être induit par le banc de test suite à une torsion de l'arbre de rotation, non prise en compte dans le modèle simulé. Nous avons constaté que les résultats issus de la simulation sont cohérents et permettent de conforter les mesures expérimentales.

Avec la présence de champ magnétique (voir Figure 80), nous avons toujours une différence de comportement séparé dans les environs de 10 kHz. Pour les fréquences inférieures à 10 kHz, nous avons mesuré deux phases, une première à faible champ magnétique et la seconde à plus fort champ, le curseur entre les phases étant légèrement différent pour les configurations. À faible champ, les modes dominants se retrouvent très rapidement atténués. Pour un champ magnétique plus important, toujours pour une fréquence inférieure à 10 kHz, en dehors du mode atténué, nous avons constaté que l'amplitude de déformation augmente avec le champ magnétique.

Pour une fréquence supérieure à 10 kHz, à part la configuration « R » qui subit une amplification avec le champ magnétique, nous ne notons aucune modification significative de la déformation.

Les résultats précédents nous permettent de synthétiser le comportement de la déformation de l'élément cisailant lors de l'immersion dans le fluide et dans un second temps en présence d'un champ magnétique. Le comportement varie avant et après les 10 kHz et est résumé dans le Tableau 11.

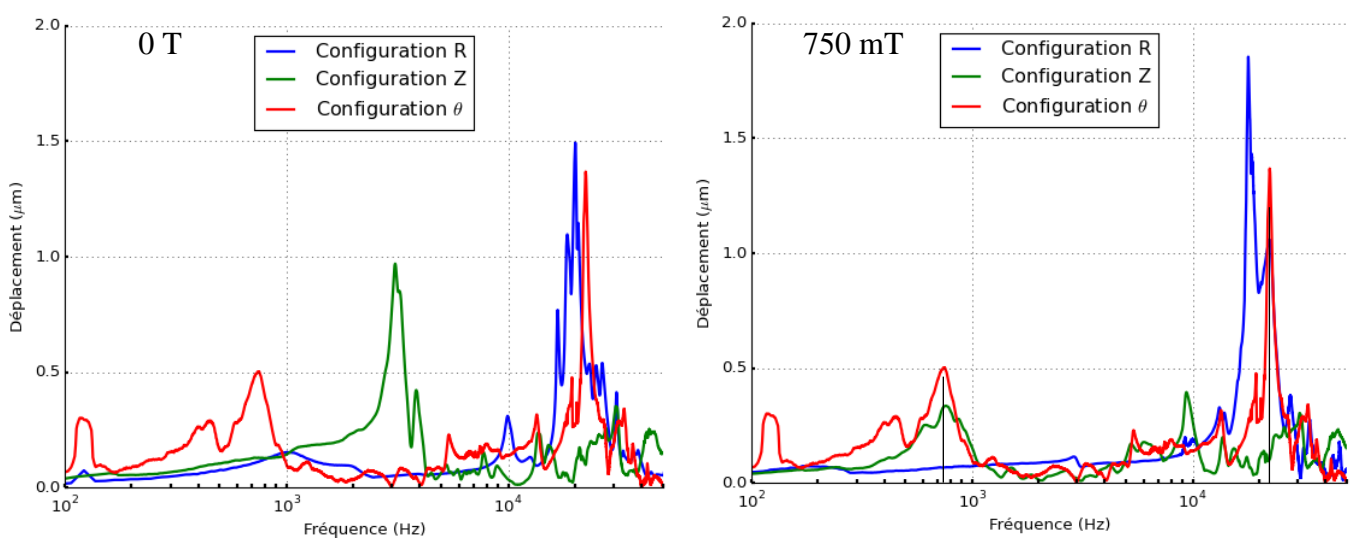


Figure 80 : Déformations en fonction de la fréquence pour les trois configurations de vibrations. Mesures dans le fluide pour une tension de 10 V sans champ magnétique (gauche) et avec un champ magnétique de 750 mT (droite).

Configurations	« R »	« Z »	« θ »
Immersion <10 kHz	Atténuation	Atténuation	Atténuation
Champ magnétique <10 kHz	=	Atténuation	Atténuation
Immersion >10 kHz	=	=	Amplification
Champ magnétique >10 kHz	Amplification	=	=

Tableau 11 : Synthèse de l'évolution de la déformation de l'élément cisailant. Durant l'immersion et dans un second temps en présence d'un champ magnétique croissant. Deux cas d'études : à basse fréquence (<10 kHz) et à haute fréquence (>10 kHz).

La configuration « Z » est celle qui présente le moins d'amplitude après un champ magnétique de 125 mT. Cette configuration ne comporte pas de mode majeur comparé aux autres configurations. Par ailleurs, cette configuration ainsi que la configuration « θ » sont mises en vibration par l'intermédiaire de deux actionneurs piézoélectriques. La présence de ces actionneurs est dans un but de symétrie concernant la direction de vibrations souhaitée. Cependant, malgré les deux actionneurs nous constatons que le déplacement maximal engendré est plus faible dans ces deux configurations que dans la configuration « R ». La configuration « R » semble donc être la configuration la plus intéressante pour étudier le phénomène du fait de la plus faible demande en énergie par rapport à la déformation obtenue.

Enfin, nous remarquons que plusieurs modes semblent être à des fréquences similaires en présence de champs magnétiques à 22,5 kHz pour les configurations « R » et « θ » et 700 – 800 Hz pour les configurations « Z » et « θ ». Concernant les modes similaires à 700 – 800 Hz (configurations « Z » et « θ »), nous avons déterminé lors des simulations numériques que ce mode ne représente pas le comportement vibratoire de l'élément cisailant cependant il peut être induit par la structure mécanique et notamment l'effet de torsion de l'arbre qui supporte la cloche. Donc les modes à 22,5 kHz similaires pour deux des configurations peuvent amener à penser que ces fréquences sont des fréquences facilitant la propagation des vibrations.

3.4 Couple des configurations vibratoires

Dans le chapitre précédent nous avons observé, dans le cas de la configuration « R », une variation de couple lorsque l'élément cisailant est perturbé par les vibrations. Nous avons remarqué que le couple a tendance à diminuer en présence de vibrations. Nous avons montré qu'il existait un couplage entre les modes vibratoires et la diminution de couple.

L'objectif de cette section est d'étendre cette comparaison aux trois configurations de vibrations. Nous les comparons en mesurant l'effet des vibrations sur la diminution de couple.

Dans un premier temps, nous comparons la variation de couple à l'amplitude de déplacement de l'élément cisailant, dans chaque configuration. Nous exprimons cette influence sur le couple, similairement au chapitre précédent, en fonction de l'écart au couple non perturbé par les vibrations.

Dans un second temps, nous mettons en regard la diminution de couple des configurations, « R », « Z » et « θ » pour étudier l'influence des paramètres sur les diminutions du couple : vitesse de cisaillement, champ magnétique, amplitude de vibrations.

3.4.1 Influence des modes vibratoires

Nous choisissons d'exposer la variation du couple pour un set de paramètres expérimentaux identique : un champ d'induction de 315 mT, une vitesse de cisaillement de 80 s^{-1} et une tension d'alimentation de l'actionneur piézoélectrique de 10 V.

Suite à l'analyse de la déformation, dans la section précédente, nous focalisons l'étude sur la bande de fréquence entre 0 et 50 kHz, la déformation étant estimée comme faible en dehors. La variation du couple est mise en regard avec la déformation de l'élément cisailant pour un champ d'induction de 375 mT et une tension d'alimentation de 10 V.

3.4.1.1 Configuration « R »

La Figure 81 représente l'évolution de la variation de couple en fonction de la fréquence de balayage ainsi que le déplacement mesuré par vibromètre. Nous remarquons tout d'abord que l'évolution du couple suit la tendance du déplacement de l'élément cisailant, la diminution de couple est en retard par rapport à celle-ci.

Dans un premier temps, jusqu'à 11 kHz (repère A), la déformation est faible et nous ne mesurons aucune variation du couple. À des fréquences plus importantes, on mesure une variation du couple à 19,8 kHz de 7,9 %, ce pic de variation semble correspondre au mode de déformation à 18,4 kHz. Nous notons la présence d'un second pic de variations du couple, d'amplitude plus faible de 3 % à 25,5 kHz, qui est relatif au second mode situé à 20,4 kHz.

Après ce second pic de variation, l'influence des vibrations chute significativement. Elle est inférieure 0,6 % pour des fréquences au-delà de 32 kHz (repère B). Nous remarquons toutefois qu'une variation de couple, à 44,5 et 47 kHz, semble être présente pour les modes vibratoires à 43,5 et 46,5 kHz.

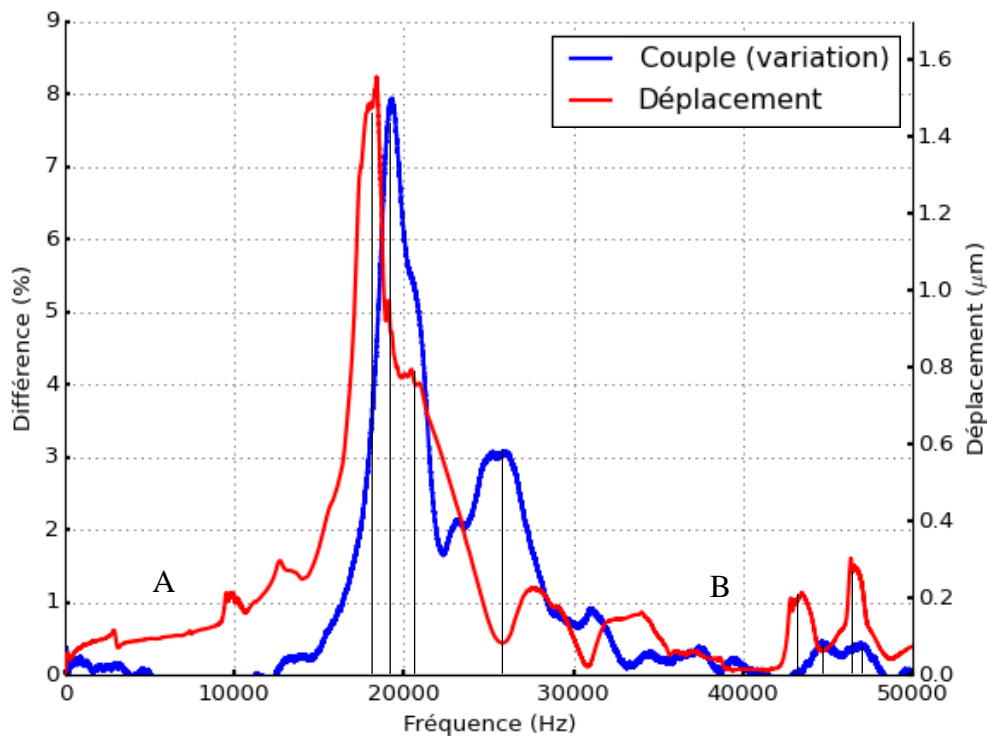


Figure 81 : Comparaison de la déformation dans la configuration « R », de l'élément cisailant et de la diminution de couple.

3.4.1.2 Configuration « Z »

Dans cette configuration (voir Figure 82), nous notons une première plage fréquentielle, jusqu'à 10 kHz (repère A), où le couple ne présente que très peu de variations.

Par la suite, la diminution de couple suit, avec un décalage vers des fréquences plus importantes, la tendance du déplacement de l'élément cisailant. Nous constatons, similairement à la déformation, trois zones de variation du couple noté B, C et D sur la Figure 82. La faible variation de couple au niveau du repère B semble être liée à la déformation mesurée au niveau du repère A. Le maximum de la diminution de couple se situe à 34,9 kHz (repère C) pour une diminution de 3,3 % qui est lié au mode vibratoire à 31 kHz. Nous notons la présence de pics secondaires d'amplitude moindre pour les fréquences de 45,4 et 48,8 kHz (repère D), ces pics semblent être liés au mode vibratoire à 45 kHz.

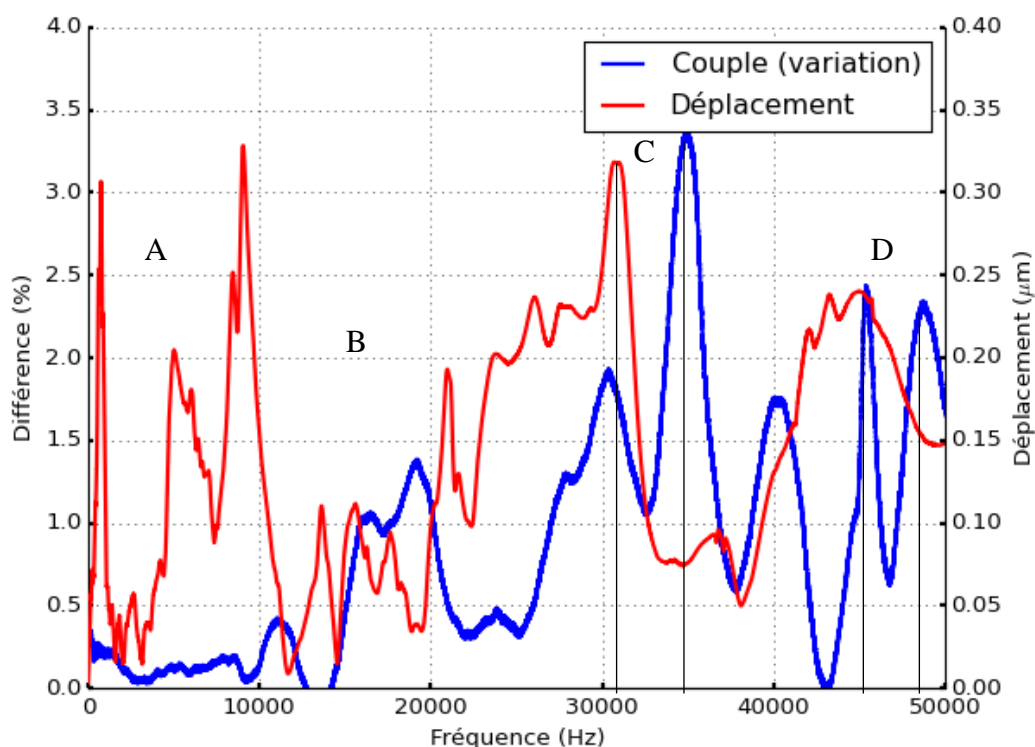


Figure 82 : Comparaison de la déformation dans la configuration « Z, » de l'élément cisailant et de la diminution de couple.

3.4.1.3 Configuration « θ »

Dans la Figure 83, nous remarquons que la variation de couple suit la tendance de la déformation de manière décalée vers des fréquences plus importantes. Une première plage de fréquence jusqu'à 25 kHz (repère A), ne présente pas de variation notable du couple. Dans cette plage de fréquence, nous ne notons pas de correspondance entre la variation de couple et le déplacement de l'élément cisailant.

Nous constatons un pic de diminution du couple situé à une fréquence de 30,8 kHz, d'une valeur de 1,4 %, ce pic semble être lié au mode vibratoire à 22,4 kHz. Deux autres pics d'amplitude moindre se dégagent à 38,5 et 45,5 kHz (repère B) dont l'association à un mode vibratoire est moins évidente. Cependant, on pourra estimer dans le cas du pic à 45,5 kHz son association avec le mode à 33,3 kHz.

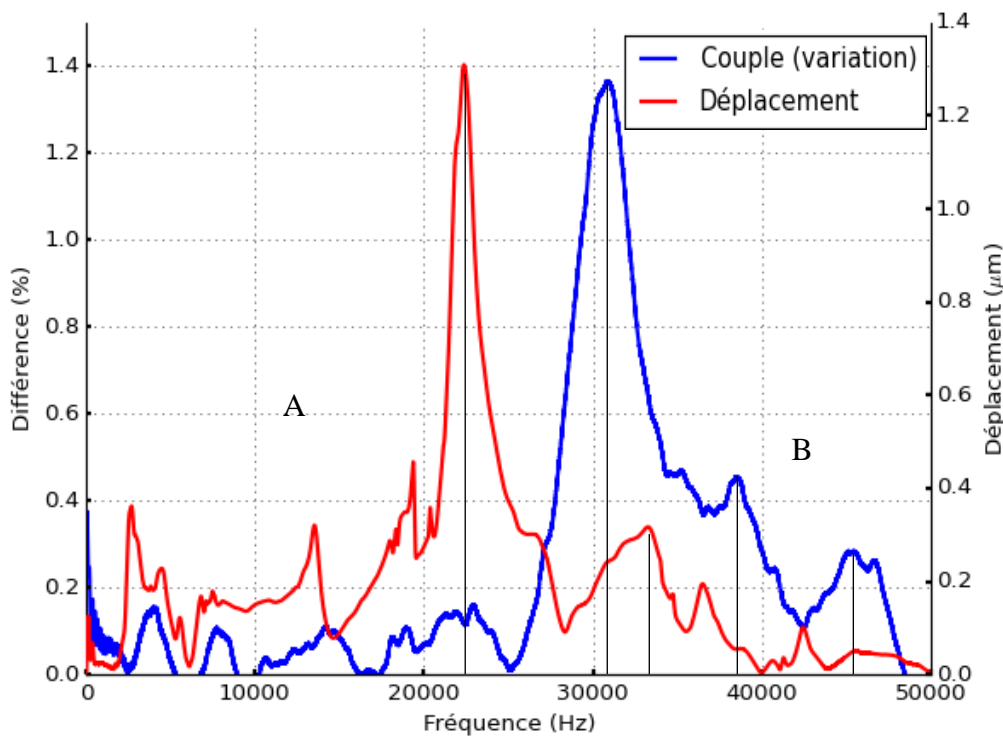


Figure 83 : Comparaison de la déformation dans la configuration « θ », de l'élément cisailant et de la diminution de couple.

3.4.1.4 Discussion

Dans un premier temps, la diminution de couple dans chaque configuration vibratoire, pour une fréquence inférieure à 10 kHz, est faible et il n'existe pas de correspondance entre la variation de couple et l'amplitude vibratoire. Ce phénomène est d'autant plus prépondérant dans le cas de la configuration « θ » perdurant jusqu'à 25 kHz.

À des fréquences plus élevées, nous remarquons que la variation de couple correspond globalement à la tendance du déplacement de l'élément cisailant. Cependant, nous observons dans toutes les configurations, des modes vibratoires dont la correspondance avec une variation de couple n'est pas clairement définie. Nous en concluons qu'un déplacement défini de l'élément cisailant n'engendre pas dans tous les cas une variation sur le couple.

Dans la configuration « R » les vibrations de l'élément cisailant sollicitent le fluide dans un mode de compression des chaînes. Ce mode accroît la rigidité de la partie immergée de la cloche engendrant un changement des conditions limites de type fixe - libre à fixe - fixe pour la cloche. Ce mode accroît les forces d'interaction entre le bas de la cloche et le fluide. Les forces transmises dans le fluide sont donc plus importantes et engendreraient plus d'impact dans la déstructuration des chaînes de particules. Ce qui explique en grande partie l'atténuation de la contrainte de cisaillement aux modes de déformations.

Les vibrations dans les configurations « Z » et « θ » sollicitent en revanche le fluide dans un mode de cisaillement des chaînes. Ce mode influe de moindre manière sur la rigidité de la partie immergée de la cloche et de ce fait modifie moins les conditions limites de la cloche. Les forces d'interaction entre le bas de la cloche et le fluide restent plus faibles. Cette force influe donc de manière moins prépondérante sur la structure des chaînes et de ce fait sur la contrainte de cisaillement du fluide.

3.4.2 Influences paramétriques

Dans cette partie, nous souhaitons comparer les trois configurations de vibration en fonctions des paramètres ayant une action sur le fluide.

Pour effectuer cette comparaison, nous nous focalisons sur l'amplitude du pic de diminution du couple soit pour la configuration « R » à 20 kHz, pour la configuration « Z » à 35 kHz et pour la configuration « θ » à 31 kHz.

Le fluide est influencé d'après leurs caractéristiques intrinsèques : la vitesse de cisaillement et le champ magnétique dans le fluide. Nous rajoutons aussi l'élément de l'étude : les vibrations, représentées par leurs tensions aux bornes de l'actionneur piézoélectrique. Nous délimitons donc la zone d'étude suivant ces trois paramètres comme indiqué ci-dessous :

- Un champ d'induction compris entre 0 et 750 mT, équivalant à 1,2 A dans la bobine. Ce champ magnétique, équivalant à un champ d'excitation de 175 kA/m, permet de se situer dans la zone fonctionnelle du fluide MR sans saturation (voir Figure 62).
- Une vitesse de cisaillement jusqu'à 320 s^{-1} , équivalant à 1,5 tr/s (zone dans lequel la variation du couple est importante).
- Une tension aux bornes de ou des actionneur(s) piézoélectrique(s) comprise entre 0 et 10 V. Cette limite est imposée par la forte capacité statique (de l'ordre de 700 nF) de l'actionneur piézoélectrique qui aux fréquences d'utilisation envisagées nécessite un courant important. Celui-ci dépasse les possibilités de l'alimentation électrique du banc expérimental ainsi que le courant admissible par le collecteur tournant.

Dans cet espace d'étude, on mesure la variation de couple pour chaque combinaison des valeurs de champ magnétique, de vitesse de cisaillement et de tension d'excitation. On en détermine un jeu de paramètres autour desquels leurs variations ont une forte influence sur le couple mesuré. Ce processus est mené pour les trois configurations mécaniques vibratoires après élimination des points de mesure donnant des résultats bruités et non exploitables. Les valeurs retenues sont alors présentées dans le Tableau 12.

	Configuration « R »	Configuration « Z »	Configuration « θ »
Champ magnétique	315 mT	315 mT	315 mT
Vitesse de cisaillement	160 s^{-1}	160 s^{-1}	80 s^{-1}
Tension de l'actionneur	7 V	6 V	10 V

Tableau 12 : Synthèse des points de fonctionnement pour chaque configuration.

3.4.2.1 Vitesse de cisaillement

Suivant l'évolution de la vitesse de cisaillement, représentée en Figure 84, nous observons, pour toutes les configurations, une décroissance rapide de la variation du couple. Cette décroissance a pour forme une exponentielle décroissante. Nous estimons que pour une vitesse de cisaillement supérieure à 100 s^{-1} , celle-ci n'a quasiment plus d'influence sur la variation de couple (inférieur à 1 % dans le cas des configurations « Z » et « θ »). C'est donc pour une faible vitesse de cisaillement que nous trouvons la plus grande diminution de couple, jusqu'à 20 % dans le cas de la configuration « R » et 11 % dans les deux autres.

Nous remarquons, comme mentionné dans la conclusion de la section précédente (3.4.1), de par sa configuration, la configuration « R » est la configuration la plus favorable à la variation de couple. Nous mesurons un écart entre la configuration « R » et les deux autres. Cet écart n'est pas constant, il diminue avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement, il est de 3 % à 100 s^{-1} .

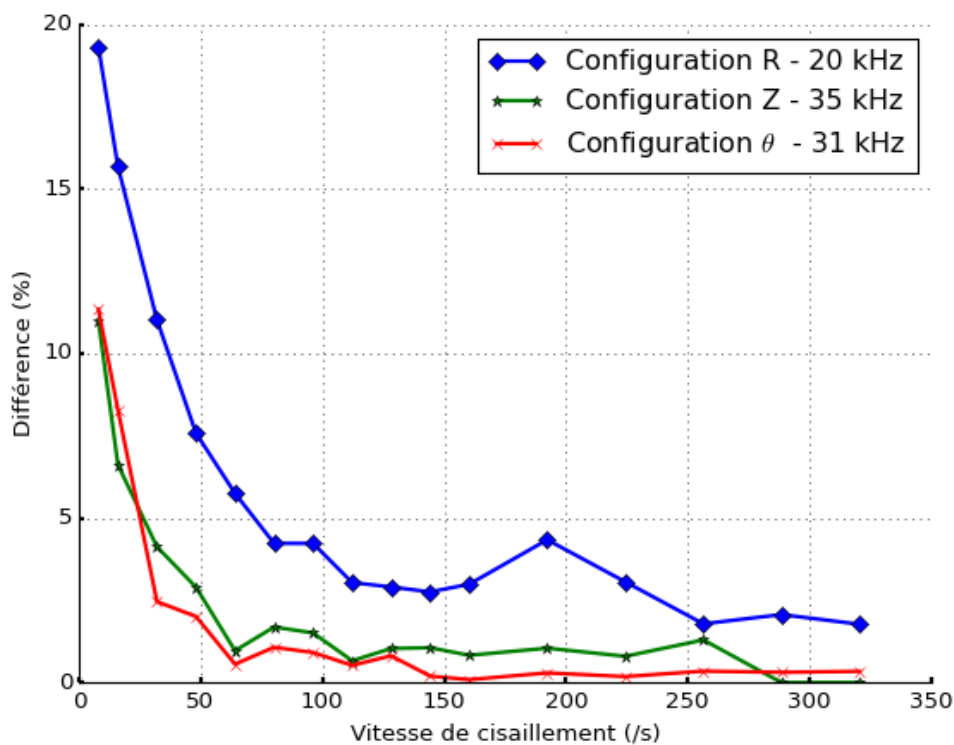


Figure 84 : Influence de la vitesse de cisaillement sur pic de variation de couple pour les 3 configurations.

3.4.2.2 Amplitude de vibrations

Durant l'étude des vibrations, nous avons confirmé que l'amplitude mesurée, dans les configurations « R » et « θ » et en partie pour la configuration « Z », était proportionnelle à la tension d'alimentation de ou des actionneur(s) piézoélectrique(s). Nous étudions dans cette partie, l'impact que la tension d'alimentation a sur la variation de couple.

Nous mesurons une augmentation de la variation de couple avec l'augmentation de la tension aux bornes de l'actionneur piézoélectrique (voir Figure 85). Cette augmentation semble être linéaire pour les trois configurations. L'effet dépasse les 1 % à partir de 6 V pour la configuration « R » et 9 V pour les deux autres configurations et reste croissant sans présence d'atténuation dans le set de mesure étudié.

La configuration R est encore une fois celle, la plus impactée par l'augmentation de la tension et celle ayant le pourcentage de diminution le plus important.

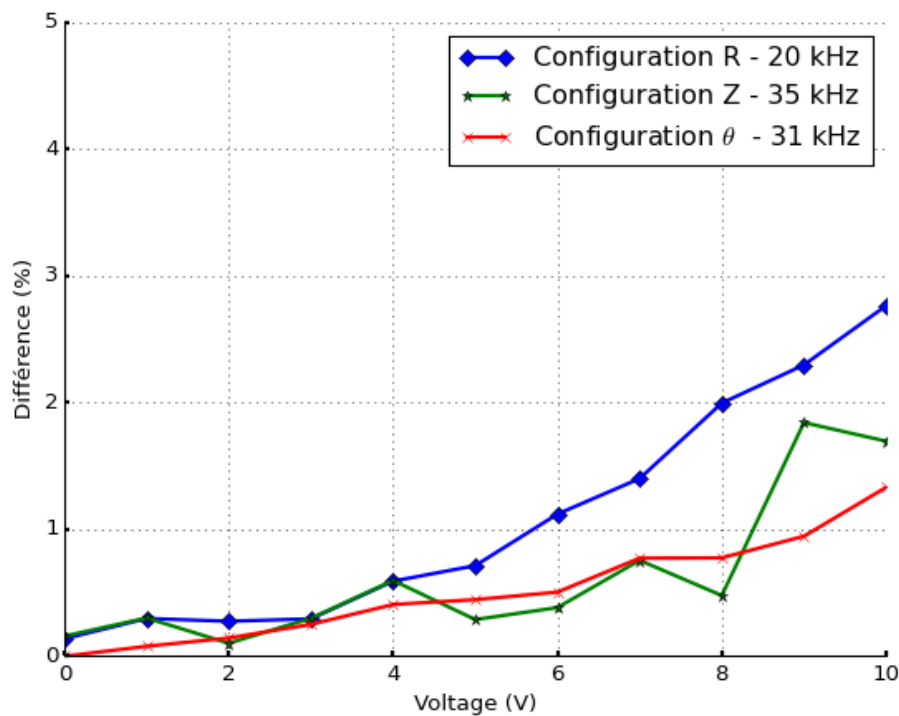


Figure 85 Influence de la tension aux bornes du ou des actionneurs piézoélectriques sur le pic de variation de couple pour les 3 configurations.

3.4.2.3 Champ magnétique dans le fluide

Nous retrouvons une évolution décroissante du couple en fonction du champ magnétique, représenté en Figure 86. Nous remarquons que les configurations « Z » et « θ » diminuent de manière exponentielle avec le champ magnétique.

La configuration « R » semble avoir une tendance différente avec l'augmentation du champ magnétique. Nous avons vu que dans le cas de cette configuration, l'amplitude de la déformation de l'élément cisailant augmente avec le champ magnétique (voir Figure 76). De plus nous avons vu, dans la Figure 85, qu'une tension plus importante dans l'actionneur piézoélectrique augmente la déformation de l'élément cisailant et de ce fait augmente la variation de couple. Nous pouvons donc dire qu'il y a pour la configuration « R » deux effets combinés représentés dans la Figure 86. Le premier est l'augmentation du champ magnétique diminuant l'influence des vibrations et le second est l'augmentation de la déformation par ce même champ. Nous observons tout de même que l'effet apporté sur la déformation de l'élément cisailant est moins prépondérant que l'atténuation de la variation de couple induit par la variation de champ magnétique.

Nous considérons que la diminution du couple est négligeable si la variation de couple est inférieure à 1 %. Suivant cette hypothèse, nous pouvons considérer, pour les configurations « Z » et « θ » que la variation de couple est négligeable pour un champ magnétique supérieur à 250 mT. Au-delà, les interactions entre les particules semblent suffisamment fortes pour ne pas subir de perturbation induite par les vibrations.

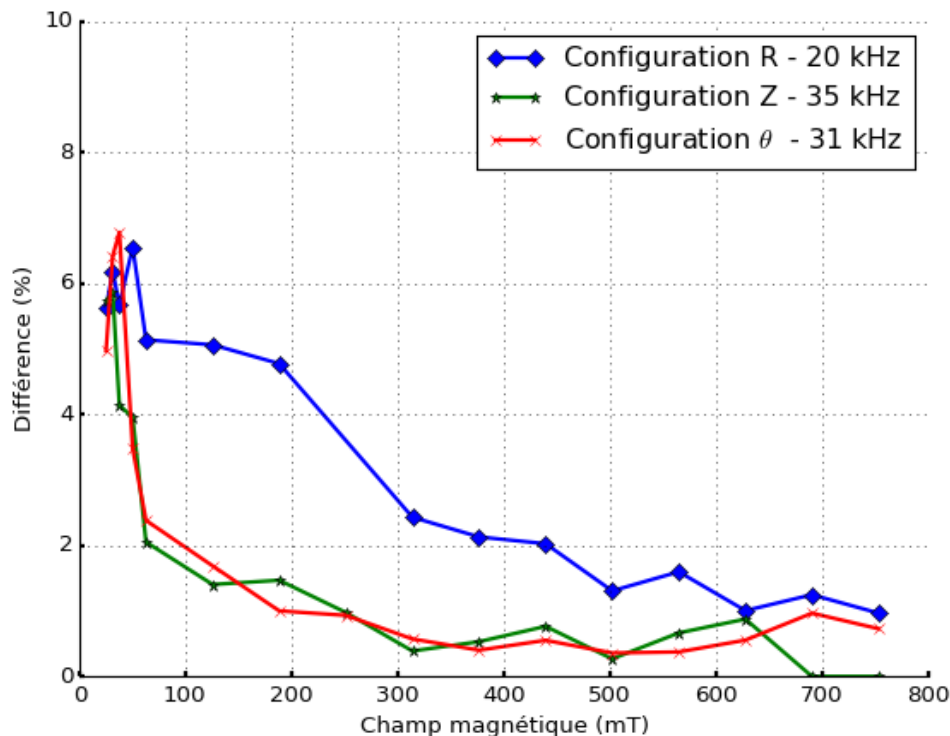


Figure 86 : Influence du champ magnétique dans le fluide sur le pic de variation de couple pour les 3 configurations.

3.4.2.4 Conclusion

Durant les évolutions paramétriques, suivant la vitesse de cisaillement, l'amplitude de vibration et le champ magnétique dans le fluide, nous avons mesuré que la configuration « R » est celle qui présente un pourcentage de variations du couple la plus importante. En effet, cette configuration présente des amplitudes de déformation les plus importantes, cela amène donc la configuration « R » à se situer dans un cas où les vibrations ont un impact plus prépondérant sur la diminution de couple comparé aux deux autres configurations.

Ensuite, nous constatons que les configurations « Z » et « θ » ont des résultats, pour chaque évolution paramétrique, très proche. Cependant les paramètres du point de fonctionnement, c'est-à-dire l'ensemble des paramètres restant fixe lors des trois variations paramétriques, de la configuration θ permettent d'avoir une diminution de couple plus importante pour mesurer l'impact des paramètres choisis que ceux de la configuration « Z ». Il est donc possible de dire que la configuration « θ » est celle présentant le moins de variations du couple.

Les paramètres liés au fluide, le champ magnétique et la vitesse de cisaillement diminuent l'effet observé sur le couple. Ces deux paramètres délimitent une zone restreinte où nous mesurons un effet sur le couple, soit un champ d'induction inférieur à 250 mT et une vitesse de cisaillement inférieur à 100 s^{-1} . Ces deux limites, comparativement au cadre d'utilisation d'applications industrielles rotatives utilisant les fluides MR, sont très faibles. Le champ d'induction de 250 mT correspond à un champ magnétique situé à 22 % du champ maximal avant saturation de la contrainte de cisaillement. De plus, les applications à haute vitesse de rotation ont une vitesse de cisaillement de quelques centaines de s^{-1} .

Nous remarquons le rôle principal de la vitesse de cisaillement. Pour la configuration « R », ayant une diminution maximale de 20 % à 8 s^{-1} , celle-ci influe de manière majoritaire. La diminution du couple n'est plus que de 3 % à 160 s^{-1} (point de fonctionnement). Similairement avec les autres configurations, nous mesurons une diminution d'environ 10 % entre les résultats au point de fonctionnement par rapport aux faibles vitesses de cisaillement. L'influence de champ magnétique quant à elle est moindre : elle a une influence d'environ 5 % sur la variation de couple entre un champ magnétique faible et le champ magnétique de référence (315 mT).

Le dernier paramètre influant sur la diminution du couple est l'amplitude du déplacement induit par les vibrations. Nous avons choisi de les représenter par la tension qui alimente les bornes de l'actionneur piézoélectrique. Nous constatons que la diminution de couple dépend linéairement de l'amplitude des vibrations. Ce résultat était attendu et montre en effet que la variation mesurée est bien dépendante des vibrations de l'élément cisailant.

Une autre façon de voir la diminution de couple est de se replacer au niveau des interactions intra particulières. À faible champ magnétique, les interactions sont faibles et donc plus faciles à perturber par l'action de vibrations. De même avec l'augmentation de la déformation, l'onde vibratoire est plus forte et effectue une perturbation plus importante sur les interactions particulières. L'explication concernant la vitesse de cisaillement est moins évidente. Plus celle-ci est faible, moins les chaînes de particules sont rompues fréquemment et donc moins les particules se déplacent. Ce qui pourrait les rendre plus susceptibles aux vibrations.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié trois configurations de vibration, dont les directions de vibrations sont colinéaires à un référentiel cylindrique. Ces trois configurations représentent toutes les combinaisons possibles de la direction de vibrations par rapport à la direction du champ magnétique et de la vitesse de cisaillement.

Nous avons caractérisé ses configurations par le déplacement dans la direction de vibrations. À l'air libre, les modes étudiés sont répartis de 0 à 50 kHz. Nous avons considéré que le déplacement était négligeable pour des fréquences supérieures. Suite à une modélisation par éléments finis, nous avons pu déterminer que les trois configurations de vibrations montrent une concordance à l'air libre tant à l'air libre qu'immergé avec les résultats issus des simulations, nous confortant ainsi sur les mesures effectuées expérimentalement.

Avec l'immersion de l'élément cisailant, nous mesurons une atténuation de l'amplitude des modes, d'un déplacement maximal de 4 μm à l'air libre à 1,5 μm , immergé. Cette atténuation n'est cependant pas constante en fonction de la fréquence : celle-ci est plus marquée pour les modes à basse fréquence (inférieur à 10 kHz) que pour les modes de fréquence supérieure.

L'application du champ magnétique dans le fluide influe lui aussi l'amplitude des déformations que l'on mesure, mais de manière complexe. Dans la configuration R, une amplification des modes pour les fréquences supérieures à 10 kHz est observée. Pour les configurations « Z » et « θ » on observe à la fois des phénomènes d'amplification et d'atténuation des modes, et ceci pour différente fréquence inférieure à 10 kHz.

Quand on regarde l'application du champ magnétique, on constate des remontées d'amplitude pour les 3 configurations, à des fréquences différentes. Ces remontées d'amplitude que l'on a constatées avec l'application du champ magnétique peuvent être mises en correspondance avec la variation de couple. Nous pouvons voir que pour la configuration « R » cela favorise la variation de couple, pour les configurations « Z » et « θ » nous avons constaté peu d'impact sur le couple mesuré.

Pour des fréquences supérieures à 10 kHz, nous mesurons un écart maximal au couple non perturbé de 20 % dans le cas de la configuration R et de 11 % dans les deux autres configurations.

Le déplacement observé est sur une portion limité de la cloche. De ce fait, la déformation observée, en dehors du fluide, ne permet pas forcément d'assurer l'impact engendré sur le taux de cisaillement. Cela nous amène à la réflexion si nous ne devons pas analyser le phénomène en termes de forces plus tôt que de déplacement.

Plus la vitesse de cisaillement augmente moins d'effet sur la variation de couple est constaté : cette variation du couple intervient pour des taux de cisaillement très faibles par rapport à des applications industrielles. De même, l'augmentation du champ magnétique a engendré la diminution de la variation de couple. L'effet du champ magnétique devient négligeable (inférieur à 1 % de variation sur le couple) pour un champ magnétique supérieur à 22 % du champ maximal avant saturation de la contrainte de cisaillement.

La configuration qui induit le plus d'effet sur le comportement du fluide MR est la configuration R, durant laquelle les vibrations sont perpendiculaires à la surface cisailant le fluide.

L'amplitude des vibrations engendrées dans le dispositif est du même ordre de grandeur que le diamètre des particules ferromagnétiques dans le fluide (de l'ordre de 1 à 10 μm). Cet ordre de grandeur de déplacement n'a pas permis de mettre en évidence si le phénomène de

perturbation des chaînes de particules avait atteint une limite ou s'il est encore possible d'engendrer davantage d'effet sur la contrainte de cisaillement développée par le fluide.

Enfin, nous avons étudié le fluide MR, le 132 DG de Lord. L'étude d'un seul fluide ne permet pas de généraliser les causes de la diminution du couple induit par des vibrations dans l'élément cisailant. Dans l'état de l'art, nous avons mentionné plusieurs fluides existant dans le commerce. Nous nous baserons sur ces fluides pour élargir les observations sur d'autres compositions de fluide présentant différentes concentrations en particules.

Chapitre 4

Effets des vibrations sur différents fluides magnéto-rhéologiques

Table des matières

4.1 Introduction.....	92
4.2 Les fluides étudiés	92
4.3 Mesure de la Déformation.....	93
4.3.1 Influence de l'immersion dans le fluide.....	94
4.3.2 Influence du champ magnétique sur la déformation	96
4.3.3 Suivi du mode principal	98
4.4 Variations du couple	102
4.4.1 Influence du champ magnétique.....	104
4.4.2 Influence de l'amplitude de déformation	108
4.5 Conclusion.....	110

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif est de comparer l'impact des vibrations sur différents fluides du commerce. Plus particulièrement, on étudiera les fluides LORD : MRF 122EG, MRF 132DG et MRF 140CG et les fluides de Liquids Research : MRHCCS4A et MRHCCS4B.

Dans le précédent chapitre, un comparatif des différentes configurations de vibration « R », « Z » et « θ » a été mené (Chapitre 3-3.2). Nous en avons déduit que la configuration « R » était celle qui présentait le plus de variation de couple comparée aux deux autres. Nous nous focaliserons donc sur cette configuration pour étudier les fluides LORD et Liquids Research.

Similairement aux chapitres précédents, nous nous focalisons sur deux points principaux pour comparer les fluides. Le premier est de savoir si le comportement modal de l'élément vibrant est le même pour tous les fluides. Le second point est d'étudier la variation du couple mesuré en fonction du champ magnétique dans le fluide et de l'amplitude de déformation de l'élément cisailant.

4.2 Les fluides étudiés

Les fluides, quel que soit leur constructeur, ont des propriétés distinctes. Dans cette partie, nous rappelons les caractéristiques essentielles de ces fluides qui sont reprises dans le Tableau 13. Les fluides LORD sont nommés en fonction de leur densité massique de particules : le fluide 140CG en ayant le plus : 85,44 % massique, suivi du 132DG (80,98 %) et enfin le 122EG (72 %) qui en présente moins. Pour les fluides du fabricant Liquids Research, le fluide MRHCCS4A a une proportion massique de particules plus faible que le MRHCCS4B : 70% contre 80% respectivement.

Il nous faut noter la très proche correspondance entre les proportions massiques de particules, aux alentours de 70 %, des fluides MRHCCS4A et du fluide 122EG. De même, les fluides MRHCCS4B et 132 DG se correspondent avec une proportion massique de particules de l'ordre de 80 %.

	140CG	132DG	122EG	MRHCCS4-A	MRHCCS4-B
Masse volumique (g/cm ³)	3,64	3,05	2,38	2,49	3,08
Viscosité (Pa s)	0,280	0,112	0,042	0,17	0,24
% massique de particules	85,44	80,98	72	70	80
Fournisseur	LORD	LORD	LORD	Liquids Research	Liquids Research

Tableau 13 : Caractéristiques disponibles pour les différents fluides MR.

Nous souhaitons comparer les variations de couple pour un champ magnétique commun à tous les fluides. Pour cela, nous adaptons le courant dans la bobine en fonction des propriétés magnétiques des fluides représentées dans la Figure 87.

Dans cette figure, nous pouvons observer que les fluides 122EG et MRHCCS4-A, ayant un pourcentage massique de 70 %, ont une courbe d'induction relativement proche. Similairement,

nous pouvons voir un rapprochement entre les courbes d'induction 132DG et MRHCCS4-B, ayant un pourcentage massique de particules de 80 %.

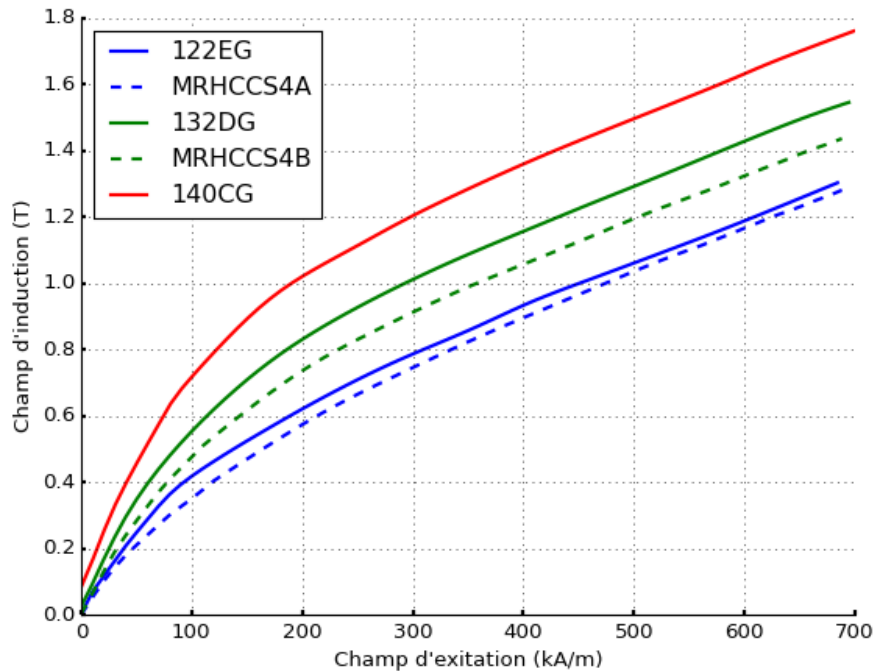


Figure 87 : Courbes d'induction pour différents fluides du commerce.

Nous obtenons grâce à des simulations par éléments finis, par une méthode similaire à celle décrite dans le chapitre 2 (2.2.1.1), les relations linéarisées suivantes :

Fluide	Équations
122EG	$B = 0,543 I$
132DG	$B = 0,6275 I$
140CG	$B = 0,735 I$
MRHCCS4A	$B = 0,532 I$
MRHCCS4B	$B = 0,595 I$

Tableau 14 : Relations entre le champ magnétique induit dans le fluide B en Tesla et le courant d'excitation dans la bobine I en Ampères.

4.3 Mesure de la déformation

Dans cette section, l'objectif est d'étudier l'évolution des déformations de l'élément cisailant en fonction de la présence de différents fluides Magnéto-Rhéologiques (MR). Il est possible de décomposer l'étude en deux parties :

- L'atténuation des modes vibratoires de l'élément cisailant suite à son immersion dans le fluide désigné.
- La variation de l'amplitude de déformation avec l'application du champ magnétique pendant son immersion.

Nous étudions le même élément cisailant qui est sous la forme d'un cylindre creux. Les vibrations sont dirigées suivant la direction radiale, configuration « R », représentées dans le chapitre 3-2.3.1.

4.3.1 Influence de l'immersion dans le fluide

Dans chacun des cas, l'immersion de l'élément cisailant se situe à 12 mm de profondeur. La Figure 89 montre les résultats des mesures de déformation de la cloche lors de l'immersion pour les fluides Liquids Research (MRHCCS4A et MRHCCS4B) et pour les fluides LORD (MRF 122EG, MRF 132DG et MRF 140CG).

Nous observons dans un premier temps un amortissement des pics de vibrations à basse fréquence (repère A) quelles que soient les caractéristiques des fluides. Concernant les fréquences supérieures à 10 kHz (repère B), les modes en présence des fluides MR sont globalement décalés vers la droite. Le mode principal se situe environ à 19 kHz pour tous les fluides, sauf le MRHCCS4B situé à 17,6 kHz. Nous retrouvons, comme dans le chapitre précédent, le mode principal accompagné d'un second mode à 25 kHz environ dans tous les fluides.

Nous remarquons que pour des fluides à forte viscosité, soit pour les fluides MRHCCS4A, MRHCCS4B et 140DG, les modes haute fréquence sont fortement atténués et lissés. Nous remarquons également que les fluides 122EG et 132DG ont une densité modale plus importante que les fluides provenant de Liquids Research.

La Figure 88 représente la déformation maximale mesurée pour l'immersion de l'élément cisailant dans les cinq fluides étudiés en fonction de leur viscosité (gauche) et de leur pourcentage massique en particules (droite). Comme énoncé juste précédemment, nous observons que l'amplitude des déformations, coefficient de détermination (R^2) égal à 0,67, est décroissante en fonction de la viscosité de chaque fluide. En revanche, il est difficile d'établir l'influence du pourcentage massique de particules sur la déformation de l'élément cisailant.

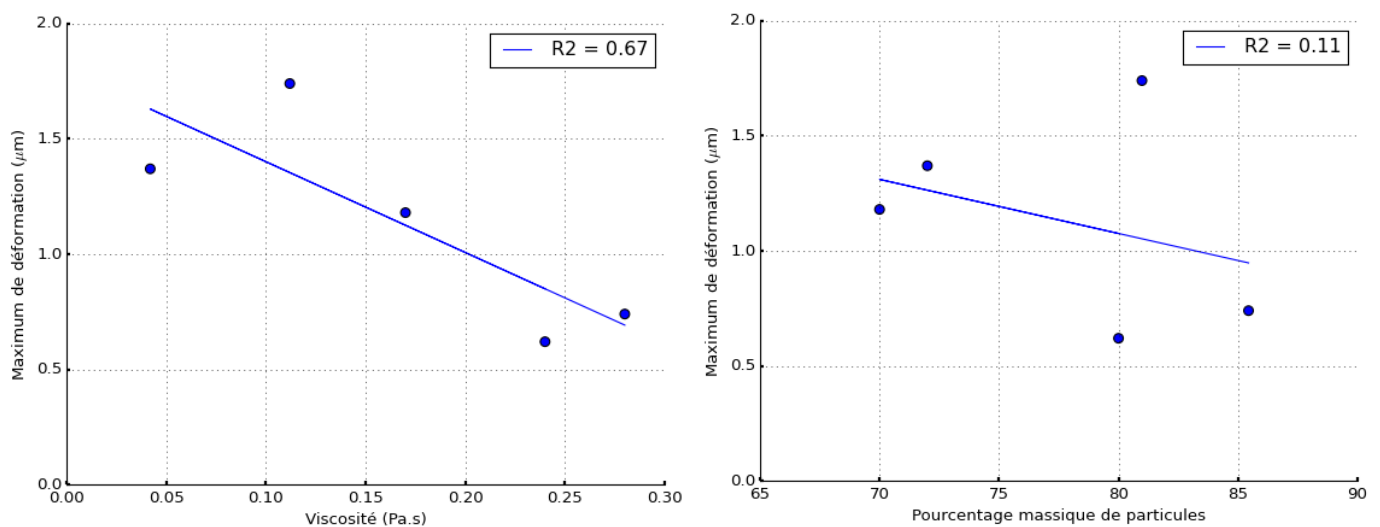


Figure 88 : Amplitude maximale de déformation en fonction de la viscosité (gauche) et du pourcentage massique de particules (droite) pour chaque fluide.

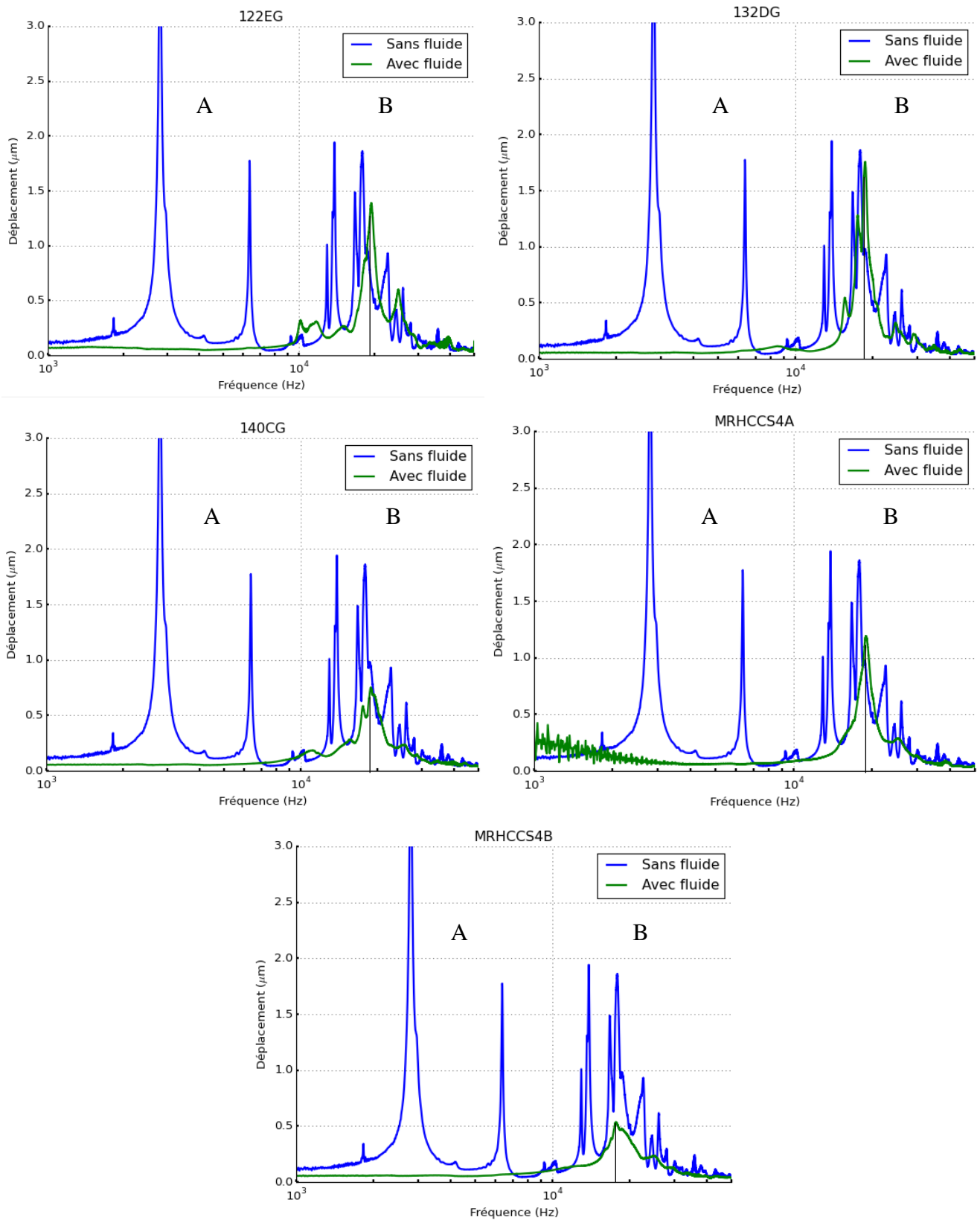


Figure 89 : Représentation de l'amplitude de déformation moyenne de l'élément cisailant, en micromètre, en fonction de la fréquence à l'air libre, en bleu et dans le fluide, en vert pour tous les fluides.

4.3.2 Influence du champ magnétique sur la déformation

Suite à la mise en place de la coche dans le fluide, on s'intéresse maintenant à la variation de la déformation de l'élément cisailant en fonction de l'augmentation du champ magnétique dans le fluide étudié.

Les résultats pour les fluides LORD et les fluides Liquids Research sont exposés dans la Figure 91, pour trois intensités de champ magnétique : 0, 0,25 et 0,5 T. Cette figure a été recentrée sur les zones d'intérêt pour faciliter l'observation de la déformation pour des fréquences comprises entre 9 et 50 kHz. Pour une fréquence inférieure à 10 kHz, l'amplitude de déformation, faible suite à l'immersion (voir sous-section 4.3.1), reste non modifiée après l'application d'un champ magnétique.

Avec l'application du champ magnétique, on remarque que les fréquences modales de la structure sont conservées, mais qu'à priori l'amplitude de déformation est atténuée sauf dans le cas du fluide MRHCC4B qui présente alors une augmentation. Nous mesurons une atténuation maximale de 1 μm dans le cas du fluide 132DG pour un champ magnétique de 0,5 T.

Un effet majeur qui se reproduit, quel que soit le fluide est un effet du lissage et d'uniformisation de l'effet vibratoire lorsqu'un champ magnétique est appliqué. On note également qu'il n'y a pas de variation notable de la fréquence de résonance du mode prépondérant à 19 kHz.

La Figure 90 représente la déformation maximale mesurée, dans le cadre d'un champ magnétique de 0,5 T, pour l'immersion de l'élément cisailant dans les cinq fluides étudiés en fonction de leur viscosité (gauche) et de leur pourcentage massique en particules (droite). Nous observons que le maximum de déformation présente une dépendance décroissante liée au pourcentage de particules dans le fluide, coefficient de détermination (R^2) égale à 0,66. Par contre, la viscosité ne semble pas influencer sur la déformation maximale mesurée à 0,5 T.

D'un point de vue macroscopique, la variation de la déformation suite au champ magnétique n'est pas celle qui est attendue. Dans le cas des chapitres précédents on avait expliqué cette variation, une augmentation, par le fait d'avoir un point de mesure en dehors du fluide et un fort amortissement qui dans le fluide. Or, les résultats que l'on obtient dans ce chapitre montrent dans la majorité des cas une diminution de l'amplitude suite au champ magnétique. Ces résultats sont à priori contraires à ce qui est exposé dans le cas de du chapitre précédent. Nous montrerons, dans la partie suivante, que ces résultats ne sont pas en opposition.

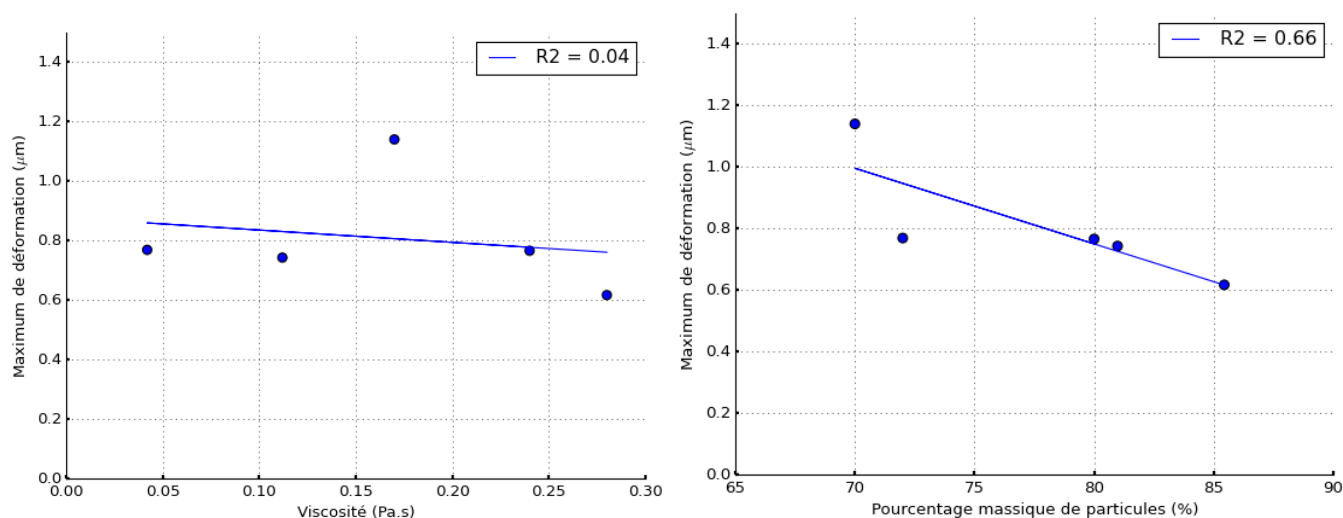


Figure 90 : Amplitude maximale de déformation mesurée pour un champ magnétique de 0,5 T, en fonction de la viscosité (gauche) et du pourcentage massique de particules (droite) pour chaque fluide.

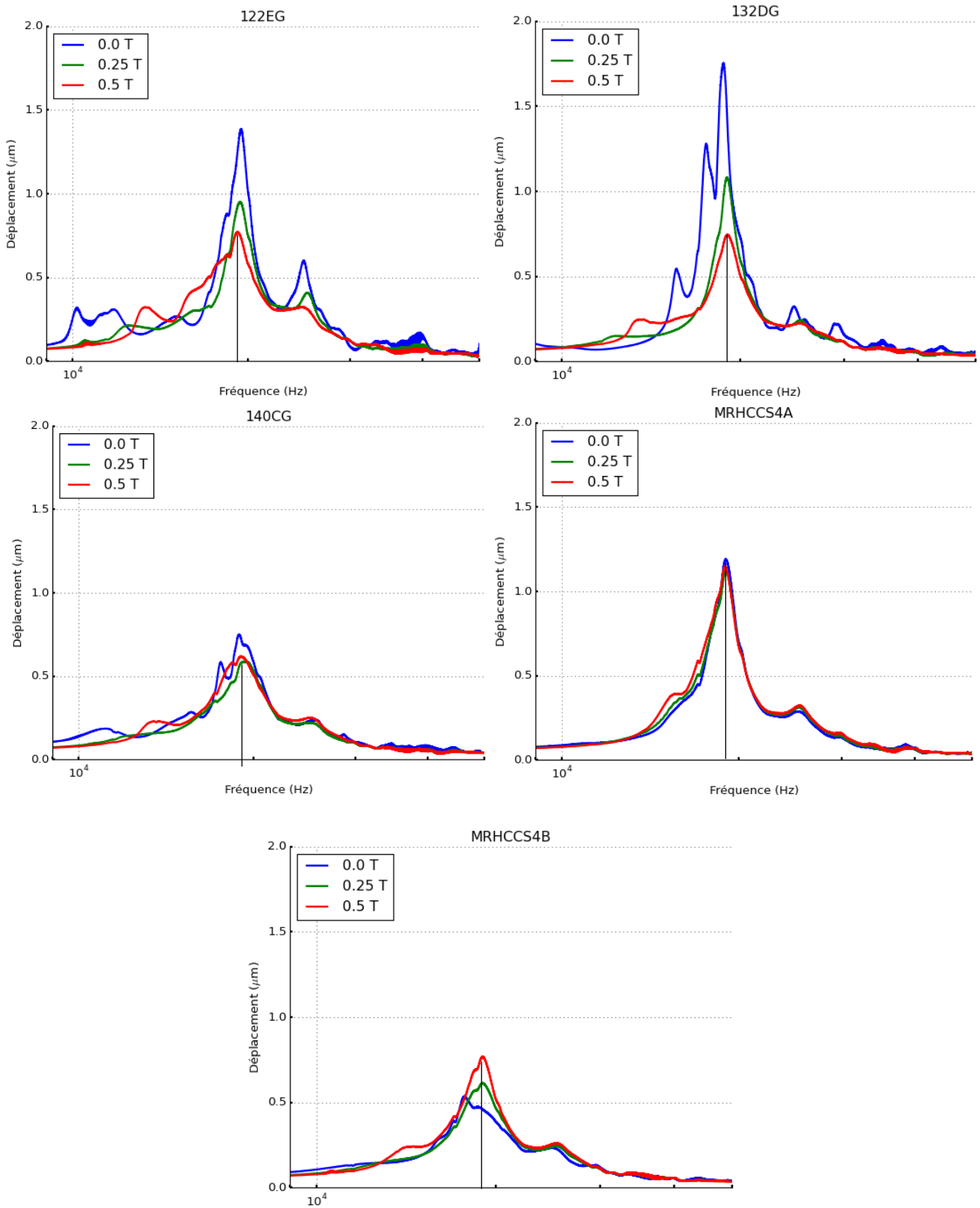


Figure 91 : Représentation de l'amplitude de déformation moyenne, en micromètre, de l'élément cisailant, en fonction de la fréquence, en Hertz, sans champ magnétique.

4.3.3 Suivi du mode principal

Nous nous intéressons ici à la relation entre l'amplitude de variations et les paramètres de l'étude notamment le champ magnétique et la tension aux bornes de l'actionneur piézoélectrique. La zone d'étude comprend des champs magnétiques jusqu'à 0,5 Tesla et une excitation de l'actionneur jusqu'à 10 Volts. En s'appuyant sur les résultats des chapitres précédents montrant que la variation du couple était liée principalement au mode dominant de l'élément cisailant, on se focalise sur le mode principal dans les environs de 19 kHz. On étudie donc l'évolution de ce mode en fonction de l'excitation demandée à l'actionneur piézoélectrique, générant l'onde vibratoire.

Dans un premier temps, nous observons une linéarité entre le déplacement et la tension appliquée pour tous les fluides.

Cependant, en fonction du champ magnétique nous observons une variation du comportement du mode suivi qui diffère pour chaque fluide (voir Figure 93). Nous observons deux tendances de la déformation en fonction du champ magnétique : une tendance décroissante qui est dominante dans le cas des fluides 122EG et 132DG et une tendance croissante qui est dominante dans le fluide MRHCC4B. Dans les autres fluides (140CG et MRHCC4A), l'impact du champ magnétique est relativement faible, nous observons toutefois une décroissance (repère A) suivie d'une croissance (repère B) de la déformation.

Nous remarquons que les fluides ayant une viscosité plus faible ont tendance à décroître (voir Figure 92) avec le champ magnétique. Cependant du fait du nombre de fluides étudiés nous ne pouvons conclure sur une tendance globale.

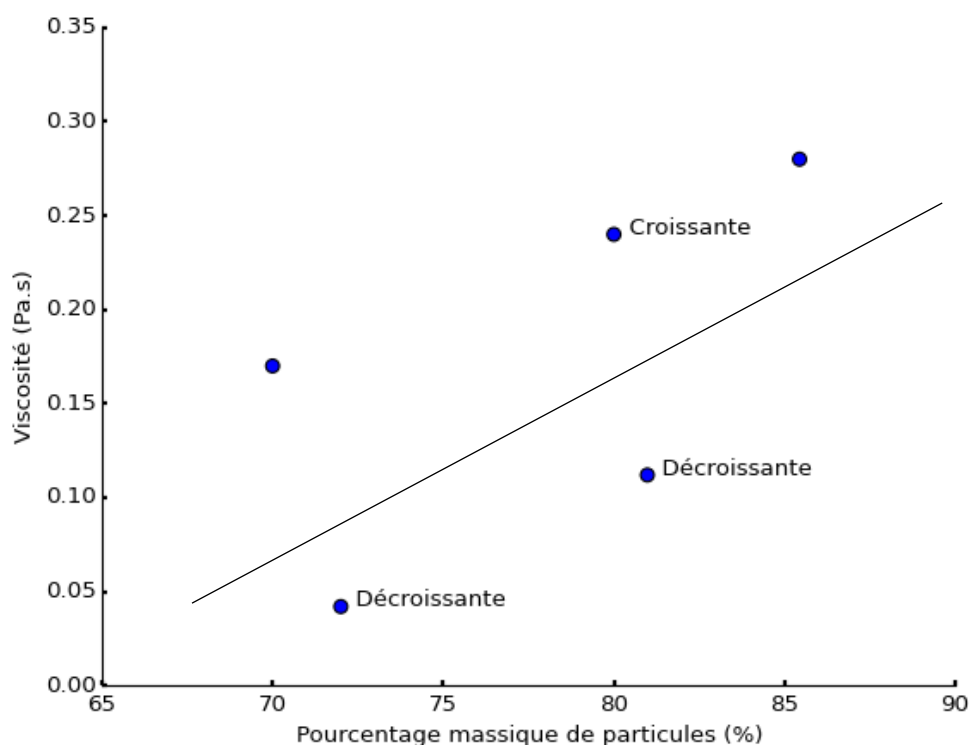


Figure 92 : Tendance des variations de l'amplitude de déformation en fonction du champ magnétique en fonction de la viscosité et du pourcentage massique de particules dans chaque fluide.

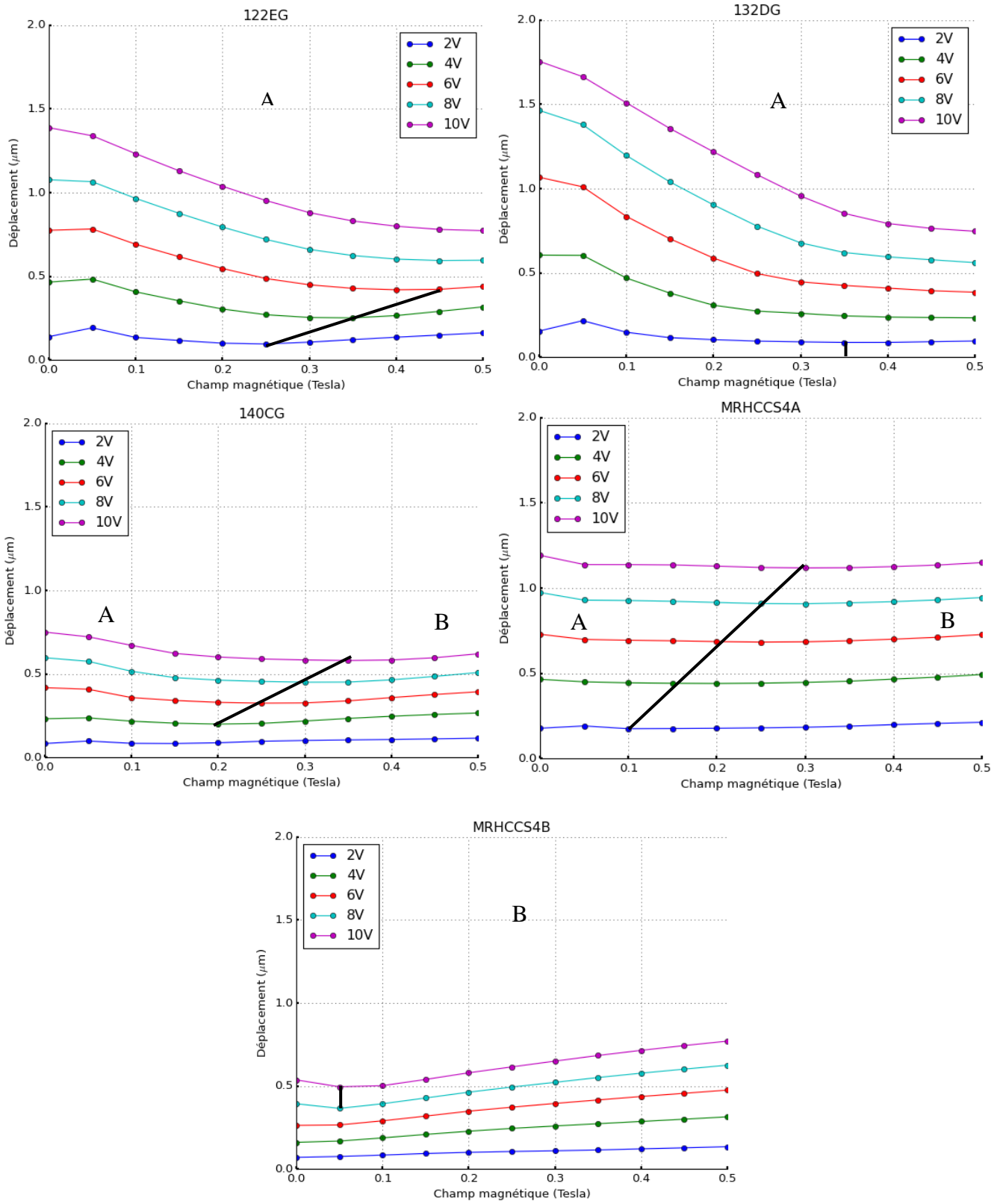


Figure 93 : Variation de l'amplitude, en micromètre, en fonction du champ magnétique, en Tesla, pour différentes tensions aux bornes de l'actionneur piézoélectrique en Volts. Le minimum de chaque courbe est indiqué par le trait noir sur chaque graphique.

Suite à une analyse plus minutieuse, nous avons constaté que la variation de la déformation en fonction du champ magnétique s'effectue en deux temps pour chaque fluide. Tout d'abord, nous observons une décroissance de la déformation en fonction du champ magnétique suivi par une tendance croissante. Ce phénomène est particulièrement visible pour les fluides 140CG et MRHCC4A qui comportent une tendance décroissante (repère A) suivie d'une tendance croissante (repère B).

Nous remarquons que la zone de transition entre ces deux tendances varie pour chaque fluide. La Figure 94 représente le champ magnétique correspondant au minimum de la déformation exprimé en fonction de la viscosité (gauche) et du pourcentage massique de particules (droite) pour une tension d'excitation de 2 V. Dans le cas où nous observons seulement une tendance croissante, le champ d'induction correspondant au minimum sera arbitrairement fixé à 0 T. Similairement dans le cas d'une décroissance, le champ sera indiqué comme égal à 0,5 T. Nous observons alors que le changement de comportement du fluide semble dépendant de la viscosité fluide, coefficient de détermination (R^2) égal à 0,74. De plus, le pourcentage massique de particules ne semble pas influencer sur ce changement de comportement. Nous avons constaté que la tension d'excitation de l'actionneur piézoélectrique, tout en conservant la tendance constatée précédemment, décale le minimum de déformation vers un champ d'induction plus important. Les minimas représentés dans la Figure 94 sont reportés sur chaque courbe de la Figure 93 et sont indiqués par les segments de droite noirs.

Une interprétation de ce comportement de « vallée », est de dire que lors de la tendance décroissante, la viscosité apparente du fluide, accrue par le champ magnétique, va amortir et donc atténuer l'amplitude de variation de l'élément cisailant. Cela paraît en concordance avec les résultats de la partie 4.3.1, qui montrent que l'amplitude maximale suite à l'immersion de l'élément cisailant dépend de la viscosité du fluide. Puis au fur et à mesure que le champ magnétique continue de s'accroître, la tendance croissante s'amorce, l'extrémité de la cloche dans le fluide devient plus rigide avec l'augmentation du champ magnétique. Nous retrouvons les résultats décrits dans le chapitre 3 (3.3.3.1) durant lesquels la déformation de la configuration « R » augmentait avec le champ magnétique dans le fluide.

Lorsque la tension d'excitation augmente, nous constatons un décalage de la position du minimum vers des valeurs de champ magnétique plus élevées. Une interprétation serait que les vibrations génèrent des perturbations dans le fluide limitant la cohésion des particules par le champ magnétique. Il faut donc que ce dernier soit plus important afin de redonner la rigidité nécessaire au bas de la cloche correspondant au cas observé dans le chapitre 3 (3.3.3.1).

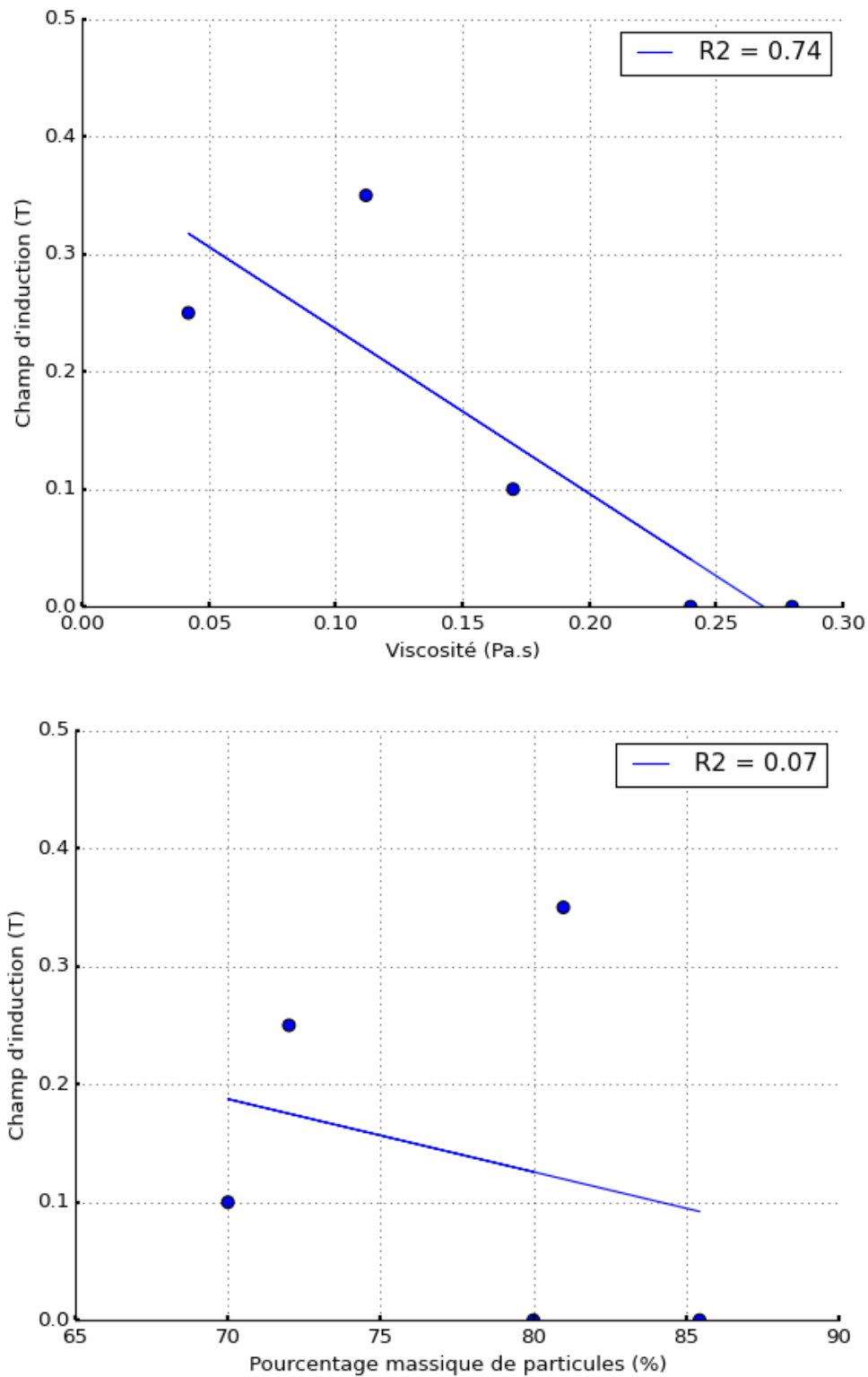


Figure 94 : Champ magnétique correspondant au changement de comportement de l'amplitude vibratoire en fonction de la viscosité (gauche) et du pourcentage massique de particules (droite) dans le fluide pour une tension d'alimentation de l'actionneur de 2 V.

4.4 Variations du couple

Dans cette partie, on s'intéresse à la variation de couple en présence de vibrations dans l'élément cisailant par rapport au couple pour un fonctionnement non perturbé par des vibrations.

Nous étudions donc la variation de couple décrite par l'équation (26), décrite plus en détail dans le chapitre 2 (section 2.4.1) pour la méthode de traitement. Dans le précédent chapitre, nous avons déduit que l'effet était plus important à faible champ magnétique et à faible vitesse de rotation. Pour l'évaluation des variations de couple qui va suivre, nous nous limiterons à un champ magnétique dans le fluide inférieur à 0,5 T. La vitesse de cisaillement est limitée à 50 s^{-1} , ce qui correspond à une vitesse de rotation de 18,72 tr/min.

La Figure 95, en page suivante, montre pour chaque fluide l'évolution de la variation du couple en fonction de la fréquence d'excitation de l'actionneur piézoélectrique avec une vitesse de cisaillement de 25 s^{-1} , un champ magnétique de 0,15 T est une tension de 10 V aux bornes de l'actionneur piézoélectrique.

La Figure 95 représente également l'amplitude de déformation de l'élément cisailant, en vert, pour le même ensemble de paramètres que pour la mesure de couple.

Pour chaque fluide, le même phénomène se retrouve, à savoir l'allure de la variation de couple reproduit l'allure de la variation de déformation de l'élément cisailant. La comparaison entre la courbe de la variation de couple et la variation de l'amplitude montre un décalage fréquentiel d'environ 2,5 kHz entre les deux courbes, indépendamment du fluide pris en considération. Les diminutions majeures s'effectuent donc à 22,5 et 28 kHz et sont liées aux modes de déformation majeurs observés dans la section précédente soit à 19 et 25,5 kHz. Ces concordances variation de couple / variations de déformation sont en accord avec ce que l'on a pu observer précédemment dans les différents chapitres. Nous pouvons donc en conclure que, quel que soit la composition du fluide, la variation de couple est liée aux modes vibratoires de l'élément cisailant.

Au vu de ces courbes, aucune tendance ni en fonction de la viscosité ni du pourcentage de particules n'est discernée. Cependant, nous observons que cette tendance est plus ou moins marquée suivant les fluides et les variations de couple au regard de l'amplitude vibratoire semblent importantes pour le fluide 140CG, modérées pour les fluides 122EG, 132DG, MRHCCS4B et faible pour le fluide MRHCCS4A.

Pour comparer les fluides entre eux et mesurer sur chaque fluide l'effet du champ magnétique et de l'amplitude de déformation, nous effectuons deux séries d'expériences :

- Série 1 : L'impact du champ magnétique sur la variation de couple.
- Série 2 : L'impact de l'amplitude de la déformation de l'élément cisailant.

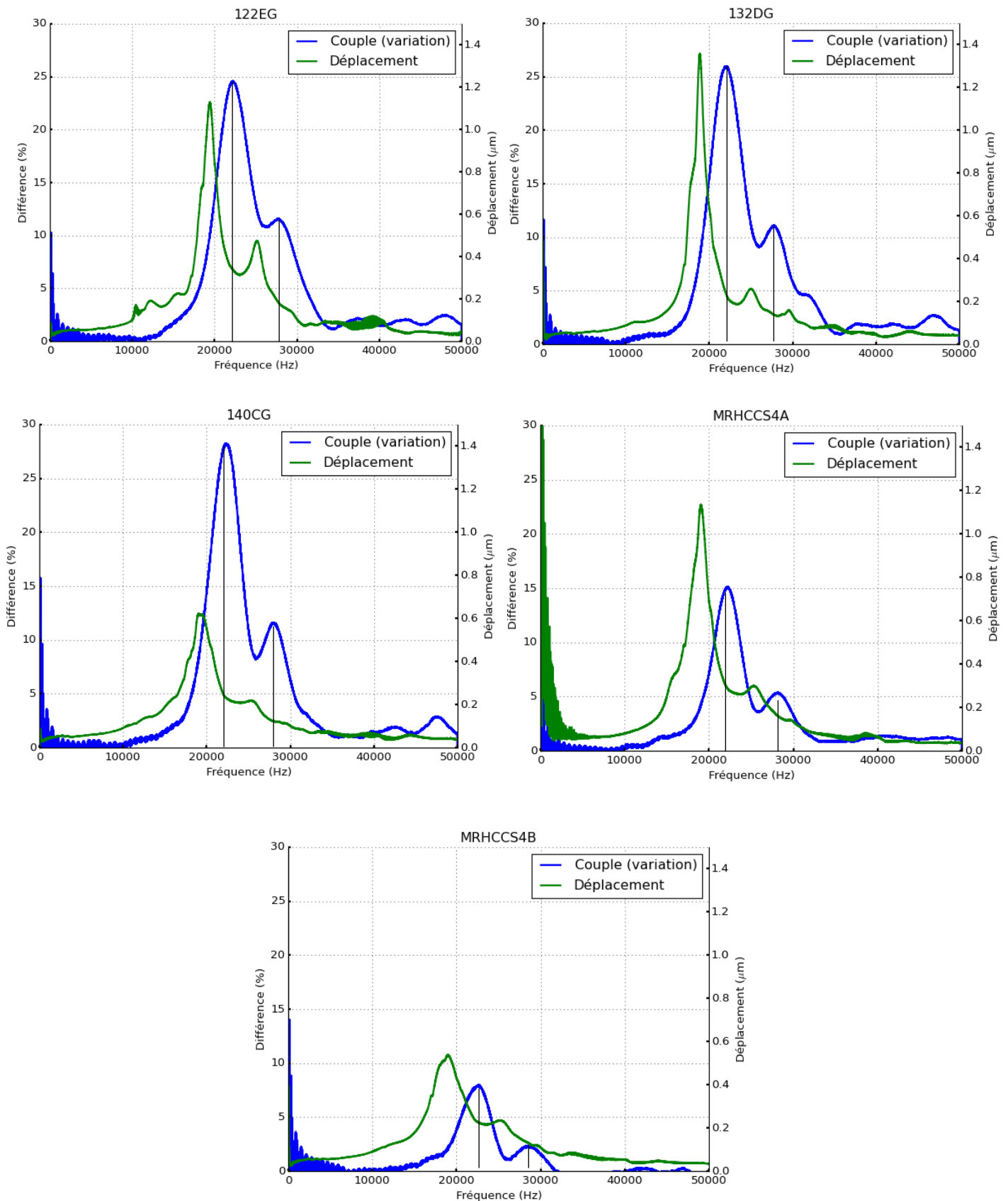


Figure 95 : Représentation de la variation de couple en bleu, en pourcentage, en fonction de la fréquence en Hertz dans le cas d'une tension de 10 Volts, un champ magnétique de 0,15 Tesla et une vitesse de cisaillement de 25 s^{-1} (9,36 tr/s). Dans le même cas d'étude, en vert l'amplitude de la déformation moyenne mesurée sur l'élément cisailant en micromètres.

4.4.1 Influence du champ magnétique

Nous étudions dans cette partie l'influence du champ magnétique sur la variation de couple, plus précisément lors du pic de variation du couple à 22,5 kHz. Dans un premier temps, pour conforter ce qui a été décrit dans le chapitre précédent, nous choisissons deux vitesses de cisaillement, 25 et 50 s⁻¹, ainsi que deux tensions aux bornes de l'actionneur piézoélectrique, 6 et 10 V. Les mesures sont effectuées pour un champ magnétique dans le fluide tous les 0,05 T jusqu'à 0,5 T. Ces données sont reprises dans le Tableau 15.

Dans un second temps, nous mettons en regard le comportement de chaque fluide suivant le champ magnétique pour une tension d'alimentation de 10 V et une vitesse de cisaillement de 25 s⁻¹.

Paramètres	Valeurs
Vitesse de cisaillement	25 s ⁻¹ et 50 s ⁻¹
Champ magnétique	De 0,05 à 0,5 Tesla (Incrément : 0,05 T)
Tension crête appliquée	6 et 10 Volts
Balayage fréquentiel	0 à 50 kHz en 1 seconde

Tableau 15 : Paramètre de l'expérience : Influence du champ magnétique.

La Figure 96, effectue la comparaison entre les résultats obtenus pour une tension d'alimentation de 6 et 10 V pour chaque fluide à une vitesse de cisaillement de 25 s⁻¹.

La Figure 97, effectue la comparaison entre les résultats obtenus pour une vitesse de cisaillement de 25 et 50 s⁻¹ pour chaque fluide avec une tension d'alimentation de 10 V.

On remarque que, dans tous les cas, l'évolution de la variation de couple présente un maximum à faible champ magnétique, compris entre 0,1 T et 0,25 T. En dehors de cette zone plus le champ magnétique est important plus la variation de couple est faible. Nous observons, en accord avec les résultats du chapitre précédent, qu'une tension d'excitation plus faible de l'actionneur piézoélectrique ainsi qu'une vitesse de cisaillement plus importante impliquent une diminution de la variation de couple.

La position de ce maximum en fonction du champ magnétique, interfaçant deux tendances, est variable. Il semble montrer un changement de sensibilité du fluide vis à vis des perturbations vibratoires :

- À faible champ magnétique, précédant le maximum, les forces d'interactions entre les particules ferromagnétiques sont faibles et de ce fait sont plus susceptibles d'être perturbées par les vibrations.
- À fort champ magnétique, suite au maximum, les forces d'interactions entre les particules deviennent de plus en plus importantes, les vibrations induites dans le fluide ont plus de difficulté à perturber la contrainte de cisaillement du fluide.

Nous remarquons que pour un même fluide, les courbes ont des tendances similaires malgré les différentes conditions expérimentales pour la vitesse de cisaillement ou la tension d'excitation. On en conclut que la position du maximum remarqué est très peu influencée par la vitesse de rotation et par l'amplitude de déformation de l'élément cisailant.

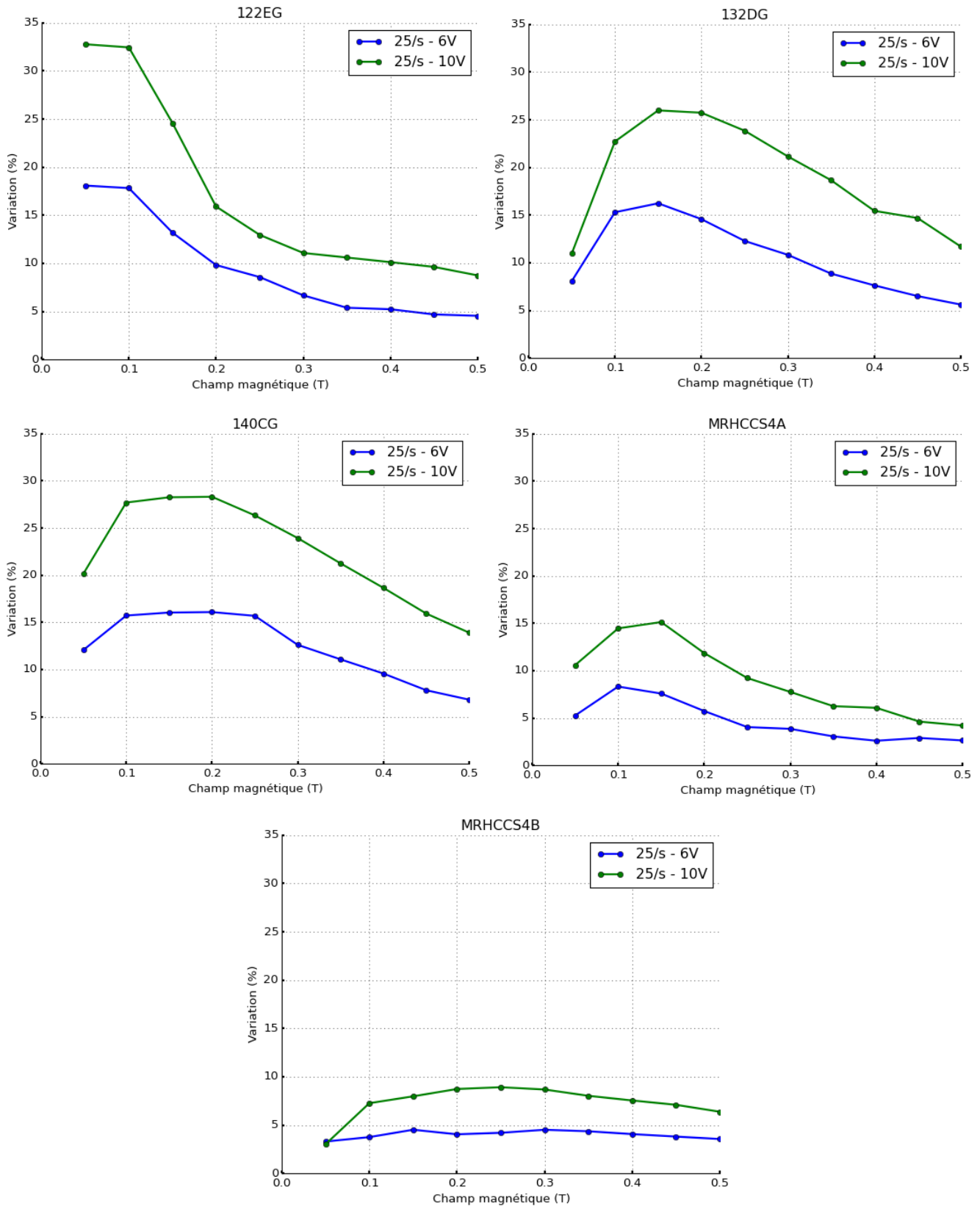


Figure 96 : Variation du couple en pourcentage, à la fréquence modale en fonction du champ magnétique, en Tesla. En vert, étude dans le cas d'une tension de 10 Volts et 25 s⁻¹. En Bleu, étude dans le cas d'une tension de 6 Volts et 25 s⁻¹.

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

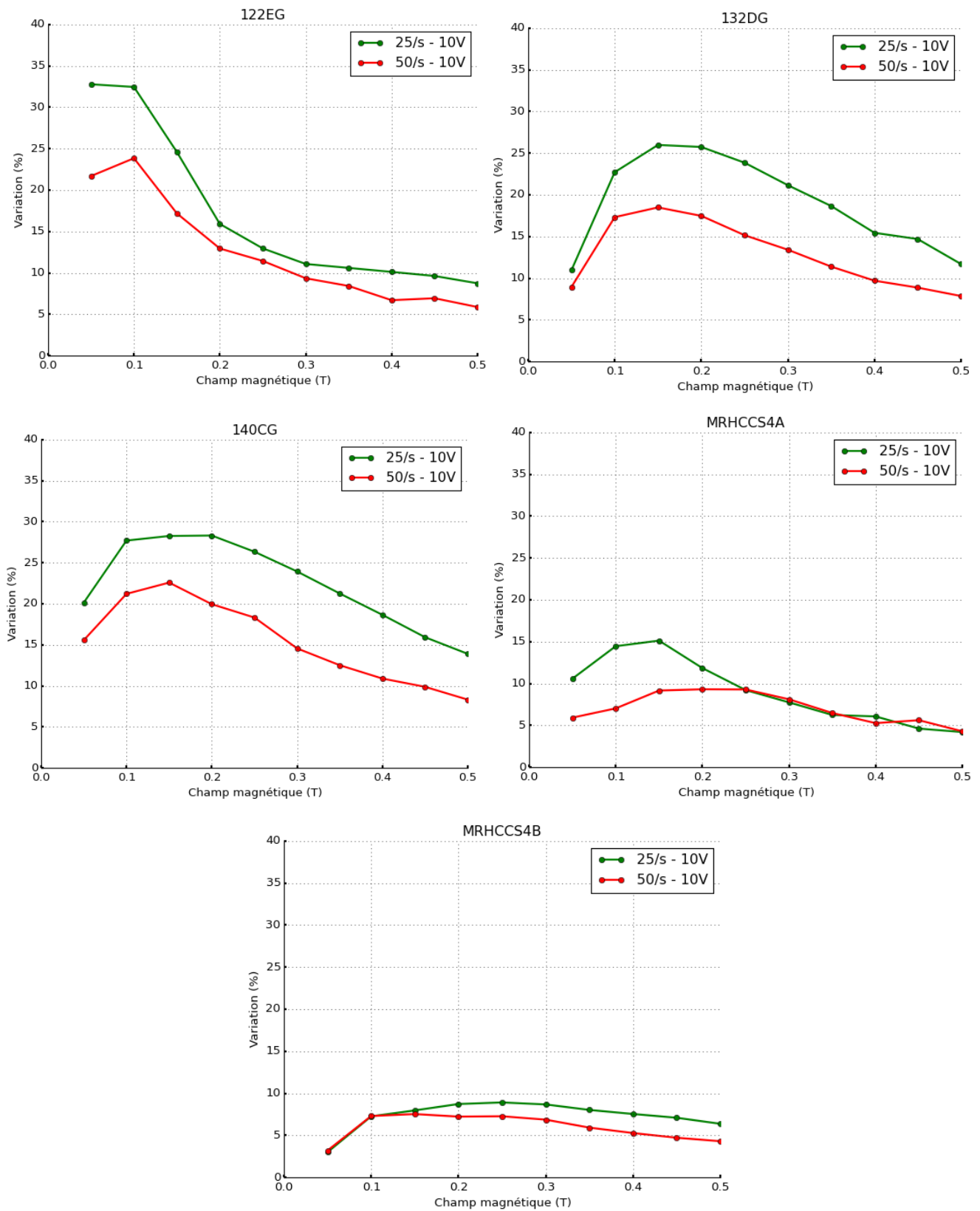
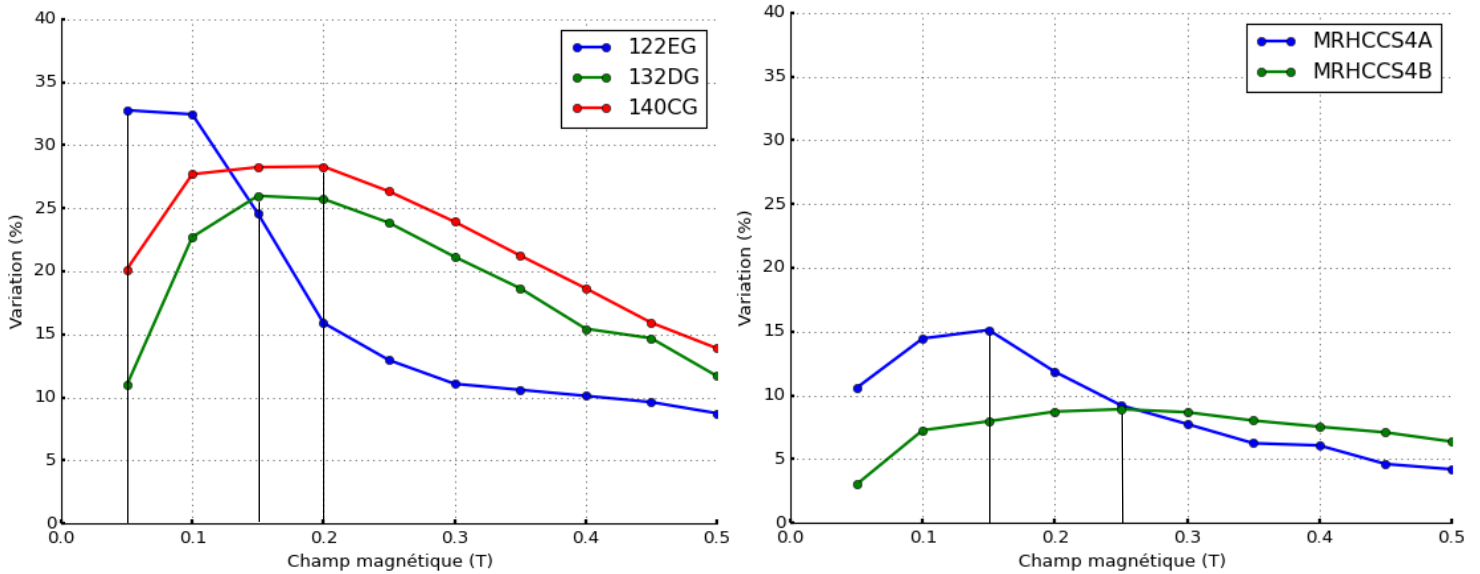


Figure 97 : Variation du couple en pourcentage, à la fréquence modale en fonction du champ magnétique, en Tesla. En vert, étude dans le cas d'une tension de 10 Volts et 25 s⁻¹. En rouge, étude dans le cas d'une tension de 10 Volts et 50 s⁻¹.

Par la suite, on va comparer les fluides de chaque famille entre eux. Pour cela, la Figures 98 présente l'évolution de la variation de couple pour chaque fabricant de fluide dans le cas d'une tension de 10 Volts, une vitesse de cisaillement de 25 s^{-1} . La figure est subdivisée en deux, les fluides LORD à gauche et les fluides Liquids Research à droite. La diminution de la variation de couple est plus importante pour les fluides LORD que les fluides Liquids Research.



Figures 98 : Fluides LORD (122EG, 132DG et 140CG) à gauche et les fluides Liquids Research (MRHCCS4A et MRHCCS4B). Évolution de la variation de couple, en pourcentage, en fonction du champ magnétique dans le cas d'une tension d'excitation de 10 Volts, une vitesse de cisaillement de 25 s^{-1} .

Le champ d'induction du maximum local, observé pour tous les fluides, semble être lié par une fonction croissante de la viscosité de chaque fluide (voir Figure 99), avec coefficient de détermination (R^2) égal à 0,8. Cependant, nous ne discernons pas de tendance au vu du pourcentage massique de particules sur la position du maximum local.

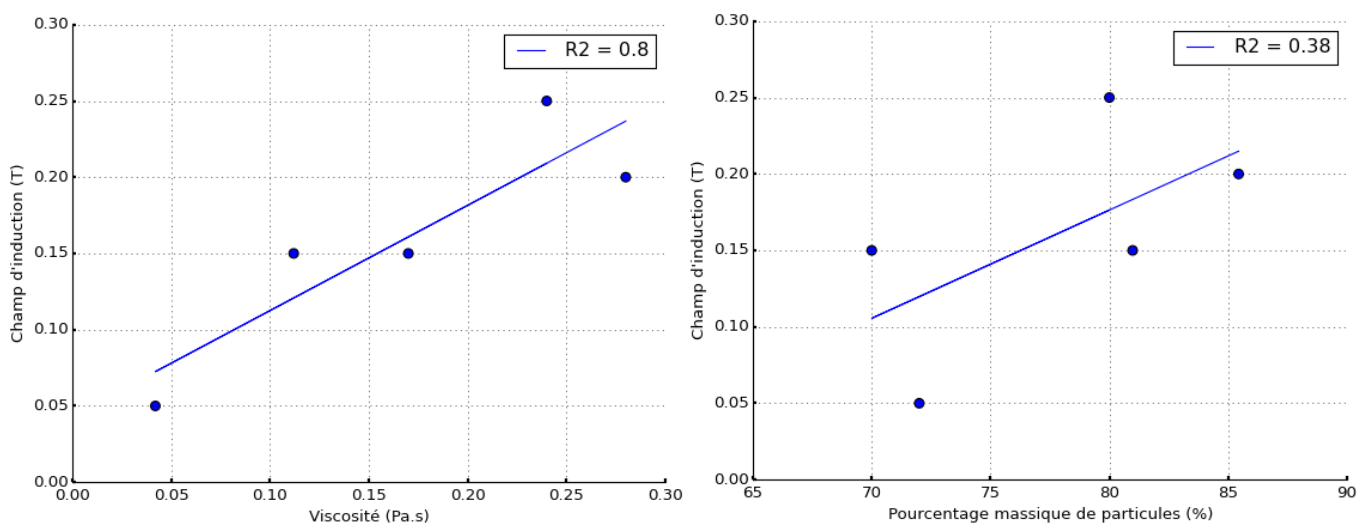


Figure 99 : Champ d'induction du maximum local en fonction de la viscosité (gauche) et du pourcentage massique de particules (droite) de chaque fluide.

À fort champ magnétique, plus le fluide possède un pourcentage de particules élevées, plus la variation de couple observée reste forte. Nous remarquons cependant une exception, le MRHCCS4A ayant une variation de couple plus faible que le 122EG. Cette tendance indique qu'à partir d'un certain champ magnétique où les interactions intra-particulaires sont fortes, plus il y a de particules dans le fluide, plus il y a une diminution importante du couple. Cette tendance n'est pas, au vu des éléments dont nous disposons, expliquée. En effet, plus il y a de particules plus les chaînes sont soit nombreuses dans le fluide soit les chaînes contiennent plus de particules ce qui entraîne un accroissement de la rigidité du fluide et est donc en opposition avec une perturbation par des vibrations plus aisées constatées lors des résultats.

À faible champ, les interactions entre les particules du fluide sont faibles et d'autant plus si le fluide a peu de particules. De ce fait, nous nous attendions à un pourcentage de variation le plus important pour les fluides 122EG et MRHCCS4A, ayant un pourcentage massique de particules d'environ 70 %. Or on remarque que ce n'est pas le cas : les fluides 132DG et 140CG ont une variation de couple plus importante que les MRHCCS4A et MRHCCS4B.

Il y a donc probablement plusieurs phénomènes couplés qui interviennent. On peut se demander si un effet de lubrification acoustique s'effectue entre la paroi de l'élément cisailant et le fluide, mais n'ayant aucun résultat le corroborant, cela reste au niveau de supposition concernant la compréhension de ce phénomène.

4.4.2 Influence de l'amplitude de déformation

Dans cette partie, nous focalisons l'étude pour une vitesse de rotation de 25 s^{-1} . Suite aux fortes variations de couple constatées pour des mesures à faible champ magnétique, nous choisissons deux valeurs de champs magnétiques, 0,05 T et 0,1 T, pour conforter les résultats mesurés. Ces valeurs sont choisies pour favoriser une variation importante du couple suite aux vibrations. Nous appliquerons une tension entre 1 et 10 Volts aux bornes de l'actionneur piézoélectrique avec un incrément de 1 V. Les valeurs utilisées sont reprises dans le Tableau 16.

Paramètres	Valeurs
Vitesse de cisaillement	25 s^{-1}
Champ magnétique	0,05 et 0,1 Tesla
Tension crête appliquée	De 1 à 10 Volts (Incrément : 1 V)
Balayage fréquentiel	0 à 50 kHz en 1 seconde

Tableau 16 : Paramètre de l'expérience : Influence de l'amplitude de déformation.

Du fait que le comportement vibratoire est différent pour chaque fluide, nous utilisons les résultats liant la tension appliquée aux bornes de l'actionneur piézoélectrique et l'amplitude mesurée par le vibromètre. Ce sont les courbes présentées en Figure 93 qui vont permettre d'estimer la valeur des déformations aux tensions étudiées afin de permettre la comparaison des fluides LORD et Liquids Research dans un contexte commun.

La Figure 100 représente l'évolution de la variation du couple en fonction de la déformation pour tous les fluides dans le cas d'une vitesse de cisaillement de 25 s^{-1} et des champs magnétiques de 0,05 (gauche) et 0,1 T (droite). Dans un premier temps, nous remarquons que les courbes obtenues à 0,1 T présentent dans le cas de chaque fluide une pente, entre la variation de couple et le déplacement, plus importante que pour un champ magnétique de 0,05 T. Cela semble cohérent à la partie précédente on avait vu qu'il existait un maximum à faible champ magnétique et dans ce cas d'étude le champ d'induction est plus faible que celui-ci.

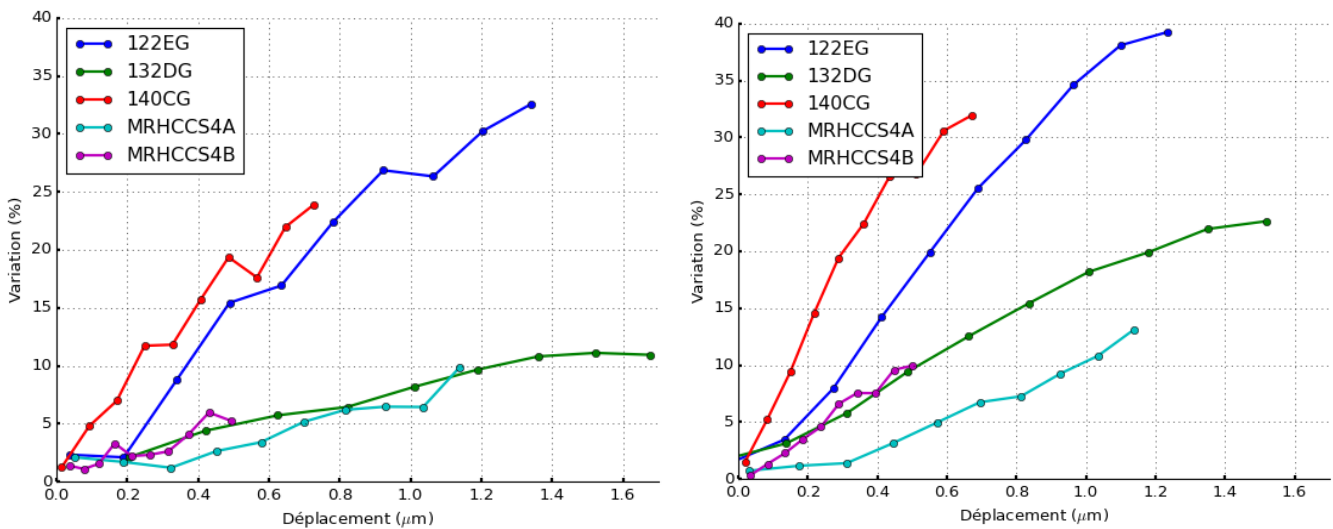


Figure 100 : Fluides LORD (122EG, 132 DG et 140CG) et les fluides Liquids Research (MRHCCS4A et MRHCCS4B). Évolution de la variation de couple, en pourcentage, en fonction de l'amplitude de la déformation mesurée, en micromètre, sur l'élément cisailant pour une vitesse de cisaillement de 25 s^{-1} et d'un champ magnétique de 0,05 Tesla (gauche) et 0,1 Tesla (droite).

Avec l'augmentation du champ magnétique, malgré la variation de pente de chaque fluide, nous observons une conservation de l'ordre des fluides, c'est-à-dire tant à 0,05 T qu'à 0,1 T le fluide 140CG est celui dont la pente est la plus importante et le fluide MRHCCS4A présente la pente la moins importante.

La Figure 101 expose le coefficient linéaire des relations entre la variation de couple et le déplacement des différents fluides en fonction de la viscosité (gauche) et du pourcentage de particules (droite). Nous observons que la pente est liée à la viscosité, suivant un ordre 2, coefficient de détermination égale à 0,92 dans le cas d'un champ magnétique de 0,05 T et de 0,96 pour 0,1 T. Donc nous observons en fonction de la viscosité du fluide un optimum, durant lequel le fluide est peu impacté par les vibrations.

Un fluide intéressant pour les interfaces haptiques doit présenter une viscosité faible (couple à vide réduit) et une contrainte seuil de cisaillement importante (qui induit dans la plupart des cas une concentration plus forte du fluide). Or il s'avère que ces fluides sont les plus sensibles à des perturbations vibratoires. Cela pourrait être un critère supplémentaire soit de dimensionnement et de conception de l'interface, soit de choix du fluide MR.

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide magnéto-rhéologique

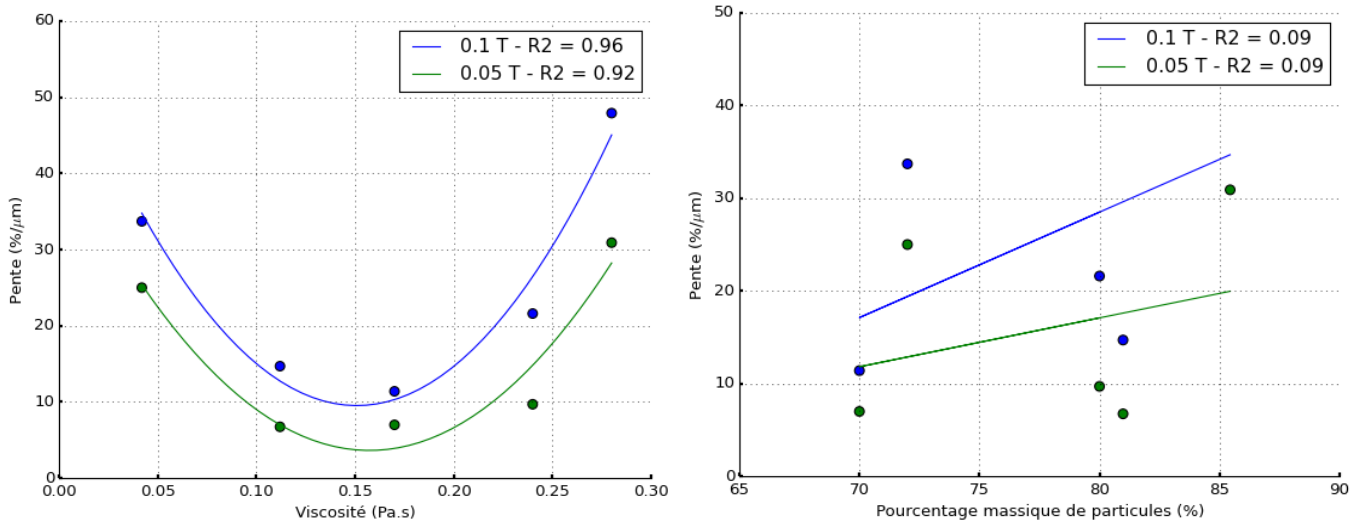


Figure 101 : Variation de la pente (%/μm) en fonction de la viscosité (gauche) et du pourcentage massique de particules dans le fluide (droite).

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence des vibrations sur différentes familles de fluides MR, à partir de produits disponibles chez les fabricants LORDS et Liquids Research. On a donc étudié dans le cas de la configuration « R », décrite dans la section 3.2.1 du chapitre 3, les 5 fluides : 122EG, 132DG, 140CG, MRHCCS4A et MRHCCS4B. Les fluides MR dans l'état de l'art sont classés selon leur viscosité, la contrainte de cisaillement qu'ils développent, et la concentration en particules ferromagnétiques qui les compose.

Nous avons constaté quel que soit le fluide, une relation de cause à effet entre l'amplitude de déformation et la variation de couple. Similairement aux résultats des chapitres précédents, nous observons dans tous les fluides une réduction de la contrainte de cisaillement en présence de vibration, celle-ci est une fonction croissante de l'amplitude de déformation de l'élément cisailant et décroît avec une vitesse de cisaillement plus importante. Pour des champs magnétiques importants, cet effet s'atténue, mais reste détectable.

La mesure de la déformation de l'élément cisailant suite à sa mise en place dans un fluide quelconque a montré l'amortissement des modes à des fréquences d'excitation mécanique inférieures à 10 kHz. À des fréquences supérieures à 10 kHz, nous retrouvons la dépendance de l'amplitude vibratoire à la viscosité du fluide similairement à un amortissement par un fluide visqueux.

Un effet majeur qui se reproduit quel que soit le fluide est un effet de lissage et d'uniformisation de l'effet vibratoire lorsqu'un champ magnétique est appliqué. On note également qu'il n'y a pas de variation notable de la fréquence de résonance du mode prépondérant à 19,5 kHz suivi d'un mode moins prépondérant à 25,5 kHz. Nous avons observé une interaction conjointe de la viscosité et du pourcentage massique de particules sur l'amplitude de vibrations.

Les différentes concentrations des fluides mettent en évidence un effet accentué de l'amortissement des modes haute-fréquence avec un effet prépondérant pour le fluide ayant la plus forte concentration massique de particules.

Plus précisément, l'amplitude de déformation dépend aussi de la viscosité du fluide. L'amplitude va tout d'abord décroître jusqu'à un certain champ magnétique, dépendant de la viscosité du fluide, puis cette amplitude va augmenter avec le champ magnétique. Cette caractéristique en forme de vallée pourrait s'expliquer au niveau physique par tout d'abord un amortissement visqueux de l'élément cisailant, puis dans un second temps la rigidité du fluide amènerait le déplacement à être plus important dans la partie hors du fluide.

Concernant la variation de couple, la viscosité du fluide a une importance prépondérante dans son comportement. Suite à la variation du champ magnétique dans le fluide, nous observons un maximum de la variation de couple, quelle que soit la composition du fluide. Celui-ci est décalé vers un champ plus élevé pour une viscosité du fluide plus élevée. Après ce maximum, la variation du couple est décroissante. Il y a donc un changement de comportement du fluide. Pour un champ d'induction plus faible que le champ du maximum local, les efforts inter-particulaires sont faibles et de ce fait facilement perturbés par les vibrations dans le fluide.

Par la suite, l'augmentation du champ magnétique favorise les interactions entre les particules et de ce fait crée un couplage mécanique entre les particules voisines, favorisant ainsi la propagation de l'onde vibratoire dans le fluide. Ces forces vibratoires se propageraient plus profondément dans la couche de fluide entourant l'élément cisailant, multipliant les ruptures de chaînes.

Après le maximum local, les efforts d'interaction entre les particules deviennent de plus en plus forts empêchant ainsi la rupture des chaînes de particules par les vibrations.

Avec la déformation de l'élément cisailant, nous observons que la variation de couple suit une tendance croissante, en fonction de la déformation mesurée sur l'élément cisailant. La sensibilité ou pente de cette tendance est liée à la viscosité du fluide suivant un ordre 2. Il existe donc un optimum durant lequel le fluide est moins impacté par les vibrations, c'est en autre le cas pour les fluides 132DG et MRHCCS4A.

Nous constatons que les propriétés des fluides (viscosité et concentration en particules) ont une influence sur le comportement vibratoire ainsi que sur la variation de couple. Cependant, nous avons constaté que certains fluides ayant des propriétés proches tant pour les viscosités que pour la concentration en particules peuvent avoir un comportement vibratoire légèrement différent, observé par un coefficient de détermination (R^2) faible (inférieur à 0,7 dans la section 4.3). Cela semble indiquer que des paramètres supplémentaires seraient nécessaires pour caractériser finement le comportement du fluide face à la présence de vibrations. On pourrait citer notamment comme paramètres éventuels la taille des particules, la répartition modale en taille des particules, les formes des particules ferromagnétiques, la présence d'additifs, la porosité, etc...

Toutefois, nous avons noté que certains fluides sont plus résiliant aux perturbations vibratoires, pour une viscosité comprise entre 0,1 et 0,2 Pa.s. Dans le cadre de la conception d'une interface utilisant les fluides MR, la contrainte de cisaillement maximal et la viscosité du fluide sont deux paramètres importants qui définissent les performances de l'interface. Les résultats de ce chapitre nous permettent d'avancer une recommandation supplémentaire sur le choix du fluide à utiliser dans le cas d'un milieu ambiant soumis à des perturbations vibratoires.

Conclusion

Les fluides Magnéto-Rhéologiques (MR) sont des fluides qui présentent un comportement dépendant de conditions extérieures telles que l'application d'un champ magnétique ou la mise sous contrainte de cisaillement par un élément mécanique. Ils sont composés de particules ferromagnétiques, en suspension dans un fluide porteur, qui sous des conditions spécifiques de champ magnétique et de déplacement d'un élément mécanique plongé dans le fluide, vont former des chaînes ou amas dont l'arrangement va en retour exercer des contraintes dites de cisaillement et ainsi s'opposer au déplacement de l'élément mécanique.

Ce phénomène est classiquement mis en œuvre pour la réalisation de freins magnéto-rhéologiques : on obtient un dispositif dont l'effort de freinage peut être contrôlé facilement par l'intensité d'un courant électrique circulant dans une bobine. Ces fluides sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles impliquant la dissipation d'énergie mécanique, de par l'adaptabilité et la contrôlabilité de leurs propriétés. Parmi ces applications, des réalisations d'interfaces haptiques homme-machine utilisant un frein magnéto-rhéologique ont montré la pertinence de cette technologie qui permet de transmettre à l'utilisateur un ressenti haptique de qualité, caractérisé par une très grande raideur du dispositif, un temps de réaction extrêmement réduit et une grande dynamique d'effort disponible tout en assurant la sécurité de l'utilisateur par le biais d'une dissipation uniquement passive de l'énergie grâce au fluide MR.

Qu'il s'agisse d'un dispositif de précision comme dans le cas d'une interface haptique ou d'un dispositif de puissance comme par exemple un embrayage magnéto-rhéologique, on se pose la question de la stabilité du comportement du fluide MR dans le cas où le dispositif serait soumis à des vibrations extérieures. En effet des perturbations vibratoires sont susceptibles d'être transmises dans le fluide par l'intermédiaire de l'élément cisailant et pourraient altérer l'arrangement des chaînes de particules ferromagnétiques.

Pour aborder cette interrogation, nous avons mis en place un banc de test permettant à la fois une interaction mécanique de cisaillement avec le fluide, par l'intermédiaire d'un cylindre creux, et une interaction vibratoire avec le fluide suivant trois directions de vibrations relatives à la direction du champ magnétique appliqué. En plus de ces trois configurations vibratoires, notées « R », « Z » et « θ », le banc de test permet de contrôler les autres paramètres externes influençant le fluide, à savoir la vitesse de cisaillement et l'intensité du champ magnétique appliqué. Le comportement magnétique du banc de test a été modélisé par méthode analytique et analyse par éléments finis ce qui nous a permis de définir le contrôle du champ magnétique dans le fluide à partir de l'asservissement du courant circulant dans la bobine d'excitation. La vitesse de cisaillement est quant à elle contrôlée par l'asservissement de la vitesse de rotation de l'élément cisaillement grâce à un moteur électrique. Enfin les vibrations perturbatrices sont générées et contrôlées par des actionneurs piézoélectriques en interaction mécanique directe avec l'élément cisailant.

Nous nous sommes ensuite attachés à caractériser les vibrations qu'il a été possible de générer au travers de la cloche de cisaillement. Cette caractérisation s'est effectuée tout d'abord en conditions libre puis en conditions d'immersion dans le fluide MR et pour différentes valeurs d'induction magnétique. Les caractéristiques en termes d'amplitude de déplacement, de

fréquence et de répartition spatiale des modes propres vibratoires de l'élément cisailant ont été mesurées par vibromètre laser et les observations ont été confrontées à des résultats de simulation multi-physique, mécanique et fluide, par éléments finis. Il ressort de cette première étude que même si de nombreux modes vibratoires sont amortis, notamment ceux présents pour des fréquences supérieures à environ 50 kHz, il persiste des vibrations dont l'amplitude est conservée ou parfois augmentée, si on les compare aux amplitudes de vibrations mesurées à l'air libre. Ces variabilités d'amplitude, qui peuvent dépendre également du champ magnétique appliqué, ont été observées pour les trois configurations vibratoires « R », « Z » et « θ ». Ces résultats nous indiquent que l'élément cisailant d'un dispositif MR est susceptible de propager un mouvement vibratoire perturbateur dans le fluide et que les caractéristiques de ce déplacement sont modulées par le champ magnétique dans le fluide. Si les vibrations ainsi transmises sont susceptibles de perturber le comportement du fluide MR, comme nous l'avons observé dans la suite de cette thèse, cela signifie qu'un dispositif à base de frein MR pourrait voir ces performances partiellement modifiées sous certaines conditions d'utilisation et en présence de vibrations.

Suite à la mise en vibration de l'élément cisailant le fluide, nous avons alors analysé l'impact de ces perturbations sur une des caractéristiques majeures d'un fluide magnéto-rhéologique, à savoir l'intensité de la contrainte de cisaillement qu'il est susceptible de développer en présence d'un champ magnétique. À l'aide de notre banc de test, il nous a été possible d'accéder à cette contrainte de cisaillement en mesurant le couple résistant obtenu lors de la mise en rotation de la cloche de cisaillement sous différentes conditions de champ magnétique, d'amplitude vibratoire et de vitesse de cisaillement. La variation de couple constatée est alors, dans tous les cas, une diminution des performances de freinage par rapport à une interaction avec le fluide sans perturbation vibratoire. De plus, grâce à un balayage fréquentiel des excitateurs piézoélectriques, nous avons pu lier la dégradation de couple avec certains des modes vibratoires de l'élément cisailant observés précédemment. La variation de couple présente alors majoritairement le même profil en fréquence que le mode vibratoire mais en présentant un décalage fréquentiel vers le haut de l'ordre de quelques kHz.

Cet impact sur la contrainte de cisaillement du fluide est variable en fonction des deux paramètres régissant également le comportement du fluide : la vitesse de cisaillement et le champ magnétique. Suite à l'augmentation soit de la vitesse de cisaillement soit du champ magnétique, l'impact sur la contrainte de cisaillement diminue. À l'inverse, l'augmentation de l'amplitude des vibrations accroît cet impact mais des limitations sur notre banc de test n'ont pas permis d'obtenir des déformations suffisamment importantes pour faire apparaître une éventuelle phase de saturation de cet impact. Les tendances issues de la variation du champ magnétique et de l'amplitude des vibrations sont en accord avec les conclusions tirées d'une première approche analytique concernant les forces d'interaction magnétique et de traînée que subissent les particules ferromagnétiques. Il nous faut toutefois mentionner que les vibrations que nous avons pu générer présentaient un impact restreint au-delà d'un champ magnétique équivalant à 22 % du champ maximal avant saturation de la contrainte de cisaillement du fluide ainsi que pour une vitesse de cisaillement supérieure à 100 s^{-1} , vitesse faible en comparaison de la plage d'utilisation des fluides MR.

Nous avons noté que la configuration dont les vibrations sont normales à la surface de l'élément cylindrique, perpendiculaire donc à la vitesse de cisaillement et colinéaire au champ magnétique, présentait une altération de la contrainte de cisaillement plus importante comparée aux deux autres configurations. Dans cette configuration, les vibrations sollicitent le fluide sous

un mode de compression accroissant ainsi les efforts transmis dans le fluide et de ce fait favoriseraient la déstructuration des chaînes de particules dans le fluide. Pour les deux autres configurations, les vibrations sont transmises sous une direction stimulant le fluide en cisaillement, de ce fait l'effort transmis serait moins prépondérant dans les chaînes de particules.

Toutes les expérimentations précédentes ont porté sur un même type de fluide magnéto-rhéologique que nous utilisons classiquement pour la conception d'interfaces haptiques rotatives. Mais il existe d'autres types de fluide MR qui présentent des caractéristiques différentes, plus spécifiquement en ce qui concerne leur viscosité et leur concentration en particules ferromagnétiques. Nous nous sommes alors attachés à étudier si ces deux caractéristiques pouvaient influencer sur le taux de dégradation de la contrainte de cisaillement lorsque ces différentes familles de fluide étaient soumises à des vibrations. Au premier abord, ce même comportement de réduction de couple résistant a effectivement été constaté pour ces différents types de fluide MR lorsque les vibrations sont normales à la paroi vibrante. Mais nous avons également constaté que ces fluides ne présentent pas tous la même sensibilité à la perturbation vibratoire. Cette sensibilité a été majoritairement associée au paramètre de viscosité du fluide, elle est minimale entre 0,1 et 0,2 Pa.s.

De plus, en fonction de l'intensité du champ magnétique appliqué, nous avons noté la présence d'un maximum sur les mesures d'altération de la contrainte de cisaillement. Ce maximum est localisé pour une valeur de champ magnétique dépendant là encore de la viscosité du fluide. En amont de ce maximum, c'est-à-dire pour un domaine de variation de faibles champs magnétiques, l'accroissement progressif du champ magnétique renforcerait les efforts de liaison entre les particules permettant ainsi de propager l'onde vibratoire plus profondément dans le fluide engendrant ainsi un plus grand nombre de déstructuration des chaînes. En aval de ce maximum, dans le cas de champs magnétiques plus élevés, les efforts de liaison deviendraient de plus en plus importants, inhibant la déstructuration de la chaîne de particules.

Des travaux futurs pourraient adresser le comportement microscopique du fluide pour mieux appréhender ces phénomènes. En effet le fait de pouvoir observer la perturbation des chaînes de particules menant à leur rupture permettrait d'avoir une meilleure compréhension des paramètres clefs susceptibles d'altérer le comportement d'un fluide MR. Cela pourrait mener à la mise en place d'un modèle comportemental prenant en compte les interactions magnétiques, les interactions mécaniques internes au fluide, mais également les interactions mécaniques externes au fluide comme les déplacements vibratoires que nous avons étudié ici.

Des études pourraient alors se pencher sur la mise en place de simulations plus fines permettant d'aider à la conception de dispositifs à base de freins magnéto-rhéologiques. Jusqu'à présent, seules les grandeurs de champ magnétique et de vitesse de cisaillement sont utilisées pour prédire les performances d'un frein MR mais nous avons vu que non seulement des déplacements vibratoires sont susceptible de modifier ces performances, mais encore que ces altérations de la contrainte de cisaillement sont, elles aussi, dépendantes de nombreuses variables : champ magnétique, vitesse de cisaillement, viscosité, amplitude et fréquence vibratoire.

L'impact sur la contrainte de cisaillement sera aussi à étudier sous le regard de la composition du fluide. Plusieurs directions peuvent être alors distinguées : la composition du fluide porteur ou le type des particules mises en œuvre dans le fluide. Concernant la composition du fluide, nous avons noté l'importance de la viscosité du fluide, mais les éventuels

additifs ainsi que le type du fluide porteur (graisse, huile synthétique, minérale...) auront certainement une influence. Concernant les particules ferromagnétiques, en plus de l'étude de la concentration massique que nous avons menée, nous pourrions nous questionner sur l'influence de leur diamètre, sur leur facteur de forme, ou même sur leur état de surface.

Enfin il pourrait être intéressant de mener une étude spécifique en se concentrant sur des phénomènes vibratoires de plus forte amplitude. Des limitations dans notre banc de test ne nous ont pas permis d'adresser cette problématique et nous n'avons jamais pu observer une quelconque limite à la réduction de la contrainte de cisaillement en fonction de l'amplitude de déplacements apportés. Cela laisse à penser qu'une diminution supérieure à 40 % de la contrainte de cisaillement est possible ou bien même serait-il possible d'annuler quasiment les efforts de cisaillement ? S'il devient possible de moduler ainsi la contrainte de cisaillement par le biais d'une action mécanique vibratoire, cela pourrait ouvrir des possibilités nouvelles de conception de freins MR mettant par exemple en œuvre un aimant permanent associé à un excitateur piézoélectrique pour le contrôle de l'effort de freinage.

Nomenclature

Symbole	Description	Unités
A	Amplitude de vibrations	m
c	Célérité de l'onde fluide	m/s
H	Champ d'excitations Magnétique	A/m
B	Champ d'induction Magnétique	Tesla (T)
f	Coefficient de friction	--
c_v	Concentration volumique	--
τ_H	Contrainte de cisaillement dépendant du champ magnétique	Pascal (Pa)
τ	Contrainte de cisaillement total	Pascal (Pa)
C	Couple	Nm
C_{vib}	Couple en présence de vibrations	Nm
I	Courant	Ampères (A)
d	Diamètre de particules	m
Φ	Flux magnétique	Tm ²
fr	Fréquence des vibrations	Hz
g	Gap de fluide	m
MR	Magnéto-Rhéologie	--
N_p	Nombre de particules	--
k	Nombre d'onde	/m
N	Nombres de tours	Tours (tr)
μ_p	Permittivité acier	H/m
μ_f	Permittivité fluide	H/m
\mathfrak{R}	Réductance	H ⁻¹
S	Section (d'un matériau)	m ²
t	Temps	s
$C\%$	Variation de couple en %	--
η	Viscosité fluide	Pa.s
$\dot{\gamma}$	Vitesse de cisaillement	s ⁻¹
ω	Vitesse de rotation	Rad/s

Références

- [1] J. Rabinow, "The magnetic fluid clutch," *Electr. Eng.*, vol. 67, no. 12, pp. 1167–1167, 1948.
- [2] W. M. Winslow, "Induced Fibration of Suspensions," *J. Appl. Phys.*, vol. 20, no. 12, pp. 1137–1140, Dec. 1949.
- [3] H. See, "Advances in modelling the mechanisms and rheology of electrorheological fluids," *Korea-Aust. Rheol. J.*, vol. 11, no. 3, pp. 169–195, 1999.
- [4] H. Block and J. Kelly, "Electro-rheology," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 21, no. 12, p. 1661, 1988.
- [5] T. C. Jordan and M. T. Shaw, "Electrorheology," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 5, pp. 849–878, 1989.
- [6] C. Zukoski, "Material properties and the electrorheological response," *Annu. Rev. Mater. Sci.*, vol. 23, no. 1, pp. 45–78, 1993.
- [7] K. Tanaka, K. Koyama, and T. Yoshida, "Transient stress response of ER suspension," *J. Rheol.*, vol. 37, no. 3, pp. 555–555, May 1993.
- [8] Robert William Phillips, "Engineering applications of fluids with a variable yield stress," -University of California, Berkeley, 1969.
- [9] J. D. Carlson, "What Makes a Good MR Fluid?," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 13, no. 7–8, pp. 431–435, Jan. 2002.
- [10] J. d. Carlson, D. m. Catanzarite, and K. a. St. Clair, "Commercial magneto-rheological fluid devices," *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 10, no. 23n24, pp. 2857–2865, Oct. 1996.
- [11] M. R. Jolly, J. W. Bender, and J. D. Carlson, "Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 10, no. 1, pp. 5–13, Jan. 1999.
- [12] N. C. Kavlicoglu *et al.*, "Response time and performance of a high-torque magneto-rheological fluid limited slip differential clutch," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 1, p. 149, 2007.
- [13] H. Sahin, F. Gordaninejad, X. Wang, and Y. Liu, "Response time of magnetorheological fluids and magnetorheological valves under various flow conditions," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 23, no. 9, pp. 949–957, Jun. 2012.
- [14] R. Nava, M. A. Ponce, L. Rejón, S. Viquez, and V. M. Castaño, "Response time and viscosity of electrorheological fluids," *Smart Mater. Struct.*, vol. 6, no. 1, p. 67, 1997.
- [15] W. A. Bullough, J. Makin, A. R. Johnson, A. Hosseini-Sianaki, and R. Firoozian, "ER Shear Characteristics: Volume Fraction, Shear Rate, Time Response," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 118, no. 2, pp. 221–225, Jun. 1996.
- [16] J. C. Ulicny, M. A. Golden, C. S. Namuduri, and D. J. Klingenberg, "Transient response of magnetorheological fluids: Shear flow between concentric cylinders," *J. Rheol.*, vol. 49, no. 1, pp. 87–104, Jan. 2005.
- [17] Y. T. Choi, J. U. Cho, S. B. Choi, and N. M. Wereley, "Constitutive models of electrorheological and magnetorheological fluids using viscometers," *Smart Mater. Struct.*, vol. 14, no. 5, p. 1025, Oct. 2005.
- [18] Y.-T. Choi and N. M. Wereley, "Comparative Analysis of the Time Response of Electrorheological and Magnetorheological Dampers Using Nondimensional Parameters", *Comparative Analysis of the Time Response of Electrorheological and Magnetorheological Dampers*

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide Magnéto-Rhéologique

- Using Nondimensional Parameters,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 13, no. 7–8, pp. 443–451, Jul. 2002.
- [19] K. D. Weiss, J. D. Carlson, and D. A. Nixon, “Viscoelastic Properties of Magneto- and Electro-Rheological Fluids,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 5, no. 6, pp. 772–775, Jan. 1994.
- [20] M. Yalcintas and H. Dai, “Magnetorheological and electrorheological materials in adaptive structures and their performance comparison,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 8, no. 5, p. 560, Oct. 1999.
- [21] M. Ashtiani, S. H. Hashemabadi, and A. Ghaffari, “A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 374, pp. 716–730, Jan. 2015.
- [22] P. P. Phulé, “Magnetorheological (MR) fluids: Principles and applications,” *Smart Mater. Bull.*, vol. 2001, no. 2, pp. 7–10, Feb. 2001.
- [23] S. Genç and P. P. Phulé, “Rheological properties of magnetorheological fluids,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 11, no. 1, p. 140, Feb. 2002.
- [24] C. Fang, B. Y. Zhao, L. S. Chen, Q. Wu, N. Liu, and K. A. Hu, “The effect of the green additive guar gum on the properties of magnetorheological fluid,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 14, no. 1, p. N1, 2005.
- [25] R. Turczyn and M. Kciuk, “Preparation and study of model magnetorheological fluids,” *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. Vol. 27, no. nr 2, pp. 131–134, 2008.
- [26] B. K. Kumbhar, S. R. Patil, and S. M. Sawant, “Synthesis and characterization of magneto-rheological (MR) fluids for MR brake application,” *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, 2015.
- [27] A. Spaggiari, “Properties and applications of Magnetorheological fluids,” *Fract. Struct. Integr.*, vol. 23, pp. 48–61, Jan. 2012.
- [28] J. M. Spinks, “Dynamic simulation of particles in a magnetorheological fluid,” PhD Thesis, Monterey California. Naval Postgraduate School, 2008.
- [29] S. Odenbach and H. Störk, “Shear dependence of field-induced contributions to the viscosity of magnetic fluids at low shear rates,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 183, no. 1, pp. 188–194, Mar. 1998.
- [30] R. C. Bell, J. O. Karli, A. N. Vavreck, D. T. Zimmerman, G. T. Ngatu, and N. M. Wereley, “Magnetorheology of submicron diameter iron microwires dispersed in silicone oil,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, no. 1, p. 015028, 2008.
- [31] “MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid - 1 Liter.” [Online]. Available: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products/mrf-132dg-magneto-rheological-fluid>. [Accessed: 31-Jul-2018].
- [32] “Explication technique : Électro-aimants de manoeuvre.”
- [33] Q. Sun, J.-X. Zhou, and L. Zhang, “An adaptive beam model and dynamic characteristics of magnetorheological materials,” *J. Sound Vib.*, vol. 261, no. 3, pp. 465–481, Mar. 2003.
- [34] M. Eshaghi, S. Rakheja, and R. Sedaghati, “An accurate technique for pre-yield characterization of MR fluids,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 6, p. 065018, 2015.
- [35] W. Nassar, “Pre-yield shearing regime of a magnetorheological fluid (MRF),” phdthesis, Ecole Polytechnique X, 2012.
- [36] F. Gandhi and W. A. Bullough, “On the Phenomenological Modeling of Electrorheological and Magnetorheological Fluid Preyield Behavior,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 16, no. 3, pp. 237–248, Mar. 2005.
- [37] M. T. AVRAAM, MR-fluide brake design and its application to a portable muscula rehabilitation device. Universite Libre de Bruxelles, 2009.
- [38] D. H. Wang and W. H. Liao, “Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 2, p. 023001, Feb. 2011.
- [39] Spencer B. F., Dyke S. J., Sain M. K., and Carlson J. D., “Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers,” *J. Eng. Mech.*, vol. 123, no. 3, pp. 230–238, Mar. 1997.

- [40] İ. Şahin, T. Engin, and Ş. Çeşmeci, "Comparison of some existing parametric models for magnetorheological fluid dampers," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 3, p. 035012, 2010.
- [41] D. H. Wang and W. H. Liao, "Modeling and control of magnetorheological fluid dampers using neural networks," *Smart Mater. Struct.*, vol. 14, no. 1, p. 111, 2005.
- [42] X. Wang and F. Gordaninejad, "Flow Analysis of Field-Controllable, Electro- and Magneto-Rheological Fluids Using Herschel-Bulkley Model," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 10, no. 8, pp. 601–608, Aug. 1999.
- [43] X. Wang and F. Gordaninejad, "Study of magnetorheological fluids at high shear rates," *Rheol. Acta*, vol. 45, no. 6, pp. 899–908, Aug. 2006.
- [44] F. D. Goncalves, M. Ahmadian, and J. D. Carlson, "Behavior of mr fluids at high velocities and high shear rates," *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 19, no. 07n09, pp. 1395–1401, Apr. 2005.
- [45] A. K. Garakani *et al.*, "Comparison between different models for rheological characterization of activated sludge," *Iran. J. Environ. Health Sci. Eng.*, vol. 8, no. 3, p. 255, 2011.
- [46] E. Mitsoulis, "Flows of viscoplastic materials: models and computations," *Rheol. Rev.*, vol. 2007, pp. 135–178, 2007.
- [47] M. Kubík, *DYNAMIC VISCOSITY OF COMMERCIALY AVAILABLE MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS*. Brno University of Technology, Institute of Solid Mechanics, Mechatronics and Biomechanics, Brno.
- [48] R. Ahamed, S.-B. Choi, and M. M. Ferdaus, "A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 29, no. 10, pp. 2051–2095, Jun. 2018.
- [49] N. M. Wereley and L. Pang, "Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models," *Smart Mater. Struct.*, vol. 7, no. 5, p. 732, 1998.
- [50] A. G. Olabi and A. Grunwald, "Design and application of magneto-rheological fluid," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 10, pp. 2658–2664, Jan. 2007.
- [51] D. Wang, T. Wang, X. Bai, G. Yuan, and W. Liao, "A self-sensing magnetorheological shock absorber for motorcycles," in *Proceedings of 19th International Conference on Adaptive Structures and Technologies*, 2008, vol. 6.
- [52] N. Q. Guo, H. Du, and W. H. Li, "Finite Element Analysis and Simulation Evaluation of a Magnetorheological Valve," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 21, no. 6, pp. 438–445, Mar. 2003.
- [53] J.-H. Yoo and N. M. Wereley, "Design of a High-Efficiency Magnetorheological Valve , Design of a High-Efficiency Magnetorheological Valve," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 13, no. 10, pp. 679–685, Oct. 2002.
- [54] M. Mao, W. Hu, Y.-T. Choi, and N. M. Wereley, "A Magnetorheological Damper with Bifold Valves for Shock and Vibration Mitigation,A Magnetorheological Damper with Bifold Valves for Shock and Vibration Mitigation," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 18, no. 12, pp. 1227–1232, Dec. 2007.
- [55] N. M. Wereley, J. U. Cho, Y. T. Choi, and S. B. Choi, "Magnetorheological dampers in shear mode," *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, no. 1, p. 015022, 2008.
- [56] P. J. Rankin, A. T. Horvath, and D. J. Klingenberg, "Magnetorheology in viscoplastic media," *Rheol. Acta*, vol. 38, no. 5, pp. 471–477, Nov. 1999.
- [57] J. Ramos, D. J. Klingenberg, R. Hidalgo-Alvarez, and J. de Vicente, "Steady shear magnetorheology of inverse ferrofluids," *J. Rheol.*, vol. 55, no. 1, pp. 127–152, Dec. 2010.
- [58] Tse Tim and Chang C. C., "Shear-Mode Rotary Magnetorheological Damper for Small-Scale Structural Control Experiments," *J. Struct. Eng.*, vol. 130, no. 6, pp. 904–911, Jun. 2004.
- [59] J. Engmann, C. Servais, and A. S. Burbidge, "Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review," *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, vol. 132, no. 1, pp. 1–27, Dec. 2005.

- [60] C. Guo, X. Gong, S. Xuan, Q. Yan, and X. Ruan, "Squeeze behavior of magnetorheological fluids under constant volume and uniform magnetic field," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 4, p. 045020, 2013.
- [61] J. de Vicente, J. A. Ruiz-López, E. Andablo-Reyes, J. P. Segovia-Gutiérrez, and R. Hidalgo-Alvarez, "Squeeze flow magnetorheology," *J. Rheol.*, vol. 55, no. 4, pp. 753–779, Apr. 2011.
- [62] X. Zhang, X. Gong, P. Zhang, and Q. Wang, "Study on the mechanism of the squeeze-strengthen effect in magnetorheological fluids," *Fac. Eng. Inf. Sci. - Pap. Part A*, pp. 2359–2364, Jan. 2004.
- [63] I. Ismail, S. A. Mazlan, H. Zamzuri, and A. G. Olabi, "Fluid–Particle Separation of Magnetorheological Fluid in Squeeze Mode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, p. 067301, May 2012.
- [64] Abhijeet N. Kulkarni and Santosh R. Patil, "magnetorheological (mr) and electro rheo fluid damper : a review parametric study of fluid behavior," *J. Eng. Res. Appl.*, vol. Vol. 3, no. Issue 62, p. pp.1879-188, Dec. 2013.
- [65] E. M. Furst and A. P. Gast, "Micromechanics of magnetorheological suspensions," *Phys. Rev. E*, vol. 61, no. 6, pp. 6732–6739, Jun. 2000.
- [66] J. m. Ginder, L. c. Davis, and L. d. Elie, "Rheology of magnetorheological fluids: models and measurements," *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 10, no. 23n24, pp. 3293–3303, Oct. 1996.
- [67] X. Peng and H. Li, "Analysis of the magnetomechanical behavior of MRFs based on micromechanics incorporating a statistical approach," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 6, p. 2477, 2007.
- [68] A. Ghaffari, S. H. Hashemabadi, and M. Ashtiani, "A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 26, no. 8, pp. 881–904, May 2015.
- [69] M. T. López-López, A. Zugaldía, F. González-Caballero, and J. D. G. Durán, "Sedimentation and redispersion phenomena in iron-based magnetorheological fluids," *J. Rheol.*, vol. 50, no. 4, pp. 543–560, Jul. 2006.
- [70] G. T. Ngatu and N. M. Wereley, "Viscometric and Sedimentation Characterization of Bidisperse Magnetorheological Fluids," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2474–2476, Jun. 2007.
- [71] J. C. Ulicny, M. P. Balogh, N. M. Potter, and R. A. Waldo, "Magnetorheological fluid durability test—Iron analysis," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 443, no. 1, pp. 16–24, Jan. 2007.
- [72] F. Vereda, J. de Vicente, J. P. Segovia-Gutiérrez, and R. Hidalgo-Alvarez, "On the effect of particle porosity and roughness in magnetorheology," *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 6, p. 063520, Sep. 2011.
- [73] Y.-M. Han, S. Kim, Y.-D. Park, J.-W. Kang, and S.-B. Choi, "Field-dependent characteristics of magnetorheological fluids containing corroded iron particles," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 11, p. 115016, 2015.
- [74] T. Plachy, E. Kutalkova, M. Sedlacik, A. Vesel, M. Masar, and I. Kuritka, "Impact of corrosion process of carbonyl iron particles on magnetorheological behavior of their suspensions," *J. Ind. Eng. Chem.*, Jun. 2018.
- [75] H. Sahin, X. Wang, and F. Gordaninejad, "Temperature Dependence of Magneto-rheological Materials," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 20, no. 18, pp. 2215–2222, Dec. 2009.
- [76] K. D. Weiss and T. G. Duclos, "Controllable fluids: the temperature dependence of post-yield properties," *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 08, no. 20n21, pp. 3015–3032, Sep. 1994.
- [77] D. M. Wang, Y. F. Hou, and Z. Z. Tian, "A novel high-torque magnetorheological brake with a water cooling method for heat dissipation," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 2, p. 025019, 2013.
- [78] M. T. López-López, P. Kuzhir, and G. Bossis, "Magnetorheology of fiber suspensions. I. Experimental," *J. Rheol.*, vol. 53, no. 1, pp. 115–126, Dec. 2008.
- [79] C. Ekwebelam and H. See, "Microstructural investigations of the yielding behaviour of bidisperse magnetorheological fluids," *Rheol. Acta*, vol. 48, no. 1, pp. 19–32, Aug. 2008.
- [80] G. T. Ngatu, N. M. Wereley, J. O. Karli, and R. C. Bell, "Dimorphic magnetorheological fluids: exploiting partial substitution of microspheres by nanowires," *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, no. 4, p. 045022, 2008.

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide Magnéto-Rhéologique

- [81] J. de Vicente, F. Vereda, J. P. Segovia-Gutiérrez, M. del Puerto Morales, and R. Hidalgo-Álvarez, "Effect of particle shape in magnetorheology," *J. Rheol.*, vol. 54, no. 6, pp. 1337–1362, Oct. 2010.
- [82] W. Jiang, Y. Zhang, S. Xuan, C. Guo, and X. Gong, "Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 323, no. 24, pp. 3246–3250, Dec. 2011.
- [83] C. Sarkar and H. Hirani, "Effect of Particle Size on Shear Stress of Magnetorheological Fluids," *Smart Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 65–73, May 2015.
- [84] Q. H. Nguyen and S. B. Choi, "Selection of magnetorheological brake types via optimal design considering maximum torque and constrained volume," *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no. 1, p. 015012, Jan. 2012.
- [85] N. Najmaei, "Design of a Haptic Interface for Medical Applications using Magneto-Rheological Fluid based Actuators," *Electron. Thesis Diss. Repos.*, Dec. 2014.
- [86] D. Senkal and H. Gurocak, "Serpentine flux path for high torque MRF brakes in haptics applications," *Mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 377–383, Apr. 2010.
- [87] D. Güth, M. Schamoni, and J. Maas, "Magnetic fluid control for viscous loss reduction of high-speed MRF brakes and clutches with well-defined fail-safe behavior," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 9, p. 094010, 2013.
- [88] M. Saleh, R. Sedaghati, and R. Bhat, "Design Optimization of a Bi-Fold Magnetorheological Damper Subject to Impact Loads," p. V002T03A007, Sep. 2017.
- [89] C.-M. C. Wei Zhou, "Development of a compact double-disk magneto-rheological fluid brake.," *Robotica*, vol. 25, pp. 493–500, 2007.
- [90] K. Karakoc, E. J. Park, and A. Suleman, "Design considerations for an automotive magnetorheological brake," *Mechatronics*, vol. 18, no. 8, pp. 434–447, Oct. 2008.
- [91] F. D. Goncalves and J. D. Carlson, "An alternate operation mode for MR fluids—magnetic gradient pinch," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 149, no. 1, p. 012050, 2009.
- [92] S. R. Hong, N. M. Wereley, Y. T. Choi, and S. B. Choi, "Analytical and experimental validation of a nondimensional Bingham model for mixed-mode magnetorheological dampers," *J. Sound Vib.*, vol. 312, no. 3, pp. 399–417, May 2008.
- [93] T. H. Nam and K. K. Ahn, "A new structure of MR brake with the waveform boundary of rotary disk," in *ICCAS-SICE, 2009*, 2009, pp. 2997–3002.
- [94] S.-B. Choi, S.-R. Hong, K.-G. Sung, and J.-W. Sohn, "Optimal control of structural vibrations using a mixed-mode magnetorheological fluid mount," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 50, no. 3, pp. 559–568, Mar. 2008.
- [95] S. J. Dyke, B. F. S. Jr, M. K. Sain, and J. D. Carlson, "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," *Smart Mater. Struct.*, vol. 5, no. 5, p. 565, 1996.
- [96] L. M. Jansen and S. J. Dyke, "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study," *J. Eng. Mech.*, vol. 126, no. 8, pp. 795–803, 2000.
- [97] Y.-T. Choi and N. M. Wereley, "Drop-Induced Shock Mitigation Using Adaptive Magnetorheological Energy Absorbers Incorporating a Time Lag," *J. Vib. Acoust.*, vol. 137, no. 1, pp. 011010–011010, Feb. 2015.
- [98] S. D. Bharti, S. M. Dumne, and M. K. Shrimali, "Seismic response analysis of adjacent buildings connected with MR dampers," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 8, pp. 2122–2133, Aug. 2010.
- [99] C. Y. Lai and W. H. Liao, "Vibration Control of a Suspension System via a Magnetorheological Fluid Damper," *Modal Anal.*, vol. 8, no. 4, pp. 527–547, Apr. 2002.
- [100] M. Romaszko, "Free vibration control of a cantilever MR fluid based sandwich beam," in *Carpathian Control Conference (ICCC), 2013 14th International*, 2013, pp. 311–314.
- [101] A. Muhammad, X. Yao, and Z. Deng, "Review of magnetorheological (MR) fluids and its applications in vibration control," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 5, no. 3, pp. 17–29, Sep. 2006.

- [102] Y. Nahmad-Molinari, C. A. Arancibia-Bulnes, and J. C. Ruiz-Suárez, "Sound in a Magnetorheological Slurry," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, no. 4, pp. 727–730, Jan. 1999.
- [103] J. Rodríguez-López, L. Elvira Segura, and F. Montero de Espinosa Freijo, "Ultrasonic velocity and amplitude characterization of magnetorheological fluids under magnetic fields," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 324, no. 2, pp. 222–230, Jan. 2012.
- [104] I. E. Ovchinnikov and V. V. Sokolov, "Effect of an external magnetic field on the propagation velocities of magnetoacoustic waves in a magnetic fluid," *Acoust. Phys.*, vol. 55, no. 3, pp. 359–364, May 2009.
- [105] C. Cavozi, F. Storti, Y. Nestola, F. Salvi, and G. Davoli, "New materials for analogue experiments: Preliminary tests of magnetorheological fluids," *Tectonophysics*, vol. 630, pp. 131–136, Sep. 2014.
- [106] J. Ding *et al.*, "Novel reversible and switchable electrolytes based on magneto-rheology," *Sci. Rep.*, vol. 5, Oct. 2015.
- [107] S. Kim, P. Kim, C.-Y. Park, and S.-B. Choi, "A new tactile device using magneto-rheological sponge cells for medical applications: Experimental investigation," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 239, pp. 61–69, Mar. 2016.
- [108] N. Sgambelluri, R. Rizzo, E. P. Scilingo, M. Raugi, and A. Bicchi, "Free Hand Haptic Interfaces Based on Magnetorheological Fluids," in *2006 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2006, pp. 367–371.
- [109] A. C. Becnel, S. G. Sherman, W. Hu, and N. M. Wereley, "Squeeze strengthening of magnetorheological fluids using mixed mode operation," *J. Appl. Phys.*, vol. 117, no. 17, p. 17C708, Feb. 2015.
- [110] G. Z. Yao, F. F. Yap, G. Chen, W. H. Li, and S. H. Yeo, "MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system," *Mechatronics*, vol. 12, no. 7, pp. 963–973, Sep. 2002.
- [111] R. S. Prabakar, C. Sujatha, and S. Narayanan, "Optimal semi-active preview control response of a half car vehicle model with magnetorheological damper," *J. Sound Vib.*, vol. 326, no. 3, pp. 400–420, Oct. 2009.
- [112] H.-S. Lee and S.-B. Choi, "Control and Response Characteristics of a Magneto-Rheological Fluid Damper for Passenger Vehicles," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 11, no. 1, pp. 80–87, Jan. 2000.
- [113] H. Janocha, "Application potential of magnetic field driven new actuators," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 91, no. 1, pp. 126–132, Jun. 2001.
- [114] D. H. Wang and W. H. Liao, "Semi-active suspension systems for railway vehicles using magnetorheological dampers. Part I: system integration and modelling," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 47, no. 11, pp. 1305–1325, Nov. 2009.
- [115] M. Saleh, R. Sedaghati, and R. Bhat, "Crashworthiness Study of Helicopter Skid Landing Gear System Equipped With a Magnetorheological Energy Absorber," p. V002T03A009, Sep. 2017.
- [116] H. J. Jung, B. F. Spencer, Y. Q. Ni, and I. W. Lee, "State-of-the-art of semiactive control systems using MR fluid dampers in civil engineering applications," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 17, no. 3–4, pp. 493–526, Mar. 2004.
- [117] B. Spencer, M. Nathan, Newmark, and S. Nagarajaiah, "State of the Art of Structural Control," *J. Struct. Eng.-Asce - J STRUCT ENG-ASCE*, vol. 129, Jul. 2003.
- [118] J. Lozada, M. Hafez, and X. Boutillon, "A novel haptic interface for musical keyboards," in *2007 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics*, 2007, pp. 1–6.
- [119] C. Rossa, M. Anastassova, A. Micaelli, and J. Lozada, "Perceptual Evaluation of the Passive/Active Torque and Stiffness Asymmetry of a Hybrid Haptic Device," in *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications*, M. Auvray and C. Duriez, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 55–60.
- [120] Y. Liu, J. D. Ngu, R. I. Davidson, and P. M. Taylor, "Tactile display array based on magnetorheological fluid," 2006, vol. 6173, pp. 61730Z-61730Z-8.

- [121] B. Liu, W. H. Li, P. B. Kosasih, and X. Z. Zhang, "Development of an MR-brake-based haptic device," *Smart Mater. Struct.*, vol. 15, no. 6, p. 1960, 2006.
- [122] S. Ryu, J.-H. Koo, T.-H. Yang, D. Pyo, K.-U. Kyung, and D.-S. Kwon, "Mechanical and psychophysical performance evaluation of a haptic actuator based on magnetorheological fluids," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 27, no. 14, pp. 1967–1975, Aug. 2016.
- [123] T.-H. Yang *et al.*, "Development of a miniature tunable stiffness display using MR fluids for haptic application," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 163, no. 1, pp. 180–190, Sep. 2010.
- [124] S. H. Winter and M. Bouzit, "Testing and Usability Evaluation of the MRAGES Force Feedback Glove," in *2006 International Workshop on Virtual Rehabilitation*, 2006, pp. 82–87.
- [125] J. Park, G.-H. Yoon, J.-W. Kang, and S.-B. Choi, "Design and control of a prosthetic leg for above-knee amputees operated in semi-active and active modes," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 8, p. 085009, 2016.
- [126] K. Gudmundsson, "Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry," Aug. 2018.
- [127] J. D. Carlson, "Critical factors for MR fluids in vehicle systems," *Int. J. Veh. Des.*, vol. 33, no. 1–3, pp. 207–217, Jan. 2003.
- [128] J. Furusho *et al.*, "Development of Shear Type Compact MR Brake for the Intelligent Ankle-Foot Orthosis and Its Control; Research and Development in NEDO for Practical Application of Human Support Robot," in *2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2007, pp. 89–94.
- [129] I. Díaz, J. J. Gil, and E. Sánchez, "Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges," *Journal of Robotics*, 2011. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/jr/2011/759764/abs/>. [Accessed: 29-Sep-2018].
- [130] H. F. M. Van der Loos, D. J. Reinkensmeyer, and E. Guglielmelli, "Rehabilitation and Health Care Robotics," in *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 1685–1728.
- [131] X. Yin, S. Guo, H. Hirata, and H. Ishihara, "Design and experimental evaluation of a teleoperated haptic robot-assisted catheter operating system," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 27, no. 1, pp. 3–16, Jan. 2016.
- [132] D. Senkal, H. Gurocak, and E. I. Konukseven, "Passive Haptic Interface with MR-Brakes for Dental Implant Surgery," *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 20, no. 3, pp. 207–222, Jun. 2011.
- [133] S.-H. Choi, S. Kim, P. Kim, J. Park, and S.-B. Choi, "A new visual feedback-based magnetorheological haptic master for robot-assisted minimally invasive surgery," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 6, p. 065015, 2015.
- [134] D. C. Harris, "History of magnetorheological finishing," in *Window and Dome Technologies and Materials XII*, 2011, vol. 8016, p. 80160N.
- [135] M. S. Niranjana and S. Jha, "Experimental investigation into tool aging effect in ball end magnetorheological finishing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 80, no. 9–12, pp. 1895–1902, May 2015.
- [136] D. Golini, "Precision optics manufacturing using magnetorheological finishing (MRF)," in *Optical Fabrication and Testing*, 1999, vol. 3739, pp. 78–86.
- [137] S. Jha and V. K. Jain, "Design and development of the magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 10, pp. 1019–1029, Aug. 2004.
- [138] S. K. S. Jha, and V. R. P., "Design of Parallel Plate Magnetorheometer for evaluating properties of Magnetorheological polishing fluid," *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4–5, pp. 3251–3259, 2015.
- [139] M. Reiner, "The Deborah Number," *Physics Today*, vol. 17, p. 62, 1964.
- [140] Élisabeth Guazzelli, *Rhéologie des fluides complexes*. 2001.
- [141] "Rheology." 2018.

Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide Magnéto-Rhéologique

- [142] P. Mongondry, "Structure et comportement rhéologique des suspensions aqueuses de Laponite en présence de plusieurs additifs," phdthesis, Migration - université en cours d'affectation, 2003.
- [143] D. Feys, R. Cepuritis, S. Jacobsen, K. Lesage, E. Secrieru, and A. Yahia, "Measuring rheological properties of cement pastes: most common techniques, procedures and challenges," *Rilem Tech. Lett.*, vol. 2, pp. 129–135, 2018.
- [144] P. Banfill, "The rheology of fresh cement and concrete—a review," Jan. 2003.
- [145] T. Gibaud, C. Barentin, N. Taberlet, and S. Manneville, "Shear-induced fragmentation of laponite suspensions," *Soft Matter*, vol. 5, no. 16, pp. 3026–3037, Aug. 2009.
- [146] A. M. Alexander, "Study of Vibration in Concrete, Report 3. Mechanics of Motion of Fresh Concrete.," ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MISS, AEWES-TR-6-780-3, Sep. 1977.
- [147] P. F. G. Banfill, X. Yongmo, and P. L. J. Domone, "Relationship between the rheology of unvibrated fresh concrete and its flow under vibration in a vertical pipe apparatus," *Mag. Concr. Res.*, vol. 51, no. 3, pp. 181–190, Jun. 1999.
- [148] P. F. G. Banfill, M. A. O. M. Teixeira, and R. J. M. Craik, "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 9, pp. 932–941, Sep. 2011.
- [149] A. Lassalle and C. Legrand, "Évolution du comportement rhéologique d'une pâte de ciment fraîche suivant la distance à une source vibrante," *Matér. Constr.*, vol. 13, no. 2, pp. 115–124, Mar. 1980.
- [150] S. Li, J. S. Marshall, G. Liu, and Q. Yao, "Adhesive particulate flow: The discrete-element method and its application in energy and environmental engineering," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 37, no. 6, pp. 633–668, Dec. 2011.
- [151] A. Nanda and M. A. Karami, "One-way sound propagation via spatio-temporal modulation of magnetorheological fluid," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 144, no. 1, pp. 412–420, Jul. 2018.

Titre : Évaluation de l'effet des vibrations sur le comportement du fluide Magnéto-Rhéologique

Mots clés : Fluide Magnéto-Rhéologique, Vibrations, Cisaillement, Frein MR

Résumé :

Les fluides Magnéto-Rhéologiques (MR) de par leurs caractéristiques variant avec le champ magnétique qui leur est appliqué, sont utilisés dans la dissipation d'énergie mécanique. Ainsi, il existe de nombreux dispositifs utilisant ces fluides, par exemple des amortisseurs ou des freins, permettant de contrôler aisément leurs performances. Cependant ces dissipateurs d'énergie mécanique sont amenés à opérer dans des milieux soumis à des perturbations externes notamment des vibrations. Dans le cadre de cette thèse, nous étudions la stabilité des propriétés des fluides magnéto-rhéologiques lorsqu'ils sont perturbés par une stimulation de type vibratoire.

Une comparaison analytique de l'ordre de grandeur des efforts vibratoires relativement aux efforts de cohésion magnétique ayant lieu dans le fluide laisse apparaître une possible perturbation du fluide par des vibrations.

Nous avons mis en place un banc de test

permettant à la fois d'injecter des perturbations vibratoires et de mesurer leur impact sur le fluide utilisé dans un mode classique de cisaillement.

Dans certaines conditions, nous avons pu mesurer une diminution de la contrainte de cisaillement du fluide. La variation observée est liée à l'amplitude du mode de déformation de l'élément cisailant. Trois directions de propagation de vibration selon un repère cylindrique sont étudiées et leurs impacts discutés. La direction normale à la surface est celle qui présente le plus d'effet. La variation maximale de la contrainte de cisaillement observée peut atteindre 40 %. Ce phénomène intervient pour des champs magnétiques faibles, inférieurs à 250 mT, et pour une vitesse de cisaillement faible, inférieure à 100 s⁻¹.

Enfin l'effet des vibrations est étudié sur des fluides de différentes viscosités et concentrations de particules, afin d'évaluer l'impact de ces derniers sur la stabilité du fluide.

Title: Impact evaluation on behaviour caused by vibration in magneto-rheological fluids

Keywords: Magneto-Rheological Fluid, Vibrations, Shear, MR Brake

Abstract:

Magneto-Rheological (MR) fluids, due to their characteristics varying with the applied magnetic field, are used in the dissipation of mechanical energy. Thus, there are many devices using these fluids, such as shock absorbers or brakes, that can easily control their performances. However, these mechanical energy dissipators may operate in environments subject to external disturbances, in particular vibrations. In this thesis, we study the stability of magneto-rheological fluid properties when they are perturbed by vibratory stimulus.

A comparative analysis of the magnitude of the vibratory forces relative to the magnetic cohesion forces occurring in the fluid reveals a possible disturbance of the fluid by vibrations.

We have implemented a test bench allowing

both to inject vibration disturbances and to measure their impact on the fluid used in a conventional shear mode.

Under certain conditions, we were able to measure a decrease in the shear stress of the fluid. The observed variation is related to the modal deformation amplitude of the shearing element. Three directions of vibration propagation according to a cylindrical coordinate are studied and their impacts discussed. The direction normal to the surface is the one with the most effect. The maximum shear stress variation can be as high as 40%. This phenomenon occurs for low magnetic fields, less than 250 mT, and low shear rate, less than 100 s⁻¹.

Finally, the vibration effect is studied on fluids of different viscosities and particle concentrations in order to assess their impact on the fluid's stability.

