



SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 2 |
| 1. Approche Générale | 3 |
| 1.1. Historique & Fabrication | 3 |
| 1.2. Principe & Stabilité | 4 |
| 1.3. Propriété | 8 |
| 2. Expérience | 10 |
| 2.1. Observations générales | 10 |
| 2.2. Expérience de la goutte de ferrofluide immergée | 12 |
| 2.3. Fabrication & comparaison Ferrofluide/MR-Fluides | 13 |
| 3. Application | 15 |
| 3.1. Médecine (amortissement, prothèse, IRM) | 15 |
| 3.2. Joints tournants (HDD, mécanique, etc.) | 16 |
| 3.3. Optique (biréfringence, polissage, etc.) | 14 |
| 3.4. Art (Fabian Oefner Labyrinth, water color pendulum morpho tower) | 17 |
| 3.5. Autres & développements | 18 |
| 4. Conclusion | 20 |
| 5. Bibliographie | 21 |



Introduction

Les ferrofluides et les fluides magnétorhéologiques sont des solutions composées de minuscules particules de fer en suspension dans un liquide porteur.

Ce sont ces dernières qui confèrent à ces liquides leurs propriétés leur permettant de réagir au champ magnétique.

En effet le Fer étant de valence $3d^64s^2$, il possède plusieurs électrons appariés sur sa couche externe. Ceux-ci sont alignés suivant le même spin de par le principe d'exclusion de Pauli. Ces éléments sont qualifiés de « ferromagnétiques » et sont susceptibles à l'aimantation.

En présence d'un champ magnétique, les particules de fer s'alignent selon les lignes de champs. Il en résulte alors une variation des propriétés rhéologiques du fluide. La viscosité est alors un paramètre que l'on peut contrôler grâce aux aimants ou électroaimants. Pour les ferrofluides, l'action d'un champ magnétique suffisamment puissant peut même solidifier le liquide.

Ce qui fait la différence entre les ferrofluides et les suspensions magnétorhéologiques (MR fluids) est la taille des particules.

Les ferrofluides sont caractérisés de « suspension colloïdale ». Cela signifie que les particules sont de taille nanométrique, environ 5-15nm. Elles sont suffisamment petites pour être affectées par les phénomènes de transports, il en résulte un fluide stable de part l'équilibre entre la gravité, les mouvements browniens et les interactions dipolaires.

Les MR fluids, eux, sont composés de particules de fer environ 100 fois plus grosses, environ 5-20 μm . Le mouvement Brownien ne s'applique plus et ces dernières ont tendance à sédimenter et à s'agglomérer. Il faut donc rajouter un second agent aux liquides porteurs pour remédier à ce problème.

Dans les deux cas, ces fluides « intelligents » ont diverses applications dans plusieurs domaines, telles que les amortisseurs actifs, l'aide à l'acquisition d'image IRM, les joints tournants de disque dur, etc.



1. Approche générale

1.1. Historique & fabrication

Un ferrofluide ne peut exister à l'état naturel. Bien que la première ébauche de ferrofluide ait été découverte par Wilson en 1779 lorsqu'il prépara un liquide constitué de fines particules de fer dans de l'eau, les véritables ferrofluides sont apparus dans la deuxième moitié du XX^e siècle. C'est dans le but de mettre en évidence les domaines de Weiss que F. Bitter a synthétisé les premiers ferrofluides. La théorie du physicien Pierre Weiss postule l'existence de domaines dans lesquels l'aimantation (moment magnétique volumique défini par : $\vec{M} = \frac{d\vec{M}}{dV}$ ou dV est un volume élémentaire) a une direction et une intensité uniforme. Cependant, les ferrofluides de Bitter s'avèrent peu stables.

Ce n'est qu'à partir de 1940 que les ferrofluides ne sont plus utilisés qu'à seule fin l'étude des domaines de Weiss. Néel introduit la notion de « relaxation » dans le but de pouvoir disposer des particules magnétiques de taille et de forme contrôlée. A la fin des années 1950, Bean et Livingstone découvrent le comportement paramagnétique pour des températures élevées et en champ faible des nanoparticules et introduisent le « superparamagnétisme ».

En 1966, Papell mélange de la poudre de magnétite et du kérosène en présence d'acide oléique. Les particules sont broyées pendant 10 mois. Ronald E. Rosenweig améliore ce fluide, notamment en le rendant plus concentré et plus magnétique puis, avec R. Moskowitz, crée l'entreprise Ferrofluidic. Les premiers ferrofluides stables sont synthétisés.

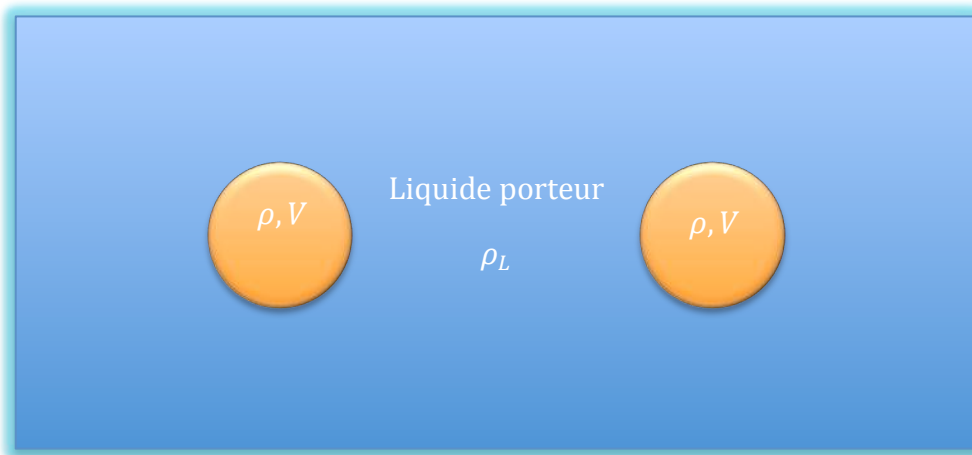
Depuis, la recherche sur les fluides magnétiques ne cesse d'affiner la qualité dans la synthèse des ferrofluides. En 1980, R. Massart invente le ferrofluide sans tensioactif : la charge ionique de surface y assure la stabilité.

Aujourd'hui, il est possible de fabriquer un fluide magnétique à partir d'éléments de la vie courante, tel que des cartouches d'encre Toner et de l'huile ou même de l'eau (ferrofluide aqueux).



1.2. Principe & Stabilité

On rappelle qu'un ferrofluide est une solution composée de particules de fer (ou de magnétite) en suspension dans un solvant. Pour la suite du problème, on modélisera le ferrofluide par des particules sphériques de taille identique de l'ordre de la dizaine de nanomètre de diamètre (noté $2r$), de volume V et de densité volumique ρ dans un fluide initialement au repos de densité volumique ρ_L et de viscosité η . La distance de séparation entre les particules solides sera précisée par la suite, dans un souci de stabilité.



Comme tout corps dans un liquide, il faut obtenir un certain équilibre. Pour des particules magnétiques en suspension, le problème de stabilité est primordial, notamment pour sa fabrication. On doit donc s'intéresser aux forces s'exerçant sur chaque particule.

a) Force gravitationnelle

Comme tout corps plongé dans un fluide, chaque particule subit une force de sédimentation :

$$\vec{P} = \rho V \vec{g} \quad (1)$$

D'autres forces viennent cependant s'opposer à celle-ci. C'est le cas de la force de Stokes, de la poussée d'Archimède et de l'agitation due au mouvement Brownien, respectivement décrites par :

$$\vec{F}_S = -6\pi\eta r \vec{v} \quad (2)$$

où \vec{v} est la vitesse associée à la particule de fer.

$$\vec{\Pi}_A = -\rho_L V \vec{g} \quad (3)$$



Le mouvement Brownien est quand à lui bien décrit par l'équations de Langevin :

$$\rho V \frac{d^2 x}{dt^2} = -\rho V \eta \frac{dx}{dt} + F(t)$$

où $F(t)$ est une force fluctuante représentant les impacts incessant des molécules de fluide sur la particules.

Cependant, le but étant d'obtenir une stabilité, c'est-à-dire un équilibre, chaque particule de fer devra avoir une vitesse nulle dans le fluide au repos :

$$\vec{v} = \vec{0}$$

D'après le Principe Fondamental de la Dynamique, on a, à l'équilibre, la relation suivante :

$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$

En raisonnant en terme d'énergies potentielles, on à l'énergie potentielle gravitationnelle $\rho V g$ qui s'oppose aux énergies de la poussée d'Archimède $\rho_L V g$ et de l'agitation brownienne $k_B T$, soit :

$$\rho V g = \rho_L V g + k_B T$$

où k_B est la constante de Boltzmann (soit $k_B \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$) et T la température (en K). D'où :

$$k_B T = (\rho - \rho_L) V g \quad (4)$$

En assimilant les particules de fer à des petites sphères de rayon r , on à le volume V définit par $V = \frac{4}{3} \pi r^3$, ce qui implique :

$$k_B T = (\rho - \rho_L) \frac{4}{3} \pi r^3 g$$

$$\Leftrightarrow r = \left(\frac{3 k_B T}{4 \pi (\rho - \rho_L) g} \right)^{1/3} \quad (5)$$

On a donc une condition sur le rayon des particules de fer ou de magnétites pour pouvoir obtenir un ferrofluide stable. Une rapide application numérique (en ordre de grandeur) permet d'obtenir une approximation sur la taille des particules. En prenant : $T = 300 \text{ K}$, $(\rho - \rho_L) \sim 4 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ et $g \sim 10 \text{ m.s}^{-2}$, on arrive au résultat suivant :

$$r \sim 3 \cdot 10^{-9} \text{ soit } 3 \text{ nm}$$

Les particules doivent donc bien avoir un diamètre de l'ordre de la dizaine de nanomètre.

N.B. : - L'égalité (4) n'est bien sur jamais réellement obtenue. Certains auteurs introduisent donc également un facteur de variation L dans le second terme de l'équation, ce qui est bien entendu repercuté dans l'équation (5).



- La taille de nanoparticules est également en accord avec la théorie des domaines de Weiss.

b) Le champ magnétique

Un ferrofluide est, comme son nom l'indique, sensible aux champs magnétiques extérieurs. Comme tout corps ferromagnétique, les particules de fer sont susceptibles de s'aimanter et donc d'entraîner une sédimentation magnétique. Comme pour le champ gravitationnel, la force de Stokes et le mouvement Brownien s'opposent à cette force.

En raisonnant comme précédemment sur les énergies potentielles, on veut que l'énergie potentielle magnétique $\mu_0 M_S V \Delta H$ soit négligeable devant celle du mouvement brownien, afin de garder l'égalité (4) vraie :



$$k_B T \gg \frac{4}{3} \pi r^3 \mu_0 M_S \Delta H \quad (6)$$

où M_S est l'aimantation à saturation du fer et ΔH l'amplitude de la variation du champ H à l'échelle de l'échantillon.

c) L'interaction dipolaire

Une fois les particules de fer aimantées, elles deviennent des dipôles magnétiques. Elles vont donc interagir entre elles et donc chaque particule subira une force due aux interactions dipolaires avec les autres particules. Pour maintenir une stabilité, il faut éviter les agglomérats de particules de fer. Par conséquent, l'agitation brownienne doit être grandement supérieure devant l'énergie de séparation des particules (en contact), donnée par $\mu_0 \frac{(M_S/V)^2}{2\pi}$, soit :

$$k_B T \gg \mu_0 \frac{(M_S/V)^2}{\pi r^3} \quad (7)$$



d) Les forces de Van der Waals et répulsions électrostatique

Chaque dipôle instantané (particule polarisée) est en interaction avec les autres dipôles instantané et, en plus, polarise les molécules voisines. C'est l'effet de dispersion de London qui énonce:

$$E_L = \frac{-k_L}{x^6}$$

où E_L est l'énergie d'interaction entre deux dipôles, x la distance entre ces deux dipôles et k_L la constante de London.

Cependant, le modèle de Hamaker prévoit l'énergie d'interaction U' suivante :

$$U' = \frac{-A.r}{12x}$$

où A est la constante de Hamaker ($A \sim 10^{-19}$).

On a donc une énergie qui tend vers l'infini quand x tend vers 0 mais qui décroît rapidement en $1/x^6$. Pour assurer la stabilité, il faut donc éviter que les particules ne forment des agglomérats. Pour cela, on utilise un surfactant, qui permet d'imposer une énergie répulsive là où l'énergie de Van der Waals devrait dominer. Celle-ci s'ajoute à celle due aux répulsions électrostatiques autrement appelées gênes stériques.

Le surfactant crée une chaîne amphiphile sur la surface des particules. La tête, polaire, adhère à la surface du ferrofluide tandis que la queue apolaire présente une affinité avec le fluide porteur. Les queues, d'une taille de l'ordre du nanomètre permettent de créer une répulsion entre particules *sufractées*. C'est pourquoi les ferrofluides *sufractés* sont à base de solvant apolaires.

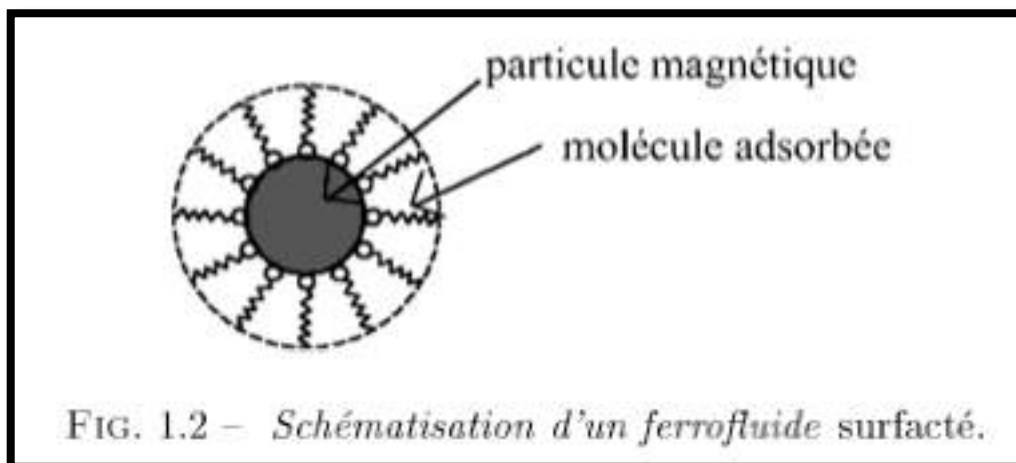


FIG. 1.2 – Schématisation d'un ferrofluide surfacté.



1.3. Propriété

a) Propriétés optiques

Sous l'effet d'un champ magnétique, les ferrofluides acquièrent des propriétés de biréfringence. Ce phénomène a pour effet de créer une dépendance de l'indice de réfraction du milieu en fonction de la direction de polarisation de l'onde lumineuse. Expérimentalement, la biréfringence se manifeste par un dédoublement d'un faisceau lumineux qui traverse le ferrofluide. Chaque particule est anisotrope et leurs axes d'anisotropie sont colinéaires à leurs axes de facile aimantation. Ainsi, sous l'effet d'un champ magnétique, l'axe optique du fluide devient colinéaire aux lignes de champ. Grâce à cet effet, il est possible expérimentalement de déterminer localement l'orientation des particules de ferrofluides.

Pour les mêmes raisons, les ferrofluides sont des substances dichroïques, c'est-à-dire qu'ils ont la propriété de prendre une couleur différente suivant l'angle sous lequel on les regarde. La propriété dichroïque implique la biréfringence.



b) Propriétés magnétiques

En l'absence de champ, les moments magnétiques des particules de ferrofluides sont orientés de manière aléatoire et l'aimantation totale du fluide est nulle. Si on applique un champ, tous les moments magnétiques s'orientent alors dans la direction du champ, proportionnellement à la valeur de l'énergie magnétique $\mu_0\mu_r H$.

La théorie de Langevin décrit l'aimantation M du fluide en fonction du champ H par la formule suivante :

$$M = M_{sat} \left(\coth(\xi) - \frac{1}{\xi} \right) \text{ avec } \xi = \frac{\mu_0\mu_r H}{k_B T} \quad (8)$$

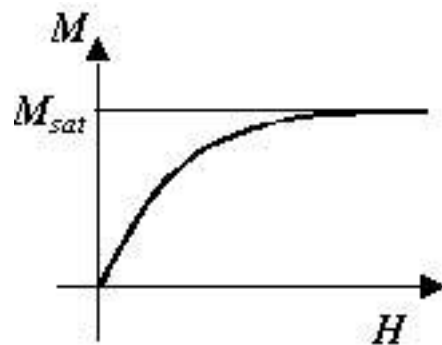
où ξ est le paramètre de Langevin, égal au rapport de l'énergie magnétique avec l'énergie du mouvement brownien.



On obtient la courbe d'aimantation ci-contre.

L'aimantation atteint la saturation à une valeur M_{sat} qui est proportionnelle à la fraction volumique en particules. Le phénomène est réversible, et ne présente pas d'hystérésis.

Cette courbe est bien décrite par l'équation de Langevin ci-dessus pour des suspensions très diluées. On a donc une dépendance de l'aimantation en fonction de la concentration du ferrofluide ainsi que de la dispersion en taille.



Courbe de l'aimantation



2. Expériences

Dans cette partie, nous avons eu l'occasion avec la permission du professeur Bossis d'accéder aux laboratoires Hyppolite Fizeau afin d'expérimenter et de rencontrer des chercheurs s'intéressant au domaine des fluides magnétiques.

2.1. Observations générales

Afin d'observer les propriétés des ferrofluides expérimentalement, nous avons utilisé notre propre ferrofluide commandé sur internet (photo ci-contre) et un autre synthétisé dans les laboratoires de l'université. Ceux-ci sont respectivement à base d'hydrocarbure ou d'huile, leur solubilité dans l'eau est théoriquement négligeable, même si on remarque qu'une interface se forme à la surface de l'eau.

Nous disposons également de divers aimants certains en Neodymium plus puissant (aimant de disques dure, aimants sphère) et un autre en ferrite (un large aimant rectangulaire fourni par le laboratoire).



a) Les piques

Quand on pense aux ferrofluides, on imagine tout de suite une sorte de hérisson noir aux reflets métallique.



Ceci est due au fait que les nanoparticules magnétiques s'alignent suivant les lignes de champ produites par les aimant à proximité.

La hauteur et le nombre de pique dépend principalement de 3 paramètres : le gradient de champ magnétique, la tension superficielle du fluide et sa densité.



Le deuxième et le troisième paramètre sont des caractéristiques propres des ferrofluides utilisés. On ne peut agir dessus mais ce sont bien ces forces qui assurent la cohésion du fluide et limitent la taille des piques. Le premier paramètre dépend de l'aimantation de l'aimant et de la distance avec le ferrofluide. On remarque que plus l'aimant est porté près du ferrofluide, plus le



nombre de piques est important. Il croise un nombre maximum de ligne de champ. Par contre la taille des piques en est diminuée. Il faut être à une certaine distance pour que celle-ci soit maximum.

b) L'instabilité de surface « labyrinthine »

Nous avons essayé de reproduire cette instabilité de surface en immergeant 2 3 gouttes de ferrofluides dans une solution d'alcool peu profonde.



Les causes de cette instabilité sont les même que celle des piques, Cependant, ici, nous n'avons qu'une fine couche de ferrofluide, ce qui amène un nouveau phénomène.

c) Aimant recouvert de ferrofluide

Nous avons aussi essayé de plongé un petit aimant (5*5mm) dans quelques gouttes de ferrofluides. On observe qu'à l'instar de la limaille de fer celui-ci vient se coller sur les lignes de champs de l'aimant et lui donne une forme particulière. Les propriété les plus étonnante de ce petit cube « ferrofluidisé » sont l'atténuation des forces de frottement sur l'assiette recouverte d'une fine pellicule de liquide magnétiques, sa réaction au champ magnétique extérieur et son l'instabilité de ses mouvement.





2.2. Expérience de la goutte de ferrofluide immergée

Nous avons voulu dans cette partie mettre au point une petite expérience consistant à immerger une goutte de ferrofluide organique dans de l'eau dans le but d'étudier son mouvement et d'en déduire la force de l'aimant.

| SCHEMA | |
|--------|---|
| | <p><u>4 forces s'exerce sur la goutte :</u></p> <ul style="list-style-type: none">• Gravité :• Frottements :• Poussé Archimede :• Force Magnétique : |

On modélise la goutte par une sphère, ce qui nous amène à l'équation de stokes pour les frottements.

Nous connaissons aussi ces autres données :

- $H = (4.5 \pm 0.1)$ cm
- $H_2 = (10.5 \pm 0.2)$ cm (en partant du milieu de l'aimant d'épaisseur 2.5 cm)
- $d_{goutte} = (15 \pm 2)$ mm
- Densité du ferrofluide : $\rho = 1.3 \cdot 10^3$ kg/m³

Densité de l'eau : $\rho_{eau} = 10^3$ kg/m³

Avec ces paramètres on mesure pour une dizaine d'essais : $t = (1.05 \pm 0.14)$ s (où t est le temps mis par la goutte pour parcourir le flacon de bas en haut.)

Nous nous sommes heurté à plusieurs problèmes lors de la réalisation de cette expérience :

- Premièrement, si la goutte est trop grosse, elle se déforme car les forces magnétique l'emporte sur la tension superficielle entre l'eau et le ferrofluide. Il faut donc de toutes petites gouttes, ce qui n'est pas évident. Les calculs et mesures sont aussi trop approximatifs pour arriver à un résultat concluant. Impossibilité de mesurer précisément le diamètre de la goutte avec la réfraction de l'air et de l'eau.



-
- Le temps mesuré est très petit même si nous avons essayé d'optimiser sa mesure image par image grâce à un enregistrement vidéo.
 - Les aimants que nous avons apporté étaient trop faible pour attirer une si petite goutte à plus de 4.5 centimètres dans de l'eau. Il faut un aimant puissant. Celui en Ferrite du laboratoire l'était suffisamment.
 - Il nous manque des paramètres comme la susceptibilité magnétique du ferrofluide etc....

2.3. Fabrication & comparaison ferrofluides / MR-Fluides

Nous avons



3. Application

3.1. Médecine

a) Application aux techniques IRM

L'imagerie par Résonance Magnétique permet d'explorer l'intérieur du corps humain à l'aide de puissant champ magnétique (environs de 0.1 à 7 Tesla) . C'est plus particulièrement par l'intermédiaire des atomes d'hydrogène que les radiologues peuvent faire fonctionner les IRM. Grâce à un premier champ, les spins des atomes d'hydrogène sont alignés. Ensuite un second champ, aligné sur une fréquence particulière à ces atomes, dites de Larmor, vient créer un mouvement de précession des moments magnétiques qui est mesurable et qui permet d'identifier le type de tissus observé en fonction de la fréquence.

Dans cette application les Ferrofluides sont utilisés comme Agent De Contraste. Ils permettent après avoir été modifié pour cibler spécifiquement certaines cellules tumorales ou cancéreuse de repérer ces dernières facilement de part leurs propriétés magnétiques.

b) Amortissement magnétorhéologique et prothèses

Les MR fluids sont composés de particules magnétiques plus grosses que les ferrofluides, celle-ci ressentent moins les effets de l'agitation thermiques et sont alors plus facilement polarisables.

Leurs viscosités varient plus efficacement que pour les ferrofluides sous l'influence d'un champ magnétique.

PHOTO

3 modes d'utilisation de cette propriété existent :

| Mode | Utilisation |
|--------------------------|-----------------------|
| Ecoulement | Amortisseur |
| Cisaillement | Freinage |
| Ecoulement sous pression | Contrôle de précision |

Les applications de ces champs sont multiples. Certaines sont déjà appliquées comme dans les systèmes de freinages de voiture haute gamme (Acura Mdx brake system made by Delphi corporation) ou militaire. En médecine, une innovation intéressante est la mise au point d'amortisseur pour prothèse semi-active.

Il est important de noter que ce point s'applique uniquement aux fluides magnétorhéologiques !



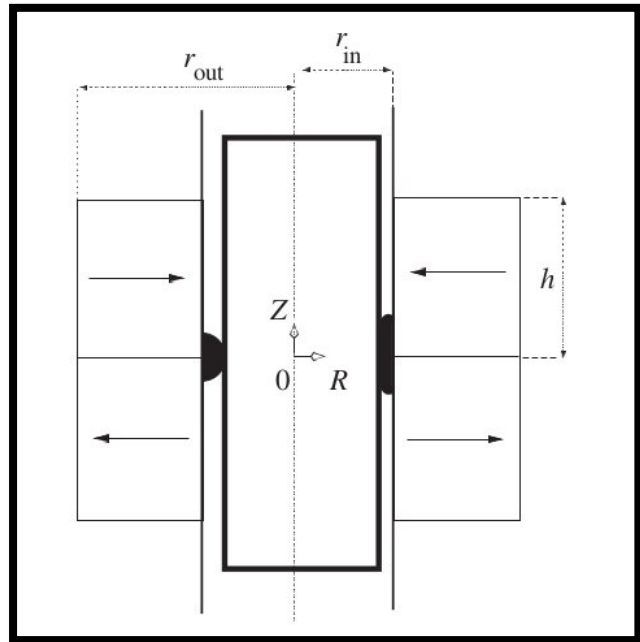
3.2. Joints tournants

Les sociétés Ferrotec et Ferrolab sont les leaders du marché des joints tournants (ferrofluidic seals). Ils sont constitués d'une tige rotative entourée d'aimants.

Ainsi le ferrofluide introduit dans l'interstice prévu à cet effet se colle à la tige et assure une étanchéité parfaite. De plus ces joints sont capables de résister à de grandes contraintes mécaniques et leur durée de vie est longue (environ 15ans) due à la stabilité des ferrofluides.

Pour ces raisons ces joints sont très utilisés en ingénierie, pour confiner des gaz et surtout dans les disques durs, autour de l'axe de rotation du disque.

Les ferrofluides étant des liquides, ils peuvent aussi avoir la fonction de refroidissement ou de diminuer les frictions.

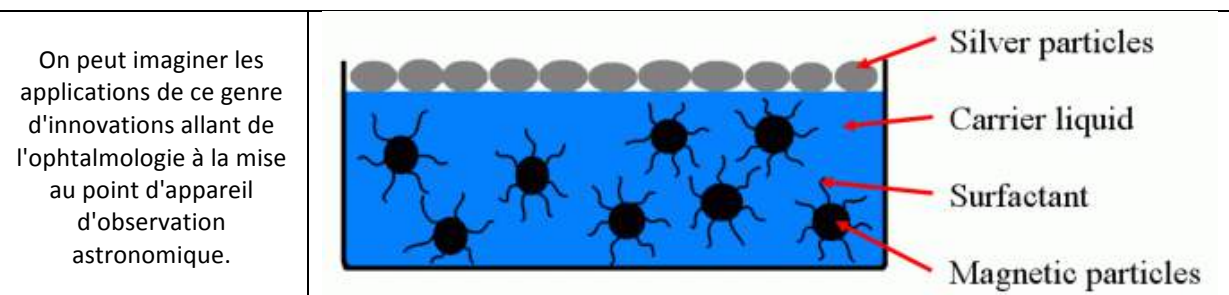


Il est important de noter que pour les joints tournants, les Mr fluids ne peuvent pas être utilisés !

3.3. Optique (biréfringence, polissage, etc.)

a) Ferrofluid Mirror

Depuis le début des années 2000, l'université de Laval au Québec travaille sur des miroirs déformables. Ceux-ci sont composés de ferrofluides recouverts d'un film de nanoparticules d'argent réfléchissantes. Une des particularités de ces ferrofluides est que le liquide porteur n'est ni de l'eau, ni une huile mais de l'éthylène glycol. Ceci afin de concilier affinité avec la surface réfléchissante, tension de surface et durée de vie (environ 70 jours.)





b) Magnetoreological Finishing (MRE)

Au cours des années 1990 et grâce aux fluides Magnétorhéologique, un physicien biélorusse, William Kordonski, a pu mettre au point un nouveau système de polissage d'extrême précision contrôlée par ordinateur.

Son efficacité viens de la capacité à pouvoir contrôler la dureté et l'aspect de la couche de ferrofluide déposé sur le disque grâce aux champs magnétiques. De plus, ce dernier permet de se débarrasser de la chaleur et des débris de polissage.

3.4. Art

De part leurs propriétés et leur comportement, les fluides magnétiques sont aussi utilisé dans le domaine artistique.

a) L'effet labyrinthe

Lorsque que quelques gouttes de ces fluides sont déposées dans une solution alcoolique à laquelle elles ne peuvent se mélangé ou bien enfermée entre deux plaques de verres puis exposé à un champ magnétique normal, celles-ci forment une structure « labyrinthe ». Il y a instabilité entre les tensions de surface et les forces magnétiques.

Ci-contre, la représentation artistique de cet effet mélangé avec divers colorant, photo prise par Fabian Oefner.





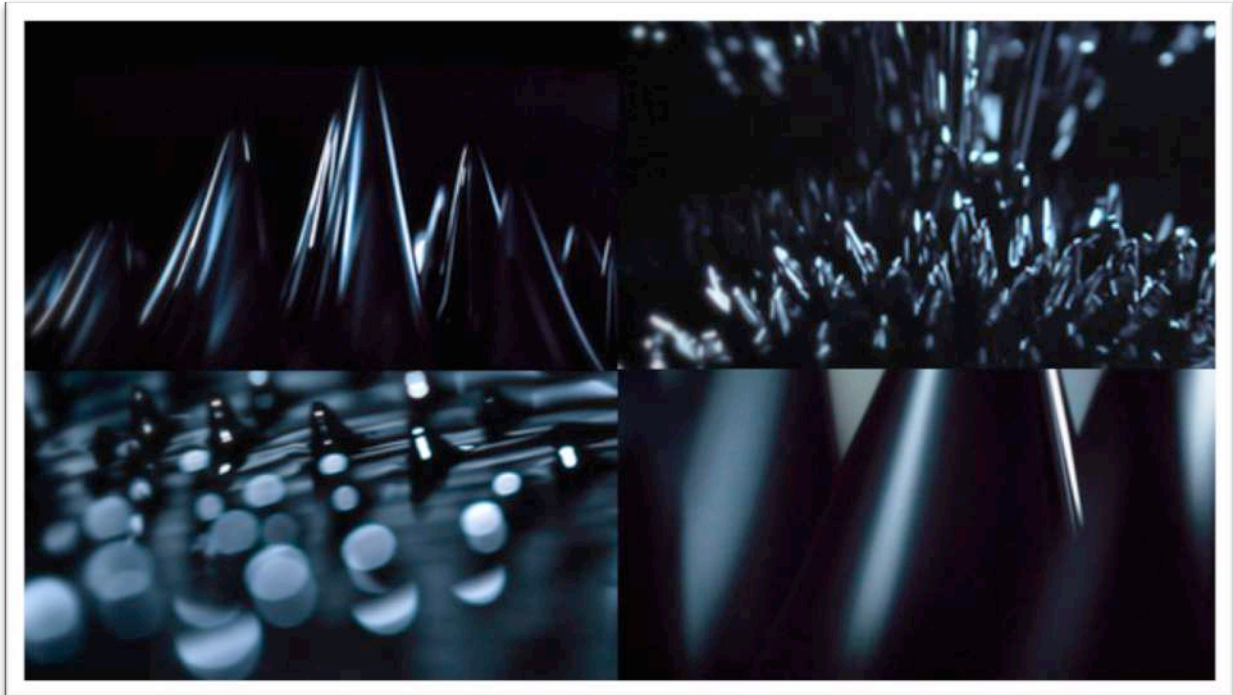
b) Sculptures

Des artistes comme Sachiko Kodama utilise des ferrofluides et des électromagnètes pour réaliser d'impressionnantes sculptures dynamiques, presque vivantes.

L'aspect métallique de la solution ainsi que les piques en suspension suivant les lignes de champs donne à ces œuvres un aspect à la fois futuriste, alien et intrigant.

Ci contre :

- "Morpho tower" de Sachiko Kodama
- sculpture du clip "Watercolor" de Pendulum



3.5. Autres & développement

D'autres applications n'ont pas été citées comme l'utilisation d'encre magnétique pour imprimer des billets/chèques et ainsi éviter les falsifications ou encore l'utilisation de ferrofluide dans enceintes pour refroidir les bobines et amortir les vibrations...

Un autre projet, de l'inventeur Jeffrey Cheung, semble intéressant. Il s'agit d'un générateur électrique consistant d'un aimant, de bobines et de ferrofluide. L'aimant glisse dans un cylindre lubrifié par des ferrofluides qui adhère aux surfaces par magnétisme. Ce

Introduction aux ferrofluides & suspensions magnétorhéologiques

LALLET Guillaume

VERDIER Paul



mouvement induit une force électromotrice à chaque fois que l'aimant passe au milieu d'une bobine. On peut ainsi créer un faible courant en secouant ce dispositif ou en le plaçant dans un milieu mouvementé (vagues, vent...)

Néanmoins ces technologies sont encore de nos jours coûteuses. Il n'est pas évident de fabriquer un MR fluid ou un Ferrofluide de bonne qualité. Le problème se pose davantage pour les suspensions magnétorhéologiques qui ont une durée de vie bien moindre que leurs équivalents nanoscopiques.

Beaucoup d'applications n'en sont encore qu'au stade de recherche.



4. Conclusion

L'Imagerie par Résonance Magnétique permet d'explorer l'intérieur du corps humain à l'aide de puissant champ magnétique (environs de 0.1 à 7 Tesla) . C'est plus particulièrement



5. Bibliographie

- Ecoulement des fluides magnetiques dans des capillaires et milieux poreux sous l'effet d'un champ magnetique PAVEL KUZHIR 2003
- Les ferrofluides : ondes de surface, résistance de vague et simulation de la convection dans le manteau terrestre. Julien BROWAEYS 2000
- Ferrofluid Flow Phenomena Thomas A. Franklin
- Magnetorheology: Fluids, Structures and Rheology G. Bossis , O. Volkova, S. Lacis , and a. meunier1
- stabilization of magnetorheological suspensions by polyacrylic acid polymers j.l. viota, j. de vicente, j.d.g. durán, a.v. delgado 2004
- properties and application of magnetorheological fluids jamme volume 18 sept-oct 2006
- mechanical properties of a ferrofluid seal: three-dimensional analytical study based on the coulombian model r. ravaud and g. lemarquand 2009
- Ferrofluids and Magnetorheological Fluids Ladislau Vékás 2008
- labyrinth pattern formation in ferrofluid august, 20, 1993,
- new scientist n° & n° & <http://www.newscientist.com/article/dn15154-morphing-mirror-could-clear-the-skies-for-astronomers.html>
- http://wood.phy.ulaval.ca/index.php/ferrofluid_derfomable_mirrors
- Ethylene Glycol Based Ferrofluid for the Fabrication of Magnetically Deformable Liquid Mirrors Jean-Philippe Dery,† Ermanno F. Borra,‡ and Anna M. Ritcey 2004
- History of Magnetorheological Finishing Daniel C. Harris* 2011
- <http://www.ferrotec.com/>
- <http://www.ferrolabs.com/>
- <http://www.google.com/patents/US6812583>
- Domaines de Weiss ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Domaine_de_Weiss
- Ferrohydrodynamics par R.E. Rosenzweig : http://books.google.fr/books?id=uSa5nJGXYicC&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Ferrofluide ; <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ferrofluide#Historique>



-
- Mouvement Brownien ;
http://marc.joos.free.fr/marc.joos/thermo_M1/Chapitre_5Thermo.pdf
 - <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/materiaux-magnetiques-42537210/ferrofluides-n4590/physique-du-superparamagnetisme-n4590niv10001.html>
 - <http://fr.slideshare.net/sylvainchabaud/diapo-complet-ferrofluide-sylvain-et-dhervy>
 - <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=187282>
 - http://www.physique.ens-cachan.fr/pagregp/cours/fichiers/Cours_opt_anis_v2_5.pdf
 - « Des liquides magnétiques : les ferrofluides » par l'UPMC (1995)