

Les fluides rhéologiques intelligents et leurs applications énergétiques et technico-industrielles

Nadjib Louam

Département de la Technologie Electronique
Collège of Telecom and Electronics
P.O Box 2816, Jeddah 2146, Saudi Arabia

(reçu le 05 Novembre 2013 – accepté le 26 Décembre 2013)

Résumé - Une forme d'énergie rentable, propre et renouvelable, peut être obtenue de nos jours par une exploitation technique adéquate de certaines propriétés physicochimiques des matériaux et fluides dits avancés ou smart. En effet, sous l'action énergétique des phénomènes extérieurs, tels que la lumière ou les champs électrique ou magnétique, certains fluides peuvent être rendus capables de changer d'une manière réversible de propriétés rhéologiques: viscosité, seuil ou contrainte d'écoulement,.... Ces fluides dénommés photo, électro ou magnéto rhéologiques, relativement à la nature du phénomène d'excitation, sont très efficaces pour faire fonctionner ou commander des mécanismes énergétiques et procédés techniques et industriels importants. Dans cet article, la technologie de ces fluides, ainsi que ses principales applications dans les différents domaines énergétiques et technico-industriels est passée en revue. En particulier les meilleures performances obtenues à ce jour et aussi les limitations des fluides électro et magnéto-rhéologiques (FER et FMR) sont comparées et commentées afin de mieux orienter les futurs travaux de recherche dans le domaine.

Abstract - A form of profitable, clean and renewable energy can be obtained today by using an adequate technique of exploitation of the physic-chemical properties of some advanced or smart materials and fluids. In fact, under the effect of external phenomena such as the light or the electric or magnetic fields, certain fluids can be made capable of changing in a reversible manner rheological properties: viscosity, flow constraint,.... These fluids called: photo, electro or magneto rheological, relatively to the excitation nature, are very efficient for powering or controlling many energetic mechanisms and technico-industrial processes important. In the present article, the technology of these fluids and its main applications in the different technical and industrial domains is over viewed. Particularly, the best performances achieved up to now and also the limitations of the electro and magneto rheological fluids are compared and commented to better orienting the future research work in the field.

Mots clé: Fluide dit avancé ou smart – Fluide électro-rhéologique - Fluide magnéto-rhéologique.

1. INTRODUCTION

A la différence de l'eau (fluide dit newtonien), le fluide rhéologique ne s'égoutte pas ou tombe facilement sous l'influence de la gravitation newtonienne. Il manifeste donc une résistance minimale à l'écoulement, (Fig. 1). En général, il est caractérisé par une contrainte ou seuil d'écoulement, τ_0 , supérieure à celle de l'eau.

Plus la valeur de τ_0 d'un fluide est proche de zéro, plus sa viscosité est très faible et par conséquent, elle est similaire à celle d'un liquide newtonien, A l'inverse, plus la contrainte de seuil, caractérisant le fluide est élevée, plus son état est proche de celui des plastiques rigides, dits plastiques de Bingham. (Fig. 2) [1]

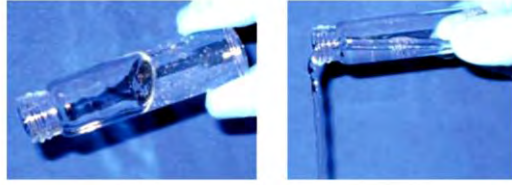


Fig. 1: Fluide rhéologique et fluide newtonien

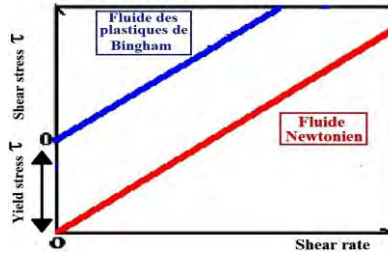


Fig. 2: limite du fluide newtonien et fluide de Bingham

Bien que les premiers brevets sur l'électro rhéologie et les fluides magnéto rhéologiques (FMR) furent déposés respectivement par W. Winslow et J. Rabinow dans les années quarante. Leurs exploitations techniques et industrielles n'ont été développées que durant les deux dernières décennies.

Les résultats obtenus sont plus qu'excellents et promettent des applications énergétiques futures importantes avec en particulier la mise en œuvre d'actionneurs d'énergie ultra rapides surtout dans les divers systèmes de la commande moderne, et seront par conséquent des interfaces électromécaniques de choix entre les systèmes mécaniques et électriques.

2. FLUIDES RHEOLOGIQUES A VISCOSITE COMMANDABLE

De part sa composition, et sous l'action par exemple d'un champ électrique ou magnétique ou encore un rayonnement lumineux d'une intensité suffisante, un fluide rhéologique peut avoir une viscosité variable (dynamique) et même commandable [1].

En général, les fluides électro et magnéto rhéologiques sont des suspensions non colloïdales, constituées à environ 40 % de leur volume global de particules, dont la taille peut varier de quelques nanomètres à plusieurs micromètres, capables de se polariser et de s'aligner en chaînes denses lorsqu'elles sont soumises respectivement à l'action d'un champ électrique ou magnétique.

Bien que la composition de ces fluides reste assez confidentielle jusqu'à ce jour, on peut dire que les particules idéales, dans le cas d'un fluide dit électro-rhéologique (FER), sont faites d'un matériau conducteur enrobé d'un isolant (métaux oxydés en surface, polymères conducteurs, cristaux liquides).

Dans le cas d'un fluide dit magnéto-rhéologique (FMR), les particules magnétiques sont en général soit de type doux (fer carbonyle, Fe_2O_3 , ...), ou de type dur (fer, cobalt) si l'on souhaite accroître l'aimantation et réduire le temps de réponse à l'action d'un champ appliqué, (Fig. 3).



Fig. 3: Fluide ER et fluide MR avec des particules en suspension

Les fluides ER et MR emploient divers liquides porteurs dont la nature et la viscosité sont adaptées à l'application visée, comme une huile artificielle ou minérale: glycol, huile de silicone,... Ces liquides porteurs sont susceptibles d'être utilisés avec éventuellement des tensio-actifs en solution où des surfactants greffés en surface des particules afin de stabiliser la suspension.

Ainsi et compte tenu de la composition du fluide, il est alors possible de pouvoir agir sur ses particules en suspension et de les orienter et même les commander à l'aide d'un champ électrique ou magnétique.

2.1 Fluide électro-rhéologique, FER

Ce type de fluide, lorsqu'il est soumis à l'action d'un champ électrique d'une intensité suffisante donnée, perpendiculaire à la direction de son mouvement, ses particules se polarisent et s'alignent en fibres le long des lignes du champ, créant une résistance à l'intérieur du fluide, d'où un changement de viscosité apparent.

Ce phénomène génère une liaison entre électrodes et augmente ainsi la viscosité de fluide, (Fig. 4).

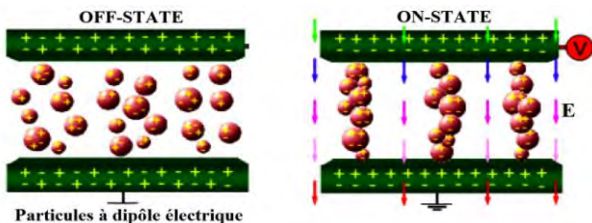


Fig. 4: Fluide avec liaison de particules à dipôle électrique

Le fluide devient rigide dans l'axe du champ, avec une contrainte d'écoulement élevée, et présente alors des propriétés visco-élastiques. Cette modification n'a pas la même intensité dans toutes les directions, c'est-à-dire, elle est anisotrope [2]. La solidification du fluide ER dans l'axe du champ électrique est rapide et quasi proportionnelle au carré de l'intensité du champ appliqué, (Fig. 5) [1].

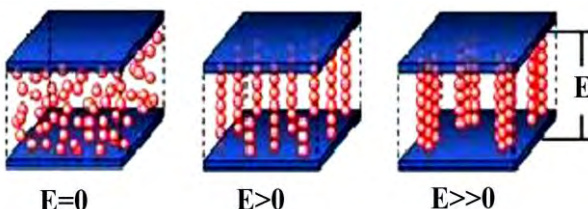


Fig. 5: Solidification du fluide dans l'axe du champ

Le phénomène est totalement réversible, c'est-à-dire le fluide regagne sa viscosité initiale, dès l'annulation du champ électrique appliqué. Perpendiculairement au champ, l'application sur le fluide ER d'une contrainte de cisaillement génère une force de rappel comme dans le cas du frottement d'un balai, et on constate là encore l'apparition d'une viscoélasticité [2].

Théoriquement, la viscosité d'un fluide ER peut varier d'un facteur de 10^5 en moins de 1 ms. Les fluides ER ont alors la possibilité de commuter entre les états, rigide et liquide, avec une vitesse très supérieure à celle obtenue à ce jour par les plus rapides valves électromécaniques employées dans les systèmes de commande [2]. C'est ce qui leur promet d'être des interfaces de choix entre systèmes mécaniques et électroniques.

2.2 Fluide magnéto-rhéologique, FMR

Comme dans le cas du fluide ER, lorsqu'on applique un champ magnétique d'une intensité suffisante à un fluide MR, les particules ferreuses (dipôles magnétiques) de ce dernier se rangent en fibres le long des lignes du champ et augmentent ainsi la viscosité de fluide.

Ce dernier devient ainsi un corps plastique rigide avec une contrainte de seuil d'écoulement très élevée qui peut atteindre 50 à 100 kPa pour des intensités de champ allant de 150 à 250 kA/m [2]. Le fluide MR a la propriété de revenir plus rapidement à sa viscosité initiale que le fluide ER si l'effet du champ appliqué cesse, (Fig. 6).

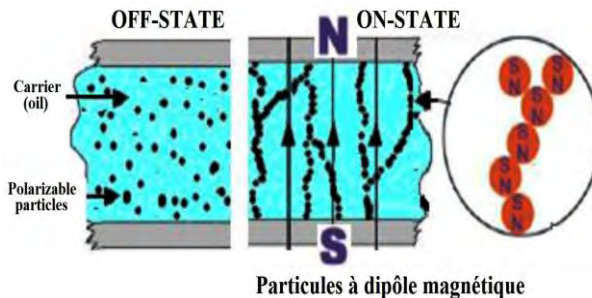


Fig. 6: Fluide avec des particules à dipôle magnétique

Par ailleurs, il est à souligner que le fluide MR est complètement différent des fluides dits magnétiques FM et ferrofluides qui sont formés en général de particules ferreuses nanométriques [3] et ne développant pas de résistance mécanique particulière sous l'action d'un champ magnétique.

2.3 Fluide photo rhéologique, FPR

Pour ce type de fluide, la viscosité peut varier avec l'intensité de la lumière. Le FPR est généralement formé à partir d'un milieu sensible au rayonnement UV, par exemple un sel ou un acide organique comme l'acide OMCA (trans-ortho-methoxycinnamic) auquel est ajouté un agent chimique actif comme le CTAB (cetyl trimethylammonium bromide) [5].

A l'état normal, le composé 'CTAB/OMCA' a la forme d'une patte de spaghettis dans une solution très visqueuse; mais lorsqu'il est soumis à l'influence d'un rayonnement UV d'une longueur d'onde inférieure à 400 nm, la valeur de sa viscosité peut chuter par un facteur allant de 10^3 à 10^4 . A la base de cette variation de la viscosité,

il y a la photo-isomérisation trans-cis, de la liaison double de l'acide OMCA, comme le montre la figure 7, [5].

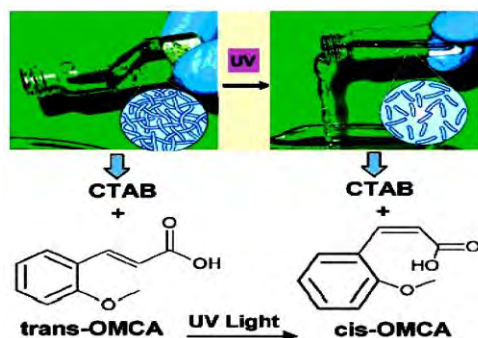


Fig. 7: Photo-isomérisation trans-cis, de la liaison double de l'acide OMCA

Bien qu'en principe les réactions de photo-isomérisation sont réversibles, c'est-à-dire la transformation (isomérisation cis-trans) est possible. Le retour de la viscosité du fluide PR à son état initial, après suppression du rayonnement UV, s'effectue lentement et très difficilement, c'est-à-dire l'isomérisation cis-trans de OMCA n'est pas simple.

C'est ce qui a limité d'une manière générale, l'utilisation et le développement des fluides PR dans les applications de la commande industrielle et énergétique.

Actuellement, les applications des fluides PR se trouvent seulement dans quelques types de micro senseurs ou micro valves opérant dans un seul sens [5]. A noter par ailleurs que la fabrication des fluides RP est très coûteuse, comparée à celle de fluides ER et MR [2].

3. MODES OPERATOIRES DES FLUIDES ER ET MR

En général, l'exploitation des fluides ER et MR peut s'effectuer selon plusieurs modes opératoires. A ce jour seulement, trois modes sont exploités [3]:

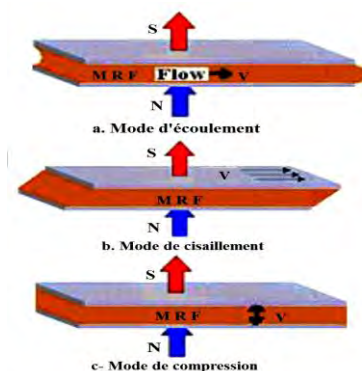


Fig. 8: Visualisation des 3 types de modes

3.1 Mode d'écoulement ou de valve, (Fig. 8a-) où l'on cherche à réguler le flux d'un écoulement perpendiculaire au champ appliqué, comme dans le cas d'une valve d'amortisseur, (Fig. 9), ou d'absorbeurs de chocs, (Fig. 10).

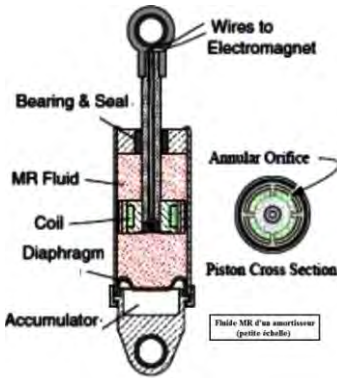


Fig. 9: Valve d'un amortisseur

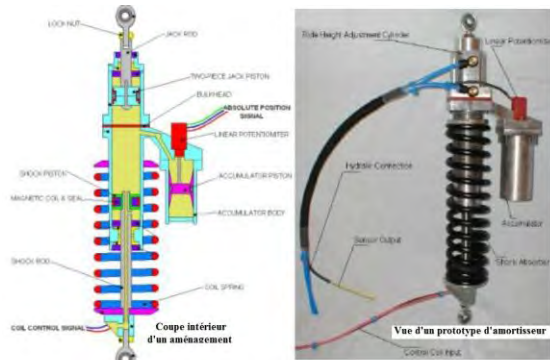


Fig. 10: Absorbeur de choc

3.2 Mode de cisaillement, (Fig. 8b-) où l'on cherche à gérer le contact ou le frottement entre deux plaques perpendiculaires au champ appliqué, comme dans le cas d'un système d'embrayage ou de freinage des véhicules, (Fig. 11, 12 et 13).

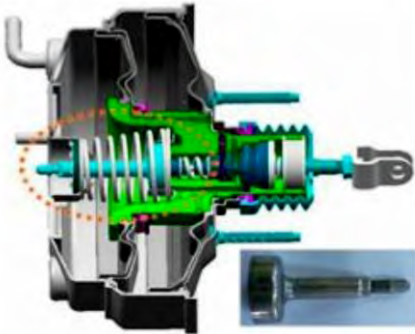


Fig. 11: Système d'embrayage

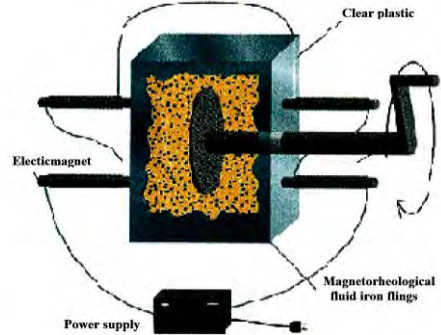


Fig. 12: Système de freinage

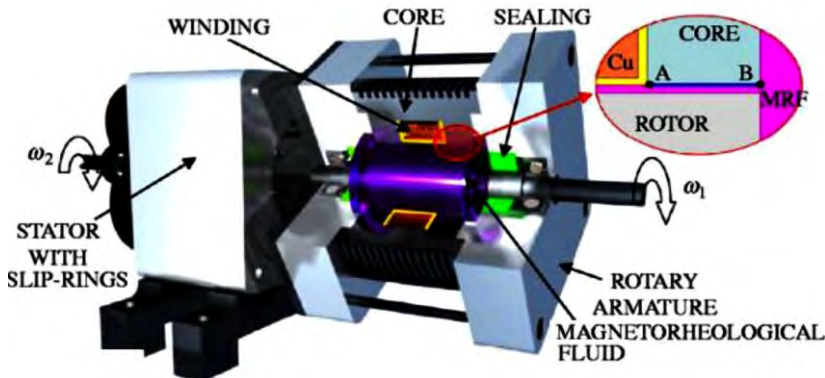


Fig. 13: Système d'embrayage

3.3 Mode de compression, (Fig. 8c-), où l'on cherche à réguler dans la direction du champ appliqué, l'écartement (en général faible) entre deux plaques parallèles vibrant à très grande vitesse sous l'effet de grandes forces, comme dans le cas des supports de

moteurs de véhicules, (Fig. 14, 15) et les systèmes d'absorption des secousses telluriques dans les constructions anti sismiques [3].



Fig. 14: Supports

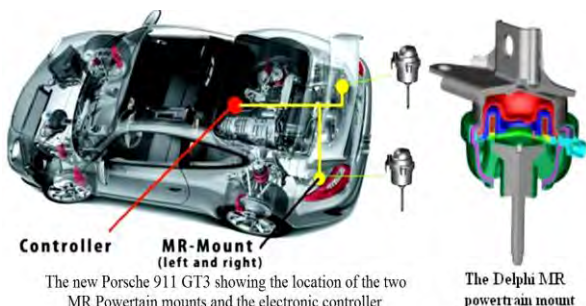


Fig. 15: Systèmes d'absorption

Il est à souligner que dans chacun des modes opératoires cités ci-dessus, le maximum de rendement n'est réalisé que seulement lorsque les lignes des champs électrique ou magnétique de commande sont parfaitement perpendiculaires à la direction d'écoulement du fluide (dans le mode de valve) et aux parois mobiles (dans les modes de cisaillement et de compression).

Ceci est dû au fait que les propriétés mécaniques des fluides ER et MR en présence des champs d'excitation, ne sont pas les mêmes dans toutes les directions [4]. Elles sont anisotropiques comme le montrent les figures 16 et 17.

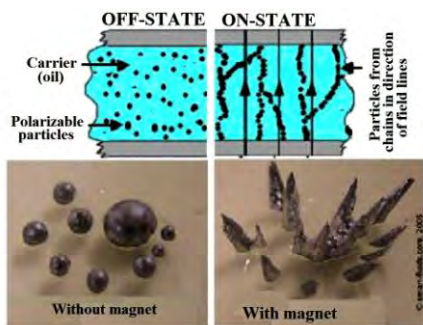


Fig. 16: Fluide Electro-Rhéologique

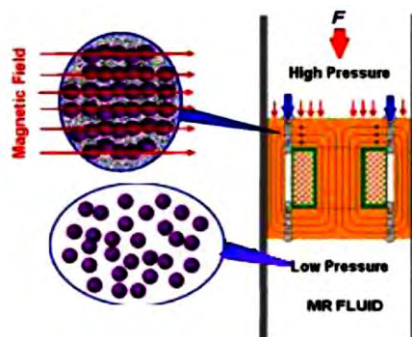


Fig. 17: Fluide Magnéto-Rhéologique

4. EXEMPLES D'APPLICATIONS ENERGETIQUES ET TECHNICO- INDUSTRIELLES DES FLUIDES ER ET MR

Les applications dans les domaines énergétiques et technico-industriels des Fluides ER et MR, selon les trois modes d'opération citées ci-dessus, sont nombreuses et variées de nos jours [2], parmi lesquelles on peut citer:

4.1 Dans le domaine de la mécanique

Le mode d'écoulement du fluide MR est appliqué ces dernières années avec un grand succès technique et commercial dans la réalisation des amortisseurs adaptatifs et intelligents de type MagneRide, (Fig. 18), par la société américaine: Delphi Corporation

(Troy, MI), sur la suspension active des voitures de luxe et de sport [2], telles que: Audi R8, Buick Lucerne, Cadillac STS Chevrolet Corvette, Ferrari 599GTB.



Fig. 18: Amortisseurs adaptatifs et intelligents

La suspension à amortissement magnéto rhéologique est une suspension pilotée. Elle est capable de faire varier, en quelques millisecondes, et en continu, la raideur de l'amortissement roue par roue, (Fig. 19)

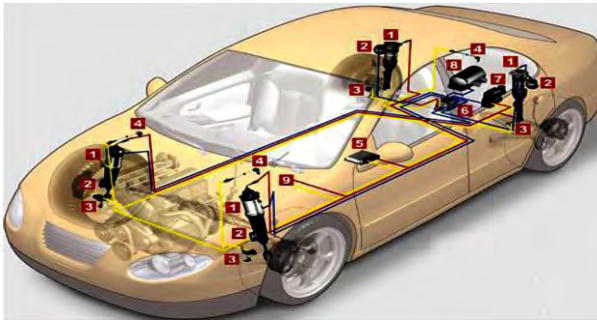


Fig. 29: Suspension à amortissement roue par roue

En fonction de l'état de la route et du style de conduite, la suspension pourra être ainsi tantôt raffermie, pour contenir les mouvements de caisse, tantôt assouplie pour préserver le confort sur chaussées dégradées.

Les nouveaux projets en cours aujourd'hui dans le domaine de la mécanique des véhicules visent l'utilisation intensive des fluides intelligents pour réduire en particulier le poids des véhicules.



Fig. 20: Systèmes dits à câbles commandables pour un véhicule à l'avenir

Ceci, par le remplacement des systèmes classiques et électromécaniques lourds avec des systèmes dits à câble commandables et légers, comme le système dit 'steer-by-wire' en remplacement du mécanisme de direction à liaisons mécaniques, ou le système 'clutch-by-wire' à la place du système classique d'embrayage, et le système 'break-by-wire' en remplacement du mécanisme lourd de freinage, etc. (Fig. 20).

Ce qui allègerait beaucoup les véhicules du futur [2] et les rendrait plus confortables et moins assujetties aux vibrations des roues et du moteur.

Les fluides contrôlables forment des interfaces de choix surtout dans les systèmes de freinage en rotation qui fournissent une résistance à l'effort. Leur flexibilité leur permet, par exemple, de définir un profil d'exercice personnalisé. Ils remplacent un système à courants de Foucault moins pratique, parce que plus volumineux et conçu pour fonctionner à plus grande vitesse", explique Gerry Estes, vice-président de Lord Corporation. En outre, le frein magnéto-rhéologique fonctionne sur une alimentation de 12 volts, ce qui facilite l'obtention de la certification électrique du dispositif.

Aujourd'hui, les freins magnéto-rhéologiques sont largement utilisés dans les produits de Nautilus, un fabricant d'équipements sportifs, qui en équipe deux machines destinées au marché des centres de 'fitness'. Ici, la capacité des fluides MR est utilisée à freiner le glissement relatif de deux pièces mécaniques en quelques millisecondes.

Les fabricants d'amortisseurs et d'absorbeurs de chocs essaient depuis longtemps de développer des suspensions semi-actives. Celles-ci utilisent en général un moteur pas à pas qui ouvre ou ferme des valves pour contrôler la résistance du fluide. Le système fonctionne, mais son temps de réponse est long. Avec un fluide contrôlable de type ER ou MR, on peut travailler presque en temps réel", affirme Gerry Estes.

Récemment, les bénéfices possibles de la technologie MR sont étendus:

- aux ceintures et coussins gonflables de sécurité. Comme les fluides MR peuvent libérer une grande énergie de façon souple et rapide, ils pourraient être utilisés par les constructeurs automobiles pour ajuster précisément la tension d'une ceinture de sécurité à la taille et au poids du passager.
- à la suspension et l'amortissement pour la charge utile de la navette spatiale.
- à la stabilisation des machines à laver avec des blocs amortisseurs magnétiques qui réduisent vibrations et glissement, et permettent d'économiser de l'énergie.

Enfin, ces smart fluides sont eux qui couleront sûrement dans les veines de nos futurs robots, affirment les spécialistes.

4.2 Dans les domaines des infrastructures anti-sismiques

L'utilisation des absorbeurs de chocs opérant avec le fluide MR a permis au Japon de réaliser avec la collaboration de la société américaine Lord Corporation, leader mondial dans le domaine, diverses infrastructures anti sismiques pouvant contrebalancer efficacement et avec une grande vitesse des forces telluriques pouvant atteindre jusqu'à 20 tonnes [3] (Fig. 21), comme dans le cas du système de suspension, qui équipe le bâtiment du Musée National Japonais des sciences émergentes, (Fig. 22).

Les absorbeurs de chocs contrôlables opérant avec le fluide MR ont été aussi utilisés avec un grand succès par la société Lord Corporation pour résoudre le problème des vibrations néfastes auxquelles, était assujetti le pont célèbre Ding Tong en Chine, (Fig. 23) [2, 3].

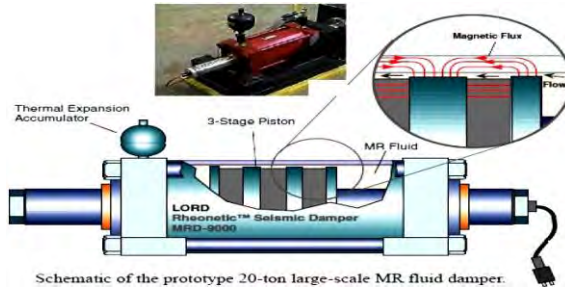


Fig. 21: Schéma d'un absorbeur de choc (suspension) de 20 t.

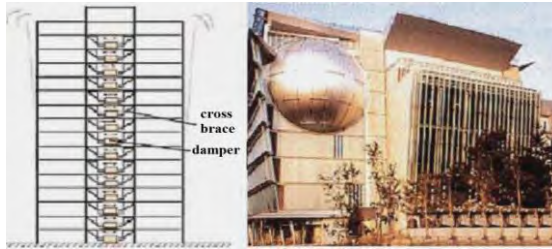


Fig. 22: Système de suspension anti-sismique



Fig. 23: Absorbeurs de chocs contrôlables

4.3 Dans le domaine médical

Plusieurs types de prothèses d'articulation de genou, fondées sur la technologie de la société Lord sont déjà disponibles chez la société Biedermann Motech.

Aussi, l'université Northeastern est arrivée à mettre au point un nouveau système léger dénommé Akrod, permettant d'asservir en temps réel, par l'emploi d'actionneur à base du fluide ER, l'articulation des jambes et des bras artificiels, (Fig. 24 et 25).



Fig. 24: Actionneur à base de fluide électro-rhéologique



Fig. 25: Actionneur pour l'articulation des jambes et des bras artificiels

4.4 Dans le domaine du polissage des cristaux et des pierres précieuses

Une machine spécialisée applique de nos jours le mode d'écoulement du fluide MR, comme outil de polissage très efficace. Ce dernier ne s'use pas comme les outils classiques, grâce à une circulation continue et asservie du fluide, entretenue par une pompe hydraulique, (Fig. 26 et 27).

Le fluide devient rigide et abrasif seulement au niveau de la pièce à polir qui doit être placée directement sous l'action d'un champ magnétique modulé en fonction de la précision à atteindre dans l'opération de polissage [2], précision qui peut être inférieure dans certains cas à 10 nanomètres d'épaisseur.

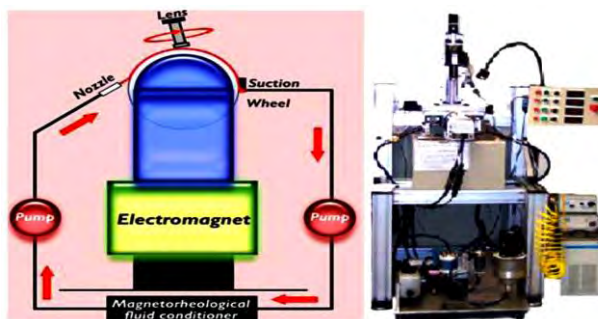


Fig. 26: Schéma d'un outil de polissage

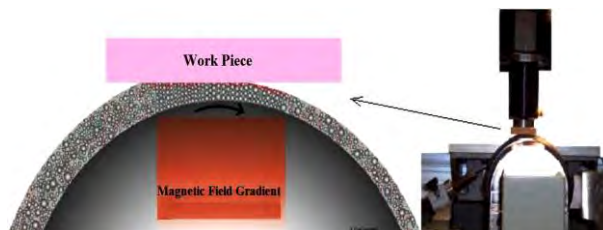


Fig. 27: Outil de polissage pour pierre précieuse

4.5 Dans le domaine du génie militaire

L'armée américaine a appliqué récemment et avec succès, dans le cadre du projet dit 'Le guerrier du futur', le mode de compression du fluide ER dans la conception d'un gilet pare-balle relativement léger qui peut se transformer à volonté ou par une percussion de balle en un corps solide impénétrable, (Fig. 28).



Fig. 28: Vue d'un gilet pare-balle



Fig. 29: Vue d'un clavier de PC

4.6 Dans le domaine de l'électronique

Plusieurs dispositifs électriques ou électroniques peuvent être rendus flexibles par intégration dans leur conception d'un fluide ER, comme dans le cas d'un clavier de PC, (Fig. 29), qui dès son alimentation en courant devient rigide et prêt à être utilisé comme par l'ordinaire.

4.7 Dans le domaine de l'espace

L'application des fluides MR a permis d'aboutir récemment à la mise au point de miroirs de télescopes magnéto liquides qui s'articulent et se déforment pour annuler l'effet néfaste de la scintillation des étoiles.

4. PERFORMANCES ET LIMITATIONS DES FER ET FMR

Il est mis en évidence par Carlson *et al.*, de la société Lord Corporation en Caroline du Nord (leader mondial dans la production des fluides contrôlables) que pour un volume de fluide plus petit, les fluides MR permettent d'obtenir des performances mécaniques supérieures à celles des fluides ER.

La meilleure performance obtenue à ce jour avec des fluides Magnéto-Rhéologique, est une résistance en cisaillement de 50 à 100 kPa sous un champ magnétique de 2000 à 3000 Oersted. Alors que leurs homologues ER n'ont atteint qu'une résistance modeste de l'ordre de 2 à 5kPa avec des tensions atteignant 4 kV.

Le fluide ER est limité par la tension de claquage du fluide porteur, alors que le fluide MR est limité par l'aimantation à saturation du système [6].

La technologie Electro-Rhéologique doit faire face à plusieurs difficultés techniques surtout qu'elle implique des tensions très élevées pour générer des champs électriques suffisants sur des épaisseurs de quelques dixièmes de millimètres, car la viscosité est quasi proportionnelle au carré du champ appliqué.

Pour éviter la détérioration du fluide rhéologique par électrolyse du fluide porteur et de ses additifs, les électrodes qui génèrent le champ électrique doivent être recouvertes d'un isolant sur leur face interne. Aussi, pour contrecarrer les courts-circuits qui peuvent annuler la polarisation, les particules doivent être aussi isolantes sur leur partie extérieure.

L'effet de pointe qui peut se produire à l'extrémité des particules limite la tension utilisable dans ces dispositifs par claquage du fluide porteur. Cet effet est d'autant plus néfaste que les particules sont petites, que l'épaisseur de l'isolant est importante et leurs qualités diélectriques élevées. Aussi, il peut y avoir dégradation de l'isolant des particules lors d'un fonctionnement sous fort cisaillement.

Une autre difficulté dans ces fluides est la stabilité (sédimentation, stabilité thermique, aggrégation des particules...).

La technologie ER présente aussi plusieurs faiblesses secondaires: sensibilité en température, mauvaise réaction à diverses impuretés (dont l'eau...) et absence d'une gamme suffisamment complète d'alimentations haute tension à bas prix.

Toutes ces limitations physiques rendent la maîtrise de la technologie ER complexe et font encore l'objet d'intenses travaux de recherche depuis le milieu des années 1990. Travaux qui ont abouti en 1995 à une solution prometteuse impliquant un effet électro rhéologique dit géant, proposé par Ping Sheng, professeur à l'UST de Hong Kong.

Toutefois, la technologie des fluides magnéto-rhéologiques reste encore plus prometteuse et suscite depuis quelques années un regain d'intérêt. Les avantages des fluides MR par rapport aux fluides ER peuvent être résumés comme suit [6]:

1) Absence des effets néfastes provoqués par la présence d'un champ électrique:

- pas de réactions de dégradation de nature électrochimique,
- pas d'échauffement par effet Joule,
- limitation de l'effet néfaste des contaminants,
- pas de risque d'écrantage du champ,
- pas de risque de claquage du liquide porteur.

2) Sensibilité à la température réduite, dépendant uniquement du fluide porteur.

3) Performances mécaniques sensiblement supérieures à énergie électrique égale.

Les fluides Magnéto-Rhéologique seraient en principe opérationnels dans la gamme de températures $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Bien que la technologie magnéto-rhéologique (MR) ne nécessite pas des tensions de commande élevées et ne redoute pas les problèmes de claquage, car les particules sont magnétiques (fer, acier,...) et il ne peut pas y avoir de courants susceptibles de passer entre elles, elle n'est pas sans limitations. La physique des particules employées et surtout les propriétés magnétiques des poudres qui dépendent des phénomènes de saturation magnétique, de l'existence de champs démagnétisant à leur surface, et de l'hystérésis dépendant de la grosseur des particules, ne sont pas aussi bien maîtrisées à ce jour et font encore l'objet d'intenses travaux de recherche.

En effet, la nature des particules employées par les fluides MR est un vrai problème.

D'un côté, il y a les produits de type ferromagnétique (acier, métaux ferromagnétiques, tel le cobalt, les alliages de métaux magnétiques,...) qui conservent une aimantation rémanente lors de l'arrêt du champ magnétique, les particules ont tendance à s'agglomérer sans champ.

D'un autre côté, les matériaux à faible aimantation rémanente, tels les paramagnétiques, les ferromagnétiques à faible hystérésis ou encore les ferrites d'une aimantation plus faible, qui perdent leur aimantation lorsqu'on arrête le champ, mais qui ont aussi une polarisation moindre.

A noter que les meilleures particules conçues de nos jours pour le fluide MR sont celles fabriquées à partir d'un composé de fer et de cobalt dont la puissance de la saturation de magnétisation a atteint 2.4 tesla. Cependant, la réalisation de ce composé est très onéreuse par rapport au coût des applications demandées aujourd'hui dans l'industrie. Et de ce fait, les particules en fer de carbonyle restent pratiquement les mieux convenables, avec une puissance de la saturation de magnétisation égale à 2.2 tesla.

De part leur nature, les particules ferreuses ont un poids non négligeable, et avec le temps et l'utilisation ont tendance à se décanter et rendent le fluide moins efficace. Ce qui nécessite inévitablement son contrôle périodique et sa rénovation de temps à autre dans les dispositifs qui les utilisent [2].

Pour réduire la tendance à la décantation chez les particules ferreuses, les fabricants recourent souvent à la technique du revêtement de la particule d'une matière isolante, légère et tensioactive (**surfactant**) qui permet à la particule de mieux rester en suspension sans perdre ses propriétés magnétiques.

Parmi, les surfactants les plus utilisés aujourd'hui on trouve [2]: Acide oléique, tetra methyl ammonium hydroxyde, acide citrique, lécithine de soya.

Le diamètre des particules (dipôles magnétiques) qui sont les plus convenables d'un point de vue technique et économique, est typiquement de l'ordre de 3 à 5 μm . Les particules de diamètre inférieur suspendent mieux et offrent des fluides MR plus stables. Elles sont réalisées surtout à partir d'oxydes, mais leur fabrication est très compliquée et coûteuse. Leur inconvénient technique majeure reste leur relative faible force à supporter les pressions qui dépassent 5 kPa. Malgré cela, la puissance d'un fluide MR est souvent 20 à 50 fois supérieure à celle d'un fluide ER, du fait que le premier est formé à la base de particules ou dipôles magnétiques [4].

De nos jours, les trois types de fluides MR qui sont les mieux appréciés technologiquement et commercialisés par la société américaine Lord Corporation, sont fabriqués à base de particules de fer de carbonyle, dont les principales propriétés physiques sont énumérées dans le **Tableau 1** suivant:

Tableau 1: Propriétés de trois différents types de fluides magnéto-rhéologique (Rheonetic™ MR Fluid specification courtesy of the lord corporation)
<http://www.mrfluid.com>

Fluide MR	MRF-132LD	MRF-240BS	MRF-336AG
Fluide de base	Huile synthétique	Eau	Huile de silicone
Température opératoire (°C)	-40 - 150	0 - 70	-40 - 150
Densité (g/cc)	3.055	3.8.18	3.446
% Poids solides	80.74 %	83.54 %	82.02 %
Coefficient d'expansion thermique (Vol, l/°C)	$0.55 - 0.67 \times 10^{-3}$	0.223×10^{-3}	0.58×10^{-3}
Chaleur spécifique -25°C (J/g°C)	0.80	0.98	0.68
Conductivité Thermique (W/m°C)	0.25 - 1.06	0.83 - 3.68	0.20 - 1.88
Point flash (°C)	> 150	> 93	> 200
Viscosité @ 10s ⁻¹ /50 s ⁻¹ (Pa.s)	0.94 / 0.33	13.6 / 5.0	8.5

La mise en œuvre des fluides rhéologiques intelligents repose sur deux éléments: leur formulation, bien sûr, mais aussi l'optimisation des dispositifs qui les utilisent.

Une large gamme de fluides magnéto-rhéologiques est utilisable, comme ceux du Tableau 1, mais ces fluides doivent être adaptés à chaque application: température, résistance, corrosion... Quant aux dispositifs, ils doivent être construits de manière à appliquer un champ magnétique dans une zone produisant un effet optimal. C'est surtout cette limitation dans les FMR qui laisse encore aujourd'hui la porte entrouverte pour l'exploitation des FER, déclare Deroin.

Ainsi, et quoique le fluide magnéto-rhéologique est le plus répandu de nos jours surtout dans l'industrie, de part ses caractéristiques physiques et économiques prouvées, plusieurs spécialistes dans le domaine, comme le Prof. C. Mavroidis, de State University of New Jersey, considèrent que la technologie électro-rhéologique présente aussi un intérêt futur certain surtout avec la découverte de l'effet électro rhéologique géant.

Ce dernier est produit dans un fluide ER qui est formé à partir de nanoparticules de baryum et de titane de 50 à 70 nanomètres de diamètre recouvertes d'un film d'urée de 3 à 10 nanomètres d'épaisseur et mises en suspension dans de l'huile de silicone. Non seulement ce nouveau fluide semble faire mieux que ses aînés, avec une résistance élastique apparente de 130 kPa, mais il en brise la limite théorique et dépasse même les fluides MR, selon le Prof. Ping Sheng.

En pratique, la technologie ER présente une physique et des contraintes d'utilisation assez différentes de celles du fluide MR et convient mieux dans certaines applications techniques comme interface ou actionneur pour les systèmes de commande où l'espace de manœuvre est restreint et où les forces ou pressions élevées ne sont pas impliquées, comme par exemple dans le cas de la commande des bras manipulateurs de robots, (Fig. 30).

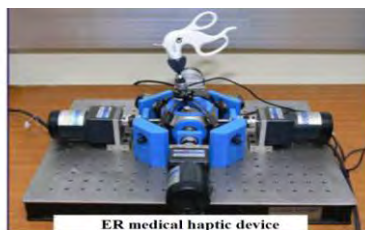


Fig. 30: Commande des bras manipulateurs de robots

Dans ce genre d'application, les aimants massifs de commande, nécessaires au fluide MR ne trouvent pas de place et sont non justifiables surtout que la circuiterie de commande du fluide ER ne demande que des électrodes ordinaires simples [2].

Pour les fluides ER commercialisés, la contrainte seuil d'écoulement qui délimite la transition entre l'état liquide et l'état solide du fluide n'est pas assez élevée, seulement de quelques kPa, pour envisager des applications réelles industrielles. Les dispositifs ER sont tout à fait indiqués pour réaliser des couplages mécaniques contrôlés.

En réalité, le choix entre la technologie ER ou MR dépend des besoins. Si les deux types de fluides progressent à grands pas, les spécialistes pensent que le choix pourrait devenir difficile. Néanmoins, chaque fluide possède ses qualités propres. "Quand on a besoin d'une action mécanique, pour contrôler une force, les FMR sont meilleurs, indique Gerry Estes, vice-président de Lord Corporation. Mais, dans certains cas, la géométrie du système interdit de concevoir un enroulement magnétique produisant un champ satisfaisant. Un circuit électrique pourrait alors être plus facile à réaliser." En

outre, les FMR conviennent bien à des systèmes où le contrôle s'effectue sur une zone limitée et où peut être appliqué un champ magnétique. Mais si l'application requiert un contrôle sur une zone plus étendue, les FER pourraient être mieux adaptés. "Usine Nouvelle, N°2529".

Enfin, nous avons estimé utile de conclure le présent exposé sur les fluides rhéologiques intelligents par un Tableau de comparaison entre leurs principales caractéristiques physiques [2], (**Tableau 2**), tout en soulignant que d'une manière générale les fluides intelligents qui sont à la fois de bonne qualité et économiques font encore l'objet d'intenses travaux de recherche dans les universités et surtout les laboratoires d'avant garde des pays industriels développés.

Tableau 2: Principales caractéristiques physiques sur les fluides intelligents

Propriétés	Fluides MR	Fluides ER
Rendement maximum du stress	50 – 100 kPa	2 – 5 kPa
Champ maximal	~ 250 kA/m	~ 4 kV/mm
Viscosité apparente de la matière plastique	0.1 – 10 Pa.s	0.1 – 10 Pa.s
Plage de température utilisable	- 40 – 150 °C	+ 40 – 90 °C
Stabilité	Insensible à la plupart des impuretés	Ne peut tolérer les impuretés
Densité	3-4 g/cm ³	1-2 g/cm ³
η / τ_0^2	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻¹⁰ s/Pa	10 ⁻⁸ – 10 ⁻⁷ s/Pa
Densité maximale d'énergie	0.1 J/cm ³	0.001 J/cm ³
Source de courant (typique)	2-50 V, 1-2 A	2000-5000 V, 1-10 mA

REFERENCES

- [1] Scientific Report, P. Grad, '*Against the Flow, Technical Articles of the Institution of Engineering and Technology*', Office Savoy Place, London, 2007, WC2R 0BL, Registration Number 909719.
- [2] Scientific Report, '*Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions*', In the Proceedings of the 12th International Conference, held in Philadelphia, USA, August 16-20, 2010. Published in 2011 by R. Tao, World Scientific Publishing Co.
- [3] G. Yang, '*Large-Scale Magneto Rheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control*', PhD Thesis, Dissertation, University of Notre Dame, Indiana, USA, 2001.
- [4] J.M. Se and J. Huang, '*Magnetorheological Fluids and their Properties*', International Journal of Modern Physics B, Vol.19, N°1-3, pp. 593 – 596, 2005.
- [5] P.W. Elder, Raghavan, A.M. Rakesh Kumar and Ketner, T.S. Davies, '*A simple Class of Photorheological Fluids: Surfactant Solutions with Viscosity Tunable by Light*', Journal of the American Chemical Society, Vol. 129, N°6, pp. 1553 – 1559, 2007.
- [6] A. Minier, '*Fluides Electrorhéologiques, Magnétorhéologiques, Ferrofluides*', Agence Rhône-Alpes pour la Maîtrise des Matériaux, 12/12/1995.