



**HAL**  
open science

## Ferrofluide -Partie A : définition, histoire, propriétés magnétiques et applications

Jonathan Piard, Emmanuelle Deleporte, Clément Guibert

► **To cite this version:**

Jonathan Piard, Emmanuelle Deleporte, Clément Guibert. Ferrofluide -Partie A : définition, histoire, propriétés magnétiques et applications. Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, 2021. hal-03929607

**HAL Id: hal-03929607**

**<https://hal.science/hal-03929607v1>**

Submitted on 26 Apr 2023

**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.

# Ferrofluide – Partie A : définition, histoire, propriétés magnétiques et applications

*Cachan : mercredi 20 mai 2020*

par **Jonathan PIARD**,  
Département de Chimie, ENS Paris-Saclay,  
4, avenue des Sciences  
91190 Gif-sur-Yvette  
[jonathan.piard@ens-paris-saclay.fr](mailto:jonathan.piard@ens-paris-saclay.fr)

**Emmanuelle DELEPORTE**  
Département de Physique, ENS Paris-Saclay,  
4, avenue des Sciences  
91190 Gif-sur-Yvette  
[emmanuelle.deleporte@ens-paris-saclay.fr](mailto:emmanuelle.deleporte@ens-paris-saclay.fr)

et **Clément GUIBERT**  
Laboratoire de Réactivité de Surface, Sorbonne Université, CNRS  
4, Place Jussieu – boîte courrier 178 - 75252 Paris Cedex 05  
[clement.guibert@sorbonne-universite.fr](mailto:clement.guibert@sorbonne-universite.fr)

*Après une brève introduction sur les colloïdes et les nanoparticules, une définition des ferrofluides est donnée ainsi qu'un bref historique de leur découverte. Par la suite, les propriétés superparamagnétiques de ces objets sont expliquées ainsi que l'observation d'instabilités de pics lorsque les ferrofluides sont placés dans le champ d'un aimant. Finalement, des applications des ferrofluides en recherche ou dans notre quotidien sont mentionnées.*

## 1. LES COLLOÏDES ET LES NANOPARTICULES

Les ferrofluides sont des liquides magnétiques obtenus grâce à la dispersion de nanoparticules magnétiques dans un milieu continu liquide.

Un **système dispersé** est un système dans lequel au moins deux phases sont en coexistence. La phase dispersée (milieu discontinu) est en suspension dans une phase dispersante (milieu continu). Il existe plusieurs types de systèmes dispersés selon la nature (solide, liquide ou gaz) des phases dispersante et dispersée. Ces différents types sont décrits dans le Tableau 1.

Milieu / Phase		Phase dispersée		
		Gaz	Liquide	Solide
Phase dispersante	Gaz	<b>Aucun</b> Les Gaz sont miscibles	<b>Aérosol liquide</b>	<b>Aérosol solide</b>
	Liquide	<b>Mousse liquide</b>	<b>Emulsion</b>	<b>Suspension Solide ou Sol</b>
	Solide	<b>Mousse solide</b>	<b>Gel</b>	<b>Suspension Solide ou Sol solide</b>

**Tableau 1** - Tableau récapitulatif des différents types de systèmes dispersés.

Lorsque les particules de phase dispersée sont comprises entre 1 nm et 1  $\mu\text{m}$ , on parle alors de colloïde ou système colloïdal. Dans ce dernier cas, à l'échelle macroscopique, on ne distingue qu'une phase unique ce qui n'est pas forcément le cas pour les systèmes dispersés. On définit également un nanomatériau comme un maté dont au moins une dimension externe est comprise entre 1 et 100 nm

(nano-objet) ou qui possède une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique (matériau nanostructuré). Parmi les nano-objets, on peut distinguer les **nanoparticules pour lesquels les trois dimensions sont inférieures à 100 nm**. Ces nano-objets se situent donc au confluent des échelles macroscopique (matériaux massifs) et moléculaire (ou atomique). Les nanofibres<sup>1</sup> et nanoplaques<sup>2</sup> sont par ailleurs des matériaux pour lesquels respectivement deux dimensions et une dimension sont inférieures à 100 nm [1].

Remarque :

Pour la commission européenne, un **nanomatériau** est un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm. Cette recommandation indique également, que tout matériau est à considérer comme relevant de la définition mentionnée ci-dessus dès lors qu'il présente une surface spécifique en volume supérieure à 60 m<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> [1].

## 2. DÉFINITION ET HISTOIRE DES FERROFLUIDES [2]

### 2.1 Définition

Un **ferrofluide** ou liquide magnétique est une **suspension de particules ferromagnétiques ou ferrimagnétiques** [3] de taille nanométrique (inférieure au micron) dispersée dans un solvant aussi appelé liquide porteur. La suspension est donc dite colloïdale. Pour que la suspension soit un ferrofluide, il est de plus nécessaire qu'elle **interagisse plus ou moins fortement avec un champ magnétique, tout en conservant sa stabilité colloïdale** si le champ n'est pas trop intense<sup>3</sup>. On parle de ferrofluide organique, aqueux lorsque le liquide porteur est respectivement solvant organique (octane, huile de silicone...) et l'eau. Les ferrofluides ne sont pas présents dans la nature et sont donc des objets de synthèse. Les particules magnétiques sont le plus souvent constituées d'oxydes magnétiques tel que la magnétite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, les ferrites MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (avec M un cation divalent : M = Co<sup>II</sup>, Mn<sup>II</sup>...), ou la maghémite  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Pour stabiliser les nanoparticules magnétiques, on peut également ajouter un tensioactif – surfactant en anglais – [4] (acide oléique en milieu organique ou aqueux par exemple) : on parle de ferrofluides surfactés. Pour des concentrations importantes de tensioactifs, ceux-ci peuvent s'organiser sous forme de bicouche hydrophile. Une autre méthode consiste à charger la surface des particules pour conduire à une répulsion électrostatique entre elles : on parle de ferrofluides chargés ou ioniques.

Remarque :

Des ferrofluides à base de particules métalliques (Ni, Co, Fe au degré d'oxydation 0) peuvent également être synthétisés. Ceux-ci possèdent généralement une aimantation plus forte mais ont l'inconvénient majeur de s'oxyder rapidement ce qui entraîne une altération importante du matériau et la diminution voire la perte totale de cette aimantation.

### 2.2 Historique [5]

La première synthèse de ferrofluide peut être datée de 1779 et attribuée à G. Knight (et rapportée par E.G. Wilson) car celui-ci prépara en son temps un fluide constitué de fines particules de fer en suspension dans l'eau. Toutefois, ce fluide n'était certainement pas à proprement parler un ferrofluide dans la mesure où les particules ne possédaient pas une taille nanométrique. Il faut attendre la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle et les travaux datés de 1963 de S. Papell (chimiste de la NASA<sup>4</sup>) dont l'objectif

---

<sup>1</sup> On distingue dans les nanofibres les nanotubes (nanofibres creuses), les nanotiges (nanofibres pleines) et les nanofils (nanofibres conductrices ou semi-conductrices).

<sup>2</sup> On distingue dans les nanoplaques les nanofeuillets, les nanocouches et les nanorevêtements.

<sup>2</sup>

<sup>3</sup> Pour des intensités de champ très élevées les ferrofluides peuvent être déstabilisés de manière irréversible.

<sup>4</sup> NASA : National Aeronautics and Space Administration.

était de fabriquer un propergol liquide (terme astronautique désignant le produit de propulsion) qui puisse être maintenu au fond de son réservoir par une autre force que la gravité en l'absence de cette dernière (Figure 1). En effet, à cette époque, la plupart des fusées étaient propulsées par des propergols solides dont la combustion est difficilement contrôlable. Pour obtenir ce tout premier ferrofluide, il broya pendant 10 mois un mélange constitué de poudre de magnétite  $Fe_3O_4$  et de kérosène (mélange d'hydrocarbures contenant des alcanes allant de  $C_{10}H_{22}$  à  $C_{14}H_{30}$  jouant le rôle de liquide porteur) en présence d'acide oléique dans le but d'obtenir des nanoparticules. Finalement, bien que ses recherches aient abouti, l'application des ferrofluides comme propergol liquide n'a jamais été mise en œuvre par la NASA. Toutefois en créant le premier ferrofluide stable et durable S. Papell ouvrit la porte à d'autres recherches et le développement des fluides magnétiques.

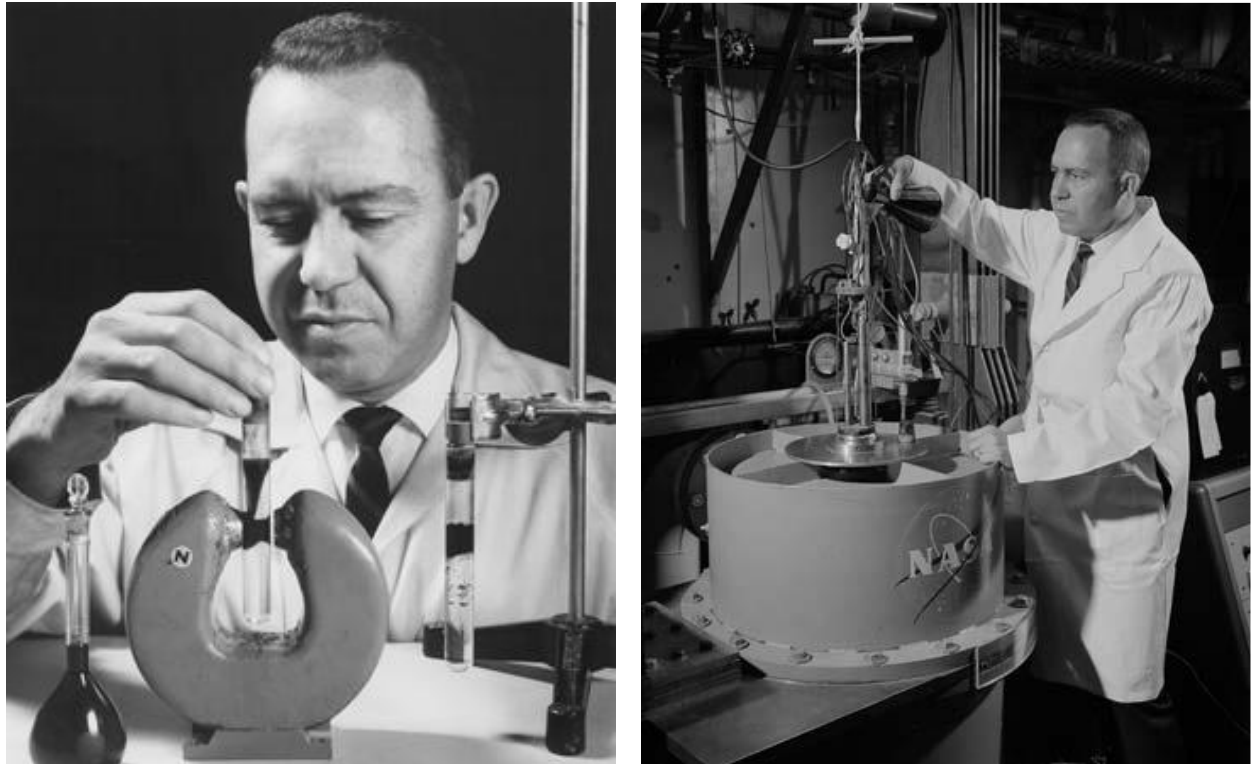


Figure 1 - S. Papell développant un ferrofluide pour la NASA en 1963 [5].

### 3. PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES FERROFLUIDES

#### 3.1 Superparamagnétisme

Le phénomène de **superparamagnétisme** est un comportement magnétique observé pour des matériaux ferromagnétiques ou ferrimagnétiques lorsque ceux-ci sont composés d'un ensemble de nanoparticules. Le superparamagnétisme apparaît pour une température inférieure à la température de Curie de ces matériaux. La taille des particules est un paramètre clé dans l'obtention d'un comportement superparamagnétique. En effet, si la taille des nanoparticules est très inférieure à l'épaisseur d'une paroi de Bloch, donc de l'ordre de la dizaine voire la centaine de nanomètres selon le matériau, chaque particule peut alors être vue comme un monodomaine possédant une aimantation à saturation. L'aimantation de chaque nanoparticule peut être considérée comme un moment magnétique « géant »  $\vec{\mu}_G$ , somme de tous les moments magnétiques portés par les atomes qui constituent la nanoparticule.

Au sein de la dispersion, les nanoparticules présentent un mouvement aléatoire lié à l'agitation brownienne et, en l'absence de champ magnétique appliqué, le moment magnétique géant qu'elles portent change ainsi d'orientation à chaque mouvement de rotation des particules sur elles-mêmes. Les moments magnétiques géants sont donc orientés aléatoirement et la suspension ne présente pas d'aimantation spontanée. Mais sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, les moments magnétiques géants portés

par les nanoparticules peuvent s'orienter extrêmement facilement, l'aimantation augmente donc avec le champ magnétique. Le modèle qui décrit cette augmentation de l'aimantation en fonction du champ magnétique est le paramagnétisme de Langevin. L'orientation dans l'espace des moments magnétiques géants  $\vec{\mu}_G$  étant un paramètre continu, la valeur moyenne des moments magnétiques géants est :

$$\langle \vec{\mu}_G \rangle = \frac{\int \vec{\mu}_G e^{\vec{\mu}_G \cdot \vec{B} / k_B T} d\Omega}{\int e^{\vec{\mu}_G \cdot \vec{B} / k_B T} d\Omega}$$

où  $d\Omega$  est un élément d'angle solide, l'intégration est faite sur toutes les orientations possibles pour  $\vec{\mu}_G$ .

Si  $n$  est la densité de moments magnétiques géants dans la suspension et pour un champ magnétique  $\vec{B}$  suivant l'axe Oz, l'aimantation par unité de volume sera alors :

$$M_z = nm_G L\left(\frac{m_G B}{k_B T}\right) \text{ avec } L \text{ la fonction de Langevin : } L(x) = \coth(x) - \frac{1}{x}$$

Le moment magnétique géant  $\mu_G$  étant beaucoup plus grand que le moment magnétique porté par un atome seul, les valeurs de susceptibilité  $\chi$  d'un corps superparamagnétique sont comprises entre 1 et 5 [6]. Elles sont donc plus grandes que celles d'un solide paramagnétique (par ex.  $3 \cdot 10^{-4}$  pour le Pt) d'où le terme de superparamagnétisme. Toutefois ces valeurs restent inférieures à celles des composés ferromagnétiques ou ferrimagnétiques (par ex. 200 pour Fe). À cause de l'absence de parois de Bloch, aucun phénomène d'hystérésis statique ni d'aimantation rémanente ne sont observés. En effet, contrairement aux solides, les processus de blocage des domaines de Weiss n'existent pas ici et le renversement de l'aimantation est un processus réversible. La courbe d'aimantation de suspensions superparamagnétiques en fonction de  $H$  est donnée sur la Figure 2 et comparée à celle de corps paramagnétique et ferromagnétique (ref au BUP sur le magnétisme).

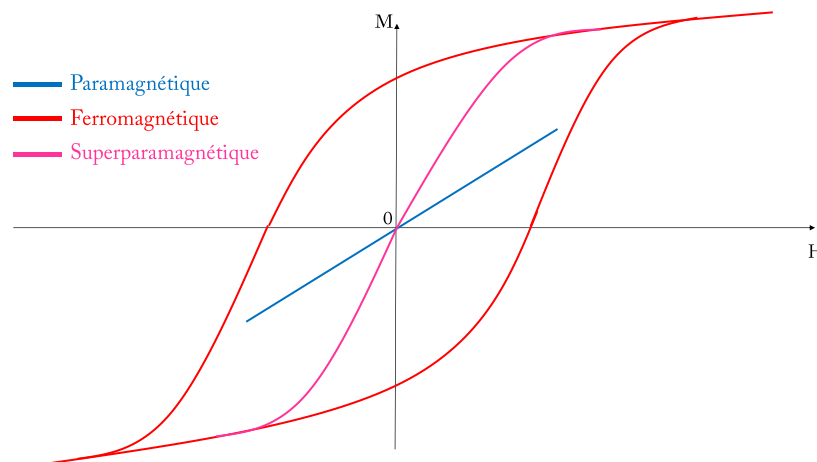


Figure 2 - Courbes d'aimantation pour des corps paramagnétique, ferromagnétique et superparamagnétique.

### 3.2 Instabilités magnétiques

Si l'on approche un aimant de grande aimantation (on a utilisé ici un aimant caractérisé par un champ magnétique de 1,3 T et une force d'adhérence d'environ 1,4 kN) à proximité du ferrofluide, on note l'obtention d'instabilités magnétiques de pics (Figure 3) : l'interface du ferrofluide se couvre de pics liquides.

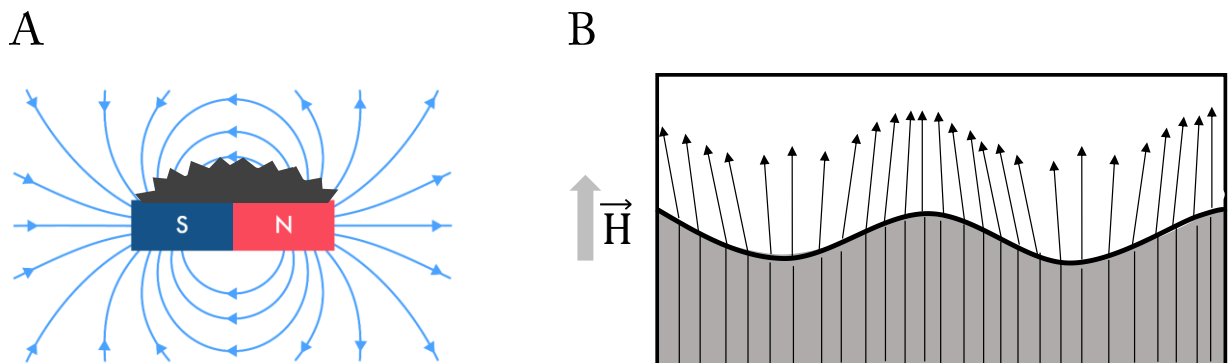


**Figure 3** - Instabilités magnétiques de pics lors de l'approche d'un aimant dans le cas du ferrofluide organique surfacté préparé dans la partie B de cet article.

Ce phénomène s'explique ici par un comportement de fluide magnétique des ferrofluides obtenus *via* des synthèses proposées dans la partie B de cet article. En effet, lorsque le ferrofluide est plongé dans un champ magnétique non uniforme  $\vec{B}$ , les moments magnétiques géants  $\vec{\mu}_G$  subissent une force

$$\vec{F}_{mag} = (\vec{\mu}_G \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} \text{ avec } \vec{\nabla} = \left( \frac{d}{dx}, \frac{d}{dy}, \frac{d}{dz} \right)$$

La forme de pic observée peut s'expliquer par la compétition entre les forces magnétiques d'une part et les forces de gravité et la tension superficielle présente à la surface des ferrofluides d'autres parts. Si l'amplitude du champ magnétique est suffisante (supérieure à une valeur seuil  $H_{seuil}$ ), les forces magnétiques deviennent prépondérantes. Ainsi, tandis que le liquide magnétique cherche à suivre les lignes du champ magnétique générées par l'aimant (Figure 4A), les forces de gravité et de tension superficielle limitent la distance à laquelle ces nanoparticules peuvent s'éloigner de la surface. De plus, lors de l'application d'un champ magnétique perpendiculaire à la surface, les conditions de passage de celui-ci à l'interface liquide – air conduisent à un resserrement et un écartement des lignes de champs respectivement au niveau des crêtes et des creux (Figure 4B) et l'observation de pics. Le comportement superparamagnétique des ferrofluides conduit à la formation de pics si : 1.  $H_{seuil}$  est assez faible, 2. la réponse au champ magnétique externe est assez forte et 3. les ferrofluides sont liquides (fluides).



**Figure 4**- Explication de l'instabilité de pics pour les ferrofluides.

Remarque :

Ces instabilités peuvent également être observées pour des liquides magnétiques qui ne sont pas des ferrofluides mais présentant une susceptibilité magnétique importante et une tension de surface faible.

## 4. APPLICATIONS DES FERROFLUIDES

Bien que les ferrofluides soient des nanomatériaux découverts assez récemment, ils s'avèrent utiles pour de nombreuses applications assez pointues dans divers domaines (souvent très éloignés de leur application originelle détaillée au paragraphe 2.2) tels que les biotechnologies, la médecine, l'automobile ou encore la mécanique voire l'art.

### 4.1 Objets du quotidien

Ils sont ainsi présents dans quelques objets de notre vie quotidienne comme les enceintes audio de haute qualité ou encore les disques durs de nos ordinateurs. Dans les enceintes classiques, l'air autour de la bobine des **haut-parleurs** évacue très mal la chaleur ce qui engendre une surchauffe et altère le son délivré. En remplaçant l'air par des ferrofluides de grande conduction thermique, un système sans surchauffe est créé permettant d'améliorer le transfert thermique et la qualité du son. Dans les **disques durs**, les ferrofluides sont mis à profit pour assurer la lubrification et l'étanchéité entre le rotor (bobine) et le stator (aimant). Ils empêchent notamment les poussières de pénétrer dans l'interstice. Les ferrofluides sont également utilisés dans le domaine de l'**imprimerie** dans les toners d'imprimante et intégrés à certains billets de banque comme celui de 1 US \$, pour les protéger de la contrefaçon. Dans l'**industrie automobile**, les ferrofluides sont à la base d'une toute nouvelle technologie d'amortisseurs développée par la marque Audi® : le système Magnetic Ride. Ce système permet d'ajuster en quelques fractions de secondes la rigidité des **amortisseurs** en fonction de la situation de conduite. Des ferrofluides sont ainsi intégrés aux amortisseurs qui, *via* l'application d'un champ magnétique dans la direction opposée à celle de l'amortisseur, permettent de contrôler la viscosité : l'augmentation de viscosité va de pair avec l'augmentation de l'intensité du champ. Un processeur calcule ensuite la force d'amortissement optimale en fonction de la conduite en temps réel et transfère ces données ce qui permet une régulation automatique des propriétés de raideur des amortisseurs [7]. Des **amortisseurs antisismiques** s'appuyant sur le même principe peuvent être intégrés dans la structure de certains bâtiments pour permettre de dissiper les ondes sismiques qu'ils subissent.

### 4.2 Biotechnologie

Les ferrofluides peuvent être utilisés dans la **bioséparation** qui est une méthode permettant la récupération et la purification de protéines ainsi que la séparation de cellules. Ainsi, on introduit des nanosphères d'oxyde ferreux ( $Fe^{II}$ ) à une substance biologique telle que l'ADN ou les anticorps. L'exposition des cellules à un champ magnétique déclenche alors le processus de séparation : les cellules liées sont attirées par le champ magnétique et les cellules sélectionnées peuvent être extraites.

### 4.3 Médecine

En médecine, les ferrofluides sont utilisés comme **agents de contraste<sup>5</sup> en IRM** (Imagerie par Résonance Magnétique...Nucléaire) pour permettre la détection de tumeurs ou dans le **traitement des ulcères** (plaies de la peau, des yeux ou d'une muqueuse, accompagnée d'une désintégration du tissu [8]) **et des fistules** (formation anormale d'une connexion entre deux organes internes). En effet, dans ce dernier cas, un ferrofluide est amené grâce un aimant permanent fixé à l'extérieur de l'endroit à traiter - la plaie ou le canal formé - pour le colmater.

Les ferrofluides sont également étudiés comme **traitements contre le cancer**. En effet, il a été montré que des nanoparticules d'oxyde de fer peuvent s'accumuler au niveau des tumeurs et dissiper de la

---

<sup>5</sup> Les agents de contraste IRM sont des particules, des molécules ou des composés de coordination ayant pour effet d'améliorer la qualité des diagnostics en accentuant les contrastes de certaines régions difficilement visualisables, par exaltation locale du champ magnétique.

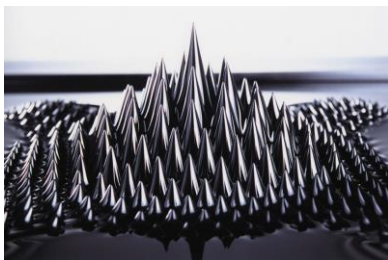
chaleur sous l'action d'un champ magnétique, provoquant ainsi l'affaiblissement puis la mort des cellules tumorales à proximité. C'est le principe de l'**hyperthermie magnétique** [9, 10]. L'application d'un champ magnétique alternatif radiofréquence entraîne la rotation physique des nanoparticules ou du moment magnétique de celles-ci (afin de s'aligner avec le champ) ce qui engendre localement des frictions (internes ou externes aux particules), provoquant un échauffement du milieu. Une élévation de la température au niveau local conduit alors à différentes réactions de la part des cellules dont la libération de radicaux libres toxiques. L'hyperthermie magnétique est une solution prometteuse pour la thérapie de certains cancers car elle permet d'éliminer les cellules malignes en préservant relativement les cellules saines voisines comme le montrent plusieurs études effectuées sur des souris ou avec des cellules humaines. L'hyperthermie magnétique permettrait également de contourner les problèmes de résistance, dues à des mutations génétiques qui apparaissent dans les cellules malignes et qui sont observés avec les chimiothérapies classiques.

#### 4.4 Les arts

Les ferrofluides ont inspirés de nombreux artistes qui ont choisi d'utiliser les ferrofluides et leurs formes géométriques dentelées en présence d'un champ magnétique pour réaliser certaines de leurs œuvres. C'est notamment le cas de S. Kodama qui créa plusieurs œuvres à partir de ferrofluides [11] :

- *Protrude, Flow* (Saillie, coulée) en 2001 (Figure 5A) dans laquelle elle induit un mouvement dynamique des liquides et les fait danser au moyen d'aimants.
- *Waves and sea urchin* (Vagues et oursins) en 2003 (Figure 5B) dans laquelle les ferrofluides donnent l'illusion de la présence de vie et permettent aux spectateurs d'interagir avec la sculpture vivante, par la voix et en plaçant les mains au-dessus de la surface du liquide. Un ordinateur convertit l'amplitude du son en tension électrique qui alimente les électroaimants.
- *Breathing Chaos* (Chaos respirant) en 2004 dans laquelle elle intègre des électroaimants au cœur de sa sculpture sur lequel les ferrofluides vont s'animer. Le mouvement et la vitesse des pics de ferrofluides sont alors contrôlés par la puissance de l'électroaimant.
- *Morpho towers* en 2006 (Figure 5C) dans laquelle les ferrofluides vont être animés d'un mouvement de rotation.

A



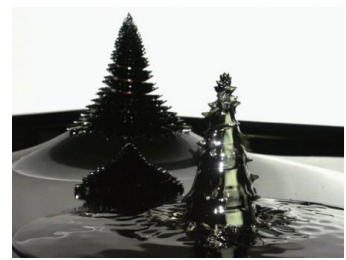
Protrude, Flow (2001)

B



Waves and sea urchin (2003)

C



Morpho tower (2006)

**Figure 5 :** Images d'œuvres de S.Kodama.

Ces œuvres et des vidéos sont disponibles au lien suivant :

<http://ssaft.com/Blog/dotclear/index.php?post/2009/04/08/L-art-magn%C3%A9tique-de-Sachiko-Kodama>

## CONCLUSION

Cet article a permis de donner une définition des ferrofluides ainsi qu'un bref historique de leur découverte. Puis, les propriétés superparamagnétiques de ces objets ont été expliquées ainsi que l'observation d'instabilités de pics lorsque les ferrofluides sont placés dans le champ d'un aimant. Finalement, des applications des ferrofluides en recherche ou dans notre quotidien ont été décrites. Cet article constitue la première partie (partie A) de plusieurs articles dédiés aux ferrofluides. La partie B est



consacrée à la synthèse de ferrofluides alors que la partie C s'intéresse à des applications réalisables en travaux pratiques.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier tous les élèves ayant contribué à l'amélioration du manuscrit (Adrien Combourieu, Joana Dagorret, Louis Godeffroy, Sandra Khemaissa, Baptiste Maillot, Melik Maksem, Baptiste Neil, Florent Saudrais et Idris Tlemsani) et Emmanuelle Cazayus pour sa relecture attentive.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] <http://www.inrs.fr/risques/nanomateriaux/terminologie-definition.html>.
- [2] "[http://www.odpf.org/images/archives\\_docs/22eme/memoires/EquipeD/memoire.pdf](http://www.odpf.org/images/archives_docs/22eme/memoires/EquipeD/memoire.pdf)."
- [3] Piard, J. Des systèmes dispersés dans nos assiettes : une étude au microscope optique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*. 2012, vol. 106, N°948, p. 1089-102.
- [4] A., Escalle-Lewis, J., Piard. Détermination de la concentration micellaire critique par spectrofluorimétrie. *Bulletin de l'Union des Physiciens*. 2013, vol. 107, N°959, p. 1181-93.
- [5] "<https://www.czferro.com/blog/2014/10/27/history-of-ferrofluids>."
- [6] Rosenweig, R.E. Magnetic Fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics* 1987, vol. 19, p. 437-61.
- [7] ., [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=78&v=SO-DIQp6qus](https://www.youtube.com/watch?time_continue=78&v=SO-DIQp6qus). vol., p.
- [8] fr.wikipedia.org.
- [9] "<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-nanoparticules-magnetiques-traitement-anti-cancer-futur-31254/>."
- [10] Dutz, S., Hergt, R. Magnetic particle hyperthermia—a promising tumour therapy? *Nanotechnology*. 2014, vol. 25, 45, p.
- [11] <http://ssaft.com/Blog/dotclear/index.php?post/2009/04/08/L-art-magn%C3%A9tique-de-Sachiko-Kodama>. vol., p.