

ART & SCIENCE

Des ferrofluides pour des œuvres de pointe

Les liquides ferromagnétiques sont des suspensions de petits aimants.

Soumis à un champ magnétique, ils se hérissent de pointes.

Certains artistes en font des sculptures mouvantes.

Loïc MANGIN

Quel est le point commun entre un billet de un dollar, les disques durs, l'imagerie par résonance magnétique et un amortisseur de voiture ? Tous utilisent les propriétés des fluides ferromagnétiques, c'est-à-dire des liquides qui contiennent des particules de taille nanométrique en suspension et dotées de propriétés magnétiques. Nous reviendrons en détail sur leur composition.

Les ingénieurs ne sont pas les seuls à exploiter les comportements étonnants de ces substances. Plusieurs artistes en ont également fait leur matière première. Parmi eux, citons l'Allemand Martin Frey, le groupe australien *Pendulum*, le Suisse Fabien Oefner... et la Japonaise Sachiko Kodama, dont plusieurs œuvres sont représentées ici (*Protrude, Flow* en a, c et d ; *Morpho Tower* en b). En 2014, elle a exposé à l'Université Stony Brook, aux États-Unis, et au Musée d'art contemporain de Shanghai (*Power station of art*), en Chine.

Les ferrofluides ont été inventés dans les années 1960 par Stephen Papell, un ingénieur de la NASA qui souhaitait, dans le cadre du programme *Apollo*, fabriquer un carburant pour fusées. Pour ce faire, il mélangea de la poudre de magnétite (un oxyde de fer, Fe_3O_4) à du kérosène et à de l'acide oléique puis broya l'ensemble pendant dix mois ! Il obtint le premier ferrofluide.

Aujourd'hui, la plupart des liquides ferromagnétiques sont toujours élaborés avec de

la magnétite, même si on lui préfère parfois la maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) qui est une forme oxydée de la magnétite. Étonnamment, ces deux substances, présentes dans les cellules nerveuses des pigeons, seraient la clef du sens de l'orientation de ces oiseaux !

Quel est le rôle de l'acide oléique ? Le lipide joue le rôle de tensioactif qui permet à la magnétite de rester en suspension dans le liquide. Sans lui, le ferrofluide ne serait pas stable et les nanoparticules magnétiques (de 5 à 15 nanomètres de diamètre) sédimenteraient. Les parties hydrophiles du lipide s'associent avec les particules

Les pics apparaissent quand le champ magnétique est suffisant pour vaincre la tension de surface du fluide et la gravité.

tandis que les parties hydrophobes sont en contact avec le solvant : les particules restent en suspension grâce au mouvement brownien. L'acide oléique est toujours utilisé lorsque le solvant n'est pas polaire. Dans le cas contraire, on doit privilégier, par exemple, une solution d'acide nitrique pour charger électriquement les particules, de façon à ce qu'elles se repoussent.

En l'absence de champ magnétique, l'aimantation de chaque nanoparticule est orientée au hasard, ce qui conduit à une aimantation globale nulle. En revanche, en présence d'un champ magnétique extérieur,

l'aimantation des nanoparticules s'oriente, en moyenne, dans le sens du champ, bien que l'aimantation de chaque particule puisse basculer aléatoirement sous l'effet de l'agitation thermique.

Les pics observés apparaissent spontanément quand le champ magnétique, fourni par des électro-aimants, est suffisamment intense pour vaincre la tension de surface du liquide et la gravité. Ces pointes suivent les lignes du champ appliqué et leur forme, notamment la hauteur, dépend des paramètres du champ.

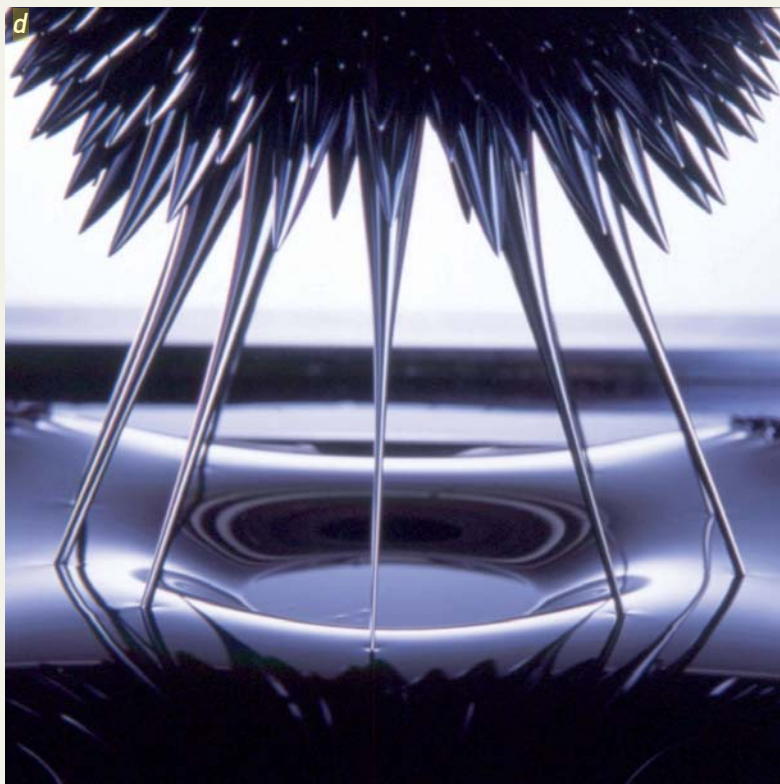
Dans *Protrude, Flow*, la première œuvre de S. Kodama (2001) fondée sur les ferrofluides, six électro-aimants étaient installés autour du récipient contenant le ferrofluide, mais l'encombrement réduisait la visibilité. Aussi, pour pallier cet inconvénient, dans *Morpho Tower* (2006), un électro-aimant unique est façonné en une sorte de tour conique spiralée autour de laquelle s'enroule puis se hérisse le ferrofluide à mesure que le champ magnétique s'intensifie.

Dans certaines de ses œuvres, l'artiste a ajouté un dispositif qui modifie le champ magnétique selon l'environnement, tels les sons, de façon à obtenir des sculptures mouvantes et dynamiques. ■

S. Kodama, *Dynamic ferrofluid sculpture : Organic shape-changing art forms*, *Commun. of the ACM*, vol. 51(6), pp. 79-81, 2008. Une vidéo de *Protrude, Flow* : <http://bit.ly/1xayZJN>



© S. Kodama



IDÉES DE PHYSIQUE

Du soleil pour chauffer... et refroidir

En jouant sur les différences de densité entre les régions chaudes et froides, on peut créer une circulation au sein d'un fluide et un transfert de chaleur. Des chauffe-eaux et des climatiseurs solaires fonctionnent sur ce principe.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Comment disposer d'eau chaude dans son habitation tout en se passant d'électricité ? Chauffer l'eau avec des capteurs solaires n'est pas tout ; encore faut-il assurer la circulation de l'eau dans ces capteurs pour les alimenter en eau froide et acheminer l'eau chaude dans le réservoir qui la stockera jusqu'à son utilisation.

La solution ? Réaliser un thermosiphon, c'est-à-dire provoquer une circulation grâce à la différence de masse volumique entre l'eau chaude et l'eau froide, différence responsable de mouvements dits de convection. En adaptant ce principe à la circulation de l'air, il est aussi possible d'utiliser la chaleur du soleil pour, paradoxalement, rafraîchir une maison en plein été.

La convection thermique en guise de moteur

Comment fonctionnent ces dispositifs, qui n'ont pas besoin de pompes ? Commençons par le phénomène de convection. Lorsqu'on place une casserole d'eau sur un feu ou une plaque chauffante, on peut voir que l'eau se met en mouvement bien avant que l'ébullition ne débute (voir la figure 1). Cette convection a pour origine les écarts de température au sein du liquide, qui créent des différences de masse volumique.

La masse d'un litre d'eau est de un kilogramme à 4°C sous pression atmosphérique. Mais ce n'est pas le cas à d'autres

températures. Plus la température est élevée, plus les molécules d'eau s'agitent et brisent les liaisons intermoléculaires qui confèrent au liquide sa cohésion, de sorte que l'eau se dilate : la masse d'eau contenue dans un litre diminue. À 20°C, cette diminution est minime – un peu moins de deux grammes. Mais à 50°C, la différence atteint déjà 12 grammes, et à 100°C elle est de 42 grammes. Un litre d'eau fait alors 958 grammes, et la différence est notable.

Pour en revenir à la casserole chauffée, l'eau au-dessus du feu s'échauffe plus vite que l'eau située à la périphérie du récipient. La colonne d'eau au centre est donc moins

dense et exerce au fond de la casserole une pression inférieure à celle de la colonne d'eau périphérique.

Cette différence de pression amorce un mouvement d'ensemble du fluide qui facilite le transfert thermique : au centre, remontée de l'eau chaude et moins dense vers la surface, refroidissement au contact de l'air ambiant, descente de l'eau refroidie et plus dense à la périphérie, réchauffement au fond, et ainsi de suite. On retrouve l'analogie de ce phénomène à l'échelle des océans de notre planète (la circulation thermohaline), mais en beaucoup plus complexe, car la salinité modifie aussi la masse volumique de l'eau de mer.

Comment mettre la convection à profit pour faire circuler sans pompe de l'eau dans un chauffe-eau solaire ? En reproduisant le même phénomène au sein des canalisations du chauffe-eau (voir la figure 2).

Une partie de ce circuit est composée des capteurs solaires et contient de l'eau chaude. C'est un ensemble de tuyaux peints en noir, placés dans une boîte plate au fond noir et au couvercle de verre, afin d'absorber toute la lumière du soleil et d'optimiser le rendement thermique.

Dans une seconde partie se trouve l'eau non encore chauffée, destinée à aller vers les capteurs. Étant donné l'écart de température entre les deux parties, une circulation naturelle peut s'établir. Il existe cependant une différence notable par rapport à la casserole. Dans cet ustensile de



1. DANS UNE CASSEROLE placée sur le feu, l'eau au centre s'échauffe plus vite que celle située en périphérie. Moins dense, elle finit par s'élever, se refroidit au contact de l'air et, devenue plus dense, replonge un peu plus loin. Des rouleaux de convection naissent ainsi.