

Els imants líquids

per Dominique Leglu

Suspenent grànuls microscòpics dins determinats líquids, els investigadors han aconseguit fluids que es comporten com un sòlid quant a les propietats magnètiques, però que conserven llurs qualitats de líquids en totes les altres situacions. Per les seves nombroses aplicacions, aquests fluids magnètics són, objecte de recerca en nombrosos laboratoris de tot el món. El present article constitueix una bona síntesi dels coneixements actuals sobre aquests "imants líquids".

Levitació permanent. Deixeu els imants a la porta, si us plau." Aquest avís pot llegir-se a la porta del laboratori de química de metalls de transició de la Universitat París VI com si fos un rètol del museu Grévin. Ja coneixem l'humor propi dels químics i les seves boniques paraules: hidròxid de tetrametilamoni o hexacloridifenilmetà. Però, ara, la levitació ens empeny a franquejar el llindar.

Apareix, en efecte, una curiositat. Al fons d'un vas posat sobre un imant brolla una multitud de pics negrosos de dos o tres centímetres d'alt. Si els toquem lleugerament amb la punta dels dits es tornen líquids; taquen. Preneu el vas entre les mans, el líquid se submergeix novament al fons del vas i s'estabilitza horitzontalment. Poseu-lo un altre cop sobre l'imant i veureu com tornen a sorgir els pics. El líquid preparat en aquest laboratori presenta, en efecte, propietats força particulars. Es un líquid magnètic batejat més científicament com a ferrofluid.

Endegats fa uns vint anys, els ferrofluids ja han deixat de ser curiositats de laboratori, tot i que són encara poc coneguts. Els industrials se n'han apoderat fent-los servir per a tota mena de tasques, ja sigui per realitzar acceleròmetres i juntes, triar mate-

rials, lubricar equips, esmorteir les vibracions dins dels altaveus o servir de tintes magnètiques.

Aquests líquids tenen propietats hidrodinàmiques sorprenents. "Fa uns quatre anys —ens recorda Alexis Martinet (Laboratori de física dels sòlids de la Universitat d'Orsay)— alguns investigadors es resistien a creure en l'existència d'aquests líquids imantats. Als seus ulls, els sòlids continuaven sent els únics materials que presenta-

ven propietats magnètiques manifestes."

Tanmateix, seria enganyós que donéssim a entendre que la imantació global observada en els ferrofluids resulta d'una imantació de cadascun dels àtoms del líquid. Encara que, pel que fa als líquids, mai no s'ha exclòs el ferromagnetisme (vegeu l'enquadrat de la pàgina 57), mai no s'ha pogut observar.

Què són, doncs, els ferrofluids? són

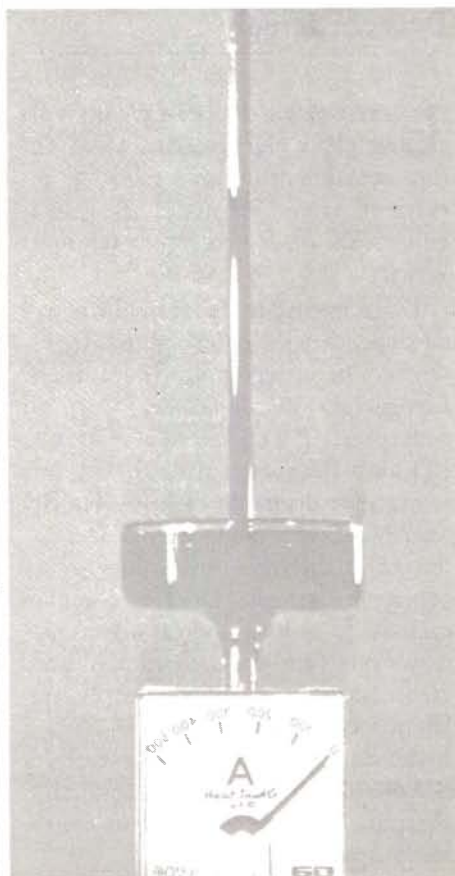


Fig. 1

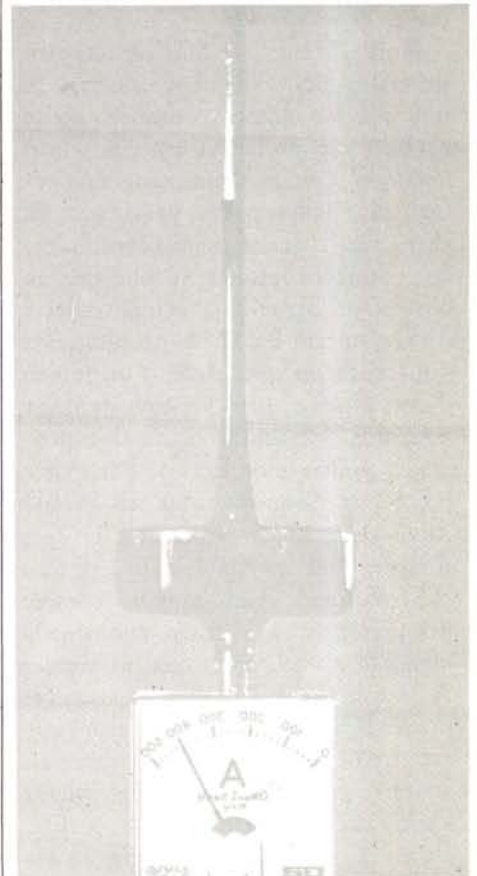


Fig. 2

Fig. 1

El corrent no passa, el ferrofluid s'estabilitza al recipient.

Fig. 2

El corrent passa i, sota l'acció del camp magnètic resultant, el líquid imantant s'enfila per la barra.



Fig. 3

Els líquids imantats presenten curioses deformacions en presència d'un camp magnètic

suspensions de grànuls magnètics molt fins, de l'ordre dels 100 àngstroms,¹ dins de líquids ordinaris. És aquesta multitud de grànuls microscòpics —fins a 10^{18} grànuls per centímetre cúbic— que dona les seves propietats magnètiques a la totalitat del líquid.

Fer-se magnètics però continuant sent fluids.

L'espectacular resideix, doncs, en el fet que s'han aconseguit fluids que es comporten com un sòlid pel que fa a les propietats magnètiques, però que conserven llurs qualitats de

1. àngstrom = 10^{-10} m.

líquid en totes les situacions. Evidentment, aquest endegament no s'ha fet de la nit al dia. Un dels principals problemes va consistir a obtenir els líquids ultra-estables, és a dir, aquells on les partícules romanen constantment en suspensió (enquadrat). Sota l'acció de la gravetat, en efecte, les partícules tenen tendència a dipositar-se al fons del recipient, mentre que d'altres forces, magnètiques i del tipus Van der Waals, les empenyen a aglutinar-se. En ambdós casos, això faria desaparèixer les propietats específiques del ferrofluid.

La idea fonamental va ser la de produir unes partícules amb hulla menuda per tal que l'agitació tèrmica, el moviment brownià, de totes les molècules garantitzi, constantment, una bona dispersió. El mètode que s'utilitza més correntment consisteix a triturar les pols durant unes quantes setmanes per obtenir grànuls de l'ordre dels cent àngstroms. S'ha considerat

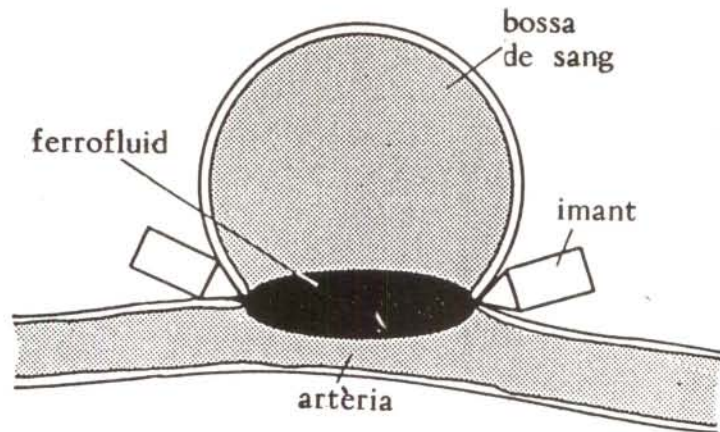
que aquesta grandària era un bon terme mig: per damunt d'ella, el moviment brownià no és prou poderós com per garantir la dispersió; per sota, a concentració igual, correspon un excessiu augment de la viscositat del fluid.

Per prevenir encara més el risc de veure com s'aglutinen els grànuls, els físico-químics han pensat també de dipositar agents dispersius (o surfactants) a la superfície dels grànuls. Aquests composts tensioactius, del tipus polímer o compost macromolecular, redueixen aleshores les forces d'atracció magnètica entre els grànuls, forces particularment intenses quan els grànuls estan en contacte.

Aquestes potingues químiques d'alt vol han permès d'obtenir suspensions de grànuls de magnetita recoberts d'àcid oleic dins l'aigua o l'heptà, el cobalt recobert de metacrilat de metil—etacrilat d'etil—vinilpirolidona de

Fig. 4

En medicina, els líquids imantants poden ajudar al tractament dels aneurismes, tumors provocats per les dilatacions d'una artèria. Aquest ferrofluid es pot retenir gràcies a un parell d'imants que sostinguin les parets arterials que han d'ésser tractades.



toluè..., i d'altres. Des d'ara ja sabem utilitzar un ampli ventall de líquids (aigua, hidrocarburs, fluorcarburs, dièsters...), de surfactants i de grànuls (magnetita, cobalt, níquel...).

Alguns laboratoris estan fent experiments, a més, per preparar ferrofluids per via química. Aquest és el cas, especialment, de René Massart, de París VI, on es produeixen ferrofluids que tenen la particularitat de no utilitzar surfactants. La capacitat dels grànuls de no aglutinar-se ni de dipositar-se al fons del recipient es deu essencialment, en aquest cas, a la naturalesa dels ions presents a la solució i al pH d'aquesta solució.

Quatre aplicacions.

L'important és que el ferrofluid presenti les propietats que Alexis Martinet resumeix en tres punts: que sigui estable, que els grànuls no se separin del líquid en presència de gradients de camp magnètic i que les propietats de fluid es conservin en camps magnètics intensos.

Això significa, més concretament, que els ferrofluids continuïn obeint les lleis que regeixen tots els líquids. Només cal afegir un terme d'origen magnètic a l'ecuació de Bernoulli per

a un líquid qualsevol.² Aquest darrer terme es manifesta com una "pressió magnètica". Concretament, afirma que el fluid té tendència a dirigir-se cap a les zones on el camp magnètic té més força. D'aquest fet es dedueixen un seguit de característiques que poden tenir múltiples aplicacions.

En podem distingir quatre. En primer lloc, és possible modificar a voluntat la densitat aparent del ferrofluid sotmetent-lo a un camp no homogeni. En segon lloc, es pot actuar a distància; també és un bon conductor tèrmic. Finalment, en presència d'un camp magnètic, el ferrofluid és un medi anisòtrop (és a dir, la direcció del camp ha esdevingut una direcció privilegiada).

Disposar d'una densitat variable, ser capaç de crear un medi de densitat nul·la o fins i tot negativa només pot fer-se amb els ferrofluids. Aquesta capacitat permet de mesurar directament la densitat d'un cos no magnètic, més dens per exemple que el ferrofluid en absència de camp. Quin és el procediment? Immergint dins el ferrofluid el cos que s'està estudiant, i sotmetent després el conjunt a un gradient de camp. Això significa, més concretament, que es fa el possible per tal que el camp més intens es doni cap al fons del recipient i disminueixi gra-

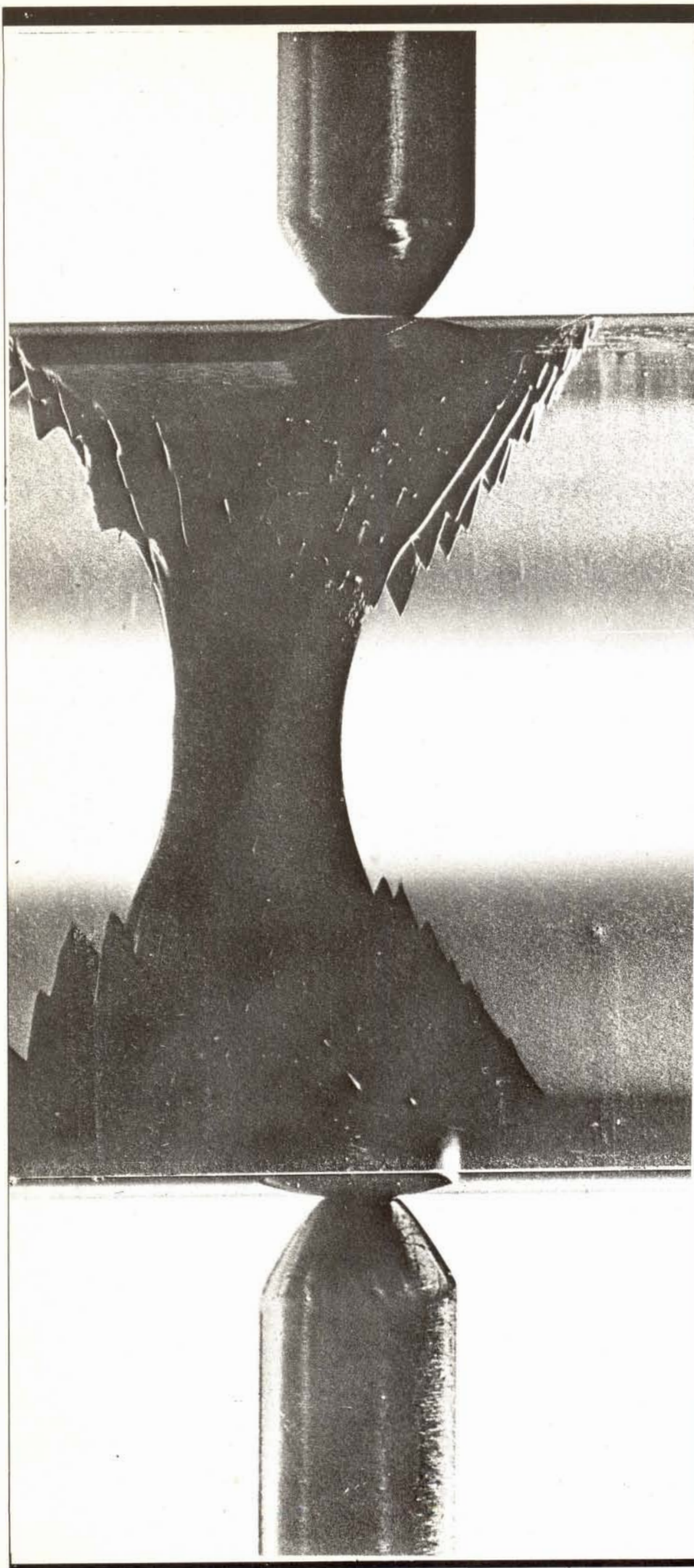
dualment cap a dalt. El ferrofluid, que tendeix a desplaçar-se cap a les zones de camp de força, podríem dir que acaba ocupant el lloc del cos enfonsat. Aleshores veiem com aquest cos torna a pujar a la superfície, desafiant, aparentment, les lleis de la gravetat. Aquesta levitació hidrostàtica ha permès de fer flotar metalls tan pesants com el tungstè (densitat: 19,3) dins uns ferrofluids de densitat 1,3 en absència de camp.

S'ha estudiat una aplicació pràctica: la separació de materials de diferent densitat. Encara que aquest triatge de materials només es troba a l'estadi preindustrial, sobretot als Estats Units i al Japó, bé podrà conèixer un desenvolupament força interessant, en particular, en el cas dels metalls preciosos. A França, empreses com Fives-Cail-Babcock han començat a considerar l'ús d'aquest procediment.

Hi ha obstacles: en primer lloc, el preu encara elevat dels ferrofluids i, en segon lloc, la necessitat de netejar els materials que han estat triats. Però això no posa en dubte les possibilitats del procediment. En un altre camp, s'han realitzat acceleròmetres molt precisos fent flotar una massa de prova en el si d'un ferrofluid sotmès a un camp magnètic no homogeni. Aquests aparells arriben a palesar una acceleració de 10^{-5} g.

Aquesta possibilitat de fer variar la densitat aparent del ferrofluid ha obert força camins; en citarem dos: un imant immersit dins un ferrofluid se suporta a si mateix i no entra en contacte amb una altra superfície sòlida.

2. $p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constant}$ (p = pressió, v = velocitat, ρ = densitat, g = gravetat, h = altura). Per a un ferrofluid l'ecuació es converteix en $p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh - \mu_0 \int^H M dH = \text{constant}$; el darrer terme és el d'origen magnètic.



Aquesta particular facultat permet, per exemple, de fer pivots sense parell d'engengament, o amortidors. En el mateix ordre de coses, s'ha considerat la possibilitat de fabricar contactors sense peces mecàniques, gràcies a la levitació d'un bany de mercuri a la superfície d'un ferrofluid.

Centenars de patents ja han estat registrades.

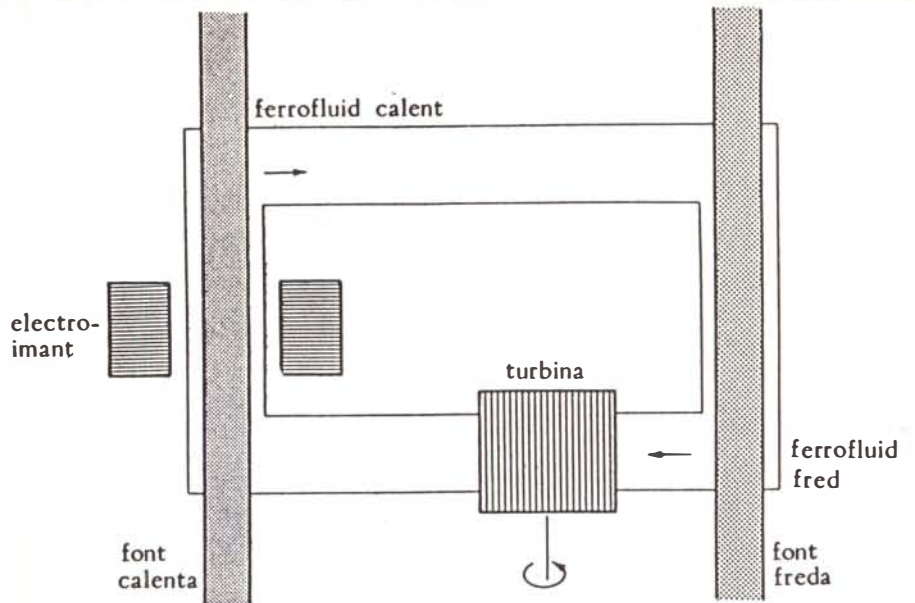
Pel que fa al posicionament a distància dels ferrofluids per un camp magnètic, cal anar vint anys endarrera per trobar un primer experiment. El Dr. Ronald Moskowitz, actual president de la companyia nord-americana Ferrofluidics, treballava en aquells moments a Avco, una companyia especialment interessada pels problemes espacials. En aquell temps, una qüestió important s'acabava de plantejar en relació amb els vehicles espacials: com garantir el seu equilibri tèrmic? Un vehicle que roman "fix" a l'espai s'escalfa molt, en efecte, pel costat que li dona el sol, mentre que l'altre costat està molt fred. El Dr. Moskowitz recorda que fou aleshores que es desenvolupà el concepte de

Fig. 5

Sota l'acció de dos imants, a dalt i a baix, el ferrofluid es bloqueja a l'interior del recipient.

Fig. 6

Aquest sistema permet de convertir l'energia tèrmica en energia mecànica. El ferrofluid calent (a l'esquerra), la imantació del qual disminueix amb la temperatura, és substituït pel ferrofluid fred, que tendeix a desplaçar-se cap al camp magnètic intens creat per l'electroimant. El ferrofluid calent es refreda de seguida (a la dreta) i el cicle torna a començar, el moviment general del líquid pot posar en marxa una turbina.



Una idea que es remunta a l'any 1779

Dos segles! Ha calgut dos segles perquè la producció de "bons" ferrofluids, és a dir, de suspensions estables, arribi a concretar la idea de líquids imantats.

En efecte, sembla que el físic anglès Gowan Knight fou el primer, ja l'any 1779, a imaginar la dispersió de partícules de ferro dins l'aigua per conferir propietats magnètiques al conjunt del líquid. Les suspensions que ell va realitzar no eren, desgraciadament, estables, i les partícules de ferro acabaven caient al fons del recipient.

Aproximadament un segle i mig més tard, l'any 1907, Cotton i Mouton van estudiar "les propietats òptiques dels licors heterogenis". Es tractava de col·loides magnètics molt diluïts: el ferro Bravais. L'any 1932, Bitter va preparar, per als seus estudis sobre els dominis magnètics, uns col·loides amb la base d'aigua en els quals dispersà grànuls de magnetita de la grandària d'un micró (cent vegades més grans que els grànuls de ferrofluid actuals). Sis anys més tard, Elmore va realitzar suspensions de grànuls més fins (200 àngstroms), els quals s'apropen als productes actuals.

Calgué esperar els anys seixanta i els treballs de la NASA en el camp de la gravetat artificial per veure finalment aparèixer els ferrofluids ultraestables. El físic nord-americà R. Rosensweig va aprofitar aleshores la seva experiència en la matèria per produir líquids a una escala més gran que la dels laboratoris, fundant la "Ferrofluidics and Co." l'any 1969. Aquesta companyia té des de llavors el quasi-monopoli de la distribució de ferrofluids.

Des de fa uns deu anys, nombrosos laboratoris d'arreu del món continuen investigant, tant per la banda fonamental com en el terreny de les aplicacions.

Per tal d'analitzar la situació sobre aquestes qüestions, s'organitzaren dues conferències internacionals sobre els fluids magnètics l'octubre de 1977 i el març de 1980. El 1983 se'n realitzà una altra. L'atenció dels físics es va centrar sobre diferents camps: preparació i físico-química dels fluids magnètics, qüestions teòriques, experiments i mesures, hidrodinàmica, termomecànica i aplicacions. Han aparegut uns quants centenars de publicacions especialitzades. I unes tres-centes patents han estat registrades arreu.

Durant els anys quaranta, s'utilitzaren com a fluids d'embragatge uns líquids que contenien partícules ferromagnètiques. Però el seu comportament en presència d'un camp magnètic, encara que fos satisfactori en la seva aplicació als embragatges, no corresponia al d'un bon ferrofluid. En efecte, en un gradient de camp totes les partícules migraven en una mateixa direcció, com les truites quan es precipiten vers una font d'aire dins un aqüari. El líquid es transformava aleshores en una mena de tap sòlid, d'alguna manera es glaçava. I la propietat que es busca amb un ferrofluid és exactament la contrària.

“Ferri, ferro, dia, para”

No sempre és fàcil saber utilitzar l'argot dels magnetistes i dir, sense equivocar-se que un cos és ferromagnètic, ferrimagnètic, diamagnètic o paramagnètic. Quan els físics declaren que els ferrofluids són superparamagnètics podríem pensar que tenen un desig malsà de complicar-nos l'existència.

En realitat, la situació no és tant complicada com es podria suposar a partir de l'abundància de termes. Només cal que ens apropem als àtoms i als electrons que hi graviten per delimitar millor la significació d'aquests termes.

Recordem, em primer lloc, que un electró té un moment magnètic: es desplaça quan se'l sotmet a un camp magnètic. Les mateixes propietats magnètiques dels àtoms es deuen a les propietats de la seva capa externa d'electrons. Si aquests últims van de dos en dos, per parelles, es mostren poc sensibles al camp magnètic. Al contrari, es revelen molt sensibles quan van tot sols, quan són solters. Llavors es comprèn que els cossos presentin propietats magnètiques diferents segons el tipus d'àtoms o d'ions (és a dir, els àtoms que han perdut o guanyat un o més electrons en la seva capa externa) que els componen.

Per simplificar les idees, es poden distingir dos tipus de casos: les solucions aquoses i els sòlids cristal·lins. En el primer cas, els ions dispersats dins la solució són independents els uns dels altres, mentre que s'interrelacionen en les xarxes cristal·lines organitzades. Això comporta unes reaccions diferents davant un camp magnètic exterior.

Pel que fa a les solucions aquoses, s'observa aleshores dos tipus de comportament, el paramagnetisme i el diamagnetisme. Per als sòlids se'n distingeixen tres: el ferromagnetisme, l'antiferromagnetisme i el ferrimagnetisme.

Si una solució paramagnètica se sotmet a un camp, els moments dels ions tendeixen a orientar-se en el camp. Però si se suprimeix el camp, l'orientació privilegiada desapareix i s'instal·la un gran desordre estadístic. Això es produeix quant a les solucions que contenen ions fèrrics —tenen cinc electrons solters—, o ions ferrosos —quatre electrons solters—. Una solució diamagnètica és igualment sensible a l'acció d'un camp, però els moments magnètics s'orienten en un sentit contrari al del camp aplicat. És, per exemple, el cas de l'oxigen.

El ferromagnetisme dels sòlids correspon a una situació en la qual els fenòmens cooperatius entre àtoms s'imposen als moments magnètics que estan prop de ser paral·lels entre ells. D'aquí prové una imantació global important. És per aquest motiu que una costurera pot ajuntar en un no res dues agulles perdudes servint-se d'un imant. Quan se suprimeix el camp magnètic, apareix a l'interior del material unes regions anomenades dominis on els moments resten paral·lels entre ells, però apunten a direccions diferents d'un domini a l'altre. Aquests dominis donaran lloc a una resultant global, que pot ser nul·la o diferent de zero segons els materials. Si és diferent de zero, el material continua imantat després d'haver estat sotmès a un camp magnètic. Aquesta irreversibilitat del camp és el que els físics anomenen fenomen d'histeresi.

Un antiferromagnètic és un sòlid que no reacciona a un camp magnètic. Almenys globalment. En efecte, una disposició particular dels moments magnètics té lloc a nivell dels àtoms que es reparteixen segons dues subxarxes, una part de les quals s'orienta en un sentit i l'altra en sentit invers. Ambdues subxarxes es compensen i el moment magnètic global és nul.

Quin és, doncs, el superparamagnetisme que presenten els ferrofluids? Se'l situa en el límit entre el ferromagnetisme dels sòlids i el paramagnetisme dels medis aquosos. Cada grànel fi (aprox. 100 àngstroms) en suspensió dins un líquid es pot considerar, en efecte, com un mínuscul imant permanent. En presència d'un camp magnètic, el grànel s'alinea sobre el camp i el líquid presenta, globalment, una imantació important. Però, quan se suprimeix el camp, la imantació desapareix, i per dues raons. L'una és simplement el moviment brownià, aquesta agitació tèrmica que afecta a tots els cossos la temperatura dels quals no és al zero absolut. Aquest enrenou a nivell microscòpic provoca una rotació dels grànuls al si del líquid. El desordre estadístic que en resulta fa desaparèixer la imantació. El segon fenomen ha estat descobert pel premi Nobel francès, Louis Néel: es tracta de la rotació del vector magnètic en l'interior mateix del grànel. Segons la grandària de les partícules i la temperatura, l'un o l'altre d'aquests fenòmens esdevé preponderant.

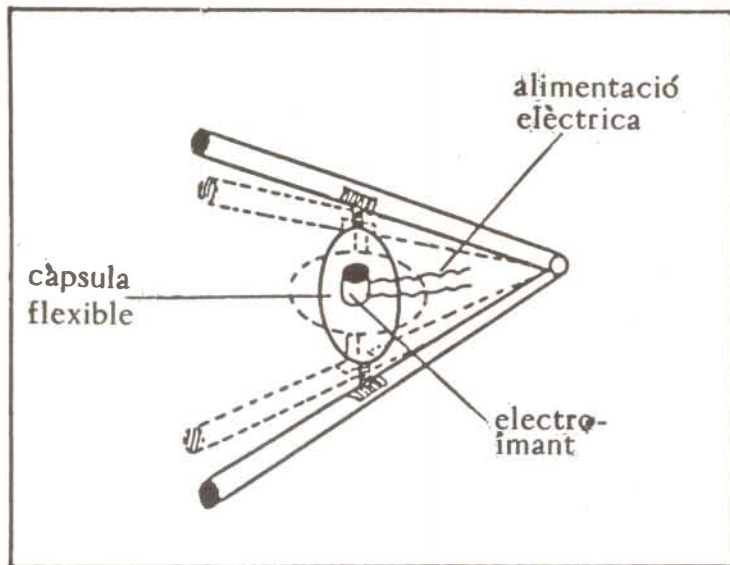


Fig. 7

Deformant, gràcies a un electroimant, una capsula flexible plena de ferrofluid, es pot simular una elongació o una contracció d'un múscul. Línia de punts: en repòs, sense imantació. Línia contínua: el corrent passa i deforma el ferrofluid.

“circulació termomagnètica”, és a dir, que es pensà de convertir directament l'energia tèrmica en energia mecànica.

Imaginem que tenim una anella plena de ferrofluid, exposada per un costat a la calor i per l'altre al fred. L'imant es troba en el costat de la font calenta. A la zona calenta, la imantació del ferrofluid disminueix quan la seva temperatura augmenta cap al punt de Curie, temperatura en la qual el cos perd tota imantació.

Què passa aleshores? El ferrofluid fred situat a l'altra part de l'anella i que, per tant, no ha perdut gens de la seva tendència a ocupar les zones de camp magnètic intens, pren el lloc del ferrofluid calent. Però aquest es recalca al seu torn mentre que el ferrofluid calent es refreda a la zona freda, i tot torna a començar. El fluid comença aleshores a circular dins l'anella. S'ha pensat a utilitzar aquest moviment del ferrofluid per accionar turbines, però, fins ara, el rendiment ha estat molt petit. El contacte tèrmic garantit pel ferrofluid ha estat utilitzat, per altra banda, per eliminar la calor acumulada a la bobina. En el mercat ja es poden trobar dispositius molt funcionals, que utilitzen la capacitat del ferrofluid de ser posicionat per un imant: ens referim a juntes per passos giratoris. En efecte, el ferrofluid es pot mantenir al voltant d'un arbre rotatori mitjançant un imant permanent. Els avantatges d'aquest procediment són nombrosos, donat que el ferrofluid no és sensible al desgast, qualitat molt important pel que fa a una junta; també suporta pressions diferencials de decenes d'atmosferes i pot funcionar sotmès en el buit

de la mateixa manera que sota pressions de més de 100 kg/cm²; finalment, es podria dir que la velocitat de rotació de l'arbre no l'afecta en absolut, puix que és possible d'arribar a fer milers de voltes per minut. En estat de repòs, el fregament viscos s'acumula; la manca d'un ressort de retorn que se'n deriva, és molt interessant per als aparells de mesura.

A partir d'aquí, s'ha pensat també a utilitzar-los com a lubricants. Preparats amb bases olioses, aquests ferrofluids que es poden mantenir constantment en el seu lloc no corren el risc de ser expulsats de les peces mecàniques per rotació o per la influència de la gravetat...

Seria impossible citar totes les idees que els ferrofluids han fet concebre. És mentem tan sols que, en un camp molt diferent, firmes com la IBM mostren un gran interès pel tema. Actualment, hi ha investigadors que treballen per fabricar impressores que utilitzin tintes magnètiques; el raig de tinta i, fins i tot el traçat, serien, llavors, dirigits per electroimants.

Per acabar, i encara que pugui semblar sorprenent, podria ser que un dia o un altre els ferrofluids fossin utilitzats dins el nostre propi cos. La medicina també està interessada en aquesta qüestió. A la Facultat de Farmàcia de París-Sud s'ha començat a fer investigacions al servei del professor Pui-sieux. És possible, en efecte, injectar ferrofluids a la sang per després guiar-los per mitjà d'un camp magnètic cap a la part del cos que es desitgi. D'aquesta manera es poden tractar aneurismes o aïllar tumors bloquejant el flux de sang a alguns capil·lars.

Fins i tot, alguns investigadors han proposat —però això encara forma part de la ciència ficció— de crear músculs artificials. Jugant amb la deformació d'una capsula flexible plena de ferrofluids, en presència de camps magnètics variables es podria, efectivament, reproduir la contracció o l'elongació d'un múscul.

Veient només les centenars de patents que ja han estat registrades i les idees que neixen a cada moment, podem dir que els ferrofluids tenen un bon futur. Això es pot veure en els ordinadors (on els ferrofluids es podrien aplicar a la memòria de bombolles) netejadors de marea negra: després d'haver escampat el ferrofluid sobre les capes de petroli, es podria aspirar totalment gràcies a uns imants. De moment, sembla que els únics límits són els de la imaginació humana. Recordem, de tota manera, que l'elevat preu de cost d'aquests fluids ha frenat, fins ara, les seves aplicacions. Però sembla que hi ha bones esperances. Mentre fa deu anys es venien per centímetres cúbics, ara s'ofereixen per 200.000 litres. I el preu també ha disminuït en aquest període en un factor de 2000. Cal, doncs, esperar veure'ls aparèixer a la vida corrent. Encara que només sigui per als aparells o per a les joies.

Alguns ja hi han pensat. L'escultor Takis, algunes obres mòbils del qual ja utilitzen els ferrofluids, també ha tret joies transparents. En principi, un petit imant recobert d'or permet de realitzar per si mateix la seva petita escultura magnètica instantània.