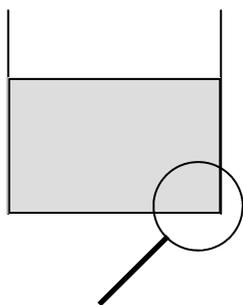


# FERROFLUIDE

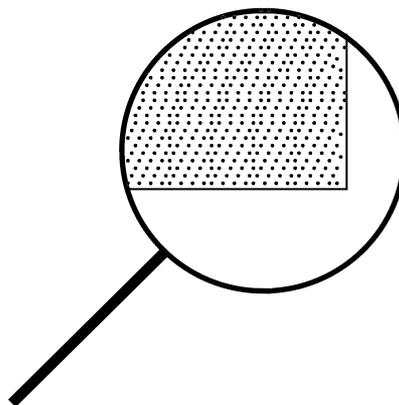
## ECHELLE MACROSCOPIQUE :

*Une solution homogène noire, sensible aux champs magnétiques.*



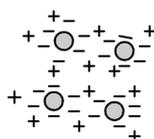
## ECHELLE MICROSCOPIQUE :

*Des nanoparticules ( $\approx 10$  nm) de nature ferromagnétique, en suspension dans un solvant, dispersées à l'aide d'un surfactant.*



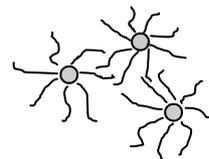
### Il existe 2 sortes de surfactants :

- ionique :



Les anions sont adsorbés à la surface des particules. Alors elles se repoussent mais les cations sont les garants de l'homogénéité de la solution.

- Par micelle :



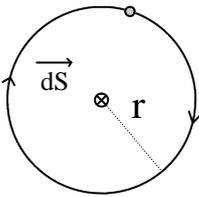
Solvants utilisés :

- eau (biocompatible)
- alcool
- huile

# FERROFLUIDE

## Ferromagnétisme

### Moment magnétique d'un électron célibataire :

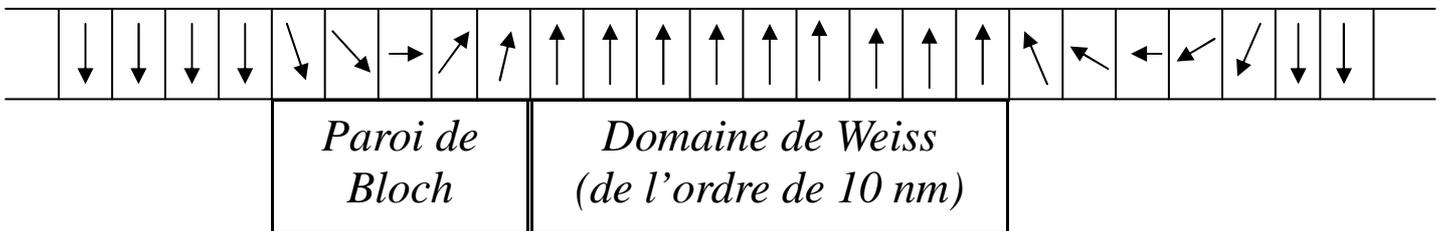


$$I = dq/dt = -e/T \text{ et } T = 2\pi/\omega = 2\pi r/v \quad \vec{\parallel dS \parallel} = \pi r^2$$

$$m = dS I = -e(r.v)/2$$

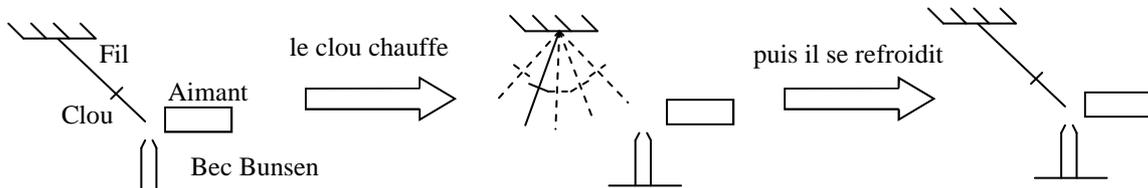
Il existe un moment magnétique pour chaque atome ayant un électron célibataire.

Organisation d'une monocouche atomique :



### Température de Curie :

Pendule de Curie :



$$\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}$$

*Boussole*

$$\vec{F} = (\vec{m} \cdot \text{grad}) \cdot \vec{B}$$

*clou*

# FERROFLUIDE

## Paramagnétisme

*Orientation aléatoire des moments magnétiques* qui par conséquent s'annulent : pas de moment magnétique permanent.

En présence d'un champs magnétique extérieur, tous les moments magnétiques s'orientent de façon à minimiser l'énergie se mettent donc colinéaires à ce champs.

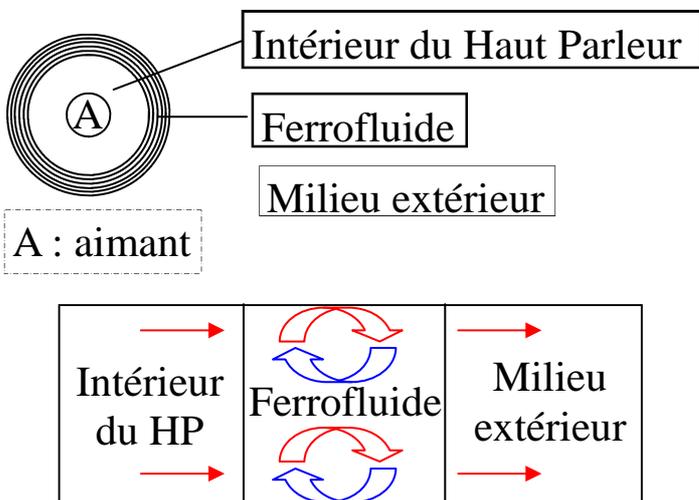
## Superparamagnétisme

Les particules des ferrofluides sont de taille nanoscopique et ne possèdent alors *un seul macromoment magnétique*.

Conclusion : ces particules, à l'origine *ferromagnétique*, se comportent *comme un matériau paramagnétique*. On obtient alors un paramagnétique beaucoup plus sensible au champs magnétique !

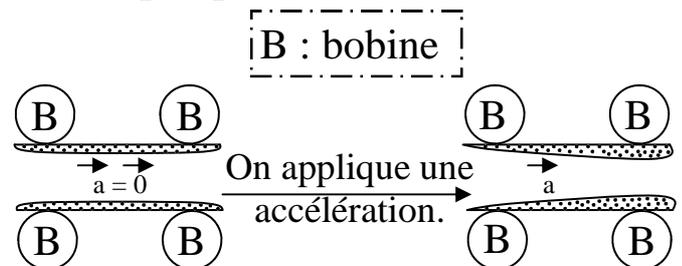
## Applications

### Système de refroidissement de haut parleur :



### Système de contrôle d'attitude :

Les bobines sont parcourues par un courant électrique qui est mesuré à tout instant.



L'intensité varie selon la position du ferrofluide qui indique l'accélération subie.

# FERROFLUIDE

## Stabilité

La température est un paramètre capital dans la stabilité d'un ferrofluide.  
Pour rester homogène, l'énergie *d'anisotropie doit être inférieure à l'énergie d'agitation thermique* :

$$K_B \cdot T > K \cdot V$$

T la température

$K_B$  la constante de Boltzman

K la constante d'anisotropie

V le volume de la particule

Il existe une température minimale,  
La température de blocage :

$$T_b > K \cdot V / K_B$$

$$K = \Delta\rho \cdot g \cdot l$$

$\Delta\rho$  la différence de densité entre solvant et particule

g constante de pesanteur

L hauteur du liquide

De plus, pour que le ferrofluide garde ses propriétés, *il faut que les particules restent ferromagnétique* :

$$T < T_C$$

T la température

$T_C$  la température de Curie

D'où : ***Plage de stabilité des températures :  $T_b < T < T_c$***

**Exemple** : magnétite  $\Delta\rho = 3400 \text{ kg/m}^3$  avec  $l = 5 \text{ cm}$  et  $K = 2109,15 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$

Si on prend un modèle cubique de côté 10 nm,  $T_b = 152,7 \text{ K}$

Si on prend un modèle cubique de côté 12 nm,  $T_b = 273,0 \text{ K}$

$T_c$  (fer) = 1043 K

$T_c$  (cobalt) = 1404 K

$T_c$  (nickel) = 631 K

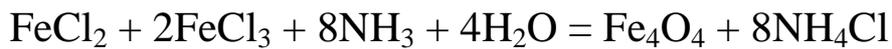
# FERROFLUIDE

## Synthèse d'un ferrofluide

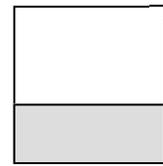
### Caractéristiques du ferrofluide :

- solvant : *eau*
- matériau des nanoparticule : *magnétite*
- Surfactant : ionique, *tétraméthylammonium*

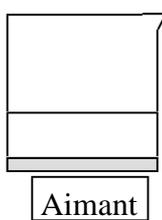
Dans un bêcher de 150 mL, on mélange 4 mL de solution molaire de chlorure de fer III et 1 mL de solution de chlorure de fer II (2 mol/L).



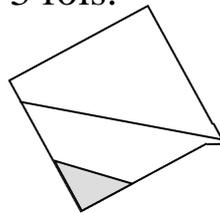
Le précipité noir de magnétite apparaît.



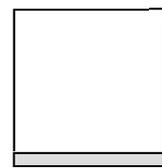
On rince la solution 3 fois.



Décantation



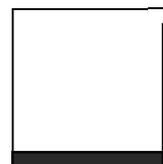
On enlève  
l'eau



On rajoute  
de l'eau

On ajoute le surfactant puis on remue.

On obtient le ferrofluide :

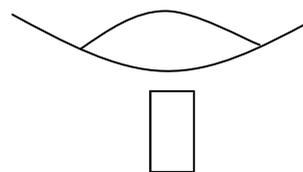


# FERROFLUIDE

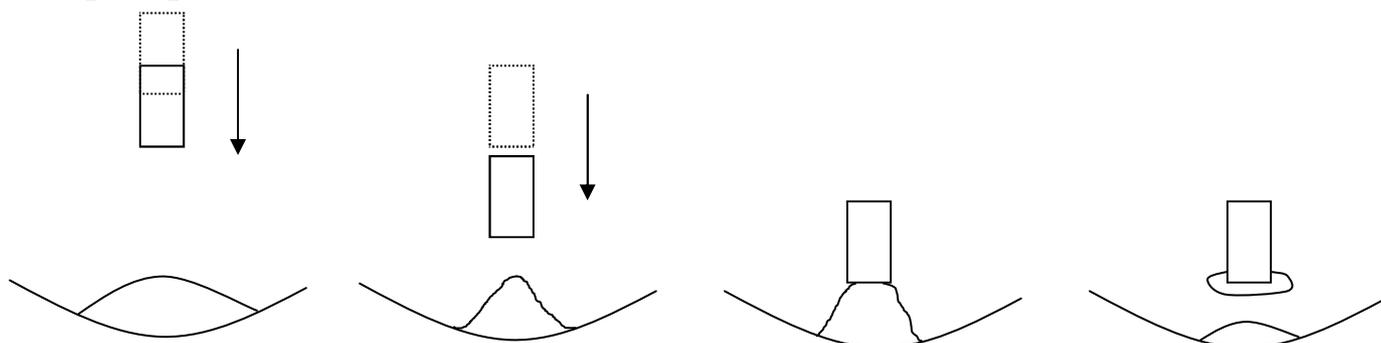
## Test du ferrofluide



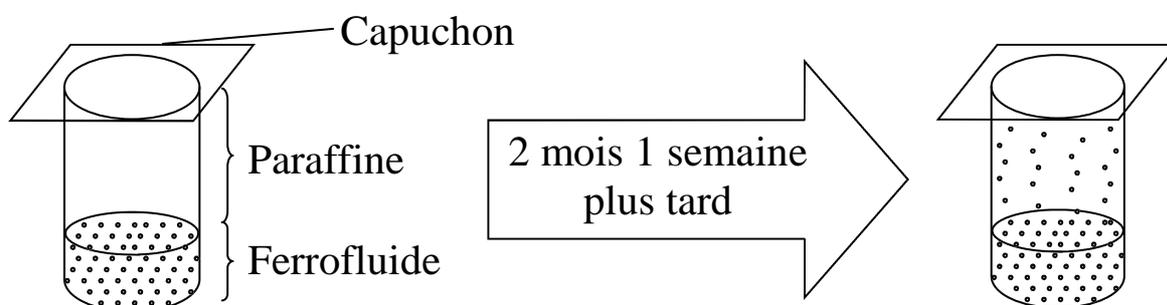
Lorsqu'on place l'aimant en dessous du ferrofluide, **une boule lise se forme**.  
On s'attendait plutôt à une boule de pics.



Lorsqu'on place l'aimant au dessus du ferrofluide un cône aplati se forme, puis s'allonge lorsqu'on approche l'aimant de plus en plus près pour finalement se coller à l'aimant.



On place le ferrofluide dans un flacon de verre, on le recouvre de paraffine pour l'isoler de l'air, sans quoi il s'évaporerait car le solvant est de l'eau.



Ainsi conditionné, **ce ferrofluide peut durer 2 mois et 1 semaine en bon état**. Passé ce délai, il commence à rouiller et les particules se collent contre le verre et passent dans la phase organique.

# FERROFLUIDE

## Résultat du test

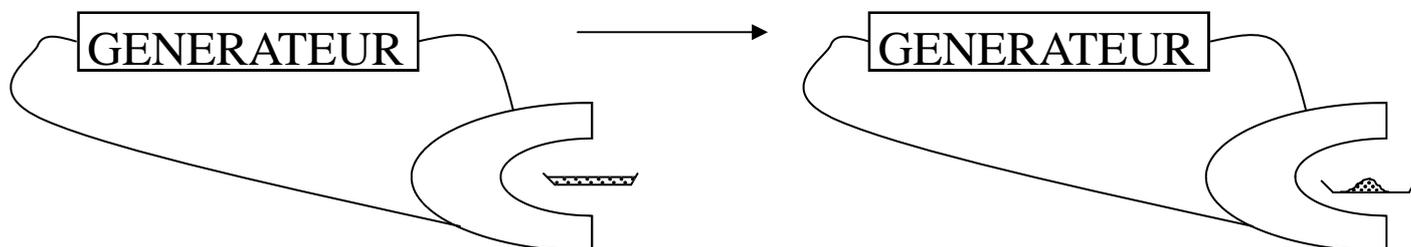
Deux problèmes :

- le ferrofluide n'est pas stable
- le ferrofluide n'est pas aussi réactif que ce que j'espérais

## Contact

Pour tester le ferrofluide avec un champs magnétiques plus intense, j'ai contacté le *Laboratoire National des Champs Magnétiques Pulsés*

Le laboratoire met à ma disposition un électroaimant :



Ce laboratoire détient un record de puissance de champs magnétique. Durant une *centaine de millisecondes*, il a généré un champs de *60 teslas* non destructif.

Avec la technique des champs pulsés, on obtient des champs plus intenses qu'avec des champs continus.

Exemples de sujets d'étude : la biréfringence du vide, le comportement des métaux à basse température sans supraconductivité.