
MP16 : MILIEUX MAGNÉTIQUES

Niveau

Commentaires du jury

- 2017 : Il n'est pas souhaitable de se limiter aux milieux ferromagnétiques. Dans l'expérience de mesure de la susceptibilité paramagnétique du chlorure de fer(III), le mécanisme de montée, ainsi que la position du ménisque dans l'entrefer de l'électroaimant doivent pouvoir être justifiés par les candidats.
- 2008 : L'effet Meissner ne se résume pas à une « expulsion de ligne de champ » .
- 2007 : Il faut pouvoir justifier la forme des pièces polaires de l'électro-aimant choisi.
- 2000 : L'usage de l'électroaimant occasionne de grosses erreurs, souvent dues à la non-linéarité de la réponse des pièces en matériau ferromagnétique. Correctement alimentés, de petits électroaimants (comme ceux qui sont disponibles) créent pour un entrefer usuel ($e \approx 1$ cm) un champ de l'ordre d'une fraction de tesla ($B \approx 0,3T$). Trouver des ordres de grandeur différents doit conduire à une analyse critique immédiate des opérations effectuées. De même la formule donnant B proportionnel à $1/e$, N et I suppose en particulier que la carcasse et l'entrefer forment un tube de flux de section constante, ce qui est rarement justifié, en particulier avec des pièces polaires tronconiques. L'emploi d'un teslamètre à sonde de Hall exige un minimum de soin (réglage du « zéro », orientation ...)

Bibliographie

—

pré-requis

Expériences

—

Table des matières

1 Paramagnétisme et diamagnétisme	2
1.1 Comparaison diazote et dioxygène	2
1.2 Ascension paramagnétique	3
2 Transition ferro-para (pas le temps...)	4
3 Ferromagnétisme	4
3.1 Cycle d'hystérésis	4
3.2 Désaimantation	5
4 Domaines de Weiss	6
5 Mesure d'aimantation	6

Introduction

Un milieu magnétique est un milieu qui acquiert une aimantation lorsqu'on le soumet à un champ extérieur $\mathbf{H}$. On caractérise la réponse du milieu magnétique par sa susceptibilité magnétique χ_m définie par la relation :

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$$

Le champ total dans le matériau s'écrit alors :

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0\mu_r \mathbf{H} = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H}$$

On distingue plusieurs cas : les matériaux linéaires, parmi lesquels les matériaux paramagnétiques ($\chi_m \approx 1 \times 10^{-3}$), les diamagnétiques ($\chi_m \approx -1 \times 10^{-5}$). On a aussi les cas non linéaires, avec les matériaux ferromagnétiques ($\chi_m \approx 2$ à 1×10^6).

On commence par illustrer le para et diamagnétisme, qui correspondent donc à des réponses linéaires du matériaux.

1 Paramagnétisme et diamagnétisme

1.1 Comparaison diazote et dioxygène

Manip qualitative mettant en évidence le caractère paramagnétique du dioxygène

Distiller du dioxygène : tremper un tube à essai vide dans du diazote liquide pendant au moins 15 minutes pour récupérer du dioxygène liquide.

Prendre un aimant en U et y rajouter des aimants néodymes pour avoir un entrefer le plus fin possible.

Refroidir cette entrefer avec du diazote. Y verser du dioxygène : il reste pris dans l'entrefer.

Cela met en évidence le caractère paramagnétique du dioxygène, et au passage celui diamagnétique du diazote. Cela s'interprète avec les diagrammes orbitales : O_2 a 2 électrons aux spins parallèles dans 2 orbitales dégénérées, N_2 a sa HO occupée par 2 électrons aux spins opposés.

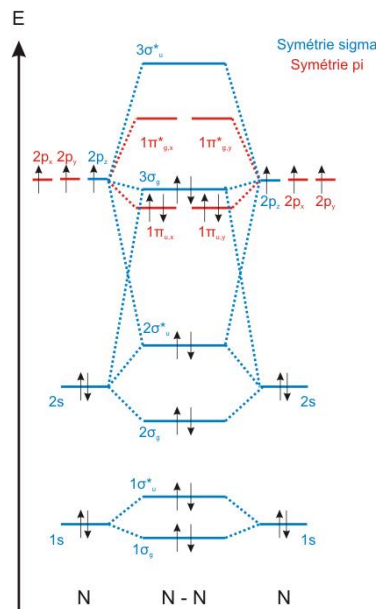


FIGURE 1 – N_2

On a observé qualitativement deux comportements, nous allons maintenant voir comment on peut quantifier l'un des deux : le paramagnétisme

Diagramme d'OM de O_2

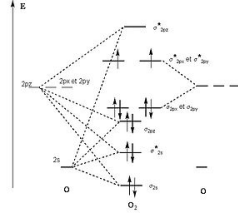


FIGURE 2 – O_2

1.2 Ascension paramagnétique

Fasciule de TP, ascension de $FeCl_3$, besoin d'étalonner l'électroaimant. Mesure de susceptibilité.

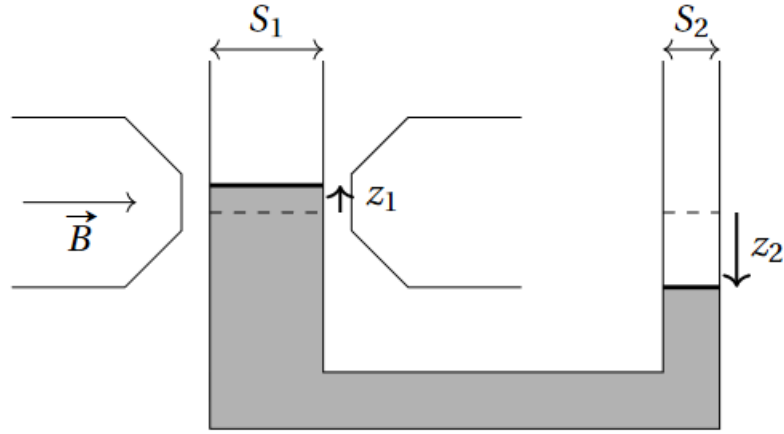


FIGURE 3 – Schéma de principe du montage

Aspects théoriques :

Equilibre hydrostatique :

$$\rho_{sol} \vec{g} - \nabla P + \frac{\chi_{sol}}{2\mu_0} \nabla B^2 = \vec{0}$$

On peut tout rentrer dans le gradient et intégrer entre les 2 surfaces libres à pression atmosphérique :

$$-\rho_{sol} g z_1 + \frac{\chi_{sol}}{2\mu_0} B^2 = \rho_{sol} g z_2$$

On utilise la conservation du volume (liquide incompressible) : $z_1 S_1 = z_2 S_2$ et on obtient :

$$z_2 = \frac{\chi_{sol}}{2\mu_0 \rho_{sol} g \left(1 + \frac{S_2}{S_1}\right)} (B - B_0)^2$$

Pour avoir le rapport $S_2/S_1 = \delta z_1 / \delta z_2$ avec les δz la longueur entre deux graduations.

On utilise ensuite l'additivité des moments magnétiques :

$$\vec{m}_{sol} = \vec{m}_{FeCl_3} + \vec{m}_{eau}$$

On a alors

$$\frac{m_{sol}}{\rho_{sol}} \chi_{sol} = \frac{m_{FeCl_3}}{\rho_{FeCl_3}} \chi_{FeCl_3} + \frac{m_{eau}}{\rho_{eau}} \chi_{eau}$$

$$\chi_{FeCl_3} = \chi_{sol} \frac{\rho_{FeCl_3}}{\rho_{sol} t_m}$$

$\rho_{FeCl3} = 2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_{sol} = 1.41 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ et $t_m = 0.41$ Valeurs données par le TP a vérifier le jour J. $\chi_{eau} = -9 \times 10^{-6}$

Matériel :

- 2 burettes graduées, une avec une petite section et l'autre avec une section de un demi centimètre de diamètre.
- un tuyau réfrigérant
- électroaimant
- teslamètre pour l'étalonnage
- ampèremètre
- alim qui balance des ampères
- potences, noix
- lentille 20cm
- filtre AC
- lampe QI

2 Transition ferro-para (pas le temps...)

On chauffe un clou aimanté, il tombe. C'est pas ouf mais je mets ça là juste au cas où.

3 Ferromagnétisme

- Matériaux Ferromagnétique : Matériaux dont les spins s'orientent préférentiellement dans un sens sur des domaines appelé domaine de Weiss. Il en résulte une aimantation spontanée (à champ nulle) macroscopique
- Matériaux Antiferromagnétique : L'interaction d'échange entre les atomes voisins conduit à un alignement antiparallèle des moments magnétiques. Ceci a pour conséquence une aimantation totale nulle.
- Matériaux ferrimagnétiques : Matériaux dont les interactions entre atomes conduisent à un alignement antiparallèle. Cependant, le moment magnétique de chaque atome y est différent ce qui entraîne une aimantation spontanée non nulle du matériau.

Attention avec le mot "ferrite" : certains ferrimagnétiques sont appelés ferrites (il s'emploie au masculin). Il ne faut pas confondre avec la ferrite qui est un terme métallurgique désignant la phase α du fer.

3.1 Cycle d'hystérésis

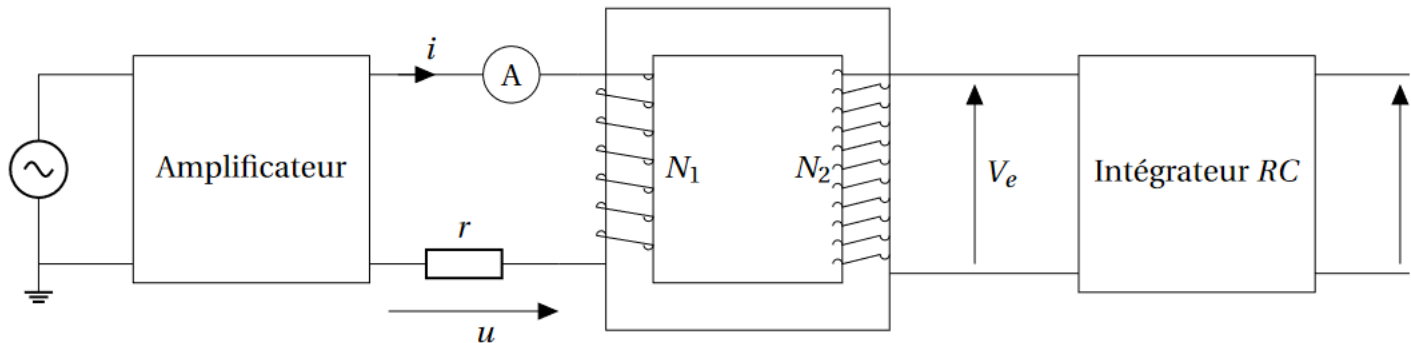


FIGURE 4 – Poly de TP

Cette manipulation s'intéresse uniquement aux matériaux constituant le tore.
 Nous voulons relier l'excitation magnétique H au champ B dans le matériau. L'excitation magnétique est directement reliée au courant traversant la bobine du primaire avec le théorème d'Ampère.

$$H = \frac{N_1 i}{l}$$

Pour remonter à B on utilise la loi de Faraday qui relie la tension aux bornes de la bobine du secondaire à la dérivée du flux traversant la bobine :

$$V_e = -N_2 S \frac{dB}{dt}$$

On utilise ensuite un intégrateur pour remonter à B

Mesure de B_r et H_c avec les boîtiers. Voir le fascicule de TP.

Il y a un courant max sur le boîtier mais on peut aller plus haut. Le courant max est uniquement pour la désaimantation (Il faut vérifier la notice mais c'est beaucoup plus que les 400mA écrit).

Pour avoir un joli cycle sur Latis pro, bien centré, on prends des acquisitions qui correspondent à des multiples de la période du signal d'entrée pour avoir pile des tours complets et on retranche au signal de sortie sa valeur moyenne (Moy sur Latis) de la sorte on a, en utilisant les formules du TP de jolis cycles.

Si il y a des saturations de l'acquisition sur Latis, identifier si elles viennent de l'entrée ou de la sortie.

- Pour l'entrée : On peut régler la valeur du rhéostat conjointement avec la tension d'entrée.
- Pour la sortie, on peut faire un diviseur de tension avant l'intégrateur

On dessine le cycle sur Latis-pro.

On peut l'exporter sur Regressi en txt puis calculer l'aire

On attend pour le fer doux : $H_c \approx 200 \text{ A/m}$ et $B_r \approx 1 \text{ T}$. Attention à se placer à basse fréquence si on veut avoir le cycle uniquement dû au caractère ferromagnétique de l'hystérésis. En effet, si on augmente la fréquence, il peut y avoir des courants de Foucaults plus importants qui dissipent eux aussi de l'énergie.

Pour le tore de ferrite P66.4/4 on attends $B_r = 0.15 \text{ T}$ et $H_c = 80 \text{ A/m}$. L'avantage du tore de Ferrite est qu'il n'est pas conducteur donc pas de courant de Foucault et que la saturation est plus facilement atteinte. Cependant c'est du ferrimagnétisme et pas du ferro...

Il faut bien saturer le matériau pour mesurer H_c et B_r .

Matériel :

- GBF
- rhéostat 33Ω
- Ampli P47.6 ou 5
- ampèremètre
- Noyau de fer doux
- Intégrateur + boîtier d'alimentation
- Oscillo
- Latis pro + carte d'acquisition

3.2 Désaimantation

On voit que à champ nul, le matériau conserve une aimantation $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{B}$ non nulle. Il est possible d'annuler cette aimantation.

C'est plus visible à l'oscillo avec le mode persistance : on se place à 1 Hz et on diminue doucement l'amplitude de la tension d'entrée. On voit le point converger vers l'origine.

On peut alors tracer la courbe dite de première aimantation, qui nous emmène vers le cycle. Une fois le cycle atteint, impossible de le changer sans changer l'amplitude.

4 Domaines de Weiss

Manip tampon. Ne le faire que qualitiatif.

Sans la lame on croise les polariseurs (un polariseur est en dessous de du microscope et un qui n'est pas réglable dans l'intervalle optique.) On place la lame et on fait la mise au point et on approche un aimant pour observer la variation des domaines.

Le principe de la manip repose sur l'effet Faraday. Le plan de polarisation subit une rotation en fonction du moment des dommaines. Ainsi on a des gris de couleurs différentes en fonctions des zones. Attention, c'est un cas particulier où la partie la plus sombre ne correspond pas à une parois de Block mais bien à un domaine.

5 Mesure d'aimantation

On cherche à mesurer l'aimantation du néodyme $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Les aimants en néodymes sont des matériaux ferromagnétiques saturés.

Matériel :

- Aimant néodyme assez gros (1cm d'épaisseur, 2 cm de diamètre)
- Ampèremètre
- Alim qui balance 5A
- Support boy
- balance
- dispositif à 2 bobines réglables Jeulin
- Statifs, noix, tiges
- Teslamètre à sonde ronde P64.26/2
- Support pvc 10 cm de haut
- niveau
- Pince en bois

Jolidon p. 135 Le montage est chaud à mettre en place. Photos.

Il faut faire attention à la mise en place, c'est délicat. Commencer par placer la plaque des bobines en la tenant avec 2 pinces. Il faut rajouter une autre pince pour tenir la bobine déplaçable. L'écart entre les bobines doit valoir $2d = \sqrt{3}R = 11.4\text{ cm}$. Il est difficile de viser cette valeur exactement, ce n'est pas très grave. Vérifier le niveau de chaque pièce.

Les bobines doivent être alimentées en anti-Helmholtz, avec 5A. Avant de mesurer quoi que ce soit, il faut vérifier que la balance et le support avec l'aimant puissent passer sous l'installation.

Il faut commencer par étalonner le champ magnétique en fonction de la position à l'aide de la sonde qui s'accroche. On repère la zone où le gradient est constant. Laisser un point pour devant le jury.

Ensuite, on remonte à la valeur du gradient de potentiel a dans la zone linéaire. On en déduit la mesure de M de la manière suivante :

Un aimant de moment magnétique M plongé dans un champ magnétique extérieur $\mathbf{B}$ subit une force :

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathcal{M} \cdot \mathbf{B})$$

Selon l'axe de la bobine : $F_z = \mathcal{M} \frac{dB}{dz}$.

Le champ créé par les bobines placées en $\left(\frac{-\sqrt{3}R}{2}, \frac{\sqrt{3}R}{2}\right)$ a pour expression, sur l'axe :

$$\mathbf{B} = \frac{48\sqrt{3}}{49\sqrt{7}} \frac{\mu_0 N I}{R} \left[\frac{z}{R} + O\left(\left(\frac{z}{R}\right)^5\right) \right] \vec{e}_z$$

Ici, l'aimant subit une force $F = Ma$. Pour mesurer cette force, on se sert de la balance. On surélève l'aimant au centre des bobines. Il doit être le plus centré possible. Pour le déposer, utiliser une pince en bois. Il faut le poser dans le bon sens : lorsqu'on s'approche, on sent une force vers le haut ou le bas. L'aimant doit être plaqué vers le bas, sinon il se retourne. On mesure la masse indiquée par la balance quand l'aimant est placé, on descend

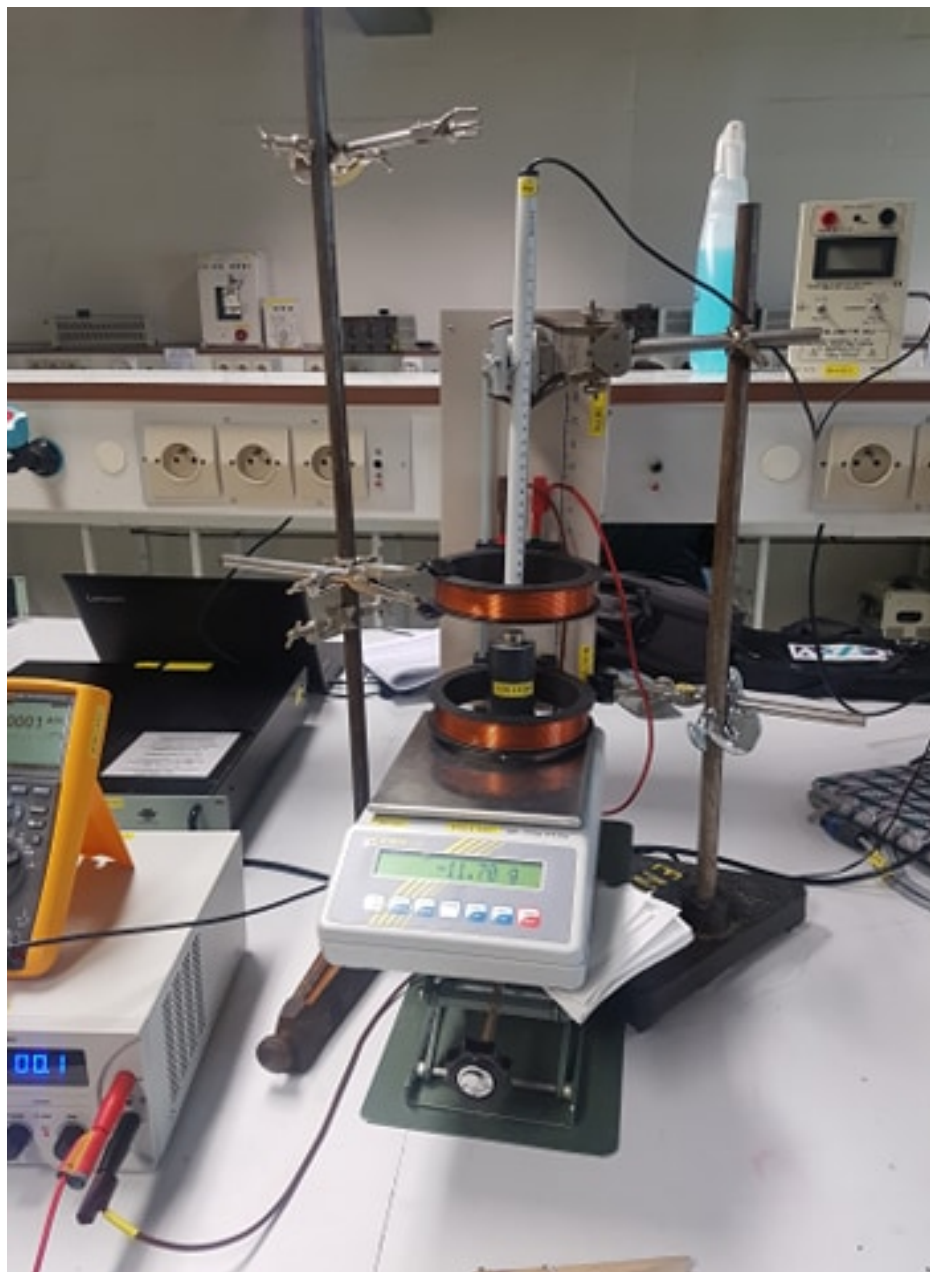


FIGURE 5 – *Photo du montage.*

doucement le courant et on lit une nouvelle fois la masse. La différence correspond au poids compensant la force magnétique :

$$g\Delta m = a\mathcal{M}$$

Au centre de spires, le gradient est le plus constant.

On suppose que l'aimant est ponctuel : sa hauteur doit être négligeable devant $2d$ et son diamètre négligeable devant celui des bobines. On peut considérer le champ constant à l'échelle de l'aimant. Il doit être parfaitement centré. Le champ est par ailleurs nul au centre : l'aimant n'acquiert pas d'aimantation induite. Pour placer l'aimant, s'aligner avec la sonde.

Les bobines ont $N = 95$ spires, on les alimente à $I \approx 5$ A.

On en déduit le moment magnétique de l'aimant. On remonte alors à l'aimantation à l'aide du volume de l'aimant, qu'il faut mesurer avec un pied à coulisse. En effet, $\mathbf{M} = \frac{dM}{dV}$

Pour un aimant en néodyme, on attend $M = 10.3 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

Pour améliorer la mesure : on peut faire la même mesure pour différents courants et remonter à M par régression linéaire sur I .

Ecart au modèle :

- Aimant non ponctuel
- tout son volume n'est pas aimanté
- Si on l'a déjà chauffé, il a pu se désaimanter

Conclusion

Nous avons vu 2 types de matériaux magnétiques : des matériaux ayant une réponse linéaire au champ extérieurs (les para et diamagnétiques) et ceux ayant une réponse non linéaire et se caractérisant par exemple pour les ferromagnétiques par une aimantation non nulle en champ nulle.

Nous avons également discuté le fait que l'on peut caractériser cette non linéarité en traçant le cycle d'hystérésis du champ B au sein d'un matériau en fonction de l'excitation H . Nous sommes remonté à ce comportement avec une interprétation microscopique : les domaines de Weiss.