

# MP16 – MILIEUX MAGNÉTIQUES

14 avril 2020

Yohann Faure & Aurélien Goerlinger

## Bibliographie

- ⚡ Dictionnaire d'expériences IV, Quaranta → FeCl<sub>3</sub>
- ⚡ TP d'électromagnétisme, Jérémie Ferrand → poly de TP, chapitre 2

## Questions

- Expliquer le choix des pièces cylindriques ou de pièces tronconiques pour l'électroaimant. *Une pièce cylindrique donne un champ uniforme et une pièce tronconique donne un champ plus fort (canalise les lignes de champs mais avec conservation du flux magnétique car  $\text{div}(\vec{B})=0$ ) mais moins uniforme.*
- Qu'est-ce qui limite l'intensité dans un électroaimant ? *Effet Joule qui peut endommager l'électroaimant.*
- Comment peut-on justifier la non linéarité de B en fonction de I quand on étalonne l'électroaimant ? *Saturation de l'aimantation lorsque tous les moments magnétiques sont alignés. Cependant, H continue d'augmenter avec I et donc B continue d'augmenter. C'est  $\vec{M}$  que l'on sature.*
- En plus des pertes fer et cuivre, quelle autre type de perte rencontre-t-on ? *On peut avoir des pertes par courants de Foucault si on a un champ  $\vec{B}$  qui n'est pas uniforme. Pour limiter ces courants, on utilise des matériaux feuilletés.*
- Sur la courbe d'étalonnage, on voit un chi2 de 3,02. C'est bien ou pas bien ? *C'est pas le top mais c'est bien, on veut viser 1. Se référer au cours sur les incertitudes. Il faut minimiser le nombre de degrés de libertés car on peut tout modéliser avec suffisamment de nombre de degrés de libertés.*
- Pourquoi l'électroaimant est encore aimanté même quand on a fait redescendre à zéro l'intensité le parcourant ? *A cause du cycle d'hystérésis, il reste un champ rémanent  $B_r$ .*
- Quelle est la taille caractéristique d'un domaine dans lequel les moments sont globalement alignés ? *Les domaines de Weiss ont une taille caractéristique d'un micromètre. Ils font tourner la polarisation de la lumière par effet Faraday. Quand on impose un champ, certains de ces domaines se rétrécissent ou d'autres grandissent. L'énergie perdue via le cycle d'hystérésis a été utilisée pour faire bouger les parois. Expérience pour le mettre en évidence : effet Barkhausen (déformation mécanique qui a un effet acoustique).*
- Comment retrouver  $\chi_{FeCl_3}$  à partir de  $\chi_{sol}$  ? *On le fait grâce à l'additivité des moments magnétiques volumiques. Cf le calcul fait dans ce rapport.*
- Quelle est l'OdG élémentaire de l'aimantation ? *C'est le magnéton de Bohr, qui vaut environ  $10^{28} m^{-3}$ .*
- Comment faire la différence entre les pertes fer et par courants de Foucault ? *Les pertes par courant de Foucault sont en  $f^2$  ( $f$ =fréquence) tandis que les pertes fer sont en  $f$  (dépendent du nombre de cycles parcourus par seconde).*
- Pourquoi utiliser un rhéostat ? *Dans le primaire on a de grosses intensités. Dans le secondaire, l'impédance de l'intégrateur est grande donc l'intensité est faible et donc on peut utiliser des composants normaux.*

## Commentaires

- Attention à ne pas confondre l'erreur de lecture d'un appareil (nombre de digits) à son erreur systématique. Dans le cas de l'oscilloscope, l'erreur systématique est de 3 % environ et est supérieure à l'erreur de lecture.
- Un récipient en verre avec de l'azote liquide peut (**et va**) casser.
- Bien maîtriser l'électronique.
- Faire un peu gaffe à l'azote liquide près de l'électronique, prévoir une pince en plastique ou en bois pour manipuler les aimants.

## Expériences

- Mise en évidence du paramagnétisme de l'aluminium et du diamagnétisme du bismuth. (*Qualitatif*)
- Mise en évidence du paramagnétisme de  $O_2$ . (*Qualitatif*)
- Ascension d'un fluide paramagnétique ( $FeCl_3$ ), mesure de  $\chi_M$ .
- Étallonnage de l'électroaimant. (*Hors champs*)
- Mesure de la température de transition ferro-para du fer. (*semi-Qualitatif*)
- Aimantation et cycle d'hystérésis d'un ferromagnétique, mesure des pertes fer et de propriétés du cycle.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Comparaison qualitative des différents magnétismes</b>	<b>3</b>
1.1	Barreau métalliques . . . . .	3
1.2	Liquides magnétiques . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Mesure de Susceptibilité paramagnétique</b>	<b>4</b>
2.1	Théorie . . . . .	4
2.2	Expérience . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Cycle d'aimantation des ferromagnétiques</b>	<b>6</b>

## Introduction

Le magnétisme est un phénomène naturel qui désigne la propriété des matériaux à s'aimanter lorsqu'on leur applique un champs magnétique extérieur. Un matériaux magnétique présente donc une aimantation  $\vec{M}$  lorsqu'on on lui applique  $\vec{B}$ . On note alors  $\mu = \mu_0\mu_r$  (perméabilité et perméabilité relative) et on a

$$\vec{B} = \mu(\vec{H})\vec{H} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

On définit également  $\mu_r = 1 + \chi_m$ , de sorte que

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

$\vec{M}$  l'aimantation est un champs qui traduit la réponse macroscopique du matériaux au champs magnétique. La force s'exerçant sur un matériaux magnétique s'exprime comme suit :

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

Dans ce montage, nous allons étudier trois types de milieux magnétiques :

- les milieux diamagnétiques qui ne comportent que des atomes non magnétiques, ce magnétisme trouve son origine dans la modification du mouvement orbital des électrons sous l'effet de l'excitation magnétique :  $\chi_d < 0$  (loi de Lenz) et  $\chi_d \sim -10^{-5}$
- les milieux paramagnétiques possèdent de atomes portant des moments magnétiques permanents qui n'interagissent que très peu entre eux :  $\chi_p > 0$  et  $\chi_p \sim 10^{-4}$  à température ambiante
- les milieux ferromagnétiques possèdent des atomes portant des moments magnétiques permanents qui interagissent fortement entre eux :  $\chi_f > 0$  et  $\chi_f \gg \chi_p$ .

On approxime  $\mu = \mu_0$  du fait des faibles valeurs de  $\chi$ .

$$\vec{F} = (\vec{M} \cdot \vec{\nabla})(\vec{B}) \simeq \frac{\chi_m}{2\mu_0} \vec{\nabla}(\vec{B}^2)$$

## 1 Comparaison qualitative des différents magnétismes

Nous allons commencer par mettre en évidence de manière qualitative l'existence de ces trois comportements, additifs en théories mais disjoints en pratique du fait de leur différence d'échelle.

Pour un matériau paramagnétique ( $\chi_m > 0$ ), la force est dirigée suivant le gradient du champ. À l'inverse, pour un matériau diamagnétique ( $\chi_m < 0$ ), la force est dirigée dans le sens opposé au gradient.

### 1.1 Barreau métalliques

Pour générer un gradient de champ magnétique, nous allons utiliser les pièces tronconiques de l'entrefer d'un électroaimant.

#### Expérience des barreaux métalliques dans l'entrefer d'un électroaimant



##### Matériel :

- Électroaimant P66.29 avec pièces tronconiques
- Générateur de tension continue P53.13
- barreaux P63.3
- Ampèremètre
- trombone
- Flexcam

##### Protocole :

Tu suspendes les barreaux d'aluminium (para) et de bismuth (dia), il faut que le fil ait une torsion super faible. Tu allumes le jus et paf ça s'alligne ou s'antiallign, et t'es content !

Ne jamais éteindre brutalement le générateur de l'électroaimant : l'inductance des bobines étant importante, une variation brutale d'intensité provoque une surtension qui risque de l'endommager.

L'électroaimant génère un champ magnétique non-uniforme dans l'entrefer, dont le gradient (radial) est dirigé vers son centre. L'aluminium est un matériau paramagnétique, il subit une force dans le sens du gradient, qui tend à ramener ses extrémités sur l'axe de l'entrefer. Le bismuth est un matériau diamagnétique, il subit une force de sens opposé au gradient, qui tend à placer ses extrémités perpendiculairement à l'axe de l'entrefer.

Montrer que si on prend un barreau ferromagnétique comme un trombone, on colle le trombone à l'aimant, ce qui met en évidence le ferromagnétisme.

## 1.2 Liquides magnétiques

Les liquides aussi ont des comportements magnétiques, comme par exemple le dioxygène et le diazote. Le dioxygène est paramagnétique du fait de sa configuration électronique, comme nous allons le montrer.

### O2 et N2 liquides dans l'électroaimant

Matériel :

- Electroaimant P66.29 avec pièces tronconiques
- Générateur de tension continue P53.13
- N2 liquide
- Ampèremètre
- Tubes à essai
- Flexcam

**Protocole : resserrer l'entrefer !!!!!**

$$T_e(N_2) = 77,36K$$

$$T_e(O_2) = 90,19K$$

On prépare du O2 liquide en le faisant condenser grâce au N2. Pour se faire, on met du N2 dans un thermos adapté, et on met à tremper dedans des tubes à essai vides. Ils vont se remplir d'O2 liquide.

Tu verses à champs nul du N2 et du O2, rien ne se passe. Tu fais pareil à champs fort, et paf, O2 se coince.

On a mis en évidence les différents comportements, nous allons maintenant mesurer la susceptibilité magnétique d'un liquide ferromagnétique.

## 2 Mesure de Susceptibilité paramagnétique

Dans cette partie, on s'intéresse particulièrement au paramagnétisme. Dans ces conditions, les moments magnétiques des atomes s'orientent selon le champ magnétique appliqué. L'observation de cet effet dépend de la température et nécessite d'utiliser des atomes dont les sous-couches électroniques ne sont pas toutes remplies.

Ici, on se propose de mettre en évidence cet effet en utilisant une solution de FeCl<sub>3</sub> dans un tube en U.

### 2.1 Théorie

On notera  $z_1$  et  $z_2$  les altitudes définies positives par rapport à l'altitude de l'électroaimant des fluides dans chacun des tubes. Lorsque l'on applique un champ magnétique  $\vec{B}$  au fluide, il subit une force volumique qu'il faut ajouter quand on écrit l'équilibre hydrostatique :

$$\vec{0} = \vec{\nabla}(-P - \rho_{sol}gz + \frac{\chi_{sol}}{2\mu_0}\vec{B}^2) \quad (1)$$

Ainsi, on retrouve le théorème de Bernoulli duquel on peut déduire l'expression de la variation d'altitude du fluide en fonction du champ  $\vec{B}$  appliqué :

$$\delta h = z_1 + z_2 = \frac{\chi_{sol}}{2\rho_{sol}g\mu_0} \vec{B}^2 \quad (2)$$

Or par conservation du volume,  $z_1 S_1 = z_2 S_2$ . Finalement, on obtient :

$$z_2 = \frac{\chi_{sol}}{2\rho_{sol}g\mu_0(1 + \frac{S_2}{S_1})} \vec{B}^2 \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\chi_{sol}}{2\rho_{sol}g\mu_0(1 + \frac{S_2}{S_1})}$$

On obtient ainsi  $\chi_{sol}$  via  $z_2 = \alpha \vec{B}^2$ , on a

$$\frac{\chi_{sol}}{\rho_{sol}} = 2g\mu_0(1 + \frac{S_2}{S_1})\alpha$$

Cependant, on cherche à déterminer  $\chi_{FeCl_3}$ . Il faut donc l'exprimer en fonction de  $\chi_{sol}$ . Pour cela, on utilise l'intensivité de l'aimantation  $V_{sol}M_{sol} = \sum_i V_i M_i$  et on introduit le titre massique  $t_m = \frac{m_{FeCl_3}}{m_{sol}}$ . Ainsi,

$$\frac{\chi_{sol}}{\rho_{sol}} = t_m \frac{\chi_{FeCl_3}}{\rho_{FeCl_3}} + (1 - t_m) \frac{\chi_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}$$

On obtient alors

$$\chi_{FeCl_3} = \frac{\rho_{FeCl_3}}{t_m} \left( \frac{\chi_{sol}}{\rho_{sol}} + (t_m - 1) \frac{\chi_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \right) \quad (4)$$

Ainsi, on peut connaître l'expression de  $\chi_{FeCl_3}$  après avoir mesuré le coefficient de proportionnalité  $\alpha$  entre  $z_2$  et  $B^2$  :

$$\chi_{FeCl_3} = \frac{\rho_{FeCl_3}}{t_m} \left( 2\alpha\mu_0g(1 + \frac{S_2}{S_1}) + (t_m - 1) \frac{\chi_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \right) \quad (5)$$

On donne  $\chi_{H_2O} = -9.051 \cdot 10^{-6}$  (susceptibilité volumique),  $\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg/m}^3$ , et  $t_m = 0.41$ . Ces valeurs seront considérées sans incertitude ou d'incertitude négligeable par rapport à la mesure.

## 2.2 Expérience

### Étalonnage de l'électroaimant

➤ Garing Magnétisme, p.310

⊖ n min

Matériel :

- électroaimant P66.29 avec pièces tronconiques,
- alimentation P53.13,
- teslamètre P64.34,
- ampèremètre
- Potence pour maintenir la sonde du teslamètre

Pour différentes valeurs d'intensité  $I$  (entre 1 et 6 A) parcourant l'électroaimant et mesurée à l'ampèremètre, relever dans l'entrefer la valeur du champ magnétique avec le teslamètre. Afin de compenser les défauts de soudure de la sonde, il faut penser à moyenniser chaque mesure du champ magnétique retournant la sonde. Modéliser la courbe obtenue par un polynôme d'ordre 3 ou une droite, à voir.

### Mesure de la susceptibilité magnétique d'une solution de $\text{FeCl}_3$

↗ Garing Magnétisme, p.310

⊖ n min

#### Matériel :

- électroaimant P66.29 avec pièces tronconiques,
- alimentation P53.13
- tube en U P63,
- solution de  $\text{FeCl}_3$  P75 ( $\rho_{sol} \simeq 1.41 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  et  $t_m = 41\%$ ),
- lampe QI + antical + lentille.

Introduire la solution de  $\text{FeCl}_3$  dans le tube en U. Placer la branche du tube de plus grande section  $S_1$  de sorte à ce que le ménisque du fluide soit au niveau de l'entrefer. Avec la QI, l'antical et la lentille, faire l'image de la seconde branche du tube de manière à ce qu'on voit clairement sur le mur (ou un écran) les graduations. Pour différentes valeurs de I parcourant l'électroaimant, relever les valeurs de  $z_2$ . Puisqu'on a préalablement étalonné l'électroaimant, on connaît  $B=f(I)$  et donc on peut tracer  $z_2$  en fonction de  $B^2$ . Il faut faire attention à exercer deux ou trois fois une petite pression manuelle sur le tuyau pour s'assurer que l'altitude  $z_2$  mesurée est bien l'altitude à l'équilibre, sans bulles d'air ou autres phénomènes de capillarité. Le coefficient de proportionnalité permet de remonter à la valeur de  $\chi_{\text{FeCl}_3}$ .

Le rapport des surfaces du petit et du grand tube vaut 5.465. Une graduation du petit tube mesure 0.00184 m.

Théoriquement, on attend  $\chi_{\text{FeCl}_3} = 3.3 \cdot 10^{-3}$ . En pratique, on devrait avoir une valeur un peu plus faible car la solution a vécu.

#### Amélioration de la mesure :

- Le fait d'avoir une surface  $S_2$  plus petite que la surface  $S_1$  implique un déplacement  $z_2$  plus grand et donc plus facile à mesurer.
- Les pièces tronconiques permettent d'avoir un champ  $\vec{B}$  plus grand mais moins homogène qu'avec des pièces cylindriques.
- Au lieu de projeter sur un mur ou un écran, on pourrait prendre des photos du tube en U et analyser les images sur ImageJ pour être plus précis.

## 3 Cycle d'aimantation des ferromagnétiques



### Observation d'un cycle d'hystérésis pour un tore de ferrite

↗ ref

⊖ temps

#### Matériel :

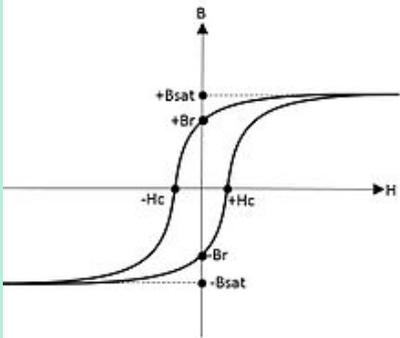
- GBF,
- amplificateur de puissance HSA4005 P47.6 ou 4011 P47.5,
- rhéostat de  $33 \Omega$  P61.3,
- intégrateur RC P42.45 alimenté par le boîtier P42.39 (**Fonctionnement décrit dans MP15**)
- tore de ferrite P66.4/4 (tore à base carrée de côté  $a=12 \text{ mm}$  et de diamètre  $d=52 \text{ mm}$ , soit  $S=a^2$  et  $l=\pi d$ , avec  $N_1=100$  et  $N_2=500$  spires),
- oscilloscope

*Au primaire :* Brancher la sortie du GBF sur l'amplificateur de puissance. L'amplificateur est branché en série avec le primaire du tore de ferrite et le rhéostat de résistance  $r = 33 \Omega$ . Choisir un gain de 10 pour l'amplificateur avec une impédance d'entrée  $Z_{in} = 600 \Omega$ . Pour le GBF, choisir un signal sinusoïdal de fréquence 1 Hz et d'amplitude entre 0 et 500 mV.

*Au secondaire* : Brancher le secondaire du tore de ferrite sur l'entrée DC de l'intégrateur. Régler la résistance interne de l'intégrateur sur  $R = 10 \text{ k}\Omega$ .

*Oscilloscope* : Afficher la tension  $u$  aux bornes du rhéostat sur la voie 1. Afficher la tension  $V_S$  en sortie de l'intégrateur sur la voie 2. Utiliser l'oscilloscope en mode XY. Augmenter la tension du GBF jusqu'à 2 V pour observer la saturation du matériau. Mesurer le champ rémanent  $B_r$  et l'excitation coercitive  $H_c$  du matériau via les formules :

$$B = V_s \frac{RC}{N_2 a^2} \quad \text{et} \quad H = u \frac{N_1}{r \pi d}$$



Pour le tore de ferrite P66.4/4, on a  $B_r \simeq 0,15 \text{ T}$  et  $H_c \simeq 80 \text{ A/m}$ . Ces valeurs donnent un ordre de grandeur des pertes fer, que nous allons déterminer précisément dans la manip suivante.

### Calcul des pertes fer pour un tore de ferrite

↗ ref

⊖ temps

Reprendre le montage précédent mais cette fois réaliser l'acquisition de  $u$  et  $V_S$  sur Latis-Pro. Le cycle doit être centré autour de 0, pour cela décharger le condensateur avant la mesure et/ou retirer à  $V_S$  sa moyenne avec la FEUILLE DE CALCUL. Convertir les tensions à l'aide de la FEUILLE DE CALCUL pour remonter à B et H. Latis-Pro n'ayant pas de fonction prédéfinie permettant de calculer une aire, nous allons utiliser Regressi. Exporter B et H dans un fichier au format txt (Menu FICHER/EXPORTATION), puis ouvrir le fichier sous Regressi. Dans l'onglet EXPRESSION, calculer les pertes avec la formule :  $P = \text{aire}(B,H)$ .

On est censé avoir  $P_v \simeq 50 \text{ J/m}^3$ . L'ordre de grandeur se retrouve facilement en assimilant le cycle à un rectangle de largeur  $2H_c$  et de hauteur  $2B_r$ , *i.e.* d'aire  $4B_r H_c$ .

On peut comparer à la puissance d'entrée envoyée dans le tore  $P_{\text{entrée}} = UI$

### Première aimantation et dés-aimantation d'un tore de ferrite :

Montrer comment on désaimante le matériau en parcourant le cycle d'hystérésis dans un sens puis dans un autre plusieurs fois en baissant l'amplitude du signal délivré par le GBF.

On peut également obtenir la courbe de première aimantation du matériau en délivrant une tension continue avec le GBF que l'on augmente progressivement de 0 à 2 V (saturation).

## Conclusion

L'étude que nous venons de faire permet de caractériser les milieux magnétiques et d'en déterminer les propriétés, afin de mieux en tirer avantage dans une application industrielle par exemple. La conversion de puissance électrique est une application directe de ce montage.