

MP16 - Milieux magnétiques

Clément (de la Salle et Colléaux)

29 mars 2020

Niveau : L3

Bibliographie

- ↗ Quaranta IV
- ↗ Garin EM
- ↗ Montages de Physique, *Patrick Charmont*
- ↗ BFR EM IV

Prérequis

Expériences

- ☞ Comparaison dia-para (qualitatif)
- ☞ Ascension du FeCl_3
- ☞ Cycle d'hystérésis d'un ferro

Rappels sur les milieux magnétiques

= milieux capables d'acquérir une aimantation \mathbf{M} lorsqu'ils sont soumis à un champ extérieur \mathbf{B} . Leur grande utilisation (disques durs, transformateurs, canaliseurs du flux dans les bobines..) rend nécessaire leur caractérisation théorique et expérimentale. Un milieu magnétique est défini par sa susceptibilité magnétique χ qui entre en jeu dans la relation constitutive des milieux magnétiques :

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H} = \mu_0\mu_r\mathbf{H} = \mu\mathbf{H}$$

Ces milieux magnétiques sont répartis en 3 grandes familles (qui ne prend pas en compte les antiferromagnétiques, les ferrimagnétiques..)

- les milieux paramagnétiques : $\chi > 0$ et $|\chi| \sim 10^{-3}$: aluminium, FeCl_3 ..
- les milieux diamagnétiques : $\chi < 0$ et $|\chi| \sim 10^{-5}$: bismuth,.. les milieux ferromagnétiques : $\chi = \chi(\mathbf{H}) > 0$ et $\chi \sim 100$: Fer, Cobalt, Nickel

Commençons par regarder l'impact du signe de χ .

1 Comparaison qualitative paramagnétisme - diamagnétisme

But

Montrer de façon rapide la différence de comportement de milieux para ou dia soumis à un champ extérieur.

Théorie

On peut montrer l'expression de la force volumique subie par un milieu para/dia soumis plongé dans un champ \mathbf{B} :

$$\mathbf{f} = \frac{\chi}{2\mu_0} \vec{\nabla} B^2$$

On a alors deux comportements radicalement différents pour des milieux para ou dia : les milieux paramagnétiques subissent une force dans le sens du gradient de B^2 , dans le sens opposé pour les milieux diamagnétiques. On se propose d'illustrer cette différence par une petite expérience qualitative :

Expérience : Comparaison para-dia

➤ Quaranta, fascicule TP

⊕ 2/3 min

Prendre un électro-aimant P66.29 et visser les **pièces tronconiques** que l'on espace de 1 cm. Alimenter l'électro-aimant avec le générateur de tension continue P53.13 et mesurer I qui ne doit pas dépasser 6 A. On suspend alors avec un fil deux barreaux, un de bismuth (dia) et un d'aluminium (para) et on les filme à la flexcam. Le barreau d'aluminium tend à s'orienter selon l'axe de l'entrefer et le barreau de bismuth perpendiculairement à cet axe. Pour mieux voir cet effet on peut tourner l'aimant donc l'axe de l'entrefer et vérifier les observations.

ATTENTION : pour éteindre l'électro-aimant baisser progressivement l'intensité à 0.

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

2 Mesure de la susceptibilité d'un milieu paramagnétique

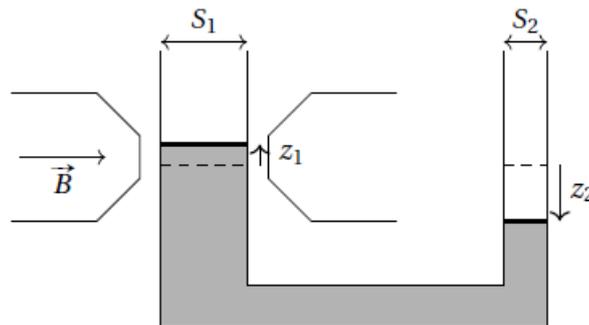


FIGURE 2.1 – Schéma du montage

On va utiliser le champ créé par un **deuxième** aimant tronconique pour mesurer χ . Le champ magnétique va faire monter le ménisque grâce à la force volumique déjà discutée, car le gradient est bien radial donc dans le bon sens. Comme l'élévation du ménisque z_1 dépend de χ on va pouvoir remonter à la valeur de χ pour le FeCl_3 en effectuant l'expériences pour plusieurs valeurs de \mathbf{B} . Pour s'assurer un champ fort, il faut rapprocher les pièces tronconiques au plus près du tube, ce qui empêche alors de mettre un teslamètre ou une sonde à effet Hall pour mesurer B . Il faut alors calibrer l'électro-aimant !

But

Calibrer l'électro-aimant : $B = B(I)$

Expérience : Étalonnage de l'électro-aimant

🔧 ⌀

⌚ 5 min

Fixer un écart entre les pièces qui permet la réalisation de l'expérience suivante (passage nécessaire du tuyau) 1.4 cm ça passe. Fixer une sonde à effet Hall vers le centre de l'entrefer, perpendiculairement à l'axe de l'entrefer. De 0 à 4 A, et ce de 0.25 en 0.25 A **dans le sens croissant**, relever la mesure de B en n'oubliant pas de retourner la plaque pour faire une moyenne des deux mesures (on s'affranchit du sens des soudures et autre chose mais je sais plus quoi). On applique alors un modèle polynomial d'ordre 3 et on regarde si le modèle linéaire est une approximation raisonnable.

Maintenant que c'est étalonné on peut passer à la vraie expérience :

But

Mesurer la susceptibilité magnétique du FeCl_3 pur paramagnétique

🔧 *Quaranta*

🔧 *Garing Magnétisme, p.310*

🔧 *BFR EM IV, p.134*

On l'a dit, l'application d'un champ magnétique va induire une force qui va faire monter le ménisque d'une hauteur z_1 . On peut alors écrire l'équilibre du ménisque :

$$\rho_{\text{sol}} \mathbf{g} + \frac{\chi_{\text{sol}}}{2\mu_0} \vec{\nabla} \mathbf{B}^2 \implies \vec{\nabla} \left(-\rho_{\text{sol}} g z + \frac{\chi_{\text{sol}}}{2\mu_0} \mathbf{B}^2 \right) = \mathbf{0}$$

Pour les deux surfaces il vient donc, avec les notations du schéma :

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

la conservation du débit impose $z_1 S_1 = z_2 S_2$.

On obtient alors finalement la relation utile :

$$z_2 = \frac{\chi_{\text{sol}}}{2\mu_0 g (1 + S_2/S_1)} B^2$$

Expérience : Mesure de la susceptibilité

🔧 Quaranta, BFR, Garing

⌚ 5 min

On utilise le dispositif en U P63 préalablement rincé à l'eau. On le remplit au tiers avec la solution de FeCl_3 à 41 % en masse ($\rho_{\text{sol}} \sim 1.41 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) et préparer un papier millimétré derrière le tube 2 pour faciliter la photo et la mesure de z_2 réalisée sur ImageJ. Effectuer cette mesure pour plusieurs valeurs de I **croissantes** entre 0 et 6 A puis tracer $z_2(I)$ puis, à l'aide de l'étalonnage, $z_2(B^2)$. On a alors χ_{sol} .

Il faut alors passer de χ_{sol} à χ_{FeCl_3} en supposant la solution homogène et que la **susceptibilité est linéaire avec la concentration** :

$$\begin{aligned}\vec{m}_{\text{sol}} &= \vec{m}_{\text{FeCl}_3} + \vec{m}_{\text{eau}} \\ V_{\text{sol}} \vec{M}_{\text{sol}} &= V_{\text{FeCl}_3} \vec{M}_{\text{FeCl}_3} + V_{\text{eau}} \vec{M}_{\text{eau}} \\ V_{\text{sol}} \chi_{\text{sol}} \vec{H} &= V_{\text{FeCl}_3} \chi_{\text{FeCl}_3} \vec{H} + V_{\text{eau}} \chi_{\text{eau}} \vec{H} \\ \frac{m_{\text{sol}}}{\rho_{\text{sol}}} \chi_{\text{sol}} &= \frac{m_{\text{FeCl}_3}}{\rho_{\text{FeCl}_3}} \chi_{\text{FeCl}_3} + \frac{m_{\text{eau}}}{\rho_{\text{eau}}} \chi_{\text{eau}}\end{aligned}$$

avec m les masses et ρ les masses volumiques. En supposant que l'influence du diamagnétisme de l'eau est négligeable devant le paramagnétisme de FeCl_3 (on le vérifiera *a posteriori*), on obtient :

$$\chi_{\text{FeCl}_3} \approx \chi_{\text{sol}} \frac{m_{\text{sol}} \rho_{\text{FeCl}_3}}{m_{\text{FeCl}_3} \rho_{\text{sol}}} = \chi_{\text{sol}} \frac{\rho_{\text{FeCl}_3}}{\rho_{\text{sol}} t_m}$$

On vérifie alors bien que la susceptibilité de l'eau $\chi_{\text{eau}} \sim -9 \times 10^{-6}$ est bien négligeable devant celle de FeCl_3 .

3 Étude d'un matériau ferromagnétique

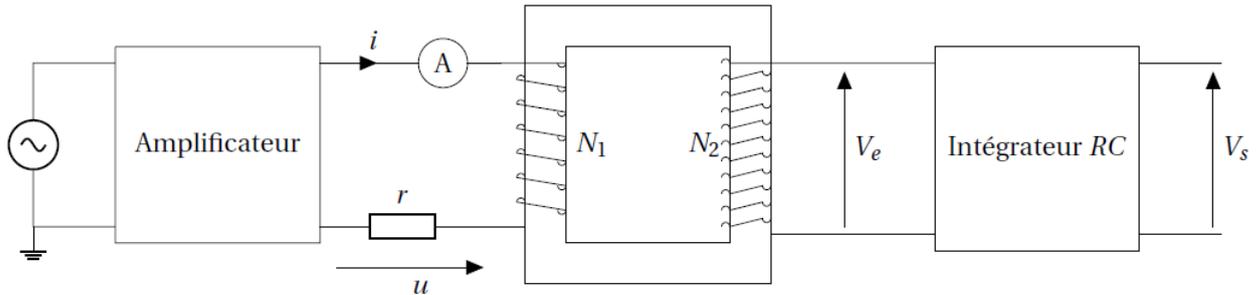


FIGURE 3.1 – Montage du tracé d'un cycle d'hystérésis - Tiré du fascicule de TP d'EM à aller lire pour avoir plus de détails

Expérience : Tracé d'un cycle d'hystérésis acier dur

🔧 Fascicule de TP

⌚ 5/10 min

- Projeter un schéma du montage et **bien l'expliquer** !
- Retransmettre l'oscillo avec une Flexcam! Ou mieux : avec le câble adapté qui permet de projeter directement l'écran de l'oscillo
- Commencer par voir le cycle de première aimantation (fréquence très grande et on augmente petit à petit la tension)
- Justifier le choix de la fréquence (bien voir le cycle en entier)
- Utiliser le tore de ferrite (2 Volt et sur 10 k et rhéostat de 33) bien faire attention au branchement des masses! Pour le ferrite on attend $B_r \simeq 0.15$ T et $H_c \simeq 80$ A/m que l'on peut avoir en mesurant u et V_s aux bons endroits

Expérience : Calcul des pertes Fer

🔧 ?

⌚ 2/3 min

Reprendre le montage précédent mais cette fois réaliser l'acquisition de u et VS sur Latis-Pro. Le cycle doit être centré autour de 0, pour cela décharger le condensateur avant la mesure et/ou retirer à VS 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 Fichier/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 $P_v \sim 50 \text{ J/m}^3$ qu'il faut comparer à UI pour avoir plus un pourcentage. 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 $4B_r H_c$.

Au primaire, le théorème d'Ampère, $\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = i_{enlac}$, déjà évoqué, permet de faire un lien avec le courant $i = \frac{U}{r}$ qui passe dans la bobine 1. On a alors, en négligeant i_2 par la différence des résistances pondérées par le nombre de spires (33Ω au primaire et $10\,000$ au secondaire avec le même nombre de spires),

$$H = \frac{N_1}{rl} u \propto u \quad (3.1)$$

avec N_1 le nombre de spires du primaire et l la longueur totale du tore.

Au secondaire, en notant ϕ le flux, du champ créé par le primaire, la loi de Faraday indique que

$$V_e = -\frac{d\phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt} \propto \frac{dB}{dt} \quad (3.2)$$

avec N_2 le nombre de spires du secondaire et S la surface d'une spire. À l'aide d'un circuit intégrateur comme un simple RC on peut alors remonter à la valeur du champ B en mesurant $V_s = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_e dt = \frac{N_2 S}{RC} B + C^{st}$, d'où

$$V_s = \frac{N_2 S}{RC} B + C^{st} \propto B \quad (3.3)$$

Ainsi, en traçant U et V_s sur un oscillo en mode XY , on peut tracer, à des constantes multiplicatives près, B en fonction de H et ainsi étudier cette relation non linéaire.

3.1 Interprétation

On peut alors faire plusieurs remarques importantes et définir certaines grandeurs qui seront projetées :

- On voit un cycle d'hystérésis : la valeur de B dépend de l'histoire du matériau
- Pour des grands H , la relation devient affine, la pente théorique est de μ_0 .
- Quand l'excitation extérieure est nulle, $H = 0$, on remarque que le champ B créé par le matériau est **non nul**, c'est une propriété caractéristique d'un matériau ferromagnétique. Quand le cycle est le plus grand possible, $B(H = 0) = B_r$ est appelé **champ rémanent**
- Pour annuler le champ B , il faut appliquer un champ H_c non nul appelé **champ coercitif**

- 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.*
- Quel type de courant envoie-t-on dans l'électroaimant ? *On envoie du courant continu.*
- 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 χ^2 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 liberté car on peut tout modéliser avec suffisamment de nombre de degrés de liberté.*
- 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 χ_{FeCl_3} à partir de χ_{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 choisir la lentille si on veut projeter la descente de FeCl_3 ? *Il faut prendre une lentille convergente de petite focale pour avoir un grand grossissement.*
- Faire le schéma d'un intégrateur RC actif (avec les AOs). *Une résistance plus une autre branche avec un condensateur en parallèle avec une grande résistance, branchés sur la borne -. La borne + est reliée à la masse. La branche condensateur plus grosse résistance en parallèle est également reliée à la sortie de l'AO. On choisit une grosse résistance pour limiter le gain de l'AO à la résonance du RC.*
- Et pour un intégrateur passif ? *On fait un passe-bas RC série avec un suiveur pour avoir un courant d'entrée nul.*
- 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.*

FIGURE 3.2 – Caption

Commentaires

- Mettre le teslamètre sur une pince quand on étalonne l'électroaimant.
- 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.
- Attention quand on écrit $\vec{B} = \mu\vec{H}$ car μ n'est pas forcément une constante mais dépend de \vec{H} (raison pour laquelle on a des cycles d'hystérésis).
- Mieux expliquer le calcul des pertes en % (on mesure UI en entrée et on compare aux pertes fer).
- Un récipient en verre avec de l'azote liquide peut (et va) casser.
- Quelques imprécisions, indéterminations dans les protocoles et les mesures.
- 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.

Manip surprise

On nous donne un banc optique avec certains composants. Il s'agit d'identifier à quoi ce banc sert et de le régler. On a un objectif de microscope, un trou, et un support pour fixer un laser. Sans le trou, on a un faisceau élargi avec du speckle, et il s'agit d'obtenir un faisceau propre en faisant un filtrage passe-bas dans le plan focal image de l'objectif. On aligne le laser sur le trou puis on rajoute l'objectif. On place le trou dans le plan focal image de l'objectif et paf ça fait des chocapics !

NB : éviter le casser le matériel lors de la manip surprise, c'est pas cool.