

MP16 - MILIEUX MAGNÉTIQUES

4 juin 2021

Deleuze Julie & Jocteur Tristan

Niveau : Classes préparatoires

Bibliographie

- ♣ *Fascicule de TP Electromagnétisme, Partie Matériaux,*
Quelqu'un-e
- ♣ *Fascicule de TP Optique, Partie Photorécepteurs,*
Quelqu'un-e

Table des matières

1	Matériaux magnétiques linéaires	4
1.1	Diamagnétisme vs paramagnétisme	4
1.2	Étude d'un matériau magnétique non-linéaire : ferromagnétisme	5
2	Visualisation des domaines de Weiss	6

Remarques sur les montages précédents

- **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.
- **2015, 2016** : Il n'est pas souhaitable de se limiter aux milieux ferromagnétiques. L'étude du transformateur est marginale dans ce montage.
- **2008** : les grandeurs mesurées, telles que les champs rémanent et coercitif, doivent être comparées et/ou commentées.
- **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 ($e = 1$ cm) un champ de l'ordre d'une fraction de tesla ($B = 0,3$ T). 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 ...)

En même temps ptdr le transformateur. En gros ya mille manip qualitatives possibles (bureau de bismuth vs aluminium dans un gradient de champ, lévitation du O₂ liquide, transition ferro-para, domaines de Weiss...) Mais pour les manip quanti c'est plus limité. En fait on a pas trop le choix faut faire l'ascension du liquide para et l'étude du cycle d'hystérésis d'un ferro. Pratique parce que vraiment tout est dans le poly de TP. Utiliser la susceptibilité comme fil rouge, la calculer ou donner ODG à chaque matériaux. Se baser sur le montage de Valentin et Chauchat il était top.

Ascension d'un liquide paramagnétique



Ascension paramagnétique



Diamètres intérieurs : 2,5 et 6,05 mm. Lentille de 16cm

2.2 Ascension paramagnétisme de FeCl_3

✦ [Quaranta IV] à « Paramagnétisme », [Garing Magnétisme] p.310, [BFR EM IV] p.134

Nous allons mesurer la susceptibilité d'une solution de chlorure ferrique FeCl_3 grâce à son équilibre hydrostatique en présence d'un champ magnétique. Auparavant, il est nécessaire de tracer la courbe d'étalonnage $B(I)$ de l'électroaimant avec des pièces tronconiques (le protocole est identique à celui du TP 1).

Espacer d'environ 1 cm les pièces tronconiques de l'électroaimant P66.29. On mesure le champ magnétique avec le teslamètre P64.34 : régler son zéro loin de l'électroaimant (appuyer sur **MENU**, sélectionner Utilities avec le bouton **NEXT**, puis Null, et appuyer sur **RESET**), puis placer son extrémité au centre de l'entrefer perpendiculairement au champ. Alimenter l'électroaimant avec l'alimentation continue P53.13 et mesurer l'intensité I à l'aide d'un ampèremètre.

Pour différents courants I **croissants** allant de 1 à 6 A, mesurer le champ magnétique B au centre de l'entrefer (moyenner les deux mesures réalisées en retournant la sonde pour compenser le défaut d'alignement des soudures). Tracer la courbe d'étalonnage $B(I)$, la modéliser par un polynôme d'ordre 3 et noter ses coefficients.

La solution de FeCl_3 paramagnétique est placée dans un tube en U, on note ρ_{sol} sa masse volumique. L'une des branches est placée dans l'entrefer de l'électroaimant, on note S_1 sa section et z_1 la position de son ménisque (ascendant), comme indiqué sur la figure 2.1. L'autre branche est située en dehors de l'électroaimant, on note S_2 sa section et z_2 la position de son ménisque (descendant).

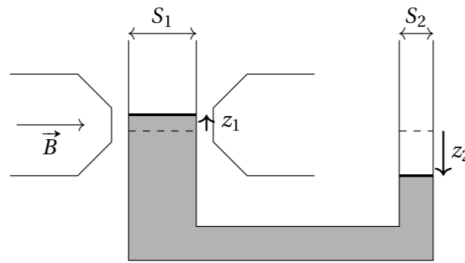


FIGURE 2.1 – Mesure de la susceptibilité paramagnétique d'une solution de FeCl_3 .

En l'absence de champ, le liquide est au même niveau dans les deux branches ($z_1 = z_2 = 0$). En présence d'un champ, la force magnétique fait monter le ménisque z_1 . L'équilibre hydrostatique s'écrit :

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

Soit :

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

En intégrant l'équation entre les 2 surfaces libres à la pression atmosphérique, on obtient :

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

Or par conservation du volume, on a :

$$z_1 S_1 = z_2 S_2$$

On obtient finalement :

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

REMARQUE : l'expression donnée dans [Quaranta IV], [Garing Magnétisme] et [BFR EM IV] ne prend pas en compte le facteur géométrique S_2/S_1 .

On utilise le dispositif en U P63 constitué de deux pipettes graduées reliées entre elles par un tuyau flexible. Commencer par le rincer à l'eau pour réduire les problèmes dus à l'hystérésis de mouillage.

Remplir environ au tiers le tube de la solution de FeCl_3 à 41% en masse P75 ($\rho_{\text{sol}} \approx 1,41 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$). Placer la grosse branche dans l'électroaimant, de manière à avoir le ménisque z_1 au centre de l'entrefer. Projeter l'image du ménisque z_2 sur un écran, en utilisant une lampe et une lentille, afin de faciliter la lecture de son niveau.

Pour différentes intensités I **croissantes** allant de 0 à 6 A, repérer la position z'_2 du ménisque sur l'écran (avec du papier millimétré par exemple).

Calculer le grandissement du dispositif de projection $\gamma = z'_2/z_2$, on pourra par exemple mesurer le rapport de l'image de la section du tube sur sa section réelle. En déduire la position réelle $z_2 = z'_2/\gamma$ du liquide, et la tracer en fonction de I , puis en fonction de B^2 à l'aide des coefficients de la modélisation $B(I)$.

Remonter à la susceptibilité de la solution χ_{sol} par régression linéaire. On pourra estimer le rapport S_2/S_1 en mesurant à la règle l'écart δz_i entre deux graduations correspondant à 1 mL sur chacune des deux branches du tube (on a alors

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{\delta z_1}{\delta z_2}).$$



Le protocole fourni dans le poly est assez complet. Laver le tube à l'éthanol et le sécher à l'air comprimé avant la manipulation. Pour la projection optique on a utilisé une lentille de focale $f = 16$ cm pour avoir un dispositif relativement compact. Les complications sont surtout liées aux phénomènes d'hystérésis du ferromagnétique de l'électroaimant et dus à la capillarité. C'est notamment pour ça que pendant le passage on a préféré faire cette expérience avant la lévitation du dioxygène pour faciliter la prise du point. On réalise une droite en préparation et on rajoute un dernier point à une intensité supérieure à ceux déjà faits (typiquement à 4.5 ou 5 A). Attention une fois l'expérience commencée on ne peut plus toucher au dispositif optique car la grandeur mesurée est une dénivellation ainsi la hauteur initiale doit rester toujours au même endroit à l'écran. Essayer d'avoir une zone de netteté la plus grande possible et qu'elle soit bien centrée par rapport à la dénivellation du liquide. Tout est mis sur potence car sinon y'a des pb d'altitude

1 Matériaux magnétiques linéaires

1.1 Diamagnétisme vs paramagnétisme



Diamagnétisme de N₂ et paramagnétisme de O₂.



Pour cette manip porter des gants cryogéniques lors de la manipulation des liquides et des lunettes de protection contre les projections possibles.

On plonge en préparation un tube à essai vide dans une deware rempli d'azote liquide. Le dioxygène ayant une température d'ébullition plus élevée il va se liquéfier au fond du tube à essai. On utilise l'électroaimant alimenté à intensité maximale (4.5-5 A). En théorie il faudrait avoir un entrefer très fin (de quelques millimètres) mais la manipulation suivante (ascension de FeCl₃) nécessite un étalonnage de l'électroaimant en préparation. Ainsi l'entrefer est réglé à la largeur minimale laissant passer le tube contenant FeCl₃. Les deux liquides (diazote et dioxygène) sont isolants électriques donc il n'y a pas de risque de ce côté là. On verse d'abord l'azote liquide : il est diamagnétique ainsi il n'est pas retenu par le champ magnétique et il chute au milieu de l'entrefer. On verse de l'azote liquide aussi sur les pièces tronconiques pour les refroidir. On verse ensuite le dioxygène liquide dans l'entrefer, il lévite pendant plusieurs secondes.

2.3 Paramagnétisme de l'oxygène (en seconde lecture)

➤ [Quaranta IV] à « Paramagnétisme »

Cette expérience permet de comparer le diamagnétisme du diazote N_2 au paramagnétisme du dioxygène O_2 .

Vous avez normalement accès à de l'azote liquide en salle de TP (demander aux techniciens si besoin). Vous ne disposez pas d'oxygène liquide, mais il est possible d'en produire à partir de l'azote liquide.

Placer un tube à essai vide dans un réservoir d'azote liquide. Après plusieurs minutes, de l'oxygène liquide se condense dans le tube.

En effet, la température de vaporisation du diazote ($T_{v,N_2} = -196^\circ\text{C}$) étant inférieure à celle du dioxygène ($T_{v,O_2} = -183^\circ\text{C}$), on peut obtenir de l'oxygène liquide par condensation de l'air ambiant.

Rapprocher les pièces tronconiques de l'électroaimant P66.29 pour obtenir un entrefer large de quelques millimètres seulement. On peut projeter l'image de l'entrefer sur un écran à l'aide d'une lampe et d'une lentille pour mieux le visualiser.

Alimenter l'électroaimant sous son intensité maximale $I = 6\text{ A}$, puis verser de l'azote liquide au centre de l'entrefer (attention aux projections !). L'azote s'écoule à travers l'entrefer.

REMARQUE : l'azote et l'oxygène liquide sont des isolants électriques, il n'y a donc aucun danger d'un point de vue électrique à réaliser ces expériences.

Recommencer la même expérience avec l'oxygène liquide contenu dans le tube à essai (refroidir préalablement l'entrefer avec de l'azote liquide pour éviter que l'oxygène ne s'évapore trop rapidement). Avant de s'écouler, l'oxygène reste en lévitation plusieurs secondes dans l'entrefer.

Le résultat est semblable aux barreaux de bismuth et d'aluminium placés dans l'entrefer. Le diazote est diamagnétique (comme le bismuth), il s'exerce alors une force qui tend à l'éloigner du centre de l'entrefer. Le dioxygène est paramagnétique (comme l'aluminium), la force permet de le maintenir sur l'axe de l'entrefer, il lévite alors quelques secondes.

1.2 Étude d'un matériau magnétique non-linéaire : ferromagnétisme

3.1 Caractérisation d'un matériau ferromagnétique

➤ [Quaranta IV] à « Ferromagnétisme », [Précis Électrotechnique] p.47-66

3.1.1 Dispositif expérimental

Un matériau ferromagnétique est caractérisé par sa perméabilité magnétique μ , et donc par sa courbe $B(H)$. Nous allons la tracer à partir du montage présenté en figure 2.2.

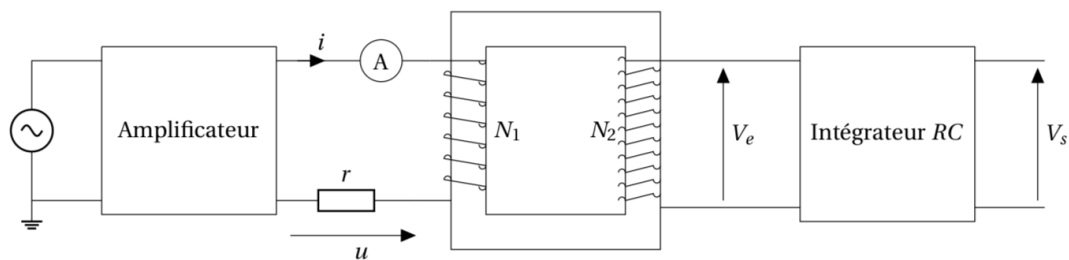


FIGURE 2.2 – Montage permettant de tracer la caractéristique d'un tore ferromagnétique.

Ce montage permet l'étude du matériau ferromagnétique constituant le tore, qui joue ici le rôle d'un transformateur. Le primaire est alimenté par un GBF, suivi d'un amplificateur de puissance (HSA 4005 P47.6 ou 4011 P47.5) nécessaire pour atteindre des intensités suffisantes permettant d'observer le cycle d'hystérésis du matériau. Il comporte également un rhéostat P61.3 de résistance $r = 33\ \Omega$. Le secondaire est constitué d'un intégrateur RC, on utilisera en pratique le boîtier P42.45, alimenté par le boîtier P42.39.

À partir de la tension u aux bornes du rhéostat, on peut remonter à H par le théorème d'Ampère :

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

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

La tension V_e au secondaire est reliée au flux magnétique Φ par la loi de Faraday :

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

avec S la section du tore et N_2 le nombre de spires au secondaire.

On relie ensuite le champ magnétique B à la tension V_e en sortie de l'intégrateur :

Possibilité de comparer plusieurs ferro mais bon là ça fait déjà bcp pas sure qu'on ait le temps de faire la courbe de première aimantation.

2 Visualisation des domaines de Weiss

Bon en fait c'est du mytho leur cycle d'hystérésis (l'hystérésis vient du déphasage entre les signaux si on fabrique un cosinus en phase on a un truc linéaire, c'est logique), il va falloir faire comme dans le Jolidon si on en veut un, sinon on reste sur du quali... J'ai importé le code qui permet de moyenner quand même, on peut en tirer le profil du signal et sa fréquence à la limite...



Visualisation des domaines de Weiss

poly d'EM + MP Valentin



On utilise l'échantillon de grenat comportant les domaines les plus grands. Attention contrairement à ce qui est écrit dans le poly, l'objectif ne comporte pas de polariseur. Ainsi il faut tirer la lame du côté inverse à ce qui est indiqué (du côté marqué ENS).

Ne pas oublier le filtre anticalorique après la lampe QI : en plus de potentiellement abîmer les instruments placés derrière vous n'observerez alors plus les domaines de Weiss du au mauvais fonctionnement des polariseurs dans l'infrarouge.

On les visualise d'abord avec l'objectif pour être sur que tout est bien réglé. Mettre la bobine avec le noyau de fer doux à proximité du microscope, l'alimenter avec GBF et ampli (même alimentation que pour la manip précédente que l'on peut donc réutiliser). Bien vérifier à l'oeil que les domaines bougent à la fréquence du GBF.

On passe ensuite à la caméra IDS sur laquelle on fixe l'objectif macro. Enlever la partie supérieure du microscope (celle qui supportait l'objectif) et fixer la caméra et son objectif à l'aide d'une potence et d'une noix au dessus du microscope. Les réglages sont assez fastidieux au début pour obtenir une bonne image. Laisser assez d'espace (quelques centimètres) entre la caméra et le microscope pour pouvoir translater ce dernier sur toute la course de sa vis de translation. Le diaphragme doit être quasiment au minimum car la caméra sature vite. Zoomer au max avec l'objectif et ajuster la netteté avec la translation du microscope et le focus de l'objectif. L'éclairage doit être le plus uniforme possible : ce n'est pas facile à faire, pour cela jouer avec la distance entre le miroir et la QI, l'orientation du miroir. Il y a également une lentille au dessus du miroir que l'on peut translater avec une vis à la base du microscope.

Une fois que la qualité d'image est bonne on peut enregistrer un film. Pour choisir les FPS il faut aller dans les paramètres et régler l'horloge pixel de la caméra. Enregistrer un film sur lequel on voit quelques cycles, attention il faut être en live pour pouvoir acquérir une vidéo mdr

On traite ensuite ce film sur ImageJ. Dans On utilise l'outil de mesures multiples en allant dans Analyse → Set Measurements choisir Mean gray value et Stack position. Ensuite on utilise l'outil de mesure multiple en allant dans Analyse → Tools → ROI Manager → click droit sur Measure et Multi measure.

On exporte le fichier de résultat (en .txt rajouter l'extension manuellement) qu'on peut ensuite traiter. Nous l'avons traité sur excel. Si on observe le niveau de gris en fonction du temps on observe un graphe analogue au graphe a.. On ajuste un cosinus en phase avec ce signal à la main pour simuler l'excitation magnétique imposée (graphe b.). On "retourne" une période sur deux du graphe en a. car cela correspond à des domaines d'aimantation opposée (la direction de l'aimantation n'est pas visible à la caméra c'est pour ça qu'il faut la prendre en compte "à la main"). On obtient donc le graphe c.. En traçant c. en fonction de b. on obtient le cycle d'hystérésis d. très analogue à ce qui a été observé dans la partie précédente. L'origine de l'hystérésis est bien le déplacement irréversible des parois de Bloch.