
MP16 : MILIEUX MAGNÉTIQUES

Stéphane - Clément

Rapports de Jury

- [2012] Ne pas se limiter aux milieux ferromagnétiques. L'étude exhaustive du transformateur n'a pas sa place dans ce montage : cet appareil n'a d'intérêt que dans la mise en évidence des propriétés des ferromagnétiques.
- [2011] Ne pas se limiter aux milieux ferromagnétiques. L'étude exhaustive du transformateur est marginale dans ce montage ; cet appareil n'a d'intérêt que dans la mise en évidence des propriétés des ferromagnétiques.
- [2010] Ne pas se limiter aux milieux ferromagnétiques. L'étude du transformateur est marginale dans ce montage.
- [2008] L'effet Meissner ne se résume pas à une "expulsion de ligne de champ". 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 nonlinéarité 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 ($B \approx 0,3$ 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 1 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

<i>Manips</i>	<i>Théorie</i>
[1] Quaranta , Tome IV : Electricité	[5] Trémolet , Magnétisme Tome I & II
[2] Quaranta , Tome II : Thermo	+ Bréal
[3] Garing , Milieux Magnétiques (p41)	
[4] Précis Bréal PSI , Electrotechnique	

Plan de la leçon

INTRODUCTION.....	2
I DIAMAGNÉTISME ET PARAMAGNÉTISME.....	3
I.1 Mise en évidence.....	3
I.2 Mesure d'une susceptibilité paramagnétique (<i>quantitatif</i>).....	5
II FERROMAGNÉTISME	6
II.1 Mise en évidence (qualitatif).....	6
II.2 Transition ferro-para du fer (<i>semi-quantitatif</i>).....	7
II.3 Hystérésis magnétique dans les transformateurs	7
III ECHELLE MÉSOSCOPIQUE : DOMAINES DE WEISS ET PAROIS DE BLOCH	11

Introduction

Toute substance possède des propriétés magnétiques. Néanmoins, suivant les caractéristiques de ses constituants, les comportements observables diffèrent aussi bien dans leur nature que dans leur degré.

Un matériau est dit magnétique si ses atomes sont porteurs d'un moment magnétique par opposition aux matériaux non magnétiques qui n'en possèdent. Nous savons que, de manière générale, l'excitation d'un matériau par un champ magnétique $\vec{H}$ a deux effets additionnables :

- en influençant le mouvement orbitalaire des électrons du nuage électronique pour toute substance.
- en interagissant avec les moments magnétiques atomiques des substances magnétiques. Cet effet domine alors largement le premier le cas échéant.

Dans tous cas, la substance excitée répond par la création d'une aimantation $\vec{M}$ en son sein. L'induction magnétique totale $\vec{B}$ suit la relation :

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

La grandeur adimensionnée χ_m , appelée *susceptibilité magnétique*, permet alors de caractériser le comportement magnétique d'un matériau.

On distingue alors trois grandes catégories de comportements magnétiques suivant le type de matériau étudié :

- **Diamagnétisme** : causé par le premier effet. Donc présent dans toutes les substances magnétiques ou non. Il présente des aimantations très faibles suivant la loi de Lenz : le champ créé par l'aimantation tend à s'opposer au champ d'excitation. On le caractérise donc par une susceptibilité négative : $\chi_{\text{dia}} < 0$.

OG : $\chi_{\text{dia}} \approx 10^{-5}$

- **Paramagnétisme** : porté par le second effet dans les substances magnétiques. Les moments magnétiques atomiques, d'orientations initialement aléatoires, s'alignent suivant le champ d'excitation : $\chi_{\text{para}} > 0$.

OG : $\chi_{\text{para}} \approx 10^{-3}$

- **Ferromagnétisme** : porté par le second effet dans les substances magnétiques. Dans ce cas particulier, des interactions entre moments atomiques favorables aboutissent à des susceptibilités beaucoup plus élevées que dans les cas précédents : $\chi_{\text{ferro}} \gg 1$.

OG : $\chi_{\text{ferro}} \approx 10^2 \text{ à } 10^6$

On peut rencontrer quelques cas particuliers de ferromagnétisme : antiferromagnétisme, ferrimagnétisme, etc. (cf Trémolet).

Le but de ce montage est de présenter différentes expériences permettant la mise en évidence et/ou la quantification de ces trois grandes catégories de magnétisme ainsi qu'une approche mésoscopique de ces comportements dans le cas du ferromagnétisme.

I Diamagnétisme et paramagnétisme

I.1 Mise en évidence

I.1.1 Dans les solides (*qualitatif*)

Principe : On observe le comportement de petits échantillons de Bismuth diamagnétique et d'Aluminium paramagnétique suspendu à un fil et placé dans l'entrefer d'un électroaimant. On visualise avec la flexcam.

Observations :

Diamagnétisme (Bismuth)

Paramagnétisme (Aluminium)

Explications : Force volumique exercée par le champ sur l'échantillon :

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

La direction des forces magnétiques suit le gradient du carré de l'induction magnétique ie de l'extérieur vers l'entrefer (ou l'inverse). Dans le cas diamagnétique, $\chi_m < 0$, donc les forces sont orientées vers les champs faibles : par équilibrage l'échantillon aura tendance à s'aligner perpendiculairement au tube de champ. A l'inverse, dans le cas paramagnétique, $\chi_m > 0$, le tube s'aligne avec le tube de champ.

Notes de manip (NM) :

Pour un effet maximal :

- utiliser les éléments tronconiques qui offrent un tube de champ de diamètre plus adapté aux dimensions des échantillons.

- **NE PAS PLACER** les échantillons dans l'entrefer : le gradient y est faible. Choisir plutôt de les placer à la frontière du tube idéal de champ (comme indiqué sur le schéma). On peut aussi utiliser un entrefer asymétrique pour créer un tube avec un gradient (non testé).

- bien dérouler les fils des en entier pour limiter les forces de torsion qui s'opposent au mouvement de l'échantillon.

- En utilisant les sources de courant les plus récentes (celle avec un bouton « Output »), il est possible d'appliquer directement un courant assez important en limitant les risques pour soi et l'électroaimant (c'est prévu pour limiter les risques d'après la doc). On constatera plus facilement le changement d'orientation des échantillons

- Quoique vous fassiez, vous le verrez de toutes façons assez mal donc préparer les explications du « pourquoi ça ne fonctionne pas comme prévu » (ou PF2P) peut être une bonne approche.

I.1.2 Paramagnétisme du dioxygène (qualitatif)

Principe : N_2 est diamagnétique. O_2 est paramagnétique. Placer plusieurs tubes à essai et un aimant permanent dans un vase Dewar rempli d'azote liquide. On récupère un peu d' O_2 liquéfié dans les tubes à essai.

Observations/Explications : Lorsqu'on récupère l'aimant, observer rapidement (pour ne pas confondre avec l'évaporation) qu'aucun liquide n'est présent dans l'entrefer : N_2 est repoussé vers les champs faibles donc l'extérieur. En revanche si l'on fait couler de l' O_2 , une partie du liquide se maintient dans l'entrefer jusqu'à évaporation : l' O_2 paramagnétique est attiré par les champs forts.

NM : On peut choisir de verser de l'azote liquide pour être plus démonstratif mais cela impose un 2e vase Dewar. En plaçant les tubes à essai une 20aine de minutes avant la manip, on récupèrera plus qu'assez d' O_2 liquide.

I.2 Mesure d'une susceptibilité paramagnétique (quantitatif)

Principe : on utilise un tube en U dont la partie à grande section S est placée dans l'entrefer dans un électroaimant et dont celle à petite section s est « loin » de l'entrefer. Ce tube est rempli d'une solution de FeCl_3 paramagnétique. Lors de l'application d'un champ magnétique, on observe un déplacement des niveaux dans le tube. On peut démontrer que, pour la petite section, le déplacement h est lié au champ B et à la susceptibilité magnétique de la solution :

$$h = \chi_{\text{sol}} \frac{B^2}{2\mu_0 \rho_{\text{sol}} g \left(1 + \frac{s}{S}\right)} = \chi_m \beta$$

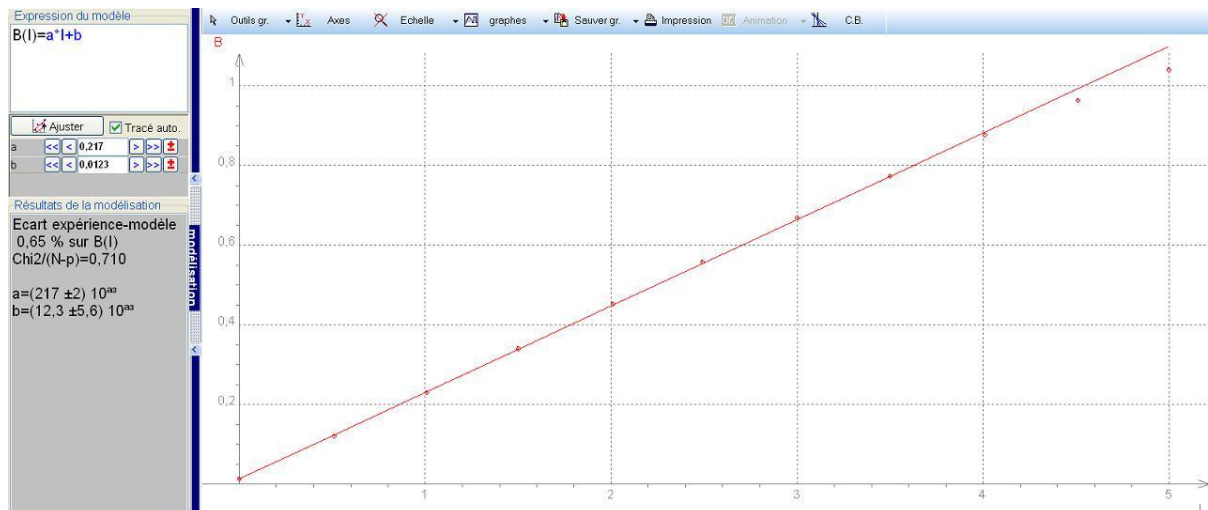
ρ_{sol} : densité de la solution de FeCl_3 commercial : $1660 \pm 10 \text{ kg.m}^{-3}$ (solution à 41%)

g : pesanteur

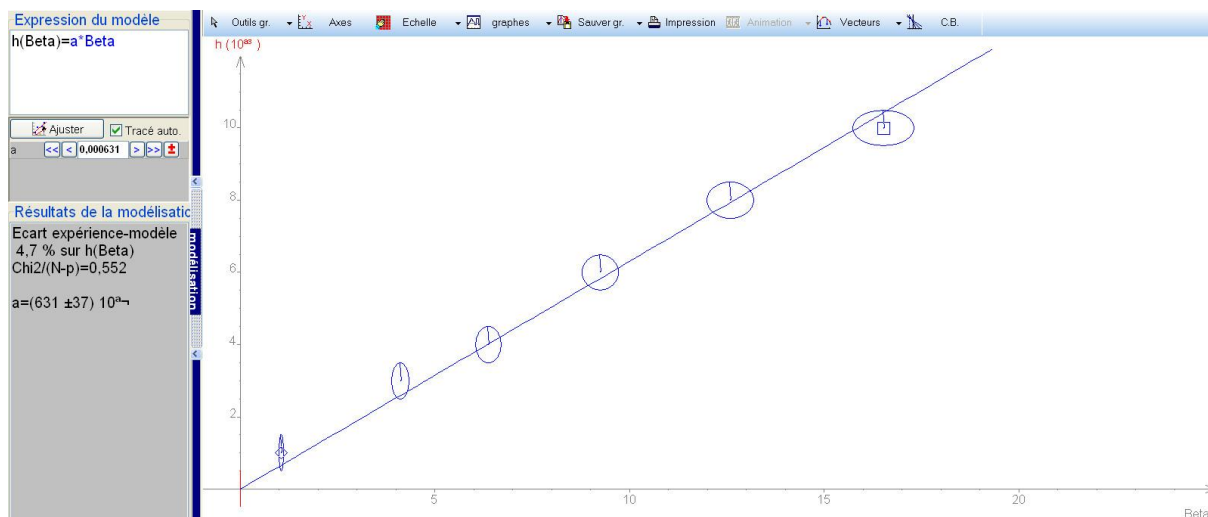
$r = 1.1 \pm 0.1 \text{ mm}$: rayon interne petit tube mesuré au Palmer mais manipulé de manière hasardeuse pour le rayon interne.

$R = 3.4 \pm 0.1 \text{ mm}$: rayon interne du grand tube.

Observations : il faut préalablement étalonner l'électroaimant en traçant $B = f(I)$. B est indiqué en Tesla et I en A, courant d'alimentation.



On observe qu'au-delà de 4 A, l'électroaimant n'a plus une réponse linéaire. On se limitera donc à des courants compris entre 0 A et 4 A. On mesure ensuite le déplacement de liquide avec un papier millimétré en fonction du paramètre β . On obtient une droite qu'il est possible modéliser sous Regressi. χ_{sol} est directement fourni par la pente.



On obtient $\chi_{sol} = \pm$ (prépa : $0.63 \text{ e}^{-3} \pm 4 \text{ e}^{-5}$)

Pour remonter à la susceptibilité du FeCl_3 , on utilisera la relation suivante :

$$\chi_{\text{FeCl}_3} = \chi_{sol} \frac{\rho_{\text{FeCl}_3}}{\rho_{sol} \chi_{massique}}$$

On obtient alors $\chi_{\text{FeCl}_3} = \pm$ (prépa : $2.6 \text{ e}^{-3} \pm 0.2 \text{ e}^{-3}$)

Or, on trouve dans les tables : $\chi_{\text{FeCl}_3} = 3.3 \text{ e}^{-3}$

Explications : on néglige les effets dus aux forces de capillarité dans le tube de petite section qui est tout de même une pipette.

De plus, la position du ménisque dans l'entrefer modifie grandement les valeurs h obtenues puisque le champ n'y est pas strictement uniforme.

On peut de plus négliger l'influence du diamagnétisme de l'eau grâce à la loi d'additivité de Wiedman qui présuppose la non interaction entre les moments magnétiques d'espèces différentes :

$$\frac{m_{sol}}{\rho_{sol}} \chi_{sol} = \underbrace{\frac{m_{\text{FeCl}_3}}{\rho_{\text{FeCl}_3}} \chi_{\text{FeCl}_3}}_A + \underbrace{\frac{m_{\text{eau}}}{\rho_{\text{eau}}} \chi_{\text{eau}}}_B$$

Or $\chi_{\text{FeCl}_3} = 3.3 \text{ e}^{-3} \gg \chi_{\text{eau}} = -9 \text{ e}^{-6}$ et $\rho_{\text{FeCl}_3} = 2800 \text{ kg.m}^{-3} = 2.9 \rho_{\text{eau}}$

Soit $A \gg B$: on peut donc négliger l'influence de l'eau sur les phénomènes magnétiques.

La relation donnant h en fonction de B s'explique par l'équilibre des forces en présence et en négligeant les forces dues à la viscosité de la solution. Très bien expliqué dans le Garing qui contient tout de même une erreur ($z_I - z_E = 2h$ et non h). Il faut néanmoins tenir compte ici des différences de section d'où le facteur $(1 + s/S)$.

NM : Attention à bien positionner le ménisque au centre de l'entrefer et à utiliser le même écartement d'entrefer en prépa et en montage.

Il pourrait être intéressant de modifier la formule en tenant compte des forces de capillarité dans le petit tube.

J'ai outrageusement exploité Regressi pour déterminer les incertitudes. Je fournirais la feuille par mail pour que vous puissiez avoir accès aux incertitudes choisies. Cette tactique fait gagner du temps mais il faut avoir quelques notions sur la méthode des ellipses pour comprendre pourquoi d'une incertitude de 50% sur h , on arrive à une si faible incertitude sur χ_{FeCl_3} (approximation gaussienne, complexité du χ^2 qui minimise plus les erreurs que la loi de propagation, divers tests statistiques dépassant mes compétences).

II Ferromagnétisme

II.1 Mise en évidence (qualitatif)

Approcher un morceau de fer ferromagnétique (pardi) de l'électroaimant : il s'y colle violemment. Mise en évidence de l'amplitude dramatiquement plus élevée des forces magnétiques sur les ferromagnétiques. S'explique par $\chi_{dia} \ll \chi_{para} \ll \chi_{ferro}$.

II.2 Transition ferro-para du fer (semi-quantitatif)

Le ferromagnétisme est un phénomène limité par l'agitation thermique. Cette dernière finit par dominer les interactions favorables microscopiques présentes dans les ferromagnétiques à partir d'une température T_c appelée température de Curie. En dessous, on a comportement typique ferro et au-delà, la susceptibilité diminue dramatiquement puis évolue en $1/T$ et on observe des comportements proches du paramagnétisme. Par abus de langage, on parle de transition ferro-para.

Principe : on utilise un thermocouple de type K dont la référence est plongé dans un mélange eau-glace (0°C) et dont la pointe de mesure a été encapsulé avec du fer. On place un aimant permanent d'un côté d'une plaque réfractaire (isolation thermique) et approche la pointe en fer de l'autre côté. Celle-ci est maintenue en contact par les forces magnétiques. On chauffe alors la pointe avec un chalumeau et/ou un bec Bunsen.

Observations : La température de la pointe est fournie par le thermocouple. A partir d'une certaine température, le fer perd ses propriétés ferro et la pointe se décolle de la plaque. Cette température est la T_c du fer. Valeur tabulée : $T_{c,fer} = 770^\circ\text{C}$.

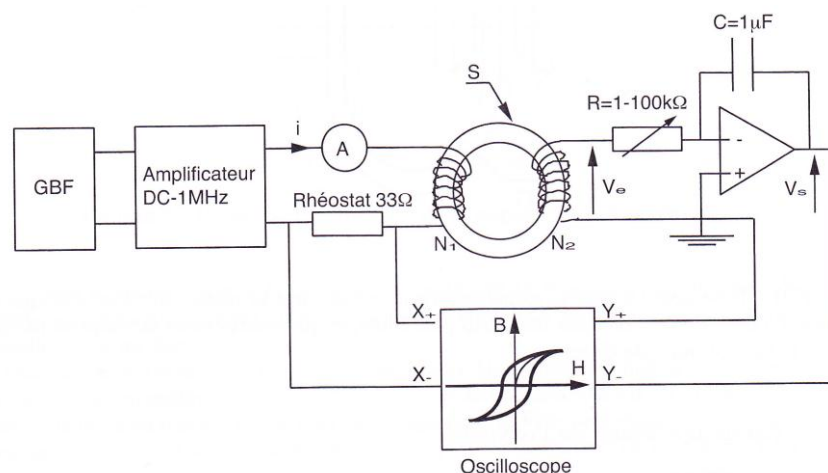
On mesure $T_{c,exp} = \quad ^\circ\text{C}$.

Cette valeur ne peut être vue que comme un ordre de grandeur même si on obtient une valeur relativement juste. En effet, les conditions expérimentales entraînent des erreurs systématiques difficiles à évaluer. Par exemple, le câblage du thermocouple possède une certaine rigidité qui peut maintenir la pointe en contact et fausser la mesure. L'aimant permanent, lui-aussi ferromagnétique, est chauffé malgré la plaque réfractaire. Enfin et surtout, la température fournie par le thermocouple n'est pas exactement la température de la surface de contact. la température mesurée est donc une température approchée influencée par les phénomènes de conduction thermiques important dans la capsule de fer. On ne peut donc rigoureusement extraire une incertitude fiable et honnête scientifiquement.

NM : les remarques précédentes sont corroborées par plusieurs tuteurs et par l'observation. Il est de plus possible de ne pas réussir à assez chauffer la pointe pour atteindre les $750\text{-}800^\circ\text{C}$. enfin, bien veiller à disposer la pointe de mesure de façons à être certain que si le magnétisme disparaît, la pointe s'écarte directement de sa position. Par exemple, de manière à ce que les forces de traction du câblage s'opposent en direction à celle exercée par l'aimant.

II.3 Hystérésis magnétique dans les transformateurs

Principe : le phénomène d'hystérésis magnétique de l'aimantation est propre aux ferromagnétiques. pour la mettre en évidence, on fabrique un transformateur câblé comme suit :



Il est ainsi possible de modifier le matériau dont est composé le tore du transformateur, tout autre caractéristique étant conservée. Le circuit est pensé de manière à ce que si l'on mesure les tensions aux bornes du rhéostat ($R = 15 \pm 0.1 \Omega$) et en sortie de l'intégrateur ($R_i = 100 \pm 5 \text{ k}\Omega$; $C_i = 1 \pm 0.05 \mu\text{F}$), on peut remonter au champ H générée par le primaire et à l'induction B à la sortie du secondaire. Auquel cas, ils suivent les relations suivantes :

$$H = N_1 \frac{V_{\text{rhéo}}}{RL}$$

$$B = \frac{R_i C_i}{N_2 S} V_{S, \text{INTEG}}$$

Où N_i : nombre de spires au primaire (100) et au secondaire (500)
 L : périmètre moyen du tore ; $L = 16.3 \pm 0.05 \text{ cm}$
 S : section du tore ; ici carré de côté 12 mm : $S = 144 \text{ e}^{-6} \pm 9 \text{ e}^{-6} \text{ m}^2$

On trace donc $B = f(H)$ après traitement sous Regressi des tensions mesurées via Synchronie en suivant des cycles à 0.1 Hz pour limiter les pertes par courants de Foucault. Un cycle d'hystérésis ferromagnétique présente la forme générale suivante :

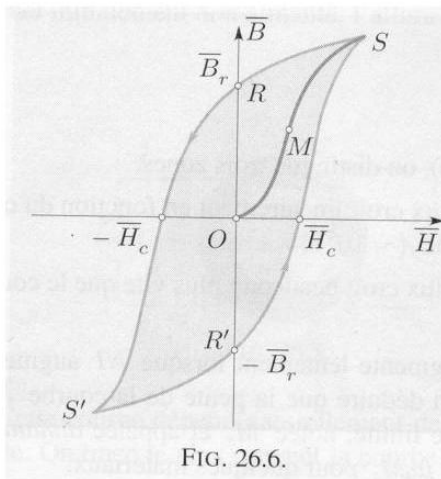


FIG. 26.6.

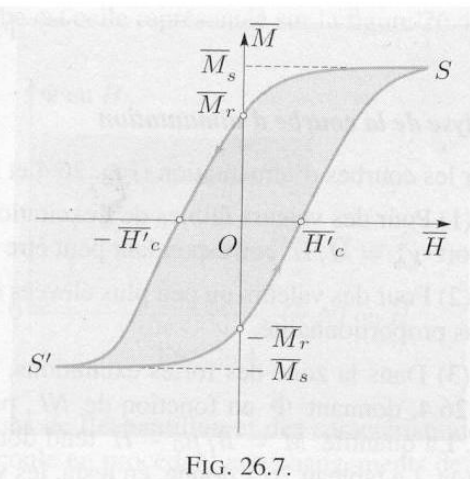


FIG. 26.7.

Les grandeurs caractéristiques sont le champ à saturation B_{sat} , le champ rémanent B_r ie pour une excitation nulle après aimantation et le champ coercitif H_c ie l'excitation à appliquer pour compenser le champ rémanent. De plus, l'aire du cycle fournit l'énergie volumique lié aux pertes dues aux cycles :

$$E_{\text{hyst, vol}} = \int_{\text{cycle}} H(t) B(t) dt$$

On distingue trois grandes catégories (encore) de ferromagnétiques :

- **Ferro. « dur »** : champ rémanent assez élevé. Champ coercitif extrêmement élevé. En conséquence, pertes très importants par hystérésis. Très difficile à désaimanter. Idéal pour les aimants permanents.

OG : $H_c > 10 \text{ kA.m}^{-1}$; $B_r > 1 \text{ T}$

- **Ferro. « doux »** : cycle très effilé donc peu de pertes. Difficile à saturer. Désaimantation très facile.

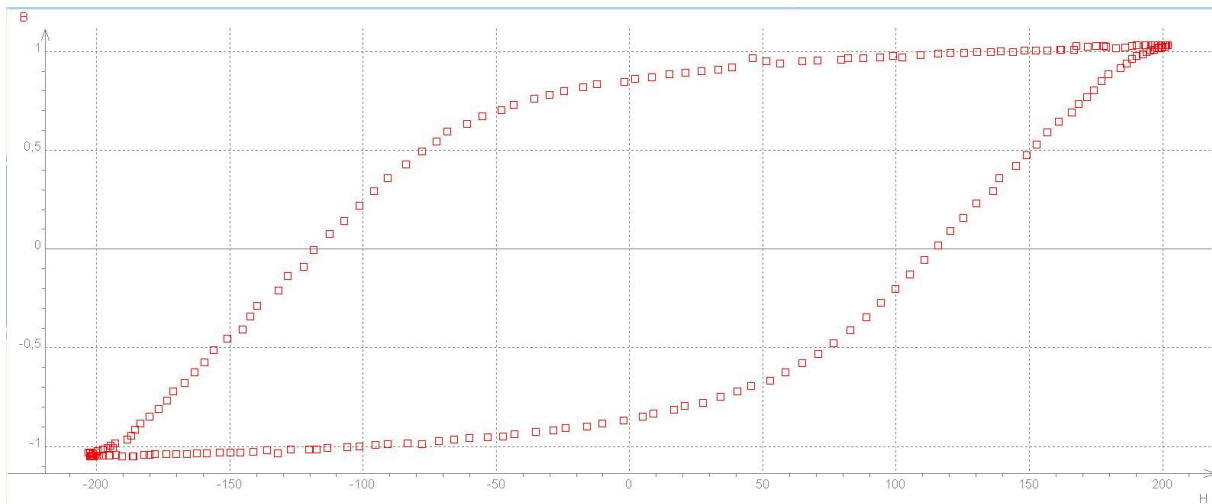
OG : $H_c < 400 \text{ A.m}^{-1}$; $B_r > 1 \text{ T}$

- **Ferrimagnétique** : isolants électriques donc peu de pertes par courants de Foucault : cycle indépendant de la fréquence. Pertes très faibles mais champ rémanent très faible aussi.

OG : $H_c = qq \text{ } 10 \text{ A.m}^{-1}$; $B_r < 1 \text{ T}$

II.3.1 Tore de fer doux

Nous obtenons après traitement un cycle de la forme suivante. B est indiqué en Tesla et H en $A.m^{-1}$.



En prépa :

$$B_{sat} = 1.0 \pm 0.1 \text{ T}$$

$$B_r = 0.85 \pm 0.1 \text{ T}$$

$$H_c = 110 \pm 2 \text{ A.m}^{-1}$$

Il s'agit d'un matériau "doux" dont les caractéristiques se situent aux limites des ordres de grandeurs. Il s'agit d'un matériau conducteur donc susceptible aux pertes par courants de Foucault ce que l'on peut voir en balayant à haute fréquence le cycle ($f > 10 \text{ Hz}$). L'écrantage des courants empêche le champ d'excitation de pénétrer le matériau. Le cycle décrit alors une ovale.

On peut aussi désaimanter le matériau et observer en balayant manuellement la courbe de première aimantation (sur oscilloscope).

Calcul des pertes par hystérésis sur un cycle de 10 s : $P_{hyst} = \frac{V}{T} \int_{\text{cycle}} H(t)B(t)dt$

En prépa : $P_{hyst} = 2.0 \pm 0.1 \text{ mW}$

Puissance apparente fournie au primaire :

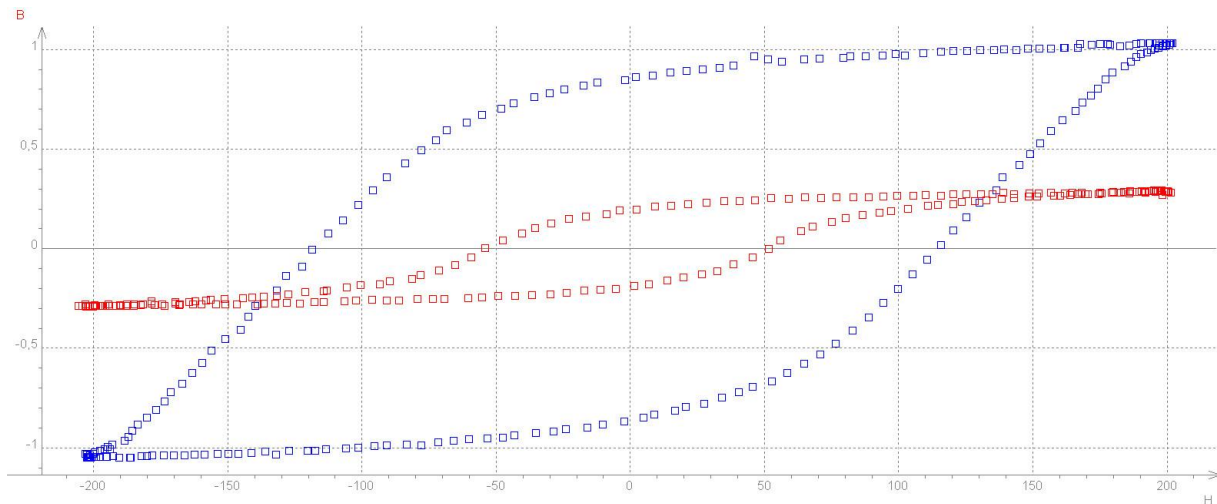
Signal triangulaire $V_{res} = \pm 4 \text{ V}$ et $I_{res} = \pm 380 \text{ mA}$. $P_{fournie} = \frac{V_{max} I_{max}}{3} = 500 \text{ mW}$

Les pertes sont donc négligeables pour un matériau doux. Idéal pour un transformateur.

II.3.2 Tore de ferrite

Ferrite = ferrimagnétique.

Cycle indépendant de la fréquence (sur oscillo).



En prépa :

$$B_{\text{sat}} = 0.29 \pm 0.05 \text{ T}$$

$$B_r = 0.19 \pm 0.05 \text{ T}$$

$$H_c = 50 \pm 2 \text{ A.m}^{-1}$$

$$P_{\text{hyst}} = 0.56 \pm 0.03 \text{ mW}$$

Pertes très inférieures au fer doux mais aimantation rémanente proportionnellement plus faible : inadapté aux applications électriques de puissance.

NM : Pour cette manip, il faut faire attention...à tout.

Pour commencer, il NE FAUT PAS utiliser l'acier dur qui n'a de dur que le nom : les champs coercitifs obtenus sont de même ordre que le fer doux alors qu'ils devraient être au moins 50 fois supérieurs !!

Ensuite, il faut bien faire attention aux paramètres d'acquisition sous Synchronie ainsi qu'au conflit de masse sur le montage. Pour la postérité, la résolution de Synchronie et de l'ordre de la largeur du calibre division par 2^{12} , car les boîtiers d'acquisition sont en 12 bits. Pour le calibre $-10/+10 \text{ V}$, on arrive à 5 mV ce qui est inférieur au bruit. Donc mieux vaut prendre au moins 10 mV pour être tranquille.

La mesure de puissance fournie doit pouvoir être réalisé avec un Wattmètre (non testé).

Il faut bien penser à recentrer les cycles après acquisition (en calculant la valeur moyenne de B et H) pour que ce soit beau. En effet, bien que le boîtier d'intégrateur compense la dérive de l'AO, une constante aléatoire (par acquisition) est présente en sortie bien que je ne sois pas certain de sa source. H est en revanche toujours centré donc ça ne semble pas venir de Synchronie.

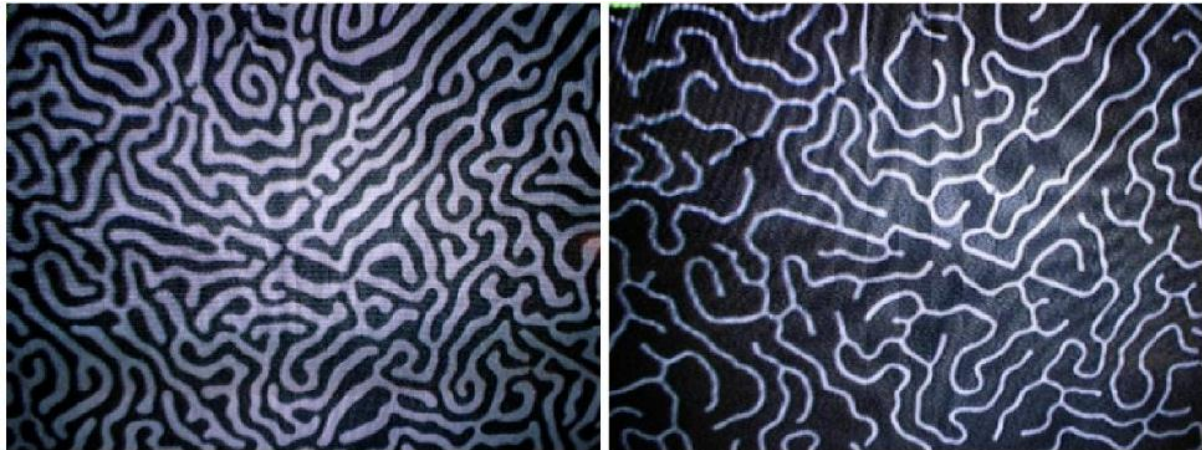
La fonction AIRE(y,x) de Regressi permet théoriquement de calculer l'aire du cycle. Néanmoins cela ne fonctionne pas si le cycle a été recentré (valeur quasi nulle ou aberrante) et du fait de la présence de deux ordonnées par abscisse, il est de toutes manières de multiplier le résultat par 2 pour arriver à une valeur concluante. J'ai esquivé en approchant le cycle par un parallélogramme ce qui surestime la puissance notamment sur la ferrite mais permet d'interpréter tout de même.

Les sources d'erreur majeures sont portées par les dimensions du tore et les composant de l'intégrateur (j'ai estimé l'erreur sur R_i et C_i à 5% de la valeur nominale). R peut être mesurée au multimètre pour plus de précision.

Encore une fois, le PF2P sur le chi2 est salvateur.

III Echelle mésoscopique : domaines de Weiss et parois de Bloch

L'observation au microscope polarisant d'un matériau magnétique permet de mettre en évidence l'organisation mésoscopique en domaines de Weiss en utilisant l'effet Faraday (rotation de la polarisation suivant l'orientation du moment magnétique de chaque domaine). On utilise pour cela des grenats ferrimagnétiques qui ont la particularité de s'organiser microscopiquement en réseau de spins antiparallèles et mésoscopiquement en domaines de Weiss antiparallèles. On observera donc 2 teintes suivant les domaines observés.



B nul

B non nul

En approchant un aimant permanent de l'échantillon, on peut observer le déplacement des parois de Bloch selon que le champ favorise l'une ou l'autre des orientations. Si l'on approche et éloigne l'aimant lentement, le déplacement est réversible (quasi-statique) et les domaines s'étendent à partir des domaines préexistants.

Néanmoins si l'on approche assez près pour saturer les domaines, les domaines ne se réorganiseront pas de la même manière lorsque l'on retire l'aimant : irréversibilité du déplacement des parois de Bloch après saturation. Lien avec l'hystérésis.

NM : Un seul échantillon, celui avec le smiley, fonctionne. L'obtention d'une bonne image est assez aléatoire et dépend grandement de l'objectif et de l'oculaire utilisé.

Bien vérifier que le polariseur (élément coulissant au dessus de l'objectif) est bien positionné dans le champ où vous passerez des heures à chercher les domaines de Weiss sans résultat.

L'observation sera simplifiée en utilisant la Webcam Phillips qui possède un adaptateur dimensionné pour les oculaires du microscope. Utiliser la flexcam ici relève de la torture psychologique.

Un montage à champ oscillant est réalisable pour mettre mieux en évidence l'irréversibilité à saturation. Demander à Manu et Gauthier pour plus d'infos, j'ai estimé que cela était rendu difficile par la limite en temps du montage.

CONCLUSION

Ce montage a permis de mettre en évidence la répartition des matériaux existants en trois grandes catégories de comportements magnétiques : diamagnétisme, paramagnétisme et ferromagnétisme.

La plupart des applications utilise des matériaux ferromagnétiques parmi lesquels on distingue différents comportements privilégiant telle ou telle application : doux > transformateurs de puissance ; dur > aimants permanents ; ferrite > applications de recherche particulière.

Certains comportements extrêmes sont à l'origine de dispositifs de haute technologie : supraconducteur = diamagnétisme parfait.