

---

## MP16 : Milieux magnétiques

---

Amélie GAY et Noé RABAUD

### Commentaires de jury

**2013** : Ne pas se limiter aux milieux ferromagnétiques. L'étude du transformateur est marginale dans ce montage.

**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. Jusqu'en 2001, le titre était : Caractérisation des milieux magnétiques. Applications du ferromagnétisme.

**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 ( $e = 1 \text{ cm}$ ) un champ de l'ordre d'une fraction de tesla ( $B \approx 0,3 \text{ T}$ ). 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

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II (Thermodynamique), Quaranta,
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV (Électricité), Quaranta,
- Électrotechnique, Conversion de puissance, PSI, Les Nouveaux Précis Bréal,
- Magnétisme, I et II, Trémolet

### Table des matières

<b>2 Milieux linéaires : diamagnétisme et paramagnétisme</b>	<b>2</b>
2.1 Mise en évidence . . . . .	3
2.2 Le paramagnétisme de $\text{FeCl}_3$ . . . . .	3
<b>3 Milieux non linéaires : ferromagnétisme</b>	<b>4</b>
3.1 Mise en évidence . . . . .	4
3.2 Transition ferromagnétique-paramagnétique . . . . .	4
3.3 Étude de l'aimantation d'un matériau ferromagnétique . . . . .	5
3.4 Approche mésoscopique : les domaines de Weiss . . . . .	7
<b>4 Conclusion</b>	<b>7</b>

# 1 Introduction

Tout matériau possède des propriétés magnétiques. Elles sont de différentes natures et se manifestent par des intensités très différentes. On peut alors définir le vecteur aimantation  $\vec{M}$  qui est le moment magnétique par unité de volume induit ou pas par une excitation magnétique  $\vec{H}$ . Il vérifie la relation :

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

où  $\vec{B}$  est le champ magnétique et  $\vec{H}$  est l'excitation magnétique.

Dans le cas d'un milieu linéaire, homogène et isotrope (LHI), on peut définir la susceptibilité magnétique  $\chi_m$  telle que :

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

Pour les matériaux non linéaires, la susceptibilité magnétique est définie par :

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

La force exercée par un champ  $\vec{B}$  sur un milieu magnétique d'aimantation  $\vec{M}$  est donnée par la relation :

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

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  $\chi_f \gg \chi_p$ .

## 2 Milieux linéaires : diamagnétisme et paramagnétisme

On a vu que pour ces matériaux  $|\chi_m| \ll 1$  :

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

D'où,

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

## 2.1 Mise en évidence

### Matériel :

- Électroaimant avec des pièces tronçonniques pour avoir un champ intense,
- Générateur de courant continu,
- Barreau de bismuth (diamagnétique) et d'aluminium (paramagnétique),
- Flexcam.

Comme le bismuth est diamagnétique, le barreau cherche à s'éloigner du champ  $\vec{B}$ , il se place donc transversalement dans l'entrefer alors que le barreau d'aluminium paramagnétique se place longitudinalement.

## 2.2 Le paramagnétisme de $\text{FeCl}_3$

### Matériel :

- Électroaimant avec des pièces plates pour avoir un champ homogène,
- Générateur de courant continu,
- Solution de  $\text{FeCl}_3$  à 40% en masse,
- Tube en U,
- Teslamètre,
- Caméra,
- Papier millimétré,
- Pied à coulisse,
- Regressi<sup>®</sup>

On place une branche du tube entre l'entrefer de l'électroaimant et l'autre est située à l'extérieur. Le teslamètre est aussi placé dans l'entrefer pour pouvoir mesurer  $\vec{B}$ , le zéro du teslamètre étant fait auparavant. On constate lorsqu'on applique un champ dans l'entrefer que la hauteur de liquide dans la branche à l'extérieur diminue alors qu'elle augmente dans l'autre.

Appliquons les lois de l'hydrostatique.

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

D'où,

$$P - \rho gz + \frac{\chi_{sol}}{2\mu_0} B^2 = \text{constante}$$

En considérant que la pression est identique dans chaque branche du tube,

$$\frac{\chi_{sol}}{2\mu_0} B^2 - \rho gh_1 = \rho gh_2$$

Comme les deux branches sont identiques,

$$\frac{\chi_{sol}}{4\rho g\mu_0} B^2 = h$$

Avec une régression linéaire sous Regressi<sup>®</sup>, on obtient

$$\frac{\chi_{sol}}{4\rho g\mu_0} = \dots \pm \dots \text{SI}$$

avec  $\rho = 1.415 \text{ kg L}^{-1}$ ,  $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$  et  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ .

D'où,

$$\chi_{sol} = \dots \pm \dots$$

Si on admet la loi d'additivité des aimantations et si on néglige la contribution de l'eau, on peut avoir :

$$\chi_{FeCl_3} = \chi_{sol} \frac{\rho_{FeCl_3} V}{m_{FeCl_3}}$$

avec  $m_{FeCl_3} = 40 \text{ g}$ ,  $V = 0.1 \text{ L}$  et  $\rho_{FeCl_3} = 2.90 \text{ kg L}^{-1}$

$$\chi_{FeCl_3} = \dots \pm \dots$$

### 3 Milieux non linéaires : ferromagnétisme

#### 3.1 Mise en évidence

**Matériel :**

- Electroaimant avec des pièces tronçoniques ou simplement un aimant,
- Générateur de courant continu,
- Barreau de fer.

On place la barre de fer dans l'entrefer de l'électroaimant. Contrairement aux milieux diamagnétiques et paramagnétiques, on observe que la barre de fer se colle contre l'entrefer très rapidement ce qui signifie que la force s'appliquant sur la barre de fer est bien plus importante que précédemment.

#### 3.2 Transition ferromagnétique-paramagnétique

Le caractère ferromagnétique d'un milieu disparaît à partir d'une certaine température appelée température de Curie,  $T_C$ , au profit d'un caractère paramagnétique.

**Matériel :**

- Aimant,
- Plaque réfractaire pour ne pas chauffer l'aimant,
- Barreau de fer associé à un thermocouple de type K,
- Bêcher rempli d'eau glacée,
- Voltmètre,
- Tables de correspondance entre la ddp mesurée et la température.

On ajuste le zéro du voltmètre en plongeant les deux extrémités du thermocouple dans le bêcher d'eau glacé. On place le barreau de fer contre la plaque réfractaire de telle sorte qu'ils ne soient maintenus que par l'aimant (et non par le fil du thermocouple), l'autre partie du thermocouple étant placée dans le bêcher d'eau glacée.

On chauffe la barre de fer jusqu'à ce qu'elle se décroche du support et on relève la ddp indiquée sur le voltmètre. En effet, comme la force d'un champ  $\vec{B}$  s'exerçant sur un matériau ferromagnétique est très importante, elle est capable de contrer le poids du barreau ce qui n'est plus le cas lorsque le matériau devient paramagnétique.

$$\text{ddp} = \dots \pm \dots \text{mV}$$

La principale source d'incertitude vient du fait qu'on ne lit pas instantanément la ddp sur le voltmètre. Avec les tables, on obtient une température de Curie :

$$T_C = \dots \pm \dots ^\circ\text{C}$$

La valeur tabulée pour le fer est  $T_C = 770^\circ\text{C}$ .

### 3.3 Étude de l'aimantation d'un matériau ferromagnétique

Pour étudier un milieu ferromagnétique, nous utilisons un transformateur torique à basse carrée ayant un noyau ferromagnétique. On excite le milieu par l'intermédiaire d'un courant  $i_1$  qui passe dans la première bobine, ce courant produisant un champ d'excitation magnétique  $\vec{H}$  qu'on peut calculer grâce au théorème d'Ampère. Le milieu ferromagnétique s'aimante et canalise les lignes de champ magnétique  $\vec{B}$  créant un courant  $i_2$  par induction dans la seconde bobine. Un intégrateur permet d'avoir une tension proportionnelle au champ  $\vec{B}$ .

#### Matériel :

- Générateur Basse Fréquence,
- Amplificateur de puissance 0 – 1 MHz,
- Rhéostat 0 – 33  $\Omega$ ,
- Ampéremètre,
- Ohmètre,
- Boîtiers contenant des transformateurs avec noyaux de fer doux, de ferrite ou d'acier dur contenant  $N_1$  spires au primaire et  $N_2$  spires au secondaire,
- Boîtier intégrateur avec son alimentation,
- Oscilloscope,
- Latis Pro<sup>®</sup>.

Au primaire du transformateur, on a :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_1 i_1 \text{ et } u_1 = r i_1$$

$$H = \frac{N_1 u_1}{\pi d r}$$

Au secondaire, on a :

$$u_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \text{ avec } \phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$u_s = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_2 dt = N_2 \frac{\phi}{RC}$$

D'où,

$$B = \frac{RCu_s}{N_2 a^2}$$

Pour les transformateurs disponibles et les composants électroniques utilisés,

- $N_1 = 100$ ,
- $N_2 = 500$ ,
- $a = 12 \text{ mm}$ ,
- $d = 52 \text{ mm}$ ,
- $r = \dots\dots\dots\Omega$ ,
- $R = 10 \text{ k}\Omega$ ,
- $C = 1 \mu\text{F}$ .

### Cycle d'hystérésis

On trace  $\vec{B}$  en fonction de  $\vec{H}$  et on obtient un cycle d'hystérésis. On peut mesurer le champ d'excitation magnétique coercitif  $H_C$  qui est le module de l'excitation magnétique  $\vec{H}$  quand le champ magnétique  $\vec{B}$  est nul ainsi que le champ magnétique rémanent  $B_R$  qui est le module du champ magnétique  $\vec{B}$  lorsque l'excitation magnétique  $\vec{H}$  est nulle.

Pour le fer doux,

$$H_C = \dots\dots\dots \text{A m}^{-1}$$

$$B_R = \dots\dots\dots \text{T}$$

Jusqu'ici, on a travaillé à très basse fréquence de l'ordre de 0.5 Hz. Si on augmente la fréquence, on observe une déformation du cycle qui est due à un accroissement significatifs des courants de Foucault. Pour éviter ce phénomène dans les transformateurs réels on utilise un milieu ferromagnétique feuilleté.

On peut aussi évaluer les pertes par hystérésis, aussi appelées pertes fer :

$$P_f = \frac{\pi d a^2}{T} \int_0^T H \cdot dB$$

avec  $T$  la période de l'excitation magnétique.

$$P_f = \dots\dots\dots \text{J}$$

Pour démagnétiser un ferromagnétique, il faut parcourir des cycles de plus en plus petit pour arriver à l'origine du repère.

Si on remplace le fer doux par de la ferrite, on observe un cycle bien plus allongé et la saturation est moins facilement atteinte.

## Courbe de première aimantation

Une fois le matériau démagnétiser, on peut le magnétiser de nouveau par l'intermédiaire d'un courant. Une fois cette courbe tracée, on parcourt de nouveau un cycle d'hystérésis sans repasser par l'origine.

### 3.4 Approche mésoscopique : les domaines de Weiss

En général un milieu ferromagnétique, comme une barre de fer, n'attire pas un autre milieu ferromagnétique (sauf s'il a été préalablement aimanté). Cette absence d'aimantation spontanée à l'échelle macroscopique résulte du fait qu'à l'échelle mésoscopique il existe des domaines de l'ordre du micromètre, appelés domaines de Weiss, qui possèdent chacun une aimantation spontanée mais dans des directions aléatoires d'un domaine à l'autre.

Ces domaines sont séparés par les parois de Bloch qui comprennent un certains nombres de plans atomiques dans lesquelles l'orientation des moments passent plus ou moins progressivement de celle d'un domaine à l'autres. Lorsqu'on applique une excitation magnétique à ce matériau les parois se déplacent pour favoriser les domaines dont l'aimantation est parallèle à l'excitation magnétique. Ce déplacement est plus ou moins rapide selon que le matériau possèdent plus ou moins de défauts : un ferromagnétique doux a peu de défauts par opposition à un ferromagnétique dur.

#### Matériel :

- Microscope polariseur,
- Caméra USB à fixer sur l'oculaire du microscope,
- Aimant en U,
- Lumière blanche,
- Lame mince de grenat ferrimagnétique

Un matériau ferrimagnétique a exactement le même comportement qu'un matériau ferromagnétique, la seule différence réside dans le fait que les moments magnétiques ont des modules variables dans le milieu ferrimagnétique. À l'approche de l'aimant, on observe bien un déplacement des parois de Bloch des différents domaines.

## 4 Conclusion

Nous avons étudié trois types de milieux magnétiques parmi toutes les variétés possibles. Le ferromagnétisme est largement utilisé dans les technologies actuelles que ce soit dans les transformateurs ou encore dans les plaques à induction.