

# LP46 – PROPRIÉTÉS MACROSCOPIQUES DES CORPS FERROMAGNÉTIQUES.

24 mars 2016

Sophie Michel & Maxime Lombart

## L2

### Commentaires de jury

- **2015** : Le principe de fonctionnement du circuit électrique utilisé pour présenter un cycle d'hystérésis doit être connu.
- **2014** : L'intérêt du champ H doit être clairement dégagé. L'obtention expérimentale doit être analysée.

### Bibliographie

- ↗ *Cap prépa PSI* → Transfo
- ↗ *BFR 4* → Cours
- ↗ *Électrotechnique, Précis* → Cours et protocole pour tracer le cycle d'hystérésis
- ↗ *Magnétisme I et II, Trémolet* → Plus complet
- ↗ *La physique par les objets du quotidien* → Disque dur

### Prérequis

- Induction
- Électromagnétisme dans la matière

### Expériences

- ☞ Tracer d'un cycle d'hystérésis
- ☞ Domaine de Weiss

### Table des matières

<b>1</b>	<b>Caractéristique du ferromagnétisme</b>	<b>2</b>
1.1	Équations de Maxwell dans un milieu magnétique . . . . .	2
1.2	Relation constitutive . . . . .	2
1.3	Réductance magnétique . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Aimantation d'un matériaux ferromagnétique</b>	<b>3</b>
2.1	Dispositif expérimental . . . . .	3
2.2	Cycle d'hystérésis . . . . .	4
2.3	Interprétation mésoscopique . . . . .	5
2.4	Aspect énergétique . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Applications</b>	<b>6</b>
3.1	Transformateur parfait . . . . .	6
3.2	Stockage de donnée . . . . .	6

## Introduction

Nous allons aujourd'hui nous intéresser à un milieu magnétique dont les propriétés macroscopiques sont utilisées dans des domaines très variés : le ferromagnétisme. Le magnétisme, et en particulier les aimants sont connus de tous (utilisation dans la vie quotidienne) et a été découvert depuis l'antiquité mais c'est seulement au cours du XX<sup>ème</sup> siècle que les propriétés microscopiques de ces milieux ont été découvertes.

## 1 Caractéristique du ferromagnétisme

### 1.1 Équations de Maxwell dans un milieu magnétique

*Il s'agit ici, d'un bref rappel sur les équations de Maxwell dans la matière, pour poser le problème, et surtout les notations.*

Un milieu magnétique peut être considéré comme un ensemble de particules possédant un moment magnétique (orbitale, spin). On peut définir le vecteur aimantation  $\vec{M}$  en un point P du matériel aimanté comme :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV}$$

où  $d\vec{m}$  est le moment magnétique résultant dans un volume élémentaire  $dV$ .

Nous pouvons associer à cette aimantation une distribution de courants de densité volumique  $\vec{j}_{lié}$  tel que :

$$\vec{j}_{lié} = \text{rot}(\vec{M})$$

L'équation de Maxwell-Ampère se ramène donc à :  $\text{rot}\vec{B} = \mu_0(\vec{j}_{libre} + \vec{j}_{lié})$ , où encore  $\text{rot}(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}) = \vec{j}_{libre}$ .

On définit alors l'induction magnétique (en A.m<sup>-1</sup>) par  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ , et alors  $\text{rot}(\vec{H}) = \vec{j}_{libre}$

L'intérêt de  $\vec{H}$  réside dans le fait qu'il n'est lié qu'à  $\vec{j}_{libre}$ , grandeur dont nous avons directement accès expérimentalement, cette grandeur ne dépend pas du tout de la réponse du milieu.

Enfin, on a  $\text{div}(\vec{B}) = 0$

Il nous manque une équation pour pouvoir résoudre le système. Il s'agit de la relation constitutive liant M et H.

### 1.2 Relation constitutive

On suppose que le milieu est isotrope, donc  $\vec{M}$  et  $\vec{H}$  sont colinéaires. Nous allons maintenant étudier la relation liant ces deux grandeurs, appelée relation constitutive. On distingue plusieurs cas :

**Diamagnétisme** :  $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$  avec  $\chi_m < 0$ .

La susceptibilité magnétique est faible environ  $10^{-4}$ .

**Paramagnétisme** :  $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$  avec  $\chi_m > 0$ .

Les valeurs de la susceptibilité sont comprises entre  $10^{-6} < \chi_m < 10^{-3}$

**Ferromagnétisme** : Les champs  $\vec{B}$  et  $\vec{M}$  sont de même sens mais liés de façon non linéaire et cette relation dépend de l'histoire du matériau.  $\vec{M} = \chi_m(H)\vec{H}$ .

Les valeurs de la susceptibilité sont bien plus importantes environ  $10^5$

Le ferromagnétisme n'existe que dans des corps à structure cristalline, essentiellement des solides (Fer, Nickel, Cobalt), alors que le dia-paramagnétisme existe aussi dans des liquides.

Au delà d'une certaine température, le matériau n'est plus ferromagnétique mais paramagnétique, cette transition a lieu à la température de Curie.

Comme  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\vec{H}$  avec  $\mu_r$  la perméabilité relative du matériau, et  $\mu$  la perméabilité du matériau.

↓ Nous venons d'établir une relation constitutive pour un matériau magnétique, nous en avons déjà établie ce type de relation dans les milieux conducteurs, nous pouvons nous demander si une analogie entre circuit électrique et circuit magnétique est envisageable.

### 1.3 Réluctance magnétique

☛ Trémolet II

Nous allons dans cette partie faire une analogie avec le courant électrique dans un conducteur, et définir la notion de circuit magnétique et de réluctance magnétique.

Relation	Circuit électrique	circuit magnétique
Relation constitutive	$\vec{j} = \sigma \vec{E}$	$\vec{B} = \mu \vec{H}$
Conservation du flux	$\text{div} \vec{j} = 0$	$\text{div} \vec{B} = 0$
Flux	$i = \int_S i dS$	$\Phi = \int_S B dS$
Circulation	$E = \int \vec{e} \cdot d\vec{l}$	$C = \int \vec{H} \cdot d\vec{l}$
Loi	$E = Ri$	$C = R_m \Phi$
Résistance, réluctance	$R = \int_C \frac{dl}{\sigma S}$	$R_m = \int_C \frac{dl}{\mu S}$

Ainsi les lignes de champ magnétique suivent le chemin de moindre réluctance. Comme  $\mu_{ferro} \gg \mu_{air}$ , on a  $R_{m,ferro} \ll R_{m,air}$ , un matériau ferromagnétique canalise les lignes de champ magnétique.

De plus  $C = \int \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = I_{enlacé}$ . On retrouve le théorème d'Ampère pour  $\vec{H}$ .

↓ Nous avons vu que pour un corps ferromagnétique, la relation constitutive est non linéaire, nous allons maintenant expliciter sa dépendance.

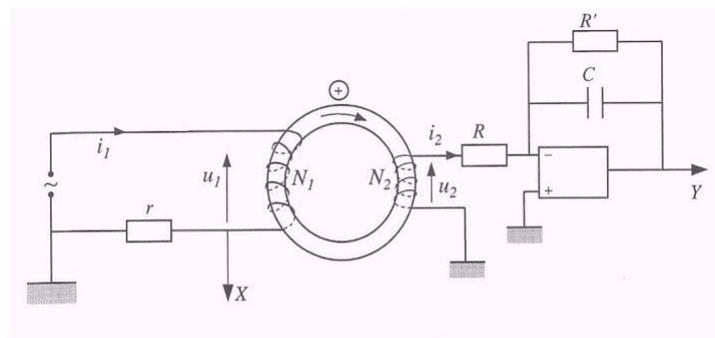
## 2 Aimantation d'un matériaux ferromagnétique

☛ Précis

### 2.1 Dispositif expérimental

L'objectif est d'étudier l'aimantation du ferromagnétisme donc de trouver un lien entre  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$ . Pour cela, il faut créer une excitation  $\vec{H}$  connue (théorème d'Ampère) et mesurer le champ  $\vec{B}$  créé dans la matière (loi de Faraday)

On suppose que le matériau est isotrope et homogène. On étudie un tore de ferrite entouré de deux bobinages suivant le montage expérimental ci dessous :



Cycle d'hystérésis du ferromagnétisme

Référence: C. Garing – Milieux Magnétiques – Ed. Ellipses

#### Mesure de l'excitation magnétique :

Pour déterminer à chaque instant l'excitation magnétique H, créée par le bobinage de  $N_1$  spires au primaire, appliquons le théorème d'ampère à un contour de rayon  $r_c$  situé dans le tore magnétique.

$$2\pi r_c H(t) = N_1 i_p(t) + \underbrace{N_2 i_2}_{\text{Négligeable}}$$

Or comme  $v = r i_p(t)$ . On a  $H(t) = \frac{N_1 v(t)}{2\pi r_c}$  Ainsi  $v$  est proportionnel à l'induction magnétique  $H(t)$ .

**Mesure du champ magnétique :**

Le flux de  $\vec{B}$  à travers cette bobine dépend du temps : il y a un phénomène d'induction. Il existe donc au borne du secondaire une force électromotrice  $e_2(t)$  tels que  $e_2(t) = -\frac{d\Phi}{dt}$ . On considère de plus que le courant de sortie  $i_2$  est nul. Donc  $u_2 = e_2$ . Et comme  $\Phi = N_2 AB(t)$  on obtient

$$u_2 = -N_2 A \frac{dB}{dt}$$

Il faut donc utiliser un intégrateur, pour remonter à  $B(t)$

## 2.2 Cycle d'hystérésis

### Tracer un cycle d'hystérésis

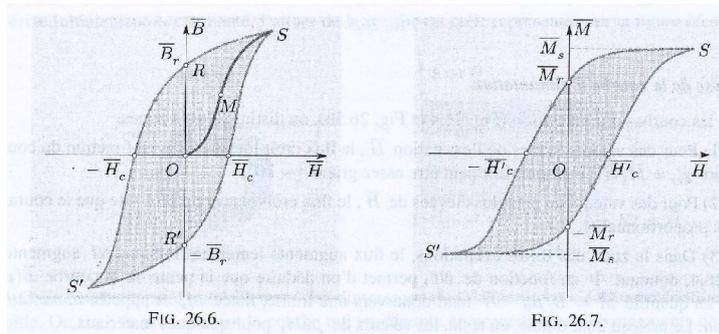
🔗 Précis

⌚ 5 min

Utiliser un GBF puis un ampli de puissance, un rhéostat (60 ohms), un intégrateur, un oscillo et un tore en ferrite. Visualiser le cycle en XY, commenter la forme du cycle

De la courbe  $B(H)$ , nous pouvons remonter à  $M(H) = \frac{1}{\mu_0} B(H) - H$

ALLURE DU CYCLE D'HYSTÉRÉSIS D'UN FERROMAGNÉTIQUE



On remarque que :

- Le cycle varie entre deux valeurs extrémales  $-B_{sat}$  et  $B_{sat}$  qui dépendent de l'amplitude du courant d'entrée. On a  $B_{sat} = \mu_0 H + \mu_0 M_{sat}$
- Lorsque  $H = 0$ ,  $B$  n'est pas nul (donc l'aimantation non plus). Ce champ est appelé le champ rémanent et  $B_r = \mu_0 M_r$ . Exemple : les aimants permanents.
- Pour annuler  $B$ , il faut appliquer une induction non nulle appelée champ coercitif,  $H_c$ .
- Le phénomène d'hystérésis traduit une irréversibilité du phénomène d'aimantation. (ie quand on inverse H, on ne passe pas par le même chemin)

ODG de l'aimantation à saturation : Fer  $M_{sat} = 1.710^6 A.m^{-1}$ , Cobalt  $M_{sat} = 1.410^6 A.m^{-1}$ , Nickel  $M_{sat} = 0.4810^6 A.m^{-1}$ .

ODG des champs coercitif et rémanent : Acier :  $B_r = 1T$ ,  $H_c = 4.10^3 A.m^{-1}$ . Fer, 4% Silicium :  $B_r = 1.4T$ ,  $H_c = 8A.m^{-1}$

On distingue deux types des matériaux : dur et doux.

**Corps doux** :  $H_c \leq 100 A.m^{-1}$  (aire du cycle faible).

**Corps dur** :  $H_c \geq 100 A.m^{-1}$  (aire du cycle grande).

Ces matériaux possèdent des propriétés physiques différentes et sont utilisés dans différents milieux de la physique que nous étudierons dans la dernière partie.

↓ *Nous allons nous demander comment interpréter ces propriétés macroscopiques à l'aide de nos connaissances sur le ferromagnétisme à l'échelle mésoscopique*

## 2.3 Interprétation mésoscopique

🔗 BFR 4

*Ce n'est pas le cœur du sujet au vu du titre "Propriété macroscopique", mais ça me semble important pour mieux comprendre l'origine du cycle d'hystérésis*

Comme nous l'avons vu dans une leçon précédente, un milieu ferromagnétique, même mono-cristallin, est divisé en domaines d'aimantation uniforme, de taille typique de l'ordre de 10 à 100 nm. Nous allons interpréter l'allure du cycle à l'aide des domaines de Weiss.

### Visualisation des domaines de Weiss

🔗 Notice

⌚ 5 min

Utiliser le microscope polarisant, une lame de ferrite (celle avec le sourire), une caméra IDS, un objectif (le petit), l'adaptateur microscope. On visualise le film sur le logiciel Ueye-cockpit. On montre l'évolution des domaines lors que l'on approche un aimant.

Lorsque l'on applique à l'échantillon un champ magnétique croissant, les domaines, qui possèdent une aimantation de même orientation que celle du champ, sont énergétiquement favorisés. Leurs domaines croient au détriment des autres qui diminuent de volume, cela se fait par déplacement des parois.

Pour des champs faibles, ces déplacements sont réversibles. Pour des champs plus fort, les déplacements sont devenus irréversibles, les parois rencontrent des "obstacles", impuretés ou défauts du cristal, sur lesquels les parois "restent accrochées" momentanément, l'augmentation se fait alors par sauts discontinus.

Enfin, pour des champs plus élevés, les domaines deviennent moins nombreux, il se produit alors une variation de la direction d'aimantation spontanée des domaines, visant à s'aligner avec le champ. Il se produit alors une rotation de l'aimantation avec disparition des dernières parois.



## 2.4 Aspect énergétique

🔗 Précis

On considère le même système, tore + bobinage. La puissance consommée en entrée est :  $P = -e_p i_p(t)$  avec  $e_p(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -N_1 A \frac{dB}{dt}$  et  $i_p(t) = \frac{2\pi r_c H(t)}{N_1}$  (théorème d'Ampère). Donc

$$P = \underbrace{2\pi r_c A}_{\text{volume du tore}} H(t) \frac{dB}{dt}$$

La puissance moyenne sur une période de l'excitation est donc :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V H(t) \frac{dB}{dt} dt = \frac{V}{T} \underbrace{\int_{\text{cycle}} H(t) dB(t)}_{\text{aire du cycle}}$$

L'aire du cycle d'hystérésis correspond à l'énergie volumique dissipée par le matériau ferromagnétique pendant la période à laquelle le cycle est parcouru.

Une conséquence de cette propriété est que les matériaux doux vont avoir moins de perte dues à l'hystérésis que les corps durs.

### 3 Applications

#### 3.1 Transformateur parfait

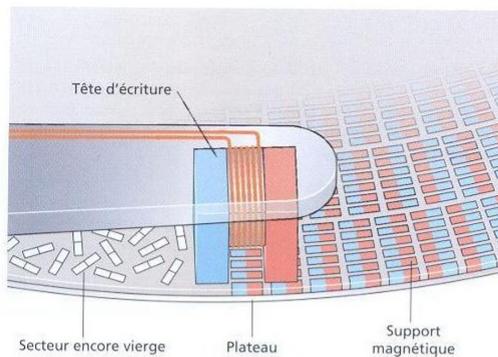
##### ⚡ Cap prépa

Tout est dans le cap prépa, en gros donner les hypothèses du transformateur parfait, faire les calculs, discuter de l'importance du courant alternatif, parler du transfo réel donc des pertes fer. Perte par hystérésis on utilise un ferro doux, perte due aux courant de foucault on utilise un matériau feuilleté

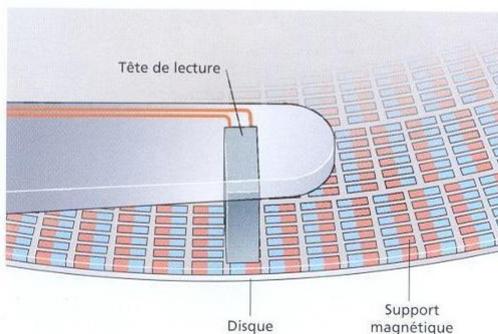
#### 3.2 Stockage de donnée

##### ⚡ La physique des objets du quotidien

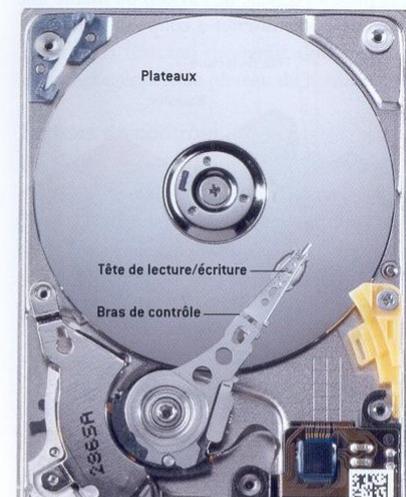
Encore une fois tout est dans le livre, cette partie reste très qualitative, aucun calcul fait pour ma part.



**5** Principe de l'écriture des données sur un matériau ferromagnétique. La direction de l'aimantation à l'intérieur des différentes zones magnétiques est symbolisée par un code de couleurs : en gris sont représentés les domaines dont l'aimantation possède une orientation quelconque, ce qui correspond aux secteurs vierges du disque dur ; la couleur indique les domaines dont l'aimantation a été modifiée par la tête d'écriture pour y enregistrer des données.



**6** Principe de la lecture des données. La résistance d'un circuit électrique se déplaçant à proximité d'une zone magnétique varie lorsque l'orientation de l'aimantation de la zone change brusquement. Cet effet permet de lire les données inscrites sur le support magnétique.



**7** Cette photo de l'intérieur d'un disque dur montre les éléments indispensables à son fonctionnement : les plateaux et la tête de lecture/écriture à l'extrémité du bras de contrôle. On aperçoit également une partie de l'électronique du contrôleur qui transmet les données à l'ordinateur.

## Conclusion

Nous avons vu dans cette leçon les caractéristiques d'un corps ferromagnétique qui se distingue par une susceptibilité magnétique très forte, une relation constitutive non linéaire qui dépend de l'histoire antérieure du milieu et met en jeu un cycle d'hystérésis caractéristique des phénomènes irréversibles. Les propriétés de ces corps sont utilisées dans de nombreux domaines, les transformateurs, le stockage d'information...

*Toutes les images viennent de la banque d'image de l'agreg!*

**Remarques et commentaires :**