

D22 – PROPRIÉTÉS MACROSCOPIQUES DES CORPS FERROMAGNÉTIQUES

23 juin 2021

Corentin Naveau & Simon Jeanne

Niveau : L2

Prérequis

- Électromagnétisme
- Loi de Faraday
- Milieux diamagnétiques et paramagnétiques

Expériences

- ☞ Mesure d'un cycle d'hystérésis de fer doux et de fer dur

Table des matières

1	Les corps Ferromagnétiques	2
1.1	Étude expérimentale	2
1.2	Cycle d'hystérésis	3
1.3	Aspect Énergétique	3
1.4	Explication mésoscopique : les domaines de Weiss	3
2	Application	4
2.1	Transformateur	4
2.2	Disque dur	4
2.3	Paléomagnétisme	4

Introduction

Lorsque nous avons étudié l'électromagnétisme dans les milieux, nous avons défini l'excitation électrique et l'excitation magnétique :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \quad (2)$$

$$(3)$$

Avec \vec{P} et \vec{M} la polarisation et l'aimantation.

Par ailleurs nous avons vu quand dans les milieux linéaires homogènes isotropes :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (4)$$

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (5)$$

$$(6)$$

χ_e et χ_m étant les susceptibilités électriques et magnétiques. Dans cette situation, nous avons défini deux types de milieu magnétique : les diamagnétiques ($\chi_m \simeq -10^{-5}$) et les paramagnétiques ($\chi_m \simeq 10^{-3}$).

Dans les deux cas, on a :

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \quad (7)$$

Ainsi, sans excitation magnétique \vec{H} , le corps dia ou para ne possède aucune aimantation. Pourtant, nous possédons des aimants permanents ! Comment cela marche-t-il ?

1 Les corps Ferromagnétiques

Les matériaux non-linéaires isotropes sont en réalité ceux qui nous intéressent aujourd'hui : ce sont les matériaux ferromagnétiques. Ils sont tels que χ_m soit positif, mais aussi et surtout fonction de H ! Les valeurs atteintes pour χ_m peuvent alors devenir très importantes (jusqu'à 10^5 , donc gigantesque par rapport au paramagnétisme). Cependant, cette propriété est assez rare (Fer, Cobalt, Nickel et leurs alliages), et ne s'observe que dans des corps à structure cristalline. De plus, on observe expérimentalement que cette propriété de ferromagnétisme dépend de la température, et disparaît complètement au-dessus d'une température appelée température de Curie (Fe : 1043 K, Ni : 631 K, Co : 1400 K). Pour des températures trop élevées, le matériau redevient paramagnétique uniquement.

1.1 Étude expérimentale

Pour mieux comprendre ce qu'il se passe dans ces matériaux, faisons une petite expérience.

Nous prenons un tore de matériaux ferromagnétique.

D'un côté, nous plaçons une bobine dans laquelle nous faisons passer un courant. Cette bobine engendre une excitation magnétique. Dans le tore (le champ magnétique est guidée par le Tore car la permittivité de celui-ci est bien plus grande que celle du vide. Voir réluctance).

On applique le théorème d'ampère au tore. Dans les fait, il y a une légère perte dû à l'effet joule. Le feuilletage a pour but de limiter ces pertes.

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \iint \vec{j}_{libre} d^2 \vec{S} \quad (8)$$

$$H = \frac{N_1 i}{l} \quad (9)$$

Avec N_1 le nombre de spires de la bobine et l la longueur du tore. Il suffit de mesurer la tension au borne d'un rhéostat pour connaître l'intensité et finalement l'excitation magnétique.

De l'autre côté du tore, on place une seconde bobine. Les variation du champ \vec{B} à travers la bobine induise une force électromotrice :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (10)$$

On relie cette bobine à un circuit intégrateur RC (circuit RC, tension de sortie mesurée sur le condensateur) Si $RC\omega \gg 1$, la tension de sortie de l'intégrateur :

$$S = \frac{E}{1 + jRC\omega} \simeq \frac{E}{RCj\omega} \quad (11)$$

$$s = \frac{1}{RC} \int e dt = \frac{N_2 S}{RC} B + cste \quad (12)$$

Grace à ce dispositif, on peut tracer B (ou $M = B/\mu_0 - H$) en fonction de H .

1.2 Cycle d'hystérésis

Expérience : On trace le cycle d'hystérésis sur un oscillo (et si possible la courbe de première aimantation), et on décrit ce qu'on voit (suivre le TP électromagnétisme p14).

Quand on commence à exciter le matériau, l'aimantation commence par monter linéairement :

$$M = \chi_m H \quad B = \mu_0(1 + \chi_m)H \quad (13)$$

Puis atteint un palier $M = M_{sat}$. B suit alors une loi affine de l'excitation :

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M_{sat} \quad (14)$$

On diminue l'excitation, et la surprise : le champ B ne suit plus la même courbe ! Pire, lorsque l'excitation est nulle, il persiste un certain champ magnétique rémanent B_r . Pour annuler le champ, il faut envoyer une excitation négative dite "excitation coercitive" H_c .

- Matériaux doux : facile à désaimanter ($H_c < 400 \text{ A/m}$)
- Matériaux dur : difficile à désaimanter ($H_c > 10^4 \text{ A/m}$)

Matériau	B_r (T)	H_c (A/m)
acier trempé	0.8	4.1
Alnico	0.7 à 1.3	48000
Néodyme	1.3	860000
Fer, 3% silicium	1.5	8

On mesure H_c et B_r pour notre tore.

1.3 Aspect Énergétique

Le tore ferromagnétique ne se contente pas d'exercer une force électromotrice sur la deuxième bobine : il en exerce aussi une sur la bobine numéro 1. Nous cherchons à connaître la puissance de cette force électromotrice.

$$P = i_1 \times e_1 = \frac{Hl}{N_1} \times \left(-N_1 S \frac{dB}{dt} \right) = -VH \frac{dB}{dt} \quad (15)$$

Ainsi l'énergie volumique consommée durant un cycle vaut :

$$E = \int H \frac{dB}{dt} dt = \int H dB \quad (16)$$

c'est à dire l'aire du cycle !

Cette énergie perdue à chaque cycle correspond à la perte fer. Elle vient s'ajouter aux pertes par courant de Foucault, ainsi qu'aux pertes cuivres (résistances des bobines).

Ainsi, pour un transformateur électrique, il vaut mieux un fer doux (petit cycle hystérésis) pour limiter les pertes.

Expérience : On calcule l'énergie volumique perdue lors d'un cycle pour notre tore.

1.4 Explication mésoscopique : les domaines de Weiss

Nous venons de décrire empiriquement les propriétés des corps ferromagnétiques, mais comment les expliquer ?

L'interprétation du ferromagnétisme est basée sur l'hypothèse, effectuée en 1907 par le physicien français Pierre Weiss, qu'un matériau ferromagnétique est divisé en domaines, appelés domaines de Weiss. Chacun de ces domaines

est aimanté, ie que les dipôles magnétiques qu'il contient sont tous orientés dans la même direction ; l'aimantation d'un tel domaine est appelée aimantation spontanée. Lorsque l'échantillon n'est pas aimanté, les différents domaines (taille typique : 10-100 μm) ont des orientations très diverses et l'aimantation macroscopique résultante est nulle.

Les directions d'aimantation spontanées correspondent à des orientation préférentielles, qui dépendent de la structure du cristal. Par exemple pour le fer, qui cristallise dans le système cubique centré, ces directions sont celles des arêtes du cube. Pour le nickel, qui cristallise dans le système cubique faces centrées, ce sont les diagonales du cube. Les frontières entre les domaines ("parois") sont les zones où l'aimantation change de direction. Leur épaisseur typique est 0.1 μm (qqes centaines de distances inter-atomiques). Exemple : retournement de 180° de l'aimantation = "parois de Bloch". À la surface d'un ferromagnétique, on observe des "domaines de fermeture" qui diminuent ou même annulent le champ créé à l'extérieur. ces domaines de fermeture ont des formes qui dépendent des directions de facile aimantation du cristal.

2 Application

2.1 Transformateur

L'application la plus évidente des ferromagnétiques est le transformateur électrique.

Leurs très forte permittivité magnétique permet d'avoir une d'induction mutuelle quasiment parfait entre deux bobines. Le ratio entre tension de sortie et tension d'entrée est le même que le ratio des nombres de spires des bobines.

Seul défaut : le cycle d'hystérésis est une source de pertes d'énergie. On peut les diminuer en choisissant le matériau le plus doux possible, mais pas les annuler.

2.2 Disque dur

Les matériaux ferromagnétiques conservent une trace de leur histoire : leurs aimantations dépendent non seulement de l'excitation actuelle, mais également des excitations passées.

Ils sont donc à la base de technologie de stockage de données, comme les disques durs. Pour le stockage, un matériau dur est utilisé (stabilité de l'info). Pour la tête de lecture, on utilise un matériau doux.

2.3 Paléomagnétisme

Lors de la formation du basalte océanique, la magnétite Fe_3O_4 qu'il contient devient ferromagnétique en se refroidissant. L'aimantation s'oriente alors selon celle du champ magnétique terrestre, puis reste figée.

L'analyse de ses roches permet d'étudier l'histoire du champ magnétique terrestre.

Conclusion

Aujourd'hui, nous avons étudié les propriétés des corps ferromagnétiques, ce qui nous a permis de comprendre le fonctionnement des aimants permanent, ou encore des condensateurs.

Ces propriétés sont dues à l'existence de domaine de Weiss, des domaines aimantés mésoscopiques.

Mais pourquoi ces domaines existent, et pourquoi disparaissent-ils au delà d'une certaine température critique ?

Nous verrons cela dans notre prochaine leçon sur les transitions de phase.