

27 juin 2020

LP46 - Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques.

Gauthier Legrand et Francis Pagaud

27 juin 2020

Bibliographie

- Physique tout en un PSI **Sanz**
- Électromagnétisme IV **BFR**
- Magnétisme II - Matériaux et applications **Trémolet**
- Électromagnétisme II **Brébec** Hprépa

Pré-requis :

- Induction, électrocinétique
- Equations de Maxwell
- Bilan de puissance ?

Table des matières

1	Champs magnétique dans un corps ferromagnétique	2
1.1	Notion de susceptibilité magnétique	2
1.2	Canalisation des lignes de champ	3
1.3	Reluctance : application au transformateur	3
2	Réponse (dynamique ?) d'un corps ferromagnétique	4
2.1	Cycle d'hystérésis	4
2.2	Point de vue énergétique	5
2.3	Interprétation	5

3 Application	5
3.1 Le disque dur	5
3.2 Désaimantion	6
3.3 Transition ferro-para	6

Reste à faire :

Commentaires du jury

- 2016** Un bilan de puissance soigné est attendu.
- 2015** Le principe de fonctionnement du circuit électrique utilisé pour présenter un cycle d'hystérésis doit être connu.
- 2001** Il faut consacrer du temps aux applications (stockage des données, transformateurs, électroaimants, . . .) en justifiant l'adéquation du type de matériau ferromagnétique à la fonction visée.
- 1999** Il est souhaitable de distinguer plus nettement les domaines d'application des ferro doux et des ferro durs (par exemple pourquoi une tête de lecture est-elle en ferro doux alors que le support d'enregistrement est en ferro dur?).

Introduction

Dire qu'on va se limiter aux milieux isotropes.

Problématique :

1 Champs magnétique dans un corps ferromagnétique

1.1 Notion de susceptibilité magnétique

Source : Sanz chapitre 24

On fait le décompte des équations : on a besoin de définir une relation de fermeture, qui définit alors la susceptibilité magnétique

On définit alors la perméabilité du milieu $\mu_r = 1 + \chi_m$

La particularité des corps ferromagnétiques c'est que la perméabilité du milieu est très grande : de l'ordre de 10^2 à 10^6 , à comparer aux para et dia magnétiques pour lesquels $\mu_r \simeq 1$.

Expérience on peut montrer expérimentalement l'effet d'un corps ferromagnétiques sur les bobines. En effet on connaît l'expression d'une inductance $L = \frac{N^2 S \mu_0 \mu_r}{l}$. On

mesure l'inductance avec un RLC-mètre (être au taquet sur comment ça marche) d'une bobine avec et sans noyau de fer. Le rapport des deux donne un μ_r . Dans l'idée ça marche que pour un fer doux dans le régime linéaire. C'est fait dans cette vidéo à partir de 19'00" : <https://www.youtube.com/watch?v=FYZBmNxV9N4>. il faudrait avoir vu la notion d'inductance et son expression dans un cours antérieur : ça peut avoir été fait dans un cours d'induction.

[https://www.eleves.ens.fr/home/hroussil/Cours/Utilisation_du_RLC-m%C3%A8tre%20\(par%20Guillaume%20Albert%20agreg%C3%A9%202013\).pdf](https://www.eleves.ens.fr/home/hroussil/Cours/Utilisation_du_RLC-m%C3%A8tre%20(par%20Guillaume%20Albert%20agreg%C3%A9%202013).pdf)

Transition : À part pour augmenter des inductances, les corps ferromagnétiques sont utiles pour canaliser les lignes de champ

1.2 Canalisation des lignes de champ

Source : Sanz page 677 + ex 24.5 (page 692)

On montre la loi de Snell-Descartes pour le magnétisme : suivre l'exercice.

$$\begin{aligned} \text{div } \vec{B} = 0 \text{ donne } \vec{B}_{\text{normal}}^{\text{fer}} &= \vec{B}_{\text{normal}}^{\text{air}} \\ \longrightarrow \text{rot } \vec{H} = \vec{j}_{\text{libre}} = \vec{0} \text{ donne } \vec{H}_{\text{tangent}}^{\text{fer}} &= \vec{H}_{\text{tangent}}^{\text{air}} \end{aligned}$$

Avec $\vec{B} = \mu \vec{H}$ on trouve que l'angle des lignes de champs dans l'air et dans le fer sont tels que : $\frac{\tan i_{\text{air}}}{\mu_0} = \frac{\tan i_{\text{fer}}}{\mu_0 \mu_r}$. On en déduit que le champ en sortie du matériau est normal à l'interface : on a bien canalisé le champ.

C'est d'ailleurs énergétiquement favorable de confiner le champ dans le corps ferromagnétique car $u_m = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu_r}$. Faire le schéma 24.14 du Sanz (page 678)

Transition : Ce confinement des lignes de champ peut être facilement exploiter, regardons l'exemple du transformateur

1.3 Reluctance : application au transformateur

Source : Trémolet page 137 + BFR 4 page 136 pour l'intérêt de tore + Sanz page 682

La canalisation des lignes de champ permet de limiter les pertes de flux comme on l'a vu sur le schéma. C'est très pratique si on veut transmettre un flux magnétique.

Modèle du transfo parfait :

- Circuit linéaire homogène isotrope, perméabilité infinie.
- aucune perte de flux
- Résistance des enroulements nulle

On ne va pas refaire les équations de fonctionnement pour plutôt s'intéresser aux propriétés physiques importantes du corps ferromagnétique.

Sur slide On dresse alors un tableau comparatif entre l'électrocinétique et le magnétisme

Circuit	Électrique	Magnétique
Champ	\vec{E}	\vec{H}
Relation constitutive	$\vec{j} = \sigma \vec{E}$	$\vec{B} = \mu \vec{H}$
Conservation du flux	$\text{div} \vec{E} = 0$	$\text{div} \vec{B} = 0$
Flux intégré	$i = \iint \vec{j} \cdot d\vec{S}$	$\phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$
Circulation	$U = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}$	$C_m = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l}$
Réistance / Réductance	$R = \int \frac{dl}{\sigma S}$	$R_m = \int \frac{dl}{\mu S}$
Loi	$U = Ri$	$C_m = R_m \phi$

Transition : On a compris comment fonctionne un corps ferromagnétique, voyons sa réponse dynamique

2 Réponse (dynamique ?) d'un corps ferromagnétique

2.1 Cycle d'hystérésis

Source : Sanz + BFR

Expérience faire le circuit intégrateur pour dessiner sur LatisPro le cycle d'hystérésis. Ne pas perdre trop de temps sur la description du montage élec : juste dire qu'on a un montage intégrateur et qu'à partir de la loi de Lenz on trouve directement le champ B . **sur slide** le circuit élec je sais pas s'il faut dire que c'est le cas particulier d'un tore, peut-être

<https://www.youtube.com/watch?v=YiKFPyfC1HY>

À partir de cette courbe expérimentale on définit le champ coercitif, le champ rémanent

Expliquer que c'est comme ça qu'on fabrique des aimants permanents.

Je pense pas que ce soit très important de parler de la courbe de première aimantation et de comment désaimanter, parce que ça faut savoir ce qu'il se passe microscopiquement

Donner des odg :

les ferromagnétiques doux (fer doux, Permalloy 20 % Fe, 80 % Ni) pour le permalloy : $\mu = 10^{-2}$, $B_r = 0,8T$ et $H_c = 4A.m^{-1}$

les ferromagnétiques durs (fer durs, aimants néodyme NdFeB, Alnico 5 52% Fe, 13% Ni, 24% Co, 8% Al, 3%Cu) : saturation pour des champs coercitifs 5 ordres de grandeur supérieurs ? OdG : Alnico 5 $B_r = 1,2T$ et $H_c = 4.610^4 A.m^{-1}$ à comparer avec $\mu = 1,5$

qui donne un champ B correspondant énorme

Transition :

2.2 Point de vue énergétique

Source : Sanz

Pertes fer : par courant de Foucault et par hystérésis

Pertes cuivres : dans la bobines

Mentionner l'intérêt du feuilletage pour le transformateur et pourquoi c'était une bonne idée de prendre un fer doux.

https://fr.wikipedia.org/wiki/T%C3%B4les_feuillet%C3%A9es

Faire la mesure sur l'expérience faite de la perte par cycle : $W = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{H}$

À comparer avec le tableau 183 du BFR

Transition :

2.3 Interprétation

Source : BFR page 179

faire attention pendant cette sous-partie, elle peut facilement tomber dans le hors-sujet. C'est peut-être mieux de ne même pas la faire

Pour comprendre comment on obtient ce genre de courbe, il faut comprendre d'où apparaît l'aimantation dans un corps ferromagnétique.

Intuitivement : quand on coupe un aimant en 2 on obtient 2 aimants, mais jusqu'où on peut aller ? La limite c'est les domaines de Weiss

On peut comprendre ceci intuitivement en regardant le rayonnement macroscopique de l'aimant :

<https://www.youtube.com/watch?v=QgwReDkpq6E>

Ces domaines sont microscopiques mais on peut les voir macroscopiquement : microscope à polarisation

Transition :

3 Application

3.1 Le disque dur

Si on veut le faire, le principe de fonctionnement est très très bien présenté dans la vidéo wiki ici : https://fr.wikipedia.org/wiki/Disque_dur#Principe_de_fonctionnement.

L'épreuve C2019 en parle également, ça peut être utile : <http://www.agregation-physique.org/index.php/annales-des-epreuves-ecrites/68-sc2019>

3.2 Désaimantation

Source : Garing magnétisme exercice 5.9 (page 194), Pérez thermo

Finalement non, c'est pas propre au ferromagnétisme.

3.3 Transition ferro-para

Source : Texier (page 223) et Diu physique statistique

loi de Curie-Weiss : $\chi_m = \frac{C}{T - T_C}$

Modèle de Landau : $f = f_0(T) + a(T - T_c)M^2 + bM^4$

Modèle de champ moyen : $F = Nk_B \left(\frac{T_c}{2} \frac{M^2}{M_\infty^2} - T \ln \left(2 \cosh \frac{T_c}{T} \frac{M}{M_\infty} \right) \right)$ c'est à dire

pour M proche de 0 : $F \simeq Nk_B \left(-T \ln 2 + \frac{T_c}{2} \left(1 - \frac{T_c}{T} \right) \left(\frac{M}{M_\infty} \right)^2 + \frac{T_c^4}{12T^3} \left(\frac{M}{M_\infty} \right)^4 \right)$

Donc c'est un peu décevant parce que les coefficients dépendent de la température. De ce que j'ai compris, l'astuce c'est de dire $T \rightarrow T_c$ (et d'ailleurs on s'est mis dans le cas $B \ll M$) ce qui permet d'écrire

$$F \simeq Nk_B \left(-T \ln 2 + \frac{1}{2} (T - T_c) \left(\frac{M}{M_\infty} \right)^2 + \frac{T_c}{12} \left(\frac{M}{M_\infty} \right)^4 \right)$$

Conclusion

Ouvertures possibles :

Commentaires pendant la prépa aux oraux

- En tout rigueur, les valeurs de l'excitation coercitive, qui annulent l'aimantation et le champ magnétique, ne sont pas exactement identiques. Elles sont toutefois expérimentalement suffisamment proches pour les confondre.
- Domaines de Weiss visualisés : 5'30" ici : <https://www.youtube.com/watch?v=zD0lK1lbW2M>, merci Jamy

—
—
—

Questions

Ferrofluide : ferro ou para ? Un ferrofluide est une suspension colloïdale de particules ferromagnétiques constituées d'un seul domaine de Weiss. Cela confère au fluide un comportement de type paramagnétique.

Aimantation d'une boussole ? En pratique, pour aimanter une boussole, on la chauffe au delà de la température de Curie et on la refroidit dans un champ magnétique qui empêche la formation de domaines de Weiss. Bien entendu, ce champ magnétique ne peut pas être créé par un aimant qui perdrait lui aussi son aimantation. On place donc l'aiguille à aimanter dans un solénoïde parcouru par un courant.

Est-ce que tu peux revenir sur l'expérience de l'aimant brisé et expliciter en quoi cela implique que l'aimantation est une propriété volumique ?

Peux-tu préciser d'où vient l'aimantation dans la matière ? A quoi correspond le terme $j_{\text{lié}}$?

Peux-tu revenir sur les hypothèses qui te permettent d'écrire les relations de Maxwell ? Il manque des équations dans le décompte car les trois équations du rotationnel ne sont pas indépendantes.

Peux-tu donner des ordres de grandeurs des susceptibilités magnétiques des corps diamagnétiques et paramagnétiques ? Quelle est l'origine microscopique de ces comportements ?

Est-ce qu'il faut forcément un réseau cristallin pour permettre le ferromagnétisme ?

Une fois que le matériau est aimanté, comment peut-on le désaimanter ? Comment expliquer le phénomène d'hystérésis ? Est-ce que tu peux tracer le cycle d'hystérésis pour B en fonction de H au lieu de M en fonction de H ?

Est-ce qu'il y a d'autres pertes que les pertes fer et les pertes cuivre ? Pourquoi l'aimantation des roches ne change-t-elle pas lors d'une inversion du champ magnétique terrestre ?

ODG de la susceptibilité d'autres comportements magnétiques

Le transformateur proposé est-il vraiment parfait ?

Comment justifier la canalisation des lignes de champ ? Pourquoi un ferromagnétique se comporte ainsi ?

L'interaction qui favorise l'ordre ferromagnétique est-elle de type dipolaire ? Quelle est son origine ? Réexpliquez simplement la transition de phase. Nope, ce n'est pas une interaction dipolaire mais combinaison Principe de Pauli + répulsion coulombienne.

Qu'est-ce que sont les parois de Bloch ? Rôle de Mr Bloch en physique du solide ? De Félix Bloch (physicien suisse) et non Eugène Bloch (physicien français qui a contribué à la radio et à la spectroscopie). Prix Nobel en 1952 : « pour leur développement de nouvelles méthodes de mesures magnétiques nucléaires fines et les découvertes qui en ont découlé », soit principalement la RMN. Thèse avec Heisenberg : physique du solide, fonctions de Bloch (1928). Premier directeur général du CERN.

Montage : fonction de transfert ? pseudo-intégrateur ? rôle de chaque composant ? pour-

quoi un ampli de puissance ? Quand vous coupez l'alim, quels processus de relaxation et quels temps caractéristiques mis en jeu ?

Quelles recherches aujourd'hui sur le magnétisme ?

Existe-t-il du magnétisme pour des systèmes monoatomiques ?

Comment fonctionnent les résistances dont la résistance varie lors de la variation d'un champ ?

Citer d'autres phénomènes d'hystérésis.