

Titre : LP22 : Propriété macroscopiques des corps ferromagnétiques

Présentée par : Théo Le Bret

Rapport écrit par : Quentin Berrahal

Correcteur : Gwendal Fève

Date : 09/01/2020

Bibliographie de la leçon :			
Titre	Auteurs	Éditeur	Année
BUP 1087 Naissance de l'EM	J. Rosmorduc		
Électromagnétisme	Pérez	Dunod	
Tout en un Physique PSI		Dunod	
BFR EM vol. 4 EM dans les milieux	BFR		

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : L3

Pré-requis : Équations de Maxwell dans les milieux aimantés.

Intro : Depuis l'Antiquité on connaît... A partir du 17^e, on remarque d'autres propriétés. De nombreuses applications.

I – Aimantation d'un ferromagnétique

1) Déf

Ferro → « s'il s'aimante fortement en présence d'un champ magnétique externe et conserve son aimantation quand $B_{\text{ext}}=0$. Caractéristique des solides cristallins. ODG $\mu_0 M = 2T$ et $B_{\text{terrestre}} 50\mu T$.

2) Première aimantation

Rappels définition \mathbf{H} (en A/m), μ et $\text{rot}(\mathbf{H})=\mathbf{j}_{\text{lib}}$.

Courbe $M=f(H)$. 3 domaines jusqu'à M_{sat} . 1 : linéaire 2 : non linéaire 3 : saturation.

De même avec la courbe $B=f(H)$. Existence d'un μ_{max} . On a $\mu_r \sim 10^5$.

3) Amplification et canalisation de Φ_B 10'

Théorème d'Ampère → $Hl = N_i \rightarrow \Phi_B = N_s \mu H = N^2 S \mu i / l = L i \rightarrow$ Augmentation de l'inductance.

Canalisation : $\Phi_f = N S B = N S \mu_0 H = \dots \Phi_f / \Phi \sim \mu_0 / \mu \ll 1$

Transition : dans un cas plus complexe, celui du transformateur on peut observer les pertes.

II – Cycle d'hysteresis dans un transformateur 16'

Présentation de l'expérience.

1) Dispositif

$V_x = R_i = R l H / N_1$ $V_y = N_2 S B / R' C$. Lecture sur l'oscilloscope de la courbe d'hystérésis. Mesure du champ rémanent B_r de 3T. Vraisemblablement une erreur

Ferro « doux » : B_r et M_r faibles. $H_c \sim 1A/m$

contre

ferro « durs » avec $B_r \sim 1T$. $H_c \sim 10^3$

On peut également mesurer H_c qui est le champ coercitif pour désaimanter le ferro.

2) Pertes par hystérésis 25'

$\Delta W = \oint \mathbf{j}_{\text{lib}} \cdot \delta \mathbf{A} d\tau$ avec \mathbf{A} le potentiel vecteur.

Calcul.

$\Delta W = \oint \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{B}$

$W_{\text{cycle}} = f \cdot v_{\text{ferro}} \cdot \text{Aire du cycle}$.

3) Interprétation du ferro 34'

Weiss (1907)

Il existe des domaines magnétiques.

Schéma des domaines de Weiss.

Diminution de l'énergie grâce à la fermeture des lignes de champs mais aussi augmentation à cause des parois de domaines de Bloch.

ODG : $100\mu m$ pour un domaine, $0.1 \mu m$ pour une paroi.

Ces domaines nous permettent de comprendre la courbe de première aimantation.
1 : Alignement des domaines de Weiss avec la direction du champ H . Linéaire et réversible.
2 : Déplacement des parois. Irréversible et non linéaire. Claquage des parois de domaines.
3 : Tous les domaines sont à M_{sat} .
CCL : On a présenté les prop macro de ferro. Avec des interprétations de cet ordre. Avec notamment des applications.

Questions posées par l'enseignant

Quels sont les claquements de parois ? Ce n'est pas le terme technique.

Le corps ferro possède des défauts qui font que les parois s'accrochent aux défauts. (Confusion avec lignes de champ).

Que se passe-t-il dans la partie 3 ? Au début ?

Vient du fait que les moments passent de l'axe de facile aimantation vers la direction de H .

Si on change la direction du champ magnétique ? Cela change-t-il le cycle d'hystérésis ?

Oui. Mais on ne le voit que pour des mono-cristaux.

L'effet Kerr magnéto-optique ? Comment ça marche ?

On envoie de la lumière polarisée dont la polarisation est modifiée par l'aimantation de surface quand elle est réfléchie.

Des arguments pour trouver la taille des domaines ?

Équilibre entre le coût des parois et l'avantage en matière d'énergie. Il y a un effet qui vient de la surface et l'autre du volume.

C'est quoi l'intérêt d'introduire H ?

Son rot dépend exclusivement des charges libres.

C'est quoi les courants de polarisations ?

Le ferromagnétisme n'existe que dans les solides cristallins ?

Oui, les ferrofluides sont des suspensions de nanoparticules (elles-même des solides cristallins).

Nécessite un solide cristallin.

Quels sont les cycles d'hystérésis d'un ferro dur et d'un ferro doux ?

Quel choix pour le condensateur du circuit intégrateur ?

]Commentaires donnés par l'enseignant

Vous n'avez pas défini l'aimantation. Il faut le faire au début. Pas longtemps, mais il faut le faire.

La distinction ferro dur ou doux est discutée trop rapidement.

Vous avez caché la canalisation dans le cas de la bobine à noyau de fer doux.

On pourrait partir de la canalisation via Maxwell et les relations de passage (bien fait dans le BFR).

Je n'ai pas compris votre partie sur la canalisation.

Indispensable de donner des valeurs.

Il faut tracer le cycle d'hystérésis des deux matériaux doux et durs. Il faut noter H_c et M_r sur ces courbes.

Le calculs des pertes peut se faire plus rapidement.

Parler des utilisations de durs et des doux.

Donner des exemples de matériaux doux et durs.

Est ce que I_2 (dans la deuxième bobine) est nul ? Quasiment car la résistance est très élevée.

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

- la leçon présentée avait un principal défaut, elle ne discutait pas assez les deux cas des ferro doux et ferro durs en distinguant bien leurs différentes applications. En dehors de cette critique importante, le contenu présenté était tout à fait satisfaisant même si je suggère quelques modifications.
- concernant le plan, suite à la remarque ci-dessus, je suggère de rajouter une partie du type : Matériaux ferromagnétiques doux et durs et leurs applications. Cette partie peut suivre naturellement la présentation du cycle d'hystérésis pour introduire la distinction entre les deux matériaux.
- la grande difficulté de la leçon est la gestion du temps, pour discuter cette troisième partie, il faut gagner du temps : je suggère une discussion de la canalisation du flux inspirée du BFR volume 4 qui me paraît plus simple que celle discutée dans la leçon (à faire directement après Maxwell), je suggère une discussion beaucoup plus simple des pertes par hystérésis, cf Perez électromagnétisme.
- je suggère de définir l'aimantation au début de la première partie

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

- relation non-linéaire entre M/B et H , cycle d'hystérésis
- canalisation du flux magnétique lorsque $\mu_r \gg 1$
- Différence entre ferro doux et ferro dur et leurs applications différentes :
Ferro doux : $H_c \leq 100 \text{ A.m}^{-1}$, petit cycle d'hysteresis, μ_r élevée (parler de perméabilité à un sens car le cycle d'hystérésis a une petite aire), forte canalisation du champ magnétique et faibles pertes par hystérésis. Applications : transformateur, électroaimant, électronique. Exemples de matériaux : permalloy (alliage Nickel-Fer) $\mu_r \sim 10000$, Mumetal (également alliage de Fe et Ni), fer doux $\mu_r \sim 1000...$
Ferro dur : grand cycle d'hystérésis, $H_c \geq 1000 \text{ A.m}^{-1}$, forte aimantation ou champ rémanent, application aux aimants permanents (et leurs utilisations dans les moteurs et générateurs électriques) et pour le stockage d'information, exemples de matériaux : Alnico (alliage Al, Ni, Co), $H_c \approx 10000 \text{ A.m}^{-1}$, $B_r \approx 1 \text{ T}$, terres rares (Samarium Cobalt, Neodyme Fer Bore), $H_c \approx 10^6 \text{ A.m}^{-1}$, $B_r > 1 \text{ T}$

Concepts secondaires mais intéressants :

- intérêt de H qui n'est relié que aux courants libres par le théorème d'Ampère
- pertes par courants de Foucault, introduction de Si dans fer doux pour détériorer la conductivité
- ferrimagnétisme : moments magnétiques antiparallèles et d'amplitudes différentes (aimantation totale non nulle), c'est le cas des ferrites utilisés pour les applications hautes fréquences pour limiter les pertes par courants de Foucault (les ferrites sont des isolants).
- taille domaine de Weiss fixée par la compétition entre énergie volumique et énergie surfacique

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

L'expérience proposée est tout à fait adaptée, extraire une valeur de H_c ou B_r et la discuter dans le cadre des matériaux ferromagnétiques doux/durs. Attention à en maîtriser les différents aspects: circuit intégrateur, théorème d'Ampère en négligeant le courant dans le circuit secondaire...

Bibliographie conseillée

- BFR volume 4, Perez Electromagnétisme
- l'interprétation de la courbe d'hystérésis en terme de domaines de Weiss est bien discutée dans le Feynman volume 2 p324 ainsi que dans le Kittel.