

Titre : Approche macroscopique du ferromagnétisme

Présentée par : Gustave

Rapport écrit par : Romain

Correcteur : Gwendal Feve

Date : 24.01.2025

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
BFR 4 3 ^e édition		Dunod
Dunod Physique PSI/PSI* 6 ^e édition		Dunod

Compte-rendu détaillé de la leçon

Pas de photographies de brouillons ! Le compte-rendu doit être rédigé, pour que l'enseignant puisse corriger si nécessaire.

Niveau choisi pour la leçon : CPGE 2eme Année

Pré-requis : Electromagnétisme, inductances propre et mutuelle

I / Première partie : Propriété des milieux ferromagnétiques

A] Première sous-partie : Champs magnétiques, aimantation et excitation magnétique

Les ferromagnétiques perturbent fortement le champ magnétique dans lequel ils sont plongés.

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

Avec :

\vec{H} : excitation magnétique

\vec{M} : aimantation

On peut réécrire $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

Où :

χ_m : susceptibilité magnétique

D'où $\vec{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H}$

Avec :

$$\mu_r = 1 + \chi_m : \text{la perméabilité magnétique relative}$$

Ordre de grandeur :

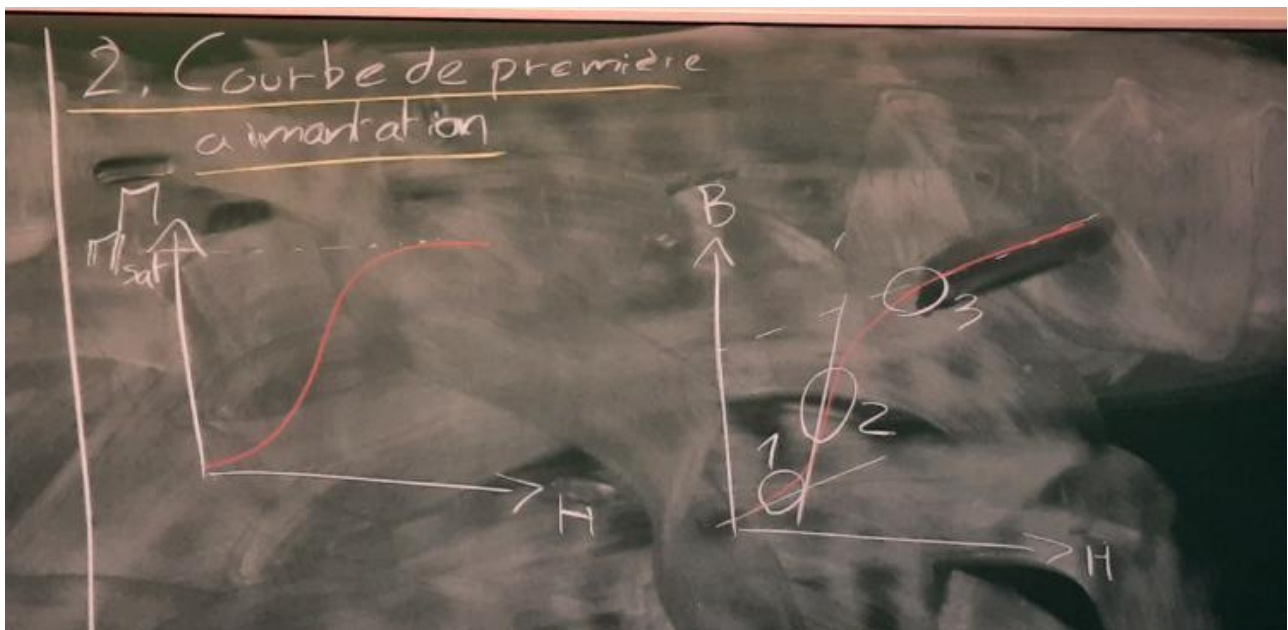
$$\text{Diamagnétique : } \chi_m = -10^{-5}$$

$$\text{Paramagnétique : } \chi_m = 10^{-3}$$

$$\text{Ferromagnétique } \chi_m = 10^2 - 10^6$$

B] Deuxième sous-partie : Courbe de première aimantation

La réponse du matériau ne va pas être linéaire en fonction de l'excitation.

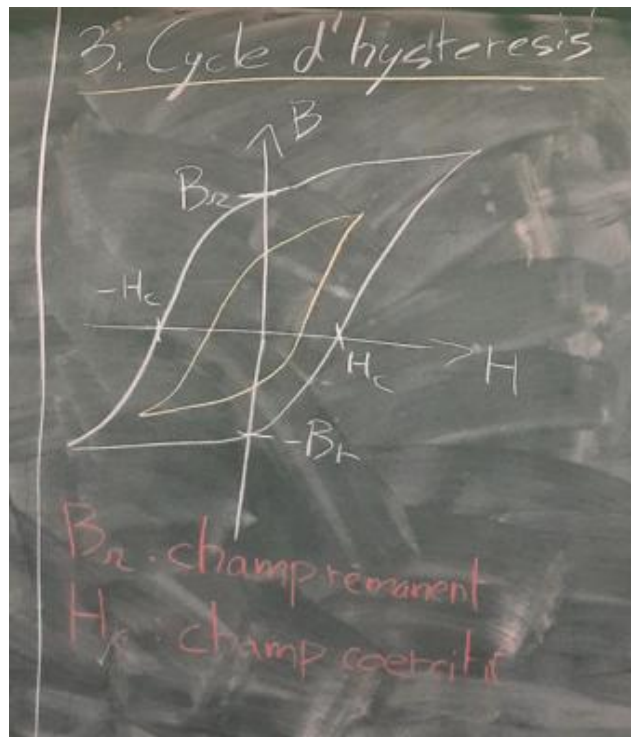


- Dans le 1^{er} domaine : réversibilité de la déformation des domaines d'aimantation
- Dans le 2^e domaine : des défauts vont retenir les parois d'aimantation
- Dans le 3^e domaine : il y a saturation de l'aimantation

Ordre de grandeur :

- taille des domaines de Weiss : 0,1-1mm
- parois : 0,1 μm

C] Troisième sous-partie : Cycle d'hystérésis



B_r (tel que $H = 0$) est le champ rémanent

H_c (tel que $B = 0$) est le champ coercitif

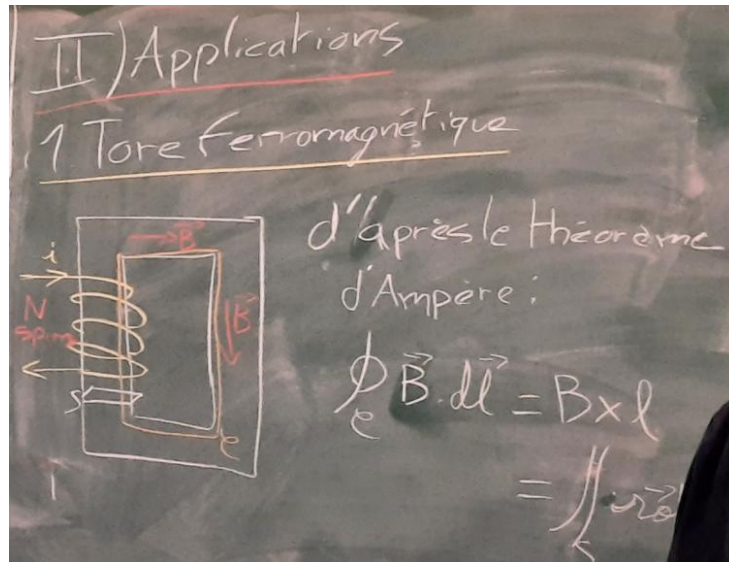
On distingue des ferromagnétiques doux ($H_c < 10^2 \text{ A.m}^{-1}$), des ferromagnétiques durs ($H_c > 10^3 \text{ A.m}^{-1}$)

Les ferromagnétiques doux vont avoir des petits cycles d'hystérésis, ils seront utiles dans le cas de transformateurs par exemple.

Les ferromagnétiques durs vont quant à eux avoir de forts champs rémanents, ils seront plutôt utilisés pour faire des aimants permanents.

II / Deuxième partie : Applications

A] Première sous-partie : Tore ferromagnétique



Le matériau ferromagnétique va canaliser les lignes de champ magnétique

D'après le théorème d'Ampère :

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = BL$$

Car le champ \vec{B} est toujours parallèle à $d\vec{l}$ le long du tore. L est la longueur moyenne de celui-ci.
Par ailleurs :

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \iint \vec{rot}(\vec{B}) \cdot d\vec{S} = \mu Ni$$

Le flux total traversant la bobine : $\phi_{tot} = NSB = NS \frac{\mu Ni}{l} = \frac{N^2 \mu Si}{l} = Li$ où $L = \frac{N^2 \mu S}{l}$ est l'inductance propre.

$$\mu_r \mu_0 = \frac{Ll}{N^2 S} \Rightarrow \mu_r = \frac{Ll}{N^2 S \mu_0}$$

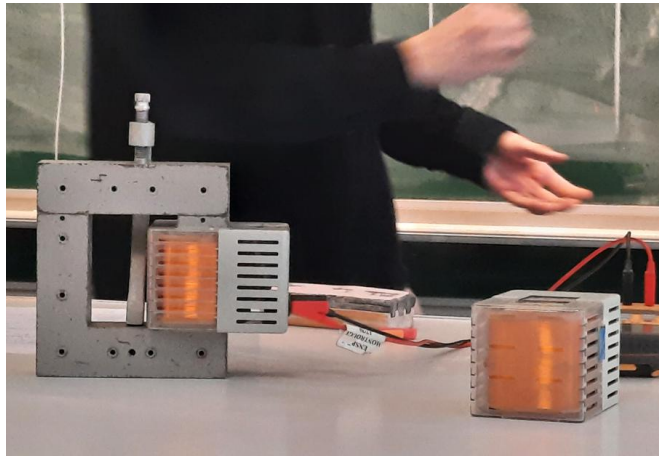
Commentaire enseignant : c'est cette partie qui, je trouve, n'a pas été bien faire pendant la leçon car c'est H et pas B qui vérifie l'équation de Maxwell $\iint \vec{rot}(\vec{H}) \cdot d\vec{S} = Ni$

Voilà la bonne manière de traiter les circuits magnétiques : on part du théorème d'Ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint \vec{rot}(\vec{H}) \cdot d\vec{S} = Ni$$

Et $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint \frac{BS}{\mu S} dl = \phi \oint \frac{1}{\mu S} dl$. On a utilisé ici que \vec{H} est colinéaire à $d\vec{l}$ (canalisation des lignes de champ dans le ferromagnétique) et que le flux $\phi = BS$ est conservé. Si par ailleurs $\frac{1}{\mu S}$ est constant le long du contour d'intégration alors on obtient : $\frac{BL}{\mu} = Ni$. Ce résultat est identique au résultat présenté plus haut car μ ne varie pas le long du contour d'intégration mais ce n'est pas vrai dans un cas plus général (présence d'un entrefer par exemple).

On mesure (au RLC-mètre) l'inductance d'une bobine autour du Tore on trouve $\mu_r = 370$. En revanche on ne peut pas définir de façon absolue la perméabilité magnétique relative d'un matériau car celle-ci varie au cours du cycle d'hystérésis. On retrouve bien le bon ordre de grandeur et une valeur inférieure à celle indiquée par le constructeur pour la perméabilité relative maximale.



B] Deuxième sous-partie : Expérience : influence du ferromagnétisme sur L et M

Avec le RLC-mètre, on mesure L_1 , L_2 et pour mesurer M , on court-circuite une des bobines et on mesure l'inductance aux bornes de la deuxième :

$$e_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$e_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0 \text{ (court-circuit)}$$

$$e_1 = \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right) \frac{di_1}{dt} = L_{app} \frac{di_1}{dt}$$

On rappelle le coefficient de couplage $\theta = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$

On fait une première fois les mesure en l'absence du noyau de fer doux (dans l'air) puis avec le milieu ferromagnétique.

2. Expérience : influence du ferromagnétisme sur L et M

environnement	L_1	L_2	inductance mutuelle $L_1 - \frac{M^2}{L_2}$	M	θ
dans l'air	0,037	0,036	0,037	0	
milieu ferro	1,56	1,56	0,44	1,32	0,85

On voit que le noyau de fer doux modifie les valeurs de L et de M

Cela peut être utile pour faire des transformateurs

Expérience(s) réalisée(s) :

- Mesure d'une inductance propre et d'une inductance mutuelle (Cf parties II.A et II.B)

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

C'est au binôme de prendre en note les questions posées par l'enseignant. Et autant que possible de prendre en note les **bonnes** réponses (donc pas nécessairement celles données par l'étudiant au tableau)

L'enseignant pourra compléter les questions et bien sûr les réponses.

Merci de respecter le format ci-dessous autant que possible.

Question : Quelle est l'intérêt d'un transformateur ?

Réponse : Cela sert à abaisser ou relever une tension selon le rapport du nombre de spire entre le primaire et le secondaire du transformateur.

Question : Quel type de ferromagnétique va-t-on utiliser pour faire une mémoire ?

Réponse : On va utiliser un ferromagnétique dur pour garder en mémoire l'aimantation, mais cela sera plus coûteux en énergie pour en changer l'aimantation.

Question : Comment faire autrement qu'en utilisant un RLC-mètre ?

Réponse : Avec un circuit RLC série et en regardant le déplacement de la résonance.

Question : Revenons sur votre théorème d'Ampère : quelle est l'équation de Maxwell à utiliser dans un milieu magnétique ?

Réponse : Il faut prendre celle avec $\vec{H} : \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{H}) = \vec{j}$, on pourra alors réécrire $\vec{H} = \vec{B}/\mu$ qui dépend de μ qui dépend lui-même du milieu.

Question : Pourquoi le champ \vec{B} est toujours le même dans le tore ?

Réponse : \vec{B} est guidé par le tore donc $\vec{B} \cdot \overrightarrow{dl} = B \cdot dl$

Question : Ok et pourquoi la circulation est égale à BI , en d'autres termes est-ce que B dépend de la position ?

Réponse : \vec{B} est constant car $\text{div}(\vec{B})=0$ et la section ne varie pas
(On peut faire apparaître le flux qui est constant dans $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint \frac{\vec{B}}{\mu_0} \cdot d\vec{l}$)

Question : Quel type de ferromagnétique utilise-t-on pour votre expérience ?

Réponse : Un ferromagnétique doux.

Question : Est-ce que ça fonctionnerait avec un ferromagnétique dur ?

Réponse : Non, car pour un ferromagnétique dur, μ ne dépend pas de \vec{H} , son cycle d'hystérésis est plat sur une grande zone. Donc il va mal canaliser le champ.

Question : Comment avez-vous défini μ ?

Réponse : μ est défini par $\vec{B} = \mu \vec{H}$ mais μ dépend de H , ça n'est pas dB/dH qui est une autre quantité importante.

Question : Pourquoi l'aire du cycle d'hystérésis est importante ?

Réponse : Cette aire est proportionnelle aux pertes par hystérésis. (Elles sont plus fortes pour les ferromagnétiques durs)

Question : Est-ce que vous avez une idée de l'aimantation à saturation, est-ce que ça dépend du matériau ?

Réponse : ça ne varie pas beaucoup d'un matériau à l'autre (contrairement au champs coercitif ou rémanent)

En effet celle-ci dépend de l'orientation des spins dans le matériau et comme la densité est à peu près la même d'un matériau à l'autre ($n \sim 10^{29} \text{m}^{-3}$) et on peut relier le moment magnétique de spin au magnéton de Bohr $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 10^{-23} \text{A.m}^2$. Donc après calcul, on trouve bien $M \sim n \mu_B \sim 10^6 \text{A.m}^{-1}$ soit $\mu_0 M \sim 1 \text{T}$ qui est bien le bon ordre de grandeur de l'aimantation à saturation.

Question : Pourquoi est-ce qu'un matériau ferromagnétique peut ne pas être aimanté a priori (en l'absence d'excitation magnétique) ?

Réponse : A l'intérieur du matériau, il va y avoir des domaines de Weiss d'aimantation aléatoire. Il y a donc une compétition entre l'énergie nécessaire à créer un champ magnétique extérieur (les domaines ont tendance à s'aligner pour fermer les lignes de champ de sorte qu'elles ne sortent pas) et l'énergie nécessaire à désaligner des spins (création d'une paroi de domaine).

Question : Que se passe-t-il lorsque l'on soumet le matériau à un champ magnétique ?

Réponse : Les domaines d'aimantation qui sont le plus alignés avec le champ vont croître, la paroi se déplace jusqu'à heurter un défaut du matériau, puis elle se détache brusquement à un moment, ce qui génère un flux à l'origine de l'hystérésis. Enfin l'aimantation dans le matériau tourne pour s'aligner avec la direction du champ magnétique (car la direction de l'aimantation dans un domaine n'est pas à priori colinéaire avec le champ).

Question : Comment peut-on visualiser ces domaines ?

Réponse : Avec des poussières selon la méthode de Bitter. Ou bien avec la déviation de la polarisation de la lumière, ou encore avec de la microscopie à force magnétique (microscopie à force atomique mais avec une pointe magnétique).

Question : Comment appelle-t-on les matériaux comme le fer, le cobalt et le nickel ?

Réponse : Ce sont des métaux de transition.

Question : Connaissez-vous d'autres matériaux plus récents utilisés pour leurs propriétés ferromagnétiques ?

Réponse : On peut utiliser des terres rares (période des lanthanides) par exemple le néodyme. Qui sont bien plus utilisés aujourd'hui dans les aimants permanents, pour les moteurs, les éoliennes etc...

Question : De quel type de corps sont les ferromagnétiques ?

Réponse : Ce sont des cristaux ou des matériaux polycristallins, car le recouvrement entre orbitales dépend de la distance entre les atomes qui n'est précisément définie que dans des cristaux. (Le recouvrement moyen serait nul dans un fluide).

Question : Quel phénomène est à l'origine du ferromagnétisme, et l'alignement des spins ?

Réponse : Ça n'est pas comme on pourrait le penser une interaction entre deux dipôles magnétiques. En réalité, c'est la force de Coulomb combinée au principe d'exclusion de Pauli (caractère fermionique des électrons) qui fait aligner ces spins.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Le binôme prend en note les commentaires de l'enseignant liés au contenu de la leçon : choix des thématiques abordées, plan choisi, notions hors-programme, expériences, respect du format de la leçon. **L'enseignant ajoute ou modifie abondamment des commentaires à posteriori.**

Les commentaires relatifs à la prestation de l'étudiant (rapidité, élocution, enthousiasme, niveau disciplinaire, etc.) sont à remplir sur la fiche « Évaluation » par l'enseignant, qui sera mis à disposition de l'étudiant passé à l'oral uniquement.

Quelle aisance ! Vraiment excellent, tout cela était parfaitement maîtrisé.

Attention au choix des prérequis, on ne sait pas vraiment ce qui a été introduit ou non précédemment (H et M par exemple). Il faut inscrire plus clairement la leçon dans une progression pédagogique.

Bien insister sur le fait que μ dépend de H. Et dire que c'est H qui vérifie $\overrightarrow{rot}(\vec{H}) = \vec{j}$

Il faut effectivement absolument parler des ferromagnétiques durs et doux comme ça a été fait.

Les ouvrages comme le BFR ne mentionnent que des exemples anciens de ferromagnétiques appartenant à la famille des métaux de transition. Il est important de mentionner également les terres rares.

L'expérience était bien, on aurait pu remplacer le RLC mètre par un circuit RLC-série (peut-être plutôt pour l'agreg docteur). Eventuellement rajouter une flex cam pour la rendre plus interactive.

Une autre mesure classique à faire est la mesure du cycle d'hystérésis.

Vous n'avez pas montré pourquoi le milieu canalise les lignes de champ et c'est un point important. Une manière de faire est d'utiliser les relations de passage aux interfaces et de comparer les angles du champ magnétique dans les deux milieux (fait dans le BFR). Ou bien utiliser des figures existantes pour gagner du temps. Cela implique de gagner un peu de temps dans le reste de la leçon ce qui pouvait être fait avec un rythme un peu plus rapide.

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

- Réaliser et interpréter une expérience permettant de montrer l'influence d'un matériau magnétique sur la valeur d'une inductance propre et d'une inductance mutuelle
- Mesurer le cycle d'hystérésis (avec un circuit intégrateur, on mesure le flux dans une deuxième bobine, on impose H en faisant passer un courant alternatif dans la première)

Titre : LPS2 : Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Présentée par : Brendan Le Pennec

CR rédigée par : Lydia Chabane

Correcteur : Gwendal Feve

Date : 08/02/2023

Compte-rendu leçon de physique élève

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Électromagnétisme. Tome 4 - Milieux di- électriques et milieux aimantés	M. Bertin, J.P. Faroux et J. Renault	Dunod (1984)	
Electromagnétisme - Fondements et applic- tions	J-Ph. Pérez	Dunod 4ème édition (2019)	
Physique Spé. PSI*, PSI	S. Olivier, C. More, H. Gié	Tec & Doc (2000)	
Physique de l'état so- lide	C. Kittel	Dunod 7ème édition (1998)	

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

- Electrocinétique
- Induction
- Notions sur la paramagnétisme et le diamagnétisme
- Milieu LHI

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

Introduction sur les matériaux ferromagnétiques en prenant l'exemple de la magnétite (Fe_2O_3). Définition : corps qui, sous l'action d'un champ EM extérieur, s'aimante très fortement.

1 Aimantation d'un corps ferromagnétique (1min15)

1.1 Magnétostatique dans un milieu aimanté

Dans la matière, il y a des électrons et des atomes qui portent des moments magnétiques.

Définition de l'aimantation : $\mathbf{M} = \frac{d\mathbf{m}}{dt}$ (en A.m^{-1}).

Vecteur excitation magnétique : $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$.

Equation de Maxwell-Ampère : $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_{\text{libre}}$. Equation de Maxwell-flux : $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$.

Pour un LHI : $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$, avec χ_m la susceptibilité magnétiques.

Pour les milieux paramagnétiques et diamagnétiques, $|\chi_m| \ll 1$. Alors que pour les ferromagnétiques :

- $\chi_m(\mathbf{H})$: relation non linéaire entre \mathbf{M} et \mathbf{H} .
- $|\chi_m| \gg 1$

1.2 Courbe de première aimantation (7min10)

Courbe $M(H)$ pour un matériau ferromagnétique initialement non aimanté : (1) courbe linéaire pour les petits H puis (2) fortement croissante puis (3) sature progressivement jusqu'à M_{sat} .

$\mu_0 M_{\text{sat}}$ est le champ magnétique maximal d'un ferromagnétique à T donnée et dépend du matériau. $M_{\text{sat}}(\text{Fe}) = 2.1T$

1.3 Interprétation microscopique (9min12)

Slide : Domaines de Weiss. Déplacement des domaines réversible à faible B , mais irréversible pour B plus élevé du fait de la présence d'impuretés dans le matériau.

Une propriété des ferromagnétiques est la canalisation des lignes de champs magnétiques. Slide : illustrations pour différentes géométries. Pour un ferromagnétique torique, les lignes de champ sont complètement canalisées.

2 Cycle d'hystérésis (14min)

Présentation de l'expérience. Transformateur : un primaire et un secondaire. C'est l'expérience "Étude du cycle d'hystérésis du fer d'un transfor-

mateure" du TP Conversion de puissance électrique, version 2023.

2.1 Etude du noyau de fer d'un transformateur(15min)

Schéma électrique du montage (cf. TP Conversion de puissance électrique)

Théorème d'Ampère : $LH = n_1 i_1 + n_2 i_2$ L : longueur totale du tore (fer doux), n_i nombre de spires de la bobine i . $H = \frac{n_1 i_1 + n_2 i_2}{L}$ donne (avec i_2 négligeable devant i_1 car la résistance imposée dans le secondaire ($\sim 10 \text{ k}\Omega$) associée est bien plus élevée que celle du primaire ($\sim 30 \Omega$)) $i_1 = \frac{L}{n_1} H$. Ainsi, si on mesure la tension aux bornes de la résistance du circuit primaire :

$V_x = Ri_1 = \frac{RL}{n_1} H$ avec ici $\frac{RL}{n_1} = 62.4 \text{ V}/(\text{Am}^{-1})$ qu'on place sur la voie 1 de l'oscillo.

Dans le circuit secondaire, on a (Loi de Faraday) : $e = -\frac{d\phi}{dt} = -n_2 S \frac{dB}{dt} = R' i_2 + \int \frac{i_2}{C}$ (cf. TP). R' et C sont choisies de telle sorte que $\int \frac{i_2}{C}$ soit négligeable devant $R' i_2$. Il vient :

$$i_2 = \frac{S}{R'} \frac{dB}{dt}.$$

Conséquences, aux bornes du condensateur : $U_c = \int \frac{n_2 S}{cR'} \frac{dB}{dt} dt$. Finalement :

$$V_y = U_c = \frac{n_2 S}{R' C} B \text{ qu'on place sur la voie 2 de l'oscillo.}$$

Début de l'expérience (24min45)

- Visualisation du cycle d'hystérésis avec le mode XY.
- Tracé du cycle $B(H)$ au tableau et définition du champ coercitif H_c (pour $B = 0$) et du champ rémanent B_r (pour $H = 0$).
- Mesure expérimentale de B_r . Valeurs : $V_y = 2.70 \pm 0.02 \text{ V}$ donne $B_r = 0.532 \pm 0.004 T$.
- Mesure expérimentale de H_c . Valeurs : $V_x = 2.10 \pm 0.01 \text{ V}$ donne $H_c = 313 \pm 1 \text{ A/m}$. Valeur caractéristique des ferro doux. Plus cette valeur est faible, plus l'excitation à devoir appliquer pour désaimanter le matériau sera faible : ce type de matériau se désaimante facilement.

On distingue deux types de ferro (slide tableau comparatif). Ferro doux (Transformateurs, inductance à haute fréquence) et ferro durs (application générateur électrique, RMN, etc.).

2.2 Bilan de puissance (35min38)

Loi des mailles : $U i_1 + e i_1 - R i_1 = 0$. Premier terme : ; dernier terme : puissance dissipée par effet Joule. $e i_1 = -\frac{d\phi}{dt} i_1$. $\delta W = -d\phi i_1 = -\frac{SHL}{n_1} = dB$. $P = \frac{1}{T} SL \oint H_u dB$. "

Conclusion (39min50)

Application : disques durs. Fin : 40min35.

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

Q : Si je lis votre relation, si j'augmente le nombre de spires, je vais diminuer la perte par hystérésis ? Non, il y a une erreur dans ma formule, elle ne dépend pas du nombre de spires.

Q : Si je regarde le cycle d'hystérésis, le champ B sature ? Non, il continue à croître linéairement.

Q : Pourquoi on utilise des ferro doux pour l'inductance à haute fréquence. ? Ce qui compte dans une inductance c'est la variation du flux. Mais dans le ferro dur, quand c'est saturé, certes le champ est fort, mais il n'est plus sensible au champ extérieur. Un ferro doux, en première approximation, c'est linéaire et la pente est la susceptibilité. Mais pour le ferro dur, la pente est nulle.

Q : Pourquoi à haute fréquence ? Pour minimiser les pertes par courants de Foucault.

Q : Quels matériaux qui minimisent ces pertes à hautes fréquence ? Utiliser des isolants (ferrites), on va limiter ainsi des pertes par courants de Foucault.

Q : Est-ce que la canalisation des champ est générique à tous les ferro ? Ce n'est pas le cas pour les ferros durs, que pour les ferros doux. Toutes les applications qui utilisent χ ou μ_r très grand c'est les ferro doux, car il n'y a plus de pente pour les ferro durs.

Q : Dans quel état sont les ferromagnétiques ? Solides cristallin. L'état ferro provient d'interaction au niveau des atomes qui n'existent pas à l'état fluide.

Q : L'aimantation à saturation et le champ coercitif dépendent des matériaux ? Varie de quelques magnétons de Bohr mais reste du même ordre de grandeur alors que H_c varie beaucoup : un ferro doux a un champ coercitif faible (10^{-3} T), un ferro dur très grand (0.1 T) matériau à un autre.

Q : Sur l'histoire du transformateur, vous avez appliqué le théorème d'Ampère. C'est évident que $\oint H \cdot dl = HL$? Il faut utiliser les relations de passage des champs B et H pour démontrer la canalisation des lignes de champs dans le ferro en l'absence de courants surfaciques à l'interface fer→air. Ensuite, les symétries et invariances du tore donnent $\mathbf{H} = H(r)\mathbf{e}_\theta$ et le théorème d'Ampère le long d'une ligne de champ permet d'avoir la formule donnée si on considère que la section du tore est faible devant la distance à l'axe..

Q : Dans un électroaimant ? Il n'y a pas conservation de la norme de H . Pour relier H dans l'entre-fer et dans le milieu, il faut utiliser la conservation du flux.

Q : Pourquoi le système forme les domaines de Weiss ? Au niveau microscopique, il y a une compétition entre l'énergie qu'il va falloir fournir pour créer ces interfaces et le coût en énergie pour créer un champ via l'alignement des moments magnétiques.

Q : La taille des domaines ? De l'ordre de la centaine de micromètres.

Q : Est-ce qu'il y a des directions privilégiées au départ dans champ extérieur ? Est-ce que je peux avoir une courbe d'hystérésis qui dépend du champ B ? Oui, il y a un axe de facile aimantation. Les champs coercitifs vont être plus forts dans l'axe de facile aimantation. Cela va exister dans des monocristaux. Les axes de facile et difficile aimantation sont définis par rapport à l'orientation cristalline du matériau et des interactions entre les moments magnétiques dans le matériau. Il n'y a pas de raison pour que l'orientation du domaine soit dans la direction du champ appliqué.

Q : Quels sont les conditions qui vous permettent de lire directement B ? $e = U_{R'} + U_c = R'i_2 + \frac{1}{jC\omega}i_2 = R'(1 + \frac{1}{jRC\omega})i_2$. On veut alors $R'C \gg \frac{1}{\omega}$ avec $\omega = 2\pi f$ et $f = 50$ Hz (fréquence du secteur).

Q : Les applications des ferros durs ? Tous les aimants permanents.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Agréable à suivre. Le rythme était un peu lent. Parfois vous vous répétez un peu, c'est très bien pour un vrai cours mais pas nécessaire pour une leçon d'agrégation, ce qui permet de gagner un peu de temps pour la partie ferro dur/ferro doux qui est un point central, et aussi pour l'histoire du $\nabla \cdot B$. Ne pas faire la démonstration pour la canalisation est un choix, vous auriez pu le faire sur transparent pour gagner du temps. Votre exploitation de la manipulation est remarquable. Il faut donner les chiffres des ordres de grandeurs.

Partie réservée au correcteur

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

C'est une bonne leçon, agréable à suivre, avec une bonne interaction avec l'audience. Par ailleurs l'expérience a été parfaitement exécutée et parfaitement exploitée, c'est un gros plus pour la leçon. Enfin il est important de donner des ordres de grandeur des valeurs de champs coercitifs (pour les matériaux doux et durs) ainsi que des champs rémanents et cela a été bien fait. Enfin il faut discuter des exemples de matériaux pour les ferro doux et durs ce qui a aussi été discuté. Il y a principalement un point qui me paraît perfectible dans les messages que cette leçon doit véhiculer, c'est la différence entre ferro doux et ferro durs. Cette différence a été traitée pendant la leçon (c'est indispensable) par un transparent qui était bien construit. Toutefois le message accompagnant ce transparent n'était pas assez clair :

-pour les ferro doux, puisque le champ coercitif est petit, on a un petit cycle d'hysteresis que l'on peut approximer à un régime linéaire (cela était bien illustré par le transparent). La pente est $\mu_r \gg 1$ c'est cette très grande valeur de μ_r qui entraîne la canalisation des lignes de champ.

-pour les ferro durs, on peut au contraire approximer le cycle à un carré pour l'aimantation. En conséquence, μ_r défini comme la pente locale du cycle d'hysteresis est proche de 1 lorsque le matériau est saturé. On n'a donc pas de bonne canalisation du champ dans les ferro durs (et on ne peut pas non plus les utiliser dans les inductances).

C'est ce message sur le lien entre μ_r et le cycle d'hysteresis des matériaux doux ou durs sur lequel vous n'avez pas assez insisté. C'est aussi relié au choix de traiter la canalisation du champ par une illustration sur transparent. En démontrant la canalisation du champ par les relations de passage de B et H à une interface

entre un matériau ferro et le vide, on voit que c'est $\mu_r \gg 1$ qui conduit à la canalisation et qu'il s'agit donc d'une propriété des ferro doux. Je pense qu'il y avait moyen de gagner un peu de temps pour faire passer de ce message important. Dernier point, il faut avoir à l'esprit d'autres circuits ferro que le transformateur (pour des questions éventuelles) comme l'électro-aimant ou même l'aimant permanent.

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

- relation non-linéaire entre M, B et H , cycle d'hystérésis.

- Différence entre ferro doux ($H_c \leq 100 A.m^{-1}$) et ferro dur ($H_c \geq 1000 A.m^{-1}$). Les ferro doux ont un petit cycle d'hystérésis et peuvent être décrits dans l'approximation linéaire (parler de perméabilité μ_r a un sens car le cycle d'hystérésis a une petite aire)

- canalisation du flux magnétique lorsque $\mu_r \gg 1$ (ferro doux).

- Applications différentes des ferro doux et durs : Ferro doux : $H_c \leq 100 A.m^{-1}$, petit cycle d'hystérésis, μ_r élevée, forte canalisation du champ magnétique et faibles pertes par hystérésis. Applications : transformateur, électroaimant, électronique. Exemples de matériaux : permalloy (alliage Nickel-Fer) $\mu_r \approx 10000$, Mumetal (également alliage de Fe et Ni), fer doux $\mu_r \approx 1000$... Ferro dur : grand cycle d'hystérésis, $H_c \geq 1000 A.m^{-1}$, 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), $H_c \approx 10000 A.m^{-1}$, $B_r \approx 1T$, terres rares (Samarium Cobalt, Neodyme Fer Bore), $H_c \approx 10^6 A.m^{-1}$, $B_r > 1T$.

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).

- domaines de Weiss, la taille des domaines de Weiss est fixée par la compétition entre énergie volumique et énergie surfacique

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

L'expérience faite durant la leçon est très bien adaptée et elle a été très bien exécutée. Je recommande de la faire même pour l'agrégation non-docteur. ce qui peut différer c'est d'avoir mesuré le champ coercitif et le champ rémanent en préparation si le temps manque (c'est très bien de l'avoir fait pendant la leçon dans le cadre de l'agrégation docteur).

Bibliographie conseillée :

Titre : Approche macroscopique du ferromagnetisme

Présentée par : Raphaëlle PINARDON

Rapport écrit par : Valentin NOURRY

Correcteur : Gwendal FEVE

Date : 06/03/2024

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
Electronique (chap. 7)	Jean-Marie Brébec	HPrepa
Electromagnétisme (fin du chap. III)	Perez Carles Fleckinger	Dunod

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence

Pré-requis :

- Magnétisme dans la matière
- Para/diamagnétisme
- Induction

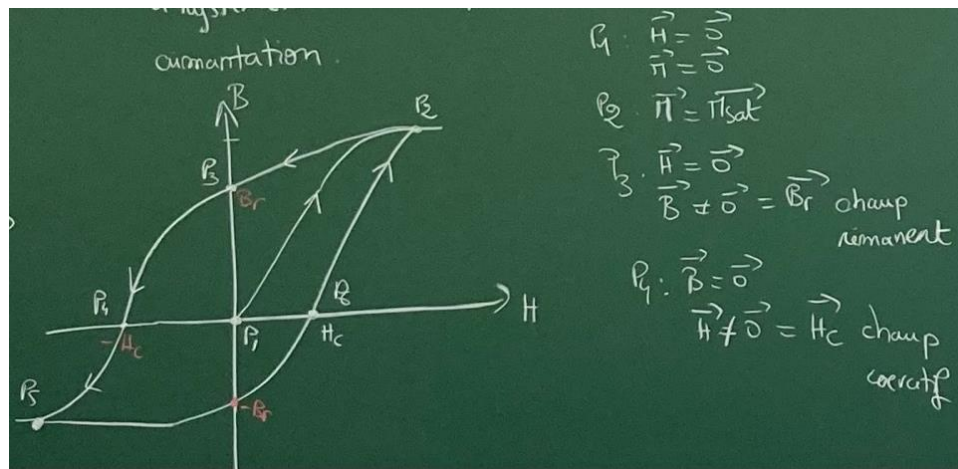
I – Description du ferromagnétisme

Définition du ferromagnétisme.

1) Généralités

- Introduction du vecteur aimantation M comme un moment dipolaire volumique
- Expression en fonction de l'**excitation magnétique** et du **champ magnétique**
- $\text{rot } M = j_{\text{liés}}$
- Démonstration du **théorème d'Ampère** à partir de l'équation Maxwell Ampère : Appliquer Stokes sur le rotationnel de l'excitation magnétique \rightarrow circulation de l'excitation magnétique.

2) Caractéristique d'un corps ferromagnétique



cycle d'hystérésis et courbe de première aimantation

Classification des matériaux ferromagnétiques

- matériaux doux : faible champ coercitif ($\sim \text{A/m}$)
- matériaux durs : fort champ coercitif ($\sim 1000 \text{ A/m}$)

3) Approximation linéaire et canalisation des lignes de champ magnétique

Matériaux doux, faibles valeurs de H et B, alors approximation linéaire donne

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

Démonstration que le champ est tangent à la surface d'un circuit magnétique si la perméabilité magnétique relative d'un fer (doux) est grande devant $\mu_r(\text{air}) = 1$

II – Application du ferromagnetisme : le transformateur (21')

1) Présentation du transformateur

voir slides

2) Étude expérimentale de l'hystérésis d'un transformateur (24')

- Circuit magnétique torique
- On néglige les résistances des bobines et les inductances de fuite

Voir slide : schéma de la manip de l'étude d'un transformateur

Modélisation de la manip :

Loi de Faraday et théorème d'Ampère appliqués aux bobines primaire et secondaire du transformateur.

Le circuit secondaire du transformateur étudié est un circuit RC à haute fréquence donc quasi ouvert. \rightarrow fonctionne comme un intégrateur et permet d'obtenir le champ B par intégration de la loi de Faraday.

Mesure : H_c et B_r d'un « rectangle » de fer : 31A/m et 0.2 T respectivement -> on est donc en présence d'un **fer doux**.

3) Dissipation d'énergie dans la carcasse (33')

- Courants de Foucault : pertes par effet Joule. Le feuilletage du matériau diminue ces courants. L'ajout (par exemple) de silice permet de diminuer la conductivité et donc les pertes par effet Joule. Ferrites : moins bons conducteurs.
Courants de Foucault plus importants à haute fréquence.
- Pertes dues à l'hystérésis dont la puissance est égale à l'aire du cycle d'hystérésis en $H=f(B)$
Interprétation de ces pertes comme la perte d'énergie potentielle par réarrangement des domaines de Weiss : permet de définir une tension de surface de ces domaines.

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

GF : Pourquoi les courants de Foucault sont importants à haute fréquence ?

GF : Ferromagnétisme ?

Moments dipolaires orientés dans le même sens

Anti-ferromagnétisme : moments anti-alignés. Normes égales : pas d'aimantation
Ferrites : normes différentes.

GF : Ce qu'il manque dans la leçon : comment marche un transformateur ?

Un courant alternatif génère un champ magnétique par induction, une bobine est couplée à une autre bobine dont le nombre de spires est différent. Cela permet de modifier la tension selon le rapport des nombres de spires.

GF : Retour sur la tension aux bornes du condensateur : la chute de tension aux bornes de R' est-elle prise en compte ?

Il y avait une approximation : haute fréquence par rapport à la fréquence de coupure du circuit $R'C$ ce qui permet de négliger la chute de tension aux bornes de la résistance R' . Cela revient à prendre $i_2 = 0$ dans le développement (approximation circuit secondaire ouvert).

GF : Les ferromagnétiques sont-ils seulement les métaux de transition ? Dans la leçon, seulement les ferros de ce type sont cités. Pour des aimants permanents par exemple ?

Réponse : on prend des terres rares dans l'industrie, principalement pour les applications électromagnétiques. Couche partiellement remplie. Néodyme, Samarium Cobalt, ...

GF : Quelles sont les valeurs de champ coercitif que l'on peut atteindre dans ces matériaux ? 10^6 , donc largement supérieurs aux matériaux qualifiés de « durs » dans les vieux livres de prépa.

Matériaux modernes : H_c élevé.

GF : Dans la courbe du cycle d'hystérésis, qu'est ce qui « sature » ?

Ce n'est pas le champ B, mais M qui sature car tous les spins sont alignés. Ensuite, le champ B peut toujours augmenter par le champ extérieur, donc tout se passe comme si le matériau n'était plus magnétique. Dans ce cas, $\mu_r \rightarrow 1$. Pente linéaire μ_0 .

Ça a l'air plat car une pente de 1 est très petite devant μ_r élevé.

Dans un matériau dur, on est presque toujours en saturation, donc il se comporte presque tout le temps comme le vide (avec un offset de M). Il ne répond pas à l'excitation magnétique.

GF : Le H_c permet de faire la différence entre matériaux durs et doux. Quid du M_{sat} ? Que veut-il dire ?

GF : Comment pourrait-on estimer M_{sat} ?

C'est le magnéton de Bohr $\sim 10^{-23}$ (moment par atome) multiplié par la densité d'atomes dans le matériau 10^{29} .

On pourrait donc évaluer M_{sat} en faisant le produit des deux.

GF : Pourquoi tous ces matériaux ont peu ou prou le même nombre d'atomes par unité de volume ?

Quel est ce type de matériau ?

Solides cristallins

Il y a aussi des alliages et des ferrofluides : solide cristallin pris dans une matrice liquide.

C'est donc la distance entre atomes dans un solide qui fixe M_{sat}

GF : Le magnétisme dans la matière a déjà été vu dans les prérequis. Qu'est ce qui a donc été vu dans le cours que vous présentez ?

Le théorème d'Ampère a été vu, donc du temps aurait pu être sauvé.

GF : Il se passe quoi au niveau du cycle d'hystérésis si on augmente la température ?

Perte d'aimantation permanente, on aura juste une aimantation linéaire avec H si on est au-dessus de la température de Curie.

L'aimantation à saturation que l'on a vue en leçon est à température nulle. La température modifie la valeur de M_{sat} .

La loi de $M(T)$ dans la leçon « approche micro » donne M à H nul.

GF :

Domaines de Weiss : approche mésoscopique

Vidéo youtube méthode de Bitter : Limaille de fer ou poudre qui se place au niveau des frontières entre les domaines de Weiss car elle est attirée par les forts gradients de champ B. Ces frontières disparaissent lorsque B augmente.

GF : Autre méthode pour visualiser les domaines de Weiss : microscopie Kerr : les domaines jouent sur la polarisation d'une onde EM incidente.

GF : Pourquoi le système forme-t-il ces domaines ? Créer une paroi coûte de l'énergie, alors pourquoi existe-t-il des parois ?

Défauts du cristal ?

S'il n'existait pas de domaines, alors tous les ferromagnétiques se présenteraient sous la forme d'un aimant permanent. Il y aurait alors une énergie magnétique dans l'espace, qui coûte aussi de l'énergie à créer. Compétition entre l'énergie magnétique et le coût énergétique à créer des parois. Un ferromagnétique à l'équilibre présente donc des domaines de Weiss.

L'aimantation totale est nulle.

Il faut quand même assurer la continuité de la composante normale de B entre deux domaines.

Lors de l'aimantation : au début, on déplace les frontières des domaines. Ensuite, l'aimantation « tourne » pour coïncider avec le champ magnétique.

GF : Question/critique : Parler du paléomagnétisme en conclusion est trop anecdotique par rapport aux applications industrielles

Parler du stockage de l'information, des aimants en terre rare, des moteurs et générateurs qui possèdent une partie magnétique (comme le rotor/stator).

Malik : Pourquoi c'est intéressant d'avoir un H_c élevé dans un matériau moderne ?

GF : matériau doux pour canaliser les lignes de champ, un entrefer plongé dans un champ. Remplacer le bobinage par un aimant permanent. H est alors négatif : champ démagnétisant. Il faut que l'aimant soit capable de supporter des H élevés

Alann : pourquoi on n'observe pas de frontière entre trois domaines différents (que des lignes qui séparent deux domaines)

Valentin : Moins de chances d'avoir une ligne triple vu qu'on observe une tranche de matériau.

Rodrigue : On minimise l'énergie en ayant des domaines longilignes, dont les frontières séparent deux domaines.

Pierre : Pourquoi pas de courant de polarisation ?

Raphaëlle : on néglige la dérivée temporelle de E dans Maxwell-Ampère.

Remplacer le fer doux de la manip par un fer dur ?

Commentaires lors de la correction de la leçon

Au début, la leçon peut aller plus vite, notamment sur le théorème d'Ampère.

Cycle d'hystérésis, H_c et B_R , distinction doux et durs : indispensables.

Canalisation du champ : indispensable.

Application à un circuit avec transformateur : très bien.

Insister sur le fonctionnement du transformateur.

Si le temps le permet, une autre application serait la bienvenue. Par exemple, l'électroaimant ou aimant permanent pour insister un peu plus sur les moteurs.

Pas besoin de consacrer une slide et des explications sur l'usage du transformateur dans un réseau électrique. Idem pour la distinction monophasé/triphasé : pas besoin.

Domage que le transformateur soit vu comme le seul débouché du ferromagnétisme. C'est une application un peu trop commune.

Bonne progression dans la leçon, qui était agréable à suivre. Pas de blocage, gestion du tableau très bien, manip très bien.

Prendre un point de mesure devant le jury si possible.

Pour une leçon docteur : prendre une mesure avec incertitudes.

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

Cycles d'hystérésis, distinction matériaux doux et durs, donner des chiffres de μ_r , H_c et B_R pour un matériau fixé. Faire un calcul de pertes. Montrer la canalisation du champ B.

Notions fondamentales :

-relation non-linéaire entre M/B et H, cycle d'hystérésis

-Différence entre ferro doux ($H_c \leq 100 \text{ A.m-1}$) et ferro dur ($H_c \geq 1000 \text{ A.m-1}$). Les ferro doux ont un petit cycle d'hystérésis et peuvent être décrits dans l'approximation linéaire (parler de perméabilité μ_r a un sens car le cycle d'hystérésis a une petite aire)

-canalisation du flux magnétique lorsque $\mu_r \gg 1$ (ferro doux).

-Applications différentes des ferro doux et durs :

Ferro doux : $H_c \leq 100 \text{ A.m-1}$, petit cycle d'hysteresis, μ_r élevée, 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), $H_c \approx 10^4 \text{ A.m-1}$, $B_r \approx 1 \text{ T}$, 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 :

-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).

- domaines de Weiss, la taille des domaines de Weiss est fixée par la compétition entre énergie volumique et énergie surfacique