

LP n°46 **Titre :** Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Présentée par : Lionel DJADAOJEE

Rapport écrit par : Jules FILLETTE

Correcteur : Yves GULDNER

Date : 01/02/2019

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Electromagnétisme 4	BFR	Dunod	1984
Physique PSI – tout-en-un		Dunod	2014
Physique de l'état solide	Kittel	Dunod	1983
Le cours de physique de Feynman – électromagnétisme 2	Feynman	Dunod	1999

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

- Magnétisme dans les milieux
- Dia

Intro : Ici, nouveau type de milieu magnétique beaucoup utilisés dans l'industrie pour leurs propriétés.

Définition (corps ferromagnétique) : Corps capable, tant que $T < T_c$ (température de Curie), de s'aimanter sous l'influence d'un champ magnétique extérieur et de garder cette aimantation même à champ nul.

Hypothèse : Milieux linéaires, homogènes et isotropes de susceptibilité χ_M ($M = \chi_M H$)

2min30

I. Aimantation des corps ferromagnétiques

1. Mise en évidence

Expérience : mesure de champ B au cœur d'une bobine avec ou sans corps ferromagnétique (1A, 1000spire, tesla mètre). On voit que le champ est multiplié par trois avec le ferro, sans changement de signe. On peut estimer μ_r à 3,6 et $\chi_M = 2,6$.

De manière générale, μ_r peut atteindre 10^5 .

6min

On distingue les milieux ferromagnétique ($\chi_M = 10^3/10^6$) des milieux paramagnétiques ($10^{-4}/10^{-6}$). Exemple de milieux ferro : Fer, Nickel, Cobalt, Alliages...

Conséquence de la valeur élevée de χ_M : $\Phi = \mu_r \phi$ donc $L = \mu_r L_0 \Rightarrow$ L'inductance augmente de manière considérable !

8min30

2. Canalisation des lignes de champ magnétique

Réfraction des lignes de champ B : à partir des équations de maxwell : continuité de la composante normale de B , continuité de la composante tangentielle de H . A l'interface entre le vide et un milieu ferromagnétique on a une grande réfraction : les lignes sont quasi parallèle à l'interface dans le milieu et très resserrées \Rightarrow Canalisation du flux magnétique dans le milieu ferro.

Aspect énergétique : l'énergie varie en $1/\mu_r$: l'énergie est minimisée si le champ est concentré dans le ferro.

13min15

Avec un milieu ferro de forme torique entouré localement par une bobine, les lignes de champ ont tendance à rester dans le ferro.

3. Application à l'électroaimant

Le tore précédent est coupé en un mince endroit ($e \ll l$) de sorte que les lignes de champ sont peu modifiées. De plus on tire de $\text{div}(\mathbf{B})=0$ que le champ est le même à l'intérieur de ferro qu'à l'extérieur (dans l'entrefer).

Enfin comme $\text{rot}(\mathbf{H})=\mathbf{j}$ le théorème d'Ampère donne une relation entre B et Ni et on obtient B .

18min30

II. Loi de réponse et cycle d'hystérésis.

1. Détermination expérimentale : « $B = f(H)$ »

Slide : Sur un tore on place deux bobines en face à face. L'une est excitée par un courant i_1 , l'autre sert de récepteur et on mesure $e = -d\Phi/dt$, que l'on intègre grâce à un montage intégrateur de sorte que le signal en sortie est proportionnel à B . De plus, le courant d'entrée est, par le théorème d'Ampère dans le ferro, directement relié à l'excitation H .

21min30

Réalisation de l'expérience. Visualisation du cycle d'hystérésis sur l'oscilloscope (voir TP conversion de puissance électromagnétique).

Commentaires :

- Cycle d'hystérésis (chemin aller différent du chemin retour) de sorte qu'à une valeur de H donnée, celle de B dépend de « l'histoire » du milieu.
- Réponse non linéaire.
- On devine un comportement asymptotique linéaire : or lorsque $H \rightarrow \infty$, $B = \mu_0 H + M$ donc on remarque expérimentalement que lorsque H est grand, M est constante.
- Le champ B , lorsque H est nul, n'est pas nul : champ rémanent ! (aimantation même à champ nul)
- Comment annuler B ? il faut appliquer une valeur particulière de H appelée champ coercitif H_c .
- Courbe de première aimantation.

27min30

2. Interprétation du ferromagnétisme

Slide : Domaines magnétiques d'un monocristal de Nickel et Grains microcristallins dans un morceau de NdFeB à aimantation macroscopique nulle. On constate tout de même la présence de domaines pour lesquels l'aimantation est uniforme (domaines magnétiques, domaine de Weiss) indépendantes les uns des autres.

Interprétation : si l'aimantation était uniforme dans le milieu ferro on aurait un fort champ B dans le vide \Rightarrow énergétiquement défavorable ! Pour minimiser ça il faut multiplier les domaines.

Slide : Aimantation d'un morceau de CoFeAl₂O₃ sous influence d'un champ H dans un sens puis dans l'autre : on voit la transition d'une aimantation à une autre.

Interprétation : courbe de première aimantation constituée de trois zones :

- Réorientation des dipôles (réversible)
- Croissance des domaines (irréversible, sauts brusques du champ magnétique = courants de Foucault = pertes énergétiques)
- Alignement de l'aimantation sur le champ

34min

3. Pertes énergétiques

Puissance moyenne fournie au milieu = $u_i = -e i = \dots$ et en moyenne sur une période, la puissance est l'aire du cycle.

36min

4. Ferromagnétiques doux et durs

- Doux : $H_c = 1$ à 100 A/m . Application : transformateur, relais, électroaimant : champ H_c faible donc cycle peu large et aire assez restreinte (moins de pertes).
- Durs : $H_c = 10^3$ à 10^5 A/m . Exemple : Alnico. Pourquoi créer de tels matériaux avec de fortes pertes ? Une fois aimantés ils sont très durs à désaimanter. Utile pour les aimants ou la mémoire d'ordinateur

38min45

Conclusion : milieux répondant fortement à une excitation extérieure. Canalisent les lignes de champ magnétique. On pourrait poursuivre en interprétant le milieu au niveau quantique, ou à plus court terme à ce qui se passe au-delà de la température de Curie.

39min45.

Questions posées par l'enseignant

- Hypothèse de milieu linéaire puis courbe de première aimantation pas franchement linéaire. Est-ce que l'hypothèse était indispensable pour cette étude ? Non, l'hypothèse n'est pas indispensable

NB : Les ferros doux sont assez bien approximés par un modèle linéaire.

- On a défini la susceptibilité $M = \chi \cdot H$, parfois par le rapport $\mu_0 \cdot M / B$. Est-ce que ce sont différentes susceptibilités ? Oui, ce ne sont pas les mêmes... Mieux vaut utiliser la perméabilité et éviter le piège...
- Sur la première expérience... C'est décevant... Pourquoi μ_r ne vaut que 3 ? On est en fait au tout début de la courbe de première aimantation... Erreur pédagogique de montrer cette manip.
- Sur les exemples on est resté assez vague : qu'est-ce qui caractérisent les ferros de manière générale ? Ce sont des cristaux (physique des solides, il n'existe pas de vapeur ferro, ni de liquide ferro... les ferrofluides sont en fait des nanocristaux de ferro dispersés dans un liquide organique). Attention aussi à ne pas confondre alliages et composés binaires (stœchiométriques, type oxyde de fer, de chrome etc...)
- Conséquence de la canalisation, on a dérivé la formule du champ B dans l'entrefer $B = \mu_0 \cdot Ni / (l / \mu_r + e)$. Quid du dénominateur sur un vrai électroaimant ? Si l vaut typiquement un mètre, μ_r est 1000.... On peut approximer $B = \mu_0 \cdot Ni / e$.
- Si on veut des grands champs B, pourquoi ne pas augmenter i, ou Ni ? $P = Ri^2$... Tout va fondre, et en plus si H tend vers l'infini en fait on sature donc ça sert à rien de chercher à augmenter i puisque quand i augmente μ_r diminue et en fait B n'augmente que peu.
- Qu'est-ce que la reluctance ? C'est le coefficient r tel que $Ni = r\Phi$, on a alors la formule $r = l / (\mu_0 \mu_r S)$. Alors les (U, l et sigma (conductivité)) de l'électrocinétique sont équivalents à (Ni, Phi et $\mu_0 \mu_r$) de l'électrotechnique. Si le courant passe dans le fil et pas dans le plastique c'est parce que sigma est grand dans le cuivre et faible dans le plastique. C'est la même chose pour les circuits magnétiques : B est canalisé dans les zones de faible reluctance (faible résistance). L'analogie peut se pousser jusqu'aux associations série/parallèle.
- Pourquoi on utilise des matériaux doux (faible reluctance) ? Toutes les machines fonctionnent par cycle et avec des matériaux doux on minimise les pertes.
- Qu'est-ce qui varie majoritairement d'un matériau ferro à un autre ? Le champ coercitif ou le champ à saturation ? Ils sont tous équivalents lorsqu'ils sont à saturation. Odg de l'aimantation à saturation : un dipôle par atome magnétique x magnéton de (Bohr $\hbar/2m$) x nombre d'atome par unité de volume x volume : $10^{-23} \times 10^{29} = 10^6 \text{ A/m}$. Odg du champ coercitif : 10^4 A/m pour les durs, 1 A/m pour les doux... Aujourd'hui le moindre aimant de moteur (trottinettes etc...) vaut largement plusieurs million d'A/m.
- Pourquoi les aimants forts ne sont apparus qu'il y a une trentaine ou vingtaine d'années ? Ils contiennent des terres rares (Lanthanides types Néodyme etc...)
- Sur les domaines : quelles sont les dimensions des domaines ? Est-ce qu'ils correspondent bien au macroscopique (titre de la leçon) ? Oui, c'est micrométrique !
- Pourquoi les diagonales à 45° ? Directions privilégiées d'aimantation : un monocristal (couche mince = plan) s'oriente dans les directions cristallines. Sur ce même schéma on remarque que la composante normale du champ à l'interface entre les domaines est continue. On démontre que ça minimise l'énergie à l'extérieur du domaine.
- Pourquoi est-ce que le cristal ne fait pas plus de domaines si c'est si favorable ? Il y a compétition entre l'énergie magnétique d'un part, mais aussi les interactions entre les dipôles magnétiques au niveau des surfaces (parois de Bloch).
- Quels sont les trois grands domaines d'application technologique du ferromagnétisme ?
Electrotechnique (moteurs, transformateurs, alternateurs, transport du courant) = royaume des matériaux doux, **stockage de données** (ferro doux et durs : la tête qui écrit sur le disque dur canalise le flux sur une dizaine de nanomètre = ferro doux, mais le matériau du disque est lui un matériau dur pour résister aux perturbations extérieures) et **aimants permanents** (moteurs continus, nouvelle motricité urbaine, éoliennes etc...) = royaume des matériaux durs.

Commentaires donnés par l'enseignant

- La première chose à faire quand on prépare une leçon : **définir le message à faire passer**. Ici c'est un problème d'ordre magnétique qui subsiste sur des distances macroscopique, et c'est fondamental pour les applications technologiques.
- La première manip fait un peu désordre dans une très bonne leçon.
- Le plan est très astucieux sans faire partie fondamentale puis applications.
- Il y a beaucoup de bonnes choses (et chaque seconde est comptées !). Inutile de parler des milieux magnétiques ici.
- Bien prendre le temps de sortir les formules et de bien les commenter.
- Il faut passer un peu de temps à discuter la diversité des champs coercitifs.

Partie réservée au correcteur

Avis sur le plan présenté

Bon plan permettant d'optimiser le temps de présentation tout en faisant une leçon assez complète couvrant les propriétés fondamentales et certaines applications.

Concepts clés de la leçon

Quelles sont les matériaux ferro (cristallins ou polycristallins, corps purs, composés stœchiométriques, alliages, métaux de transitions et terres rares...),
Comment se traduit macroscopiquement le ferromagnétisme,
Non linéarité des matériaux ferro (perméabilité dépendant fortement de H),
Grande gamme de champs coercitifs possibles, ferro doux et ferro durs,
Domaine de Weiss et aimantation (ne pas hésiter à projeter de belles figures pour un monocristal et pour un polycristal), origine énergétique des domaines...
Applications : électrotechnique, aimants permanents, stockage magnétique de l'information.

Concepts secondaires mais intéressants

Notion de réluctance, analogie avec l'électrocinétique.
Axes de facile aimantation dans un cristal.
Magnéto-résistance géante : application aux têtes de lecture.
Champ coercitif important pour faire un aimant permanent plat.
Coût énergétique de la formation d'une paroi de Bloch.
Micro et nano cristaux mono-domaines.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Expériences indispensables dans cette leçon : cycle d'hystérésis
Une expérience mettant simplement en évidence la haute perméabilité magnétique des ferro peut être appréciée...

Points délicats dans la leçon

Exposé simple de l'origine de la canalisation du flux magnétique par un circuit magnétique.
Bien faire comprendre les causes de la grande échelle possible des champs coercitifs.
Faire comprendre quelles propriétés du matériau sont principalement intéressantes pour chaque application : électrotechnique, stockage de l'info, aimant permanent...
Le point le plus délicat reste « le timing » de la leçon !

Bibliographie conseillée

La biblio est très classique car la leçon est présente dans tous les livres niveau L.
Ne pas oublier le Kittel pour répondre aux questions du jury.
Certains ouvrages de l'enseignement technique peuvent aussi être consultés et bien sur Wikipedia...