

LP46

Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques.

Correcteurs : **Jérémy Schmitt**¹ et **Étienne Thibierge**²

Leçon présentée le jeudi 24 octobre 2013

Le présent compte-rendu a pour but de résumer et compléter la discussion qui a suivi la présentation de la leçon en classe. Bien entendu, il est partiel et partial, et n'est qu'un point de vue qui n'engage que ses auteurs. Rappelons que c'est *vous* qui présenterez les leçons en fin d'année, et que c'est donc à *vous* de décider de ce que vous voulez en faire.

Extraits des rapports du jury

Je vous rappelle que le préambule des rapports de l'épreuve de leçon présente les attentes et exigences du jury. Je vous encourage vivement à le lire.

Le titre contenait précédemment le mot supplémentaire « Applications », se reporter au rapport 2013 pour la justification du changement de titre.

2009, 2010 : L'intérêt du champ \vec{H} doit être clairement dégagé. L'obtention expérimentale du cycle d'hystérésis doit être analysée.

2005 : Les dispositifs expérimentaux utilisés au cours de cette leçon doivent être parfaitement maîtrisés. Il existe bien d'autres applications que le transformateur idéal.

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.

Commentaires généraux

La leçon présentée ne répond pas aux attentes d'une leçon d'agrégation de façon satisfaisante. Les définitions ne sont pas posées avec assez de précision, les explications sont trop souvent incomplètes et des points qui me semblent importants manquent.

Les rapports sont clairs sur l'attention que le jury porte à certains points clés de la leçon (champ \vec{H} , analyse des dispositifs expérimentaux, applications). Il est impossible de se contenter d'expliquer vaguement l'intérêt de \vec{H} aux détours de la partie III, ni de passer très vite sur la présentation des expériences. Rappelons qu'en leçon comme en montage toute expérience même simple *doit* être accompagnée d'un schéma du dispositif. Il ne s'agit

pas d'une contrainte formelle destinée à ennuyer les candidats, mais bien de présenter les choses d'une façon qui soit aisée à suivre pour un auditoire qui découvre l'expérience en question.

La présentation doit être plus soignée : les titres de paragraphe sont souvent venus à contre-temps, des fautes d'orthographe sont restées au tableau, les couleurs de craies ne sont pas toujours les mieux choisies (banissez le bleu foncé). Utiliser un transparent est une façon judicieuse de présenter les schémas des dispositifs expérimentaux. N'hésitez pas non plus à les utiliser pour recopier des tableaux de valeurs numériques.

Placer en pré-requis les équations de Maxwell dans la matière est raisonnable, mais il faut malgré tout rappeler pour définir clairement \vec{H} , \vec{B} et \vec{M} , ce qui a manqué. Les dénominations n'étant pas normalisées, il faut les fixer dès le début de la leçon ... et s'y tenir par la suite : dans ce corrigé \vec{H} est l'excitation magnétique et \vec{B} le champ. Par ailleurs, c'est sans doute l'équation de Maxwell-Ampère $\text{rot } \vec{H} = \vec{j}_{\text{libre}}$ qui permet de présenter le mieux l'intérêt de l'excitation \vec{H} , qui ne dépend que de ce qui est imposé depuis l'extérieur.

Un point qui n'a pas été mentionné et sur lequel je crois qu'il faut pourtant insister est le fait qu'un matériau magnétique non seulement amplifie mais aussi canalise le champ magnétique. On peut pour cela choisir d'introduire la notion de réluctance magnétique, mais ce n'est pas indispensable. Une présentation alternative consiste à comparer l'énergie magnétique volumique dans le vide $B^2/2\mu_0$ à celle dans un ferromagnétique $B^2/2\mu_0\mu_r$. Pour des valeurs usuelles de μ_r , on voit qu'il est énergétiquement favorable d'avoir un champ fort dans le matériau.

Des applications ont été présentées et c'est bien. Parler de plaque à induction et de boussole est tout à fait pertinent. Je trouve un peu dommage qu'aucune application électrotechnique n'ait été envisagée. Le transformateur est un exemple intéressant, car il permet de réexploiter les calculs détaillés pour l'expérience d'obtention du cycle et en retour de comprendre plus finement les limites de ladite expérience (fuites magnétiques, courants de Foucault, pertes cuivre et fer ...). Le disque dur est un exemple classique et intéressant, bien qu'il semble que le fonctionnement même schématique des disques modernes diffère de celui décrit usuellement³. Le paléomagnétisme est aussi un exemple sympathique, mais il est difficile de dépasser le stade du qualitatif.

1. jeremy.schmitt@ens-lyon.fr

2. etienne.thibierge@ens-lyon.fr, <http://perso.ens-lyon.fr/etienne.thibierge>

3. Demandez à Thomas Moutonnet qui s'y connaît bien mieux que moi ! Attention, il y a de plus des erreurs à ce sujet dans le poly 2012, je suis le coupable :)

Retour sur la leçon présentée

Introduction

Les plaquettes de boussoles sont faites pour être placées sur un rétroprojecteur, ce qui rend les lignes de champs beaucoup plus visibles pour l'auditoire.

Bien penser à annoncer dès l'introduction la démarche qui va être suivie dans la leçon. Il peut s'agir d'une « simple » annonce de plan, mais je conseille d'insister dès le début sur les liens logiques entre les parties.

I) Introduction et rappels historiques

Écrire au tableau le titre du I avant le début de la leçon n'est pas une très bonne idée, car le passage de l'introduction à la première partie n'est pas clair.

L'historique qui a été présenté est intéressant pour votre culture, mais est trop long pour être présenté en leçon. Passez plus vite sur toute la mise en contexte pour parler de physique le plus tôt possible.

II) Réponse d'un corps ferromagnétique à une excitation

1/ Expérience

Il faut absolument passer plus de temps à présenter le dispositif expérimental. Évitez les expressions malencontreuses comme « le GBF alimente un générateur de puissance », il le commande ou le pilote, ou « l'intégrateur donne la valeur de H », ce qui est doublement faux.

Pour présenter au mieux le fonctionnement du dispositif, je pense qu'il est intéressant de mener de bout en bout les calculs (cf. p.ex. le Précis Bréal). Cela permet de mettre en évidence le fait que l'excitation magnétique est imposée par l'extérieur, alors que le champ qui contient la réponse du milieu doit être mesuré pour être connu. Vous pouvez même aller jusqu'à redémontrer le théorème d'Ampère pour \vec{H} , car la démonstration est rapide et il s'agit d'une équation fondamentale de l'électrotechnique.

Attention de ne pas vous faire piéger par les détails expérimentaux. Le rhéostat permet non seulement d'assurer une conversion courant-tension, mais surtout de présenter une charge suffisante au générateur de puissance, sans quoi il ne pourrait pas débiter à cause de son système de sécurité. Il s'agit ainsi de protéger le bobinage du tore, qui a une petite résistance. Le boîtier intégrateur (à préférer à un intégrateur monté à la main) est stabilisé par une résistance montée en parallèle du condensateur et un réglage minutieux de l'offset de l'AO pour limiter la dérive, ce qui est efficace à l'échelle de quelques minutes. Il est muni d'un bouton pour décharger le condensateur si besoin. Soyez au point sur ce montage, il fait souvent l'objet de questions.

Les courants de Foucault peuvent altérer notablement l'allure du cycle d'hystérésis si le matériau magnétique est conducteur. On peut même parfois voir apparaître des boucles aux extrémités du cycle. Les pertes augmentent proportionnellement au carré de la fréquence de parcours du cycle, ce qui impose de travailler à très basse fréquence. Pour contrecarrer ces effets, il faut choisir un tore

ferromagnétique (p.ex. de ferrite), fait d'un matériau isolant, ce qui permet de travailler à 50 Hz.

2/ Courbe en induction et aimantation

Opposer l'allure des cycles d'hystérésis concernant le champ \vec{B} et l'aimantation \vec{M} est une bonne idée, pour montrer que la saturation concerne l'aimantation et pas le champ, qui croît proportionnellement à l'excitation même une fois que le matériau est saturé.

Attention aux définitions : l'aimantation rémanente, le champ rémanent et l'excitation coercitive sont par convention des grandeurs positives.

On peut rappeler que l'aimantation dépend de la température, donnant lieu à la transition ferro-para à la température de Curie. Attention en revanche à ne pas s'em mêler les pinces : l'aimantation rémanente dépend de T , mais pas l'aimantation à saturation, puisqu'il s'agit de l'aimantation du matériau lorsque tous les moments magnétiques sont alignés.

3/ Cycle idéal et grandeurs caractéristiques

Définir ainsi l'écart à l'idéal apporte plus de questions que d'éclaircissements : pourquoi un cycle carré serait-il l'idéal ? De façon générale, il faut impérativement motiver et exploiter toutes les notions que vous introduisez. En l'occurrence, cette définition semble inutile.

Il est par contre important de bien distinguer les deux types de ferromagnétiques, durs et doux, à partir de l'aimantation rémanente et/ou de l'excitation coercitive. Par convention, en électrotechnique, la frontière entre les deux types de matériaux se fait pour $H_c = 100 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

4/ Matériaux doux

La discussion sur la composition des différents matériaux n'était pas claire du tout. Si vous voulez discuter ce point, faites-le à l'aide d'un transparent ou en écrivant au tableau, mais se contenter d'énoncer les compositions à l'oral ne permet pas à l'auditoire de suivre.

Développer des exemples concrets est important dans toutes les leçons, et dans celle-ci en particulier. Celui des plaques à induction est bien choisi, mais il est indispensable de le traiter avec plus de soin. En particulier, parler de « la tension de la poêle » n'a pas de sens. Le phénomène mis en jeu est bien la dissipation des courants de Foucault par effet Joule, mais il ne peut pas se décrire dans un langage électrocinétique.

5/ Matériaux durs

Pensez à bien commenter tous les ordres de grandeur, et à les mettre en relation avec ceux que vous connaissez par ailleurs : un champ à saturation de 20 T peut par exemple être comparé au champ magnétique terrestre ($5 \times 10^{-5} \text{ T}$) ou à celui créé par un aimant permanent (20 mT).

Encore une fois, l'exemple de la boussole est le bienvenu. Il est intéressant d'expliquer que les boussoles doivent être lestées, mais il faudrait aussi mentionner que le pôle Nord terrestre est pointé par le pôle Sud de la boussole. Pour être exhaustif, on peut aussi rappeler la différence entre pôle magnétique et pôle géographique.

III) Aspect thermodynamique

Penser à soigner les transitions, et à insister sur les liens logiques entre les différentes parties du plan.

1/ Thermodynamique du cycle

À part peut-être pour les audacieux forts en thermo (et encore), je déconseille fortement de prendre le risque de présenter la thermodynamique des milieux aimantés à l'oral de l'agrégation. C'est un sujet particulièrement délicat, avec lequel vous n'êtes en général que très peu familiers. Il me semble que cela revient à escalader un glacier sans crampons.

Rappelons au cas où que mener une étude thermodynamique correctement oblige à préciser (au tableau) le système, les variables internes, les paramètres de contrôle, et les éventuelles fonctions caractéristiques ou potentiels thermodynamiques. Par ailleurs les notations d , δ et ∂ ne sont pas du tout équivalentes et leur sens physique est fondamentalement différent : on écrit dU et δQ , et pas le contraire.

Il est néanmoins important de montrer que l'hystérésis magnétique entraîne de la dissipation. On peut se contenter pour cela de faire le bilan énergétique d'un tore magnétique enlacé par un bobinage (cf. p.ex. Précis Bréal).

2/ Domaines de Weiss

Cette partie est intéressante, et la discussion faisant apparaître la taille typique des domaines a été plutôt bien menée. Je pense qu'il s'agit du prototype de partie à garder pour une fin de leçon : elle est intéressante et la présenter apporte quelque chose à la leçon, mais elle n'est pas centrale et vous ne serez pas pénalisés si la présentation doit être écourtée faute de temps.

Une fois encore, le dispositif expérimental doit être expliqué et accompagné d'un schéma.

Il est intéressant d'interpréter la courbe de première aimantation en termes de domaines de Weiss ... à condition d'expliquer un peu plus. En particulier, parler du processus de première aimantation sans avoir parlé de celui de désaimantation est particulièrement problématique.

Conclusion

La conclusion de la leçon était trop longue. Une bonne conclusion doit récapituler les nouveautés apportées à la compréhension de la physique apportées par la leçon, et répondre en quelques mots à la problématique posée dans l'introduction. Pour donner une idée, passer entre une et deux minutes sur la conclusion me semble raisonnable.

Questions

Les questions servent *d'abord* à éclaircir les points peu clairs de la leçon puis *ensuite* à tester vos connaissances plus largement. Voici des pistes de questions possibles, qui n'ont pas toutes été posées pendant la correction.

4. Je vous conseille chaudement d'aller « jouer » avec des aimants et les ferrofluides de la collection ! Vous constaterez que malgré la structure « en oursin », on peut passer dans le ferrofluide une pipette avec la même facilité que dans n'importe quel fluide.

Un matériau ferrimagnétique a un comportement macroscopique analogue à celui d'un ferromagnétique. En revanche ils diffèrent au niveau microscopique : un ferrimagnétique contient deux types d'atomes non-équivalents, portant des moments magnétiques différents, les uns s'orientant dans le sens du champ et les autres dans le sens opposé. Par ailleurs, les ferrimagnétiques sont des isolants alors que les ferromagnétiques peuvent être des conducteurs.

Un ferrofluide est une suspension colloïdale de particules ferromagnétiques constituées d'un seul domaine de Weiss. Cela confère au fluide un comportement de type paramagnétique⁴.

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.

On peut faire une analogie entre les milieux magnétiques et les milieux diélectriques :

$$\begin{aligned} \vec{E} &\rightsquigarrow \vec{B} \\ \vec{P} &\rightsquigarrow \vec{M} \\ \vec{D} &\rightsquigarrow \vec{H} \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho_{\text{libre}} &\rightsquigarrow \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{libre}} \end{aligned}$$

De la même façon que la polarisation \vec{P} est la densité volumique de moment dipolaire électrique, l'aimantation \vec{M} est la densité volumique de moment dipolaire magnétique. On voit donc qu'il s'agit d'une grandeur nivelée, définie seulement à l'échelle mésoscopique et pas à l'échelle microscopique.

Attention, une erreur fréquente consiste à définir la susceptibilité χ magnétique d'un ferromagnétique par $\vec{M} = \chi \vec{H}$. Un ferromagnétique ayant une réponse non-linéaire, cette écriture est au mieux peu claire, au pire fautive. Mieux vaut définir la susceptibilité comme la fonction de réponse linéaire, $d\vec{M} = \chi d\vec{H}$, où χ dépend du cycle d'hystérésis en train d'être parcouru, de la position sur ledit cycle, et du sens de $d\vec{H}$.

Dans un transformateur on distingue deux types de pertes. Les pertes fer sont les pertes par hystérésis magnétique auxquelles s'ajoutent les pertes par courants de Foucault dans le matériau magnétique. Pour contrer ces pertes par courant de Foucault, on réalise les transformateurs dans des matériaux feuilletés, où le feuilletage est fait dans une direction perpendiculaire aux courants. Le deuxième type de perte est appelé pertes cuivre, et concerne les pertes par effet Joule dans les bobinages de l'induit et de l'inducteur.

Bibliographie

En complément de la bibliographie mentionnée sur le poly, citons le très bon Précis Bréal, tome *Électrotech-*

nique PSI, de M. Sauzeix et P. Brenders.

Pour une explication très qualitative des applications telles que le disque dur, vous pouvez aller consulter le livre de C. Ray et J.P. Poizat intitulé *La physique par les objets quotidiens*.

Conclusion

La leçon présentée ne répond pas complètement aux attentes d'une leçon d'agrégation. À ce stade de l'année, je

pense que ce n'est ni grave ni inquiétant : les progrès que vous allez accomplir pendant les huit prochains mois sont considérables ! Il faut malgré tout retravailler la leçon de façon conséquente, dans le but d'en faire une présentation plus rigoureuse et plus complète.

Si vous avez d'autres questions, nous restons à votre disposition par mail, en TP ou dans de futures séances de correction.