

LP46 : Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Armel JOUAN, Géraud DUPUY

Niveau : L3

1 Aimantation induite

1.1 Aimantation

- Décrire la matière aimantée sous l'hypothèse d'une juxtaposition d'élément de volume $d\tau$ portant un moment dipolaire magnétique $d\vec{m}$
- On définit l'aimantation, densité volumique de moment dipolaire $\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{d\tau}$. Donner unité
- On modélise les courants en les divisant en deux: courants de conduction liés aux déplacement de charges libres dont on a l'habitude, et des courants d'aimantation microscopiques générés par les charges liées aux atomes, qu'on admet dériver de l'aimantation comme suit $\vec{\text{rot}}(\vec{M}) = \vec{j}_M$
- Expliquer qu'on va donc exciter avec un nouveau champ $\vec{H}$ du à l'excitation libre, qui va créer une réponse en aimantation $\vec{M}$ du système, pour au final avoir la somme des deux avec le champ $\vec{B}$
- Donner la nouvelle loi de Maxwell Ampère et son nouveau théorème intégral

1.2 Observation expérimentale du ferromagnétisme

- On désigne par ferromagnétique les corps qui s'aimante très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur
- Quelques exemples : Fe, Ni, Co, Alliages
- De plus ils gardent souvent leur aimantation même à champ nul
- De manière générale, l'aimantation dépend du passé du système : Hystérésis
- De plus, ils confinent les lignes de champ magnétique (cartes de lignes de champs)

Transition : essayons maintenant de voir comment évolue l'aimantation en fonction de l'excitation dans le détail.

2 Phénoménologie du ferromagnétisme

2.1 Première aimantation

- Faire le montage pour observer en XY l'hystérésis
- En abscisse on a le courant injecté dans le primaire, auquel $\vec{H}$ est proportionnel. En ordonnée on a la tension au secondaire, qui est proportionnel au flux et donc à $\vec{B}$
- Mettre une consigne continue en activant la permanence
- Commenter la courbe de première aimantation. Partant de $(\vec{H} = \vec{0}, \vec{M} = \vec{0})$.
- On monte jusqu'à avoir saturation de $\vec{M}$. On a pas de saturation à proprement parler de l'ordonnée car on mesure $\vec{B}$, donc même quand $\vec{M}$ sature, $\vec{H}$ continue d'augmenter, mais en ordre de grandeur ça marche.

2.2 Hystérésis

- On fait varier $\vec{H}$ de manière périodique
- Lorsque H diminue, on voit que quand il est nul on obtient des valeurs rémanentes en aimantations/champs $\vec{M}_c/\vec{H}_c$
- D'ailleurs, il faut une valeur non nulle en excitation nommé champ coercitif $\vec{H}_c$ pour avoir une aimantation nulle
- En redescendant on arrive à nouveau à saturation
- Puis en remontant on a les mêmes étapes en symétrique
- Rq : le cycle dépend de la fréquence de tracé
- On peut classer les ferromagnétiques en deux catégories: :
 - Milieu doux : Cycle étroit, les champs coercitifs sont de l'ordre de 10 à 100 A/m et avec un champ rémanent faible. Utiles pour les systèmes qui doivent retourner leur aimantation facilement
 - Milieu dur : Cycle large, les champs coercitifs sont au moins de l'ordre de 1000 à 10000 A/m et avec un champ rémanent fort. Utiles pour les aimants permanents

Transition : le cas des ferros durs est complexe, mais on peut faire une modélisation convenable des ferros doux.

2.3 Modélisation d'un milieu doux

- On néglige l'hystérésis et on fait une affine par morceau
- Deux régimes: Linéaire et saturation
- Poser μ_r
- Ordre de grandeur pouvant aller jusqu'à 1000.
- Application: Noyau de ferromagnétique dans une bobine
- On sait qu'à l'extérieur on a pas de champ
- Par théorème d'Ampère, à l'intérieur on a $\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = LH(r) = I_{libre}^{enlacé} = nLI$
- L'excitation est uniforme, donc l'aimantation le sera également
- On a enfin $\vec{B}_{int} = \mu_o(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_o\mu_r\vec{H} = \mu_o\mu_r nI\vec{e}_z$
- On rappelle que sans milieu, on aurait $\vec{B}_{int} = \mu_o\vec{H} = \mu_onI\vec{e}_z$
- On a donc multiplié par un facteur μ_r notre champ, donc jusqu'à un facteur 1000, c'est monstrueux !
- Avec un solénoïde à 1000 spires par mètre et à 1 ampère, si on fait les applications numériques, on passe de 1 mT à 1 T !

3 Application: Bobine torique à noyau de fer doux

3.1 Modèle

- Enroulement de N spires. Dimension de longueur très grande devant celles de section: $l \gg \sqrt{S}$
- Plan (M, $\vec{e}_r$, $\vec{e}_z$) de symétrie pour les courants, donc d'antisymétrie pour le champ B qui est donc selon $\vec{e}_\theta$. Thm d'Ampère à l'intérieur du tore sur un cercle de rayon r: $H = \frac{Ni}{2\pi r}$
- Comme $l \gg \sqrt{S}$, on peut considérer $2\pi r = l = cte$ dans le tore. Donc on aura $H = \frac{Ni}{l}$ uniforme
- Modèle simple de fer doux: $B = \mu_o\mu_r H$; le flux s'écrit alors $\phi_B = NSB = NS\mu_o\mu_r \frac{Ni}{l} = Li$

- On multiplie l'inductance, et donc le stockage d'énergie magnétique $E = \frac{1}{2}Li^2$ est lui aussi multiplié par 1000

3.2 Etude des pertes

- On part de $U = ri + NS\frac{dB}{dt}$ et $lH = Ni$
- On en déduit $P = Ui = ri^2 + NS\frac{dB}{dt}i$
- Donc on a $\langle P \rangle = \langle Ri^2 \rangle + \frac{NS}{T} \int_0^T \frac{dB}{dt} \frac{lH}{N} dt = \langle Ri^2 \rangle + Slf \int_0^T H dB$
- On a somme des pertes Joules et des pertes fer dites pertes par hystérésis correspondant à l'aire du cycle d'hysteresis
- On peut rajouter une source de pertes fer: les pertes par courant de Foucault. Pour ça on note que le champ magnétique va créer localement des spires de courant dans le milieu.
- Ces spires dissipent une puissance donnée par $P = \vec{j} \cdot \vec{E} = \gamma \vec{E}^2$
- On se donne un cercle de rayon inférieur au solénoïde, en appliquant un théorème de Faraday avec $\vec{B}$ uniforme, on obtient :
- $\oint \vec{E} \cdot \vec{e}_\theta r d\theta = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot \vec{e}_z r dr d\theta$
- On en déduit: $\vec{E} = f\pi r B \sin(\omega t) \vec{e}_\theta$
- On dissipe donc une puissance en $P_{foucault} \propto f^2 B^2$
- On fait un bilan de puissance
- $\langle P_{pertes} \rangle = \langle P_{Joule} \rangle + \langle P_{fer \ hyst} \rangle + \langle P_{fer \ foc} \rangle = \langle Ri^2 \rangle + \langle K_{hyst} f B^2 \rangle + \langle K_{foucault} f^2 B^2 \rangle$
- Dans une application industrielle, on veut limiter ces pertes :
 - pour limiter les pertes Joules : on augmente la surface des cables.
 - pour limiter les pertes d'hysteresis : on utilise des noyaux de fer doux types Fe-Si
 - pour limiter les pertes par courants de Foucault : on utilise un feuilletage qui tue les spires de courant

3.3 Application au transfo

- Expliquer comment fonctionne le transfo
- Dans la pratique ça fonctionne même sans fer, mais on stocke bcp plus d'énergie avec nettement moins de pertes

Conclusion

Comment obtenir de très gros champs magnétiques ? Supra pour limiter les pertes joules, et pour des gros champs instantanés, réduire la section du solénoïde brutalement.

Bibliographie

- [1] BFR EM 4 : chap 5 à 8
- [2] The Feynman Lectures on Physics : chap 36 et 37 pour la culture et qqs ODG

Manipulations, ressources

- (1) Mise en évidence du phénomène d'hystérésis avec un transfo (cf MP16)