

L22: Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques.

PRÉREQUIS - Électromagnétisme (dans les milieux)
- Induction
(- Paramagnétisme, diamagnétisme)
- Électronique

INTRODUCTION

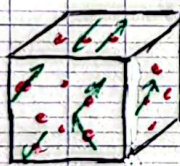
On a tous déjà utilisé des aimants = corps ferromagnétique.

Ferromagnétisme = propriété qu'ont certains corps à s'aimanter très fortement sous l'effet d'une excitation (champ) magnétique extérieur et de garder en mémoire cette aimantation même quand l'excitation cesse.

I. Description du ferromagnétisme.

1. Equations de Maxwell dans les milieux.

Considérons un matériau ferromagnétique et si on zoom très fortement à l'échelle microscopique



dV
matériau

chaque élément de volume peut être assimilé à un petit aimant : de moment magnétique $\vec{m}_{\text{atome}}$.

⇒ moment magnétique global de dV $\vec{m} = \sum \vec{m}_{\text{atome}}$ (échelle micro)
mais volume élémentaire ⇒ moment magnétique $\vec{m} = \sum \vec{m}_{\text{atome}}$
 $\vec{m} \propto dV$

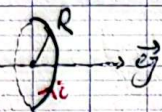
↳ coeff de proportionnalité $\vec{M}$ = vecteur aimantation [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]

⇒ $\boxed{\vec{M} = \frac{\vec{m}}{dV}}$ = densité volumique de moment magnétique.

D'un point de vue plutôt macro

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}_{\text{micro}}}{\Delta G}$$

Ring magnétostatique



moment magnétique $\vec{m} = Si \vec{e}_j$ avec $S = \pi R^2$
 $r \gg R \Rightarrow \vec{B} = \frac{\mu_0 \vec{m}}{2\pi r^3}$

$\Rightarrow$ milieu magnétique $\Rightarrow \vec{H} \neq \vec{0} \Rightarrow \sum \vec{m}_{\text{micro}} \text{ ne se compensent pas.}$

* On admet la densité volumique de courant d'aimantation $\vec{j}_a = \text{rot } \vec{H}$ défini par Götzel
 $[A.m^{-2}]$ $[A]$

* Eq Maxwell des ARQS pour milieux magnétiques non polarisés ou en régime permanent
 $\hookrightarrow$ magnétique $\sim |\vec{H}| \gg |\vec{E}| \Rightarrow$ courants prépondérants devant les charges qui ne s'accumulent pas

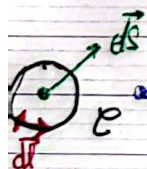
• HA: $\text{rot } \vec{B} = \mu_0 (\vec{j}_{\text{micro}} + \vec{j}_a) = \mu_0 (\vec{j}_{\text{micro}} + \text{rot } \vec{H})$

$\Rightarrow \text{rot } \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H} \right) = \vec{j}_{\text{micro}}$ $\rightarrow$ pratiques car maîtrisées par expérience en travaillant aux $\vec{j}_a$
 $\vec{H}$ = vecteur excitation magnétique $[A.m^{-1}]$

$\Rightarrow \text{rot } \vec{H} = \vec{j}_{\text{micro}} \Rightarrow \vec{H}$ est créée par courant qui circule dans les fils on a le contrôle dessus

mg: $\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \Rightarrow \vec{B}$ créée par courants libres et d'aimantation
 $\hookrightarrow \oplus \ominus$ estimer que $\vec{H}$

• MI: $\text{div } \vec{B} = 0$



Th Ampère pour les milieux $\oint_S \text{rot } \vec{H} \cdot d\vec{S} = \oint_{\partial S} \vec{j}_{\text{micro}} \cdot d\vec{S} \Rightarrow \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{\text{encirclée}}$

$\Rightarrow$ On a 6 équations (1 MI + 2 HA + 3 avec def de $\vec{H}$) mais 9 inconnues $\vec{H}, \vec{B}, \vec{H}$

$\hookrightarrow$ Si on connaît $\vec{H}$ il nous manque 1 relation par le lien $\vec{B}$ et $\vec{H}$ uniquement
 $\Rightarrow$ recherche de relations constitutives.

2 - Relations constitutives - phénoménologique : permet de relier $\vec{B}$ à $\vec{H}$

Aimantation varie avec l'excitation magnétique, si matériaux isotrope (c'est-à-dire que ses propriétés sont identiques dans toutes les directions) $\Rightarrow \vec{M} = \chi_m(\vec{H}) \vec{H}$
 avec $\chi_m(\vec{H}) \equiv$ susceptibilité magnétique (sans dimension) $\hookrightarrow$ matrice 3×3

* Matériaux linéaires (faiblement magnétique) : χ_m ne dépend pas de $\vec{H}$
 $\Rightarrow \vec{M} \propto \vec{H}$

- matériaux diamagnétiques : $\chi_m < 0$ ($\chi_m \sim 10^{-6} - 10^{-9}$)
 - paramagnétiques : $\chi_m > 0$ ($\chi_m \sim 10^{-3} - 10^{-6}$)
- mq: si $\vec{H} = \vec{0} \Rightarrow \vec{M} = \vec{0}$ *peuvent avoir aimants permanents*

* Matériaux non linéaire qd $H \uparrow$ (fortement magnétique) : ferromagnétique $\rightarrow \chi_m(\vec{H})$
 il est possible que $\vec{H} = \vec{0} \Rightarrow \vec{M} \neq \vec{0}$ c'est aimants permanents.
 QDS: χ_m fer 200, nickel ~ 1000

Rmq: ferromagnétisme que dans structures cristallines ($\sim$ solides) et en dessous de la température de Curie (par T) $T_c \Rightarrow$ paramagnétisme
 QDS: $T_c(\text{fer}) = 1063 \text{ K}$ $T_c(\text{Ni}) = 63 \text{ K}$ $T_c(\text{ferro}) > T_{\text{amb}} \Rightarrow$ faut observer le comportement ferro.

$$\Rightarrow \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi_m \vec{H} \Rightarrow \vec{B} = \underbrace{\mu_0(1 + \chi_m)}_{\mu} \vec{H} \Rightarrow \boxed{\vec{B} = \mu_{\text{eff}} \vec{H}}$$

$\mu = \mu_{\text{eff}} \equiv$ perméabilité magnétique de milieu $\hookrightarrow$ perméabilité magnétique relative (sans dimension)

3 - Notion de réactance (à réviser)

Dans milieux conducteurs : relation constitutive $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, ici $\vec{B} = \mu \vec{H}$
 $\Rightarrow$ analogie possible entre circuits électriques et magnétiques.

Réactance: propriété d'un matériau à s'opposer au passage d'un flux magnétique
à résistance magnétique.

↳ Analogie électrostatique $R_m = \oint \frac{dl}{\mu S}$

Les lignes de champs suivent le chemin de moindre réactance.

Or $\mu_{\text{fer}} \gg \mu_{\text{air}} \Rightarrow R_{m, \text{fer}} \ll R_{m, \text{air}}$

$\Rightarrow$ Champ @ interface deux matériaux fer, il canalise les lignes de champs.

|| Comment varie X_m avec H ? $\Rightarrow$ Comment B varie en fct de H ?

II - Aimantation d'un corps ferromagnétique.

1. Cycle d'hystérésis: détermination expérimentale.

Objectif: mesure H et B .

* Théorème d'Ampère: $Hl = N_1 i + N_2 e$ avec $l =$ longueur du circuit magnétique.

On choisit $r \sim 30 \Omega$ et $R \sim 100 k\Omega \Rightarrow N_1 i \gg N_2 e$

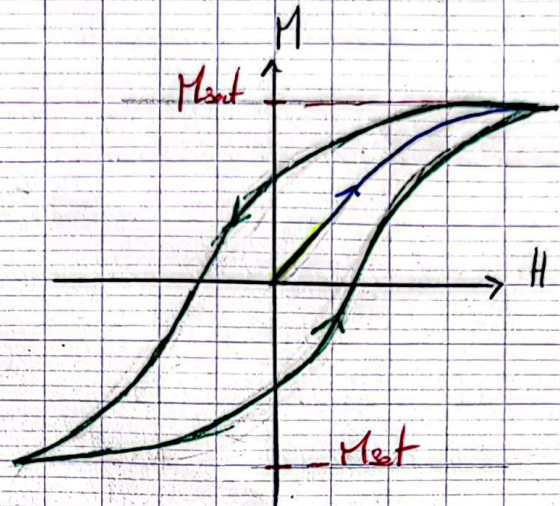
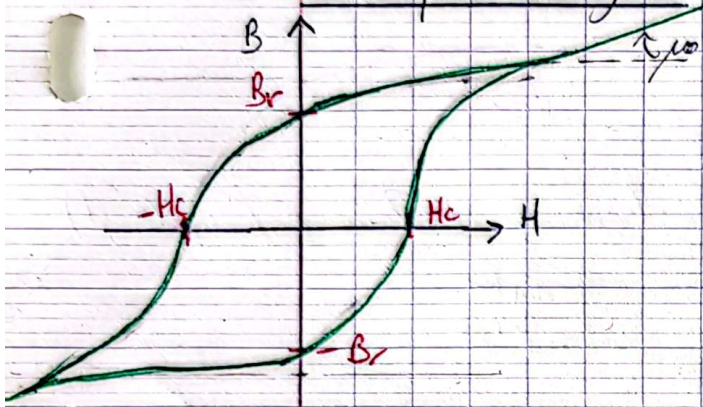
$$\Rightarrow H = \frac{N_1 i}{l} = \frac{N_1 U}{l r}$$

Au secondaire on a $V_e = -\frac{d\phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt} \Rightarrow$ Filme RC $\hat{=}$ intégrateur pour récupérer B

$$\Rightarrow \frac{dV_e}{dt} = \frac{-V_e}{RC} = \frac{N_2 S}{RC} \frac{dB}{dt}$$

$$\Rightarrow V_e = \frac{N_2 S}{RC} B + \text{const} \Rightarrow B = \frac{RC V_e}{N_2 S}$$

2 - Description du cycle



- * Valeur de B dépend de l'hystorèse du matériau
- * Pour grand H , $B = f(H)$ devient affine de pente μ_0
- * Quand excitation magnétique $H=0 \Rightarrow$ champ B créée par matériau $\neq 0$
 $\Rightarrow$ champ rémanent
- * Pour annuler le champ $B \Rightarrow$ il faut appliquer une excitation magnétique $\neq 0$
 $\Rightarrow$ excitation coercitive.
- * Evolution de H en fct de H à savoir que B fct de H
 On a $M(H) = \frac{B}{\mu_0} - H \Rightarrow$ Saturation du matériau $\Rightarrow$ aimantation de saturation
 $\exists$ aimantation rémanente. cad $H \neq 0$ avec $H=0 \Rightarrow$ principe des aimants permanents.
- * En fct taille du cycle on différencie 2 types de matériaux.
 - Doux: B_r faible $\Rightarrow$ cycle plutôt étroit $\Rightarrow$ relation entre B et H quasi linéaire $\Rightarrow$ utile pour guider B à travers le transfo car on veut pas que le ferro est un B_r propre à ajouter au B créée par bobinage.
 - Dur: B_r élevée $\Rightarrow$ cycle large $\Rightarrow$ aimants permanents $\Rightarrow$ possèdent $\vec{M}$ propre indépendamment de $\vec{H}$.

Conséquence de l'hystérésis $\rightarrow$ perte de puissance.

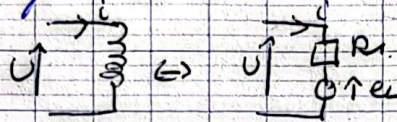
3. Bilan de puissance.

* Puissance instantanée consommée au primaire (avec R_e résistance de l'air-circuit) bobine

$$P_p(t) = u_L(t) i_L(t)$$

$$\text{or } u_L(t) = R_e i_L(t) - e_L(t)$$

$$\text{avec } e_L(t) = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 S \frac{dB}{dt}$$



De plus, H ampère $\Rightarrow \phi H(t) = N_1 i_L(t) \Rightarrow i_L(t) = \frac{\phi H(t)}{N_1}$

$$\Rightarrow P_p(t) = R_e i_L^2(t) + \underbrace{\left(\frac{1}{2} S H(t) \frac{dB}{dt} \right)}_{\substack{\text{Volume de fer} \\ \text{reçoit} \\ \text{puissance } H \frac{dB}{dt} \\ \text{pendant } dt \text{ il} \\ \text{reçoit } \frac{1}{2} H \frac{dB}{\text{cycle}}}}$$

* Puissance moyenne sur un cycle $\langle P_p(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T P_p(t) dt$

$$\Rightarrow \langle P_p(t) \rangle = \underbrace{\frac{1}{T} \int_0^T R_e i_L^2 dt}_{P_{\text{avec}}} + \underbrace{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} S H dB}_{P_{\text{fer}}}$$

$\Rightarrow$ 2 sources de pertes:

• Pertes Joules $P_J = R_e I_L^2$ avec $I_L =$ valeur efficace de i_L
Les dues au courant qui traverse la bobine.

• Pertes fer $P_f = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{2} S H dB \right)$ $\rightarrow$ area sous la courbe

$$\Rightarrow P_f = \frac{V_{\text{cyc}}}{T} = V_{\text{cyc}} f$$

$\text{aire du cycle} \propto \sim \text{E volumique dissipée vers d'un cycle}$

$\Rightarrow \oplus$ le cycle est large $\Rightarrow \oplus$ E dissipée

Or dans appli industrielles le cycle est parcouru bcp de fois (à travers)

$\Rightarrow$ on veut des ferres doux

Exemple: P_J avec cycle à comparer au rapport des puissance $P_1 - P_2$

- * Si ferre conducteur (c fer): $\vec{B}$ variable $\Rightarrow$ courant de Foucault $\Rightarrow P_s$
 Pour les minimiser $\Rightarrow$ feuilletage = empilement de tôles fines (de l'ordre de P_{Fe})
 ($< 1\text{mm}$) séparées par une couche d'isolant.

III - Application: modèle du transformateur parfait

Intérêt: Convertir une tension alternative en une autre tension alternative, sans perte de puissance.

ex. dans production d'électricité

- élever tension dans lignes haute tension
- abaisser tension au 220V du domestique dans chargeur : tension à 10V.

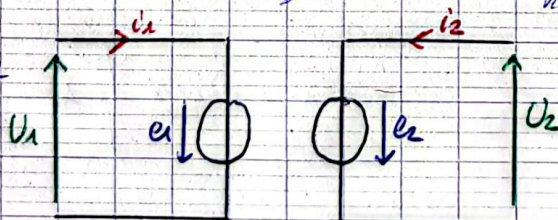
Description: 2 enroulements: primaire et secondaire

+ ferre par canaliser le $\rightarrow$ parcours par le fer $\Rightarrow$ créat° $\vec{B}$ variable
 champ est l'amène jusqu'au secondaire où une fem est induite

Hypothèses du transformateur parfait

- $\rightarrow$ Tous les lignes de champs sont canalisées par le ferre car $\mu_r \rightarrow \infty$
- $\Rightarrow \mu \rightarrow \infty \Rightarrow$ aucune perte de flux
- $\rightarrow$ Résistances des enroulements négligées.
- $\rightarrow$ ϕ courants de Foucault dans ferre (on le suppose isolant m si feuilleté en pratique)

Schéma équivalent



* Loi des mailles @ HF $U_1 = -e_1 = \frac{d\phi_1}{dt} = N_1 S \frac{dB}{dt}$ et $U_2 = -e_2 = N_2 S \frac{dB}{dt}$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = m} \quad \text{rapport de transformation}$$

ODG: tension de 20 kV $\rightarrow$ 220V $\rightarrow m \sim 10^{-3}$
 220V $\rightarrow$ 12V $\rightarrow m \sim 0,05$ (chargeur)

* Th Ampère sur 1 ligne de champ magnétique du fer $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{enc} = N_1 i_1 + N_2 i_2$
 or fer parfait $\rightarrow \vec{B} = \mu \vec{H}$ avec $\mu \rightarrow \infty$ or $\vec{B}$ fini $\Rightarrow \vec{H} \rightarrow \vec{0}$
 $\Rightarrow N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{i_2}{i_1} = -\frac{N_1}{N_2} = -\frac{1}{m}}$

mq: signe $\ominus$ car de entrant, si i_2 sort $\Rightarrow i_2' = -i_2 \Rightarrow \frac{i_2'}{i_1} = \frac{1}{m}$

* Type gain: mesure m.

* $\frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 i_2'}{U_1 i_1} = \frac{m}{m} = 1 \Rightarrow$ puissance conservée dans un transo parfait

$\hookrightarrow$ intérêt: transporter électricité sur des très grandes distances avec très haute tension et très faible courant pour minimiser effet Joule.

* En pratique $\exists$ petites pertes dans bobinage
 • pertes fer par courant de Foucault
 • pertes de flux
 • pertes hystérésis

CONCLUSION

$\rightarrow$ Matériaux ferros comportement non linéaire avec champ ext $\Rightarrow$ cycle d'hystérésis.
 $\hookrightarrow$ permettent de canaliser le champ $\Rightarrow$ repousser intense } beaucoup applications
 $\hookrightarrow$ effet mémoire

$\rightarrow$ Il faut choisir matériau en fct de l'application

* transmission puissance $\hat{c}$ transfo $\Rightarrow$ limite pertes $\Rightarrow$ fer doux

* effet mémoire $\Rightarrow$ mise à profit de l'hystérésis $\Rightarrow$ fer dur $\Rightarrow$ disque dur.

$\rightarrow$ Autre appl: stockage de l'info: disque dur $\Rightarrow$ fer dur qui stocke données sous forme binaire $\Rightarrow$ champ de frélence $\neq$ modifié $\Rightarrow$ conserve info.