

ELECTROMAGNÉTISME APPLIQUÉ
LES MATERIAUX MAGNETIQUES DURS

- I. Rappels et définitions
- II. Les matériaux magnétiques durs
- III. Les différents types d'aimants permanents
- IV. Utilisations des aimants permanents
- V. Calcul des systèmes à aimants permanents

I.1 Représentation dipolaire et action sur un dipôle

Champ créé par une spire

moment magnétique $\vec{M} = I \cdot \vec{S}$ (modèle ampérien)

$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{M} \wedge \vec{r}}{r^3}$ (potentiel vecteur)

$\mu_0 V = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{M} \cdot \vec{r}}{r^3}$ (potentiel scalaire)

I.1 Représentation dipolaire et action sur un dipôle

Champ créé par une spire

Champ créé par un dipôle

$\mu_0 \vec{M} = m^* l$

charges magnétiques équivalentes (modèle coulombien)

Forces et couples exercés sur un moment magnétique \vec{M}

Energie d'interaction d'un moment magnétique \vec{M} placé dans un champ extérieur \vec{H}_e

$W_{Li} = -\mu_0 \vec{M} \cdot \vec{H}_e = -\vec{M} \cdot \vec{B}_e$

Force exercée sur le moment magnétique

$\vec{F} = -\text{grad}(W_{Li})$

Couple exercé sur le moment magnétique

$\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}_e$

Notations et rappels

\vec{B} induction magnétique (T)

\vec{H} champ magnétique (A/m)

\vec{J} polarisation magnétique (T)

\vec{M} aimantation (A/m)

$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}$

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

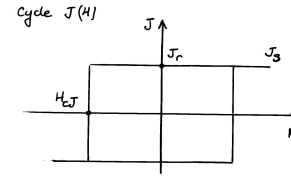
\vec{A} potentiel vecteur $\vec{B} = \text{rot}(\vec{A})$

V potentiel scalaire $\vec{H} = -\text{grad}(V)$

- \vec{M} moment magnétique ($A \cdot m^2$)
- $\vec{M} = I^* \vec{S}$ représentation ampérienne
 - $\vec{M} = \frac{1}{\mu_0} m^* \vec{l}$ " coulombienne
 - $\vec{M} = \frac{1}{\mu_0} \vec{J} \cdot \vec{v} = \vec{M} \cdot v$ " volumique

Aimant permanent idéal

Polarisation J constante



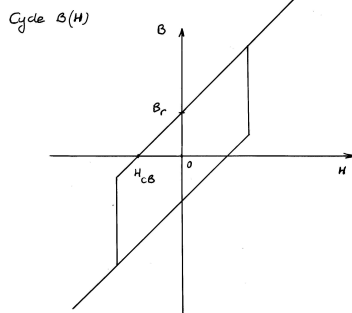
Points particuliers du cycle

J_r : polarisation rémanente

H_{cJ} : champ coercitif du cycle $J(H)$

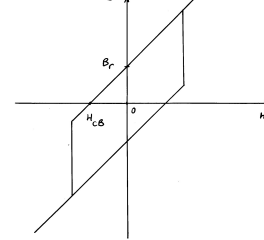
J_s : polarisation à saturation

Induction à l'intérieur de l'aimant idéal



Dans l'aimant : $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}$

Cycle $B(H)$



Dans l'aimant : $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}$

Points particuliers du cycle

B_r : induction rémanente

$B_r = J_r$

H_{cB} : champ coercitif du cycle $B(H)$

attention : $H_{cB} \neq H_{cJ}$

Perméabilité d'un aimant permanent

$$B = \mu_0 H + J$$

$$\Delta B = \mu_0 \Delta H$$

La perméabilité d'un aimant idéal est μ_0

$$\mu_{\text{aim}} = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \mu_0$$

Moment magnétique d'un aimant

Moment magnétique élémentaire d'un élément de volume de l'aimant dV

$$d\vec{M} = \frac{1}{\mu_0} \vec{J} \cdot dV$$

Moment magnétique d'un aimant

$$\vec{M} = \frac{1}{\mu_0} \iiint_{\text{vol. aim.}} \vec{J} \cdot dV$$

Pour un aimant idéal de polarisation uniforme J

$$\vec{M} = \frac{1}{\mu_0} \vec{J} \cdot V_{\text{aim.}}$$

En utilisant l'aimantation M

$$\vec{M} = \frac{\vec{J}}{\mu_0}$$

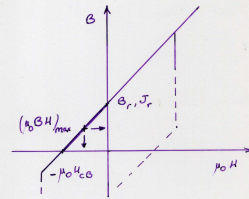
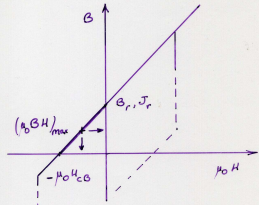
$$\vec{M} = M \cdot V_{\text{aim.}}$$

Valeur de $(B, H)_{max}$ pour l'aimant idéal

$(B, H)_{max}$: valeur qui caractérise l'aimant permanent

Equation de la courbe de désaimantation de l'aimant idéal

$$B = \mu_0 H + J_r = \mu_0 H + B_r$$



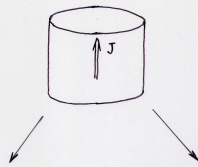
Sur la courbe de désaimantation, pour $B = 0$: $-\mu_0 H_{c0} = +B_r$

Coordonnées du point $(B, H)_{max}$ $\left\{ \begin{array}{l} B = \frac{B_r}{2} \\ \mu_0 H = -\mu_0 \frac{H_{c0}}{2} \end{array} \right.$

d'où $(B, H)_{max} = \frac{B_r^2}{4\mu_0}$

$(\mu_0 B, H)_{max} = \frac{B_r^2}{4}$

Représentations de la polarisation J



Équivalence coulombienne

Équivalence ampérienne

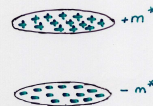
Représentations de la polarisation J

Équivalence coulombienne

Équivalence ampérienne

Masses magnétiques équivalentes sur les pôles de l'aimant

Nappe de courants autour de l'aimantation



Équivalence coulombienne

$m^* = \sigma S$
"masses magnétiques"

σ : densité surfacique de charges équivalentes

$$\sigma = \vec{J} \cdot \vec{n} \quad [T]$$

\vec{n} : vecteur unité normal, orienté vers l'extérieur du volume

Équivalence coulombienne

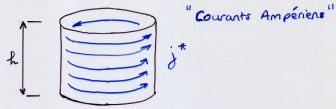
$m^* = \sigma S$
"masses magnétiques"

- Quand $\vec{J} \parallel \vec{n}$, $\sigma = J$
Distribution de charges "+", appelée "pôle Nord"

- Quand \vec{J} et \vec{n} sont anti-parallèles $\sigma = -J$
Distribution de charges "-", appelée "pôle Sud"

Calcul direct du champ magnétique \vec{H}
Les lignes de champ magnétique \vec{H} vont des masses magnétiques "+" vers les masses magnétiques "-"

Équivalence ampérienne



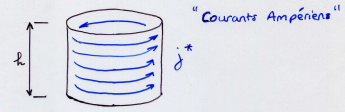
j^* : densité linéique de courants équivalents

$$j^* = \frac{J}{\mu_0} \quad [A/m]$$

Courants ampériens totaux :

$$I_L^* = j^* \cdot h$$

Équivalence ampérienne



j^* : densité linéique de courants équivalents

$$j^* = \frac{J}{\mu_0} \quad [A/m]$$

Calcul direct de l'induction magnétique \vec{B}
Les lignes de champ de l'induction \vec{B}
s'enroulent autour des courants ampériens