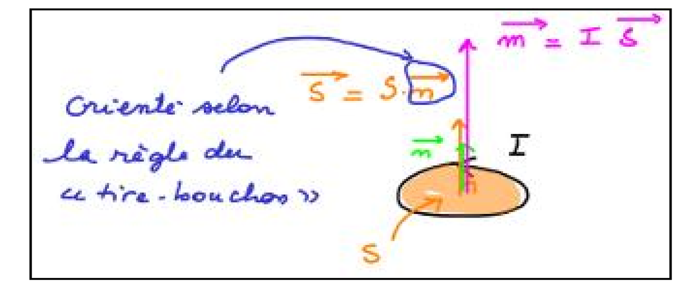
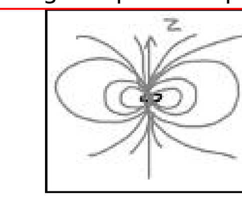
Milieux ferromagnétiques

Moment magnétique d'une spire parcourue par un courant

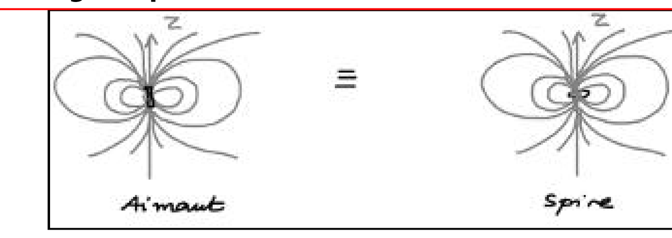
$\vec{m} = I\vec{S}$



Champ magnétique créé par cette spire



À grande distance, les lignes de champ d'une spire sont proches de celles de n'importe quelle source : on étend la notion de moment magnétique à toutes les sources, alors appelées **dipôles magnétiques**.



Exemples

$$\text{Aimant} \ : \ m \simeq 10 \ \text{A.m}^2$$
$$\text{Terre} \ : \ m \simeq 7,9 \times 10^{22} \ \text{A.m}^2$$

Actions subies par un dipôle magnétique

Énergie potentielle d'interaction

$\mathcal{E}_p = -\vec{m} \cdot \vec{B}_{\text{ext}}$

Position stable d'une boussole

$\mathcal{E}_p$ minimale pour $\alpha = 0$

Force

$\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}}(\mathcal{E}_p) = \overrightarrow{\text{grad}}(\vec{m} \cdot \vec{B}_{\text{ext}})$

Boussole dans un champ uniforme

$\vec{F} = \vec{0}$

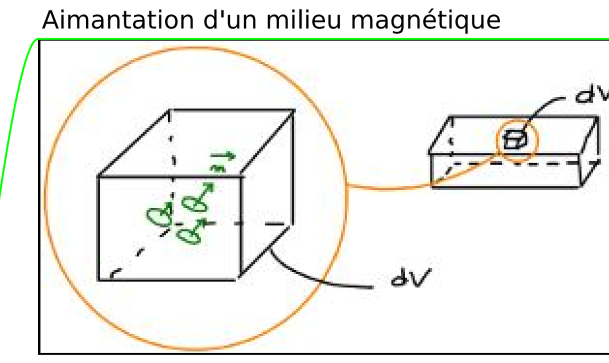
Moment

$\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}_{\text{ext}}$

Boussole subissant un couple nul

$\vec{\Gamma} = \vec{0}$ pour $\alpha = 0$

Aimantation d'un milieu magnétique



Vecteur aimantation

$\vec{M} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{m}}{\mathrm{d}V}$

Densité de dipôles magnétiques par unité de volume

L'aimantation de la matière est équivalente à la présence de courants électriques volumique, appelés **courants d'aimantation** (ou courants liés).

$\vec{j}_M = \overrightarrow{\text{rot}}\vec{M}$

Équation de Mawxell-Ampère dans un milieu magnétique

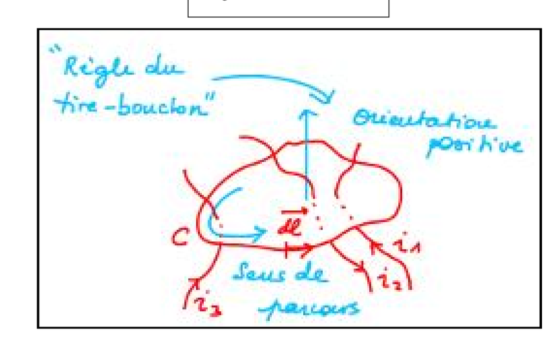
$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j}$

Vecteur excitation magnétique

$\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

Théorème d'Ampère généralisé aux milieux magnétiques

$\oint_C \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{\ell} = i_{\text{tot}}$



Milieu Linéaire Homogène Isotrope (LHI)

$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

Suceptibilité magnétique du milieu

χ_m

Conséquence directe

$\vec{H} = \dfrac{\vec{B}}{\mu}$ avec $\mu = \mu_0 \mu_r$

Perméabilité magnétique relative du milieu

$\mu_r = 1 + \chi_m$

Exemples

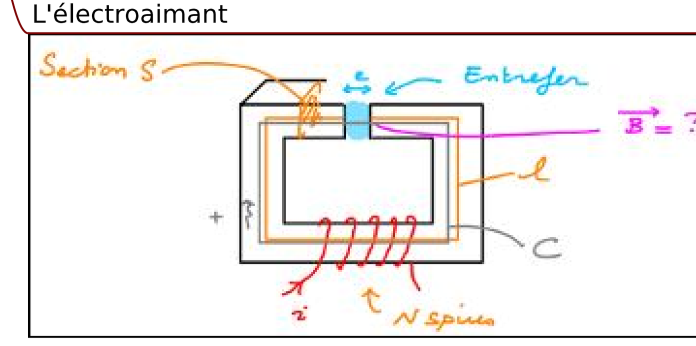
Milieux diamagnétiques

$\chi_m < 0$

Milieux paramagnétiques

$\chi_m(T) > 0$

L'électroaimant



Hypothèses du modèle

- Pas de fuites
- Milieu magnétique LHI
- Section faible

$S << \ell$

Caractéristiques de l'excitation magnétique

$\vec{H}$ uniforme

Théorème d'Ampère généralisé

$H_{\text{circuit}} \cdot \ell + H_{\text{entrefer}} \cdot e = N \cdot i$

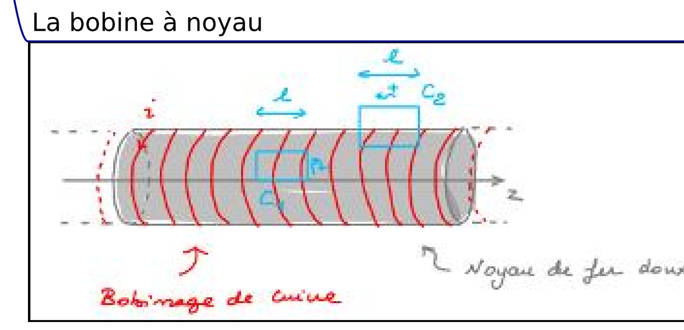
Conservation du flux magnétique

$B_{\text{circuit}} \cdot S = B_{\text{entrefer}} \cdot S$

Champ magnétique dans l'entrefer

$$B_{\text{entrefer}} = \frac{\mu_0 N i}{\dfrac{\ell}{\mu_r} + e}$$

La bobine à noyau



Hypothèses du modèle

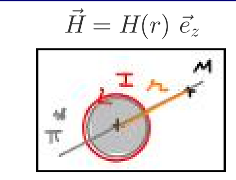
- Pas de fuites

$\vec{H}_{\text{ext}} = \vec{0}$

- Milieu magnétique LHI
- Longueur infinie

Symétries et invariances

$\vec{H} = H(r) \ \vec{e}_z$



Contour d'Ampère circulaire

Théorème d'Ampère généralisé

$\vec{B} = \mu \dfrac{N}{\ell} i \ \vec{e}_z$

Inductance propre

$$\phi_p = N \iint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = NBS = Li \text{ soit } L = \frac{\mu N^2 S}{\ell}$$

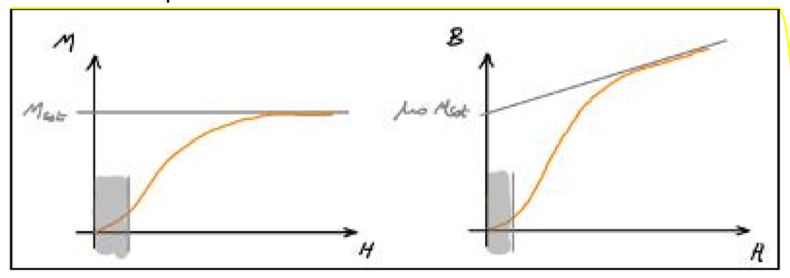
Aspect énergétique

$w_B = \dfrac{B^2}{2\mu}$

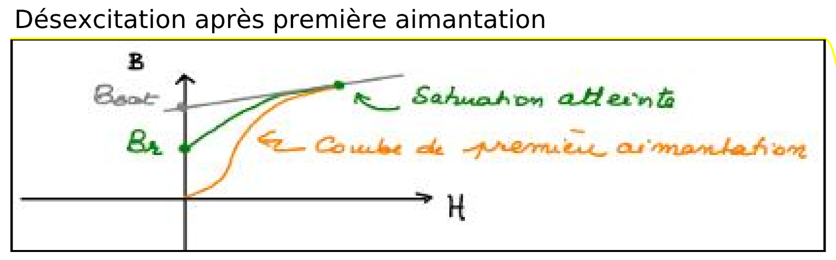
Milieu ferromagnétique (non LHI)

Cycles d'hytérésis

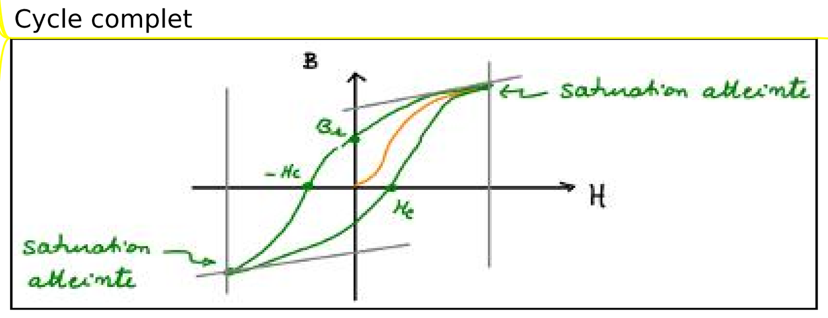
Courbes de première aimantation



Désexcitation après première aimantation



Cycle complet



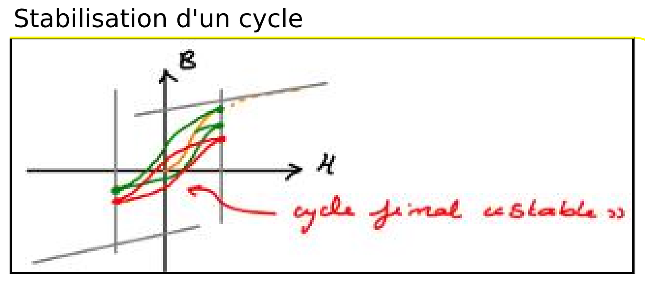
Champ rémanent (le milieu est aimanté)

B_r

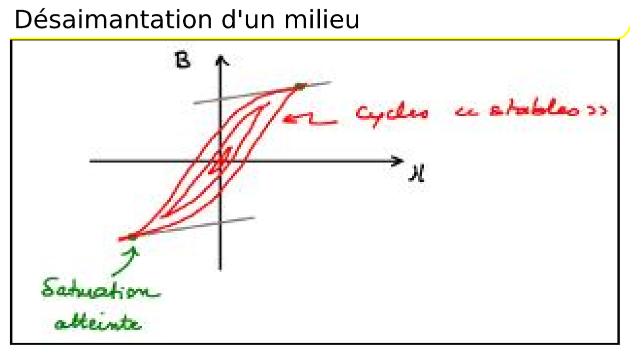
Excitation coercitive (le milieu est désaimanté)

H_c

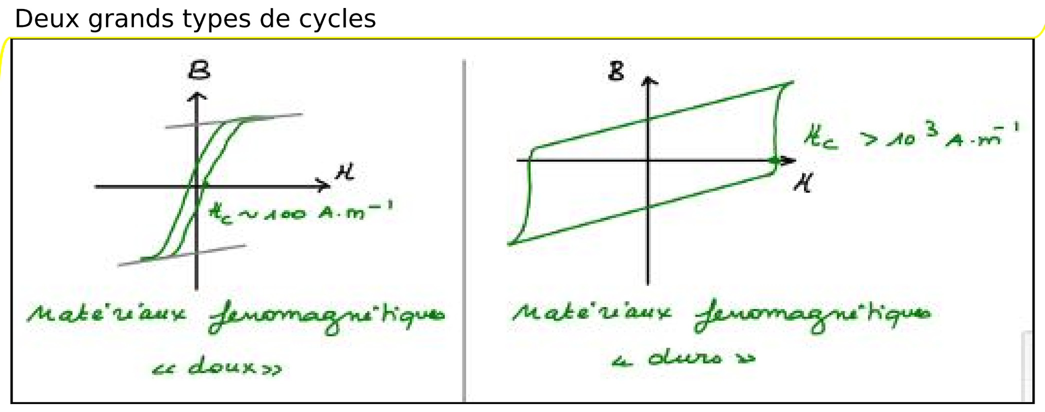
Stabilisation d'un cycle



Désaimantation d'un milieu



Deux grands types de cycles

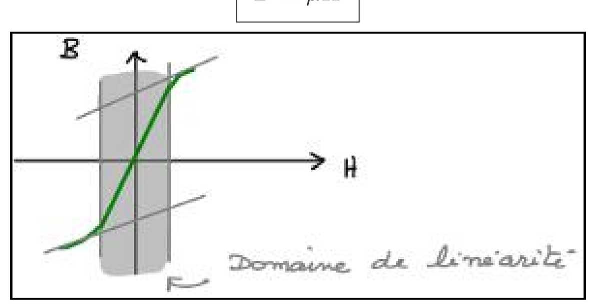


Matériaux doux pour limiter les pertes

Matériaux dur pour un grand champ rémanent

Cas d'un milieu ferromagnétique **particulièrement doux : le milieu peut être considéré comme quasi-LHI.**

$\vec{B} \simeq \mu \vec{H}$



Au delà de la **température de Curie**, le milieu devient paramagnétique.

Pertes dans les systèmes réels

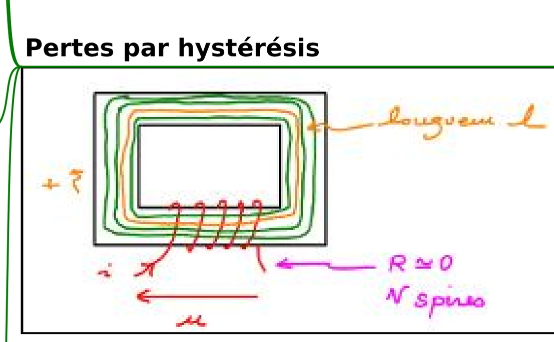
Pertes << cuivre >>

$p_{\text{cuivre}} = R \ i^2$

Pertes << fer >>

Pertes par courants de Foucault

Pertes par hystérésis



Théorème d'Ampère généralisé

$H\ell = Ni$ soit $i = \dfrac{H\ell}{N}$

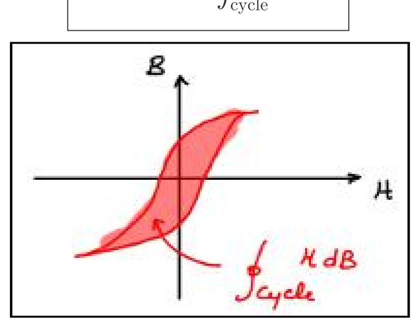
Puissance délivrée par le générateur au matériau

$$p = ui = -ei = \mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t \cdot i = NS \ \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \cdot \frac{H\ell}{N} = H\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \cdot V$$

$p_{\text{vol}} = H\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$

Puissance moyenne, restituée sous forme de chaleur

$< p_{\text{vol}} >= f \oint_{\text{cycle}} H\mathrm{d}B$



Pertes proportionnelles à la **fréquence** et à **l'aire du cycle**