

# LP46 : Propriétés & macro des corps ferromagnétiques

12

Milieu magnétique : collection

$\vec{\Pi} = \frac{\partial \vec{m}}{\partial V}$  : Densité volumique de moment dipolaire  
(A.m<sup>-1</sup>)

Milieux magnétiques

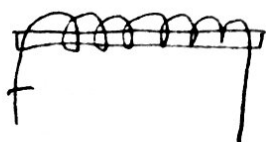
- Diamagnétique  $\vec{\Pi} = \frac{\chi_m}{\mu_0} \vec{B}$   $\chi_m \approx -10^{-5}$
- ~~Para~~ Paramagnétique  $\vec{\Pi} = \frac{\chi_m}{\mu_0} \vec{B}$  ( $\chi_m \sim 10^{-3}$ )
- Ferromagnétique : plus de linéarité entre  $\vec{\Pi}$  et  $\vec{B}$   
 $\|\vec{\Pi}\| \sim \frac{10^5}{\mu_0} \|\vec{B}\|$

I) Définition et équations de Maxwell (ds ferro) ← revoir livre

1) Observation expérimentale

⇒  $\vec{B}$  grâce à un solénoïde

- 1) • Noyaux de fer à l'intérieur du solénoïde  $B \nearrow (\sim 10^5)$
- Sans courant il reste un champ  $\vec{B}$  rémanent



Matériau pas ds le même état avant et après

Propriétés ferro: • certains corps simple (fer, cobalt, nickel)  
+ alliages

⇒ propriété à l'état condensé, pour des structures cristallines

## 2) Equation de Maxwell

On admet qu'on peut définir une densité de courant

$$\vec{j}_{\text{lié}} = \text{rot } \vec{\Pi} \quad (\text{Boucles de courant fictive})$$

$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 
 $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$

Equation de Maxwell Ampère

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 (\vec{j}_{\text{libre}} + \vec{j}_{\text{lié}})$$

$$\text{rot } \left( \underbrace{\vec{B}}_{\mu_0} - \vec{\Pi} \right) = \mu_0 \vec{j}_{\text{libre}}$$

$\vec{H}$ : excitation magnétique

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

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j}_{\text{libre}}$$

$\vec{B}$ :  $\Sigma$  de 2 termes

$H$ : excitation magnétique (extérieur)

Aimentation  $\Pi$  (réponse du milieu)

Théorème d'Ampère ds le vide



$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{j}_{\text{libre}} \cdot d\vec{S}$$

= l'encluee, libre

⇒ Forme intégrale avec  $H$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0$$

On ne s'intéresse pas au champ électrique

1 inconnue vectorielle en plus.  $\Rightarrow$  Il faut  $\uparrow$  une relation constitutive du matériau entre  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$  ou ( $\vec{M}$  et  $\vec{H}$ )

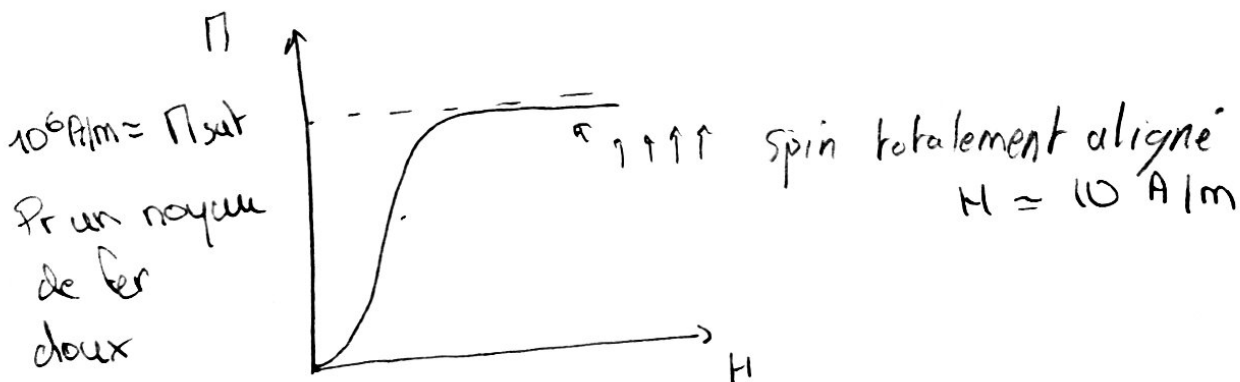
## II) Description des milieux ferromagnétiques

$H \Rightarrow$  lié aux courants libres. On le maîtrise

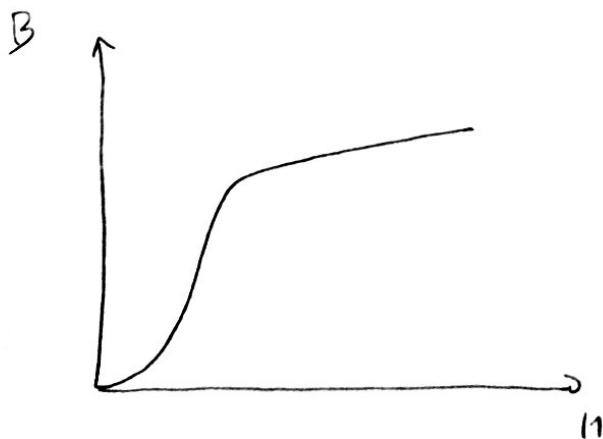
Hypothèses:  $H, B, M$  scalaire et uniforme sur une section

### 1) Première aimantation

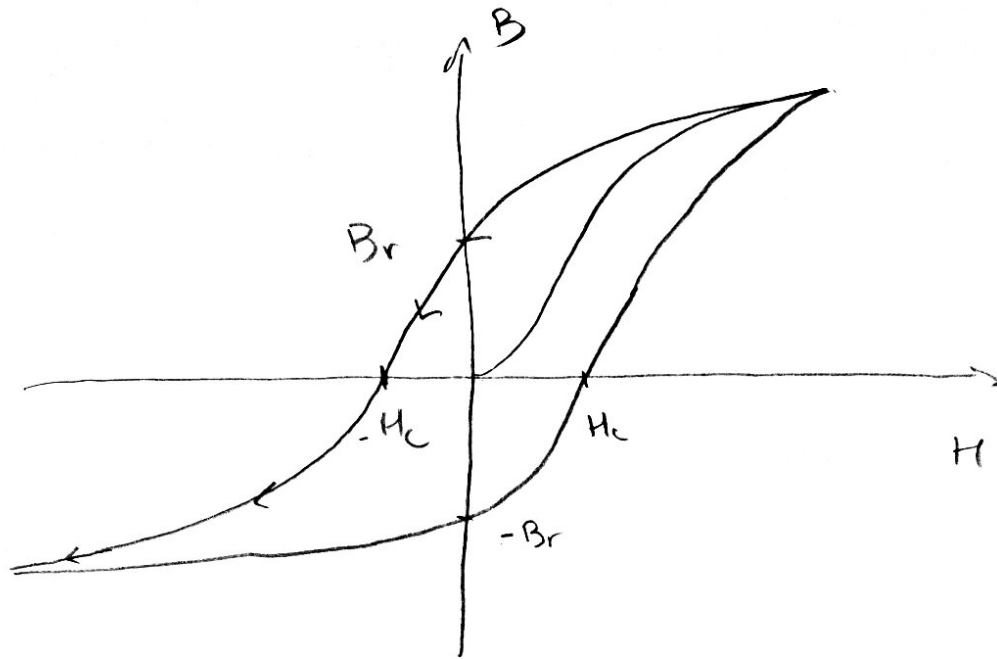
Initial:  $M=0, H=0, B=0$



$$B_{\text{sat}} = \mu_0 (H_{\text{sat}} + M_{\text{sat}}) \approx \mu_0 M_{\text{sat}}$$



## 2) Cycle d'hysteresis

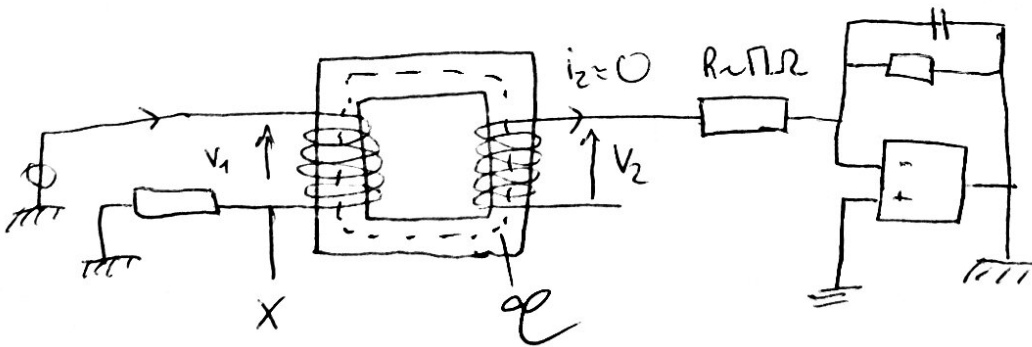


L'état dans lequel se trouve le matériau dépend de l'état antérieur.

## 3) Cycle d'hysteresis en TP

H préparé ?

- Mode XY de l'oscilloscope



Montage intégrateur

- Maxwell Ampère sur le contour Ø

$$H l = n i$$

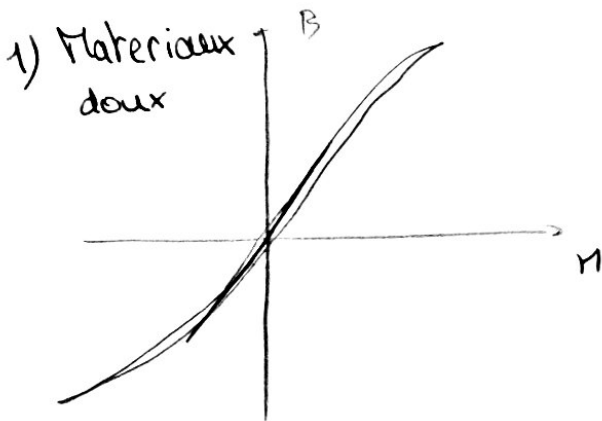
- Loi de Faraday

$$e_2 = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(B S n_2)}{dt} = V_2$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{e_2}{Sn_2} = \frac{V_L}{Sn_2} \Rightarrow V_L \propto B$$

Desuimentation du matériau

#### 4) Conséquences



$$\mu = \mu_0 \mu_r \text{ avec } \mu_r \approx 10^5$$

Puissance dissipée sur 1 cycle?

$$P = v_1 i_2 = \frac{Hl}{n_2} \cdot n_1 S \frac{dB}{dt} = HV \frac{dB}{dt}$$

↑  
volume

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} HV \frac{dB}{dt} dt$$

, Aire

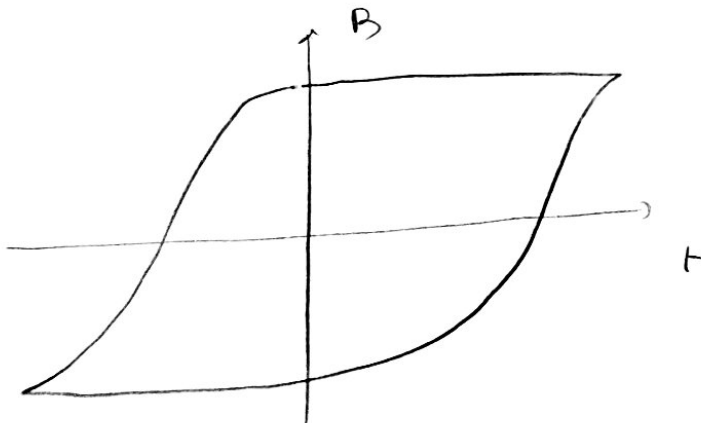
$$= f V \int_{t_0}^{t_0+T} H dB = f V A_{\text{cycle}}$$

A<sub>cycle</sub>: P dissipée / unité de volume sur 1 période.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} : \text{permeabilité du matériau.}$$

⇒ On perd peu de puissance Matériaux doux, utilisés en électrotechnique pr limiter les pertes.

#### 2) Matériaux durs



Pr les aimants permanents

$$B_r \approx 1 \text{ T.}$$

$$H_c \approx 10^5 \text{ A/m}^{-2}$$

⇒ Matériaux permettant de canaliser les lignes de champ.

Matériaux doux

$$v_1 = n_1 S \frac{dB}{dt} \quad B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 n_1 i_1}{l}$$

$$v_1 = \mu n_1^2 \frac{S}{l} \frac{di_1}{dt}$$

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{n_1^2 S}{l}$$

### 3) Interpretation microscopique

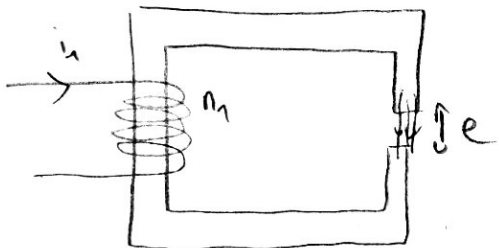
On observe que les moments dipolaires s'orientent sur une petite échelle.

### III) Applications

#### 1) Electroaimant

• But : créer des champs  $\vec{B}$  élevés.

• Description



Lignes de champs canalisées.

$$\mu H_f + e H_e = n_1 i_1$$

• Vide  $H_e = \frac{B_e}{\mu_0}$

• conservation du flux  $B_e = B_f$

$$\mu H_f + e \frac{B_f}{\mu_0} = n_1 i_1$$

$$B_f = \mu_0 \mu_r H_f$$

$$\Rightarrow B_f = \frac{\mu_0 n_1 i_1}{\frac{l}{\mu_r} + e} \approx \frac{\mu_0 n_1 i_1}{e}$$

~~On~~ On reconnaît une bobine mais sur une distance  $e$

Conclusion: Ouvrir sur les transformateurs et moteurs.

## Remarques

- Champs lissés : Echelle
- $H$  est relié à ce qu'on contrôle (courant bobines)
- Pour un  $H$  donné est-ce que le matériau répond fortement?  
 $\Pi(H) \Rightarrow$  Effet en fonction de la cause.  
 $\Rightarrow$  Cas non linéaire accessible par l'expérience.

•  $\vec{\Pi}(\vec{r}) = \underbrace{\chi_m}_{\text{Tenseur}} \vec{H}(\vec{r})$   
Tenseur : On considère un milieu homogène  $\Rightarrow$  Ne dépend pas de  $r$

•  $B = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m \vec{H}$

• Solide cristallin monocristal.



$$\vec{\Pi} = \begin{pmatrix} \chi_1 & 0 & 0 \\ 0 & \chi_2 & 0 \\ 0 & 0 & \chi_3 \end{pmatrix} \vec{H}$$

↑  
Axe propres

Pour un système polycristallin  $\chi_m = \chi \hat{1}$

• Pourquoi fer dur ou doux? Alliages  $\neq$ .