

MP16: Milieux Magnétiques

1

Bibliographie: - Quaresima IV, Electricité

- Quaresima III, Thermo

- Garing, Milieux magnétiques p41 (Fellz)

- Précis Brial, PSI, Electrorecherche p58 (transfo)

Rapports de jury:

2010: "Ne pas se limiter aux ferromagnétiques. L'étude exhaustive du transformateur est marginale dans ce montage"

2007: "Il faut pouvoir justifier la forme des pièces polaires de l'électro-aimant choisi et les OdG correspondants"

INTRODUCTION

Il existe certains matériaux qui possèdent des propriétés magnétiques, avec différentes natures et différents intensités dans leur comportement.

De façon générale, si on excite un milieu magnétique avec un champ $\vec{H}$, il a une aimantation en réponse $\vec{M}$.

Alors, le champ magnétique $\vec{B}$ vaut $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$

Pour les matériaux LHM, $\vec{M} = \chi \vec{H}$

χ : susceptibilité mag.

Il existe différentes sortes de magnétisme:

• Diamagnétisme: substance avec des atomes non magnétiques

→ aimantation très faible due à l'induction des électrons [2]
 $\chi_d < 0, |\chi_d| \approx 10^{-5}$

• Paramagnétisme: substance avec des atomes portant des moments magnétiques
 $\chi_p > 0, \chi_p \approx 10^{-3}$

• Ferromagnétisme: substance avec des atomes portant des moments magnétiques et avec des interactions entre moments.
 $\chi_f > 0, \chi_f \approx 10^2 \rightarrow 10^6$

(I) Dia et para-magnétisme

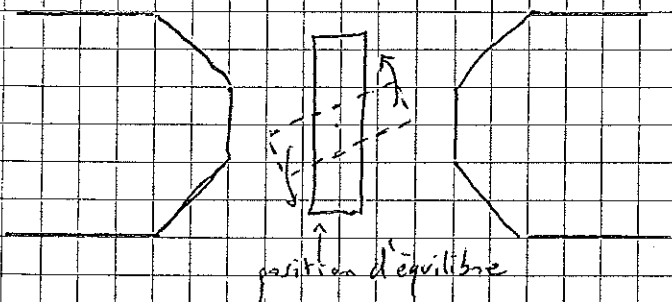
(A) Mise en évidence qualitative

Avec la flexcam, on voit le comportement de milieux dia-para dans l'entrefer d'un électroaimant.

Dia (Bismuth):

$$\chi_d < 0$$

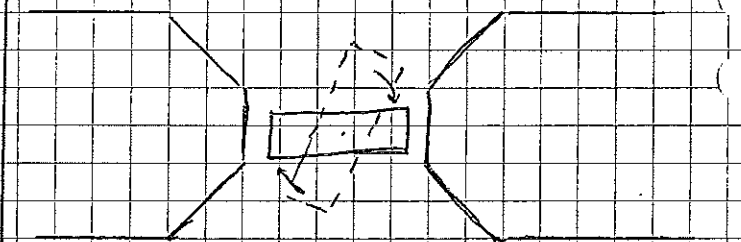
"Il fuit les champs forts"



Para (Aluminium):

$$\chi_p > 0$$

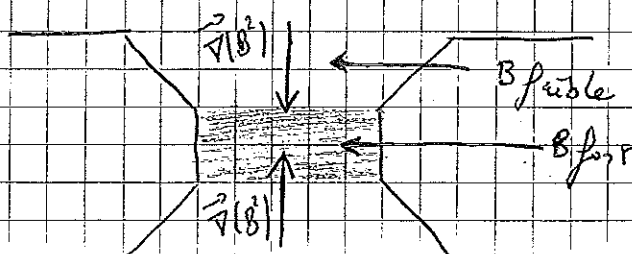
"Il aime les champs forts"



POURQUOI?

$$|\chi| \ll 1 \Rightarrow \vec{H} \approx \chi \vec{B}_0$$

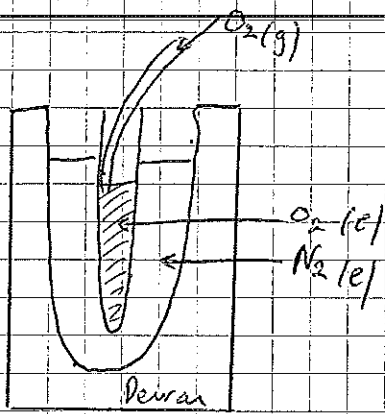
$$\text{Force volumique } \vec{f}_v = (\vec{H} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B}_0 \approx \frac{\chi}{2\mu_0} \vec{\nabla} (B_0^2)$$



Rq: l'at a un caractère diamagnétique négligeable

Allons plus loin! Et pour un liquide?

3

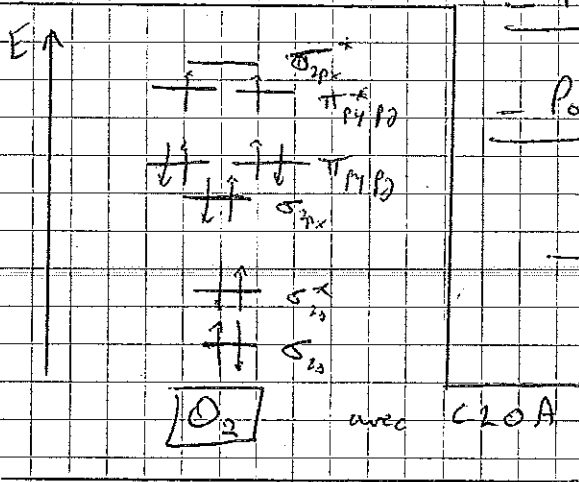


Si on fait couler un liquide entre les pôles francobanques de l'électroaimant ($\vec{V}(B^2) \oplus \text{gd!}$) ou qu'on utilise une pièce avec 2 aimants face à face:

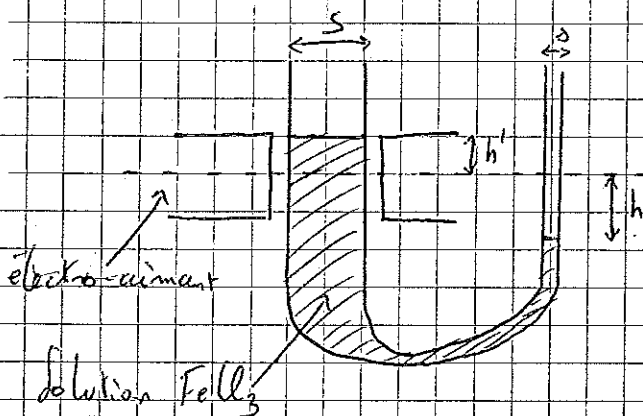
- Pour $N_2(l)$: avec ou sans $\vec{B}$, il s'écoule

- Pour $O_2(l)$: avec $\vec{B}$, il se forme un pont si on coupe $\vec{B}$, le pont s'écroule

→ O_2 attiré par les champs forts B (et paramagn)



(B) Mesure d'une susceptibilité paramagnétique

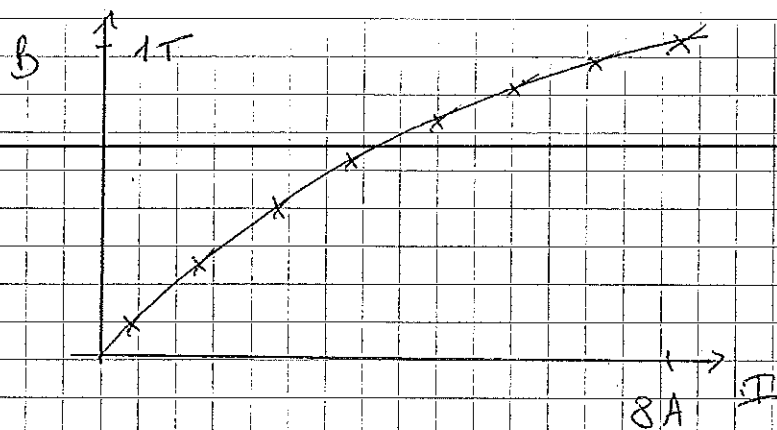


Principe : On place un des deux bouts du tube en U dans l'électroaimant et on observe une chute de liquide à l'opposé

$$h = \frac{\chi B^2}{2\rho g \left(1 + \frac{s}{S}\right)}$$

(A) Etaloner l'électroaimant

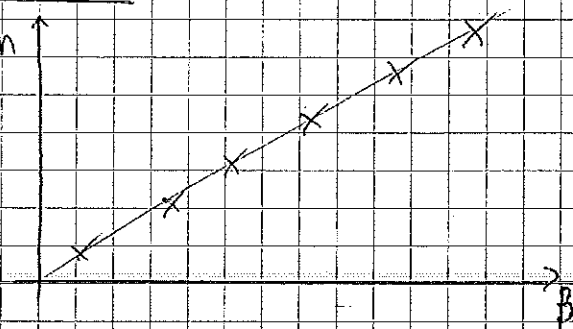
Avec une sonde à effet Hall on trace $B = f(I)$, où I est le courant qui traverse l'électroaimant.



4

② Mesurer (montrer à la flex. cam, avec le papier millimétré) la hauteur h pour différents courants I .

On en déduit $h = f(B)$
 fit linéaire $B = \frac{B^2}{2\mu_0 \rho g (1 + \frac{d}{S})}$



$\Rightarrow \chi = \pm$ (pour la solution)

On $\chi_{FeCl_3} = \frac{\rho_{FeCl_3}}{\rho_{solution}} \cdot \frac{1}{\chi_{marque}} \chi = \pm$

$$\chi_{FeCl_3}^{ratable} = 3,3 \cdot 10^{-3}$$

Justification : loi d'additivité de Wiedemann (non invariant des ρ)

$$\frac{m}{\rho} \chi = \underbrace{\frac{m_{FeCl_3}}{\rho_{FeCl_3}} \chi_{FeCl_3}}_{①} + \underbrace{\frac{m_{eau}}{\rho_{eau}} \chi_{eau}}_{②}$$

$$\text{On } \chi_{eau} = -9 \cdot 10^{-6}$$

$$\rho_{eau} = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\chi_{FeCl_3} = 3,3 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho_{FeCl_3} = 2900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\chi = \frac{m_{FeCl_3}}{m_{totale}} = 20\%$$

$$\Rightarrow \frac{②}{①} \approx 10^{-2} \ll 1$$

⚠ Solution : 20% en masse de $FeCl_3$ car $\rho_{solution} = 1380 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

[5]

Justification de la loi : Hydrostatique : $-\vec{\nabla} + \rho \vec{g} + \frac{\chi}{2\rho_0} \vec{\nabla}(B^2) = 0$

D'où : $\vec{\nabla} \left(\frac{\chi B^2}{2\rho_0} - P - \rho g z \right) = 0$

D'où : $P = \frac{\chi B^2}{2\rho_0} - \rho g z + \text{cte.}$

Egalité des pressions des deux côtés du tube : $\frac{\chi B^2}{2\rho_0} - \rho g h' = + \rho g h$
et $h' = h$

$$\Rightarrow \boxed{h = \frac{\chi B^2}{2\rho_0 \rho g \left(1 + \frac{\chi}{5}\right)}}$$

Discussion du résultat : la capillarité joue un rôle non négligeable ici : selon si $B \downarrow$ ou si $B \uparrow$, on a un ménisque qui se relève  $\rightarrow$  $\Rightarrow$ Hydrénésis
 $\Rightarrow$ Rafofen le tube pour lire h

• On trouve χ_{FeCl_3} à un facteur 10 près
 $\rightarrow$ la solution est bien caractérisée, donc ... ???

[Rq] Le paramagnétisme varie avec T
si $T \uparrow$, $\chi \downarrow$ et donc $h \downarrow$

II Ferromagnétisme

A Mise en évidence qualitative

Un morceau de fer = ferromagnétique

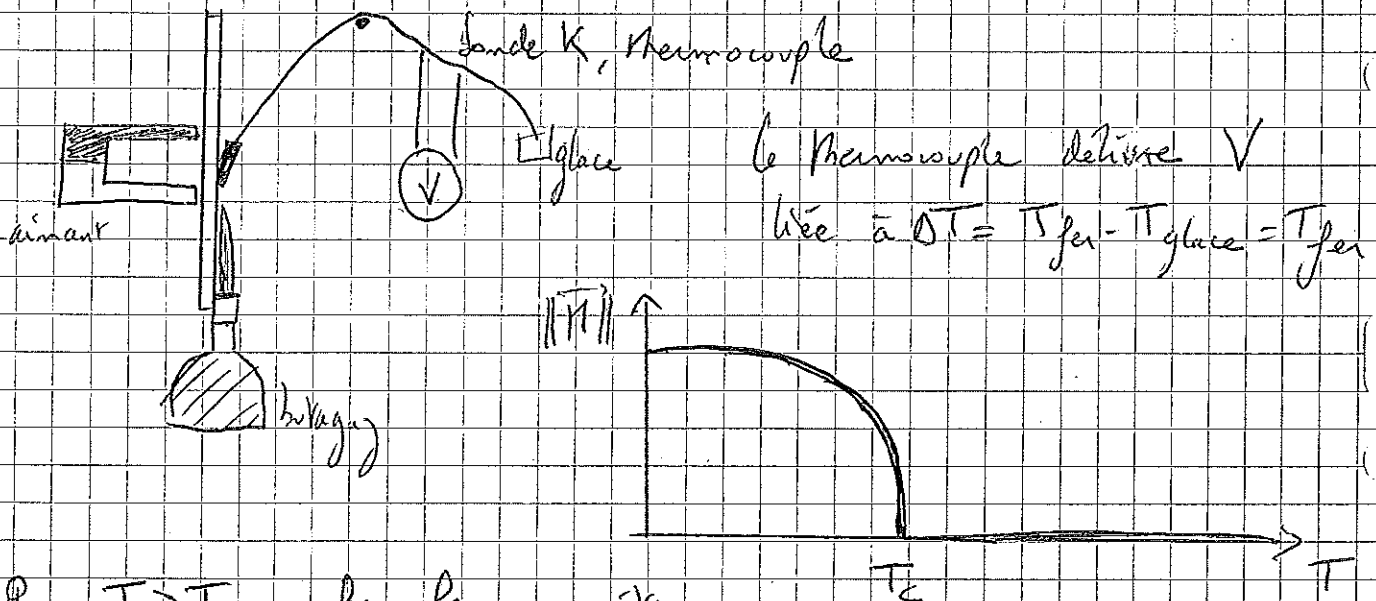
Si on l'approche de l'électro-aimant, il s'y colle violemment!

⇒ Effet beaucoup plus fort!

Bien oui: $\chi_{\text{ferro}} \approx 10^3 \rightarrow 10^6 \gg \chi_{\text{para-dia}}$

B Transition ferro-para.

Le ferromagnétisme est un comportement qui disparaît au-delà d'une certaine température T_c (c comme critique, ou comme Curie?)



Pour $T > T_c$, fer paramagnétique
avec χ grand (domaines de Weiss avec $\vec{\mu} \uparrow \uparrow \uparrow$ ou $\downarrow \downarrow \downarrow$)

Pour $T < T_c$, fer paramagnétique ($\vec{\mu}$ désordonnés) χ plus petit

⇒ On chauffe jusqu'à voir le bout de fer qui lâche

et note $V_c =$ $\pm$

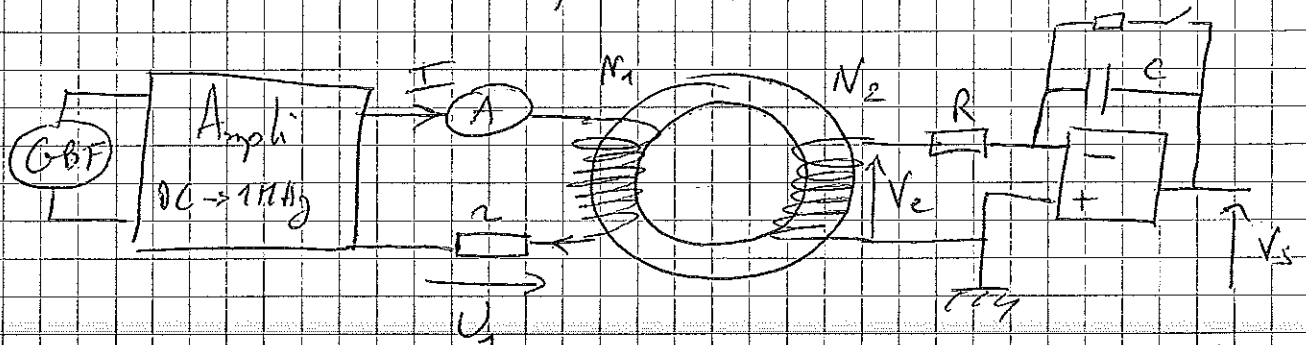
Donc $T_c =$ $\pm$

$T_c^{\text{Fe}} = 770^\circ\text{C}$

en utilisant les tables $^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{V}$ pour les sondes K⁷

($\triangle$ Utiliser les tables ou le graphe et pas la relation linéaire $40 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)

(C) Une application du phénoménisme : le transformateur



r : rhéostat ($\sim 10-30 \Omega$)

$R = 1, 10$ ou $100 \text{ k}\Omega$

$C = 1 \mu\text{F}$

Principe: on envoie un courant I dans le primaire, et on observe la réponse du matériau (cœur μ) au secondaire

$$H = N_1 \frac{I}{l} = \boxed{N_1 \frac{U_1}{n l} = H} \quad l: \text{longueur du tore} \quad l = \pi \phi = 16,3 \text{ cm}$$

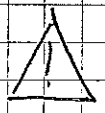
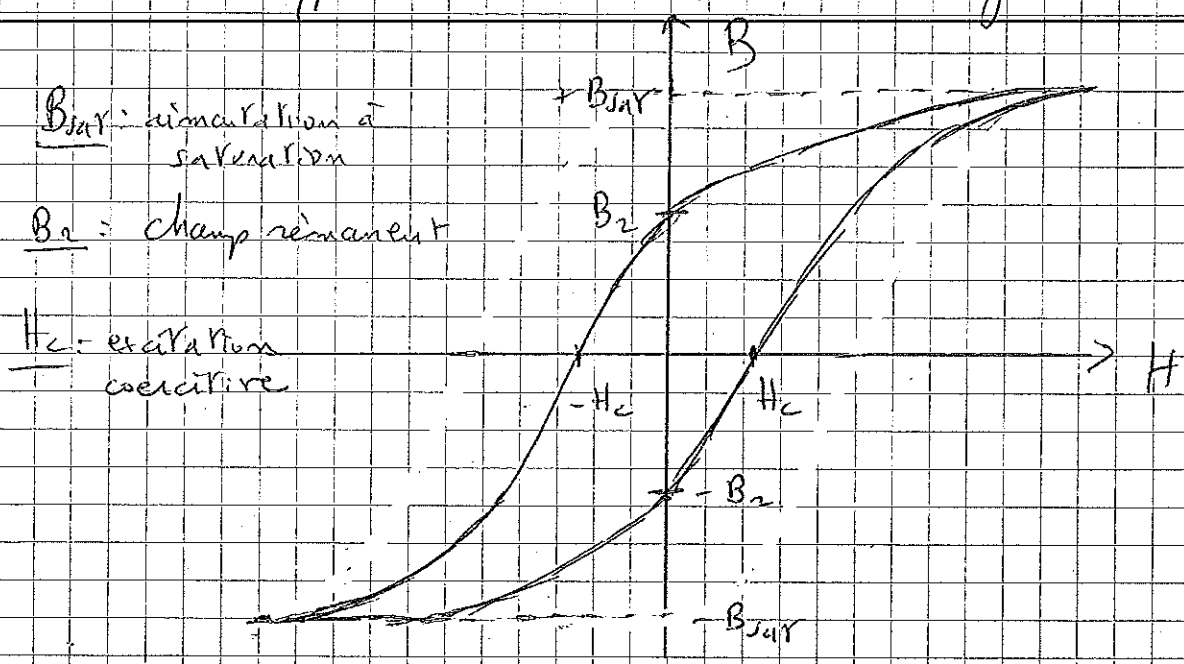
$$V_c = \frac{-d\phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad V_s = \frac{-1}{RC} \int_0^t V_c dt'$$

$$\Rightarrow \boxed{B = \frac{RC}{N_2 S} V_s}$$

$$S = \text{section du tore} \\ = (12 \text{ mm})^2 \\ = 144 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

On trace $B = f(H)$ (ia) Réponse = $f(\text{Excitation})$

Selon le type de matériau, ça varie, mais globalement, on a



On doit travailler à des fréquences au delà de la fréquence de coupure de l'intégrateur : ici $0,1 \text{ Hz}$ ou f_c donnée

par $\pi_{gain, su}(A\Omega) = \text{cte} = G_0 f_0 = G f_c$

et $f_c \ll 0,1 \text{ Hz}$

Pour ne pas s'embêter avec l'offset de l'AO $\rightarrow$ boîtier pour faire

Matériau utilisé :

• Fer doux (pva) : peu de pertes par hystérésis, difficile à saturer, (dés)aimantation facile

• Fer dur (avec C) : B_r grand $\rightarrow$ aimant permanent. Grandes pertes hystérésis

• Ferrimagnétiques : isolant électrique donc pas de courants de Foucault, donc cycle indépendant de la fréquence de travail.

Fer doux

$$B_r =$$

$$B_{sat} =$$

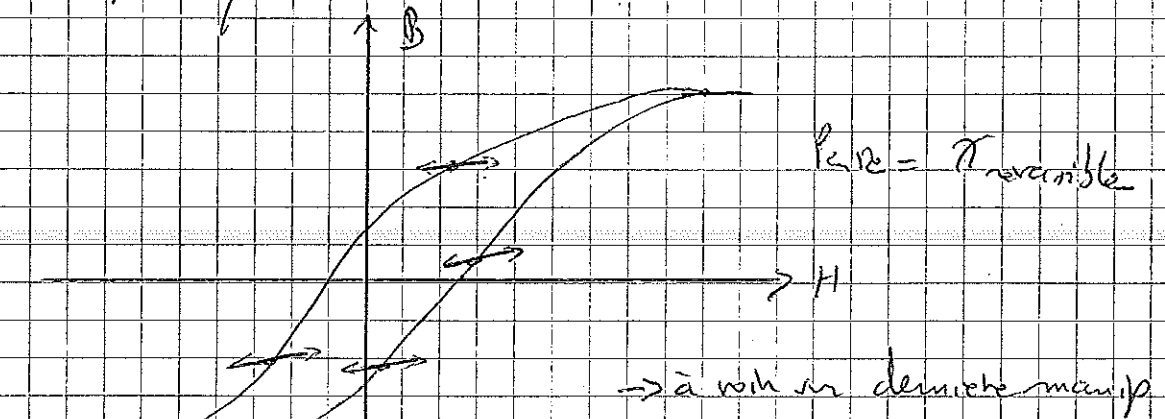
$$H_c =$$

$$P_{\text{cycle}} = \frac{V_{\text{core}}}{T} \int_0^T H(t) dB(t) \quad [9]$$

ODG: $B_r \sim 1T$
 $H_c \sim 12 A/m$

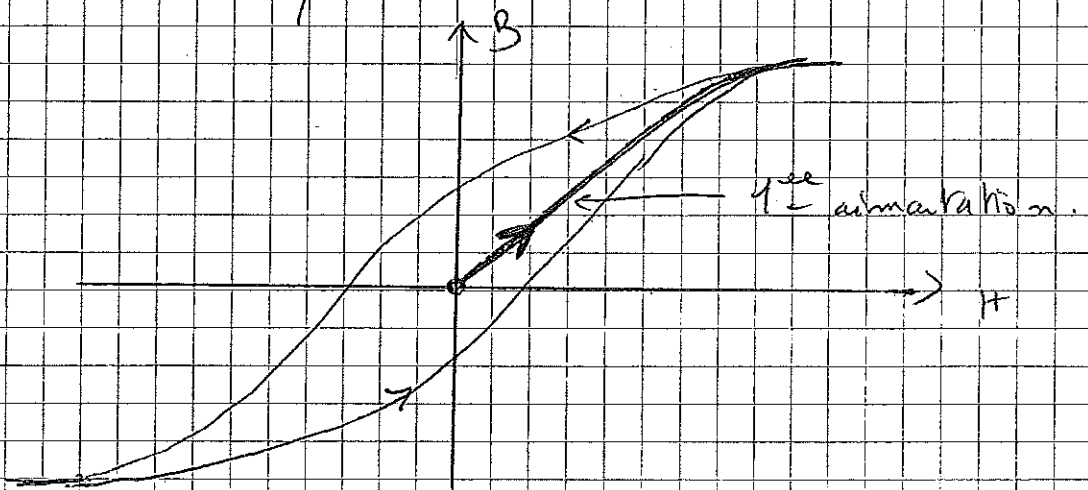
- Forme et aire du cycle différents si on augmente la fréquence $\rightarrow$ Courant de Foucault.

- On observe une rémanence de l'aimantation pour les champs de faibles variations : au GBF, $\sim 20mV + DC$



- Désaimantation : on réduit l'amplitude des oscillations petit à petit, jusqu'à être au point 0.
 $\rightarrow$ Aimantation quasi-nulle.

Puis 1^{ère} aimantation : augmenter l'effet du GBF jusqu'à la saturation, puis faire des aller-retour $\rightarrow$ on retombe sur l'hystérésis



Fer dur

$$\bullet B_r =$$

[10]

On a: $B_r \approx 1,9 T$

$$B_{sat} =$$

$$H_c = 5,5 kA/m$$

$$H_c =$$

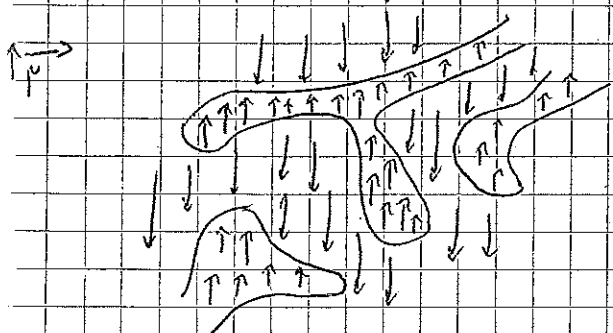
$$P_{hyr} = \frac{V_{core}}{T} \int_0^T H(H) dB(H)$$

On voit que le matériau est plus difficile à désaimanter
→ plus de pertes

Conclusion: Pour un transformateur, on électroaimant, un relais, mieux vaut utiliser du fer doux: - moins de pertes
- plus facile à aimanter

① Echelle microscopique: Domaines de Weiss

Observation au microscope polarisé des domaines de Weiss dans un grand ferromagnétique.

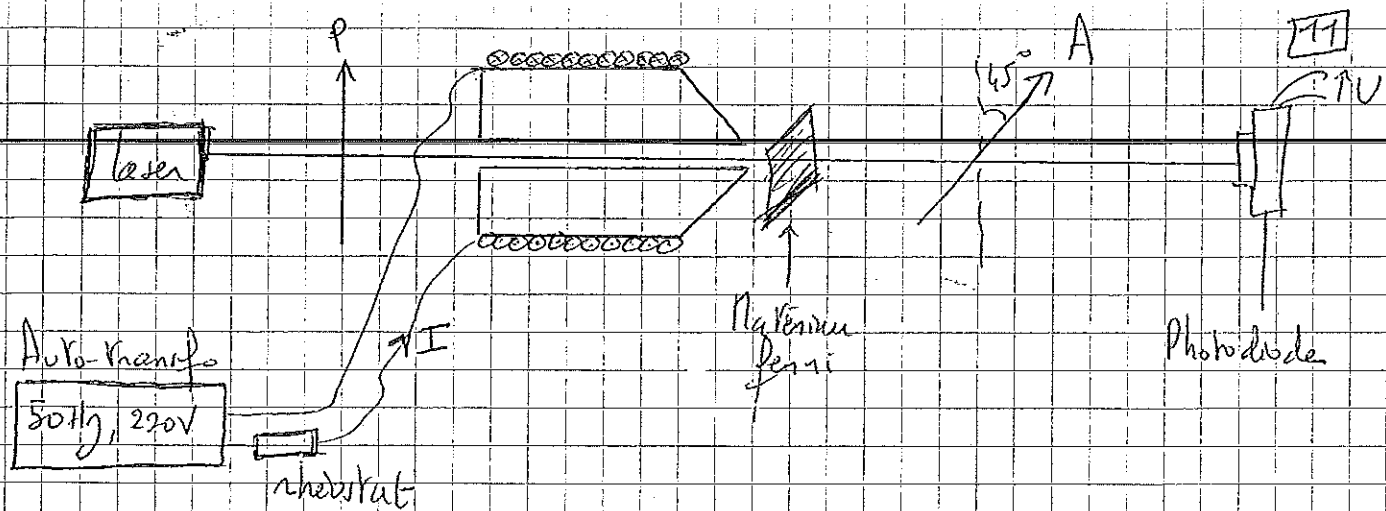


• Si on approche un aimant, on voit les domaines se déformer, puis disparaître jusqu'à la saturation. On peut saturer ↑↑ ou ↓↓.

→ On retrouve la saturation avec des domaines variables

• Si on approche / éloigne l'aimant, on voit que c'est très proche de la saturation.

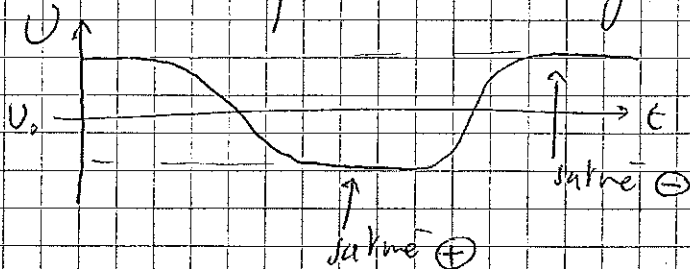
• On peut venir d'observer la saturation du matériau grâce à l'effet Faraday



- On mesure l'intensité qui traverse la bobine. On peut faire un étalonnage $H = f(I)$ pour connaître le champ B correspondant ($\approx$ linéaire)

$$I = \alpha H$$

- On mesure la ddp à la photodiode: par effet Faraday, le matériau ferri va faire tourner la polarisation et on va donc avoir un signal $\oplus$ ou $\ominus$ fort à la photodiode



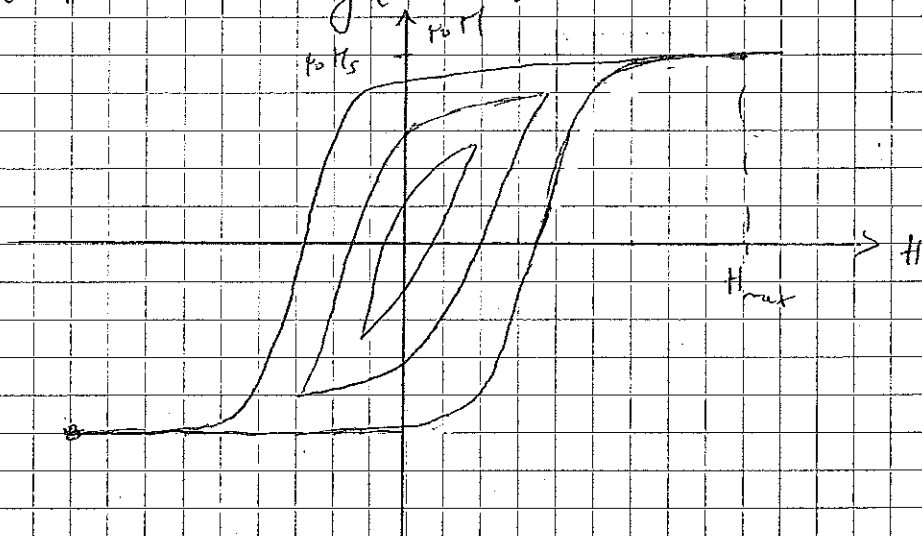
On est en dehors de la loi de Verdet ($\alpha \propto B$) car on va jusqu'à la saturation du milieu $\uparrow\uparrow$ ou $\downarrow\downarrow$.

On a placé Potentiomètre et Analyseur à la 5^e pour avoir un régime linéaire

$$D5i \quad U = \alpha' B + U_0$$

On peut trouver α' si on connaît la valeur (ρ, H_{sat}, H) du matériau qui correspondra à la tension maximale mesurée

A ces constantes près, on peut donc remarquer avec
 $U = U_0 = f(I) \approx B = f(H) \approx \mu_0 H$



ODG : $\begin{cases} H_{\max} = 3000 \text{ A/m} \\ \mu_0 H_s \approx 2,014 \text{ T} \end{cases}$

On retrouve l'hystérésis observé tout à l'heure!

CONCLUSION

On a vu différents types de magnétisme $\begin{cases} \text{dia, para: "faibles"} \\ \text{ferr: "forts"} \end{cases}$

- Recherche actuelle $\rightarrow$ Effet Meissner (paramagnétisme parfait)
 (ie) supraconductivité : exclusion de tout champ B

- Applications: ferromagnétique très utilisée
 $\rightarrow$ électroaimant : industrie
 $\rightarrow$ relais & transfo: dans tous nos appareils élec