

①

APPROCHE MACRO

FERROMAGNETISME

Introduction:

En cours de magnétisme dans la matière, on a introduit \vec{H} l'excitation magnétique et \vec{M} l'aimantation. On a vu deux comportements

différents: le dia et le para. Tous deux avaient des susceptibilités mag faibles ($|\chi_m| < 10^{-3}$) ~~mais~~ ^{et} donnaient lieu à des réponses linéaires. 3^e

famille avec effets + spectaculaires: les ferromag.

Ce sont eux qu'on retrouve aimant perm, transformateurs, disques durs. Leur réponse est non linéaire, grande

amplitude $\chi_m \sim 10^2$ à 10^6 et avec effet de mémoire

\vec{M} dépend de l'histoire du matériau.

Objectif de cette leçon: caractériser macroscopiquement ces matériaux et montrer qu'on peut introduire

2 familles aux applications radicalement différentes

ferro doux et durs et les 1^{ères} propriétés essentielles de canalisation des lignes

I - Réponse magnétique d'un ferromagnétique

②

A) Rappels et cadre

$$T \text{ (kg} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}\text{)}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{\pi}) \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\text{ou } T \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2}$$

$\vec{\pi}$: aimantation

(moment magnétique par
unité de volume A/m)

\vec{H} : excitation magnétique (imposée par expérimentateur
via Feuille).

Dans LHI $\vec{\pi} = \chi_m \vec{H}$ et $\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$
 $\chi_m = \text{cte}$ avec $\mu_r(\vec{H})$.

Dans ferro χ_m dépend de \vec{H} et
de l'histoire magnétique du matériau donc on ne peut
pas écrire $\vec{\pi} = \chi_m \vec{H}$ avec $\chi_m = \text{cte}$! C'est la difficulté
et richesse des ferros.

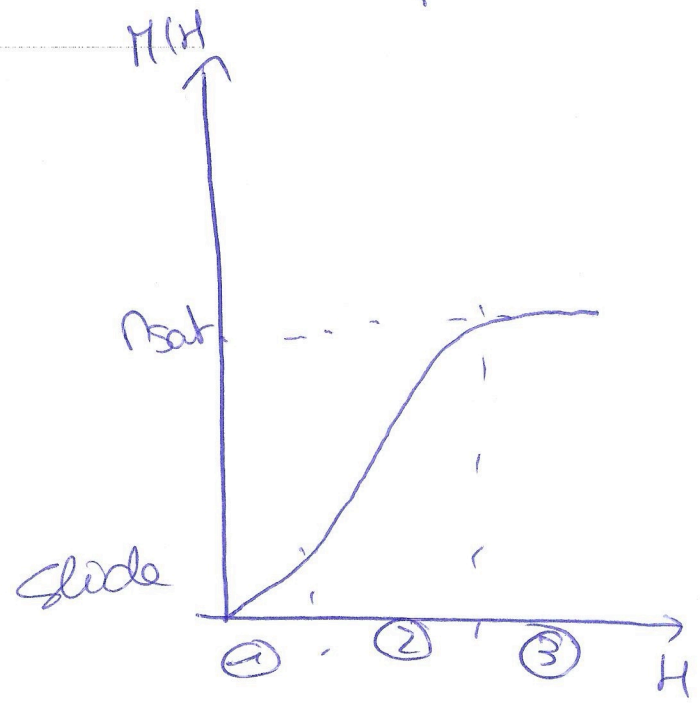
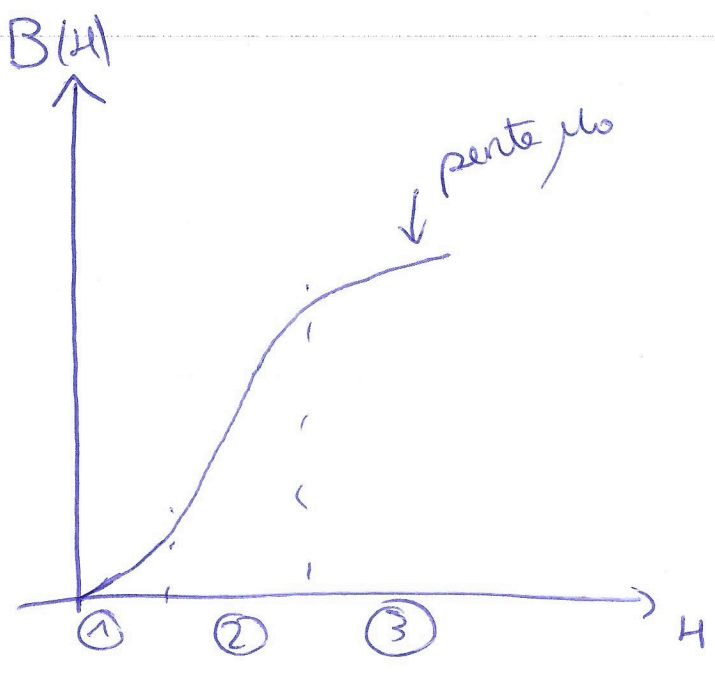
Exemples ferros : Fe, Co, Ni (métaux de transition avec
couche 3d incomplète) + de nos jours terres rares

~~NdFeB, SmCo~~ (couche 4f incomplète). Ce sont tous des
solides

B) Courbe de 1^{ère} aimantation

~~On part~~ On veut établir la relation $\pi(H)$ ou de
manière équivalente $B(H)$. On part d'un matériau
désaimanté. On augmente H (tore + bobine $\rightarrow I$)
et on trace π ou B .

ça s'appelle courbe de 1^{er} aimantation,



3 zones: pour les comprendre domaines de Weiss. A l'échelle méso (0,1 - 1μm)

un ferromagnétique composé de domaines de W: des régions dans lesquelles les $\vec{\mu}_m$ sont alignés mais dont les orientations diffèrent d'un domaine à l'autre. Avec $\vec{B}_{ext} = \vec{0}$, ces orientations se compensent et \vec{M} macroscopique = 0.

- 3 zones:
- ① linéaire ^{croissance} faible, réversible: domaines alignés avec \vec{H} grossissent légèrement par cisaillement de façon réversible,
 - ② croissance rapide, irréversible défauts cristallins
 - ③ Saturation: plus de domaines tous les moments mag sont alignés avec \vec{H} .
- $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{H}_{sat}$ droite de pente μ_0 .

ODG \mathcal{N}_{sat} ?

A saturation tous les $\vec{\mu}_m$ sont alignés. Chaque atome contribue pour quelques μ_B

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} \approx 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2$$

$$\mathcal{N}_{sat} \sim n \mu_B \quad \text{avec } n \sim 10^{29} \text{ m}^{-3}$$

$$\text{donc } \mathcal{N}_{sat} \sim 10^6 \text{ A/m et } \mu_0 \mathcal{N}_{sat} \sim 1 \text{ T}$$

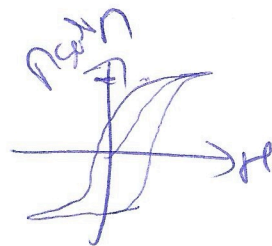
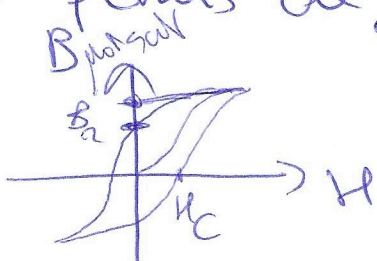
Même ODG pour tous solides cristallins ferreux

On peut se vérifier sur des valeurs tabulées et un expé juste après.

Matériau	\mathcal{N}_{sat} (A/m)	$\mu_0 \mathcal{N}_{sat}$ (T)
Fe	$1,71 \cdot 10^6$	2,14
Co	$1,42 \cdot 10^6$	1,76
Nickel	$0,48 \cdot 10^6$	0,6

Cycle d'hystérésis et grandeurs caract

Ar que se passe-t-il si à saturation, on diminue H ?
B ne repasse pas par valeurs qu'à l'aller \rightarrow hystérésis.
c'est la conséquence de l'irréversibilité du déplacement du parois de zone 2.



slide

Plein de grandes caractéristiques sur cycle.

5

B_n : champ rémanent
ce qu'il reste à $\vec{H} = \vec{0}$

H_G : excitation coercitive
ce qu'il faut pour $\vec{B} = 0$

N_{sat} : aimanté à saturation

Vérif expé?

DJ Namip Traçé expé du cycle.

Schéma slide, ou autre feuille.

torre en Fe Si

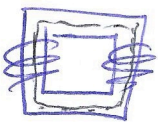
Sur V_x $V_x = R I_1$

Théorème d'Ampère pour \vec{H} pour se débarrasser de $\vec{J}_{e\text{xt}}$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{\text{enlacé}}$$

$$= N_1 I_1 + N_2 I_2$$

négligeable car $R' \gg R$.



$H L$

H_{courant}

car BS connue et $\frac{1}{\mu S}$ réactance aisé

$$\text{donc } H = \frac{N_1}{RL} V_x$$

Sur V_y

$$N_2 = - \frac{d\phi}{dt} = - N_2 S \frac{dB}{dt}$$

~~$$V_y = R' I_2 + V_y$$~~

~~$$V_y = R' I_2 - N_2 S \frac{dB}{dt}$$~~

$$V_y = \int \frac{I_2}{c} dt = \frac{1}{c} \int \frac{N_2}{R'} dt = -\frac{1}{R'C} m_2 S B \quad (6)$$

d'où $B = -\frac{R'C}{m_2 S} V_y$

$$V_y = f(V_x) \quad \& \quad B = g(H) !$$

On affiche le cycle et on pointe B_r, H_c , zone saturation

On mesure H_c, B_r et $\mu_0 N_{sat}$:

Script python conversion + graphe.

On compare à l'ODA 10^6 pour N_{sat} (saturation pas atteinte) et zone pour H_c et B_r

↳ (entrefer) complet pour ~ 200 par H.

② 2 familles

D'après H_c , deux familles doux vs dur.

doux $H_c \leq 1000$ A/m vs dur. $H_c > 1000$ A/m.

cycle étroit faible air

large.

slide

μ_r très grand, approx linéaire possible

pas pertinent.

Application: Transf électromagnétique

Aiments permanents

↓
Canalisation cham.

tenues rare $H_c \sim 10^6$ très bon airak



ici R_f Curie & $\mu \gg 1$ vert.

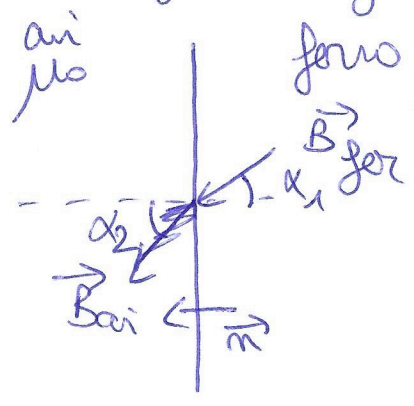
Canalisation ligne de champ car $\mu_r \gg 1$?

II - Canalisation du champ et circuit magnétique

A) Canalisation des lignes de champ.

ferro doux dans zone linéaire $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$ avec $\mu_r \gg 1$.

Interface ferro/air.



Relation de passage pour ligne et surface

$$\vec{n} \cdot (\vec{H}_{\text{air}} - \vec{H}_{\text{fer}}) = \vec{j}_s = \vec{0}$$

donc $H_{\text{air}}^t = H_{\text{fer}}^t$.

de plus $\vec{B} = \mu \vec{H}$ donc

$$B_{\text{fer}}^t = \mu_r H_{\text{fer}}^t \quad B_{\text{air}}^t = \mu_0 H_{\text{air}}^t$$

Donc $\frac{B_{\text{fer}}^t}{B_{\text{air}}^t} = \mu_r \gg 1$ et $B_{\text{air}}^m = \mu_r B_{\text{fer}}^m$.

$$\tan \alpha_f = \frac{B_{\text{fer}}^t}{B_{\text{fer}}^m} = \mu_r \frac{B_{\text{air}}^t}{B_{\text{air}}^m} = \mu_r \tan \alpha_{\text{air}}$$

Si fuite $\tan \alpha_{\text{air}} \neq 0$ et $\mu_r \gg 1$ donc $\tan \alpha_f \gg 1$

$\alpha_f \approx 90^\circ$ Ainsi $B_{\text{fer}}^t \gg B_{\text{fer}}^m \Rightarrow$ canalisation
 + B_{air} petit car $m = j_n$ petit et $t \mu_r \rightarrow$ peu de fuite.

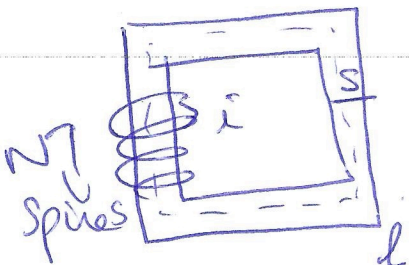
\Rightarrow fil pour $\vec{B} \rightarrow$ circuit magnétique.

Re : que ferons nous,

(8)

pour dans saturer $\frac{dB}{dH} = 0$ donc $\frac{dB}{dH} \sim \mu_0 \rightarrow$ vide!

B) Circuit magnétique : le tore



$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

(Ampere pour H.

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = N i$$

déjà fait mais on comprend en canalisation

$$H = \frac{N i}{l}$$

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N i}{l}$$

$$\Phi_{tot} = N B S = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l} i \quad i = L i$$

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

Inductance multipliée par $l \mu_r$!! Soit de petits i et N !
Fondamental transfo + électronique de puissance.

C) Application : électroaimant

(slide)

Que se passe-t-il si on coupe le tore pour y insérer un entrefer? Parce qu'ici B confiné, si on veut l'utiliser pour du circuit, on fait comment? Electroaimant.

Calculons \vec{B} dans entrefer.

$$\text{div } \vec{B} = 0 \text{ et surface constante} \rightarrow B_{entrefer} = B_{fer} = B$$

$$\text{Ampere } H_{fer} l + H_e e = N i$$

$$H_{fer} = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} \text{ et } H_e = \frac{B}{\mu_0} \text{ d'où } B \left(\frac{l}{\mu_0 \mu_r} + \frac{e}{\mu_0} \right) = N i$$

Soit $B = \frac{\mu_0 N i}{e + l_{jn}} \sim \frac{\mu_0 N i}{e}$

contrôlable avec i !
 intérêt par rapport à deux autres
 pour $B \gg 1T$ mais fixe.
 $\rightarrow B \approx 0,1T$.

ODG $N \sim 1000$, $e \sim 1cm$, $i \sim 1A$

Ré Reluctance $\frac{Ni}{U} = \frac{A \phi}{R I}$ $R = \int \frac{dl}{\mu S}$

$R_{fer} = \frac{l}{\mu_{0\mu N} S}$ $R_e = \frac{e}{\mu_0 S} \gg R_{fer}$

$\frac{1}{N}$: Nos travaux deux

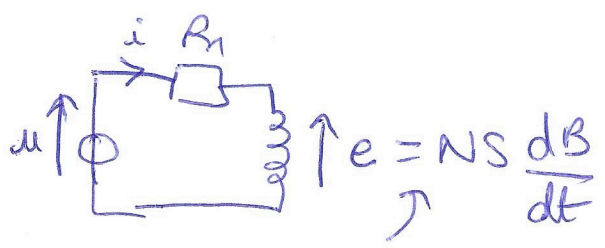
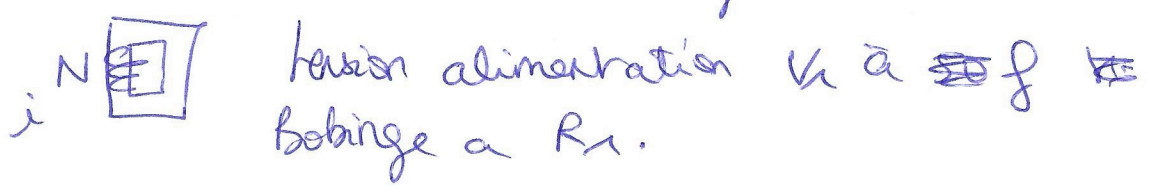
Soit au cœur de l'électrotechnique.

Si générateur à 50Hz, le ferro parcourt le cycle 50 fois/s.
 Le cycle a une aie non nulle : chemin aller & retour
 comme on l'a vu en fluo \rightarrow énergie dissipée.

III - Bilan de puissance et pertes

A) Bilan de puissance ~~sur le primaire~~
dans le

On reprend un système simple : une bobine dans



pas de \ominus la convention usuelle.

loi des mailles
 $U = R_1 i_1 + NS \frac{dB}{dt}$

puissance fournie par source $P = ui$

$P = R_1 i_1^2 + NS i_1 \frac{dB}{dt}$
 joule.

$i_1 = \frac{Hl}{N}$ donc

$$P = R_1 i^2 + \underbrace{V_{gen}}_{\text{fer}} H \frac{dB}{dt}$$

ça instantané. On moyenne sur une période.

$$\begin{aligned} \langle P \rangle &= R_1 i_{eff}^2 + \frac{V_{gen}}{T} \int_0^T H(t) \frac{dB}{dt} dt \\ &= R_1 i_{eff}^2 + \underbrace{\int V_{gen} f H dB}_{\text{pertes fer}} \end{aligned}$$

~~By Pertes fer~~

2 origines hyst + Foucault.
retournés par l'air du cycle.

~~Hysteresis~~

$$\int H dB \rightarrow \text{aire du cycle!}$$

$$\downarrow \quad \downarrow$$

$$A_{lm} \quad T$$

J/m³ énergie volumique dissipée à chaque cycle.

$$P_{hyst} = V_{gen} \times f \times A_{cycle} \quad \text{Ici}$$

$$A \sim 13,5 \text{ A} \text{ comme } \sim 340 \text{ J/m}^3.$$

$$A_{comme} = \frac{31 \times 500}{52,72 \times 48 \cdot 10^2} \times 100 \cdot 10^3 \times 102 \cdot 10^2 \cdot 5 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{102 \cdot 10^2 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{250 \times 11 \cdot 10^4}$$

$$P_{hyst} \sim 13 \text{ W} \rightarrow 2 \text{ W/kg}$$

ou oth.

$$\sim 25,2 \text{ J/m}^3$$

2 origines : Hysteresis et Foucault.
(inertabilité
d'f.

Ferrocalt:

(11)

\vec{B} variable $\rightarrow \vec{E}$ dans matériau

Si inductions \rightarrow courants induit qui dissipent par Joule.

$e \propto \frac{dB}{dt} \propto \omega$ et Joule $\propto e^2 \propto \omega^2$ parité $f \cdot l$.

Connet solutions:

feuillelage limite circulation courants.

Ajout de Si $\rightarrow \uparrow \downarrow$

ou couramment isolant: ferrites.

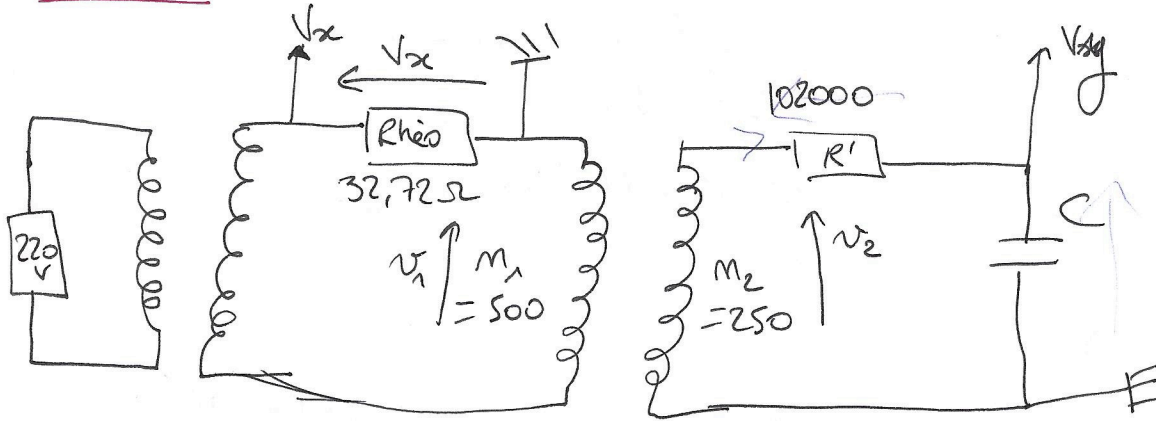
Conclusion On a caractérisé macroscopiquement ferro par cycle d'hystérésis et identifiés 2 familles deux vs deux.

Matériaux modernes tous sont révolutionnaires aimants permanents et sont fabriqués: moteurs élec ou électrom.

ouverture: Magneto résistance géante (GMR) Nobel de 2007
résistance d'un empilement de couches ferro varie selon orientation relative de \vec{n} \rightarrow lecture des disques durs.

DANIP

HAUTE RESOLUTION



$$V_x = R I_1$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{enlacé}$$

$$H \times L \sim I_1 \times m_1$$

$$I_2 \ll I_1 \quad \text{car } R' \gg R$$

$$V_x = \frac{R HL}{m_1}$$

$$R = 32,72 \pm 0,01 \Omega$$

$$m_1 = 500$$

$$L \sim 15 \times 2 + 17 \times 2 \sim 64 \text{ cm}$$

$$11 \times 2 + 13 \times 2 \sim 48 \text{ cm}$$

$$7 \times 2 + 9 \times 2 \sim 32 \text{ cm}$$

48 ± 16 cm.
50 ± 10 cm.

$$H = \frac{m_1 V_x}{RL}$$

~~$$V_y = \frac{d\phi}{dt}$$~~

$$I_2 = C \frac{dV_y}{dt}$$

$$V_2 = -\frac{d\phi}{dt} = -m_2 S \frac{dB}{dt} \left(= R' I_2 + \int \frac{I_2}{C} dt \right)$$

$$V_y = \int \frac{I_2}{C} dt = \frac{1}{C} \int \frac{V_2}{R'} dt = \frac{+1}{R'C} m_2 S B$$

$$V_y = \frac{+m_2 S}{R'C} B$$

$$B = \frac{R'C}{m_2 S} V_y$$

$$R' = 102,52 \pm 0,01 \text{ k}\Omega \quad m_2 = 250$$

$$C = 5,038 \pm 0,001 \mu\text{F}$$

~~$$S = 26 \text{ cm}^2$$~~

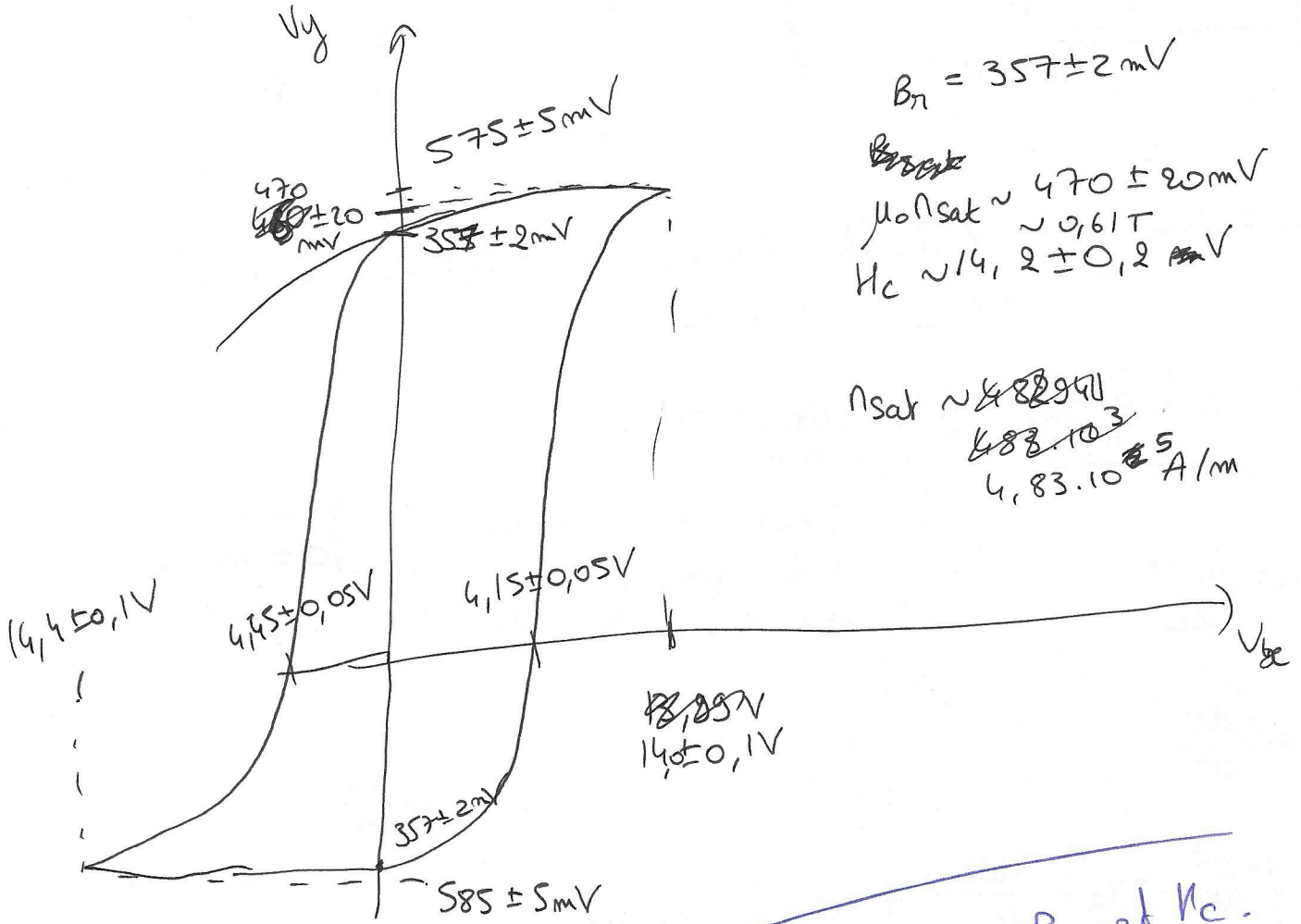
$$S = l \times L$$

$$l = 4 \pm 0,05 \text{ cm}$$

$$L = 4 \pm 0,05 \text{ cm}$$

$$S = 16 \pm 0,3 \text{ cm}^2$$

13,5 carreaux ± 1
 3,1V/div sur x
 et 200 mV/div. sur y.



$B_n = 357 \pm 2 \text{ mV}$
~~...~~
 $\mu_{\text{sat}} \sim 470 \pm 20 \text{ mV}$
 $\sim 0,61 \text{ T}$
 $K_c \sim 14,2 \pm 0,2 \text{ mV}$

$n_{\text{sat}} \sim 4,83 \cdot 10^3$
 $4,83 \cdot 10^3 \text{ A/m}$

$K_c \sim \frac{m_1 V_{\text{sat}}}{R_c} \sim 452 \text{ A/m}$

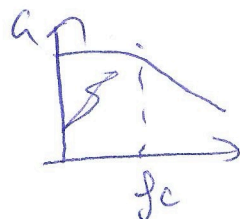
$B_n \sim 0,46 \text{ T}$

utiliser charge B_n et K_c .
 A n_1 fixe $n_1 = m_1 \frac{d\phi}{dt}$ (Faraday)
 $= m_1 S \omega B$

done $B = \frac{n_1}{m_1 S \omega}$

si $m_1 \downarrow$, $B \uparrow$, facile saturation

Bode phase $f_c = \frac{1}{2\pi R'C}$



on veut $f_s \gg f_c$

done $S\omega R'C \gg \frac{1}{2\pi R'C}$
 soit $R'C \gg \frac{1}{2\pi \times S}$

$\frac{1}{2\pi \times 50} \sim 5 \cdot 10^{-3}$
 $R'C \sim 0,55 \text{ ok!}$