

# Table des matières

---

Table des matières .....	1
I. Introduction .....	2
II. Méthodologie expérimentale .....	3
1. Appareils utilisés .....	3
2. Mesures.....	3
3. Formules générales.....	4
III. Présentation des résultats .....	7
IV. Discussion des résultats.....	7
1. Cas du tore A.....	15
2. Cas du tore B.....	16
Conclusion.....	17

# I. Introduction

---

Dans ce laboratoire nous étudierons les matériaux ferromagnétiques. Ces derniers ont une très grande importance dans les domaines de la technologie et de l'informatique, grâce à leur capacité de contenir un champ magnétique sans présence de champ magnétique externe, qu'on appelle champ rémanent. Ce champ peut servir pour stocker de l'information numérique par exemple. Ce phénomène d'aimantation nous permet d'établir un lien entre le champ magnétique extérieur et la densité de flux magnétique, grâce à la courbe d'hystérésis. Nous déterminerons dans ce laboratoire de façon expérimental le champ d'induction magnétique rémanent  $B_r$ , l'induction de saturation  $B_s$ , le champ coercitif  $H_c$ , et la puissance dissipée par hystérésis pour les deux matériaux à notre disposition, afin de mieux les identifier et de déterminer leur perméabilités.

## II. Méthodologie expérimentale

---

### 1. Appareils utilisés

Les appareils que nous utiliserons dans ce laboratoire sont les suivants :

- L'autotransformateur (0 – 120 V ; 60 Hz) pour varier la tension  $V$ .
- Le générateur AC (0 – 7V ; 2 KHz) pour l'alimentation du circuit.
- Une plaquette du circuit contenant les deux tores.
- L'oscilloscope pour l'observation des courbes d'hystérésis.

### 2. Mesures

Après avoir réglé l'oscilloscope comme mentionné dans le guide du laboratoire, nous avons relevé une dizaine mesures de  $V_1$  et de  $V_c$  (en faisant varier la tension à l'aide de l'autotransformateur dans le cas du tore A, et le générateur AC dans le cas du tore B) pour pouvoir tracer la courbe de première aimantation. Il est à noter que toutes les mesures que nous ferons devront être divisées par  $\sqrt{2}$  afin d'obtenir la valeur efficace. Après les mesures, nous avons décalqué les deux courbes d'hystérésis, que nous inclurons dans ce rapport. Par la suite nous tracerons les courbes  $V_c = f(V_1)$ . Pour la détermination des perméabilités, nous multiplierons  $V_c$  et  $V_1$  par  $K_x$  et  $K_y$  respectivement, et nous tracerons la courbe  $B = f(H)$ . La pente de cette courbe nous donnera la perméabilité du tore. Finalement, nous déterminerons expérimentalement les valeurs de  $B_s$ ,  $B_r$ , et  $H_c$  à la saturation des deux tores, pour ensuite trouver les puissances dissipées par hystérésis.

### 3. Formules générales

$$k_x = \frac{N_1}{L_1 R_1} \text{ [A/m]}$$

$$k_y = \frac{R_2 C}{N_2 A_2} \text{ [T]}$$

En ce qui concerne l'incertitude sur les résistances, on l'évalue à 5% de la valeur de R.

#### Exemple :

$R_1 = 8 \, \Omega$  à 5%

Alors

$$\Delta R_1 = \frac{R_1 \times 5}{100} = \frac{8 \times 5}{100} = 0.4 \, \Omega$$

On a donc  $R_1 = (8 \pm 0.4) \, \Omega$

Tore A :

- $N_1$  = Nombre de tours de fil = 3420
- $L_1$  = Circonférence moyenne du tore =  $(76 \pm 1) \times 10^{-3} \text{ m}$
- $R_1$  = Valeur de la résistance =  $(8 \pm 0.4) \, \Omega$
- $N_2$  = Nombre de tours de fil = 820
- $A_2$  = Aire de la surface =  $(90.25 \pm 0.05) \times 10^{-6} \text{ m}^2$
- $R_2$  = Valeur de la résistance =  $(270 \pm 13.5) \times 10^3 \, \Omega$
- $C$  = la valeur de la capacité =  $(220 \pm 11) \times 10^{-9} \text{ F}$

Tore B :

- $N_1$  = Nombre de tours de fil = 46
- $L_1$  = Circonférence moyenne du tore =  $(67.5 \pm 1) \times 10^{-3} \text{ m}$
- $R_1$  = Valeur de la résistance =  $(8 \pm 0.4) \, \Omega$
- $N_2$  = Nombre de tours de fil = 18
- $A_2$  = Aire de la surface =  $(31.85 \pm 0.05) \times 10^{-6} \text{ m}^2$
- $R_2$  = Valeur de la résistance =  $(100 \pm 5) \times 10^3 \, \Omega$
- $C$  = la valeur de la capacité =  $(15 \pm 11) \times 10^{-9} \text{ F}$

$$H = k_x * V_1$$

$$B = k_y * V_c$$

Pour Calculer l'incertitude sur les tensions mesurés par l'oscilloscope, nous utilisons la formule suivante :

$$\Delta V = 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{5} \times Echelle$$

Exemple de calcul :

$$\Delta V_1 = 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{5} \times 5 = 1 \text{ mV}$$

$\Delta V_c = 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{5} \times 200 = 40 \text{ mV}$  La formule pour calculer la puissance dissipée est :

$$P = \int_{-H_{max}}^{H_{max}} B \cdot dH$$

Nous présentons les schémas des circuits utilisés pour chacun des tores ci-dessous :

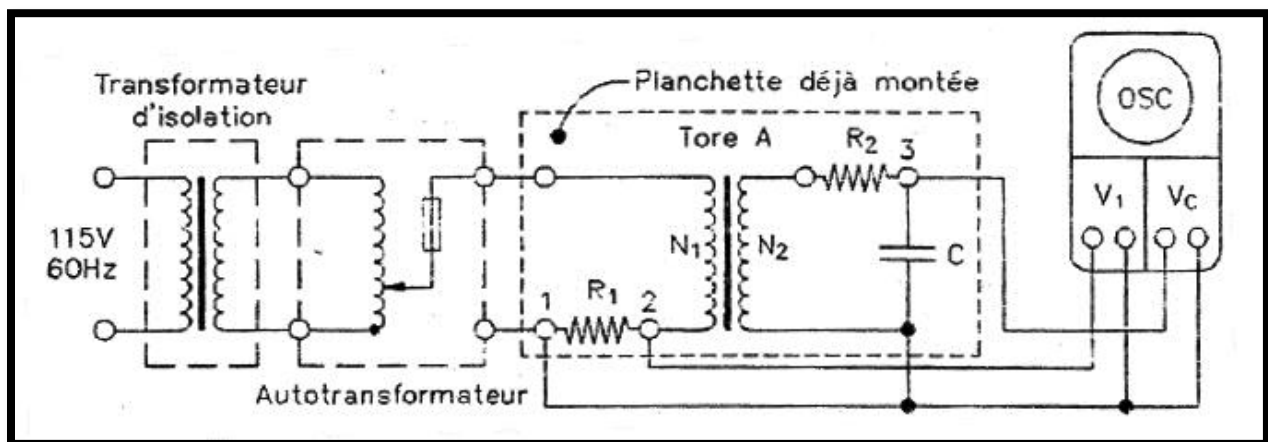


Figure I : Schéma du circuit pour les mesures du tore A (Guide du laboratoire)

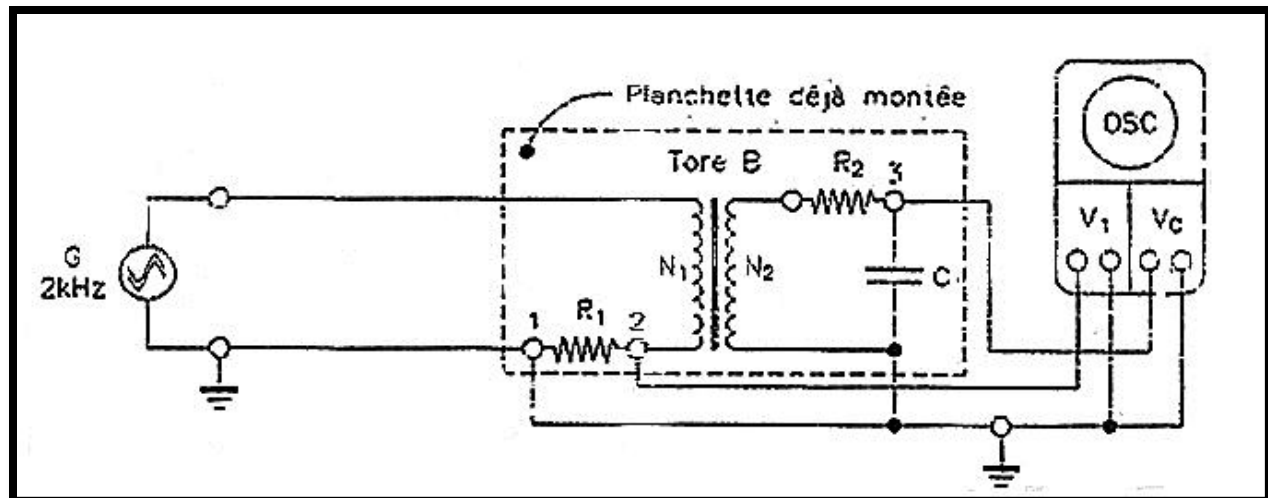


Figure II : Schéma du circuit pour les mesures du tore B (Guide du laboratoire)

## II. Présentation des résultats

### 1. Calcul des constantes $K_x$ et $K_y$ pour les tores A

Ce tableau présente les constantes  $K_x$  et  $K_y$  de chaque tore.

	$k_x$	$\Delta k_x$	$k_y$	$\Delta k_y$
<b>Tore A</b>	5625.0	355.2	0.803	0.081
<b>Tore B</b>	85.2	4.9	2.62	0.27

Tableau III.2: Tableau des constantes pour chacun des tores

L'incertitude de  $K_x$  est calculée en utilisant la méthode des dérivées partielles:

$$\Delta k_x = \left| \frac{-N1}{L1^2 \times R1} \right| \Delta L1 + \left| \frac{-N1}{R1^2 \times L1} \right| \Delta R1$$

Exemple de calcul pour le tore A :

$$\Delta k_x = \left| \frac{-3420}{0.076^2 \times 8} \right| 0.001 + \left| \frac{-3420}{8^2 \times 0.076} \right| 0.4 = 355.2$$

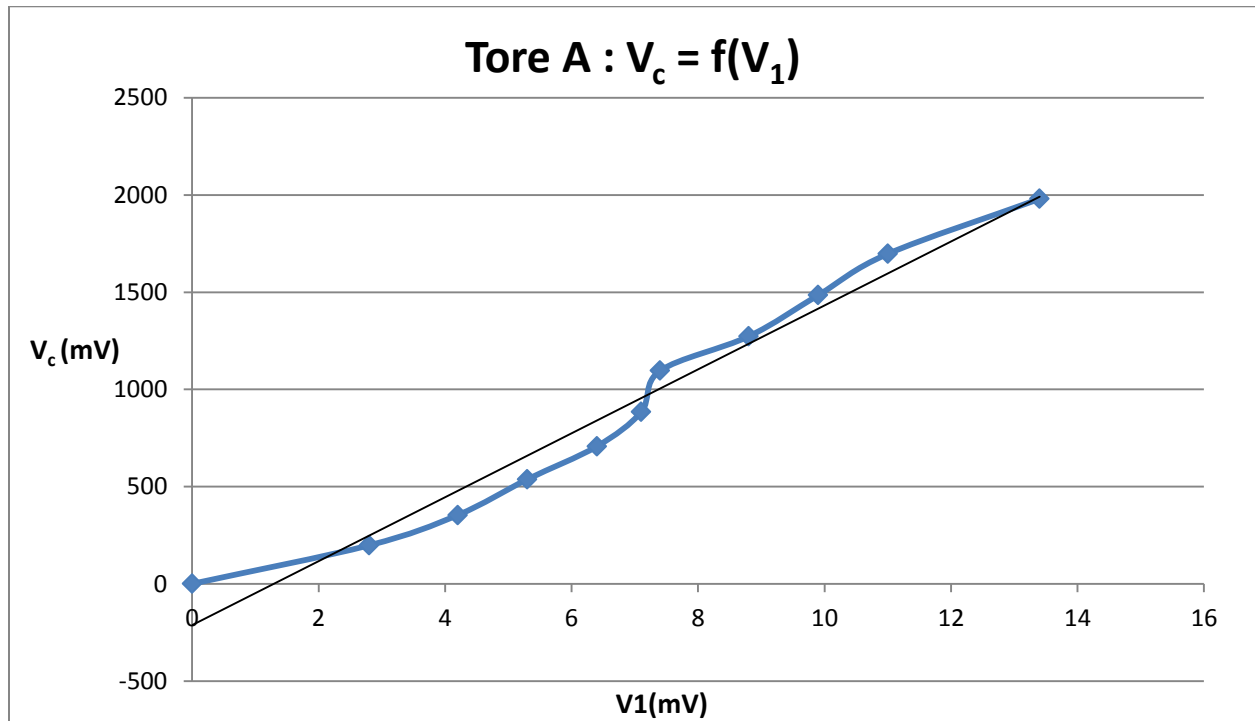
La même méthode est utilisée pour déterminer les incertitudes pour  $K_y$  et  $K_x$  pour les deux tores.

### ❖Tore A :

Pour le tore A, les résultats sont :

Tableau III.2.A : Évolution du sommet de  $V_c = f(V1)$

Nbre de div. En X (div.)	Échelle en X (mV/div)	$V_1$ (mV)	$\Delta V_1$ (mV)	Nbre de div. En Y (div.)	Échelle Y (mV/div)	$V_c$ (mV)	$\Delta V_c$ (mV)
<b>0</b>	<b>5</b>	<b>0</b>		<b>0</b>	<b>200</b>	<b>0</b>	
<b>0.8</b>	<b>5</b>	<b>2.8</b>	<b>±2.0</b>	<b>1.4</b>	<b>200</b>	<b>198.0</b>	<b>±40.0</b>
<b>1.2</b>	<b>5</b>	<b>4.2</b>	<b>±2.0</b>	<b>2.5</b>	<b>200</b>	<b>353.6</b>	<b>±40.0</b>
<b>1.5</b>	<b>5</b>	<b>5.3</b>	<b>±2.0</b>	<b>3.8</b>	<b>200</b>	<b>537.4</b>	<b>±40.0</b>
<b>1.8</b>	<b>5</b>	<b>6.4</b>	<b>±2.0</b>	<b>2</b>	<b>500</b>	<b>707.1</b>	<b>±100.0</b>
<b>2.0</b>	<b>5</b>	<b>7.1</b>	<b>±2.0</b>	<b>2.5</b>	<b>500</b>	<b>883.9</b>	<b>±100.0</b>
<b>2.1</b>	<b>5</b>	<b>7.4</b>	<b>±2.0</b>	<b>3.1</b>	<b>500</b>	<b>1096.0</b>	<b>±100.0</b>
<b>2.5</b>	<b>5</b>	<b>8.8</b>	<b>±2.0</b>	<b>3.6</b>	<b>500</b>	<b>1272.8</b>	<b>±100.0</b>
<b>2.8</b>	<b>5</b>	<b>9.9</b>	<b>±2.0</b>	<b>2.1</b>	<b>1000</b>	<b>1484.9</b>	<b>±200.0</b>
<b>3.1</b>	<b>5</b>	<b>11.0</b>	<b>±2.0</b>	<b>2.4</b>	<b>1000</b>	<b>1697.1</b>	<b>±200.0</b>
<b>3.8</b>	<b>5</b>	<b>13.4</b>	<b>±2.0</b>	<b>2.8</b>	<b>1000</b>	<b>1979.9</b>	<b>±200.0</b>



**Titre :** Figure représentant le graphe de  $V_c = f(V_1)$  pour le tore A

## 2. Données pour calculer la perméabilité du tore A

- La valeur de H est obtenue par l'équation suivante :

$$H = K_x * V_1 \quad \text{Où : H est en A/m}$$

Quant à l'incertitude, la formule ci-dessous nous a permis de la calculer:

$$\Delta H = V_1 \times \Delta K_x + K_x \times \Delta V_1$$

- En ce qui concerne la valeur de B, nous l'avons obtenue par l'équation suivante :

$$B = K_y * V_c \quad \text{Où : B est en (mT)}$$

Quant à l'incertitude, la formule ci-dessous nous a permis de la calculer:

$$\Delta B = V_c \times \Delta K_y + K_y \times \Delta V_c$$

**Tableau III.3A : Données pour calculer la perméabilité du tore A.**



$V_1 \pm \Delta V_1$ (mv)	$H \pm \Delta H$ (A/m)	$V_c \pm \Delta V_c$ (mv)	$B \pm \Delta B$ (mT)	$\mu_A \pm \Delta \mu_A$ (mH/m)	$\mu_{Ar} \pm \Delta \mu_{Ar}$
2.8±2,0	15.8±12.2	198.0±40	159.0±48.2	24.0±19.2	(19.1±15.2)×10 <sup>3</sup>
7.1±2,0	39.9±13.7	883.9±100	709.8±151.9		
8.8±2,0	49.5±14.4	1272.8±100	1022.1±183.4		
9.9±2,0	55.7±14.7	1484.9±200	1192.4±280.9		
13.4±2,0	75.4±16.0	1979.9±200	1589.9±289.4		

A partir du graphique  $B = f(H)$ , il est possible de déterminer la pente de la partie presque linéaire de la courbe, cette pente correspond à  $\mu_A$  :

$$\mu_A = \frac{B_2 - B_1}{H_2 - H_1} = \frac{(1589.9 - 159.0) \times 10^{-3}}{75.4 - 15.8} = 24.0 \times 10^{-3}$$

$$\text{L'incertitude est } \Delta \mu_A = \frac{B_1 \times \Delta B_1}{H_2 - H_1} + \frac{B_2 \times \Delta B_2}{H_2 - H_1} + \frac{(B_2 - B_1) \times \Delta H_1}{(H_2 - H_1)^2} + \frac{(B_2 - B_1) \times \Delta H_2}{(H_2 - H_1)^2}$$

$$\Delta \mu_A = \frac{0.159 \times 0.0482}{75.4 - 15.8} + \frac{1.5899 \times 0.2894}{75.4 - 15.8} + \frac{(1.5899 - 0.159) \times 12.2}{(75.4 - 15.8)^2} + \frac{(1.5899 - 0.159) \times 16}{(75.4 - 15.8)^2}$$

$$\Delta \mu_A = 19.2 \times 10^{-3}$$

$$\mu_r = \frac{\mu_A}{\mu_0} = \frac{24.0 \times 10^{-3}}{4 \times \pi \times 10^{-7}} = 19.1 \times 10^3$$

$$\Delta \mu_r = \frac{\Delta \mu_A}{\mu_0} = \frac{19.2 \times 10^{-3}}{4 \times \pi \times 10^{-7}} = 15.2 \times 10^3$$

Donc,  $\mu_r = (19.1 \pm 15.2) \times 10^3 \in 10^3 \sim 10^4$

Cette perméabilité relative correspond à celle de l'acier silicié.

### 3. Caractéristiques à saturation du tore A

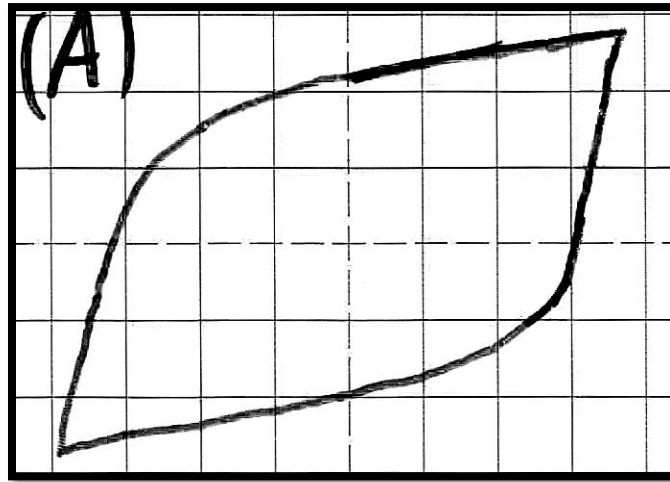


Figure : Courbe d'hystérésis du tore A observée à l'oscilloscope à la tension de saturation

Tableau III.5A : Caractéristique à la saturation du tore A.

Caractéristiques	Nombre de divisions (crête à crête)		échelle (V/div)		V (V)	$\Delta V$ (V)
$B_s \pm \Delta B_s$ (T)	4.5		1		1.59	0.2
$B_r \pm \Delta B_r$ (T)	4.3		1		1.52	0.2
$H_c \pm \Delta H_c$ (A/m)	6.1		0,005		0,011	0,001
P (W/cycle x m <sup>3</sup> )	X	6	X	0.005	0.003	0.001
	Y	4	Y	1	4	0.2

## P= Aire sous la courbe

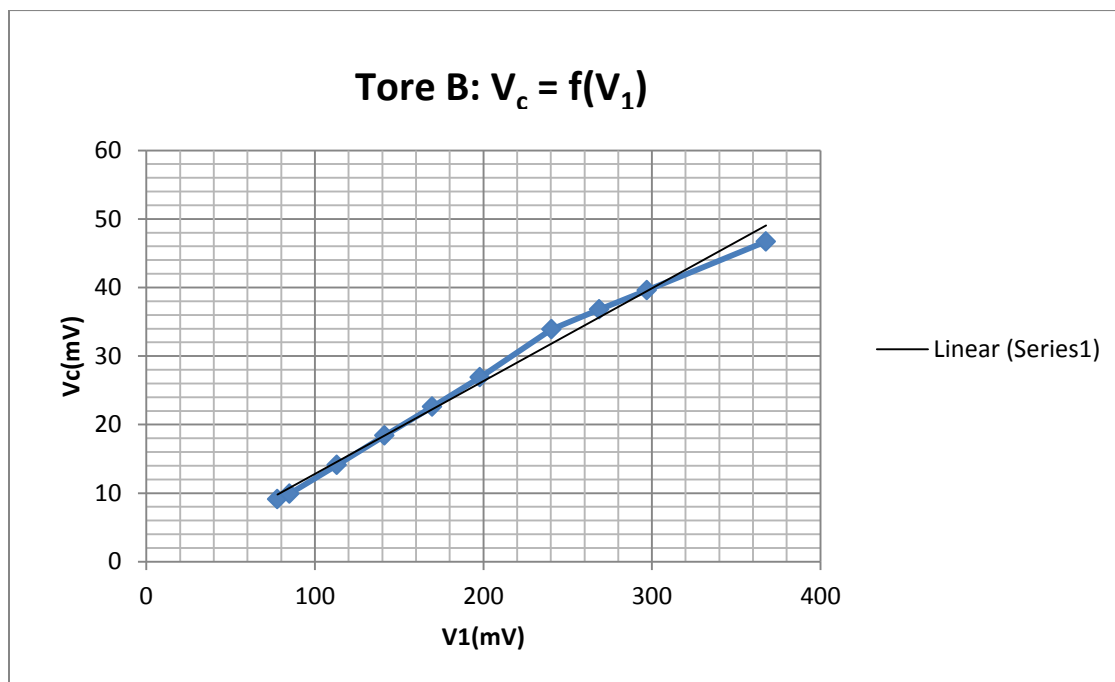
$$P = V_x \cdot V_y \cdot k_x \cdot k_y = 54.2 \text{ W/cycle} \cdot \text{m}^3$$

## ❖Tore B :

Pour le tore B, les résultats sont :

**Tableau III.2.B : Évolution du sommet de  $V_c = f(V_1)$**

Nbre de div. En X (div.)	Échelle en X (mV/div)	$V_1$ (mV)	$\Delta V_1$ (mV)	Nbre de div. En Y (div.)	Échelle Y (mV/div)	$V_c$ (mV)	$\Delta V_c$ (mV)
1.1	100	77.8	20.0	1.3	10	9.2	2.0
1.2	100	84.9	20.0	1.4	10	9.9	2.0
1.6	100	113.1	20.0	2	10	14.1	2.0
2.0	100	141.4	20.0	2.6	10	18.4	2.0
2.4	100	169.7	20.0	3.2	10	22.6	2.0
2.8	100	198.0	20.0	3.8	10	26.9	2.0
3.4	100	240.4	20.0	2.4	20	33.9	4.0
3.8	100	268.7	20.0	2.6	20	36.8	4.0
4.2	100	297.0	20.0	2.8	20	39.6	4.0
2.6	200	367.7	40.0	3.3	20	46.7	4.0



**Titre :** Figure représentant le graphe de  $V_c = f(V_1)$  pour le tore B

#### 4. Données pour calculer la perméabilité du tore B

- La valeur de H est obtenue par l'équation suivante :

$$H = K_x * V_1 \quad \text{Où : H est en A/m}$$

Quant à l'incertitude, la formule ci-dessous nous a permis de la calculer:

$$\Delta H = V_1 \times \Delta K_x + K_x \times \Delta V_1$$

- En ce qui concerne la valeur de B, nous l'avons obtenue par l'équation suivante :

$$B = K_y * V_c \quad \text{Où : B est en (mT)}$$

Quant à l'incertitude, la formule ci-dessous nous a permis de la calculer:

$$\Delta B = V_c \times \Delta K_y + K_y \times \Delta V_c$$

**Tableau III.3A : Données pour calculer la perméabilité du tore A.**

$V_1 \pm \Delta V_1$ (mv)	$H \pm \Delta H$ (A/m)	$V_c \pm \Delta V_c$ (mv)	$B \pm \Delta B$ (mT)	$\mu B \pm \Delta \mu B$ (mH/m)	$\mu_{Br} \pm \Delta \mu_{Br}$
113.1±20.0	9.6±1.4	14.1±4.0	36.9±14.3	4.2±19.2	(3.3±0.7)×10 <sup>3</sup>
141.4±20.0	12.0±1.5	18.4±4.0	48.2±15.4		
169.7±20.0	14.5±1.7	22.6±4.0	59.2±16.6		
198.0±20.0	16.9±1.8	26.9±4.0	70.5±17.7		
297.0±20.0	25.3±2.3	39.6±4.0	103.8±21.2		

A partir du graphique  $B = f(H)$ , il est possible de déterminer la pente de la partie presque linéaire de la courbe, cette pente correspond à  $\mu_b$  :

$$\mu B = \frac{B_2 - B_1}{H_2 - H_1} = \frac{(103.8 - 36.9) \times 10^{-3}}{25.3 - 9.6} = 4.2 \times 10^{-3}$$

$$\text{L'incertitude est } \Delta\mu_B = \frac{B1 \times \Delta B1}{H2 - H1} + \frac{B2 \times \Delta B2}{H2 - H1} + \frac{(B2 - B1) \times \Delta H1}{(H2 - H1)^2} + \frac{(B2 - B1) \times \Delta H2}{(H2 - H1)^2}$$


---

$$\Delta\mu_B = \frac{0.0369 \times 0.0143}{25.3 - 9.6} + \frac{0.1038 \times 0.0212}{25.3 - 9.6} + \frac{(0.1038 - 0.0369) \times 1.3}{(25.3 - 9.6)^2} + \frac{(0.1038 - 0.0369) \times 2.4}{(25.3 - 9.6)^2}$$


---

$$\Delta\mu_B = 0.9 \times 10^{-3}$$

$$\mu_r = \frac{\mu_A}{\mu_o} = \frac{4.2 \times 10^{-3}}{4 \times \pi \times 10^{-7}} = 3.3 \times 10^3$$

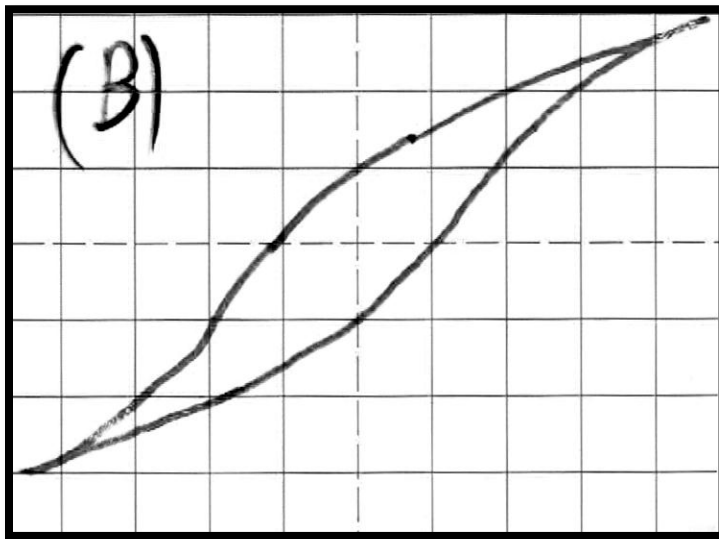
$$\Delta\mu_r = \frac{\Delta\mu_A}{\mu_o} = \frac{0.9 \times 10^{-3}}{4 \times \pi \times 10^{-7}} = 0.7 \times 10^3$$

Donc,  $\mu_r = (3.3 \pm 0.7) \times 10^3 \approx 10^3$

Cette perméabilité relative correspond à celle des Ferrites

---

## 5. Caractéristiques à saturation du tore B



**Figure : Courbe d'hystérésis du tore B observée à l'oscilloscope à la tension de saturation**

**Tableau III.5A : Caractéristique à la saturation du tore B.**

Caractéristiques	Nombre de divisions (crête à crête)		échelle (V/div)		V (V)	$\Delta V$ (V)
$B_s \pm \Delta B_s$ (T)	3		0.02		0.021	0.004
$B_r \pm \Delta B_r$ (T)	2		0.02		0.014	0.004
$H_c \pm \Delta H_c$ (A/m)	2.0		0.1		0.07	0.02
P (W/cycle x m <sup>3</sup> )	X	3	X	0.1	0.3	0.02
	Y	2.7	Y	0.02	0.054	0.004

$P =$  Aire sous la courbe

---

$$P = V_x * V_y * k_x * k_y = 3.6 \text{ W/cycle} * \text{m}^3$$

## IV. Discussion des résultats

---

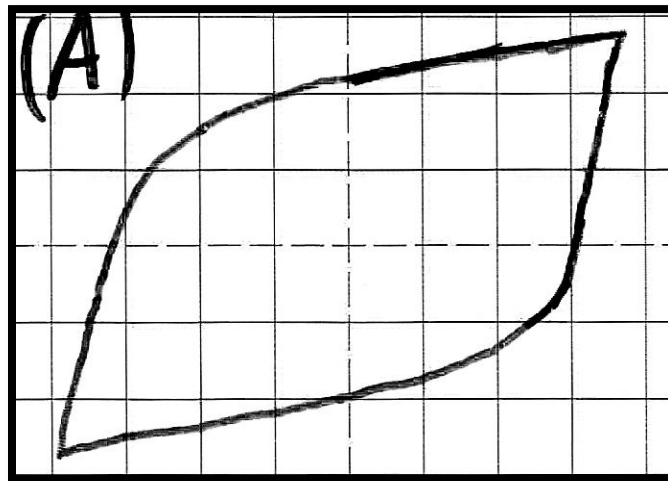
Pour les deux tores, nous constatons que les courbes de première aimantation ( $B = f(H)$ ) sont plus ou moins linéaires (les courbes de tendances passent par au moins quatre points). Nos mesures ont donc permis de vérifier qu'il y a une proportionnalité entre B et H. Le coefficient de proportionnalité de cette fonction linéaire représente la perméabilité  $\mu$  du matériau magnétique. L'identification des deux matériaux a été réussie puisque les résultats obtenus étaient proches de celles du tableau de caractéristiques des matériaux ferromagnétiques.

**Tableau III.1: Caractéristiques des matériaux ferromagnétiques**

Matériau	Perméabilité relative $\mu_r$	Champ de saturation $B_s$ (Wb/m <sup>2</sup> )	Application
Acier silicié	$10^3 - 10^4$	1,6	inductances, transformateurs à basse fréquence, amplificateurs magnétiques
Alliage Ni-Fe	$10^4 - 10^5$	1,5	
Poudre Ni-Fe	10 -100	0,6	inductances des filtres à haute fréquence
Ferrites	$10^3$	0,3	inductances haute qualité transformateurs à haute fréquence

## 1. Cas du tore A

- Le champ d'induction de saturation ( $B_s$ ) et le champ d'induction rémanent ( $B_r$ ) ont des valeurs voisines.
- Nous avons de grandes pertes d'énergie (dues à des cycles d'hystérésis larges)
- Le champ coercitif est élevé.



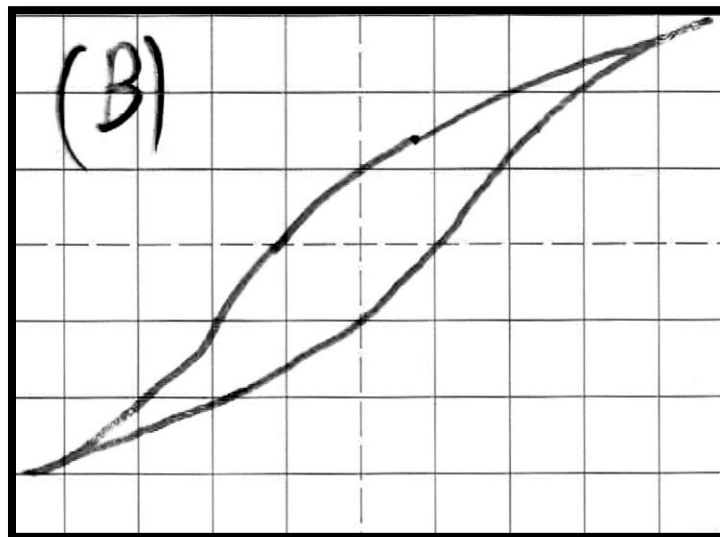
**Figure : Courbe d'hystérésis du tore A observée à l'oscilloscope à la tension de saturation**

À partir de ces résultats expérimentaux, nous pouvons déduire que le tore A est un matériau ferromagnétique dur. Ces matériaux servent pour la fabrication d'aimants permanents de très forte puissance. Ces aimants sont très utilisés pour la réalisation de machines à courant continu ou de machines synchrones.

Ses applications : inductances, transformateurs a basse fréquence, amplificateurs magnétiques.

## 2. Cas du tore B

- Champ coercitif faible.
- Le champ d'induction de saturation ( $B_s$ ) et le champ d'induction rémanent ( $B_r$ ) ont des valeurs plus ou moins éloignées.
- Pas beaucoup de pertes d'énergie (grâce à un cycle d'hystérésis étroit).



**Figure x : Courbe d'hystérésis du tore B observée à l'oscilloscope à la tension de saturation**



Ces caractéristiques nous laissent déduire que ce matériau est un matériau ferromagnétique doux. Ils servent généralement pour la fabrication d'électroaimants ou des circuits magnétiques fonctionnant en régime alternatif (machines électriques, transformateurs), car ce phénomène d'hystérésis est responsable de pertes d'énergie.

Ses applications inductances haute qualité, transformateurs à haute fréquence.

## Conclusion

---

En conclusion, on peut dire que nous avons atteint le but de notre expérience, qui était non seulement de tracer la courbe de première aimantation à partir de la courbe d'hystérésis, mais aussi de reproduire cette courbe d'hystérésis jusqu'à la saturation complète. Il faut dire que nous avons également mesuré la perméabilité de deux matériaux ferromagnétiques A et B, tout en déterminant leur caractéristiques respectives ( $B_s$ ,  $B_r$ ,  $H_c$  ainsi que les pertes d'énergie associées). À partir de tout ceci, nous sommes arrivé à identifier que les deux tores A et B étaient respectivement l'Acide silicié et les Ferrites.

### Bibliographie

- L. Martinu, D. Simon, J. Cerny. Champs électromagnétiques 2<sup>ème</sup> édition : Manuel de laboratoire N 5935. Presses Internationales Polytechnique. Montréal. 2005