PHS1102 – Champs électromagnétiques

Page couverture obligatoire des rapports de laboratoire

GROUPE DE TRAVAUX PRATIQUES (TP)

Cochez votre numéro de groupe : le groupe de TP n'est pas le groupe du cours.

○ 01	○ 02	◉ 03	○ 04	○ 05	○ 06

AUTEURS

Nom : Clas	Prénom : Paul
Matricule : 1846912	Signature : Paul
Nom : Émard-Lamy	Prénom : Arnaud
Matricule : 2021005	Signature :
Nom :	Prénom :
Matricule :	Signature :

TRAVAIL REMIS

Date de remise du travail : 30 novembre 2020

Rapport de laboratoire (cochez le numéro) : ○ 1 ○ 2 ◉ 3

Charge de travail (nombre d'heures dédiées à la rédaction du rapport) : 20

GRILLE D'ÉVALUATION DU RAPPORT DE LABORATOIRE

(section à remplir par le correcteur)

Quiz :	/ 4
Présentation :	/ 1,5
Introduction :	/ 1,5
Montage expérimental et principes physiques :	/ 2
Mesures et tableaux :	2,5 / 3
Calculs d'incertitudes (en annexe) :	/ 3
Discussion :	/ 3
Conclusion :	/ 2
NOTE TOTALE :	**/ 20**

15,5 / 20

Table of Contents

1. Introduction

Les matériaux ferromagnétiques sont une partie importante des technologies utilisées à tous les jours. Entre autres, elles sont au cœur de l'enregistrement digital, des transformateurs électriques, des électroaimants et des moteurs électriques. Par ailleurs, les matériaux ferromagnétiques sont souvent utilisés pour leur capacité à emmagasiner soit de l'énergie ou de l'information. Par conséquent, une étude importante doit être consacrée à la recherche sur ceux-ci afin de déterminer leurs propriétés.

Dans ce laboratoire, la courbe d'hystérésis de deux matériaux de nature inconnue est étudiée afin de déterminer, entre autres, la perméabilité, le champ rémanent et coercitif, ainsi que l'énergie dissipée dans un cycle. Ces caractéristiques d'une courbe d'hystérésis associées à un ferromagnétique permettent justement de savoir quelles applications sont possibles pour un certain matériau. L'objectif principal de ce laboratoire sera alors de comparer les deux matériaux ferromagnétiques selon leur courbe d'hystérésis ainsi que déterminer leur application possible.

2. Méthodologie expérimentale

Dans l'expérience, un tore A et un tore B contenant chacun un enroulement primaire de N1 spires et secondaire de N2 spires sont utilisés.

Pour le tore A, la source de courant alternatif utilisée est celle provenant directement de l'établissement, soit d'une source d'excitation de 120 V à 60 Hz. Un transformateur et une inductance variable sont utilisés afin de réguler la puissance fournie au tore A. Un oscilloscope mesure la tension V1 aux bornes de la résistance R1 et aussi la tension VC aux bornes de la capacité C, comme le montre la **Figure 1.**

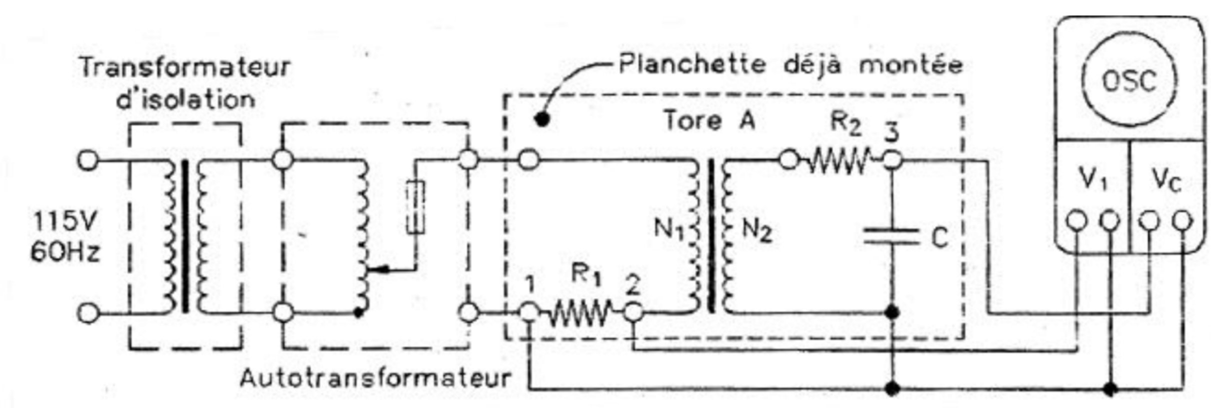

Figure 1 Schéma des circuits pour mesurer la courbe d'hystérésis du Tore A **[1]**

Pour le tore B, la source de courant alternatif provient d'un générateur de 7 V à 2 kHz. Pour la mesure, l'oscilloscope est branché de la même manière que le tore A, comme le montre la **Figure 2** avec le générateur.

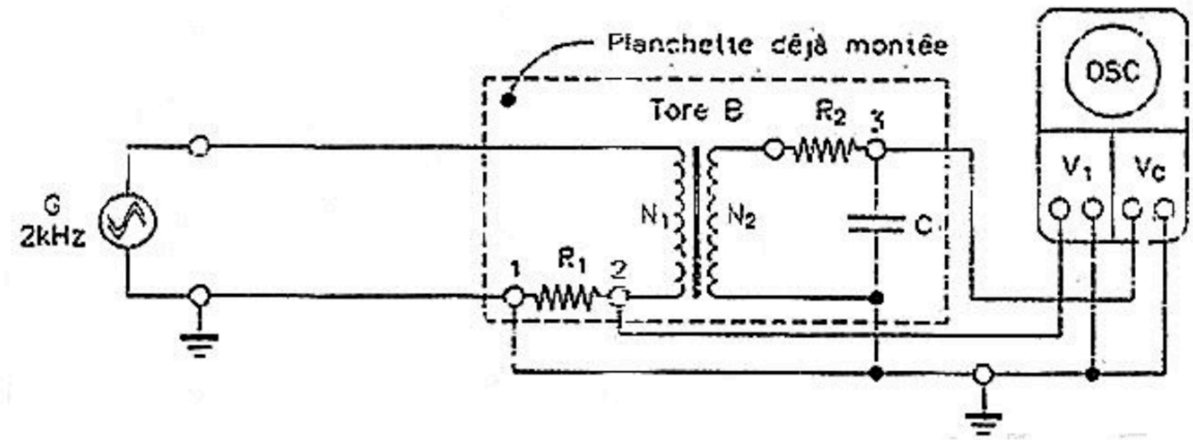

Figure 2 Schéma des circuits pour mesurer la courbe d'hystérésis du Tore B **[1]**

À l'aide de l'oscilloscope en mode X-Y mesurant les tensions V_1 et V_c, il est possible d'obtenir une courbe fermée. En faisant varier l'inductance variable ou la tension du générateur, il est possible de faire varier la différence de potentiel au primaire et au secondaire de sorte à contrôler la courbe d'hystérésis.

Mesure de la perméabilité μ_A

Afin de calculer la perméabilité μ_A , il faudra d'abord trouver les valeurs de H et de B associé au tore A. Pour ce faire, on utilise les formules suivantes :

i) $H = k_x V_1$ ii) $B = k_y V_c$

Les constantes k_x et k_y sont trouvées à partir des relations suivantes :

i) $k_x = \frac{N1}{L1 * R1}$ ii) $k_y = \frac{R2 * C}{N2 * A2}$

où N1 : Nombre de tour de fils de l'enroulement primaire (tours)
L1 : Circonférence moyenne du tore (mm)
R1 : Résistance de l'enroulement primaire (ohm)
R2 : Résistance de l'enroulement secondaire (ohm)
N2 : Nombre de tour de fils de l'enroulement secondaire (tours)
A2 : Aire de la section de l'enroulement secondaire (mm^2)
C : Capacité du condensateur (nF)

*Ces valeurs sont fournies à la page 40 du manuel de laboratoire.

Une fois que H et B sont trouvés, en prenant une série de points correspondant aux sommets de la courbe de V_c en fonction de V_1, on peut tracer un graphique B = f(H) à l'aide de ces points.

Dans la zone de première aimantation, correspondant à la zone linéaire trouvée à partir de la corrélation des cinq points (sommets) choisis, la pente du graphe B = f(H) correspond à la perméabilité du tore. On peut donc directement obtenir cette pente à l'aide d'un logiciel comme Excel ou la calculer soi-même par la formule d'une pente pour une droite.

Mesure de la perméabilité μ_B

Il s'agit de faire les mêmes étapes telles que mentionnées ci-dessus, mais en utilisant les données pour le tore B.

Relevé des caractéristiques B_r, B_s et H_c sur l'écran de l'oscilloscope

À l'aide de l'image de la courbe d'hystérésis obtenue à l'oscilloscope, on est en mesure de calculer les caractéristiques B_r, B_s et H_c propres à chacun des tores. En se fiant à l'échelle horizontale et verticale de l'oscilloscope, il est possible de déterminer la tension V(Bs) associée à chacune de ces caractéristiques. Ensuite, à partir de ces tensions, une simple conversion en utilisant les constantes k_x et k_y nous permet d'obtenir leur valeur, i.e. :

$B_s = k_y * V(Bs)$; $B_r = k_y * V(Br)$; $H_c = k_x * V(Hc)$

Finalement, le calcul de la puissance dissipée par unité de volume et par cycle se trouve en calculant l'aire délimitée sous la courbe d'hystérésis. Une approximation est fondée sur le nombre approximatif de carreau correspond à la surface en question. Ensuite, on multiplie le nombre de carreau par l'aire d'un carreau en se fiant bien sûr aux échelles propres à chacun des deux tores.

3. Présentation des résultats

Nous avons tout d'abord calculé les constantes k_x et k_y afin de trouver les résultats du Tableau III.2 suivants. Bien que ces constantes nous permettent entre autres d'alléger les calculs, celles-ci nous permettent de revenir dans l'unité souhaité lors de l'analyse de la courbe d'hystérésis, dépendamment de si l'on veut B ou H par exemple.

	k_x	$\pm \Delta k_x$	k_y	$\pm \Delta k_y$
Tore A	5625	355	0.80	0.08
Tore B	85	5	2.6	0.3

Tableau III.2 Tableau des constantes pour chacun des tores

a) Tore A

Nous avons calculé les incertitudes reliées aux mesures de V_1 et V_c basé sur les échelles de l'oscilloscope et les avons insérés dans le tableau III.2.A (les données de de V_1 et V_c étaient fournies) :

Échelle en X (mV/div)	V_1 (mV)	$\pm \Delta V_1$ (mV)	Échelle en Y (mV/div)	V_c (mV)	$\pm \Delta V_c$ (mV)
2	2.6	0.4	10	18	2
2	4.4	0.4	20	67	4
2	4.9	0.4	50	86	10
2	6.8	0.4	50	169	10
2	7.8	0.4	100	236	20
2	9.2	0.4	100	300	20
5	11.5	1.0	200	464	40
5	13.5	1.0	200	555	40
5	15.5	1.0	200	695	40
5	18.5	1.0	500	835	100
5	22.0	1.0	500	935	100
10	27.0	2.0	500	1015	100

Tableau III.2.A Évolution du sommet de $V_c = f(V_1)$ pour le Tore A

NB : Nous n'avons pas osé arrondir les valeurs de V_1 qui étaient déjà fournies, bien qu'ils ne respectent pas toujours le bon nombre de chiffres significatifs.

OK

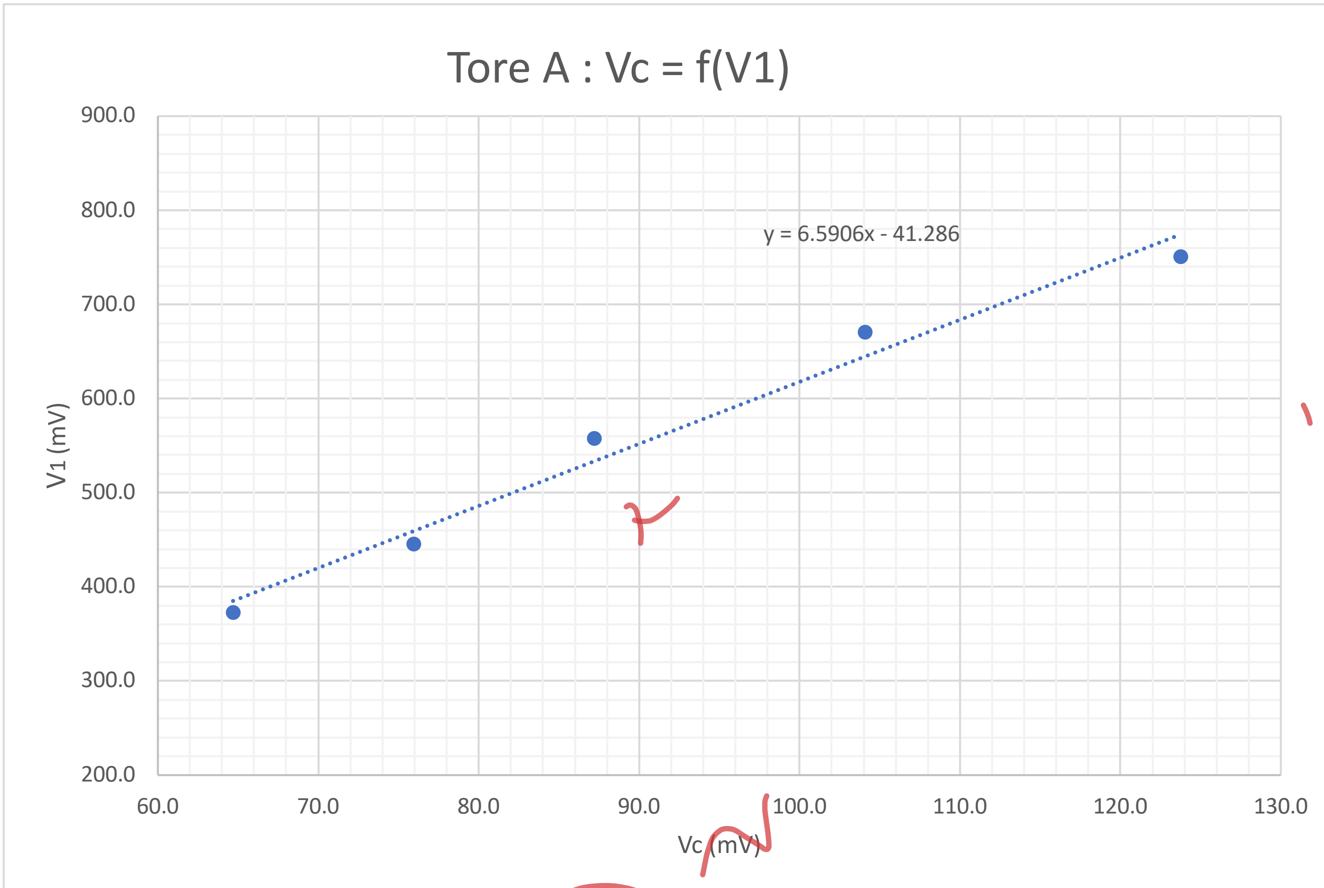

Figure 3 Représentation du graphe de Vc = f(V1) pour le tore A

Grâce à la courbe ci-haut, on trouve une perméabilité μ_A= 6.59 (mH/m) qui correspond à la pente de la tendance linéaire des points.

Voici la courbe d'hystérésis du tore A fournie par le technicien de laboratoire Yves Leblanc que nous aurions potentiellement obtenue si nous avions fait le laboratoire en présentiel.

Courbe d'hystérésis du tore A

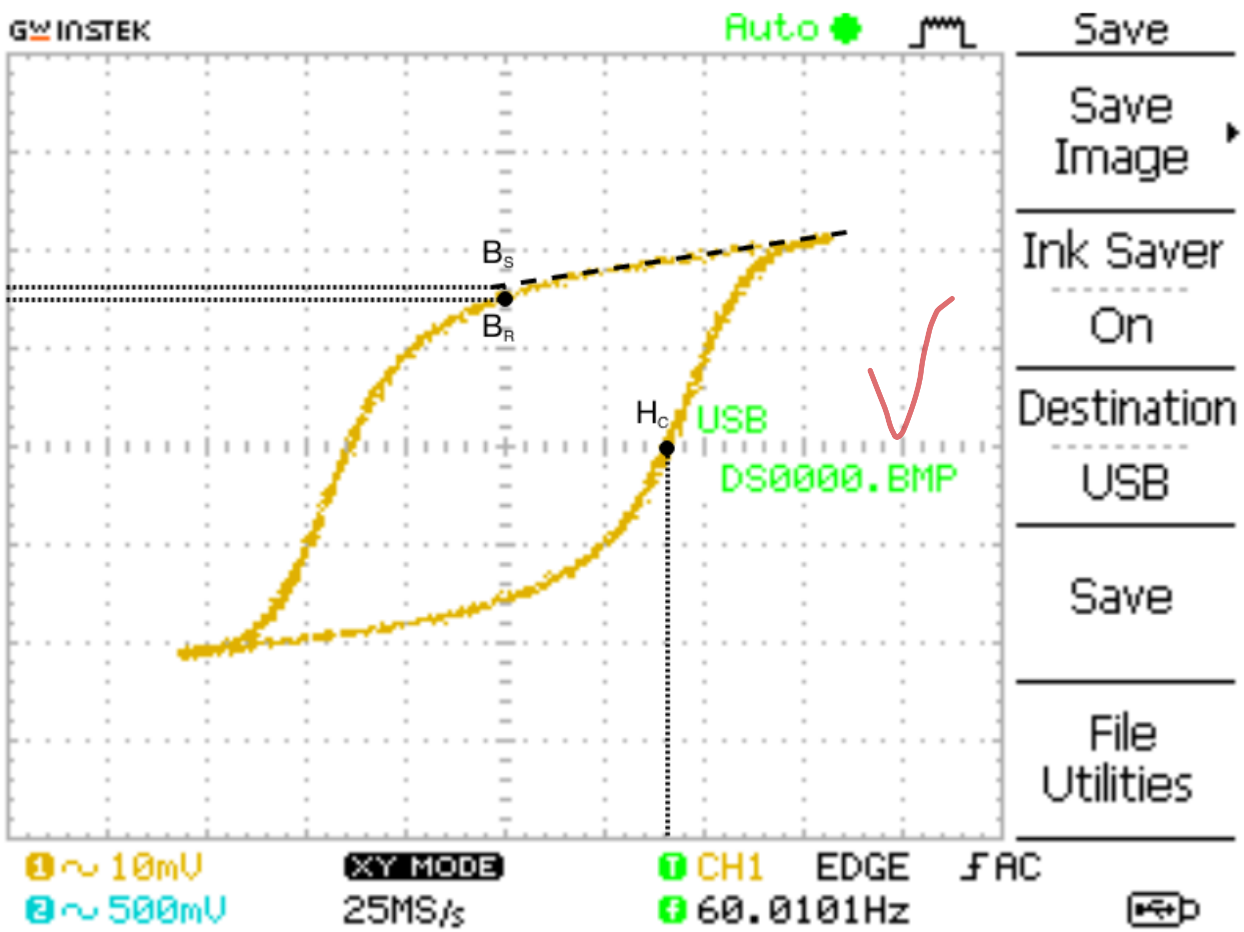

Figure 4 Capture d'écran [2] et représentation graphique de B_s, B_r et H_c pour le tore A

Nous pouvons observer d'après les courbes d'hystérésis que pour le tore A :

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

Après avoir tracé un nuage de points sur Excel de B = f(H), les cinq points (sommets) que nous avons choisis comme étant dans la zone linéaire de la première aimantation étaient les valeurs de V_1 ainsi que V_2 présentées dans le tableau suivant. Ce tableau présente également les valeurs de H et B associées à chacun de ces sommets. À partir de B et H, la pente de cette courbe à tendance linéaire (B = f(H)) peut être trouvée et correspond à la perméabilité du tore A.

V_1 (mV)	$\pm \Delta V_1$ (mV)	H (A/m)	$\pm \Delta H$ (A/m)	V_c (mV)	$\pm \Delta V_c$ (mV)	B (mT)	$\pm \Delta B$ (mT)	μ_A (mH/m)	$\pm \Delta V \mu_A$ (mH/m)	μ_r	$\pm \Delta \mu_r$
11.5	1.0	65	10	464	40	372	70	6.59	4.18	5.09E+03	3.32E+03
13.5	1.0	76	10	555	40	445	77				
15.5	1.0	87	11	695	40	558	88				
18.5	1.0	104	12	835	100	670	148				
22.0	1.0	124	13	935	100	750	156				

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

En analysant la courbe d'hystérésis, toujours en se fiant à l'échelle horizontale et verticale de l'oscilloscope, il est possible de déterminer la tension V(Bs) associée à chacune de ses caractéristiques. Celle-ci nous permet ensuite de trouver la valeur associée à chacune des caractéristiques en multipliant par leur constante k_x ou k_y. La puissance P représente l'aire sous la courbe d'hystérésis. Le tableau III.4.A rassemble alors les caractéristiques à saturation du tore A.

Caractéristiques	Échelle (V/div)	V(Bs) [V]	$\pm \Delta V$ (Bs) [V]	Résultats	$\pm \Delta$Résultats
$B_s \pm \Delta B_s$ (mT)	0.5	0.80	0.10	0.6	0.2
$B_r \pm \Delta B_r$ (mT)	0.5	0.75	0.10	0.6	0.1
$H_c \pm \Delta H_c$ (mT)	0.01	0.016	0.002	90	17

Tableau III.4.A Caractéristiques à saturation du tore A

vous n'êtes pas dans la zone linéaire

	Nombre de division crête à crête		Échelle (V/div)		V(Bs) [V]	± ΔV (Bs) [V]	P(W/m^3)
P(W/m^3)	x	4	x	0.01	0.06	0.04	271
	y	3	y	0.5	1	1.5	

Tableau III.4.A(suite) Caractéristiques à saturation du tore A

b) Tore B

Nous avons calculé les incertitudes reliées aux mesures de V_1 et V_c basé sur les échelles de l'oscilloscope et les avons insérer dans le tableau III.2.B (les données de de V_1 et V_c étaient fournies) :

Échelle en X (mV/div)	V_1 (mV)	± ΔV_1 (mV)	Échelle en Y (mV/div)	V_c (mV)	± ΔV_c (mV)
50	154	10	10	25	2
50	216	10	10	35	2
100	280	20	20	44	4
100	350	20	20	57	4
100	412	20	20	68	4
100	488	20	50	85	10
200	550	40	50	91	10
200	595	40	50	97	10
200	650	40	50	101	10
200	720	40	50	106	10
200	835	40	50	114	10
200	900	40	50	117	10

Tableau III.2.B Évolution du sommet de $V_c = f(V_1)$ pour le Tore B

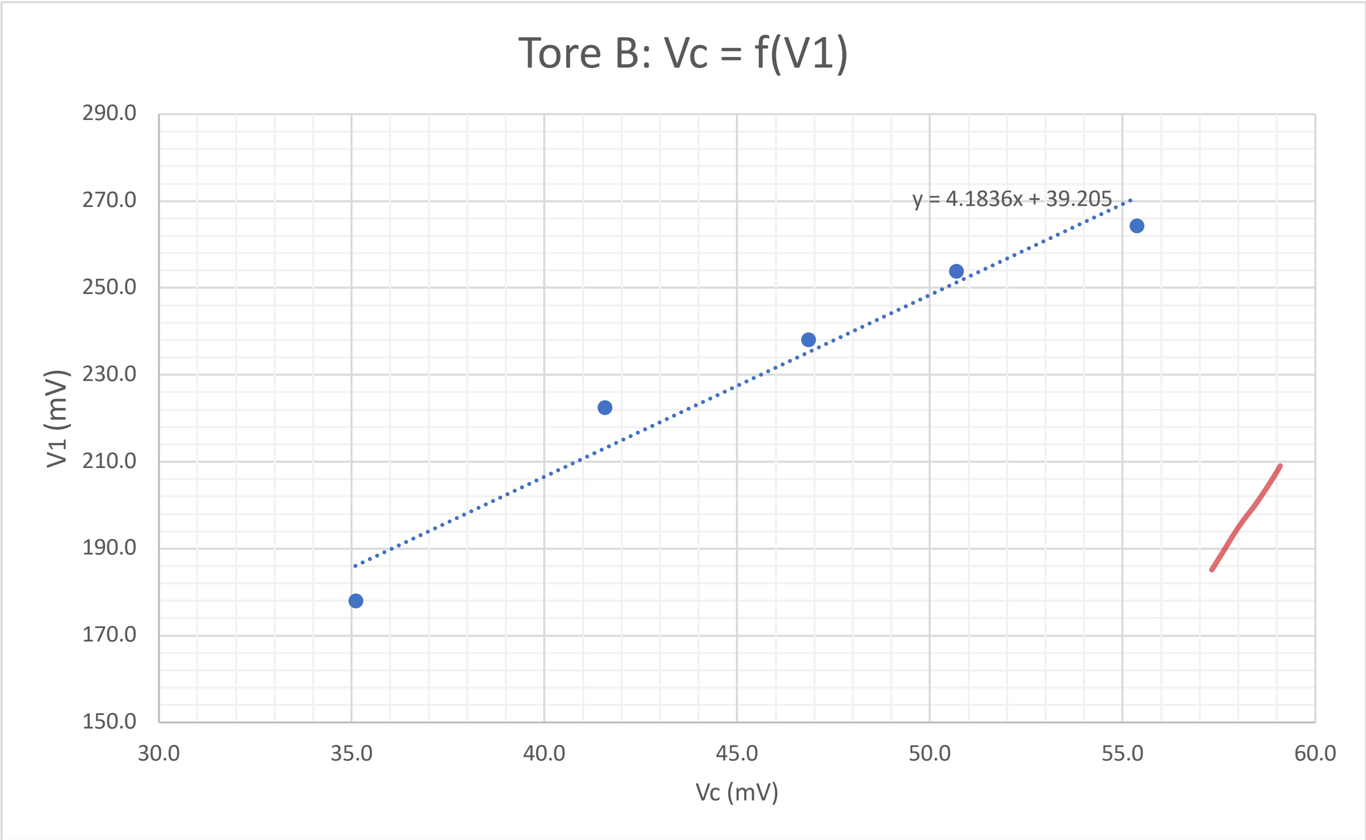

Figure 5 Représentation du graphe de Vc = f(V1) pour le tore B

Grâce à la courbe ci-haut, on trouve une perméabilité relative μ_B= 4.18 (mH/m) qui corespond à la pente de la tendance linéaire des points.

Voici la courbe d'hystérésis du tore B fournie par le technicien de laboratoire Yves Leblanc que nous aurions potentiellement obtenue si nous avions fait le laboratoire en présentiel.

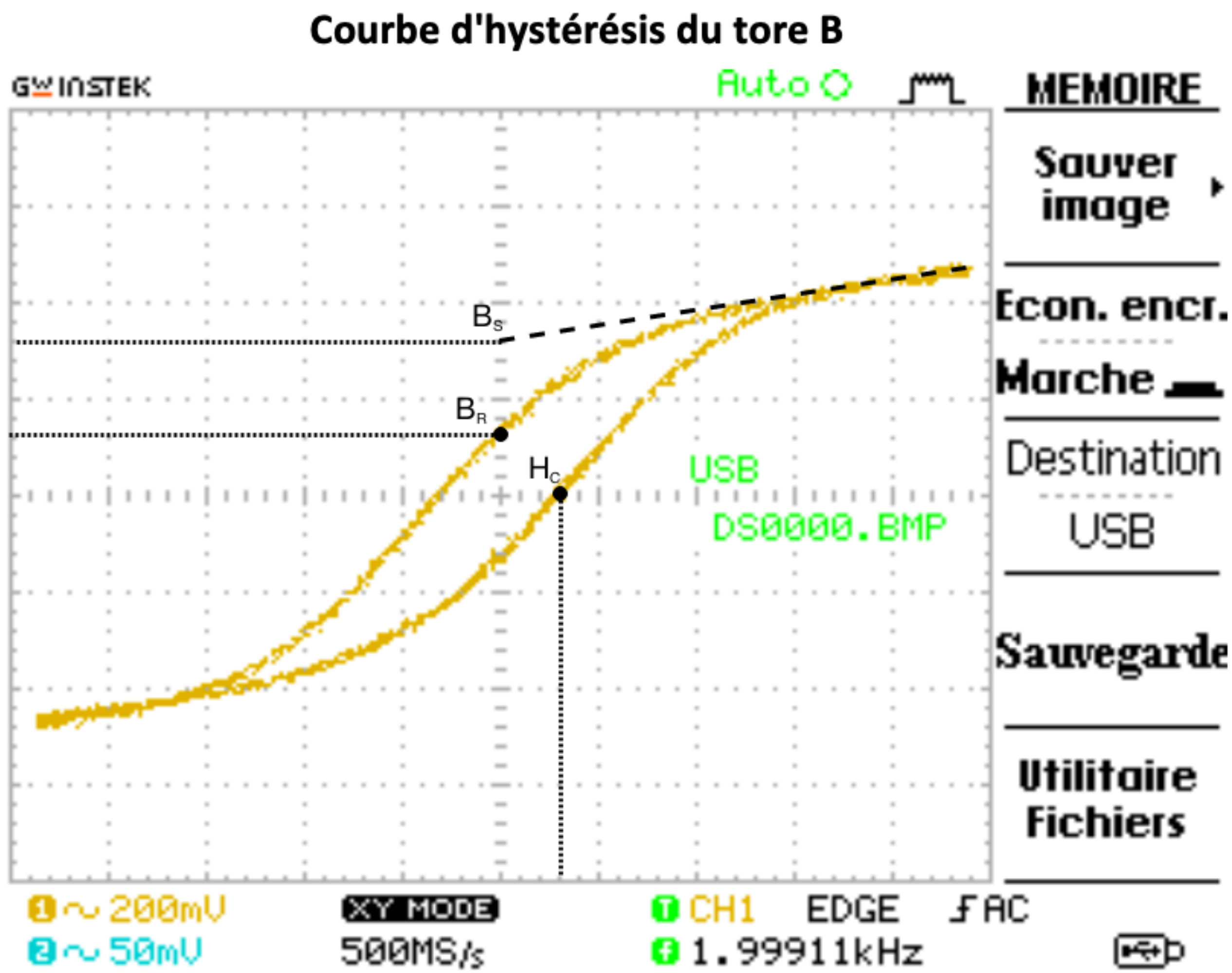

Figure 6 Capture d'écran [2] et représentation graphique de B_s, B_r et H_c pour le Tore B

Nous pouvons observer d'après les courbes d'hystérésis que pour le tore B :

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

Après avoir tracé un nuage de points sur Excel de B = f(H), les cinq points (sommets) que nous avons choisis comme étant dans la zone linéaire de la première aimantation étaient les valeurs de V_1 ainsi que V_2 présentées dans le tableau suivant. Ce tableau présente également les valeurs de H et B associées à chacun de ces sommets. À partir de B et H, la pente de cette courbe à tendance linéaire (B = f(H)) peut être trouvée et correspond à la perméabilité du tore B.

V_1 (mV)	± ΔV_1 (mV)	H (A/m)	± ΔH (A/m)	V_c (mV)	± ΔV_c (mV)	B (mT)	± ΔB (mT)	μ_B (mH/m)	± ΔV μ_B (mH/m)	μ_r	± Δ μ_r
412	20	35	4	68	4	178	35				
488	20	42	4	85	10	222	57				
550	40	47	6	91	10	238	59	4.16	2.49	3.39E+03	1.98E+03
595	40	51	6	97	10	254	61				
650	40	55	7	101	10	264	62				

Tableau III.3.B Données pour calculer la perméabilité du tore B

En analysant la courbe d'hystérésis, toujours en se fiant à l'échelle horizontale et verticale de l'oscilloscope, il est possible de déterminer la tension V(Bs) associée à chacune de ses caractéristiques. Celle-ci nous permet ensuite de trouver la valeur associée à chacune des caractéristiques en multipliant par leur constante k_x ou k_y. La puissance P représente l'aire sous la courbe d'hystérésis. Le tableau III.4.A rassemble alors les caractéristiques à saturation du tore B.

Caractéristiques	Échelle (V/div)	V(Bs) [V]	± ΔV (Bs) [V]	Résultats	±ΔRésultats
$B_s \pm \Delta B_s$ (mT)	0.05	0.11	0.01	0.288	0.055
$B_r \pm \Delta B_r$ (mT)	0.05	0.035	0.01	0.092	0.035
$H_c \pm \Delta H_c$ (mT)	0.2	0.12	0.04	10	4.0

Tableau III.4.B Caractéristiques à saturation du tore B

	Nombre de division crête à crête		Échelle (V/div)		V(Bs) [V]	± ΔV (Bs) [V]	P(W/m^3)
P(W/m^3)	x	2	x	0.2	0.4	0.04	8.92
	y	2	y	0.05	0.1	0.01	

Tableau III.4.B(suite) Caractéristiques à saturation du tore B

4. Discussion

a) Comparaison des perméabilités

D'après nos mesures, on peut identifier le tore A comme étant de la Poudre Ni-Fe car le tore A a un champ de saturation de 0.642 mT et une perméabilité relative μ de l'ordre de 10^3 qui se rapproche de celle caractéristique de la Poudre Ni-Fe. Nous identifions le tore B comme étant une ferrite car nous avons trouvé que le tore B avait un champ de saturation de 0.288 mT et une perméabilité relative μ de l'ordre de 10^3 qui correspond aux caractéristiques établies de la ferrite.

Avant de décrire des applications technologiques possibles pour ces matériaux, il faut noter que le champ coercitif de A est H_C = (90 ± 17) A/m et que celle de B est H_C = (10 ± 4) A/m.

On a besoin de ces trois caractéristiques, la perméabilité, le champ de saturation, et le champ coercitif, car ils définissent quel genre d'applications sont propices avec les matériaux identifiés.

- Un matériau avec une perméabilité beaucoup plus enlevée que l'air laisse passer le flux magnétique facilement. Cela est spécialement souhaitable pour des applications comme des génératrices, des transformateurs ou des moteurs électriques.
- Le champ de saturation détermine la fréquence à laquelle on peut aimanter et désaimanter un matériau. Plus le champ de saturation est faible, plus nous pouvons atteindre de hautes fréquences, et plus le champ de saturation augmente, plus la fréquence diminue.
- Le champ coercitif nous informe sur la facilité de désaimanter un matériau. Si le champ coercitif est faible, le matériau se désaimante facilement, alors que s'il est élevé, il sera plus difficile à désaimanter. Il est souhaitable pour une mémoire magnétique d'être produite d'un matériau au champ coercitif faible, afin de pouvoir réécrire facilement. Toutefois, si l'on désire produire un aimant permanent, il serait mieux de choisir un matériau au champ coercitif élevé.

Selon les données que nous avons pour le tore A, sa perméabilité est beaucoup plus élevée que l'air, il a un champ de saturation plus grand que celui de B, et un champ coercitif aussi plus grand que celui de B. Ainsi, le matériau A serait utile comme transformateur à basse fréquence, ou comme aimant permanent.

Quant à lui, le tore B a une perméabilité aussi plus grande que l'air, mais un champ de saturation plus petit que pour A, et un champ coercitif plus faible que celui de A, de sorte qu'il serait parfait comme transformateur à haute fréquence, ou comme mémoire magnétique.

b) Puissance dissipée

La puissance dissipée par le tore A est de (271) W/(cycle m^3) et celle dissipée par le tore B est de (8.92) W/(cycle m^3).

Il est souhaitable de diminuer au maximum la perte d'énergie par hystérésis lorsqu'on choisit un matériau pour un transformateur. Pour le Tore A, cette perte est considérablement plus élevé que le Tore B fait en ferrite, un matériau souvent utilisé dans les transformateurs. Par conséquent, la poudre Ni-Fe n'est pas un bon matériau pour un transformateur en raison de sa perte d'énergie en chaleur.

c) Sources d'erreurs

Quelques sources d'erreurs ont pu venir altérer légèrement nos résultats. D'abord, on modélise le tore comme un circuit magnétique où tout le flux magnétique circule dans le cadre ferromagnétique. Or, en réalité, une partie du flux peut s'échapper et ne jamais se rendre à la bobine secondaire.

L'impédance du circuit électrique peut également causer des pertes de puissance qui pourraient être observables.

Finalement, la lecture graphique du champ de saturation et du champ coercitif ont pu induire des erreurs non négligeables dans la déduction des matériaux ferromagnétique.

5. Conclusion

Le but de ce laboratoire était d'identifier les différents paramètres d'un matériau ferromagnétique à partir de sa courbe d'hystérésis. À partir de la théorie de l'électromagnétisme, nous pouvons vérifier que la pente de la courbe de première aimantation correspond à µ, que l'ordonnée à l'origine de la droite de saturation donne le champ de saturation, que les ordonnées à l'origine des courbes d'hystérésis sont les champs rémanents, que les abscisses à l'origine des courbes d'hystérésis sont les champs coercitifs, et que la puissance dissipée lors d'un cycle est son aire intérieure.

Nous avons pu trouver des valeurs précises qui nous ont permis d'identifier les types de matériaux ferromagnétiques auxquels nous avions affaire. Les différentes propriétés des matériaux ainsi identifiés ont guidés notre choix des applications possibles pour chacun des matériaux A et B.

6. Annexe

ANNEXE

① Calcul de K_x (Tore A)

$$K_x = \frac{N_1}{L_1 R_1} = \frac{3420}{76E\text{-}3 \cdot 8} = 5625\ t./\Omega \cdot m$$

d'où $K_x = (5625 \pm 355)\ \frac{tours}{\Omega \cdot m}$

② Calcul de ΔK_x (Tore A)

$$\Delta K_x = \left|\frac{\partial K_x}{\partial L_1}\right| \cdot \Delta L_1 + \left|\frac{\partial K_x}{\partial R_1}\right| \Delta R_1$$

$$\Delta K_x = \frac{N_1}{L_1 R_1}\left(\frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right)$$

$$\Delta K_x = 5625\left(\frac{1}{76} + \frac{0{,}4}{8}\right)$$

$$\Delta K_x = 355{,}26$$

③ Calcul de K_y (Tore A)

$$K_y = \frac{R_2 \cdot C}{N_2 \cdot A_2} = \frac{270E3 \cdot 220E\text{-}9}{820 \cdot 90{,}25E\text{-}6} = 0{,}8026$$

d'où $K_y = (0{,}80 \pm 0{,}08)\ \frac{\Omega \cdot F}{tours \cdot mm^2}$

④ Calcul de ΔK_y (Tore A)

$$\Delta K_y = \left|\frac{\partial K_y}{\partial R_2}\right|\Delta R_2 + \left|\frac{\partial K_y}{\partial C}\right|\Delta C + \left|\frac{\partial K_y}{\partial A_2}\right|\Delta A_2$$

$$\Delta K_y = \frac{R_2 C}{N_2 A_2}\left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta A_2}{A_2}\right)$$

$$\Delta K_y = 0{,}8026\left(\frac{13{,}5}{270} + \frac{11}{220} + \frac{0{,}05}{40{,}25}\right)$$

$$\Delta K_y = 0{,}0812$$

* Le même type de calcul s'applique pour le calcul de K_x et de K_y du tore B. Les calculs sont donc laissés à la discrétion du lecteur (NB: Les valeurs des variables pour le tore B sont à p. 40 du manuel)

⑤ Calcul de ΔV_1 (Ex. de calcul)

* Les mesures de V_1 ont été prises à l'oscilloscope. Il s'agit d'une double lecture lorsqu'on prend la mesure. Ainsi:

$$\Delta V_1 = 2x\left(\tfrac{1}{2}x(\text{plus petite division})\right)$$

La plus petite division à l'oscilloscope pour une échelle en x de 2mV est de:

$d = \frac{2}{5} = 0{,}4$ (car 5 petites divisions dans un carreau)

d'où $\Delta V_1 = 2 \cdot \left(\frac{1}{2}(0{,}4)\right) = 0{,}4$ mV

⑥ Calcul de ΔV_c (Ex. de calcul)

* Les mesures de V_c ont été prises à l'oscilloscope. Il s'agit donc d'une double lecture lorsqu'on prend la mesure. Ainsi:

$$\Delta V_c = 2 \cdot \left(\tfrac{1}{2} \cdot (\text{plus petite division})\right)$$

La plus petite division à l'oscilloscope pour une échelle en y de 10mV est de:

$d = \frac{10}{5} = 2$ (car 5 petites divisions dans un carreau)

d'où $\Delta V_c = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (2)\right) = 2$ mV

* Le même type de calcul s'applique pour le tore B

↳ i) Pour une échelle horizontale de 50mV/div, on a $\Delta V_1 = 2\left(\frac{1}{2}\left(\frac{50}{5}\right)\right) = 10$ mV

↳ ii) Pour une échelle verticale de 10mV/div, on a $\Delta V_c = 2\left(\frac{1}{2}\left(\frac{10}{5}\right)\right) = 2$ mV

Exemples de calcul

* Pour les tableaux III.3 A et III.3 B, les valeurs de V_1, ΔV_1 ainsi que V_c, ΔV_c sont les mêmes qu'utilisées et trouvées aux tableaux III.2 A et III.B, mais ne contient cette fois que les 5 points "sommets" selon lesquels on opère en zone linéaire, c-à-d dans lesquels on a la zone de première aimantation.
  ↳ Selon le nuage de points tracé sur Excel, on détermine quels sont ces 5 points (Voir Tableau pour voir nos points choisis)

⑦ Calcul de H (Ex. de calcul) Tore A

$$H = K_x V_1 = 5625 \cdot 11,5\,E{-3} = 64,68$$

d'où $H = (65 \pm 10)$ A/m

⑧ Calcul de ΔH (Tore A, Ex calcul)

$$\Delta H = \left|\frac{\partial H}{\partial K_x}\right| \Delta K_x + \left|\frac{\partial H}{\partial V_1}\right| \Delta V_1$$

$$\Delta H = K_x V_1 \left(\frac{\Delta K_x}{K_x} + \frac{\Delta V_1}{V_1}\right)$$

$$\Delta H = 64,68 \left(\frac{355}{5625} + \frac{1}{11,5}\right)$$

$$\Delta H = 9,70$$

⑨ Calcul de B (Ex. calcul, Tore A)

$$B = K_y \cdot V_c = 0,8026 \cdot 464E{-3} = 0,3724 \text{ T}$$
$$= 372,4 \text{ mT}$$

d'où $B = (372 \pm 70)$ mT

⑩ Calcul de ΔB (Tore A, Ex. calcul)

$$\Delta B = \left|\frac{\partial B}{\partial K_y}\right| \Delta K_y + \left|\frac{\partial B}{\partial V_c}\right| \Delta V_c$$

$$\Delta B = K_y V_c \left(\frac{\Delta K_y}{K_y} + \frac{\Delta V_c}{V_c}\right)$$

$$\Delta B = 0,3724 \left(\frac{0,08026}{0,80} + \frac{40}{464}\right)$$

$$\Delta B = 0,06966 \text{ T} = 69,6 \text{ mT}$$

* Les calculs du tableau III.3 B sont presque identiques à ceux présentés ci-dessus. Ils sont alors laissé à la discrétion du lecteur.

⑪ Calcul de l'échelle

* Pour les tableaux III.4A et III.34B, les échelles sont données par Yves Leblanc :

Tableau III.4 A ⇒
- Échelle horizontale : 10mV/div ⟺ 0,01 V/div
- Échelle verticale : 500mV/div ⟺ 0,5 V/div

Tableau III.4 B ⇒
- Échelle horizontale : 200mV/div ⟺ 0,2 V/div
- Échelle verticale : 50mV/div ⟺ 0,05 V/div

* Attention, pour les densités de flux magnétique (B) incluant B_s et B_r les échelles seront VERTICALES, alors que pour H_c, l'échelle sera horizontale.

(12) Calcul de $V(B_s)$ (Tore A)

- En se basant sur la courbe d'hystéris et sur la gradation proposée par les échelles décrites ci-dessus, on peut en déduire les tensions associées à B_s, B_r, H_s.

Tore A : i) B_s : En faisant la prolongation de la droite reliant le point de saturation, on en déduit que V_{BS} se trouve à 8 petite divisions verticales.

i.e. $\Rightarrow V_{BS} = 8 \cdot (100 mV) = 800 mV = 0{,}8 V$

ii) B_r : B_r se trouve à l'ordonnée à l'origine, c-à-d lorsque H est nul. On en déduit que V_{Br} se trouve à $7\frac{1}{2}$ petites divisions i.e. $\Rightarrow V_{Br} = 7{,}5 \cdot (100 mV) = 750 mV = 0{,}75 V$

iii) H_c : H_c se trouve à l'abscisse pour $B=0$, i.e lorsque B nul. On en déduit que V_{Hc} se trouve à 8 petites divisions i.e. $\Rightarrow V_{Hc} = 8 \cdot (2 mV) = 16 mV = 0{,}016 V$

* Le même principe s'applique pour la courbe d'hystéris fournie pour le tore B. Similairement, on peut alors calculer similairement les données du tableau III.4 B pour le tore B. (laissé à la discrétion du lecteur).

(13) Calcul de $\Delta V(B_s)$ (Tore A)

Similairement au point #(5) et (6), les incertitudes des mesures prises à l'oscilloscope sont dues à la double lecture.

i.e. Ex. calcul. Pour une échelle de 0,5V $\Rightarrow \Delta V = 2\left(\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{0{,}5}{5}\right)\right) = 0{,}1 V$

(14) Résultats (Tore A)

Par ex: pour B_s $\Rightarrow$ $B_s = K_y \cdot V_{Bs} = 0{,}803 \cdot 0{,}8 = 0{,}642 \text{ T}$

$$\Delta B_s = \left|\frac{\partial B}{\partial K}\right| \Delta K + \left|\frac{\partial B}{\partial V}\right| \Delta V = B_s \cdot \left(\frac{\Delta K_y}{K_y} + \frac{\Delta V_{Bs}}{V_{Bs}}\right) = 0{,}642\left(\left(\frac{0{,}08024}{0{,}803}\right) + \left(\frac{0{,}1}{0{,}8}\right)\right)$$

$\Delta B_s = 0{,}144 \text{ T}$

d'où $B_s = (0{,}6 \pm 0{,}1) \text{ T}$

Similairement, on trouve $B_r = K_y \cdot V_r$ et $H_c = K_x \cdot V_c$

* Encore une fois, le même type de calcul est effectué pour le tore B.

(15) Calcul de P (Exemple de calcul Tore A)

* Le calcul de P est basé sur une approximation de l'aire délimitée par la courbe d'hystérésis

⇒ Nous avons approximer l'aire sous les courbes d'hystérésis en essayant de trouver une approximation sous forme rectangulaire couvrant environ la m̂ surface.

Pour le 1er :

On a approximer avec un rectangle 6x2 carreaux

$x = 6$, $y = 2$, Selon l'échelle,

⇒ $x = 0{,}01V$ et $y = 0{,}5V$

d'où
Échelle en x : 0,01V
Échelle en y : 0,5 V

aire d'un 1 carreau ⇒ $A = 0{,}01 \cdot 0{,}5 = 0{,}005\ V^2$

$P = 12 \cdot (A) \cdot K_x \cdot K_y = 271\ W/m^3$

* Le même type de calcul sera effectué pour le tore B

↳ Pour le rectangle utilisé pour approximer l'aire sous courbe d'hystérésis on a pris un rectangle 2x2

(16) Calcul de μ_A

* En traçant le nuage de points sur Excel avec les 5 points choisis, on peut directement utiliser une courbe de tendance linéaire et trouver l'équation mathématique associée à la courbe. $y = \underbrace{m}x + b$

on a directement la pente et celle-ci équivaut à μ_A ou μ_B dépendamment de quel Tore on étudie.

- En théorie, on peut également calculer μ_A soi-même.

$$\mu_A = \frac{B_{max} - B_{min}}{H_{max} - H_{min}} = \frac{(750 - 372) \cdot 1E\text{-}3}{(124 - 65)} = 0{,}006406.$$

* La perméabilité relative se trouve en faisant $\mu_r = \frac{\mu_A}{\mu_0}$

(17) Calcul de $\Delta\mu_B$ (Ex. de calcul)

$$\Delta\mu_B = \frac{B_{min} \Delta B_{min}}{H_{max} - H_{min}} + \frac{B_{max} \Delta B_{max}}{H_{min} - H_{min}} + \frac{(B_{max} - B_{min}) \cdot \Delta H_{min}}{(H_{max} - H_{min})^2} + \frac{(B_{max} - B_{min}) \cdot \Delta H_{min}}{(H_{max} - H_{min})^2}.$$

Pour
$B_{min} = 177{,}9\ mT$ $\quad \Delta B_{min} = 28{,}4\ mT$
$B_{max} = 264{,}3\ mT$ $\quad \Delta B_{max} = 52{,}7\ mT$
$H_{min} = 35{,}1\ A/m$ $\quad \Delta H_{min} = 3{,}7\ A/m$
$H_{max} = 55{,}4\ A/m$ $\quad \Delta H_{max} = 6{,}6\ A/m$

$\Delta\mu_B = 0{,}9383946\ mH/m$.

7. Bibliographie

[1] L. Martinu, D. Simon, J. Cerny. Champs électromagnétiques 4ème édition : Manuel de laboratoire N 6542. Press es Internationales Polytechnique. Montréal. 2012

[2] Données expérimentales du laboratoire 3, Automne 2020. Polytechnique. Montréal. 2020